اتصالات الألياف البصرية

تأليف :

أ. د. محمد عبد الرحمن الحيدر

مكتبة العبيكان

ⓒ مكتبة العبيكان، ١٤١٦هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية

الحيدر، محمد عبد الرحمن

اتصالات الألياف البصرية.

... ص؛ ... سم

ردمك ٣ ـ ١٥٠ ـ ٢٠ ـ ٩٦٠٠

١ ـ اتصالات الألياف البصرية واللاسلكية أ ـ العنوان

ديوي ٥, ٣٨٤ ١٦/٠٧٩٥

ردمك ٣ ـ ١٥٠ ـ ٢٠ ـ ٩٦٠٠ رقم الإيداع: ١٦/٠٧٩٥

الطبعة الأولى

١٤١٦هـ/١٩٩٥م

حقوق الطبع محفوظة

لا يجوز نسخ أو استعمال أي جزء من هذا الكتاب في أي شكل من الأشكال أو بأية وسيلة من الوسائل ـ سواء التصويرية أم الإلكترونية أم الميكانيكية، بما في ذلك النسخ الفوتوغرافية والتسجيل على أشرطة أو سواها وحفظ المعلومات واسترجاعها ـ دون إذن خطي من الناشر.

الناشر

مكتبة العبيكان

الرياض ـ العليا ـ طريق الملك فهد مع تقاطع العروبة

ص. ب ٦٢٨٠٧ الرمز ١١٥٩٥

هاتف ٤٦٥٤٤٢٤ فاكس ٤٦٥٠١٢٩

بسم الله الرحمن الرحيم

المحتويـــات

مقدمة المؤلف

الفصل الأول
مقدمة في الاتصالات

١ - ١ لمحة تاريخية ١
١ - ٢ عناصر أنظمة الاتصالات ٦
١ - ٣ طيف الترددات الكهرومغناطيسية ١١
١ - ٤ قنوات الاتصال ١٨
١-٤-١ الخطوط السلكية ١٩
١-٤-٢ القنوات اللاسلكية ٢٣
١-٤-٣ موجات الراديـــو ٢٤
١ - ٥ الضوضاء ٢٧
١ - ٦ مَعْلمات أنظمة الاتصالات ٣١
١-٦-١ الديسيبل ٣١
١-٦-٢ وحدات مشتقة من الديسيبل ٣٢
١-٦-٣ نسبة الإشارة إلى الضوضاء ورقم الضوضاء ٣٤
١-٦-٤ عرض النطاق ٣٥
١-٦-٥ عرض الخط أو عرض الطيف ٣٧
١-٦-٦ التوهين ٣٩
١-٦-٧ فتحة النفوذ العددية ٣٩
١ - ٧ جداول الثوابت والوحدات ٤٠
١ - ٨ الخلاصة ٤٢
أسئلة ومسائل الفصل الأول ٤٣

الفصل الثاني
أهمية الألياف البصرية ٤٥

٢ - ١ تطور الاتصالات البصرية ٤٥
٢ - ٢ عناصر أنظمة الاتصالات عبر الألياف البصرية ٤٩

٢ - ٣ أنواع الألياف البصرية ٥٩
٢ - ٤ ميزات الألياف البصرية ٦٦
٢ - ٥ إستخدام الألياف البصرية ٧١
٢ - ٦ التوجهات المستقبلية ٧٣
٢ - ٧ الخلاصة ٧٤
أسئلة الفصل الثاني ٧٧

الفصل الثالث

أسس الموجات الضوئية ٧٨

٣ - ١ طبيعة الضوضاء ٧٨
٣-١-١ نظرية الجسيمات الدقيقة ٧٨
٣-١-٢ نظرية الموجات الكهرومغناطيسية ٧٩
٣-١-٣ نظرية الفوتونات ٨٢
٣ - ٢ طيف التردد البصري ٨٣
٣ - ٣ انعكاس الضوء ٨٦
٣ - ٤ انكسار الضوء ٨٨
٣ - ٥ التشتيت ٩٢
٣ - ٦ الانعراج ٩٢
٣ - ٧ فتحة النفوذ العددية ٩٥
٣ - ٨ الاستقطاب ٩٦
٣ - ٩ الخلاصة ٩٨
أسئلة ومسائل الفصل الثالث ٩٩

الفصل الرابع

بنية وخصائص الألياف البصرية ١٠٢

٤ - ١ ليف بمعامل انكسار عتبي (ليف عتبي) ١٠٢
٤ - ٢ ليف بمعامل انكسار متدرج (ليف متدرج) ١٠٥

٤ - ٣ التوهين ١١١
٤-٣-١ بنية الزجاج ١١٢
٤ - ٤ التشتيت ١٢٠
٤-٤-١ التشتيت النمطي أو الضمني ١٢٢
٤-٤-٢ التشتيت الباطني ١٢٧
٤ - ٥ معدل المعلومات ١٣٨
٤ - ٦ الأنماط في الألياف البصرية ١٤٣
٤-٦-١ الأنماط في الألياف العتبية ١٤٦
٤-٦-٢ الأنماط في الألياف المتدرجة ١٤٨
٤ - ٧ الخلاصة ١٥١
أسئلة ومسائل الفصل الرابع ١٥٧

الفصل الخامس
تصنيع الألياف البصرية ١٦٠

٥ - ١ إنتاج التشكيلة الأولية من الزجاج الذائب ١٦٠
٥ - ٢ إنتاج التشكيلة بترسيب بخار الزجاج ١٦٢
٥-٢-١ الترسيب بالتراكم الخارجي ١٦٢
٥-٢-٢ الترسيب بالتراكم المحوري ١٦٤
٥-٢-٣ الترسيب بالتراكم الكيميائي المعدل ١٦٥
٥-٢-٤ الترسيب بالتراكم الكيميائي بالبلازما ١٦٧
٥ - ٣ سحب الليف البصري ١٦٧
٥ - ٤ الخلاصة ١٦٩
أسئلة الفصل الخامس ١٧٠

الفصل السادس
الكابلات البصرية ١٧١

٦ - ١ الطبقة الواقية لليف البصري ١٧٢

٦ - ٢ التغليف ١٧٤
٦-٢-١ الغلاف الواقي لليفة بصرية واحدة ١٧٤
٦-٢-٢ الغلاف الواقي لعدة ألياف ١٧٧
٦-٢-٣ الغلاف الواقي الضيق ١٧٨
٦-٢-٤ الغلاف الواقي المركب ١٧٩
٦-٢-٥ تركيبة الألياف الشريطية ١٨٠
٦ - ٣ عناصر التقوية ١٨١
٦-٣-١ الأسلاك الفولاذية ١٨٢
٦-٣-٢ ألياف القماش ١٨٣
٦-٣-٣ البلاستيك المقوى بالزجاج ١٨٣
٦ - ٤ خواص المواد الأخرى المستخدمة في الكابل البصري ١٨٤
٦-٤-١ تأثير المواد المضافة ١٨٥
٦-٤-٢ الاشتعال ١٨٦
٦-٤-٣ السمية والعدوانية ١٨٦
٦ - ٥ وسائل حماية معينة ١٨٧
٦-٥-١ منع تسرب المياه ١٨٧
٦-٥-٢ الحماية من القوارض ١٨٨
٦-٥-٣ السيطرة على الهيدروجين ١٨٨
٦ - ٦ التأثيرات البيئية ١٨٩
٦-٦-١ درجة الحرارة ١٨٩
٦-٦-٢ الاجهاد الطولي ١٩٠
٦-٦-٣ الضغط ١٩٠
٦ - ٧ أنواع الكابلات البصرية ١٩١
٦-٧-١ كابلات الاستخدام العام ١٩١
٦-٧-٢ الكابلات المغمورة أو البحرية ١٩٢
٦-٧-٣ الكابلات الصناعية ١٩٤
٦-٧-٤ الكابلات الهوائية ١٩٤
٦-٧-٥ الكابلات المدفونة ١٩٥
٦-٧-٦ كابلات الاتصالات البعيدة ١٩٦

٦-٧-٧ كابلات الاتصالات العسكرية ١٩٨
٦-٧-٨ كابلات الاستخدام الخاصة ١٩٩
٦ - ٨ الخلاصة ٢٠١
أسئلة ومسائل الفصل السادس ٢٠٤

الفصل السابع
توصيل عناصر النظام الليفي البصري ٢٠٥

٧ - ١ مبادئ التوصيل ٢٠٥
٧ - ٢ تحضير الليف ٢٢٠
٧ - ٣ الوصلات الدائمة ٢٢٤
٧-٣-١ التوصيل الدائم بالصهر ٢٢٤
٧-٣-٢ التوصيلات الميكانيكية ٢٢٥
٧ - ٤ الموصلات ٢٢٩
٧ - ٥ المقارن ٢٣٦
٧-٥-١ بنية المقرن ٢٤١
٧-٥-٢ اقتران المنبع ٢٤٥
٧ - ٦ الخلاصة ٢٤٨
اسئلة ومسائل الفصل السابع ٢٥٠

الفصل الثامن
المنابع الضوئية ٢٥٣

٨ - ١ خصائص عامة ٢٥٣
٨-١-١ القدرة والكفاءة ٢٥٤
٨-١-٢ كفاءة الاقتران ٢٥٦
٨-١-٣ الطول الموجي وعرض الخط ٢٥٨

٨-١-٤ عرض النطاق وزمن الاستجابة ٢٥٨
٨-١-٥ الاستقرار والاعتمادية ٢٦٠
٨-١-٦ التكلفة ٢٦٠
٨ - ٢ وصلة PN ٢٦١
٨ - ٣ الثنائيات الباعثة للضوء ٢٦٥
٨-٣-١ ثنائي مستوي ٢٦٧
٨-٣-٢ ثنائي القبة ٢٦٨
٨-٣-٣ ثنائي باعث سطحي ٢٦٩
٨-٣-٤ ثنائي باعث حافيّ ٢٧٢
٨ - ٤ خصائص الثنائي الباعث للضوء ٢٧٣
٨ - ٥ ثنائيات الليزر ٢٨٠
٨-٥-١ ثنائي ليزر بوصلة متجانسة ٢٨١
٨-٥-٢ ثنائي ليزر ببنية غير متجانسة ٢٨٥
٨ - ٦ خصائص ثنائيات الليزر ٢٨٧
٨ - ٧ دوائر إلكترونية ٢٩١
٨-٧-١ دوائر تشغيل LED الرقمية ٢٩٤
٨-٧-٢ دوائر تشغيل LED التماثلية ٢٩٧
٨-٧-٣ دوائر تشغيل ثنائيات الليزر ٢٩٨
٨ - ٨ الخلاصة ٣٠١
أسئلة ومسائلة الفصل الثامن ٣٠٤

الفصل التاسع

الكواشف الضوئية ٣٠٦

٩ - ١ خصائص عامة ٣٠٦
٩ - ٢ الكواشف الضوئية ٣١٢
٩-٢-١ ثنائي ضوئي نوع PN ٣١٢
٩-٢-٢ ثنائي ضوئي نوع PIN ٣١٤

٩-٢-٣ ثنائي ضوئي جرفي ٣١٥
٩-٢-٤ الترانزستورات الضوئية ٣١٧
٩ - ٣ دوائر الكشف ٣١٨
٩-٣-١ دوائر PN و PIN ٣١٨
٩-٣-٢ دوائر PIN - FET ٣١٩
٩-٣-٣ دوائر APD ٣٢٣
٩ - ٤ الخلاصة ٣٢٥
أسئلة ومسائل الفصل التاسع ٣٢٨

الفصل العاشر

قياسات الألياف البصرية ٣٣٠

١٠ - ١ قياسات القدرة ٣٣١
١٠-١-١ المنابع والكواشف ٣٣١
١٠-١-٢ توزيع الحقل ٣٣٢
١٠-١-٣ فقد القدرة في الليف البصري ٣٣٤
١٠ - ٢ عرض النطاق ٣٤١
١٠-٢-١ قياس عرض النطاق ٣٤٢
١٠ - ٣ تشتيت اللون ٣٤٥
١٠-٣-١ طرق قياس تشتيت اللون ٣٤٧
١٠ - ٤ طول موجة القطع ٣٤٩
١٠-٤-١ طرق قياس طول موجة القطع ٣٤٩
١٠ - ٥ خواص التوصيل والوصل الدائم ٣٥٢
١٠-٥-١ هندسة الليف ٣٥٢
١٠-٥-٢ فتحة النفوذ العددية ٣٥٤
١٠-٥-٣ قطر الحقل النمطي ٣٥٤
١٠ - ٦ الانعكاس البصري في المجال الزمني ٣٥٦
١٠ - ٧ الخلاصة ٣٥٦

أسئلة الفصل العاشر ٣٥٧
بيان بالهيئات والمواصفات القياسية لنظم الاتصالات الليفية البصرية ٣٥٨

الفصل الحادي عشر

التشكيل وتعدد الإرسال ٣٦٦

١١ - ١ التشكيل ٣٦٦
١١ - ٢ التشكيل التماثلي ٣٦٧
١١-٢-١ تشكيل الاتساع ٣٦٧
١١-٢-٢ تشكيل الشدة المباشر ٣٧٠
١١-٢-٣ تشكيل الشدة بحامل فرعي ٣٧٣
١١-٢-٤ تشكيل الشدة بتشكيل تردد حامل فرعي ٣٧٥
١١ - ٣ تشكيل النبضات ٣٧٧
١١-٣-١ تشكيل اتساع النبضات ٣٧٨
١١-٣-٢ تشكيل الفترة الزمنية للنبضات ٣٨٠
١١-٣-٣ تشكيل مركز النبضات ٣٨٠
١١-٣-٤ تشكيل رمز النبضات ٣٨٣
١١ - ٤ تعدد الإرسال ٣٨٨
١١-٤-١ تعدد الإرسال بتقسيم الزمن ٣٨٨
١١-٤-٢ تعدد الإرسال بتقسيم التردد ٣٩٠
١١-٤-٣ تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي ٣٩٣
١١-٤-٤ تعدد الإرسال بتقسيم التردد البصري ٣٩٤
١١-٤-٥ تعدد الإرسال بتقسيم الزمن البصري ٣٩٦
١١ - ٥ الخلاصة ٣٩٧
أسئلة ومسائل الفصل الحادي عشر ٤٠١

الفصل الثاني عشر

نظم الاتصالات الليفية البصرية ٤٠٥

١٢ - ١ منهجية تصميم نظم الألياف البصرية. ٤٠٥
١٢-١-١ مواصفات عناصر الوصلة الليفية البصرية ٤٠٧
١٢ - ٢ اعتبارات التصميم ٤٠٩
١٢-٢-١ إجراءات التصميم ٤١٠
١٢ - ٣ ميزانية القدرة ٤١٢
١٢ - ٤ ميزانية زمن الصعود أو عرض النطاق ٤١٧
١٢-٤-١ النظم التماثلية ٤١٧
١٢-٤-٢ النظم الرقمية ٤١٩
١٢ - ٥ الخلاصة ٤٢٤
أسئلة ومسائل الفصل الثاني عشر ٤٢٦
المراجع ٤٢٨
معجم المصطلحات العلمية ٤٣٠

مقدمة

شهد العقدان الماضيان تطورات هامة في مجالي الالكترونيات والاتصالات . وقد كان لمجال الاتصالات البصرية نصيب وافر في هذه التطورات ، منذ اكتشاف ألياف بصرية ذات فقد قليل عام ١٩٧٠م . فمنذ ذلك التاريخ حدثت تطورات سريعة ومتلاحقة في مجال الألياف البصرية ، حيث تم إنتاج ألياف ذات خواص جيدة وبفقد قليل ، إضافة إلى تطوير منابع وكواشف ضوئية ومكوّنات مختلفة تكاملت معًا لتقدم شبكات من الألياف البصرية ، وقد أصبحت هذه الشبكات العمود الفقري لأنظمة الاتصالات الحديثة وحلّت محل كثير من الأنظمة التي تستخدم الكابلات المحورية أو الأسلاك الهاتفية . وما كان ذلك ليتم لولا الميزات العديدة التي تمتلكها هذه الأنظمة كسعة النطاق ، وقلة فقد الألياف ، وعدم تأثرها بالتشويش ، ومقاومتها للظروف البيئية . ونظرًا لافتقار المكتبة العربية لكتب تعالج هذه الموضوعات فقد رأيت أنه من الضروري وضع كتاب يعمل على تقديم موضوع الألياف البصرية بصورة مبسطة دون الدخول في التفاصيل الرياضية والنظرية .

يصلح هذا الكتاب كمرجع للعاملين في مجال الاتصالات من إداريين ومهنيين . كما يمكن استخدامه كمدخل أولي لدراسة منهجية في الاتصالات عبر الألياف البصرية . وينقسم الكتاب إلى اثني عشر فصلاً . يقدم الفصل الأول نظرة عامة إلى أنظمة الاتصالات وتطورها ، كما يستعرض عناصر هذه الأنظمة وقنوات الاتصال والعوامل المرتبطة بها . ويُعطي الفصل الثاني شرحًا لعناصر أنظمة الاتصالات عبر الألياف البصرية ، ويستعرض أنواع الألياف البصرية واستخداماتها . أما الفصل الثالث فيقدم مبادىء أساسية حول الموجات الضوئية والبصريات . وتشرح الفصول اللاحقة وهي الرابع والخامس والسادس بنية وخصائص الألياف البصرية وطرق تصنيعها وأنواع الكابلات المصنوعة منها . ويطرح الفصل السابع موضوع توصيلات عناصر أنظمة

الألياف البصرية . ويقدم الفصل الثامن خصائص ومواصفات المنابع الضوئية ويُعطي الفصل التاسع خصائص ومواصفات الكواشف الضوئية . أما الفصل العاشر فيتحدث عن طرق قياس معلمات الأليات البصرية . ويتحدث الفصل الحادي عشر عن طرق التشكيل وتعدد الإرسال المستخدمة في أنظمة اتصالات الألياف البصرية . ثم يُقدِّم الفصل الثاني عشر اتصالات الألياف البصرية بشكل متكامل ويشمل ذلك شرحًا لمواصفاتها ومنهجية تصميمها . ويُعطي الكتاب أخيرًا قائمة بالمراجع والمصطلحات التي استخدمت باللغتين العربية والإنجليزية . وتجدر الإشارة إلى أن التعامل مع ترجمة المصطلحات إلى اللغة العربية قد تم بمنهجية ذات مرحلتين . في المرحلة الأولى تمت الترجمة باستخدام معجم مصطلحات الاتصالات المعتمد من قبل الاتحادين الدولي والعربي للاتصالات ، ومن قبل وزارة البرق والبريد والهاتف السعودية . لكن هذا المعجم لم يتضمن كافة المصطلحات المستخدمة في هذا الكتاب ، لذا جاءت المرحلة الثانية مرحلة اجتهاد في اختيار مفردات عربية مناسبة للمصطلحات غير الواردة في المعجم . وآمل أن يكون هذا الاختيار موفقًا بما يساهم في توسيع هذا المعجم في المستقبل .

إن هذا الكتاب ليس إلاّ محاولة لطرح موضوع علمي من أكثر الموضوعات سرعة في التغير والتجدد في الوقت الحاضر ، وجعل هذا الطرح مبسطًا يستفيد منه قطاع كبير من المهتمين ، وتقديمه باللغة العربية إيمانًا بأن اللغة الأم هي خير لغة لنقل التقنية إلى عقول أبناء الأمة . وقد وضعت كل ما توفر لديَّ من إمكانات لجعلها محاولة ناجحة . لكن الرأي في النهاية ملك للقارئ الكريم . وإني في هذا المجال أرحب بكل نقد يمكن أن يؤدي إلى تطوير الكتاب في الطبعات التالية شكلاً ومضمونًا . وسيكون لي ، إن شاء الله ، في تلك الطبعات محاولة أخرى تشمل حصر المستجدات وتحديث المعلومات بما يتناسب مع مايقدمه الإبداع العلمي والتقني المستمر في هذا المجال الحيوي .

وفي الختام يسرني أن أتوجه بالشكر والتقدير إلى كل من ساهم في إخراج هذا العمل . وأخص بالذكر الدكتور عبدالرحمن محمد العمود ، مدير مركز البحوث في كلية الهندسة ، جامعة الملك سعود ، الذي اهتم بدعم العمل ومتابعته ، وكذلك الأخوة الأفاضل الذين ساهموا في طباعة الكتاب ، وإعداد رسومه وإخراجه بشكله النهائي .

وفقنا الله لما يحبه ويرضاه

د. محمد عبدالرحمن الحيدر
أستاذ بقسم الهندسة الكهربائية
كلية الهندسة - جامعة الملك سعود

الرياض - المملكة العربية السعودية
١٤١٦هـ - ١٩٩٥م

الفصل الأول

مقدمة في الاتصالات

الفصل الأول

مقدمة في الاتصالات

Introduction to Communications

يقدم هذا الفصل نظرة عامة إلى هندسة الاتصالات تبدأ بلمحة تاريخية تتضمن استعراضاً لتطور الاتصالات الكهربائية منذ أن وضع أوم Ohm قانونه الشهير وحتى الآن. يلي ذلك استعراض لعناصر أنظمة الاتصالات في الإرسال والاستقبال ثم دراسة لطيف الترددات الكهرومغناطيسية وتقسيماتها المختلفة ، بعد ذلك نتطرق إلى قنوات الاتصال السلكية واللاسلكية ، وحيث أن نظم الاتصالات لاتخلو من الضوضاء الداخلية والخارجية فقد خصص بند لذلك ، وينتهي الفصل بشرح لبعض المفردات اللازمة لفهم أنظمة الاتصالات وجدولة الثوابت والوحدات المستخدمة في الكتاب .

١-١ لمحة تاريخية Historical Review

منذ فجر التاريخ والإتصالات تشكل جزءً من حياة الإنسان اليومية ، فعندما يتحدث كل منا إلى الآخر فإن المتحدث هو المرسل والمستمع هو المستقبل والمسافة بينهما هي قناة الإتصال ، فلو ابتعدنا عن بعضنا فقد لايسمع أي منا الآخر فنضطر في هذه الحالة إلى استخدام الإشارة إذا كان نظر المستقبل موجهاً إلى المرسل. وحتى في هذه الحالة هناك مسافة معينة للإتصال عندها نضطر إلى البحث عن وسائل أخرى ،منها مثلاً أن نكلف أحد الأشخاص بنقل رسالة إلى شخص آخر . وهذه الطريقة لها محاذيرها إذ قد لايستطيع هذا الشخص تذكر المعلومات المراد نقلها ،كما أن المسافة والسرعة محدودتان. يتضح من هذا المثال أن هناك ثلاثة عناصر تحدد مواصفات نظام الإتصال، وهي كمية المعلومات المنقولة ، وسرعة نقل المعلومات، ومسافة نقلها.

وقد تطور الأمر بعد اكتشاف الكتابة والقراءة. فقد باتت المعلومات تكتب وترسل باليد ، لكن حامل المعلومات لايستطيع أن يسرع بها كما أن المسافة التي

يستطيع أن يقطعها قد قلت بسبب مايحمله من رسائل ثم استخدمت الحيوانات لنقل هذه الرسائل ، وقد يستغرق تبادل الرسائل أياماً وأشهر طويلة. وقد استطاع الإنسان في بحثه عن وسائل تمكنه من زيادة سرعة مراسلاته أن يكتشف مزايا الحمام الزاجل إذ تستطيع الحمامة الطيران لمدة تصل إلى سبع عشرة ساعة دون توقف وبسرعة تصل إلى ستين كيلومتراً في الساعة. وقد كان هذا الطائر ولفترة طويلة هو المرسال السريع ، غير أن مايستطيع حمله من معلومات كان محدوداً .

في القرن الثامن عشر ميلادي بدأ نظام الإتصالات المعروف « بالسيمافور» ينتشر في بقاع كثيرة من العالم كوسيلة من وسائل الإتصال السريع .ويعتمد هذا النظام على تمثيل الكلمات بإشارات حركة أعلام أو إشارات ضوئية ، وقد كان إستخدامه في البداية مقصوراً على تبادل الإتصالات بين السفن عند تقاربها إلى مدى الرؤية أو بين الموانيء والسفن خصوصاً أثناء الليل للمساعدة في توجيه حركتها. ثم امتد إستخدامه ليشمل إقامة محطات سيمافور بين المدن وكانت هذه المحطات عبارة عن أبراج عالية لاتتجاوز المسافة بين محطتين متجاورتين الثلاثة كيلو مترات. وكانت كل محطة تقوم بملاحظة الإشارات القادمة من محطة مرسلة تسبقها لتقوم بعد ذلك بنقلها كما جاءت إلى محطة أخرى تليها ولتصل الإشارات المعبرة عن الكلمات المرسلة بعد عدة إجراءات من هذا النوع إلى المحطة الواقعة في المدينة المقصودة وكان نقل رسالة صغيرة بهذه الطريقة بين مدينتين لايتجاوز البعد بينهما مائة كيلومتر يستغرق عدة دقائق وبالرغم من فائدة هذه الأنظمة إلا أنها باهظة التكاليف وتعتمد على الطقس .

ثم جاء استغلال ظواهر الكهرباء والمغناطيسية لنقل المعلومات والرسائل بين بقاع الأرض بسرعة وفاعلية وهكذا بدأت الإتصالات عصراً جديداً شهدت خلاله تطورات هائلة غيرت وجه العالم الذي عرفته الأجيال التي عاشت قبل هذا العصر. ولإلقاء الضوء على هذه التطورات يبين الجدول (١-١) متابعة زمنية لهذا التطور.

الجدول (١-١) التطور التاريخي للإتصالات

التاريخ	الحـــــدث
١٨٢٦	أوم Ohm يضع قانونه الشهير في الكهرباء
١٨٣٠-١٨٤٠	فاراداي Faraday وآخرون يكتشفون وجود علاقة بين المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية.
١٨٣٤	ظهور التلغراف telegraph على يدي غاوس Gauss وويبر Weber
١٨٣٧	تنفيذ أول نظام تلغرافي في بريطانيا على يدي كل من كوك Cooke وويتستون Wheatstone.
١٨٤٤	تنفيذ أول نظام تلغرافي في أمريكا على يدي مورس Morse صاحب الرموز التلغرافية الشهيرة.
١٨٦٤	نشر ماكسويلMaxwellنظريته حول إنتشارالموجات الكهرومغناطيسية
١٨٦٦	تنفيذ أول نظام تلغرافي عبر الأطلسي.
١٨٧٦	ظهور الهاتف telephone على يدي ألكسندر جراهام بيل Bell.
١٨٨٧	هرتز Hertz يثبت نظرية ماكسويل Maxwell في انتشار الموجات الكهرومغناطيسية.
١٨٩٤	لودج Lodge ينفذ أول إرسال لاسلكي wireless للموجات لمسافة تقدر بحوالي ١٥٠ متراً.
١٨٩٧	ماركوني Marconi يقدم أول نظام تلغرافي يعمل لاسلكياً.
١٨٩٨	ماركوني Marconi ينفذ إرسالاً لاسلكياً لمسافة ٩٦ كيلومتراً.
١٩٠١	ماركوني Marconi ينفذ إرسالا لاسلكياً عبر الأطلسي.
١٩٠٤	فلمنج Fleming يبتكر الصمام الإلكتروني الثنائي diode.
١٩٠٦	لي دي فورست Lee De Forest يبتكر الصمام الإلكتروني الثلاثي triode.

١٩١٨	آرمسترونج Armstrong يبتكر طريقة الاستقبال اللاسلكي بواسطة المزج المتقدم superheterodyne .
١٩٢٠	كارسون Carson يطبق مبدأ العينات sampling في الإتصالات.
١٩٢٠	إنشاء أول محطة إذاعية radio station في مدينة بتسبرج Pittsburgh الأمريكية .
١٩٢٦	تنفيذ أول مكالمة هاتفية تجريبية بين أوروبا وأمريكا عبر الأطلسي.
١٩٢٩	فلاديميرزوركن Zworykin يقدم أول نظام تلفزيوني television تجريبي.
١٩٣٣	آرمسترونج Armstrong يبتكر تشكيل التردد frequency modulation
١٩٣٧	ريفز Reeves يبتكر تشكيل رمز النبضات pulse-code modulation
١٩٣٨	بداية الإرسال التلفزيوني.
١٩٣٩-١٩٤٥	شهدت فترة الحرب العالمية الثانية ظهور أنظمة الرادار radar ، وأنظمة الموجات الصغرية microwave . كما شهدت أيضاً تطبيق الأساليب الإحصائية statistical methods في استخلاص الموجات signal extraction
١٩٤٨	ظهور الترانزستور transistor
١٩٤٨	شانون Shannon ينشر بحثه حول النظرية الرياضية للإتصالات mathematical theory of communications
١٩٥٠	تطبيق مبدأ تجميع تقسيم الزمن time-division multiplexing في أنظمة الهاتف.
١٩٥٠	البدء في بناء محطات أنظمة الإتصالات بواسطة الموجات الصغرية microwave على نطاق عملي واسع .
١٩٥٣	بناء أول كابل cable بحري للإتصالات الهاتفية بين أوروبا وأمريكا.

١٩٦٠	عبر المحيط الأطلسي . بداية سواتل الاتصالات communication satellites : في هذا العام أرسل ساتلان إلى الفضاء :أيكوECHO، وكورير COURIER.
١٩٦٠	ميمان Maiman يكتشف الليزر LASER ، وهذا الإسم اختصار لجملة "تضخيم الضوء بالانبعاث المثار للإشعـــاع : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
١٩٦٢	أول استخدام فعلي لسواتل الاتصالات في مجال الهاتف، والتلفزيون ، والمعطيات data كان بواسطة الساتل تليستار Telstar.
١٩٦٩	أول إرسال صوت وصورة من الساتل.
١٩٧٠-١٩٦٠	- بناء أنظمة هاتفية عملية على أساس تشكيل رمز النبضات PCM.
	- استخدام الليزر تجريبياً.
	- ظهور الدوائر الإلكترونية المتكاملة.
	- ظهور التلفزيون الملون.
	- تعزيز بحوث معالجة الموجات الرقمية.
١٩٨٠-١٩٧٠	- تعزيز إستخدام السواتل في الاتصالات.
	- ظهور الدوائر المتكاملة ذات المجال المتسع VLSI.
	- ظهور شبكات الحاسوب computer networks
	- استخدام الحاسوب computer على نطاق واسع في أنظمة الاتصالات.
١٩٨٧-١٩٨٠	- ظهور شبكات الحاسوب المحلية local area computer networks
	- تعزيز الإتصالات في النطاق المتسع wideband communication
	- استخدام الألياف البصرية optical fiber
	- إطلاق ثلاثة سواتل عربية للإتصالات Arabsat.

١٩٨٨ وما بعد	- تعزيز أساليب الإتصالات الرقمية. - توسيع استخدام أنظمة إتصالات الوحدات المتحركة. - سواتل البث المباشر. - توسيع استخدام شبكات الحاسوب خصوصاً مع وجود بنوك المعلومات فيها: viewdata - ربط كافة أنواع أنظمة الإتصالات ضمن شبكة واحدة. - تطورات أخرى .

١ - ٢ عناصر انظمة الإتصالات Elements of Communication Systems

يبين الشكل (١-١) الهيكل العام لأي نظام إتصالات ، ويتكون هذا الهيكل من العناصر الأساسية التالية :

أ - مصدر المعلومات المطلوب إرسالها information source.

ب - محول طاقة للمدخل input transducer حيث يجري تطبيق المعلومات المطلوب إرسالها، وتحويلها إلى موجة كهربائية.

جـ - جهاز إرسال أو مرسل transmitter ومهمته إستخدام الأساليب المناسبة لإرسال المعلومات بشكلها الكهربائي عبر قناة الإتصال.

د - قناة إتصال communication channel .

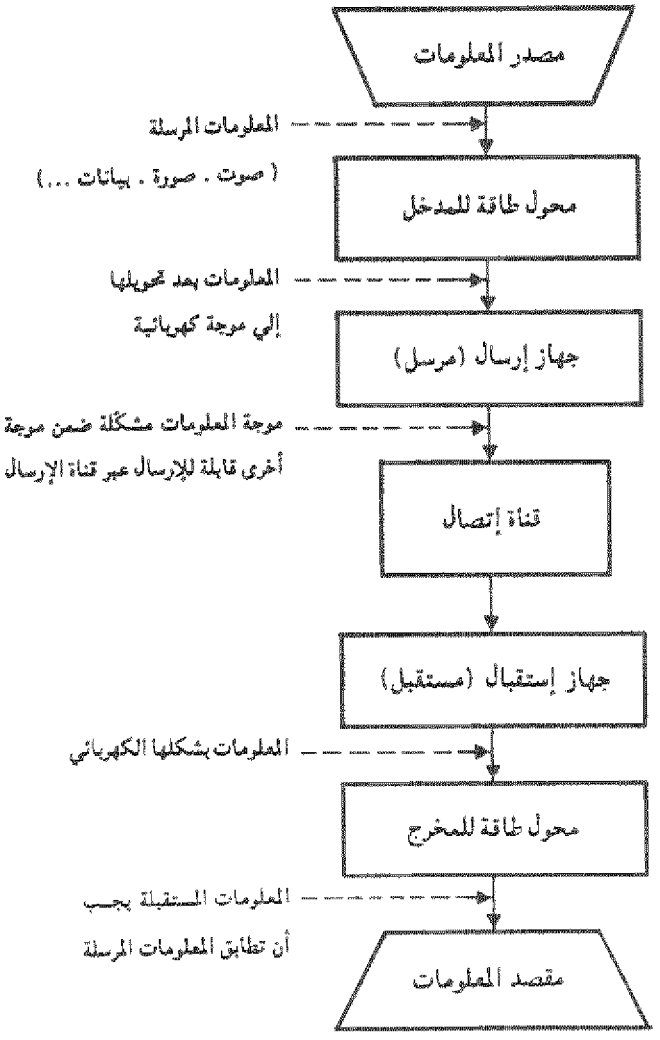
هـ - محول طاقة للمخرج output transducer ويعمل على إعادة المعلومات إلى شكلها الأصلي.

و - مقصد المعلومات information destination وهو الهدف الذي تم من أجله إرسال المعلومات .

تنقسم المعلومات التي يُطلب إرسالها عادة إلى نوعين رئيسيين هما : معلومات تماثلية analog information ، ومعلومات رقمية digital informantion . ويمكن التعبير عن المعلومات التماثلية على أنها متغيرات تتغير قيمتها بشكل مستمر continuous مع تغير الزمن مثل : أصوات الناس، والموسيقى ، والمشاهد المرئية ، ودرجة الحرارة ، والضغط ، وغير ذلك من المتغيرات . أما المعلومات الرقمية فهي ، بالمقارنة مع المعلومات التماثلية ، متغيرات ذات قيم منفصلة تتغير بشكل متقطع discrete مع تغير الزمن مثل: البيانات المكتوبة ، والأرقام ، والثقوب على البطاقات المستخدمة في الحاسوب ، وغيرها.

وعندما يقدم مصدر ما للمعلومات ، معلومات يطلب إرسالها ، فسواء كانت هذه المعلومات تماثلية أو رقمية ، لابد من إجراء تحويل لها في الشكل مع الاحتفاظ بالمضمون ، بحيث يكون الشكل الجديد مناسباً لنظام الإتصالات المستخدم. والشكل المناسب للمعلومات في أنظمة الإتصالات الكهربائية هو بالطبع الشكل الكهربائي. أي يجب تحويل المعلومات المطلوب إرسالها إلى موجات كهربائية تستطيع المرور عبر أجهزة الإتصالات الكهربائية . ويتم ذلك عادة بواسطة محول طاقة المدخل. وفي حالة إرسال الأصوات speech يكون محول الطاقة هذا عبارة عن ميكرفون microphone، حيث يمكن لمثل هذا الجهاز أن يكون أحد عناصر دائرة كهربائية ، مقاومة مثلاً ، تتغير قيمتها بتغير إهتزازات الصوت المطبقة عليها، وبالتالي تعمل على تغيير التيار الكهربائي المار في الدائرة تبعاً لهذه الإهتزازات ، وتتشكل بذلك موجة كهربائية تحمل ذات المعلومات التي تحملها الإهتزازات الصوتية ، وتدعى هذه الموجة بالموجة الكهربائية للمعلومات أو إشارة المعلومات information signal .

بعد الحصول على موجة كهربائية تمثل المعلومات المطلوب إرسالها، يمكن تمرير هذه الموجة مباشرة إلى قناة الإتصال عندما تكون مسافة الإتصال محدودة بنطاق محلي local . ولكن من أجل مسافات إتصال كبيرة فإنه يجب تزويد موجة المعلومات بما يلزم من أجل رحلتها عبر هذه المسافات ، وتلك هي مهمة جهاز الإرسال. والعملية الأساسية



الشكل (١- ١) العناصر الأساسية لنظام إتصالات

التي يقوم بها هذا الجهاز عادة هي التشكيل modulation ، وتتلخص هذه العملية في القيام بتحميل موجة المعلومات على موجة أخرى تدعى بالموجة الحاملة carrier ، واستخراج موجة تتضمن المعلومات ، قابلة للإرسال عبر المسافات تدعى عادة بالموجة المشكلة modulated أو موجة التشكيل . وبالإضافة إلى عملية التشكيل هذه يقوم جهاز الإرسال بعمليات أخرى تشمل : تضخيم الموجات amplification ، وترشيح أو تصفية الترددات filtering ، ووضع موجة التشكيل على قناة الإرسال باستخدام الهوائي antenna أو أي أجهزة مناسبة أخرى تبعاً لنوع القناة المستخدمة .

هناك نوعان أساسيان من قنوات الإتصال . يستخدم أحدهما الخلاء كقناة لإرسال الموجات كما هو الحال في الأنظمة الإذاعية radio،أما النوع الآخر فيستخدم الأسلاك لهذه الغاية كما هو الحال في معظم أنظمة الهاتف المحلية local telephone . وهناك أمثلة كثيرة لأنظمة الإتصال عبر الخلاء منها مايمتد عبر الفضاء إلى السواتل satellites ذهاباً وعودة . وبالإضافة إلى ذلك هناك أيضاً أمثلة أخرى كثيرة لأنظمة الإتصال عبر الأسلاك منها مايمتد عبر مسافات طويلة براً وبحراً ، مثل الكابلات cables التي تمتد تحت البحار أو بين القارات. ولاتقتصر أنظمة الإتصالات في الوقت الحاضر على استخدام الأسلاك المعدنية في الكابلات، بل هناك أنظمة حديثة تستخدم كابلات من الألياف البصرية optical fibers موضوع هذا الكتاب وستحدث في بند خاص من هذا الفصل عن أنواع قنوات الاتصالات السلكية واللاسلكية .

وتشترك قنوات الإتصال أياً كان نوعها في مشكلة أساسية هي تداعي degradation مستوى الموجة المرسلة بين المرسل والمستقبل. وعلى الرغم من أن مثل هذا التداعي قد يحدث في مختلف عناصر أنظمة الإتصالات ، إلا أن القدر الأكبر منه هو من نصيب قناة الإتصال خصوصاً مع تباعد المسافات. وهناك أسباب متعددة لتداعي الموجة المرسلة عبر قناة الإتصال مثل الضوضاء noise وتأثير موجات أخرى على الموجة المرسلة أو مايعرف بالتداخل interference ، وكذلك خمود fading قوة الموجة

المرسلة ، وغير ذلك من التأثيرات غير المرغوبة . وسوف نتحدث في بند خاص من هذا الفصل حول مثل هذه التأثيرات ليس في قناة الإتصال فقط ، بل في عناصر أنظمة الإتصالات الأخرى أيضاً .

تصل الموجة المرسلة إلى المستقبل عبر قناة الإتصال، ومهمة هذا الجهاز كما عبرنا سابقاً هي تلقي هذه الموجة ، وهي موجة التشكيل المكونة من موجة حاملة تحمل موجة المعلومات ، واستخراج موجة المعلومات منها تمهيداً لتطبيقها على محول طاقة المخرج الذي يعمل على إعادة المعلومات إلى شكلها الأولي الذي كانت عليه قبل دخولها عبر مراحل الإتصال المختلفة. وعلى ذلك فإن العملية الأساسية لجهاز الإستقبال أو المستقبل هي إزالة التشكيل demodulation والتخلي عن الموجة الحاملة التي تكون قد أدت الغاية التي استخدمت من أجلها. وتسمى عملية إزالة التشكيل أيضاً بعملية الكشف detection ، أي الكشف عن موجة المعلومات المطلوبة. وبالإضافة إلى عملية إزالة التشكيل هذه يقوم المستقبل بعمليات أخرى مثل الترشيح وتصفية الترددات ، والتضخيم ، وغير ذلك .

وفي مرحلة محول طاقة المخرج التي تلي المستقبل يجري تحويل الموجة الكهربائية للمعلومات التي تطبق عند مدخل هذه المرحلة إلى الشكل الأصلي للمعلومات نفسها. فإذا كان هذا الشكل صوتاً ، فإنه يمكن إستخراج هذا الصوت من الموجة الكهربائية التي تعبر عنه بواسطة المجهار loudspeaker وقد يحتوي هذا المجهار على ملف كهربائي وصفائح معدنية ، فعند تمرير تيار موجة المعلومات عبر الملف فإن الأثر المغناطيسي للتيار يتغير مع تغير هذا التيار، ويؤدي هذا إلى تغير جذب الصفائح المعدنية التي تعطي بذلك الصوت المطلوب. وهناك بالطبع لكل نوع من المعلومات المرسلة محول طاقة مناسب يقدم لمقصد المعلومات ذات المعلومات التي كان مصدر المعلومات قد أصدرها .

١ - ٣ طيف الترددات الكهرومغناطيسية Electromagnetic Spectrum

تنقسم ترددات الموجات الكهرمغناطيسية التي يجري إرسالها في أنظمة الإتصالات المعتادة إلى ثمانية نطاقات رئيسية. وتتمتع كل من هذه النطاقات بمواصفات إرسال خاصة تجعلها مناسبة لعدد من التطبيقات. ويبين الجدول (١-٢) هذه النطاقات الثمانية إلى جانب أطوال موجاتها، وقد جرى استخلاص أطوال الموجات هذه اعتماداً على المبدأ التالي :

المسافة = السرعة × الزمن ..... (1.1)

فإذا كانت المسافة هي طول موجة واحد λ، فإن الزمن يكون الفترة الزمنية للموجة أو دور الموجة period ، ويرمز له بالرمز T . وإذا اعتبرنا أن سرعة إنتشار الموجات الكهرومغناطيسية هي سرعة الضوء [300 000 km/sec] ، فإنه يمكن اعتماداً على المبدأ السابق استنتاج أن :

$$\lambda = 3 \times 10^8 \, T \ [\ meter\ ] \quad ..... \ (1.2)$$

حيث يقدر طول الموجة بالمتر ودورها بالثانية . وبما أن العلاقة بين الدور والتردد frequency ويرمز له بالرمز f هي :

$$f = (1/T)$$

لذا تصبح العلاقة التي يمكن بواسطتها حساب طول الموجة بدلالة التردد على النحو التالي :

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{f} \ [\ meter\ ] \quad ..... \ (1.3)$$

الجدول (١-٢) النطاقات الرئيسية في طيف الترددات الكهرومغناطيسية

المجـــــال	الترددات	أطوال الموجات
نطاق الموجات الطويلة جداً Very Low Frequency [VLF]	3kHz-30 kHz	100km - 10km
نطاق الموجات الكيلومترية Low Frequency (LF)	30 kHz -300kHz	10km - 1 km
نطاق الموجات الهكتومترية Medium Frequency [MF]	300 KHz -3 MHz	1000 m - 100m
نطاق الموجات الديكامترية. High Frequency [HF]	3 MHz - 30 MHz	100 m - 10 m
نطاق الموجات المترية Very High Frequency [VHF]	30 MHz-300MHz	10 m - 1 m
نطاق الموجات الديسمترية Ultra - High Frequency [UHF]	300 MHz -3 GHz	100 cm - 10 cm
نطاق الموجات السنتيمترية Super High Frequency [SHF]	3 GHz - 30 GHz	10 cm - 1 cm
نطاق الموجات المليمترية . Extremely High Frequency [EHF]	30 GHz-300 GHz	1 cm - 1 mm

وتقدر الترددات عادة بعدد الإهتزازات في الثانية الواحدة . وتعرف وحدة ذلك، أي الإهتزازة الواحدة في الثانية ، بالهرتز Hertz ، ويرمز لها بالرمز Hz . وفي الجدول (١-٢) جرى استخدام مضاعفات الهرتز وهي :

كيلو هرتز = $kHz\ (kilohertz) = 10^3\ Hz$

ميجا هرتز = $MHz\ (megahertz) = 10^6\ Hz$

جيجا هرتز = $GHz\ (gigahertz) = 10^9\ Hz$

أما أطوال النطاقات فتقدر بوحدات المسافة مثل المتر meter ، ويرمز لهذه الوحدة بالرمز m. وفي الجدول (١-٢) جرى إستخدام مضاعفات وأجزاء المتر وهي :

كيلومتر = km (kilometer) = 1000m

سنتمتر = cm (centimeter) = (1/100)m

ملليمتر = mm (millimeter) = (1/1000) m = 1/10) cm

والآن وبعد أن عرفنا النطاقات الرئيسية لطيف الترددات المغناطيسية نلقي الضوء فيما يلي على بعض الإستخدامات الهامة ضمن كل من هذه النطاقات :

أ - نطاق الموجات الطويلة [VLF] ،نطاق الموجات الكيلومترية [LF] ، ويستخدمان أساساً في الملاحة navigation.

ب - نطاق الموجات الهكتومترية [MF] ،ويطلق عليه أيضاً نطاق الموجات المتوسطة: [medium wave: MW] ، ويستخدم غالباً في الإرسال الإذاعي المعتاد.

جـ - نطاق الموجات الديكامترية [HF] ، ويستخدم في بعض أنظمة الهاتف ، والإتصالات بين الطائرات والسفن وغير ذلك.

د - نطاق الموجات المترية [VHF] ، ويستخدم في بعض أنظمة التلفزيون والإرسال الإذاعي ، وأنظمة التحكم بالحركة الجوية ، وأنظمة إتصالات الشرطة، وغيرها.

هـ - نطاق الموجات الديسمترية (UHF) ،ويستخدم أيضاً في بعض أنظمة التلفزيون، وعدد من أنظمة الرادار ، والسواتل.

و - نطاق الموجات السنتيمترية [SHF] ، ويستخدم في عدد من أنظمة الرادار المختلفة،وفي الوصلات الصغرية microwave links، وعدد من أنظمة إتصالات الوحدات المتحركة mobile communication system.

ز - نطاق الموجات المليمترية [EHF] ، ويستخدم في بعض أنظمة القطارات railroad services ، وبعض أنظمة الرادار ، كما يستخدم أيضاً في إجراء

الإختبارات.

ونظراً لإتساع نطاقات الترددات العليا ، وإمكاناتها في استيعاب العديد من التطبيقات ، فقد جرى تقسيم هذه النطاقات إلى عدد من الأقسام لكل منها نطاق محدد من الترددات frequency band . ووضع لكل نطاق إسم أو رمز محدد ، ويبين الجدول (١-٣) هذه التقسيمات ، والإسم أو الرمز الذي كان متداولاً في الماضي لكل نطاق فيها ، بالإضافة إلى الأسماء أو الرموز المتداولة حالياً .

يلاحظ من الجدول (١-٣) أن ترددات النطاقات المذكورة تضم جزءاً من نطاق الموجات الديسمترية UHF ، ونطاق الموجات السنتيمترية SHF ، بالإضافة إلى جزء من نطاق الموجات المليمترية EHF ويدعى مجموع هذه النطاقات جميعاً بنطاق الموجات الصغرية microwaves .

وبالإضافة إلى ماسبق من نطاقات الترددات ، هناك نطاق ترددات معروف يقل في معظم تردداته عن نطاق الموجات الطويلة جداً VLF ، وهناك نطاقات أخرى تتفوق في تردداتها على نطاق الموجات المليمترية EHF. أمانطاق الذي تقل تردداته عن نطاق الموجات الطويلة جداًفيعرف بنطاق الموجات الصوتيةVF voice frequency، وتقع تردداته مابين التردد 300Hz والتردد 3.4kHz . وتتراوح الترددات المنخفضة للغاية Extra Low Frequency ELF مابين 30Hz و 300Hz .

الجدول (١-٣) نطاقات ترددات الموجات الصغرية ورموزها

المجـــــال	الرمز السابق	الرمز الحالي
500 MHz - 1 GHz	VHF	C
1 GHz - 2 GHz	L	D
2 GHz - 3GHz	S	E
3 GHz - 4GHz	S	F
4 GHz - 6GHz	C	G
6 GHz - 8 GHz	C	H
8 GHz - 10 GHz	X	I
10 GHz -12.4 GHz	X	J
12.4 GHz-18GHz	Ku	J
18 GHz - 20 GHz	k	J
20 GHz - 26.5 GHz	k	k
26.5 GHz- 40GHz	ka	k

ولا تستخدم موجات مثل هذه الترددات عادة كموجات كهرومغناطيسية يجري إرسالها من قبل أنظمة الإتصالات ، بل يجري إرسال الأصوات التي تقع ضمن هذا المجال من الترددات محمّلة على موجات أخرى تتفوق في ترددها على الترددات الصوتية كما سنرى في دراسة موضوعات التشكيل modulation. وعلى الرغم من أن ترددات الأصوات التي يمكن للأذن البشرية أن تسمعها تفوق الحد الأعلى في نطاق الترددات الصوتية المذكور، وربما تصل إلى 15kHz ، إلا أنه اكتُشِفَ أن نطاق الترددات الصوتية المختار ، يحمل الخواص الأساسية للأصوات ، لذا فإن اعتماده في الإتصالات يحقق غاية الإتصال المنشودة من جهة ، ويوفر في مجال الترددات الصوتية المطلوب إرسالها من جهة ثانية .

أما الموجات التي تفوق في ترددها نطاق الموجات المليمترية EHF فتنقسم إلى عدة أقسام نوردها باختصار فيما يلي :

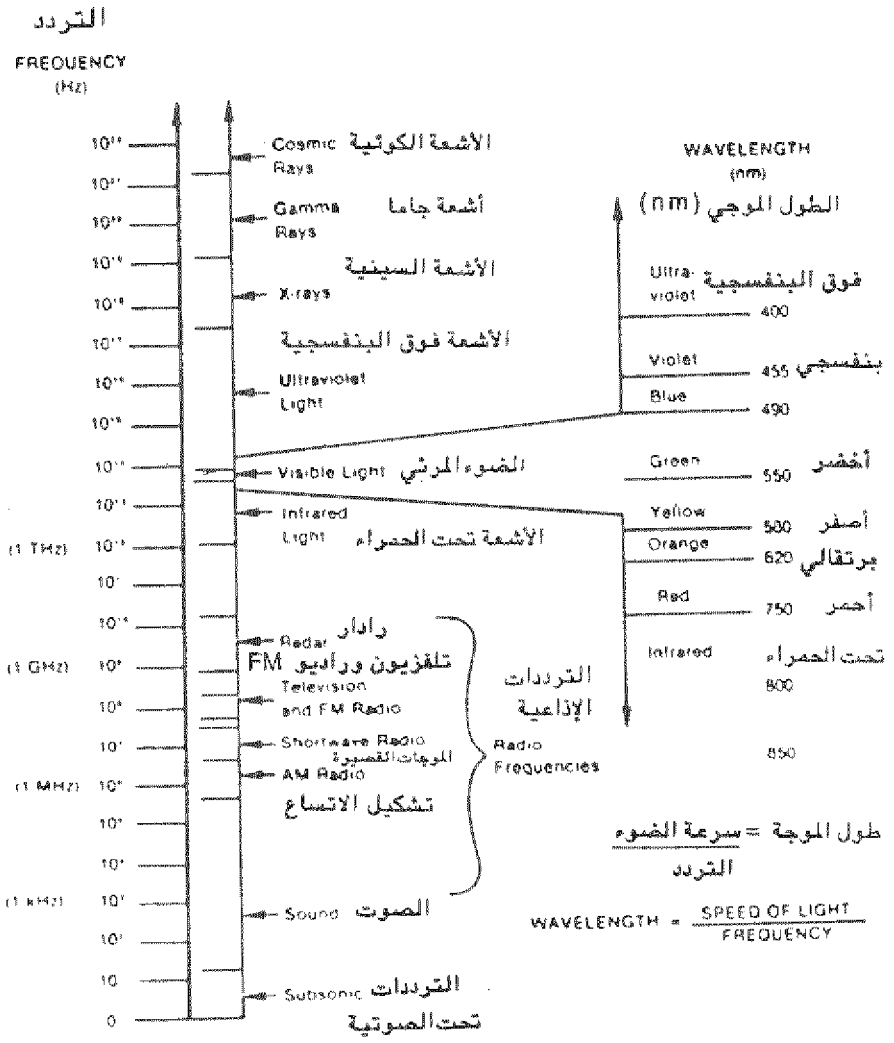
أ - نطاق الترددات البصرية ، ويبدأ هذا النطاق عند حوالي 10^{12} Hz ويمتد حتى يتجاوز 10^{16}Hz ، وينقسم إلى ثلاثة مجالات هي : الأشعة تحت الحمراء infrared ، والضوء المرئي visible ،والأشعة فوق البنفسجية ultraviolet .

ب - نطاق ترددات الأشعة السينية x-rays ، ويقع ضمن نطاق يتوسطه على وجه التقريب التردد 10^{18}Hz .

جـ - نطاق ترددات أشعة جاما gamma - rays ، ويفوق نطاق ترددات الأشعة السينية ويتداخل معه ، ويقع ضمن نطاق ترددات يتوسطه التردد 10^{20}Hz على وجه التقريب .

د - نطاق ترددات فوتونات الأشعة الكونية cosmic ray photons ويتجاوز هذا النطاق نطاق أشعة جاما ويصل إلى أكثر من التردد 10^{32}Hz .

وتجدر الإشارة أخيراً إلى أن ترددات الإتصالات عبر الألياف البصرية ، وترددات الليزر Laser تقع ضمن مجال الترددات البصرية. ولعله من المناسب هنا أن نذكر القارىء الكريم أن الضوء المرئي يشكل جزءاً محدوداً من مجال الترددات البصرية ويقع هذا الجزء بين بداية الضوء الأحمر حيث يبلغ التردد 4.285×10^{14}Hz ، وحتى نهاية الضوء البنفسجي حيث يبلغ التردد 7.5×10^{14}Hz . ونرى في الشكل (١-٢) طيف الترددات الكهرومغناطيسية وموقع الترددات البصرية.



الشكل (١-٢) طيف الترددات الكهرومغناطيسية وموقع الترددات البصرية

١ - ٤ قنوات الإتصال Communication Channels

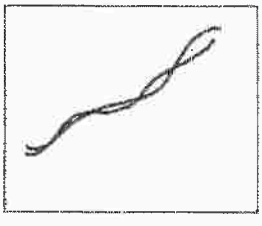
هناك نوعان من قنوات الاتصال إما لاسلكية كالجو وطبقات الأثير والتي يمكن للموجات أن تسير من خلالها والأمثلة على ذلك كثيرة ، منها : البث الإذاعي والتلفزيوني ووصلات الموجات الصغرية وغيرها - والنوع الآخر من القنوات هو السلكي ونرى في الشكل رقم (١-٣) أنواعاً مختلفة منها مثل أسلاك الهاتف والكابلات المحورية ودليل الموجة . وبالرغم من أن القنوات أو الخطوط السلكية تكلفتها أكثر من حيث التصنيع والتركيب والإنشاء من القنوات أو الخطوط اللاسلكية إلا أنها تتمتع بميزات عديدة منها :

١ - خصوصية الإستخدام .

٢ - عدم اعتمادها على الأحوال الجوية .

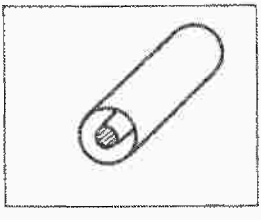
٣ - إمكانية توصيلها داخل أو خارج المباني.

وسنورد فيما يلي شرحاً للخطوط السلكية المستخدمة .



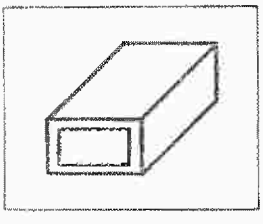
أسلاك مجدولة

(أ)



كابل محوري

(ب)



دليل الموجة

(جـ)

الشكل (١ - ٣) بعض أنواع قنوات الاتصال

١-٤-١ الخطوط السلكية Wire Lines

أ - الكابلات الهاتفية Telephone Cables

استخدمت الأسلاك المعلقة والتي تمتد بين أعمدة الهاتف استخداما واسعاً في الماضي لحملها للمكالمات الهاتفية داخل المدن وخارجها ، ونظراً للصعوبات الجمة التي واجهتها ، والتوسع المستمر في مجال الاتصالات الهاتفية، فقد حلت الكابلات الهاتفية محل الأسلاك المعلقة حيث عزلت الأسلاك عزلاً كهربائيا وقربت المسافة بينها كما وضع العديد منها معاً داخل كابل واحد مما سبب في لغط المكالمات cross talk ولتقليل التداخل بين المكالمات استخدمت الأسلاك المجدولة (الشكل ١-٣ أ) .

هذا وتستخدم أطوال تضفير twist length مختلفة بين الأسلاك المتجاورة لتقليل الحث بينها وتوضع عدة مئات من الأسلاك في كابل واحد داخل أنابيب تحت الأرض وتستخدم مكررات repeaters كل ٤ إلى ٦ كيلومتر حيث توضع في غرف خاصة تحت الأرض تعرف باسم فتحات دخول manholes .

ب - الكابلات المحورية Coaxial Cables

عند إرسال إشارات كهربائية ذات تردد مرتفع عبر الأسلاك فإن معظم التيار الكهربائي يمر خلال الطبقة الخارجية للسلك مستخدماً جزءاً صغيراً من مقطع السلك مما يؤدي إلى زيادة المقاومة الفعلية للسلك ، وتعرف هذه الظاهرة باسم تأثير الجلد skin effect هذا بالإضافة إلى فقدان قدرٍ متزايدٍ من الطاقة بالإشعاع radiation كلما ازداد التردد ، ونظراً للإحتياج المتزايد إلى زيادة سعة الخطوط وإرسال ترددات مرتفعة ظهر الكابل المحوري وهو عبارة عن قشرة اسطوانية من النحاس ويملأ الفراغ بين القشرة الخارجية والسلك الداخلي بمادة عازلة كالبلاستك (الشكل ١-٣ ب) أو الهواء ، وفي حالة استخدام الهواء تستخدم فواصل عازلة بين الإسطوانة الخارجية والسلك كل عدة سنتيمترات ،وتوضع عدة أنابيب من الكابلات المحورية داخل كابل كبير، ويسري التيار

بين السلك الداخلي والقشرة الخارجية التي تمنع الطاقة من التسرب بالإشعاع. وكما تعمل القشرة الخارجية على منع التسرب خارج الكابل فإنها تحول أيضاً دون دخول الإشارات من خارج الكابل ولهذا فإن تداخل المكالمات يقل أو ينعدم في هذه الكابلات كما ينعدم التشويش الخارجي مما يسمح بنقل أعداد كبيرة من المكالمات الهاتفية ، وفي حين أنه يمكننا نقل ١٢ أو ٢٤ مكالمة هاتفية على سلك هاتفي واحد wire pair فإن سعة الكابل المحوري الواحد تبلغ ٣٦٠٠ مكالمة ، وبالرغم من ارتفاع ثمن الكابلات المحورية مقارنة بالأسلاك الهاتفية فإن السعة العالية للكابلات المحورية تبرر هذا الإرتفاع في التكلفة ، والكابلات المحورية ذات السعة العالية يمكنها نقل ١٠٨٠٠ مكالمة هاتفية على كابل واحد، وعادة يوضع ٢٢ منها داخل غطاء واقي اسطواني لتحمل ١٠ أنابيب الإشارات في إتجاه و١٠ أخرى تحمل الإشارات في الاتجاه المعاكس ، ويستخدم الكابلين الآخرين كاحتياط وتبلغ السعة الكلية لمثل هذا الكابل ١٠٨ ألف محادثة هاتفية في الاتجاهين. وبالإضافة إلى هذه السعة العالية تتمتع الكابلات المحورية بالميزات الآتية:-

١ - يقل اللغط cross talk بحيث لايكاد يذكر.

٢ - يقل التشويه في الإشارات والناجم عن تغيير المقدار بتشوه الاتساع amplitude distortion عن مثيله في الأسلاك العادية ويقل أيضاً التشويه الناشيء عن تغير الطور أو عن وصول الإشارات ذات التردد المختلف في لحظات مختلفة والمسمى تشوه التأخر delay distortion عن مثيله في الكابلات الهاتفية.

٣ - يمكن الاستغناء عن معدات تقليل الصدى echo suppressors حيث ينشأ الصدى عن وصول الإشارة المرتده بعد فترة زمنية من وصول الإشارة الأصلية ، ولما كانت سرعة انتشار الإشارات عبر الكابل المحوري تقرب من سرعة الضوء فإن الفارق الزمني بين الإشارة الأصلية والمرتدة يتلاشى تقريبا مقللا التأثير السيء للصدى .

جـ - دليل الموجة Waveguide

دليل الموجة هو أنبوبة نحاسية مفرغة ذات مقطع دائري أو مستطيل أو على شكل مقطع ناقص ellipse ،تسمح بانتقال الموجات الصغرية داخلها . ويستخدم دليل الموجة المستطيل rectangular waveguide (الشكل ١-٣ جـ) في نقل الموجات الصغرية بين أجهزة الراديو والهوائيات في أعلى الأبراج وهي مسافة لاتتعدى عدة مئات من الأمتار ، أما دليل الموجة الدائري circular waveguide فيبلغ قطر مقطعه عدة سنتيمترات ويمكنه إرسال ترددات أعلى بكثير من الدليل المستطيل ، وعموماً فإن مقدار التوهين attenuation في قدرة الموجات المرسلة عبر الدليل يقل مع ازدياد التردد حتى حوالي (100 GHz) .

وبالرغم من قدرة هذا الوسط على نقل إشارات تفوق في عرض نطاقها bandwidth كل الأوساط السابق ذكرها فإن استخدامه لايزال محدوداً حيث أن تكلفة تمديد هذه الأنابيب باهظة للغاية ويرجع السبب إلى ضرورة تمديد الأنابيب بدون انحناءات حادة .

د - الكابلات البحرية Submarine Cables

قبل إطلاق السواتل، والتي سهلت الاتصالات عبر البحار إلى حد بعيد ،كان الاعتماد الأكبر على الكابلات البحرية لنقل الإشارات والمكالمات عبر البحار والمحيطات. والكابلات البحرية هي كابلات محورية ممدودة في قاع البحار والمحيطات روعي في تصميمها وبنائها اعتبارات التحمل الأقصى ضد الصدأ والكسر وكذلك الإقلال من فقدان القدرة power losses وكذلك فإن المكررات repeaters صممت لتتحمل ضغط المياه وتعمل لفترات طويلة دون أعطال حيث أن إصلاحها أو استبدالها يتطلب جهداً كبيراً .

ولقد كان بناء الجيل الأول من هذه الكابلات في منتصف القرن التاسع عشر واقتصر استخدامه على إرسال الإشارات التلغرافية ، وفي عام ١٩٥٦ أمكن إرسال أول مكالمة هاتفية عبر الأطلسي عندما أرسى الكابل الهاتفي الأول مستخدما الصمامات في تكبير الإشارات ، وفي عام ١٩٦٣ أرسى الكابل الهاتفي الثاني مستخدماً الصمامات أيضاً. ولكن وضعت المكررات على مسافات تبلغ ٢٠ ميلاً بحرياً بعكس الكابل الأول والتي بلغت المسافة بين المكررات ٤٠ ميلاً بحرياً تقريباً .

وأمكن نقل ١٤٠مكالمة هاتفية على الكابل الثاني في حين اقتصرت على ٤٨ مكالمة هاتفية في الكابل الأول ، وفي عام ١٩٦٩ استخدم الترانزستور في المكررات وقربت المسافة بينها إلى عشرة أميال بحرية بحيث زاد عدد المكالمات إلي ٨٤٥ مكالمة وازدادت في الجيل الرابع عام ١٩٧٦ إلى ٤٠٠٠ مكالمة هاتفية .

هـ - الألياف البصرية Optical Fibers

وهي ألياف بسمك شعرة الإنسان مصنوعة من الزجاج النقي جداً تسمح بمرور الضوء من خلالها وقد تم تصنيع أول ليف زجاجي قليل الفقد عام ١٩٧٠ وقد أدرك العاملون في مجال الاتصالات أهمية هذه الألياف وقد بدء استعمالها على نطاق واسع لقدرتها الفائقة على نقل المعلومات إذ بلغ معدل نقل المعلومات 2.4Gbps ويسمح هذا بنقل عدد من القنوات التلفزيونية بالإضافة لقنوات المعلومات والقنوات الصوتية كما أن صغر حجمها وقلة وزنها مكن من وضعها ضمن مجارى الخدمات الكهربائية أو بالتوازي مع الخطوط الكهربائية حيث أنها لاتتأثر بالتشويش الكهرومغناطيسي بالإضافة إلى مزايا أخرى سنتطرق إليها في الفصل القادم .

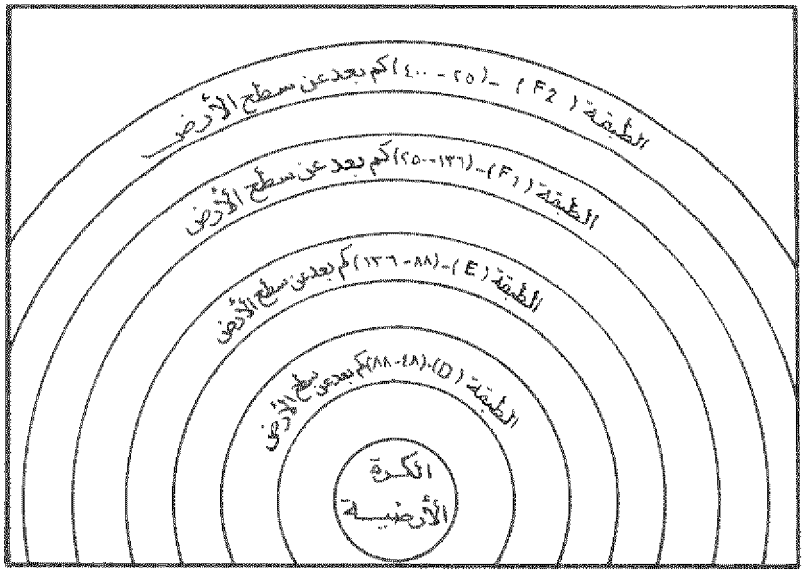
١-٤-٢ القنوات اللاسلكية : Wireless Channels

تستخدم القنوات اللاسلكية المجال الجوي على اختلاف طبقاته لإرسال الترددات المختلفة وينقسم هذا المجال إلى ثلاث طبقات :

أ - الطبقة الإستوائية وتمتد من سطح الكرة الأرضية حتى إرتفاع ١٠كيلومتر من سطح الأرض .

ب - الطبقة الحارة وتبدأ من إرتفاع ١٠ كيلومتر عن سطح الأرض وحتى إرتفاع ٥٠ كيلومتر.

جـ - الطبقة الأيونية F وهي أهم الطبقات الثلاث وهي ناتجة عن التأين الناجم عن سقوط أشعة الشمس عليها وتبدأ من ارتفاع ٥٠ كيلومتر حتى ٤٠٠ كيلومتر . وتتكون من أربع طبقات موضحة بالشكل (١-٤) . تتواجد هذه الطبقات أثناء النهار أما أثناء الليل فتتلاشى الطبقات الدنيا وهيD و Eوتندمج الطبقتين F_1 و F_2 لتكونا طبقة واحدة .

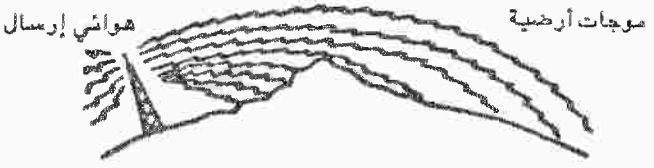


الشكل (١ - ٤) الطبقات الأيونية

١ - ٤ -٣ انواع الموجات اللاسلكية (موجات الراديو)

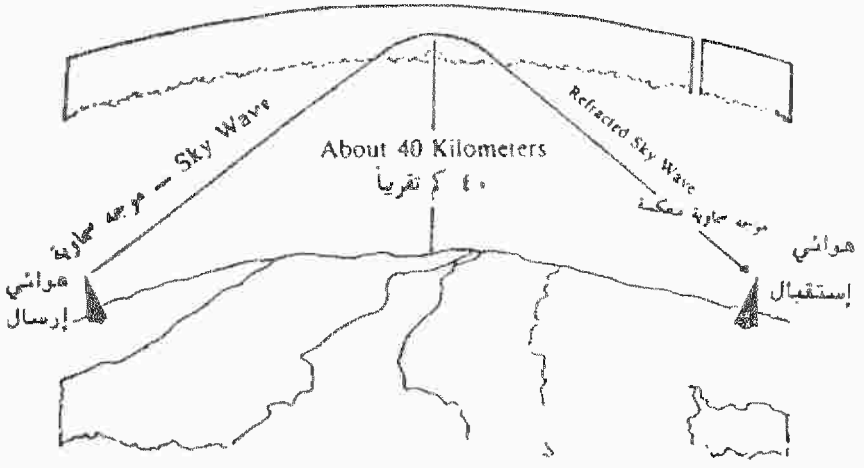
تنتشر الموجات اللاسلكية في الجو بطرق مختلفة تعتمد بالدرجة الأولى على تردد هذه الموجات وتنقسم إلى الآتي :-

أ - الموجات الأرضية وتسير بصورة موازية لسطح الأرض وقد تذهب لمسافات بعيدة بهذه الطريقة . (الشكل (١-٥)) وتشمل الموجات المتوسطة (نطاق الموجات الهكتومترية) ومادونها ، وتستخدم في الإرسال الإذاعي.



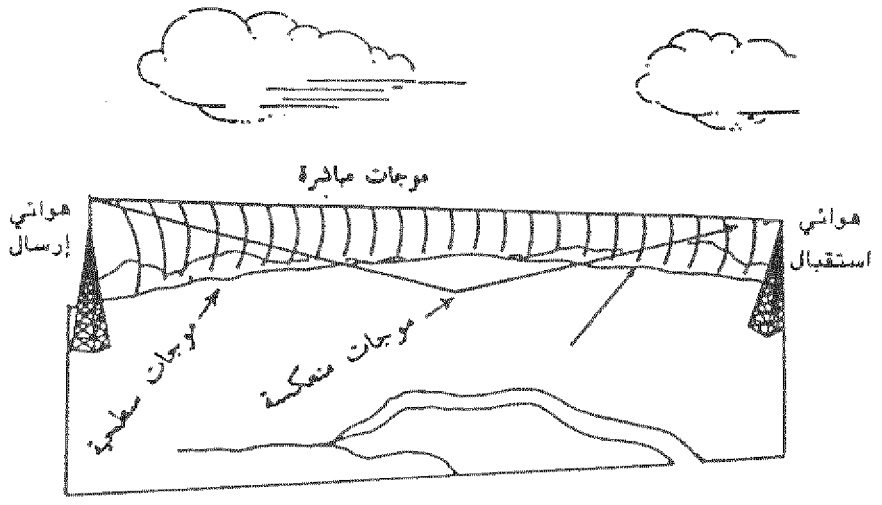
الشكل (١-٥) الموجات الأرضية

ب - الموجات السماوية وتستخدم الطبقة الأيونية لعكس هذه الموجات وتوجيهها للمنطقة المراد إيصال المعلومات لهـــا الشكل (١-٦) وتشمل الموجات القصيرة بين تردد 3MHz و 30MHz (نطاق الموجات الديكامترية).



الشكل (١-٦) الموجات السماوية

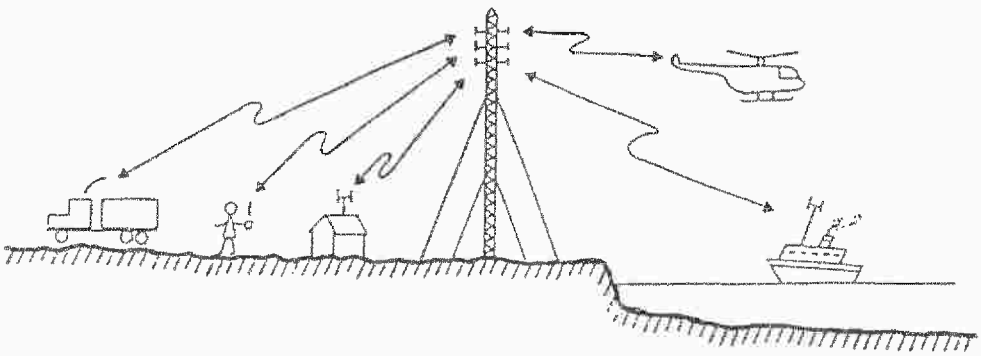
جـ - الموجات المباشرة وتستخدم مدى الرؤيا المباشر بين جهاز الإرسال والإستقبال أو ترسل إلى السواتل التي تقوم بعكس هذه الموجات إلى المناطق المراد إرسال البث إليها كما في الشكل (١-٧).



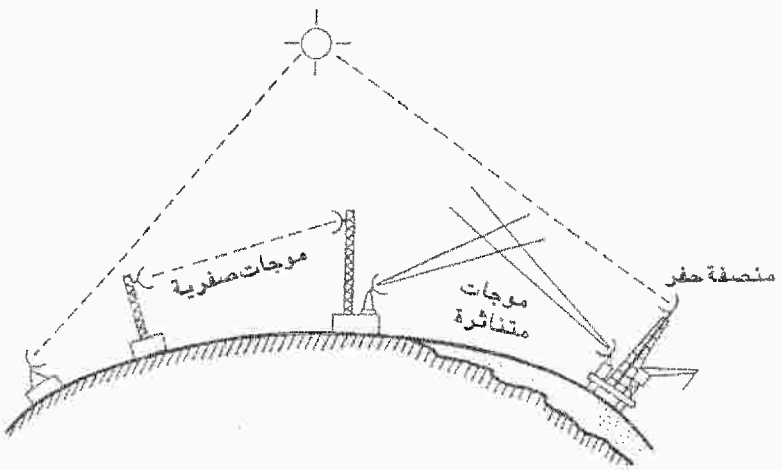
الشكل (١-٧) الموجات المباشرة وترددتها تقع ضمن نطاق الموجات المليمترية.

د - الموجات المتناثرة scattered وتستخدم هذه الموجات الطبقة السفلى من الطبقات الجوية وهي الطبقة الإستوائية كما تستخدم التأين الناتج عن الشهب أو عدم تجانس الطبقات الأيونية وترددتها تقع ضمن نطاق الموجات الديسمترية.

يوضح الشكل (١-٨) الإتصال بين وحدات متحركة ووحدات ثابتة في الجو والبر والبحر. أما الشكل (١-٩) فيرينا طرق الإتصال بإستخدام السواتل ووصلات الموجات الصغرية والموجات المتناثرة.



الشكل (١-٨) الإتصال بين وحدات ثابتة ومتحركة في الجو والبر والبحر



الشكل (١-٩) إستخدام السواتل ووصلات الموجات الصغرية والموجات المتناثرة

١ - ٥ الضوضاء Noise

الضوضاء هي العدو الأول لأنظمة الإتصالات . وتعرّف على أنها الإشارات أو الموجات غير المرغوب فيها التي تنشأ ضمن مختلف عناصر أنظمة الإتصالات لتشارك الإشارة أو الموجة الأصلية signal في مرورها عبر هذه العناصر. وعلى ذلك فإن وجود الضوضاء يعيق استقبال الموجات المطلوبة. وغاية هذا البند هي التعرّف على أنواع الضوضاء ومسبباتها ، ومناقشة أسلوب تقويم مستوى الموجات في أنظمة الإتصالات .

تنقسم الضوضاء إلى نوعين رئيسيين : ضوضاء داخلية internal noise وضوضاء خارجية external noise . ويقصد بالضوضاء الداخلية التأثيرات غير المرغوب فيها الناتجة عن مكونات الدوائر الإلكترونية ، مثل المقاومات وغيرها ، والتي تؤثر على الموجة الأصلية المطلوب نقلها أثناء عبورها ضمن هذه الدوائر. أما الضوضاء الخارجية فهي تلك التي تنشأ عن عناصر خارجية لاتشكل أجزاء من نظام الاتصالات الذي يعمل على نقل الموجة المطلوبة.

وللضوضاء الداخلية أشكال متعددة تنتج عن أسباب مختلفة. لذا يمكن تقسيم هذه الضوضاء إلى أقسام رئيسية على النحو التالي :-

أ - الضوضاء الحرارية thermal noise /ضوضاء جونسون Johnson noise أو ضوضاء نايكويست Nyquist noise وتنشأ بسبب ارتفاع درجة الحرارة temperature في مكونات الدوائر الكهربائية . فإرتفاع درجة الحرارة يزيد الحركة العشوائية للذرات atoms والإلكترونات electrons في المادة . ويؤدي ذلك إلى إشعاع طاقة كهرومغناطيسية تظهر على هيئة جهد ضوضاء noise voltage غير مرغوب فيه. ويقع جهد الضوضاء هذا ضمن مايسمى بالضوضاء البيضاء white noise ، أي التي تشمل جميع الترددات. وتزداد الضوضاء كلما ازداد عرض نطاق ترددات نظام الاتصالات ، ويعبر عن الجهد الناتج عن الضوضاء الحرارية بالمعادلة التالية:

$$Vrms = \sqrt{4k\,TR\,\Delta f} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1.4)$$

حيث أن : k هو ثابت بولتزمان ويساوي $1.38 \times 10^{-23}\ J/\overset{\circ}{k}$

و : T درجة الحرارة المطلقة بالكلفن $(273 + {}^{\circ}C)$

و : R مقدار المقاومة (Ω) المنتجة للضوضاء .

و : Δf هو سعة نطاق الضوضاء الفعلية وتزيد عن عرض نطاق نظام الاتصالات بحوالي 57% أي أن :

$$\Delta f = \frac{\Pi}{2}\Delta f_{3dB} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1.5)$$

والقدرة المبددة في المقاومة R هي :

$$P_N = 4kT\Delta f \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1.6)$$

وإذا أردنا تخفيض الضوضاء الحرارية فعلينا استخدام مقاومات أقل وإن لم يكن ممكناً فيجب استخدام مقاومات لاتتأثر كثيراً بارتفاع درجة الحرارة كالمقاومات المصنوعة من الزجاج أو الرقائق المعدنية metal - film materiels واستخدام كواشف ذات مقاومة قليلة .

نلاحظ أيضاً من معادلة جهد الضوضاء الحرارية أن هذه الضوضاء تعتمد على المقاومة وعرض النطاق الفعلي ودرجة الحرارة .

ب - ضوضاء الطلقه Shot Noise

وتسمى أيضاً ضوضاء شوتكي Schottky noise أو ضوضاء شروت Shrot niose أو ضوضاء التقسيم partition noise ، وتنتج عن تغير تيار التغذية الكهربائية في الوقت الذي يفترض بهذا التيار أن يكون ثابتاً وكما هو الحال بالنسبة للضوضاء الحرارية فإن ضوضاء الطلقة هي أيضاً ضوضاء بيضاء. وتولد هذه الضوضاء تياراً ثابتاً يعبر عنه بالمعادلة التالية :

$$Irms = \sqrt{2\,q\,I_{DC}\,\Delta f} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1.7)$$

حيث أن q هي شحنة الإلكترون وقيمتها 1.6×10^{-19} C والتيار I_{DC} هو تيار التغذية للدائرة أو الجهاز الإلكتروني و Δf عرض النطاق الفعلي .

جـ - أشكال أخرى من الضوضاء الداخلية

توجد أنواع كثيرة من الضوضاء مثل ضوضاء الازيز hum noise الناتجة من قصور التصفية filtering في دائرة التغذية الكهربائية . وكذلك ضوضاء زمن التحول transit time التي تنشأ عن عدم تماثل زمن حركة الإلكترونات بين أطراف دائرة كهربائية مع دور الموجة المطلوبة التي تعبر الدائرة والضوضاء الناتجة عن الحقول المغناطيسية magnetic fields لمحولات الربط coupling transformers في المضخمات amplifiers ، وغير ذلك من أنواع الضوضاء الداخلية.

ننتقل الآن إلى موضوع الضوضاء الخارجية التي تنتج أيضاً عن أسباب مختلفة، وسوف نستعرض فيما يلي التقسيمات الرئيسية لمثل هذه الضوضاء :

أ - الضوضاء الجوية atmospheric noise ، وينتج عن الموجات التي يجرى توليدها بواسطة تفريغات الشحنة الكهربائية التي تحدث ضمن المجال الجوي الأرضي من خلال العواصف الرعدية thunder storms. وتتناسب قيمة مثل هذه الموجات عكسياً مع التردد ،وتقع ضمن نطاق الترددات الواقع ماقبل التـــردد 20MHz . ونظراً لأن هذه الضوضاء تنطلق بشكل مفاجيء ولفترات زمنية صغيرة ، فهي توصف بأنها ضوضاء نبضية impulsive. ويعاني البث الإذاعي المعتاد الذي يستخدم تشكيل الاتساع amplitude modulation:A.M. ضمن مجالات التردد الواقعة بين 550kHz و 1.6MHz من هذه الضوضاء أكثر مما يعاني منها البث الإذاعي الذي يستخدم

تشكيل التردد frequency modulation F.M. وكذلك البث التلفزيوني لأنهما يعملان ضمن مجالات تردد تفوق التردد 50MHz .

ب - الضوضاء الناتجة عن المنشآت التي أقامها الأنسان man - made noise . فهناك في كثير من منشآت التقنية الحديثة التي يستخدمها إنسان هذا العصر مصادر تعمل على توليد أمراج كهربائية جانبية تودي إلى حدوث ضوضاء على الموجات التي تبثها أنظمة الإتصالات . ومن مصادر الضوضاء هذه خطوط الجهد العالي لنقل الطاقة الكهربائية high-voltage power lines ، والمحركات الكهربائية electrical motors ، وكذلك أنظمة الإتصالات الأخرى التي كثيراً ماتتداخل ترددا تها مع ترددات موجات الإتصالات المطلوبة. وبالإضافة إلى ماسبق فإن السيارات والطائرات وكثير من المرحلات relays ودوائر التبديل switching في الأنظمة المختلفة تطلق عند تشغيلها ضوضاءً على هيئة شرارات كهربائية ، وتدخل هذه الضوضاء ضمن نطاق مايوصف بالضوضاء النبضية.

جـ - الضوضاء الناتجة عن مصادر تقع خارج جو الأرض extraterrestrial noise sources ، مثل الشمس والنجوم . فهذه المصادر تبث ، بسبب طاقاتها الحرارية الهائلة قدرة تمتد من وجهة نظر التردد على مدى نطاق واسع من الترددات التي تتراوح مابين بضعة ميجاهرتزMHz إلى بضعة جيجاهرتز GHz.

د - ومن أسباب ظهور الإشارات أو الموجات غير المرغوب فيها في القنوات اللاسلكية مسألة تعدد مسارات الإرسال multiple transmission paths التي تتعرض لها الموجة المرسلة. وينشأ هذا التعدد عادة من إنعكاسات الموجة على التلال أو الأبنية والطائرات وما إلى ذلك . ويؤدي هذا الإنعكاس إلى وصول الموجة المطلوبة إلى المستقبل من إتجاهات متعددة وقيم مختلفة وأوقات متفاوتة

مما يودي إلى الأثر غير المرغوب .

بعد أن استعرضنا الأنواع المختلفة من الضوضاء الداخلية والضوضاء الخارجية نود الإشارة إلى أنه كثيراً مايجري قياس أداء أنظمة الإتصالات بواسطة عامل يدعى نسبة الإشارة إلى الضوضاء signal-to-noise ratio وتقدر هذه النسبة عادة بوحدة تدعى الديسيبل decibel.

١-٦ معلّمات انظمة الإتصالات Communication Systems Parameters

١-٦-١ الديسيبل Decibel

تستخدم هذه الوحدة أساساً في حساب نسبة قدرة موجتين فإذا كانت هاتان الموجتان هما موجة مدخل وموجة مخرج لنظام معين فإن النسبة بينهما تعطي الكسب gain أو الفقد أو الخسارة loss في النظام. وإذا كانت هاتان الموجتان هما موجة أصلية وموجة ضوضاء فإن النسبة بينهما تحدد مدى امكان استخراج الموجة الأصلية وتلقي ماتحتويه من معلومات وللتعريف بالديسيبل ويرمز له بالرمز dB نفرض أن لدينا موجتان Vs (t) و Vn (t) ، قدرة الأولى منهما Ps وقدرة الثانية Pn، عندئذ تعطي نسبة هاتين القدرتين مقدرة بالديسيبل على النحو التالي :

$$(\text{Ratio})\ dB = 10\ \text{Log}_{10}\frac{Ps}{Pn} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (1.8)$$

ويبين الجدول (١-٤) مقارنة بين نسبة قدرتين عند حسابها كنسبة حسابية معتادة وكذلك عند حسابها مقدرة بالديسيبل.

الجدول (١-٤) قيم نسبة القدرة لموجتين بالحساب المعتاد
وما يكافئها بالديسيبل

(Ps /Pn)	(Ps / Pn) [dB]	(Pn/Ps)	(Pn / Ps) [dB]
10	10	0.1	- 10
100	20	0.01	- 20
1000	30	0.0001	- 30
10000	40	0.0001	- 40
100000	50	0.00001	- 50
1000000	60	0.000001	- 60

١-٦-٢ وحدات مشتقة من الديسبل

١ - وحدات dBm

تطرقنا إلى وحدة الديسيبل للتعبير عن نسبة بين مقدارين غير أن المستخدم لنظم الاتصالات يحتاج لمعرفة قيم يستطيع من خلالها التعرف على النظام ومن الوحدات الشائعة هي وحدة dBm المستخدمة كثيراً في نظم الاتصالات البصرية وهي مقياس لنسبة القدرة مقارنة لواحد مللي وات ($\frac{١}{١٠٠٠}$ وات) وعندما يعبر عن 1mw يشار إليه بأنه odBm ويعبر عن dBm بالمعادلة التالية :

$$\text{Power (dBm)} = 10 \text{ Log } \frac{\text{Power (mw)}}{1 \text{ mw}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1.9)$$

فمثلاً لو أن قدرة المخرج هي 20 w فإن قدرة المخرج بمقياس dBm يعبر عنها بالآتي:-

$$\text{Power (dBm)} = 10 \text{ Log } \frac{20w}{1mw}$$

$$= +43 \text{ dBm}$$

وإشارة + تعني مستوى قدرة الإشارة فوق مستوى المرجع وهو odBm ، أما إذا كانت قدرة المخرج هي 0004w. فإن قدرة المخرج بمقياس dBm هي :

$$\text{Power (dBm)} = 10 \text{ Log } \frac{\text{Power (w)}}{1 \text{ mw}}$$

$$= -4 \text{ dBm}$$

وإشارة - تعني أن مستوى الإشارة أقل من OdBm أو 1mw .

ب - وحدات dBw

وتستخدم كثيراً في أنظمة الموجات الصغرية وتعرف بالديسيبل مقارنة بقدرة 1w وتستخدم المعادلة التالية :

$$\text{Power level (dBw)} = 10 \text{ Log } \frac{\text{Power (w)}}{1 \text{ w}} \quad \text{..... (1.10)}$$

فمثلاً لو أن مقدار قدرة المخرج هي 100W فإن ذلك يعبر عنه بالآتي :-

$$\text{Power level (dBw)} = 10 \text{ Log } \frac{100w}{1 \text{ w}}$$

$$= +20 \text{ dBW}$$

والجدول (١-٥) يعطينا العلاقة بين الوحدات المختلفة آنفة الذكر وقيم القدرات الفعلية .

dBm	dBW	Watts	dBm	dBw	Milliwatts
+ 66	+ 36	4000	+ 30	0	1000
+ 36	+ 33	2000	+ 27	- 3	500
+ 60	+ 30	1000	+ 23	- 7	200
+ 57	+ 27	500	+ 20	- 10	100
+ 50	+ 20	100	+ 17	- 13	50
+ 47	+ 17	50	+ 13	- 17	20
+ 43	+ 13	20	+ 10	- 20	10
+ 40	+ 10	10	+ 7	- 23	5
+ 37	+ 7	5	+ 6	- 24	4
+ 33	+ 3	2	+ 3	- 27	2
+ 30	0	1	0	- 30	1
			- 3	- 33	0.5
			- 6	- 36	0.25
			- 7	- 37	0.20
			- 10	- 40	0.1

الجدول (١ - ٥)

قيم القدرة ومايكافئها بـ dBw و dBm

١-٦-٣ نسبة الإشارة إلى الضوضاء ورقم الضوضاء

Signal to Noise Ratio (SNR) and Noise Figure (NF)

يعبر عن نسبة الإشارة إلى الضوضاء بالمعادلة التالية :

$$(S/N)_{dB} = 10\ Log_{10}\left(\frac{P_S}{P_n}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (1.11)$$

حيث أن مقدار القدرة في الإشارة هو P_S ومقدار القدرة في الضوضاء هو P_n أما إذا

استخدمنا الجهد فإن :

$$(S/N)_{dB} = 20\ Log_{10}\left(\frac{V_S}{V_n}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (1.12)$$

كذلك يعبر عن مقدار الضوضاء بمقياس آخر وهو رقم الضوضاء Noise Figure (NF) والذي يمثل نسبة الإشارة - إلى - الضوضاء في مدخل الدائرة إلى الإشارة - إلى - الضوضاء في مخرج الدائرة ويعبر عنه بالديسيبل بالمعادلة التالية :

$$NF = 10\ Log_{10}\left[\frac{(S/N)\ input}{(S/N)\ output}\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (1.13)$$

or

$$(NF)\ dB = (S/N\ input)\ dB - (S/N\ output)\ dB. \quad (1.14)$$

١-٦-٤ عرض النطاق Bandwidth

يعرف عرض النطاق على أنه المدى range بين أقل تردد وأعلى تردد يستجيب له النظام ففي المضخمات والمرشحات يُعرف بأنه المدى بين نقطتي منتصف القدرة 3dB ولكل نظام من نظم الاتصالات عرض نطاق محدد ، فالقناة الصوتية تحتاج إلى عرض نطاق 4 kHz والنظام التلفزيوني عرض نطاقه 6 MHz وفي الجدول (١-٦) عرض نطاق بعض الأنظمة .

نوع الرسالة	عرض النطاق	ملاحظـــــات
صوت	4 kHz	قناه هاتفية مفردة
موسيقى	10 kHz	محطة إذاعة راديو AM
موسيقى	200 kHz	محطة إذاعة راديو FM
تلفزيون	6 MHz	محطة إذاعة تلفزيونية

الجدول (١ - ٦) عرض نطاق بعض الأنظمة

من هذا الجدول يتضح لنا أن إرسال قناة تلفزيونية واحدة يحتاج إلى عرض نطاق كبير مقارنة بما تحتاجه القناة الهاتفية . لذا فقد تم البحث عن قنوات إتصال قادرة على استيعاب عدة قنوات تلفزيونية إضافة إلى القنوات الصوتية والمعلوماتية ، واستخدمت الأنظمة الرقمية لإرسال الرسائل المختلفة ، لذا كان لزاماً تحويل الإشارات التماثلية إلى إشارات رقمية وهناك قواعد تحكم هذا التحويل يعتمد على معدل العينات وعلى نظام الترميز . فإذا أردنا إرسال رسالة تماثلية فإن معدل العينات يجب أن يساوي على الأقل ضعف أعلى تردد تحويه الإشارة ، فالقناة الهاتفية التي عرض نطاقها 4 kHz تحتاج إلى ٨٠٠٠ عينة بالثانية، وتستخدم إجراءات الترميز ثمانية بتات Bits لوصف اتساع كل عينة لذلك نحتاج لإرسال 64 kbps من أجل رسالة هاتفية واحدة ولو أرسلنا نبضات بمعدل أعلى من 64 kbps لأمكن إرسال عدة رسائل في آن واحد . وهناك طرق مختلفة للإرسال ومزج الرسائل المختلفة باستخدام بتات تزامن وبتات ترميز . وتضاف عناصر لنظام الاتصالات لضم الإشارات الرقمية عند الإرسال وفصلها عند الاستقبال وقد استخدمت أنظمة رقمية معيارية متعددة في الولايات المتحدة وأوروبا وفي الجدول رقم (١-٧) التسلسل الهرمي للنظام الرقمي المستخدم في الولايات المتحدة .

عدد القنوات الصوتية	دلالة الإرسال	دلالة الإشارة	معدل المعلومات
1	-	DS - 0	64 kbps
24	T1	DS - 1	1.544 Mbps
48	T1C	DS - 1c	3.152 Mbps
96	T2	DS - 2	6.312 Mbps
672	T3	DS - 3	44.736 Mbps
1344	T3C	Ds - 3c	91.053 Mbps
4032	T4	DS - 4	474.175 Nbps
6048	-	-	405 Mbps
8064	-	-	565 Mbps
16128	-	-	1.2 Gbps

الجدول رقم (١- ٧) التسلسل الهرمي الرقمي للنظام المستخدم في أمريكا

نلاحظ من الجدول (١-٧) أن سعة نطاق القنوات في ازدياد مستمر لتلبية الطلبات المتنامية على أنظمة الاتصالات المختلفة ، وهناك خطوات لإنشاء قنوات بسعة 2.4Gbps وأكثر مستخدمين الألياف البصرية . مما سبق تتضح العلاقة بين عرض النطاق ونوع الرسالة والتي تحدد نوع شبكة الاتصالات. والسعة التي تتميز بها شبكات الاتصالات البصرية أدت إلى زيادة الطلب عليها واستبدال بعض شبكات الكابلات المحورية والأسلاك الهاتفية بألياف بصرية مصنوعة من الزجاج .

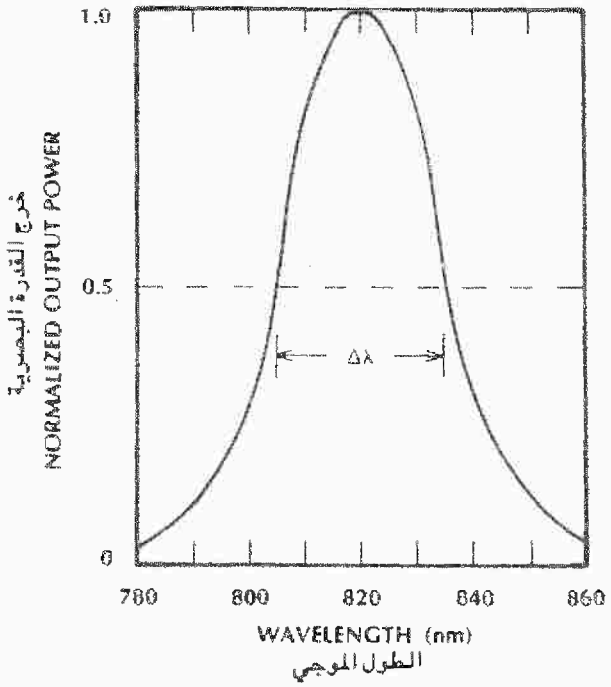
وفي الجدول (١-٨) نرى مقارنة بين الأنظمة الرقمية المستخدمة في أوروبا والولايات المتحدة واليابان .

	معدل المعلومات Mbps					
أوروبا	2 -	8 -	34 -	140 -	565 -	
الولايات المتحدة	1.5 -	6 -	- - 45	135 -	405 565	
اليابان	1.5 -	6 -	32 - -	100 -	400 -	

الجدول (١-٨) مقارنة بين النظم المعيارية في أوروبا والولايات المتحدة واليابان

١-٦-٥ عرض الخط اوعرض الطيف Linewidth or Spectral width

تبث المنابع الضوئية المستخدمة في أنظمة البصريات الليفية الضوء في نطاق من الترددات أي أنها ليست أحادية اللون وبتعبير آخر فإن هذه المنابع تبث عدداً من الأطوال الموجية ويعرف عرض الخط أو عرض طيف الطاقة الضوئية المنبعثة من المنبع الضوئي بأنه العرض مقاساً بالأطوال الموجية بين نقطتين تنخفض فيهما القدرة الضوئية إلى نصف القدرة القصوى.



الشكل (١-١٠) طيف ثنائي باعث ضوئي

ونرى في الشكل (١-١٠) أن أقصى قيمة للقدرة عند $\lambda_o = 820$ nm وتنخفض إلى نصف قيمتها عند $\lambda_1 = 810$ nm و $\lambda_2 = 830$ nm . لذا فإن عرض الخط هو 830-810 = 20 nm ويستخدم الرمز $\Delta\lambda$ لعرض الخط أو الطيف حيث تعادل عرض النطاق Δf . ويمكن التعبير عن Δf بدلالة عرض الخط $\Delta\lambda$ كالآتي:

$$\Delta f = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda o} \right) fo \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1.15)$$

حيث fo هو التردد المركزي و λ_o هو طول الموجة المركزية و $\Delta f = f_2 - f_1$ ، f_1 و f_2 يمثلان ترددات نصف القدرة half-power للمنبع الضوئي. ولعرض خط المنبع الضوئي تأثيرات هامة على إنجاز نظم الاتصالات البصرية ، حيث أن ازدياد عرض الخط يودي إلى إثارة عدد كبير من الانماط لنفس فتحة النفوذ العددية NA ويقلل من الحد الأقصى من معدل نقل المعلومات للنظام ، وفي الجدول (١-٩) قائمة بعروض خط نموذجية لمنابع ضوئية شائعة .

المنبع	عرض الخط $\Delta\lambda$
ثنائي باعث للضوء LED	20-100nm
ثنائي ليزر LD	1 - 5 nm
ليزر Nd:YAG	0.1 nm
ليزر HeNe	0.002nm

الجدول رقم (١ - ٩) عروض خط منابع ضوئية

١-٦-٦ التوهين Attenuation

يعتبر التوهين أحد العناصر الأساسية في تقويم أنظمة الاتصالات حيث تتعرض الموجات الحاملة للوهن عند انتشارها في قناة الاتصال نتيجة عوامل عديدة كالامتصاص asbsorption والتناثر scattering ويجب استخدام قنوات اتصال بأقل توهين ممكن حتى تنتشر الموجات الحاملة لأطول مسافة ممكنة. وفي قنوات الاتصال المصنعة من الألياف البصرية ، يلعب التوهين دوراً أساسياً في اختيار الليف ،وفقد الضوء في الليف البصري يعتمد إلى حد كبير على الطول الموجي للضوء المستخدم حيث يقل عند بعض الأطوال الموجية ويزيد عند أطوال موجية أخرى ،حيث أن امتصاص جزيئات (OH) للضوء يزداد عند بعض الأطوال الموجية ويقل عند أطوال موجية أخرى، حيث أن امتصاص جزيئات (OH) للضوء يزداد مثلاً عند $\lambda = 1.39\ \mu m$ وتقاس قيم التوهين لليف البصري بوحدة الديسيبل لتعبر عن النسبة بين الطاقة الضوئية المستقبلة والطاقة الضوئية المرسلة في الليف .

١-٦-٧ فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture

يتطلب اقتران الضوء في الليف البصري وقوع الشعاع ضمن زاوية معينة تدعى زاوية القبول θ ويعبر عن قدرة تجميع الضوء بجيب زاوية القبول والذي يطلق عليه فتحة النفوذ العددية ويعبر عنها رياضياً بالتالي :

$$\text{Numerical Aperture} = n_o \sin\theta \quad \ldots\ldots\ldots (1.16)$$

حيث n_o تمثل معامل انكسار الوسط الفاصل بين منبع الضوء والليف وسنقدم شرحاً أكثر في البند ٣ - ٧.

١- ٧ جداول الثوابت والوحدات Tables of Constants and Units

قبل أن نختتم هذا الفصل لابد من ذكر كافة الثوابت والوحدات المستخدمة في هذا الكتاب إذ سنعتمد وحدات نظام MKSC (متر - كيلو - ثانية - كولومب) الذي يفي بمعظم متطلبات الألياف البصرية . وبالإضافة إلى ذلك سنذكر بعض الثوابت الفيزيائية المهمة في دراسة نظم إتصالات الألياف البصرية . يحتوي الجدول (١-١٠) على قائمة بالوحدات المستخدمة وفي الجدول (١-١١) نذكر الثوابت المستخدمة ويحتوي الجدول (١-١٢) على معلمات الكميات الصغيرة والكبيرة .

الجدول (١ - ١٠) الوحدات المستخدمة

الوحدة	الرمز	القياس
متر	m	طول
كيلو غرام	kg	كتلة
ثانية	s	زمن
كولومب	C	شحنة
جول	J	طاقة
وات	W	قدرة
هرتز	Hz	تردد
نيوتن	N	قوة
أمبير	A	تيار
درجة كلفن	°k	درجة حرارة
درجة مئوية	°C	درجة حرارة
فاراد	F	سعة
أوم	Ω	مقاومة
ڤولت	V	جهد
ديسيبل	dB	نسبة

الجدول (١-١١) ثوابت فيزيائية

الوصف	القيمة	الرمز
سرعة الضوء	3×10^{8} m/s	c
ثابت بلانك	6.626×10^{-34} J × s	h
شحنة الالكترون	-1.6×10^{-19} C	q
ثابت بولتزمان	1.38×10^{-23} J / °k	k

الجدول (١ - ١٢) مَعلّمات الكميات الكبيرة والصغيرة

عامل الضرب	الرمز	السابقة
10^{9}	G	Giga
10^{6}	M	Mega
10^{3}	k	Kilo
10^{-2}	cm	Centi
10^{-3}	mm	Milli
10^{-6}	μ	Micro
10^{-9}	n	Nano
10^{-12}	P	Pico
10^{-15}	f	Femto

١-١٠ الخلاصـــة Summary

قدمنا في هذا الفصل عرضاً مبسطاً لهندسة الاتصالات مبتدئين بشرح لمفهوم الاتصالات واعتمادها على ثلاثة عناصر أساسية وهي السرعة والمدى وكمية المعلومات المراد نقلها وقد وجد أن وسائل الاتصالات القديمة تفتقر إلى أحد أو كل العناصر الثلاثة آنفة الذكر غير أن البحث عن وسائل اتصال أفضل استمر على مدى العصور وقد أدى وضع أوم لقانونه الشهير عام ١٨٢٦ إلى فتح المجال لاكتشاف الكهرباء والمغناطيسية ، وقد استمرت الاكتشافات عبر الأزمنة إلى فتح مجالات عديدة في الاتصالات الكهربائية، وقد وجد أن طيف الموجات الكهرومغناطسية يمتد من الترددات المنخفضة للغاية وحتى ترددات الأشعة الكونية ولكل مجال من هذه الموجات صفات تتميز بها ، ولكي نتعرف على توليد وإرسال واستقبال هذه الموجات لابد من دراسة العناصر الأساسية لأنظمة الاتصالات والتي تمت تغطيتها في هذا الفصل . وهنا لابد من التعرف على أنواع القنوات السلكية واللاسلكية وميزاتها ومداها . و قلما تخلو أنظمة الاتصالات من مشاكل الضوضاء أو اللغط cross talk التي تؤثر على نوعية الإشارات المنقولة وقد أفردنا بنداً خاصاً لمناقشة الأنواع المختلفة من الضوضاء ،وقد إختتمنا الفصل بتعريف بعض الوحدات المستخدمة في أنظمة الاتصالات مثل الديسيبل ونسبة الإشارة إلى الضوضاء وعرض النطاق وسعة القناة كما أوضحنا بعض الثوابت والوحدات المستخدمة في هذا الكتاب .

الفصل الأول

أسئلة

١ - عرف معنى الاتصالات واذكر العناصر الرئيسية لتكوين وصلة اتصالات.

٢ - يعتبر الضوء ضمن الموجات الكهرومغناطيسية ، أذكر أربعة أنواع أخرى من الموجات الكهرومغناطيسية مع ذكر تردداتها وأطوالها الموجية واستخداماتها.

٣ - أذكر ثلاثة أنواع من الاتصالات السلكية واستخداماتها.

٤ - أذكر أربعة أنواع من الموجات اللاسلكية واذكراستخداماتها.

٥ - ماهي أنواع الضوضاء وماتأثيرها على قنوات الاتصال.

٦ - ماالفرق بين الموجات التماثلية والموجات الرقمية.

٧ - لماذا تستخدم الموجات الحاملة ؟

٨ - ما الهدف من التشكيل؟

٩ - مامدى الترددات التي يمكن للأذن البشرية سماعها.

١٠- ماالأطوال الموجية التي يمكن للعين البشرية أن تراها.

مسائل

١ - أحسب الأطوال الموجية λ بالامتار.

أ - موجية صوتية بتردد 4kHz.

ب - قناة تلفزيونية بتردد 605 MHz .

جـ - موجة تحت الحمراء بتردد 1000 GHz.

د - اللون الأصفر بتردد 0.5×10^{15} Hz

٢ - أوجد الجهد الناتج عن الضوضاء الحرارية في مقاومة مقدارها 1kΩ ودرجة حرارة $70\ ^{\circ}F$ وعرض نطاق الضوضاء 1MHz.

٣ - أوجد قدرة الضوضاء الناتجة في مقاومة مقدارها 2.2kΩ ودرجة حرارة $85\ ^{\circ}F$

وعرض نطاق الضوضاء 500kHz .

٤ - إذا كان التيار المستمر I_{DC} = 8mA يمر في مقاومة مقدارها 220 Ω أوجد مقدار تيار الطلقة Irms إذا كان عرض النطاق 100kHz .

٥ - أوجد مقدار جهد الضوضاء والقدرة المبددة في المقاومة المذكورة في السؤال رقم٤ .

٦ - إذا كان لدينا مضخم فيه إشارة دخل 35 μv ومستوى ضوضاء 9 μv . أوجد قيمة الإشارة إلى الضوضاء بالديسيبل.

٧ - أوجد نسبة الإشارة إلى الضوضاء بالديسيبل إذا كانت قدرة الإشارة 20 μw وقدرة الضوضاء 40 nw .

٨ - أوجد قيمة قدرة الضوضاء إذا كانت نسبة الإشارة إلى الضوضاء تساوي 15 dB وقدرة الإشارة تساوي 15 pw .

٩ - أوجد رقم الضوضاء لمضخم فيه نسبة الإشارة إلى الضوضاء في الدخل تساوي 21dB ونسبة الإشارة إلى الضوضاء في الخرج تساوي 6dB .

١٠- أوجد مستوى القدرات التالية محسوبة بـ dBm و dBw : 230 μw , 170nw , 0003 w , 150mw , 250 w و 1.2w .

١١ - أوجد قيمة Δf لمنبع عرض خطه 2 % وطول موجته 1.3 μm .

الفصل الثاني

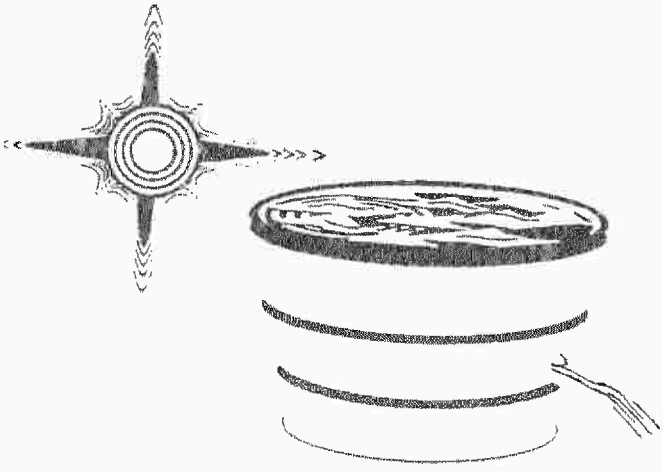
أهمية الألياف البصرية

الفصل الثاني
اهمية الألياف البصرية
The Importance of Optical Fibers

نبدأ هذا الفصل بلمحة تاريخية عن تطور الاتصالات البصرية ثم شرح لعناصر أنظمة الاتصال عبر الألياف البصرية في الإرسال والاستقبال ودور الليف البصري كقناة اتصال ثم نقوم بعد ذلك باستعراض أنواع الألياف البصرية المستخدمة حالياً ، يأتي بعدها شرح لميزات الألياف البصرية واستخداماتها المختلفة ، ونختتم هذا الفصل بالتوقعات المستقبلية للبصريات الليفية .

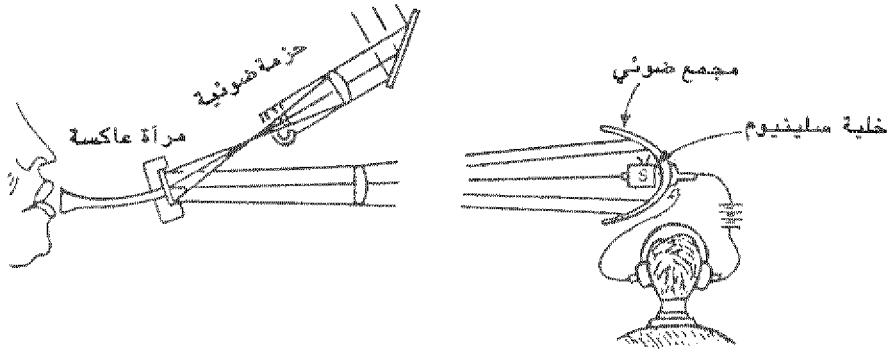
٢ - ١ تطور الاتصالات البصرية
Development of optical communicotions

استخدمت الإشارات الضوئية لنقل المعلومات قبل حوالي ٢٠٠ سنة إذ قام كلود شابي Claude Chappe عام ١٧٩٠ في فرنسا ببناء نظام تلغراف بصري مكون من مجموعة أبراج تحتوي على أذرعة ضوئية متحركة ، وقد استخدمت لنقل المعلومات لمسافة ٢٠٠ كيلومتر ويستغرق نقل المعلومة ١٥ دقيقة ، وأوقف استخدامه بعد اكتشاف التلغراف البصري . وفي عام ١٨٥٤ قام الفيزيائي الإنجليزي جون تايندل John Tyndall بإجراء تجربة تثبت إمكانية ثني الضوء وتوجيهه إذا وجد الوسط المناسب واستخدم لذلك وعاءً مدرجاً مملوءاً بالماء معرض أعلاه لأشعة الشمس وبه ثقب في أسفله يقع تحت سطح الطاولة المركب عليها الوعاء كما في الشكل (٢-١) ، ووجد أن الضوء أخذ شكل مسار الماء الخارج من الفتحة ، وفي هذه التجربة أثبت إمكانية حصر الضوء ضمن الوسط المادي وهو الماء في هذه الحالة وكذلك إمكانية ثنيه لأن الماء يتدفق بشكل منحني ، وتعد هذه أول تجربة بصرية .



الشكل (٢-١) صورة لتجربة جون تايندل عن إمكانية
ثني الضوء وتوجيهه في وسط مادي

في عام ١٨٨٠ تمكن ألكسندر جراهام بل Alexander Graham Bell في أمريكا من تطوير هاتف ضوئي (الشكل (٢-٢)) حيث قام بتوصيل مرآة عاكسة للضوء بميكروفون وأسقط شعاعاً ضوئياً على تلك المرآة وعند استخدام الميكروفون تبدأ المرآة بالاهتزاز وبذلك تتغير شدة الضوء المنعكس من المرآة ، وعلى الجانب الآخر يتم استلام الشعاع الصادر من المرآة بواسطة مرآة أخرى تقوم باسقاط الضوء على مادة السلينيوم التي تتغير مقاومتها بتغير شدة الإضاءة التي تعبر عن المعلومات والإشارات المشكلّة في الضوء المرسل غير أن هذه الفكرة لم تجد استخداماً عملياً لتأثرها بالأحوال الجوية ومدى الرؤية .



الشكل (٢-٢) رسم توضيحي لأول هاتف بصري لنقل الإشارات بالطاقة الضوئية

وفي عام ١٩٣٤ تمكن الأمريكي نورمان ر.فرنش من استلام براءة اختراع لهاتف بصري يقوم بإرسال إشارات صوتية مستخدماً كابل بصري حيث يصنع الكابل من الزجاج أو أي مادة تنقل الضوء وفقدانها قليل كما أن الطول الموجي ملائم للمادة المصنع منها الكابل ولم يتم إدراك هذه الفكرة عملياً إلا بعد ٢٥ سنة كانت بدايتها عام ١٩٥٨م عندما قام كلٌ من آرثر شاولو Arthur Schawlow وتشارلز تاونز C.Townes الأمريكيي الجنسية بتطوير جهاز الليزر وحازا على جائزة نوبل لهذا الاختراع وتمكن ثيودور هـ. ميمان T.H.Maiman الأمريكي الجنسية من تشغيل أول جهاز ليزر مصنوع من الياقوت عام ١٩٦٠ . وفي عام ١٩٦٢ أُدرك إمكانية تصنيع ليزر وكواشف ضوئية مصنوعة من أشباه الموصلات وبهذين الحدثين توفر المرسل والمستقبل ولم يبقى إلا إيجاد الوسط الناقل بينهما ، وفي بداية الأمر أجريت محاولات عديدة لإستخدام دليل موجي بمرايا عاكسه ونظام عدسات معقد ولم تلق هذه الفكرة النجاح لأنها لم تكن عملية ولم يكن استخدام الألياف البصرية ممكناً آنذاك نظراً لتوهينها العالي للضوء ، وهو 1000dB/km . وفي عام ١٩٦٦ اقترح كل من تشارلز هـ. كاو

Charles H.Kao وجورج أ. هوكام George A. Hockam من بريطانيا استخدام ألياف زجاجية فقدانها قليل وبالفعل تمكنت شركة كورننج للزجاج Corning Glass Works عام ١٩٧٠ من تطوير ألياف زجاجية يقل توهينها عن 20dB/km ، ويعتبر هذا سبقاً كبيراً في هذا المجال وأعطى ذلك فرصة كبيرة لاستخدامها في مجال الاتصالات وعلى نطاق واسع في شتى أنحاء العالم وسنتحدث في وقت لاحق عن الاستخدامات المتعددة لهذه الألياف، ونرى في الجدول رقم (١-١) نبذة تاريخية عن تطور الاتصالات البصرية.

١٨٥٤	تجربة جون تايندل
١٨٨٠	ألكسندر جراهام بل يقترح الهاتف البصري
١٩٦٠	بناء أول ليزر
١٩٦٦	اقتراح تصنيع ألياف بصرية من الزجاج
١٩٧٠	تصنيع ألياف زجاجية بتوهين يقل عن 20 dB/km
١٩٧٤	تصنيع ألياف زجاجية بتوهين 4 dB/km
١٩٧٦	أمكن الحصول على ألياف زجاجية بتوهين يصل إلى 0.5 dB/km
١٩٧٩	أمكن تخفيض التوهين إلى 0.2 dB/km والحصول على عرض نطاق عال.
١٩٨٠	نشطت الأبحاث في مجال الألياف الزجاجية أحادية النمط .
١٩٨٢	تم الحصول على ليف زجاجي أحادي النمط بتوهين يصل إلى 0.16dB/km وهو أقل توهين ممكن الحصول عليه نظرياً .

جدول (٢-١) تطور الاتصالات البصرية الموجهه

٢ - ٢ عناصر أنظمة الاتصالات عبر الألياف البصرية
Elements of Optical Fiber Communications

تعرضنا في الفصل السابق لنموذج عام للعناصر الأساسية لنظام اتصالات عام وسنقوم في هذا البند بشرح موجز لعناصر نظام اتصالات بصري مبتدئين بمصدر المعلومات ومنتهين بمقصد المعلومات ، كما هو مبين بالشكل (٢-٣).

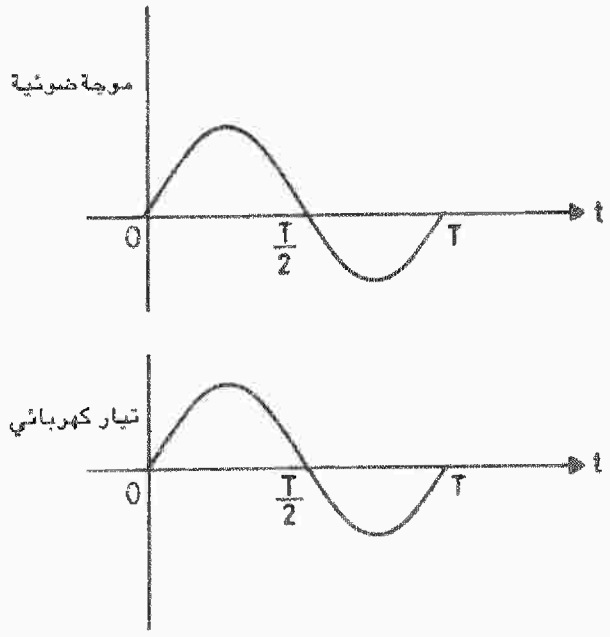
أ - مصدر المعلومات Information Source

تتوفر المعلومات المراد إرسالها بأشكال كثيرة يمكن تصنيفها إلى قسمين، الأول منها على هيئة كميات فيزيائية كالصوت والحرارة والضغط وماإلى ذلك. والقسم الآخر على هيئة إشارات كهربائية كخرج الحواسيب وأجهزة القياس الكهربائية . ولابد من وجود المعلومة بشكل يستطيع نظام الاتصالات التعامل معه، وهو بالطبع الشكل الكهربائي. ففي حالة الكميات الفيزيائية لابد من تحويلها إلى إشارات كهربائية ، أما الكميات الكهربائية فيمكن استخدامها مباشرة .

ب - محول طاقة المدخل Input Transducer

يتولى محول طاقة المدخل تحويل الكميات الفيزيائية إلى إشارات كهربائية ، ومن الأمثلة الشائعة تحويل الأصوات إلى إشارات كهربائية ، إذ تقوم الموجات الصوتية بإحداث تغيير في مقاومة أو مكثف الميكروفون الذي يكون أحد عناصر دائرة كهربائية ، وبالتالي يتغير التيار الكهربائي المار في الدائرة تبعاً لتغير الموجات الصوتية كما هو في الشكل (٢-٤).

الشكل (٢-٣) مخطط إجمالي لنظام اتصال عبر الليف البصري



الشكل (٢-٤) العلاقة بين دخل وخرج محول طاقة المدخل

فلو أردنا إرسال هذه الإشارة عبر نظام الاتصالات فيمكننا ربط محول طاقة المدخل بالمصدر الضوئي مباشرة أو خلال دوائر الكترونية تقوم بتضخيم الموجة أو ترميزها .

جـ - التشكيل Modulation

يمكن التعبير عن التشكيل من خلال المثال التالي ، إذا كان لدينا رسالة مكتوبة على ورقة يطلب نقلها بين نقطتين متباعدتين ، فإن رمي ورقة الرسالة من نقطة المصدر باتجاه المقصد سوف يؤدي إلى نقل الرسالة مسافة قصيرة تسقط بعدها على الأرض ، ولكن لو أمكن ربط هذه الورقة بحجر ثم جرى رمي الحجر من نقطة المصدر فإنه يمكن قطع مسافة أطول ، وبذلك يمكن تأمين الاتصال بين هاتين النقطتين . تمثل الورقة المكتوبة في هذا المثال الإشارات أو المعلومات المراد إرسالها ، ويمثل الحجر الموجة الحاملة carrier

وتمثل العملية فكرة التشكيل ، وتسمى موجة المعلومات بموجة نطاق الأساس baseband signal ونطاق الأساس هنا يعني نطاق ترددات المعلومات نفسها أو موجة المعلومات . ويتفوق تردد الموجة الحاملة عادة بكثير على ترددات موجات نطاق الأساس، وتسمى الموجة الخارجة من المصدر الضوئي بالموجة المشكّله modulated signal . هناك نوعان من التشكيل تماثلي analog ورقمي digital . ففي التشكيل التماثلي يقوم التيار الخارج من محول الطاقة بتشكيل الموجة الحاملة والصادرة من المصدر الضوئي لتأخذ شكل موجة نطاق الأساس وتكون قابلة للإرسال عبر الليف البصري.

أما في النوع الآخر من التشكيل وهو الرقمي، فتحول الموجات التماثلية الخارجة من محول الطاقة إلى متغيرات ذات قيم منفصلة تتغير بشكل متقطع discrete حيث يوجد هناك إشارة (حالة ON) أو لايوجد (حالة OFF) فالحالة ON تمثل الرقم 1 والحالة OFF تمثل0 . وهذه هي الأرقام الثنائية أو مايسمى بثنائيات أو بتات Bits النظام الرقمي ويكون معدل الإرسال هو عدد الثنائيات الرقمية(البتات) لكل ثانية Bits Per Second (bps) ويمكن أن يكون تتابع النبضات بنوعيها ترجمة مرمزة لرسالة تماثلية . وتتم عملية الترميز هذه من خلال إدخال الإشارات التماثلية إلى جهاز الترميز أو محول تماثلي / رقمي analog to digital converter بعدها تذهب تلك الإشارات الرقمية إلى منبع الضوء لتخرج الموجة الضوئية الحاملة بشكل متقطع معبرة عن محتوى المعلومات المراد إرسالها وجاهزة للإرسال عبر الليف البصري وعند المستقبل تحدث عملية معاكسة حيث ترجع الإشارة الرقمية إلى شكلها التماثلي باستخدام جهاز إعادة ترميز أو محول رقمي/ تماثلي digital to analog converter ولابد من الإشارة هنا إلى أن عملية التحويل هذه يجب أن لاتحدث أي تغيير في المعلومات المرسلة .

د . منبع الضوء Light Source

يتولى المنبع الضوئي توليد الموجة الحاملة ويستعمل لهذا الغرض نوعان من

المنابع الضوئية هما ثنائي الليزر Laser Diode (LD) والثنائي الباعث للضوء Light Emitting Diode (LED) . وتتميز هذه الثنائيات بصغر حجمها وخفة وزنها وتستهلك كميات صغيرة من القدرة وتتمتع بسهولة التشكيل أي تحميل المعلومات على إشعاعاتها . يعمل كل من هذين الجهازين بواسطة تمرير تيار كهربائي فيه ويمكن جعل كمية القدرة التي يشعها الجهاز تتناسب مع هذا التيار وبهذه الطريقة فإن القدرة البصرية الخارجة من الثنائي تأخذ شكل التيار القادم من محول طاقة المدخل ، فإذا كان التيار الداخل للثنائي موجي فإن القدرة البصرية الخارجة تكون موجية وهذا مايحدث في التشكيل التماثلي . وإذا كان التيار الداخل للثنائي متقطع فإن القدرة البصرية الخارجة من الثنائي تكون متقطعة وبنفس الأسلوب وهذا مايحدث في التشكيل الرقمي ولابد من التوضيح هنا أن التغيرات في القدرة البصرية تحتوي على المعلومات المرسلة ويسمى هذا بتشكيل الشدة intensity modulation . رأينا في الشكل (٢-٤) أن تيار الموجة الداخلة للمنبع الضوئي يتغير بين موجب وسالب بينما القدرة البصرية الخارجة من الثنائي الباعث للضوء LED موجبة دائماً . لتحقيق هذه الخطية يجب أن يكون تيار التشكيل في النظام التماثلي بكامله موجباً . ويتم ذلك بإضافة تيار انحياز مستمر DC Bias Current إلى إشارة المعلومات المرغوبة أما في حالة التشكيل الرقمي فإن تيار التشكيل موجب دائماً وهذا يعني عدم استخدام تيار انحياز عند استخدام الثنائي الباعث للضوء .

أما في حالة استخدام ثنائي الليزر فإننا بحاجة إلى تيار أدنى يعمل عنده هذا الثنائي ويسمى هذا بالتيار العتبي threshold current . فإذا كان العدد البتة(1) فإن التيار المار بثنائي الليزر يتجاوز قيمة العتبة ويجعل الثنائي يبعث ضوءاً بينما يبقى التيار عند العتبة للبتة (0) ،ولايحدث أي إشعاع . أما في حالة استعمال ثنائي الليزر للتشكيل التماثلي فلابد من استخدام تيار انحياز مستمر بحيث يعمل الثنائي في الجزء الخطي من منحنى خواص التيار - القدرة حتى نحصل على إشارة مماثلة لإشارة الدخل.

هـ - مقرن المدخل Input Coupler

جاء الآن دور تحميل القدرة البصرية الصادرة من المنبع الضوئي على قناة الاتصال . ففي الإرسال اللاسلكي سواء كان إذاعياً أو تلفزيونياً أو غير ذلك يقوم هوائي الإرسال بنقل المعلومات إلى قناة الاتصال وهي الجو. أما في الأنظمة السلكية كالهاتف فإننا نستخدم وصلات بسيطة تربط جهاز الإرسال بخط الإرسال والأمثلة على ذلك كثيرة، أما في حالة استخدام نظام الليف البصري فإن نقل القدرة البصرية من المنبع الضوئي إلى الليفة البصرية يتعرض لفقد كبير والسبب في ذلك يعود إلى أمرين أساسيين، الأول هو صغر حجم الألياف البصرية والتي تبلغ أقطارها 50 μm أو أقل ، والثاني أن الثنائيات الضوئية تبعث القدرة الضوئية على امتداد زوايا كبيرة بينما لاتقبل الألياف البصرية دخول الضوء إليها إلا ضمن زوايا محددة وصغيرة وللحصول على أقل فقد ممكن لابد أن نحرص على تقارب قيم زوايا مخروط الإشعاع للثنائي الضوئي وزوايا القبول لليف البصري أو تصميم وسائل اقتران متطورة .

وسنقوم بشرح هذه الخواص في فصول قادمة لكن يجب أن نلاحظ أن مقرن المدخل جزء مهم من تصميم نظام الليف البصري بسبب إمكانية حدوث فقد كبير فيه .

و - قناة الاتصال او قناة المعلومات Communication or Information Channel

تعرّف قناة الاتصال بأنها المسار بين المرسل والمستقبل ، وفي نظام الاتصالات عبر الألياف البصرية يكون الليف الزجاجي أو البلاستيكي هو القناة . ولكي تكون لهذه القناة فعالية فلابد أن يكون التوهين ضعيفاً وزاوية القبول كبيرة حتى يستطيع الضوء قطع مسافات طويلة دون أن يضعف، وأن نجمع أكبر قدر من الضوء ليقترن بقناة الاتصال خاصة عند الإرسال لمسافات طويلة . وعلى الرغم من وجود أجهزة استقبال حساسة إلا أن القدرة الواصلة إلى المستقبل يجب أن لاتقل عن مستوى معين للحصول على المعلومات المرسلة بصورة مرضية.

هناك خاصية أخرى لقناة الاتصال هي زمن انتشار propagation time الموجات خلالها . ويعتمد ذلك على تردد الضوء، وعلى مسار الأشعة الضوئية وتحتوي الإشارة المنتشرة في الليف على مجموعة من الترددات البصرية لأن المنابع الضوئية تبعث مجموعة من الترددات أو الأطوال الموجية wavelengths فتتوزع القدرة على عدة مسارات ويؤدي ذلك إلى تشوه الإشارة المنتشرة وللتقليل من هذا التأثير يتم إرسال المعلومات بمعدل منخفض low transmission rate وهذا غير محبب لأنه يحد من قيمة النظام ويمكن التقليل من تشوه الإشارة من خلال استعمال ألياف أحادية النمط single mode fibers ولكن هذا يوقعنا في مشكلة أخرى، إذ أن هذه الألياف صغيرة جداً حيث يبلغ قطرها $10\mu m$ فيصعب اقتران الضوء بها كما أن زاوية قبولها صغيرة .

أياً كانت الألياف فإن المتطلبات متناقضة من أجل زاوية قبول ضوئية كبيرة وتشوه إشارة منخفض. ولكن بالإمكان الحصول على أطوال خطوط ومعدل معلومات مقبولة باستخدام ألياف ذات زوايا قبول مناسبة وتشوه إشارة مقبول كما سيتبين ذلك في فصول لاحقة .

ولا يقتصر الفقد في قناة الاتصال عبر الألياف البصرية على التوهين في الليف البصري فحسب بل هناك عناصر أخرى يجب أخذها بعين الاعتبار وهي الوصلات الدائمة splices ،حيث أن الليف البصري يصنع بأطوال محددة لذا فإن الحصول على خطوط طويلة يتطلب ربط الألياف بعضها ببعض وكل وصلة تسبب فقد في مقدار القدرة المرسلة في حدود 0.2dB . لذا يجب الإقلال من هذه الوصلات ماأمكن ذلك . تتعرض القدرة المرسلة للتوهين نتيجة الفقد في مقرن المدخل والليف البصري والوصلات الدائمة ، فإذا كانت المسافة طويلة فتحتاج إلى مكررات repeaters توضع على مسافات معينة تتراوح المسافة بين المكررات من ٥٠ كيلومتر إلى ١٠٠ كيلومتر . تقوم هذه المكررات بتضخيم الإشارات إلى ماكانت عليه في بداية الإرسال عبر الليف البصري ، وحيث أن المكررات تتكون من دوائر إلكترونية فلابد من تحويل القدرة الضوئية إلى كهربائية وبعد

تضخيمها تحول إلى قدرة ضوئية وترسل ثانية عبر الليف البصري وقد تتكرر العملية عدة مرات حسب مسافة الإرسال إلى أن تصل إلى المستقبل .

د - مقرن المخرج Output Coupler

في نظام الاتصالات اللاسلكية يقوم الهوائي بتجميع الإشارة من قناة المعلومات وهي الجو ويوجهها نحو المستقبل وفي الأنظمة السلكية كالهاتف فإننا نستخدم مقرن بسيط لتوصيل الأسلاك الهاتفية بجهاز الاستقبال . أما في نظام الاتصالات عبر الألياف البصرية، فإن عمل مقرن المخرج هو توجيه الضوء الخارج من الليف نحو الكاشف الضوئي ويخرج الضوء بشكل مخروطي كما كان في حالة الدخول ، وحيث أن الكواشف الضوئية ذات مسطحات كبيرة وزوايا قبول واسعة فإنه يتم استخلاص الضوء من الليف بصورة فعالة .

هـ - كاشف الضوء Light Detector

يتولى الكاشف الضوئي تحويل القدرة البصرية إلى تيار كهربائي ويتناسب التيار الخارج من الكاشف مع قدرة الموجة البصرية الساقطة عليه وحيث أن تغيرات القدرة البصرية تحتوي على المعلومات المرغوبة، فإن تيار خرج الكاشف يحتوي هذه المعلومات وهذا التيار يماثل التيار المستعمل في قيادة المنبع الضوئي (مصدر الموجة الحاملة) وتسمى تلك العملية بإزالة التشكيل (الكشف) demodulation . وتستخدم لهذا الغرض ثنائيات ضوئية مصنعة من أشباه الموصلاتsemiconductors وهناك عدة أنواع منها وتتميز بصغر الحجم وقلة الوزن كما أنها إقتصادية ولها عمر طويل، واستهلاك قدرة منخفض وحساسية عالية للإشارات البصرية، واستجابة سريعة للتغيرات السريعة في القدرة البصرية.

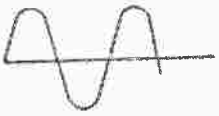
ط - معالج الإشارة Signal Processor

يتولى معالج الإشارة تضخيم وترشيح الإشارة في أنظمة إرسال الإشارة التماثلية، إذ لايقوم بالتخلص من تيار الانحياز الثابت فحسب بل يمنع كافة الترددات غير المرغوب فيها من الاستمرار في الانتقال ويسمح بمرور كل الترددات التي تحتويها المعلومات المرسلة ، فيؤدي هذا إلى وضوح الإرسال المطلوب . يزيد الترشيح المناسب نسبة قدرة الإشارة إلى القدرة غير المرغوبة حتى القيمة العظمى .

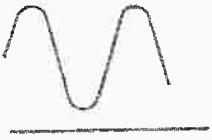
أما في حالة نظام إرسال الإشارة الرقمي فتضاف إلى معالج الإشارة دوائر قرار بالإضافة، إلى المضخمات والمرشحات، تقرر بها دوائر القرار فيما إذا كان قد استقبل (1) أو (0) خلال الشق الزمني لأي بتة.

وبسبب الضوضاء في عناصر النظام المختلفة فإن حدوث خطأ في البتات، وارد ويجب أن يكون معدل الخطأ في البتات، bit error rate (BER) صفيراً جداً للحصول على اتصالات عالية الجودة . وعلى معالج الإشارة الرقمية أن يفك ترميز التتابع إذا كانت الرسالة تماثلية ويتم هذا بواسطة محول رقمي تماثلي فينتج الشكل الكهربائي الأصلي للموجات ، أما إذا كان الاتصال بين آلات فإن الإرسال الرقمي مناسب لكي يستعمل بدون التحويل الرقمي التماثلي .

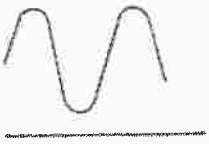
ولإيضاح حالة الإشارة في نظام إرسال الإشارة التماثلي نرى في الشكل (٢-٥) حالة إشارة تماثلية عند نقاط مختلفة من النظام في الجزء (أ) التيار الناتج بعد محول الطاقة والذي يمثل الرسالة الأصلية والجزء (ب) شكل الموجة بعد إضافة تيار الإزاحة وفي الجزء (جـ) تغير القدرة البصرية الداخلة إلى الليف البصري ، وفي الجزء (د) تغير القدرة البصرية عند نهاية الليف بعد تعرضها للفقد في مقرن المدخل والوصلات الدائمة والتوهين في الليف . شكل التيار الخارج من الكاشف موضح بالجزء (هـ) أما الجزء (و) فيمثل التيار بعد الترشيح والتضخيم.



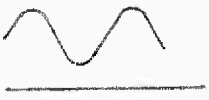
(أ) تيار يمثل الرسالة الأصلية



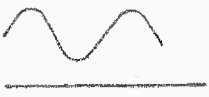
(ب) تيار خرج المشكل



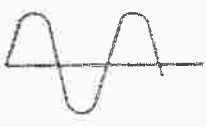
(جـ) تغير القدرة البصرية
عند مدخل الليف



(د) تغير القدرة البصرية
عند نهاية الليف



(هـ) شكل موجة التيار خارج
الكاشف الضوئي



(و) التيار بعد الترشيح
والتضخيم

الشكل (٢-٥) الإشارات عند نقاط مختلفة من نظام تماثلي

ي - محول طاقة المخرج Output Transducer

يتولى محول طاقة المخرج تحويل الإشارة الكهربائية بعد تضخيمها وترشيحها إلى شكلها الأصلي . فلو كانت الإشارة الأصلية المرسلة صوت فإننا نستخدم المجهار loudspeaker لتحويل التيار الكهربائي إلى صوت نتمكن من سماعه أما إذا كانت الإشارة الأصلية المرسلة صورة فنستخدم أنبوبة الأشعة المهبطية لتحويل التيار إلى صورة نستطيع مشاهدتها كالتلفزيون .

أما إذا كانت الإشارة المنقولة كهربائية كالتخاطب بين الحواسيب وأجهزة القياس الكهربائية ، فإننا نستخدم الإشارة بشكلها الكهربائي وتوزع الرسالة بواسطة موصلات كهربائية دون استخدام محول طاقة المخرج .

٢ - ٣ أنواع الألياف البصرية Types of Optical Fibers

يتعين على مهندسي الاتصالات التعرف على أنواع الألياف البصرية وخصائصها قبل التوصية باستخدامها في التطبيقات المختلفة ، لذا لابد من إعطاء نبذة موجزة عن الألياف البصرية الموجودة حالياً :

أ - الياف متعددة النمط وبمعامل انكسار عتبي

Multimode Step Index Fibers

يتألف الليف البصري من جزئين أساسيين هما لب الليف والذي يشغل مركز الليف يحيط به كساء يضاف لذلك طبقة واقية تسمى الغلاف .

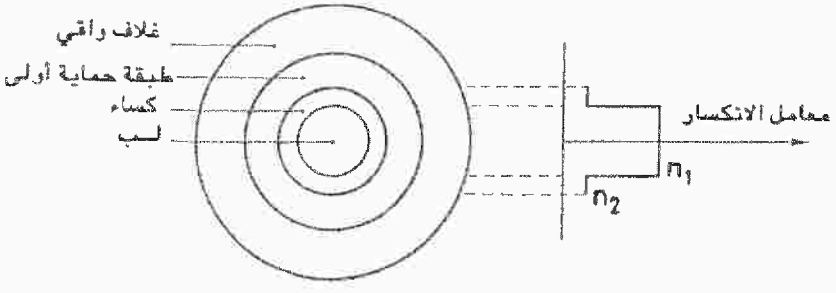
يصنع هذا النوع من الألياف البصرية من عناصر مختلفة من الزجاج ومركباته أو من السليكا المطعمة . تتميز هذه الألياف بكبر قطر اللب وكبر فتحة النفوذ العددية والتي تمكن من دخول كمية كبيرة من الضوء لليف البصري، خاصة عند استخدام الثنائيات الباعثة للضوء (LEDs) . وتعتمد خواص هذه الألياف على نوع الليف والمواد المصنع

منها وطريقة التصنيع.وتعتبر الألياف المصنعة من السليكا المطعمة أفضل الألياف البصرية، وفي الشكل (٢-٦) نرى مقطعاً لليف بصري بأجزائه المختلفة والمكونة من اللب والكساء والطبقات الواقية وتتغير قيمة معامل الانكسار عبر الليف البصري حيث نلاحظ أن أعلى قيمة له هي في اللب وتقل قيمته في الكساء .

يعطي الجدول (٢-٢) مواصفات الأجزاء المختلفة لهذا النوع من الألياف .

قطر اللب	50- 400μm
قطر الكساء	125-500μm
قطر الغلاف الواقي	250-1000μm
فتحة النفوذ العددية	0.16 - 0.5

الجدول رقم (٢ - ٢)



الشكل رقم (٢-٦)مقطع نموذجي
لليف بصري متعدد النمط ومعامل إنكسار عتبي

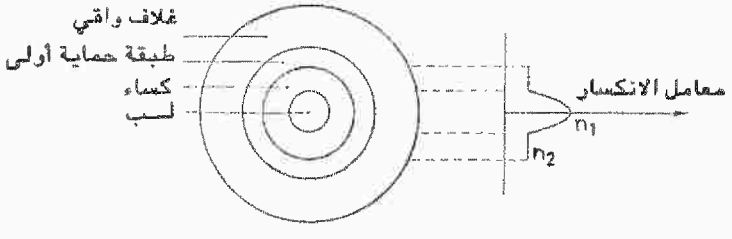
ويتراوح توهين هذه الألياف بين 4dB/km و 50dB/km وذلك حسب المواد المصنعة منها الألياف والطول الموجي المستخدم ، أمـــا عـــرض النطاق فيتـــراوح بـــين 6 MHz- km و 25 MHz - km وتستخدم لنقل المعلومات لمسافات قصيـــرة وعرض نطاق محدود ، غير أن تكلفتها قليلة .

ب - الياف متعددة النمط وبمعامل انكسار متدرج

Multimode Graded Index Fibers

معامل انكسار هذه الألياف متدرج إذ تبلغ أعلى قيمة له في مركز الليف وتقل قيمة معامل الانكسار بصفة تدريجية كلما اتجهنا نحو الكساء حيث تكون قيمة معامل الانكسار ثابتة ويصنع هذا النوع من الألياف من عدد من العناصر الزجاجية أو السليكا المطعمة . وقد تصنع هذه الألياف من مواد ذات نقاوة أعلى من تلك التي تصنع منها الألياف متعددة النمط وبمعامل انكسار عتبي حتى يقل فقد الليف البصري .

إن أداء الألياف متعددة النمط ومتدرجة معامل الانكسار يتفوق على أداء الألياف متعددة النمط ذات معامل الانكسار العتبي نظراً لتدرج معامل الانكسار وقلة التوهين فيها غير أن قطر اللب في الألياف متعددة النمط ومتدرجة معامل الانكسار أقل من قطر اللب في الألياف متعددة النمط ذات معامل الانكسار العتبي ، غير أن القطر الكلي بما فيه الطبقة الواقية متساو في كلتا الحالتين.وهذا يعطي الليف البصري مقاومة أكثر للثني ونرى في الشكل (٢-٧) مقطعاً نموذجياً لهذا النوع من الألياف .



الشكل (٢-٧) مقطع نموذجي لليف متعدد النمط
بمعامل انكسار متدرج مصنوع من الزجاج

وفي الجدول (٢-٣) أقطار الأجزاء المختلفة لليف وفتحة النفوذ العددية

قطر اللـــب	30- 60μm
قطر الكساء	100-150μm
قطر الغلاف الواقي	250-1000μm
فتحة النفوذ العددية	0.2 - 0.3

الجدول رقم (٢ - ٣) أقطار أجزاء الليف وفتحة النفوذ العددية

لابد من الإشارة هنا إلى أن القطر القياسي للب المستخدم في الاتصالات البعيدة هو 50μm ، والقطر القياسي للكساء المستخدم في الاتصالات البعيدة هو 125μm

ويتراوح توهين هذه الألياف بين 2dB/km و 10dB/km وعرض النطاق من 150MHz- km وحتى 2GHz - km وتستخدم للمسافات المتوسطة وعرض نطاق متوسط إلى عالي مع الثنائيات الباعثة للضوء LEDs وثنائيات الليزر على التوالي .

جـ - الياف احادية النمط Single Mode Fibers

قد يكون معامل إنكسار الليف متعدد النمط متدرج أو عتبي ولكن معظم الألياف أحادية النمط الموجودة حالياً ذات معامل إنكسار عتبي . تتميز الألياف أحادية النمط بنوعيتها الممتازة كما أن عرض النطاق فيها كبير وتستعمل للمسافات الطويلة وتصنع من مادة السليكا المطعمة لتقليل التوهين .

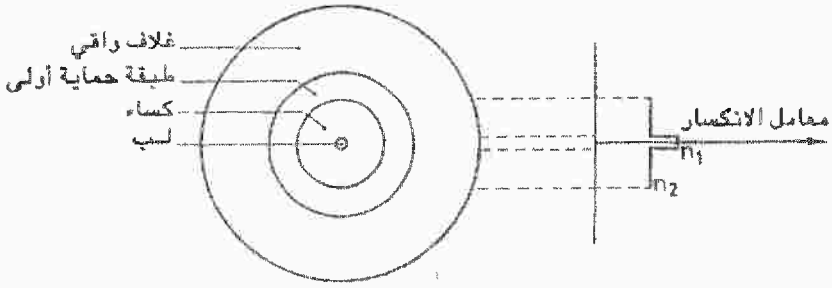
ولو أن قطر اللب صغير جداً إلا أن قطر الكساء يبلغ أضعاف قطر اللب وذلك للتقليل من نسبة الفقد من الموجات المضمحلة evanescent التي تمتد داخل الكساء. ومع استخدام الغلاف الواقي يصبح القطر الإجمالي لليف أحادي النمط مساوٍ إلى قطر

ليف متعدد النمط . ونرى في الشكل (٢-٨) مقطعاً لليف من هذا النوع . وفي الجدول (٢-٤) أبعاد الليف أحادي النمط وفتحة النفوذ العددية .

قطر اللب	3- 10μm
قطر الكساء	50-125μm
قطر الغلاف الواقي	250-1000μm
فتحة النفوذ العددية	.08 - 0.15

الجدول رقم (٢ - ٤) أقطار ليف أحادي النمط

وفتحة النفوذ العددية

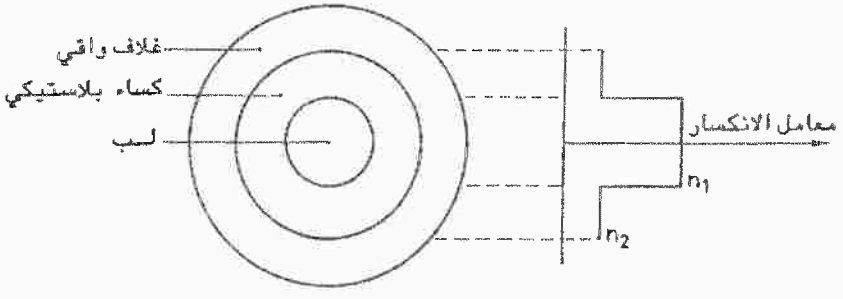


الشكل (٢-٨) ليف أحادي النمط بمعامل إنكسار عتبي

يبلغ توهين هذه الألياف 2-5 dB/km عند طول موجي $\lambda = .85\,\mu$ m .
ويمكن الحصول على توهين أقل عند أطوال موجية أعلى ، كما أن عرض النطاق يزيد عن 500MHz-km ويستخدم في الخطوط الطويلة ذات سعة النطاق العالية والمنبع الضوئي المستخدم في الإرسال من نوع ثنائي الليزر الحاقن injection laser diode .

د - الياف بكساء بلاستيكي Plastic Clad Fibers

عادة ماتكون هذه الألياف متعددة النمط وبمعامل انكسار متدرج أو عتبي يصنع اللب من الزجاج والكساء من المطاط السليكوني silicone rubber يقل فقدها الإشعاعي عن مثيلتها المصنعة من السليكا بالكامل ، لذا فإن انجازها يتحسن في بعض المواقع كما أن سعرها أقل ، وفي الشكل (٢-٩) مقطع لهذا الليف ، وفي الجدول (٢-٥) نذكر أبعاد الليف وفتحة نفوذه العددية .



الشكل (٢-٩) مقطع لليف بصري لبه من السليكا وكساءه من البلاستيك

قطر اللـــب	معامل انكسار عتبي معامل انكسار متدرج	100- 500μm 50- 100μm
قطر الكساء	معامل انكسار عتبي معامل انكسار متدرج	300-800μm 125- 150μm
قطر الغلاف الواقي	معامل انكسار عتبي معامل انكسار متدرج	500-1000μm 250- 1000μm
فتحة النفوذ العددية	معامل انكسار عتبي معامل انكسار متدرج	.5 - .2 .3 - .2

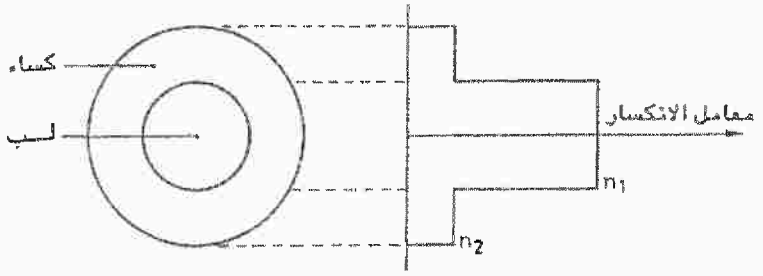
الجدول رقم(٢-٥)أبعاد الليف الزجاجي بغلاف بلاستيكي وفتحة النفوذالعددية

يتراوح توهين الليف بمعامل انكسار عتبي بين 5-50 dB/km وتوهين الليف بمعامل انكسار متدرج 4-15 dB/km. أما عرض النطاق لليف بمعامل انكسار عتبي فهو 5-25MHz km وعرض النطاق لليف بمعامل انكسار متدرج 200 -400 MHz-km.

تستعمل هذه الألياف إذا كان عرض النطاق قليلاً ومسافات النقل قصيرة وتمتاز عن الألياف ذات الكساء الزجاجي بسهولة الترصيل .

هـ - الياف بلاستيكية All Plastic Fibers

جميع الألياف البلاستيكية متعددة النمط وذات معامل انكسار عتبي وأقطارها كبيرة ولايستخدم فيها غلاف واقي لكبر حجمها . سعرها رخيص ويسهل التعامل معها وفتحة النفوذالعددية كبيرة غير أن فقدها كبير ويحد هذا من استخدامها في الاتصالات. وفي الشكل (٢-١٠) مقطع لهذا الليف ، وفي الجدول (٢-٦) أبعاد الليف البلاستيكي وفتحة النفوذ العددية .



الشكل (٢-١٠) مقطع لليف بصري من البلاستيك

قطر اللـب	200- 600μm
قطر الكساء	450 -1000μm
فتحة النفوذ العددية	0.5 - 0.6

الجدول رقم (٢ - ٦)

قطر الليف وفتحة نفوذه العددية

يبلغ التوهين عند طول موجي $\lambda = 0.65\mu m$. 350-1000dB/km .
وعرض النطاق قليل جداً حيث لاتستخدم هذه الألياف إلا لعشرات الأمتار كالاستخدام المنزلي ونحوه .

٢ - ٤ ميزات الألياف البصرية Advantages of Optical Fibers

قبل أن نتطرق إلى ميزات الألياف البصرية لابد من الإشارة إلى أن هناك قيوداً إقتصادية وتقنية لابد من اعتبارها قبل اختيار نظام الليف البصري ولابد من دراسة أنظمة الاتصالات السلكية واللاسلكية ومقارنة مزايا ومساوىء كل نظام من الأنظمة ، ولم يأتي اختيار الألياف البصرية عبثاً بل هناك أسباباً كثيرة لهذا الاختيار وسنتطرق في هذا البند

إلى هذه الميزات ، ولابد من الإشارة إلى أن هناك مساوىء للألياف البصرية كارتفاع تكلفة الموصل البصري وكبر فقده وصعوبة توصيل الألياف ببعضها وبالمنبع والكواشف الضوئية مقارنة بالأنظمة السلكية الأخرى. ولكن هذه المساوىء لاتقلل من أهمية الألياف البصرية للاتصالات للميزات الكثيرة التي سنذكرها وهي :

١ - عرض نطاقها عال جداً .

٢ - قطرها صغير ووزنها خفيف .

٣ - لايوجد تداخل بينها مهما قربت المسافة بينها .

٤ - لا تتأثر بالحث أو التداخل الكهرومغناطيسي.

٥ - انخفاض في سعر تكلفة المكالمات.

٦ - أكثر أماناً وسلامة .

٧ - حياتها طويلة .

٨ - تتحمل درجات حرارة عالية ولاتتأثر بالمواد الكيميائية.

٩ - سهولة الصيانة كما يمكن الاعتماد عليها .

وسنشرح الآن الفوائد الرئيسية للألياف البصرية :-

١ - إن عرض النطاق المرتفع جداً يعني إمكانية نقل معلومات عالية جداً بواسطة ليفه بصرية واحدة وقد تكون هذه المعلومات صور تلفزيونية أو مكالمات هاتفية أو معلومات للحواسيب أو مزيج منها . وقد أثبتت التجارب إمكانية نقل معلومات بمعدل (10 Gb/s) ولمسافة ٨٠ كم بدون مكررات repeaters مستخدمين الطول الموجي 1310nm ومرسلات ثنائي الليزر laser diode ومستقبلات الثنائي الضوئي الجرفي(avalanche photodiode(APD أما عند استخدام النبضات الطبيعية solitons فقد تم إرسالها لمسافة ١٥٠٠٠كم بمعدل معطيات 5Gb/s باستخدام تعدد الإرسال بتقسيم الزمن time division multiplexing (TDM) ومعدل معلومات 10Gb/s عند استخدام تعدد الارسال بتقسيم الطول

الموجي wavelength division multiplexing (WDM)
والأبحاث مستمرة في أنحاء العالم للحصول على أنظمة تعمل بمعدل معلومات أعلى ولمسافات أطول.

من الناحية النظرية فإن عرض نطاق ليفه بصرية واحدة هو 10^4 GHz ، فلو فرضنا أن المسافة بين المكررات تبلغ 100 km فإن هذا يعني إمكانية نقل المعلومات المذكورة في الجدول (٢-٧) وهي معلومات أقرب للخيال منها للواقع، وبإمكاننا أن نضع مجموعة منها ضمن كابل واحد ، وهذا بالطبع يعني منبعا لاينضب من وسائل نقل المعلومات . ويتناسب عرض النطاق تناسباً طردياً مع أعلى معدل لنقل المعلومات أو سعة نقل المعلومات Information carrying capacity.

نوع القناة	عدد القنوات	معدل الإرسال
قناة صوتية	160مليون قناة	64kb/s
معلومات	1 بليون	9.6 kb/s
قناة تلفزيونية	200 ألف قناة	44 Mb/s

الجدول (٢ - ٧)

٢ - قطرها صغير ووزنها خفيف ، يبلغ سمك الليفة البصرية سمك الشعره ، وعلى الرغم من أن هناك طبقات واقية توضع فوقها إلا أنها لاتزال أقل حجماً ووزنا من الأسلاك الهاتفية أو المحورية ومثالاً على ذلك أن ليف بصري بقطر يبلغ 125 µm ضمن كابل يبلغ قطره ٦ ملم يمكن له أن يحل محل كابل هاتفي قطره ٨ سم ويحتوي على ٩٠٠ زوج من الخطوط السلكية النحاسية وهذا يعني أن الحجم قد انخفض بنسبة تزيد عن ١ : ١٠ وكمثال آخر على صغر حجم الكابلات البصرية فإن كابلات محورية بطول ٢٣٠ متر وقطر ٤٦ سم وتزن ٧ طن كانت

تستخدم في نظام رادار متقدم على ظهر أحد السفن تم استبدالها بكابلات بصرية تزن ١٨ كغم وقطرها ٢,٥ سم.

مما سبق يتضح لنا إمكانية إضافة كابلات بصرية في نفس مسارات الكابلات النحاسية والمحورية في شتى مجالات الاتصالات السلكية .

ونظراً لهذه الميزة فقد تم استبدال الكابلات النحاسية في كثير من الطائرات والبواخر بألياف بصرية . وبسبب صغر الحجم وقلة الوزن فإن نقلها وتركيبها يتم بصورة أسهل وأسرع من الكابلات النحاسية وهذا يعني تكلفة أقل.

٣ - نلاحظ أحياناً عند إجراء محادثة هاتفية سماع أصوات محادثات هاتفية أخرى وهو مايطلق عليه باللغط وهذا النوع من التداخل لايحدث عند استخدام الألياف البصرية مهما قربت المسافة بينها.

٤ - تتمتع الألياف البصرية لكونها مصنعة من مواد عازلة dielectrics بعدم تأثرها بالحث الكهرومغناطيسي الصادر من المصادر الكهرومغناطيسية الصناعية كالمحركات والمولدات والأجهزة الكهربائية المختلفة أو الطبيعية كالبرق وتلك الخاصية تغنينا عن وضع مواد عازلة لحمايتها من الحث induction والتداخل interference .

٥ - تصنع معظم الألياف البصرية في وقتنا الحاضر من مادة السليكا الموجودة بكثرة في الرمل والتي يقل سعرها كثيراً عن معدن النحاس الذي بدأ ينفذ في أماكن كثيرة من العالم ، ونظراً للميزات التي ذكرناها في البنود ٢,١ فإن ثمن نقل المعلومات بأنواعها المختلفة سيقل عن الأنظمة المختلفة الأخرى .

٦ - نظراً لأن الضوء هو الوسط الناقل للمعلومات في الألياف البصرية ولايولد هذا الضوء أي مجال مغناطيسي خارج الكابل فإن من الصعوبة بمكان التجسس ومعرفة المعلومات التي يحويها الكابل البصري كما أن من الصعوبة معرفة وجود الكابل البصري بسبب المادة المصنع منها ولايوجد جزء معدني إلا في بعض الحالات حيث تتم إضافة كابل فولاذي لتقوية الكابل البصري . أو تسليح معدني لحماية الكابل من القوارض والأحمال الخارجية .

أما الميزة الأخرى فهي سلامة الألياف البصرية لأن الضوء هو الناقل ولايمكنه أن يحدث شرراً أو دائرة قصر لعدم وجود تيار كهربائي فيه ولهذا السبب يمكن استخدام الألياف البصرية في المحلات الحاوية على غازات أو مواد قابلة للإحتراق ومستودعات المواد الخطرة كما أن احتمال كهربة العاملين في الألياف البصرية غير وارد .

٧ - يتوقع أن يكون عمر الألياف البصرية في حدود ٢٥ عام مقارنة بخمسة عشر عام للنظم الأخرى حيث أن المكونات الأساسية للألياف هي الزجاج والذي لايصدأ على عكس النظم الأخرى والتي تحوي على معادن تتعرض للصدأ .

٨ - يمكن للزجاج أن يتعرض لدرجات حرارة متفاوتة من حيث الانخفاض والارتفاع كما يمكن استخدامه في أجواء تحتوي على مواد كيميائية مختلفة دون أن يتعرض للتلف.

٩ - أثبتت التجارب التي أجريت حديثاً إمكانية وضع المكررات repeaters على مسافة ١٠٠ كم بين مكرر وآخر وهذا يقلل من عدد المكررات وبالتالي من صيانة النظم كما يزيد من الاعتماد على النظام لقلة الأجهزة المستخدمة بينما المسافة بين المكررات في النظام الهاتفي المستخدم حاليا تتراوح بين ٤ إلى ٦ كم .

٢ - ٥ استخدام الألياف البصرية Applications of Optical Fibers

تعرضنا في القسم السابق إلى فوائد الألياف البصرية ، ومما لاشك فيه أن كثيراً من الحقول في المجالات المدنية والعسكرية بدأت تستفيد من هذه الفوائد ومن الصعب جداً التعرض لكل المجالات الممكن استخدام الألياف البصرية فيها وسنقوم في هذا القسم بالتعرض لبعض الاستخدامات العامة، وأهم الاستخدامات للألياف البصرية هي :

أ - الإتصالات الهاتفية Telephone Communications

لعبت الأسلاك المجدولة والكابلات المحورية دوراً كبيراً في السنوات الماضية في مجال الاتصالات الهاتفية وبصفة خاصة بين البدالات ، وحيث أن أحد الصفات الهامة هي سعة الألياف البصرية ، فقد بدأت كثير من الشركات بالتفكير في بناء خطوط هاتفية جديدة وإحلال بعض الخطوط القديمة سواء كانت أسلاك مجدولة أو كابلات محورية وأول خط تجاري يستخدم الألياف البصرية في الولايات المتحدة بدأ تشغيله في ٢٢ أبريل ١٩٧٧م وقد استخدم الإرسال الرقمي في هذا الخط ، كما أن المكررات كانت على مسافة ٣ر٦ كيلومتر واستخدمت الثنائيات الباعثة للضوء light emitting diodes في أجهزة الارسال وثنائيات الضوء الجرفية avalanche photodiodes في أجهزة الاستقبال وكانت سعة هذا الخط ٢٤ مكالمة آنية وقد استخدم تشكيل الرمز النبضي pulse code modulation في هذا الخط . وتلا ذلك إنشاء عدد كبير من الخطوط الهاتفية في أنحاء العالم بلغت سعة بعضها حوالي ٢٦٥٦٢ مكالمة هاتفية يمكن تنفيذها في وقت واحد .

ب - الإتصالات التلفزيونية TV Communications

بدأ أول استخدام للألياف البصرية بربط الكاميرات التلفزيونية بسيارات النقل التلفزيوني وفي الدوائر المغلقة ثم استخدمت في إيصال الخدمات التلفزيونية للمنازل وقد استخدمت لنقل قناة واحدة فقط وتستخدم الآن لنقل عشرات القنوات التلفزيونية والفيديو

ضمن نظام الكابل التلفزيوني cable television (CATV) .

جـ - محطات القوى Power Stations

نظراً لعدم تأثر الألياف البصرية بالتداخل أو الحث الناتج عن المولدات الكهربائية أو خطوط الضغط العالي فقد تم تركيب الألياف البصرية في محطات القوى الكهربائية لنقل المكالمات الهاتفية ونقل المعلومات ، كما تم تركيبها جنباً إلى جنب مع خطوط الضغط العالي لنقل المعلومات data transmission والسيطرة control .

د - الشبكات المحلية Local Area Networks

يطلق هذا الأسم على شبكات الاتصالات المستخدمة لتبادل المعلومات بين الحاسبات والمستخدمين وهذه الشبكات تكون في نطاق جغرافي محدود كمكاتب الشركات أو الجامعات أو المستشفيات أو غيرها ومجالاتها مابين ١٠٠ متر إلى ١٠ كم وسعة نطاقها فوق المليون بتة/ ثانية وهناك عدة تكوينات لهذه الشبكات نذكر منها الشبكة الحلقية والنجمية وغيرها .

هـ - الاستخدامات العسكرية Military Applications

بدأ أول الاستخدامات العسكرية للألياف البصرية في السفن والطائرات الحربية نظراً للميزات التي ذكرناها وبصفة خاصة قلة الوزن والحجم. ثم تلا ذلك استخدامها في ميادين المعارك حيث خفة الوزن وصغر الحجم وسهولة النقل ، أمور هامة في مثل هذا الوضع ، كما تم استخدامها في الخطوط الأمامية في جبهات القتال .

و - استخدامات متفرقة Other Applications

ذكرنا بعض الاستخدامات الهامة للألياف البصرية وحيث أن من الصعوبة التطرق لكل الاستخدامات الممكنة لابد من ذكر بعض منها :

أ - الاستخدامات الطبية (المناظير الطبية بكافة أنواعها).

ب - قياس درجات الحرارة عن بعد .

جـ - قياس المجالات المغناطيسية الخطرة .

د - مصانع البتروكيماويات والمصافي.

هـ - الكابلات البحرية .

٢ - ٦ التوجهات المستقبلية Future Trends

شهد حقل البصريات الليفية fiber optics تطوراً مذهلاً خلال السنوات الخمس الماضية لم يتوقعه حتى العاملون في المجال كان التركيز في هذا التطور هو الحصول على أجهزة وشبكات ذات كفاءة عالية بتكلفة أقل وتطويع البصريات الليفية لتوائم أنظمة الاتصالات القائمة وتبسيط التعامل مع نظم الألياف البصرية وكنتيجة للأبحاث الدؤوبة فقد برزت مجالات جديدة سيكون لها تأثير كبير على انتشار هذه التقنية وهي :

أ - مضخمات الألياف المطعمة بالأربيوم .

ب- الدوائر الفوتونية المتكاملة .

جـ - ألياف مصنعة من زجاج الهالايد Halide Glass .

د - استخدام النبضات الطبيعية Solitons

هـ - زيادة عدد مكونات الدوائر المتكاملة لتزيد عن مليون مكوّنة لكل رقاقة.

و - الحصول على منابع ضوئية بتردد واحد .

وقد انشئت خطوط ألياف بصرية تنقل المعلومات بمعدل يصل إلى 2.4Gb/s وهناك خطط لزيادة هذا المعدل سواء تحت البحر أو على اليابسة كما أن مضخمات الألياف المطعمة بالأربيوم ستغني عن المضخمات الالكترونية والمكررات ويصبح نقل المعلومات لآلاف الكيلومترات ممكناً بدون مكررات ، ويفتح استخدام النبضات الطبيعيـــة

آفاقاً جديدة لم تكن معروفة في السابق ، وسيمكن إرسال المعلومات بمعدلات عالية جداً لآلاف الكيلومترات دون مكررات أو معالجة .

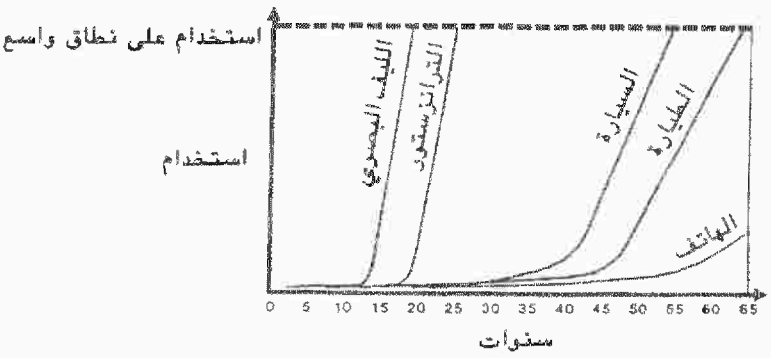
وستتركز الاستخدامات المستقبلية على :

(١) تكوين شبكات إتصال ذكية وذات سعة عالية تربط القارات مع بعضها .
(٢) ربط المكاتب الرئيسية مع بعضها كالشركات الكبرى والبنوك وما إلى ذلك .
(٣) ايصال الخدمات للمنازل.
(٤) التوسع في استخدام الشبكات المحلية وشبكات المناطق الواسعة بكافة أنواعها .
(٥) استخدام أجهزة تبديل switching سريعة .
(٦) تحسين تعدد الإرسال واستخدام تعدد تقسيم الطول الموجي.
(٧) استخدام المكونات الفوتونية .

٢ - ٧ الخلاصة Summary

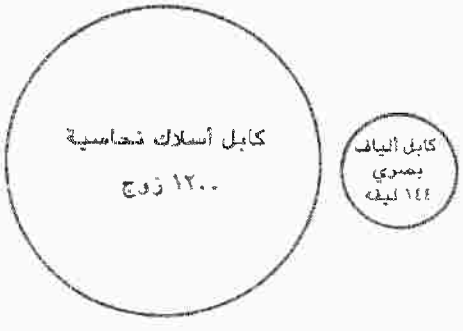
استعرضنا في هذا الفصل التطور التاريخي لإستخدام الاتصالات البصرية الموجهة والتي بدأت بتجربة جون تايندل التي أثبتت إمكان توجيه الضوء إذا وجد الوسط المادي المناسب. لكن الثورة الحقيقية في مجال الاتصالات البصرية بدأت عند اكتشاف الليزر عام ١٩٦٠. ولم يبدأ التفكير العملي باستخدام الألياف البصرية إلا عند اكتشاف ألياف زجاجية بفقد يصل إلى 20 dB/km عام ١٩٧٠ . وبدأت التجارب لاستخدامها عام ١٩٧٦ ووصلت الخدمة التجارية عام ١٩٧٧ وقد تطور استخدامها مع الزمن بشكل يفوق كثير من الاكتشافات الأخرى كما هو في الشكل (٢-١١).

ونظراً لاختلاف مكونات الاتصال عبر الليف البصري عن الأنظمة الالكترونية فقد تطرقنا للمكونات الأساسية ودورها في النظام وضرورة تحويل الاشارات الكهربائية إلى ضوئية حتى نتمكن من الإرسال عبر الليف البصري وبمعرفة أسلوب انتقال الموجات الضوئية وخصائص الألياف البصرية فقد وجدت أنواع كثيرة من الألياف البصرية يستخدم



الشكل (٢-١١) تطور الاستخدام مع الزمن

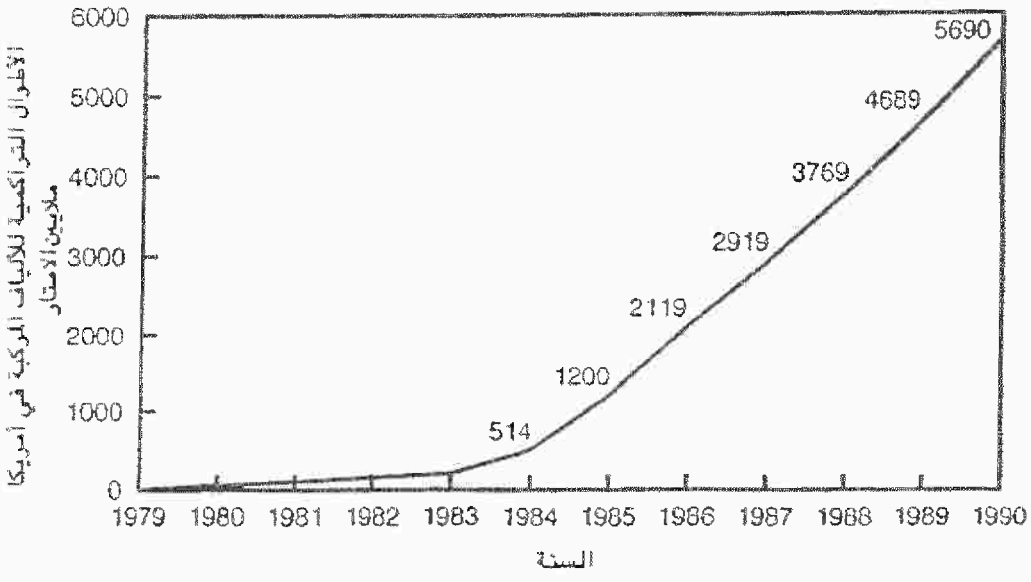
كل منها لغرض معين ، وقد استعرضنا الأصناف الشائعة والموجودة بشكل تجاري وهناك أنواع خاصة سنشرحها فيما بعد . ولم يأت استخدام الألياف البصرية عبثاً بل بسبب الميزات الكثيرة التي تتمتع بها مما جعلها تتفوق على الاتصالات السلكية الأخرى ، ونورد في الشكل (٢-١٢) مقارنة بين كابل بصري وآخر نحاسي. إذ تبدو فيه مقارنة الحجم وسعة كل كابل وعدد القنوات الصوتية التي يستطيع كل منهما أن يمرره .



	كابل أسلاك نحاسية	كابل ألياف بصري	معامل الميزه البصري
معدل المعلومات R	1.2 Gb/s	6.2 Mn/s	180
مسافة المكررات D	50 km	1.5 km	33.3
RX D	56000	9.3	6020
عدد القنوات الصوتية	1.161.216	57600	20.2

(٢-١٢) مقارنة بين كابل ألياف بصري وكابل أسلاك نحاسي

وقد شاع استخدام الألياف البصرية في معظم الاتصالات السلكية وبدأت تحل محل كثير منها ، وأصبحت تنافس الاتصالات اللاسلكية بعيدة المدى كالاتصالات عبر السواتل الفضائية ، وكدليل على التوسع في استخدام الألياف البصرية نورد في الشكل (٢-١٣) أطوال كابلات الألياف البصرية المركبة في الولايات المتحدة الأمريكية ونلاحظ ازدياد الكابلات المركبة في السنوات القليلة الماضية والتي تعدت خمسة ملايين كيلومتر .



الشكل (٢-١٣) كابلات الألياف البصرية المركبة في الولايات المتحدة على مدى سنوات

واختتمنا هذا الفصل باستعراض التطورات المستقبلية المبنية على اكتشافات حديثة تمت في السنوات القليلة الماضية والتي سيؤدي تطبيقها العملي إلى تغير جذري في مفهوم الاتصالات الحديثة .

الفصل الثاني

أسئلة

١ - هل تعتقد أن إنتشار شبكات الاتصالات البصرية سيلغي دور السواتل، علل ذلك؟

٢ - ماهي المكونات الأساسية لليف البصري وهل يمكن الحصول على ليف بدون كساء ولماذا ؟

٣ - ماهي السمات الرئيسية التي أدت إلى قلة تكلفة نظم الاتصالات البصرية؟

٤ - ما السبب في تأخر إستخدام الألياف البصرية في الاتصالات ؟

٥ - أذكر بعض إستخدامات الألياف البصرية في غير مجال الاتصالات؟

٦ - ماهي أوجه التشابه والفرق بين نظم الاتصال عبر الليف البصري ونظم الاتصالات الأخرى.

٧ - أذكر أنواع الألياف البصرية.

٨ - لماذا نستخدم ألياف بمعامل انكسار متدرج.

٩ - أذكر ثلاثة أنواع من الألياف البصرية حسب نوع مادة التصنيع؟

١٠- ماذا يحدث عندما يكبر لب الليف أو يصغر؟

١١- أذكر خمس ميزات للألياف البصرية ؟

الفصل الثالث

أسس الموجات الضوئية

الفصل الثالث

أسس الموجات الضوئية

Lightwave Fundamentals

سنتحدث في هذا الفصل عن أسس الموجات الضوئية وبصفة خاصة مايتعلق بمجال الألياف البصرية والثنائيات الباعثة للضوء وأشعة ليزر وكاشفات الضوء وسنتجنب ما أمكن الدخول في المعادلات الرياضية ومحاولة عرض الموضوع بصورة مبسطة ، وسيلاحظ القاريء الكريم أن بعض الموضوعات المطروحة في هذا الفصل قد تكون مألوفة لديه لأنها مشمولة في مناهج المرحلة الثانوية .

٣-١ طبيعة الضوء Nature of Light

لقد حاول علماء الطبيعة عبر القرون الماضية إيجاد تفسير علمي لظاهرة الضوء من خلال نماذج مبسطة يمكن التعامل معها وقد برزت نظريات عديدة لتفسير هذه الظاهرة ومحاولة التعرف على كيفية انتشاره وامتصاصه واختراقه لبعض الأوساط المختلفة .

ومن أوائل من تعرف على طبيعة الضوء هو العالم المسلم الحسن بن الهيثم الذي دحض النظريات القديمة السائدة قبله بأكثر من ألف عام وقال بأن الضوء عبارة عن كمية فيزيائية لها صفاتها وخصائصها ولاتزال هذه النظرية هي السائدة حتى الآن ،وتـــلا ذلك نظريات أخرى استخدمت لتفسير طبيعة الضوء وهي :

٣-١-١ نظرية الجسيمات الدقيقة Corpuscular Theory

تقول هذه النظرية إن الضوء مكون من أجسام كروية صغيرة جداً ومرنة تسير بسرعة عالية جداً وتختلف سرعتها تبعاً للوسط الذي تخترقه ، وتتحرك تلك الجسيمات الدقيقة في خطوط مستقيمة وأول من ابتدع هذه النظرية هو العالم الانجليزي اســحـــاق نيوتـــن وقد استند في نظريته هذه على أن زاوية السقوط تساوي زاويـــة الانعكاس في حالة

الضوء على سطح عاكس . وتشير هذه النظرية إلى أن سرعة الضوء تزداد في الوسط الكثيف عنه في الوسط الخفيف وهو مخالف للوضع العملي و العلمي وقد فشلت هذه النظرية في تفسير ظواهر طبيعية كثيرة كالانكسار والتداخل والانعراج والاستقطاب . بعدها بدأت نظريات أخرى أكثر قرباً للواقع العلمي والعملي . وقد تفسر بعض الظواهر بإحدى هاتين النظريتين أو بكليهما . وسنقوم بشرحهما بايجاز فيما يلي .

٣-١-٢ نظرية الموجات الكهرومغناطيسية Electromagnetic Wave Theory

من خلال تجارب عديدة وجد أن الضوء لايتصرف كحزمة من الفوتونات بل على شكل موجات كهرومغناطيسية وأول من تحدث عن هذه النظرية هو العالم الانجليزي ماكسويل ، وتحتوي هذه الموجات الكهرومغناطيسية على حقلين متذبذبين ومتعامدين على بعضهما البعض أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي ، وباستخدام هذه النظرية يمكن تفسير انتشار وانتقال الضوء ضمن الأجواء المختلفة . وعند محاولة تفسير طبيعة الضوء لابد من استخدام نظريتي الفوتونات والموجات الكهرومغناطيسية ولابد من أن نذكر هنا أن أي نظرية من هذه النظريات لاتستطيع لوحدها أن تفسر كافة الظواهر الضوئية .

إن التعامل مع الضوء كموجة وكجسم يساعدنا على فهم البصريات الليفية فعندما نتحدث عن صفات الألياف البصرية التي تتغير مع الطول الموجي فإننا نستخدم الموجة وعندما نتحدث عن انبعاث الضوء من المصدر أو امتصاصه من قبل الكاشف نستخدم نظرية الجسيم particle theory .

أ - طول موجة الضوء Wanelength of Light

ذكرنا آنفا أن الضوء عبارة عن موجات كهرومغناطيسية فإذا كان الأمر كذلك فلابد إذاً من تردد لهذا الضوء وطول موجي . وفي مجال البصريات غالبا مايستخدم

الطول الموجي بدلا من التردد والذي يستخدم كثيراً في مجالي الألكترونيات والاتصالات.

يقاس الطول الموجي إما بالمايكرومتر micrometer ويساوي 10^{-6} m أو بالانجستروم angstrom ويساوي 10^{-10} m.

والطول الموجي يرتبط بالتردد f من خلال المعادلة التالية :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.1)$$

حيث أن v هي سرعة الضوء في الوسط المادي وترتبط بسرعة الضوء في الفضاء c بالمعادلة التالية :

$$v = \frac{c}{n} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.2)$$

و n هي معامل الانكسار للوسط المادي وتعتمد قيمته على الطول الموجي للضوء وفي الاتصالات البصرية نستخدم منابع ضوئية تصدر الأشعة تحت الحمراء والألياف البصرية تصنع من السليكا المنصهرة والتي ينخفض فيها معامل الانكسار مع ازدياد الطول الموجي ، ونرى في الجدول (٣-١) معامل الانكسار وسرعة الضوء في بعض المواد.

المادة	معامل الانكسار	سرعة الضوء (كم/ثانية)
الفراغ	1.0	300 000
الهواء	1.0003	300 000
الماء	1.33	225 000
السليكا المنصهرة	1.46	205 000
الزجاج	1.5	200 000
زرنيخ الجاليوم	3.35	89 500
سليكون	3.5	88 000
جرمانيوم	4.0	75 000

الجدول (٣-١) معامل الانكسار وسرعة الضوء في بعض المواد

ب - سرعة الضوء Speed of Light

شأن الموجات الضوئية كشأن سائر الموجات الكهرومغناطيسية إذ تسير في الفضاء بسرعة عالية جداً تصل إلى 300000000 m/s ويعبر عنها بالمعادلة التالية :

$$C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \mu_o}} = 3 \times 10^8 \quad m/s \quad \ldots\ldots\ldots (3.3)$$

حيث أن ε_o معامل سماحية الفراغ الحر permittivity و μ_o معامل نفاذية الفراغ الحر permeability وقيمهما التقريبية هي 8.85×10^{-12} Farad / meter و 411×10^{-7} Weber/Ampere – meter على التوالي.

وفي الوسط المادي تتغير قيم $\in$ و μ فتتغير تبعاً لذلك سرعة الضوء في الوسط المادي ويعبر عن معامل الانكسار في الوسط المادي بالعلاقة التالية :

$$n = \sqrt{\mu_r \in_r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.4)$$

حيث أن سماحية ونفاذية الوسط المادي $\in$ و μ يرتبطان بسماحية ونفاذية الفضاء بالعلاقتين الآتيتين :

$$\in_r = \frac{\in}{\in_o}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

وتسمى $\in_r$ السماحية النسبية relative permittivity و μ_r النفاذية النسبية relative permeability .

يعبر عن سرعة الضوء في الوسط المادي بالتالي :

$$V = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \in_r}} = \frac{c}{n} \quad \ldots\ldots\ldots (3.5)$$

٣-١-٣ - نظرية الفوتونات Photon Theory

تقول هذه النظرية إن الضوء عبارة عن سيل من الجسيمات الكهرومغناطيسية والتي تتحرك بسرعة فائقة يطلق عليها فوتونات وعلى الرغم من تسميتها بالجسيمات إلا أنها لاتشبه الجسيمات المادية ، إذ أنها تنطلق بسرعة فائقة ولكن كتلتها تساوي صفراً في حالة السكون وبدلا من إطلاق كلمة جسيمات على الفوتونات يفضل إطلاق حزم ضوئية وأول من أخذ بهذه النظرية هو العالم الأمريكي ألبرت اينشتاين إذ افترض أن الطاقة في الحزمة الضوئية تسير خلال الفراغ في شكل حزم مركزه أطلق عليها اسم الفوتونات photons ، وطاقة الفوتون W_p يعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$W_p = hf \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.6)$$

إذ تمثل f تردد الضوء وh ثابت بلانك $= 6.626 \times 10^{-34}$ J.S وتستخدم هذه النظرية لإيضاح انبعاث وامتصاص الضوء وبصفة خاصة مايتعلق بالتأثيرات الكهروضوئية كالثنائيات الباعثة للضوء أو الكواشف الضوئية والحزمة الضوئية تحتوي على عدد كبير من الفوتونات كما نرى في المثال التالي :

ماهو عدد الفوتونات في الثانية الساقطة على كاشف ضوئي إذا كانت القدرة هي واحد ميكروواط وطول موجة الضوء 1.3 μm ؟

من المعادلة (3.1) و(3.6) نجد أن الطاقة للفوتون الواحد عند $\lambda = 1.3\ \mu$

$$W_p = hf = h\frac{c}{\lambda} = 6.626 \times 10^{-34} \times \frac{3 \times 10^8}{1.3 \times 10^{-6}} = 15.3 \times 10^{-20}\ J$$

وحيث أن القدرة هي معدل تسليم الطاقة لذا فإن الطاقة الكلية هي :-

$$W = Pt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.7)$$

ولو ضربنا القدرة (μ w) بالفترة الزمنية وهي ثانية واحدة نجد أن الطاقة الناتجة هي (1 μJ) فيكون عدد الفوتونات اللازمة للحصول على طاقة مقدارها (1 μJ) مايلي :

$$\frac{w}{wp} = \frac{\text{الطاقة الكلية}}{\text{طاقة كل فوتون}} = \frac{10^{-6}\ J}{15.3 \times 10^{-20}\ J/\ photon} = 6.5 \times 10^{12}\ \text{photons.}$$

نلاحظ من هذا المثال العدد الهائل للفوتونات التي ترد إلى الكاشف خلال ثانية واحدة ، وحيث أن زمن الاستقبال يقاس بجزء بسيط من الثانية مثلاً (1 μsec) ، نجد أن عدد الفوتونات الواردة في هذا الزمن الضئيل تساوي 6.5×10^{6} فوتون وتوجد مستقبلات قادرة على اكتشاف فوتونات قليلة نكيف. بهذا العدد الهائل منها ، ولابد من الإشارة هنا إلى أن هناك وحدة أخرى تستخدم لقياس الطاقة الحركية التي يكتسبها الإلكترون عندما يعجل بفرق جهد مقداره واحد فولت هي إلكترون فولت ev ويعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$1ev = 1.6 \times 10^{-19}\ J\ .$$

لذا فإن طاقة الفوتون الوارد في المثال السابق هي :

$$\frac{15.3 \times 10^{-20}}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.96\ ev.$$

٣ - ٢ طيف التردد البصري Optical Frequency Spectrum

تشغل الموجات البصرية حيزاً يقع بين الموجات الصغرية والأشعة السينية كما هو موضح في الشكل (٣-١) وتشمل مناطق ثلاث ، وهي :

١ - فوق البنفسجية ونطاق أطوال موجاتها قصير ولايمكن للعين البشرية أن تراها وأطوال موجاتها تتراوح بين 50 إلى 3900 أنجستروم ، من 6×10^{16} إلى 7.69×10^{14} هيرتز وهي موضحة بالشكل (٣-٢) .

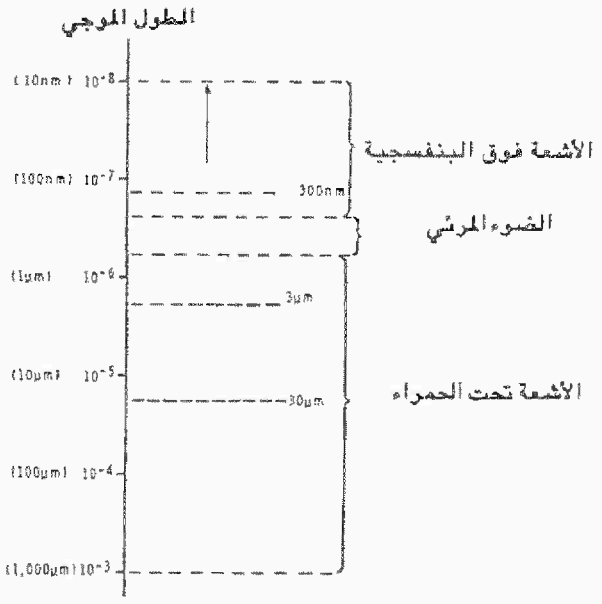
٢ - المرئية وهي الموجات التي يمكن للعين البشرية أن تراها وأطوال موجاتها من 3900 إلى 7500 أنجستروم وترددهامن 7.69×10^{14} و 3.9×10^{14} هيرتز وهي موضحة بالشكل (٣-٣).

٣ - تحت الحمراء ونطاق طول موجاتها طويل لايمكن للعين البشرية أن تراها ويتراوح طول موجاتها من 7500 إلى 000 000 40 أنجستروم وترددها من 4×10^{14} إلى 7.5×10^{10} هرتز وهي موضحة بالشكل (٣-٢).

يمكن للعين البشرية أن ترى اللون البنفسجي والذي طول موجته يساوي 4300 انجستروم في جانب من الطيف الكهرومغناطيسي واللون الأحمر والذي طول موجته يساوي 6800 أنجستروم على الجانب الآخر من الطيف. وتقع بين هذين اللونين ألوان عديدة كالأزرق والأخضر والأصفر والبرتقال ، كما هو موضح في الشكل (٣-٣). وعندما يكون لشعاعين ضوئيين نفس طول الموجة يقال أن لهما نفس اللون وبالعكس فعندما يكون هناك شعاعين ضوئيين لهما نفس اللون فيقال أن لهما نفس طول الموجة .

الشكل (٣-١)

موقع الطيف البصري في الطيف الكهرومغناطيسي



الشكل (٣-٢) الطيف البصري

الشكل (٣-٣) الطيف المرئي

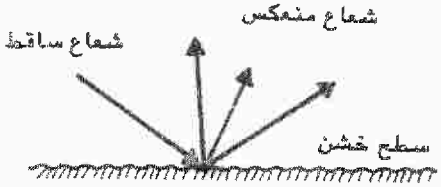
٣ - ٣ إنعكاس الضوء Reflection of Light

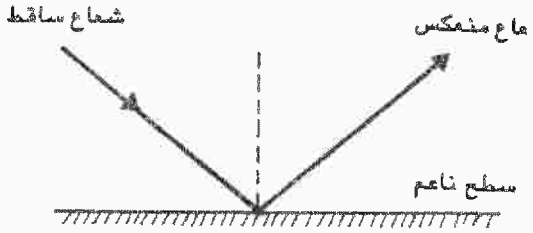
عندما يسقط الضوء على سطح فاصل بين وسطين فإن جزءاً من هذا الضوء سينعكس في نفس الوسط الذي سقط فيه ، أما الجزء الآخر فإنه يخترق الوسط الثاني عبر سطح الانفصال حيث يمر الضوء تماماً أو لايكون للوسط الثاني أي تأثير يذكر عندئذ يطلق على الوسط على أنه شفاف transparent ،مثل الزجاج والماء والهواء وبعض المنتجات البلاستيكية . وتعتبر الألياف البصرية المستخدمة للاتصالات من أفضل المواد الشفافة .أما إذا امتص الوسط الثاني الضوء فإن هذا الوسط يعتبر معتماً وقد تكون بعض الأوساط شفافة ولكن بزيادة سمكها تصبح معتمة، وهو مانلاحظه على شواطىء البحر، إذ يكون الماء شفافاً عند الساحل ويزداد عتمه كلما تعمقنا أكثر . وبعض المواد تسمح بمرور جزء من الضوء وتصعب الرؤية من خلالها وتسمى نصف شفافة translucent وتتوقف نسبة ماينعكس على طبيعة السطح العاكس .

عندما يسقط الضوء على سطح مصقول فإن انعكاسه سيكون منتظماً أي أنه سينعكس باتجاه معين بالنسبة لاتجاه زاوية السقوط كما في الشكل (٣-٤) أما إذا كان السطح الساقط عليه الضوء خشناً فإن الشعاع المنعكس سيكون غير منتظم ويسمى بالانعكاس المشتت diffuse كما في الشكل رقم (٣-٥) والانعكاس المشتت هو الذي يمكننا من رؤية كافة الأجسام المرئية في حياتنا اليومية .

نرى في الشكل (٣-٦) شعاع ساقط وآخر منعكس وعند إلتقاء الشعاع بالسطح العاكس يوجد خط متعامد على السطح العاكس وفي هذا الشكل نرى أن زاوية السقوط، وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والخط العمودي تساوي زاوية الانعكاس ، وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع المنعكس والخط العمودي .

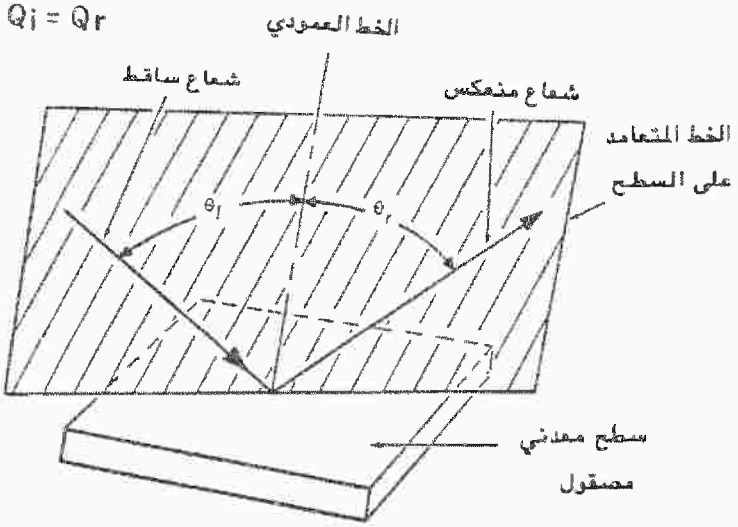
كما أن الشعاع الساقط والشعاع المنعكس والعمود على السطح العاكس تقع جميعاً في مستوى واحد عمودي على السطح العاكس .





الشكل (٣-٥) انعكاس من سطح خشن

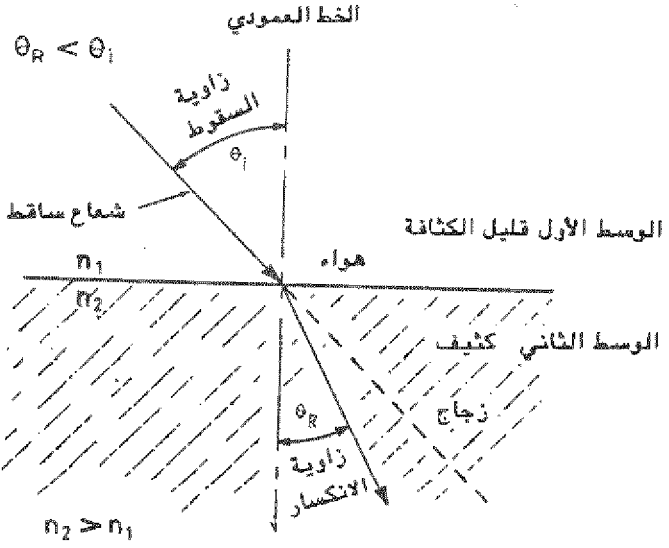
لشكل (٣-٤) انعكاس من سطح ناعم



الشكل (٣-٦) الأشعة المنعكسة

٣-٤ انكسار الضوء Refraction of Light

إذا مر شعاع من وسط شفاف متجانس إلى آخر فإن هذا الضوء سينكسر عند السطح الفاصل بين الوسطين ولابد من الإشارة هنا إلى أن بعض الضوء سينعكس ولكن لن نقوم بمناقشة ذلك في هذا البند وسنركز على الضوء الذي يخترق الوسط الثاني ونرى في الشكل (٣-٧) الشعاع الساقط والشعاع المنكسر والخط المتعامد على السطح الفاصل بين الوسطين عند نقطة إلتقاء الضوء بالسطح الفاصل بينهما .



الشكل (٣-٧) الشعاع المنكسر في الزجاج

ونلاحظ في حالة الانكسار مايلي :

١ - النسبة بين جيب زاوية السقوط $\sin\theta_i$ (الزاوية بين الشعاع الساقط والعمود على سطح الانفصال عند نقطة السقوط) ، وجيب زاوية الانكسار $\sin\theta_r$ (الزاوية بين الشعاع المنكسر والعمود على السطح الفاصل عند نقطة السقوط) ثابتة للوسطين أياً كانت زاوية السقوط ويعبر عن هذه العلاقة بالمعادلة التالية :

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_r \qquad (3.8)$$

وتسمى هذه العلاقة بقانون سنل Snell وتمثل n_1 معامل انكسار الوسط الأول و n_2 معامل انكسار الوسط الثاني ، ويوضح الجدول رقم (٣-٢) معامل انكسار بعض المواد .

المـــــــادة	معامل الانكسار
هواء	1
ثاني أوكسيد الكربون	1
كحول الإيثيل	1.36
ماء	1.33
سيليكا منصهرة	1.46
زجاج	1.5
بوليستيرين	1.59
سيليكون	3.5
جرمانيوم	4
ياقوت أزرق	1.8
الكالسيت (كربونات الكالسيوم المتبلورة)	1.6
كلورايد الصوديوم	1.54
فلورايد المغنيزيوم	1.38
كبريتيد الزنك	2.3
زرنيخ الجاليوم	3.35
زرنيخ جاليوم الألومنيوم	3.6

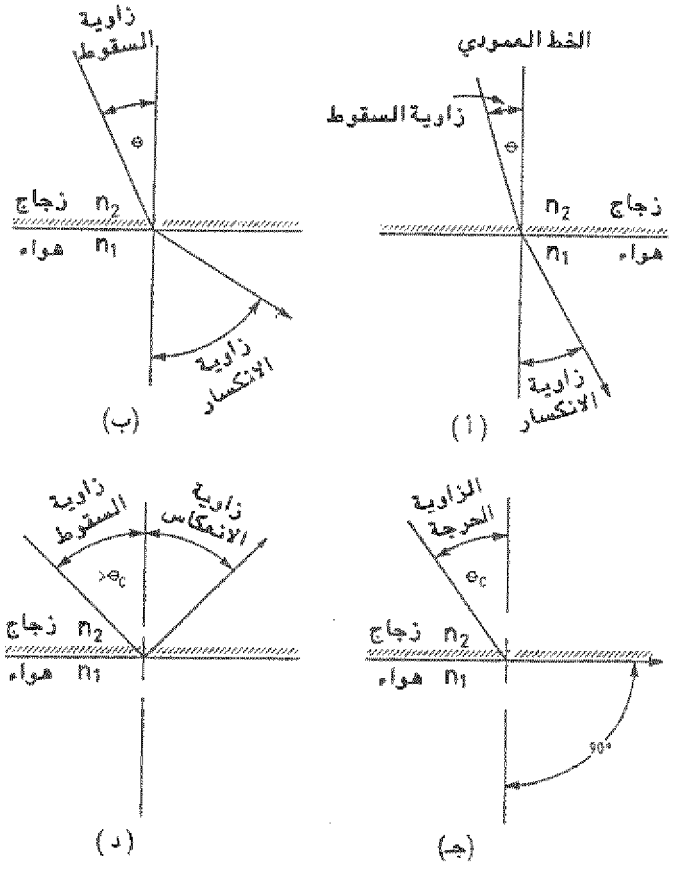
الجدول (٣ -٢) معامل انكسار أوساط مختلفة

٢ - الشعاع الساقط والشعاع المنكسر والعمود على السطح الفاصل بين الوسطين عند نقطة السقوط تقع جميعاً في مستوى واحد عمودي على السطح الفاصل .

عندما تحدثنا عن الانكسار افترضنا أن الضوء يتجه من وسط معين إلى وسط أكثر كثافة منه ويمكن للضوء أن يتجه من الوسط الكثيف إلى وسط أقل كثافة إذ يمكننا أن نستخدم العلاقة (3.8) طالما أن الأشعة الساقطة ترمز إلى الوسط الأقل كثافة والأشعة المنكسرة إلى الوسط الأكثر كثافة .

لنفرض أن شعاعاً ضوئياً اتجه من وسط كثيف أي بمعامل انكسار عال إلى وسط أقل كثافة أي أن معامل انكساره أقل فإن هذا الشعاع لن ينكسر إذا سقط على السطح الفاصل بين الوسطين إذا كانت زاوية السقوط تساوي أو أكبر من زاوية معينة تسمى الزاوية الحرجة critical angle وبدلا من ذلك فإنه سينعكس عند السطح الفاصل بين الوسطين وتسمى تلك بظاهرة الانعكاس الداخلي الكليtotal internal reflection. حيث أن الشعاع الساقط على السطح الفاصل بين الوسطين قادم من وسط كثيف إلى وسط أقل كثافة فإن زاوية الانكسار ستزداد، أي أن الشعاع المنكسر سيبتعد عن الخط العمودي على السطح الفاصل كما هو في الشكل (٣-٨ أ).

وكلما زادت زاوية السقوط ، فإن الشعاع المنكسر سيقترب من السطح الفاصل بين الوسطين ، الشكل (٣-٨ ب) .وعند زيادة زاوية السقوط فإن الشعاع المنكسر سيصل إلى حد يوازي فيه السطح الفاصل بين الوسطين (الشكل (٣-٨ جـ) وزاوية السقوط هذه يطلق عليها الزاوية الحرجة ويرمز لها بـ θ_C عندها تكون قيمة زاوية الانكسار 90 درجة ، ولو عوضنا عن ذلك في المعادلة (3.8) نحصل على الآتي :-



الشكل (٣ – ٨) مراحل زاوية السقوط الحرجة

$$n_2 \sin\theta_i = n_1 \sin 90$$

وحيث أن $\sin 90$ يساوي واحد فإن

$$\sin \theta_i = \frac{n_1}{n_2}$$

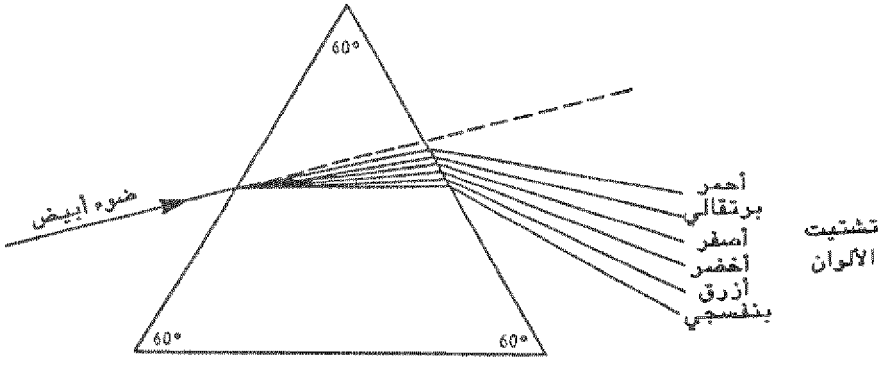
في هذه الحالة $\theta_i = \theta_c$ إذاً

$$\sin \theta_c = \frac{n_1}{n_2} \qquad \text{..... (3.9)}$$

لذا فإن أي شعاع ساقط تزيد زاوية سقوطه عن الزاوية الحرجة سوف ينعكس إلى داخل الوسط عند الحد الفاصل بين الوسطين على فرض أن الشعاع الساقط متجه من الجهة الكثيفة إلى الأقل كثافة كما هو في الشكل (٣-٨ د) .

٣ - ٥ التشتيت Dispersion

عندما تحدثنا عن الهواء فرضنا أن الضوء أو شعاع الضوء مكون من طول موجة واحدة وأن سرعة هذه الموجة v في وسط معامل انكساره n تساوي $\frac{c}{n}$ ، غير أن الواقع خلاف ذلك ففي الزجاج المكون للألياف البصرية نجد أن لهذه الظاهرة شأن كبير عند انتقال الموجات الضوئية في الألياف البصرية وأبسط الأمثلة على التشتيت هو مرور شعاع ضوئي أبيض كأشعة الشمس ، مثلا ، من خلال موشور زجاجي فإننا نرى أن هذا الضوء سيتفرق إلى ألوان مختلفة يرمز كل لون إلى طول موجة معينة كما هو في الشكل رقم (٣-٩) .



الشكل (٣- ٩) تشتيت الضوء بواسطة موشور زجاجي

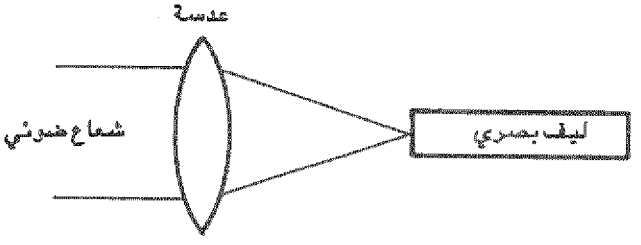
٣ - ٦ الإنحراج Diffraction

نستخدم علم البصريات الهندسية geometrical optics أو بصريات الشعاع

ray optics لتفسير انتشار الضوء في خطوط مستقيمة وبالتالي فإنه لايضيء إلا الأجسام التي في طريق المسار المستقيم وقد لوحظ أن اصطدام الضوء في حافة حادة كموس الحلاقة مثلا أو مرور الضوء من خلال فتحة مستطيلة ضيقة فإن هذا الضوء سيحيد عن مسار الخط المستقيم في كلا الحالتين وسنرى أن الضوء ينتشر على جانبي الفتحة المستطيلة ويزداد الانحراف كلما ضاقت الفتحة وتسمى هذه الظاهرة بالانعراج diffraction .هناك نوعان من الانعراج أحدهما يسمى إنعراج فرسنل Fresnel diffraction وفي هذه الحالة يكون المنبع قريبا من الفتحة والشاشة التي يسقط عليها الشعاع قريبة أيضاً من الفتحة وواجهةالموجات wave fronts الساقطة على الشاشة وتلك التي تترك الفتحة ليست واجهات مستوية ، أما إذا تحرك المصدر والشاشة إلى مسافة بعيدة عن الفتحة فإن واجهات الموجات الساقطة ستكون مستوية والأشعة المصاحبة لها متوازية وتعتبر هذه الحالة خاصة من حالات انعراج فرسنل ويطلق عليها إنعراج فرانهوفر Fraunhofer diffraction .

ونرى في بعض الكتب تسمية أخرى لهذين الانعراجين يطلق على انعراج فرسنل بانعراج الحقل القريب near field diffraction وانعراج فرانهوفر بانعراج الحقل البعيد far field diffraction ، ومن الظواهر الواجب دراستها في مجال الألياف البصرية هو تأثير الانعراج على تركيز وانتقال الضوء .

تتميز الألياف البصرية بصغر حجمها مما يدعونا إلى استخدام عدسة لتركيز الضوء في قلب الليفة كما في الشكل (٣-١٠).



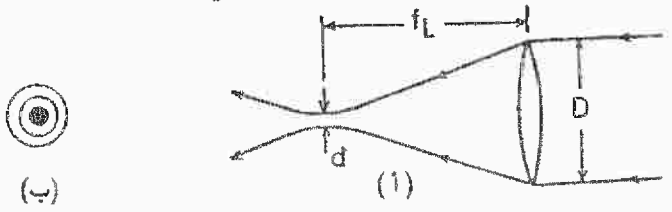
الشكل (٣-١٠) استخدام العدسة لتركيز الضوء

عند تركيز الضوء سنرى نقطة ضوئية في الوسط محاطة بحلقات ضوئية تقل شدة اضاءتها كلما ابتعدنا عن المركز وقطر النقطة المركزية .

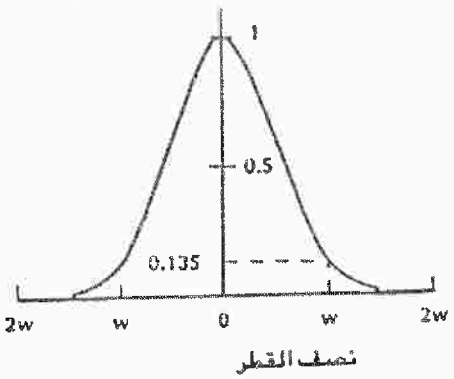
$$d = \frac{2.44\,\lambda\,f_L}{D} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (3.10)$$

حيث أن λ هي طول الموجة ، f_L البعد البؤري للعدسة و D قطر العدسة ، والشكل (٣-١١) يوضح ذلك ، ولإعطاء القاريء الكريم فكرة عن قطر هذه النقطة لنفرض أن $f_L = 2D$ وطول الموجة يساوي 1 μ m فإن قطر النقطة باستخدام المعادلة (3.10) سيساوي 4.88 μ m بينما نحتاج في بعض الاستخدامات إلى تركيز الضوء لأقل من ذلك كما هو في البصريات المتكاملة Integrated Optics .

لو أخذنا مقطعاً عرضياً لضوء صادر من ليزر غازية أو ثنائي باعث للضوء لوجدنا أن توزيع شدة الضوء في هذا المقطع سيكون كما هو في الشكل (٣-١٢) .



الشكل (٣ - ١١)(أ) تبئير شعاع ضوئي حسب نظرية الانحراف
(ب) توزيع الضوء في المستوى البؤري



الشكل (٣-١٢) التوزيع الجاوسي لشدة الإضاءة

ويسمى هذا التوزيع بتوزيع جاوس ويعبر عنه رياضياً بالتالي :

$$I = I_0 \, e^{-2r^2/w^2} \qquad (3.11)$$

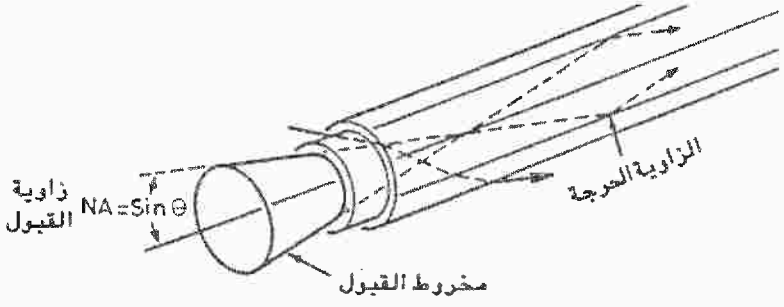
حيث أن $e = 2.718$ ، I_0 شدة الإضاءة في المركز ($r = 0$) و r هي المسافة من المركز ، ومن المتعارف عليه أن عرض نقطة شعاع الضوء من نوع جاوس W هي عندما تصبح شدة الضوء $\frac{1}{e^2}$ من شدته في المركز ونصف القطر هذا يعطينا حجم نقطة الضوء.

٣ - ٧ فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture

تستخدم العدسات في نظم الاتصالات البصرية لتجميع الضوء وتركيزه لنقوم بايصاله إلى ليفة بصرية أو إلى كاشف ضوئي وفي مجموعهما نحصل على نظام تجميع جيد للضوء وتستخدم لهذا الغرض تسمية فتحة النفوذ العددية للتعبير عن قدرة أي نظام بصري لتجميع الضوء بما فيها الألياف البصرية وتستخدم لهذا الغرض المعادلة التالية :

$$\text{Numerical Aperture NA} = n_0 \sin\theta \qquad (3.12)$$

حيث تمثل n_0 معامل انكسار الوسط الفاصل بين العدسة وكاشف الضوء في حالة استخدام كاشف ضوئي أو ليفة بصرية كما هو في الشكل (٣ - ١٣) والزاوية θ هي زاوية القبول القصوى maximum acceptance angle



الشكل (٣-١٣) مخروط وزاوية القبول

عندما يكون الهواء هو الوسط الفاصل بين العدسة والليفة البصرية أو الكاشف الضوئي فإن :

$$NA = \sin \theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.13)$$

وزاوية القبول θ لها علاقة بقطر الكاشف الضوئي أو الليفة البصرية d وبالبعد البؤري f_L في حالة استعمال عدسة حيث أن $\tan \theta = \frac{d}{2f_L}$

ويمكن التعبير عن θ بالمعادلة التالية :

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_o}}$$

حيث أن n_1 معامل انكسار اللب و n_2 معامل انكسار الكساء .

٣ - ٨ الإستقطاب Polarization

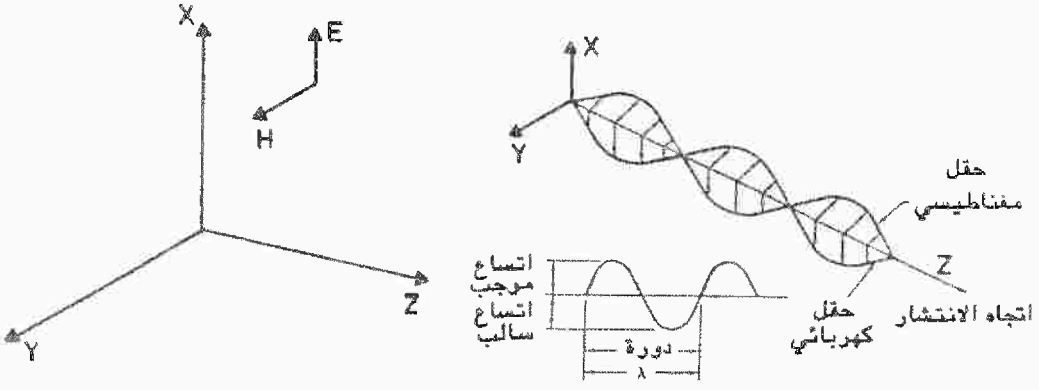
يتكون الضوء حسب نظرية ماكسويل من موجات كهرومغناطيسية . تتعامد فيها مركبات الحقل الكهربائي مع الحقل المغناطيسي ونرى في الشكل (٣-١٤) علاقة مركبة الحقل الكهربائي electric field vector مع اتجاه حركة الموجة حيث أن الموجة تتحرك باتجاه z وحركة الحقل الكهربائي باتجاه x ويطلق على مثل هذا المجال بأن استقطابه خطي إذ أنه يشير دائماً إلى اتجاه واحد .

ونرى دائماً أن اتجاه مركبة الحقل متعامد دائماً على حركة اتجاه الموجة إذا كان الوسط غير محاط unbounded medium وكما في الشكل (٣-١٤) فإن اتجاه E قد يكون باتجاه y مادام متعامداً على اتجاه حركة الموجة ويعتمد الاستقطاب على نوعية مصدر الضوء وبإمكان أكثر من موجة أن تسلك نفس السلوك في آن واحد وكل منها له استقطاب خاص بها ويطلق على كل موجة بأنها نمط mode .

يطلق على الموجة التي تتحرك فيها مركبة المجال في أي إتجاه بأنها موجة غير مستقطبة unpolarized wave وتمثل تلك الحالة معظم الموجات التي تمر خلال الألياف

البصرية.

وفي الألياف البصرية يمكن لعدة أنماط modes أن تسير خلالها وتلعب هذه الأنماط دوراً كبيراً عند تصميم نظم الاتصالات البصرية .



الشكل (٣-١٤) موجة تسير باتجاه Z ومركبة الحقل الكهربائي باتجاه X

٣ - ٩ الخلاصة Summary

قدمنا في هذا الفصل المبادىء الأساسية للموجات الضوئية . وبدأنا بشرح للنظريات التي تفسر ماهية الضوء وتصرف الضوء تحت ظروف مختلفة ، وأشرنا إلى القوانين التي تفسر هذا التصرف ، ورأينا أن موقع الموجات الضوئية يقع ضمن نطاق طيف واسع وهو الطيف الكهرومغناطيسي . بعد ذلك تم شرح مفاهيم الانعكاس والانكسار والانعراج والتشتيت وعلاقتها بمعامل الانكسار والطول الموجي وزوايا السقوط والانعكاس أو الانكسار ثم تطرقنا إلى فتحة النفوذ العددية وأهميتها في نظم الاتصالات بالإضافة إلى تقييم موجز عن استقطاب الموجات الضوئية .

الفصل الثالث

أسئلة

١ - ماهو الضوء وماهي النظريات التي استخدمت لتفسير طبيعته ؟

٢ - ماهو الفوتون وماهي الظاهرة الطبيعية التي تفسر بنظرية الفوتونات؟

٣ - إذا تضاعف التردد في الفراغ الحر ماذا سيحصل للطول الموجي؟

٤ - هل سرعة الضوء في الماء أكثر من سرعته في الفراغ الحر ولماذا ؟

٥ - أين تقع الأطوال الموجية التالية في الطيف الكهرومغناطيسي

$\lambda = 1000\ km$, $\lambda = 11\ cm$, $\lambda = .4\ \mu m$, $\lambda = 1.55\ \mu m$,

$\lambda = 0.82\ \mu m$, $\lambda = 10^{-11} m$, $\lambda = 1cm$

٦ - ماالفرق بين الإنكسار والإنعكاس ؟

٧ - ماالفرق بين الإنكسار والإنعراج ؟

مسائل

١ - أوجد سرعة الضوء في المواد التالية :

أ - ماء $n = 1.33$

ب - سيليكا $n = 1.46$

جـ - سليكون $n = 3.5$

د - ياقوت أزرق $n = 1.8$

٢ - احسب الزمن اللازم لوصول الضوء إلى نهاية ليف مصنوع من السيليكا طوله 500m ؟

٣ - أوجد الزمن اللازم لذهاب وعودة شعاع ضوئي إلى ساتل على إرتفاع 50km إذا كان الجو ملوثاً للخمسة كيلومترات الأولى فوق سطح الأرض ومعامل الانكسار

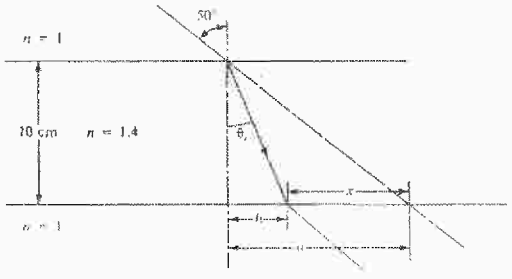
$n = 1.015$ أما المسافة بعد 5km فهي فراغ ؟

٤ - احسب طاقة الفوتون عند $\lambda = 0.5\mu m$, $\lambda = .82\mu m$, $\lambda = 13\mu m$, $\lambda = 155\ \mu m$؟
أيهما يملك طاقة أكبر فوتون الأشعة المرئية أم فوتون فوق البنفسجية؟

٥ - احسب عدد الفوتونات التي تصل كل ثانية إلى مستقبل إذا كانت القدرة 5 nw عند $\lambda = 0.82\ \mu m$؟

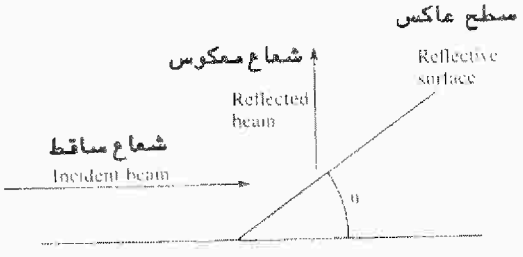
٦ - ارسم منحنى للعلاقة بين زاوية القبول وفتحة النفوذ العددية NA للمدى $0.1 < NA \leq 0.8$. افرض أن معامل انكسار الوسط الفاصل بين المنبع والليف $n_o = 1$ ؟

٧ - يمر الضوء في الشكل (٣-١٥) خلال لوح زجاجي. أوجد مقدار إنحراف الضوء X ؟



الشكل (٣-١٥)

٨ - ماهي الزاوية θ التي يكون فيها الضوء المنعكس عمودي على الضوء الساقط في الشكل (٣-١٦).



الشكل (٣-١٦)

٩ - احسب حجم البقعة المبأرة لحزمة ضوئية متوازية تسقط على عدسة قطرها 15mm وبعدها البؤري 25mm إذا كان الطول الموجي $\lambda = 1.3\ \mu m$ ؟

١٠- ارسم منحنى بياني لشدة شعاع جاوس مقابل البعد عن المحور إذا كان حجم البقة الجاوسية 1mm ؟

الفصل الرابع

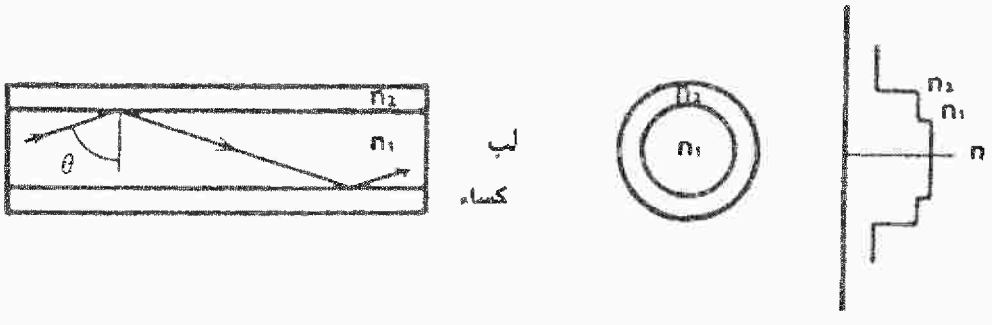
بنية وخصائص الألياف البصرية

الفصل الرابع
بنية وخصائص الألياف البصرية
Construction and Characteristics of Optical Fibers

يتكون الليف البصري من عنصرين أساسيين هما اللب يحاط بطبقة أخرى هي الكساء وتختلف قيمة معامل الانكسار في اللب عنها في الكساء ، ونستعرض في هذا الفصل البنية الأساسية للألياف متعددة النمط وأحادية النمط ذات معامل الانكسار العتبي أو المتدرج وخصائص انتشار الموجات خلالها وسندرس تأثير التوهين وأسباب الفقد فيها علاوة على الأنماط وسعة المعلومات.

٤-١ ليف بمعامل انكسار عتبي (ليف عتبي) Step Index Fiber

نرى في الشكل (٤-١) مقاطع متعددة لليف بصري بمعامل انكسار عتبي (ليف عتبي) حيث أن معامل الانكسار في لب الليف هو n_1 ومعامل الانكسار في الكساء n_2 وقيمة n_1 دائماً أكبر من قيمة n_2 حتى تنحصر الموجات البصرية داخل الليف .



(جـ) (ب) (أ)

الشكل (٤-١) ليف بمعامل انكسار عتبي (ليف عتبي)
(أ) مظهر جانبي لمعامل الانكسار (ب) منظر طرفي (جـ) مقطع جانبي

عند احضار منبع ضوء نقطي point source بالقرب من الليف البصري كما في الشكل (٤-٢) فإن جزءاً من الشعاع الساقط لن يتمكن من الانتشار داخل لب الليف لأن زاوية سقوطه θ تقل عن الزاوية الحرجة θ_C وتعطي الزاوية الحرجة θ_C بالعلاقة التالية:

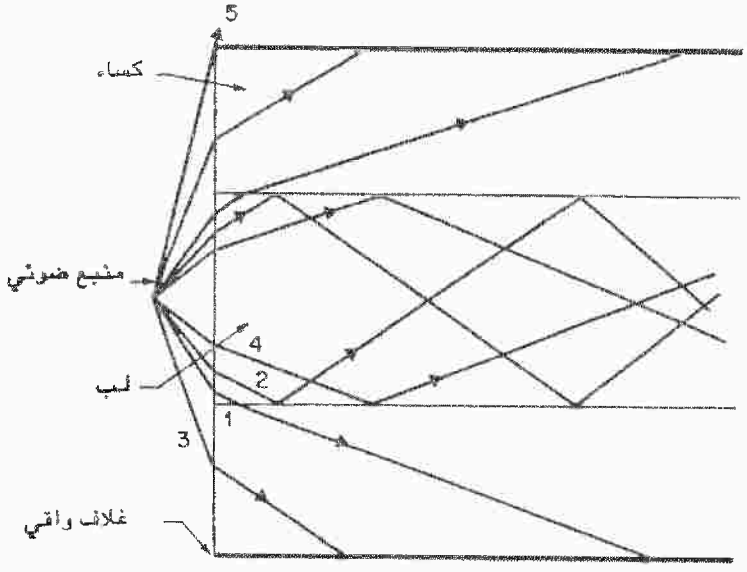
$$\sin \theta_C = \frac{n_2}{n_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.1)$$

حيث أن n_1 وn_2 يرتبطان بالعلاقتين الآتيتين :

$$n_2 = n_1 (1 - \Delta) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.2\ a)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.2\ b)$$

حيث أن Δ دائماً موجبة لأن n_1 يجب أن تكون دائماً أكبر من n_2 حتى تكون هناك زاوية حرجة تؤدي إلى الانعكاس الداخلي وبالتالي حصر الضوء داخل لب الليف البصري وتبلغ قيمة Δ النموذجية بحدود 0.01 ولو رجعنا إلى الشكل (٤-٢) لوجدنا أن الاشعاعات رقم 3 و5 تسقط على الكساء وتمتص أو تتبعثر على الغلاف الواقي وبذا لايستفـــاد منهـــا .



الشكل (٤ - ٢)

أما الشعاع رقم 1فإنه يسقط على اللب لكن زاوية سقوطه تقل عن الزاوية الحرجة θ_C فينتشر خلال الكساء ويتبعثر على الغلاف الواقي ، أما الاشعاعات رقم 2 و4 فإنها تحقق الشرط بأن زاوية سقوطها مساوية للزاوية الحرجة θ_C أو أكبر منها فتتمكن من الانتشار داخل لب الليف . لهذا السبب تبرز أهمية قيمة فتحة النفوذ العددية لأنها تساعد على معرفة كمية الشعاع الذي يمكن أن ينتشر في لب الليف.

لكي نتمكن من إرسال الشعاع لأطول مسافة ممكنة حتى يكون الإرسال ذو فعالية فإن الفقد في اللب والكساء يجب أن يكون قليلاً . وعلى الرغم من أن مخطط الشعاع في الشكل (٤-٢) يشير إلى انتشار الضوء كلياً داخل اللب إلا أن الواقع العملي غير ذلك إذ أن جزءاً من هذا الشعاع ينتشر داخل الكساء كموجات مضمحلة evanescent waves فإذا كان فقد الكساء قليلاً فلن يفقد الضوء المار فيه بل سينتشر في الليف. تتلاشى الموجات المضمحلة بسرعة لذا لن يصل أي منها إلى الغلاف الواقي إذا كانت سماكة الكساء بضع عشرات من الميكرونات كما هو الحال في الألياف المستخدمة والتي يصل قطر الكساء إلى 125 µm .

قد يتبادر إلى ذهن القاريء الكريم عن مدى الحاجة إلى وجود الكساء ولماذا لايستخدم اللب مباشرة طالما أن معامل انكسار الهواء المحيط يقل عن معامل انكسار اللب $(n_1 > n_2)$ ؟ والإجابة على هذا السؤال تتكون من شقين الأول منهما يتعلق بضرورة وجود الكساء لتقوية اللب وحمايته من المؤثرات الخارجية كالخدش والثني والتلوث أما العنصر الثاني فهو وجود الموجات المضمحلة مما يتطلب استخدام كساء فقده قليل حتى لايتسبب في فقد الموجات المنتشرة بالليف البصري للأسباب الآنف ذكرها . تم تصنيع عدة أنواع من الألياف ذكرناها في الفصل الثاني ، ونورد في الجدول (٤-١) صفات ثلاثة أنواع من الألياف متعددة النمط وذات معامل انكسار عتبي.

الجدول (٤-١) صفات ألياف متعددة النمط وذات معامل انكسار عتبي

بنية الليف	فتحة النفوذ العددية	الفقد عند * λ= 850nm	ارتباط النبض الظاهري والنمطي	معدل المعلومات	مسافة النقل
لب زجاجي وكساء زجاجي (عدة كيلومترات) All Glass	منخفضة .24	قليل 2.4dB/km	صغير	عال نوعاً ما	طويلة إلى حد ما
لب زجاجي وكساء بلاستيكي PCS	متوسطة .41	متوسط 8dB/km	متوسط	متوسط	قصيرة بضع مئات من الأمتار
لب بلاستيكي وكساء بلاستيكي All Plastic	كبيرة .53	مرتفع 270dB/km عند λ =790nm	مرتفع	منخفض	قصيرة جداً (بضع عشرات من الأمتار)

* تتغير قيمة الفقد بتغير الطول الموجي.

وفي الجدول رقم (٤-٢) نورد صفات ليف بصري لبه وكساؤه مصنوعان من الزجاج عالي النقاوة ويتراوح قطر اللب بين 5 µm و 10 µm أما الكساء فقطره 125 µm.

الجدول (٤-٢) صفات ليف بصري أحادي النمط بمعامل انكسار عتبي

بنية الليف	فتحة النفوذ العددية	الفقد	معدل المعلومات	مسافة النقل
لب زجاجي وكساء زجاجي	منخفضة ≤ 0.2	قليل جداً ≤.16 dB/km عند λ=1550nm	عال جداً 5G b/s وأكثر	عشرات إلى مئات الكيلومترات

٤ - ٢ ليف بمعامل انكسار متدرج (ليف متدرج) Graded Index Fiber

رأينا في البند السابق أن التغير بين معامل انكسار اللب ومعامل انكسار الكساء في الليف ذو معامل الانكسار العتبي يحدث بصورة فجائية وعلى شكل عتبة كما في الشكل (٤-١) أما في الليف ذو معامل الانكسار المتدرج (الليف المتدرج) فإن قيمة

معامل الانكسار تتغير تدريجياً داخل اللب حيث تبلغ أقصى قيمة لها عند محور الليف وتقل كلما ابتعدنا عن المحور كما هو واضح في الشكل (٤-٣) وان اختلف هذا الليف ببنيته الداخلية إلا أن تمريره للشعاع الساقط عليه لايختلف عن الليف البصري بمعامل الانكسار العتبي (الليف العتبي) step index (SI) ويمكن التعبير عن تغير معامل الانكسار في هذا النوع من الألياف بالمعادلات التالية :

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{2r}{a}\right)^{\alpha} \Delta} \qquad r \le a \quad \text{..... (4.3a)}$$

$$n(r) = n_1 \sqrt{(1 - 2\Delta)} = n_2 \qquad r > a \quad \text{..... (4.3b)}$$

حيث أن :

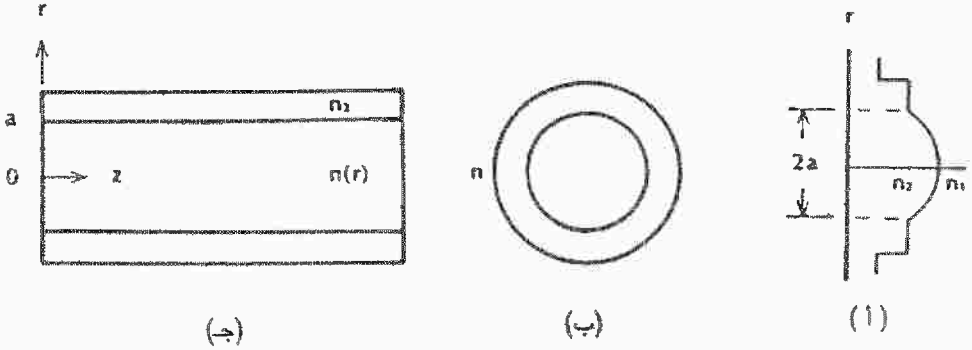
n_1 = معامل الانكسار عند محور الليف

n_2 = معامل انكسار الكساء

a = نصف قطر اللب

α = معلمة تصف تغير المظهر الجانبي لمعامل الانكسار

Δ = معلمة تحدد مقياس تغير المظهر الجانبي .



الشكل (٤ -٣) ليف بمعامل انكسار متدرج

(أ) مظهر جانبي لمعامل الانكسار (ب) منظر طرفي (جـ) مقطع عرضي

من المعادلة (4.3b) نرى أن Δ ترتبط مع معامل الانكسار n_1 و n_2 بالمعادلة التالية :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.4)$$

وعندما تكون قيمة n_1 قريبة جداً من n_2 عندها تكون ·

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

تعبر القيم التالية للثابت α عن تغير معامل الانكسار داخل اللب

$\alpha = 1$ عندما يكون المظهر الجانبي لتغير معامل الانكسار على شكل مثلث ·

$\alpha = 2$ عندما يكون المظهر الجانبي لتغير معامل الانكسار على شكل قطع مكافيء parabolic.

$\alpha = \infty$ عندما يكون المظهر الجانبي لتغير معامل الانكسار على شكل عتبة ·

تستخدم معظم الألياف المتدرجة تغير معامل الانكسار ذي القطع المكافيء أي أن $\alpha = 2$ ولو استخدمنا هذه القيمة في المعادلة (4.3a) فإنها تصبح كالتالي :

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\left(\frac{r}{a}\right)^2 \Delta} \quad \ldots\ldots\ldots (4.5)$$

وحيث أن $\Delta << 1$ يمكن كتابة المعادلة (4.5) على النحو التالي :

$$n(r) = n_1 \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \Delta\right) \qquad r \le a \; (4.6\,a)$$

$$n_2(r) = n_1 (1 - \Delta) \qquad r > a \; (4.6\,b)$$

يعبر عن فتحة النفوذ العددية NA لهذا النوع من الألياف بالآتي :-

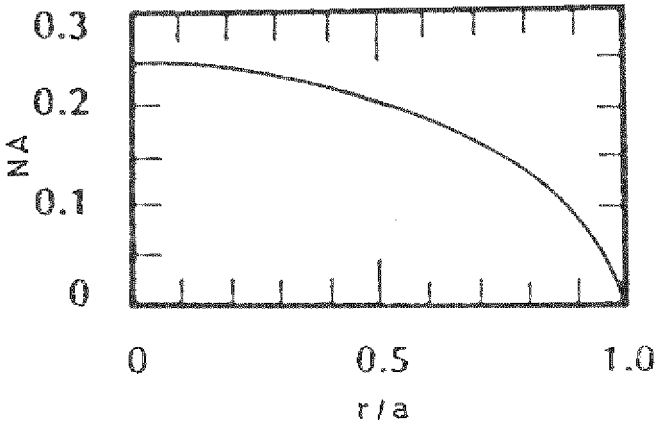
$$NA = n_1 (2\Delta)^{1/2} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.7)$$

تشير هذه المعادلة إلى تغير فتحة النفوذ العددية مع البعد النصف قطري من المحور في الألياف المتدرجة ولو رسمنا هذا التغير ،الشكل (٤-٤)، مستخدمين المعادلة (4.7) وقيم

$n_1 = 1.48$ و $\Delta = 0.0135$ لوجدنا أن قيمة NA المحورية عند $r = 0$ يعبر عنها بالتالي:

$$NA = n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.8)$$

وتساوي 0.24 وتنقص قيمتها إلى صفراً عندما تكون $r = a$ أي أن قيمة NA عند محور الليف المتدرج بمعامل انكسار ذي قطع مكافيء هي نفسها لليف بمعامل انكسار عتبي وتستخدم لذلك المعادلة (4.8) .

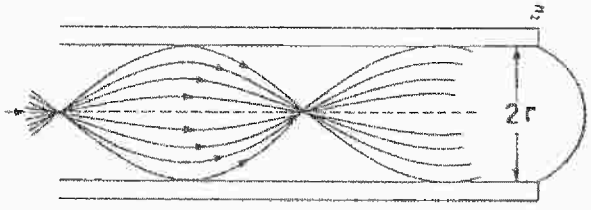


الشكل (٤-٤) فتحة النفوذ العددية لليف بمعامل انكسار قطع مكافئ $n_1 = 1.48$ و $\Delta = 0.0135$

نستنتج من ذلك أن كفاءة الاقتران في الليف المتدرج تبلغ أشدها عند المحور وتتناقص كلما ابتعدنا عنه على عكس الليف العتبي الذي يحتفظ بقيمة فتحة نفوذ عددية واحدة بغض النظر عن نقطة دخول الضوء. لهذا السبب فإن كفاءة الاقتران في الليف العتبي أكبر من كفاءة الاقتران في الليف المتدرج إذا كان حجم اللب فيهما متساوٍ وتغير Δ متساوٍ أيضاً .

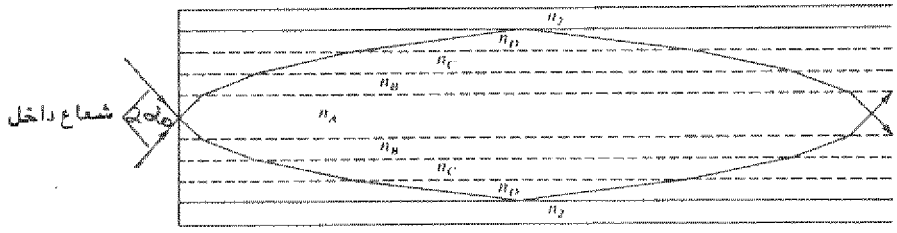
إن طريقة انعكاس الشعاع الضوئي في الليف المتدرج لاتتم في الحد الفاصل بين

اللب والكساء كما هو الحال في الليف العتبي والموضح بالشكل (٤-٢) بل تنعكس تدريجياً كما هو في الشكل (٤-٥) وذلك بسبب تغير معامل الانكسار التدريجي. ويتم التحكم بقيمة معامل الانكسار عند تصنيع الليف حيث يصنع على شكل طبقات متتالية.



الشكل (٤ - ٥) مسارات شعاع على طول ليف متدرج

عند سقوط الشعاع على الليف فإنه ينكسر عندما ينتقل من طبقة إلى أخرى كما في الشكل (٤-٦) حسب قانون سنل $(n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_r)$. حيث ينكسر الضوء عند الحدود بين $n_A - n_B$ و $n_B - n_C$ .. إلخ . وعندما تصل زاوية السقوط إلى الزاوية الحرجة θ_C أو أكثر ينعكس الشعاع نحو محور الليف منتقلاً الآن من معامل انكسار منخفض إلى معامل انكسار أعلى إلى أن يعبر محور الليف وتتكرر العملية في الجانب الآخر من المحور وهكذا يتذبذب الشعاع عند انتشاره في الليف . ينتشر في الليف المتدرج الشعاع الواقع ضمن مجال زاوي محدود تحدده فتحة النفوذ العددية وزاوية القبول وتعتمد فتحة النفوذ العددية في الليف المتدرج على قيم α و Δ ونورد في الجدول (٤-٣) مواصفات لعدة أنواع من الألياف البصرية .



الشكل (٤- ٦) نموذج لليف متدرج

Fiber Type	Manufacturer	Model	Refractive Profile	Core Diameter (μm)	Cladding Diameter (μm)	n_{core}	n_{clad}	N.A.[1]	Loss[2] (dB/km)	BW[3] (MHz-km)
All-silicon step-index	Quartz Products Corp.	QSF 133/200 ASW		133	200			0.2	5	20
Silica core, plastic-clad step-index	DuPont	Pifax S-120 Type 30		200	600	1.46	1.409	0.38	30	0.85
All-silicon graded-index	Valtec/ Phillips Corp.	MG05		50	125			0.2	6	400
All-plastic step-index	Dupont	Pifax PIR140 Type B		368	400	1.48	1.419	0.42	270 @ 790 nm	0.58
All-silicon, single-mode step-index	Corning Glass Inc.	SMF-28		8.3	125	1.471 @ 1300 nm	Δ = 0.35%	0.12	1.8 @ 850 nm 0.19 @ 1550 nm	>2000 @ 1300 nm (565 Mb/s-40 km
Silicon, single-mode, W profile dispersion-shifted	Corning Glass Inc.	SMF-D5		~16	125	1.476	Δ_{max} = 0.9% Δ_{ring} = 0.3%	—	2.96 @ 850 nm 0.22 @ 1550 nm	>4000 @ 1550 nm (565 Mb/s-80 km

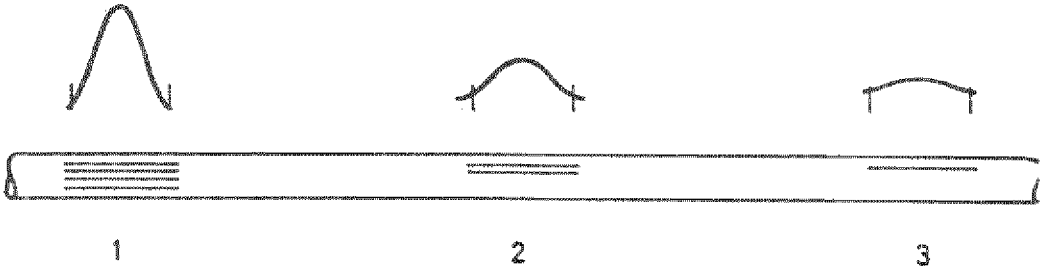
[1]N.A. = numerical aperture.
[2]Loss at 820 nm unless otherwise specified.
[3]BW = bandwidth.

الجدول (٤-٣) مواصفات بعض أنواع الألياف البصرية

٤-٣ التوهين Attenuation

يشكل التوهين عنصراً رئيسياً من عناصر تصميم نظم الاتصالات البصرية وحيث أن الفقد في القدرة البصرية يتم في عدد من نقاط نظام الاتصالات البصري كالفقد في مقرن الدخل ومقرن الخرج والوصلات الدائمة وداخل الليف سنقوم في هذا البند بالتعرف على الفقد في الليف وأسبابه المختلفة.

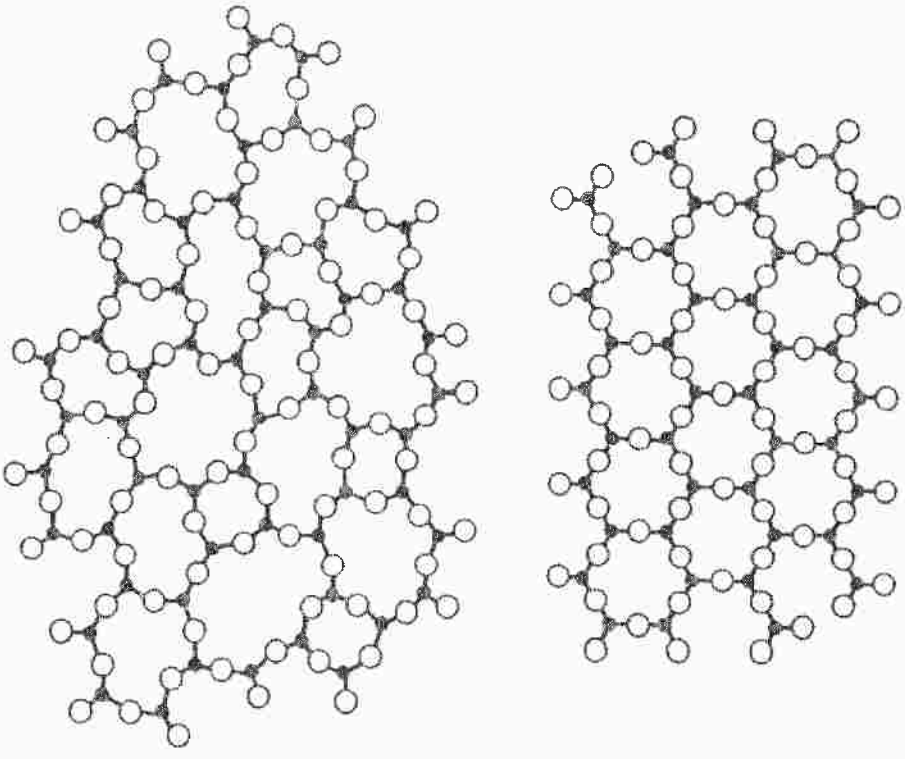
يوضح الشكل (٤-٧) إشارات بصرية في مواقع مختلفة من ليف بصري إذ نرى الموجه رقم 1 عند مدخل الليف ونتيجة لوجود التوهين فإنها تضعف بعد مسافة معينة لتصل إلى شكل الموجه 3 تتوفر منابع وكواشف ضوئية فعالة تعمل في مدى من الأطوال الموجية يتراوح بين 0.5μm و1.6μm ونظراً لأن الزجاج هو أكثر المواد استخداماً في تصنيع الألياف ولإمكانية الحصول على ألياف فقدها قليل جداً ضمن هذه الأطوال الموجية فإن دراستنا ستتركز على خواص هذه المادة . والتعرف على أفضل السبل للحصول على ألياف بأقل فقد ممكن .



الشكل (٤ - ٧) تأثير التوهين على موجة عبر ليف بصري

٤-٣-١ بنية الزجاج

يتم الحصول على الزجاج المستخدم في تصنيع الألياف البصرية من مادة السليكا (ثاني أوكسيد السيليكون SiO_2) ويتكون هذا الزجاج من مجموعات من جزيئات ثاني أوكسيد السليكون. تتغير مواقع الجزيئات ضمن المادة على عكس البنى البلورية التي تتخذ فيها ذرات المركب مواقع ثابتة ومتكررة كما في الشكل(٤-٨) والسليكا ليست المادة الوحيدة التي تتكون على هيئة زجاجية بل هناك مواد أخرى كثيرة تكون في حالة زجاجية عند درجات حرارة مختلفة كما هو في الجدول (٤-٤) .



(ب) (أ)

شكل(٤-٨) (أ) بنية بلورية (ب) بنية زجاجية

وللحصول على زجاج بمعاملات انكسار مختلفة تضاف مواد إلى مزيج جزيئات ثاني أوكسيد السليكون مثل الجرمانيوم Ge والتايتينيوم Ti والثالبوم T1 والبورونB ومواد أخرى فينتج زجاج عالي السليكا يمكن أن يصنع منه ليف بفقد منخفض إذا كانت نقاوة هذا المركب عالية جداً .

المـــــــــادة	درجة الحرارة (كلفن)
مطاط طبيعي	200
كلوريد البولي ڤينيل	347
ماء	140
حامض الفوسفور المجفف	359
جلسرول	183
سكر جلوكوز	305
بروبانول	95
سلينيوم	303
ثاني كلوريد الزرنيخ	373
ثاني فلوريد البريليوم	570
ثاني أوكسيد الجرمانيوم	800
ثاني أوكسيد السليكون	1350

الجدول (٤ -٤) مواد لها حالات زجاجية عند درجات حرارة معينة

يعزى الفقد في الألياف الزجاجية إلى عناصر ثلاث وهي :

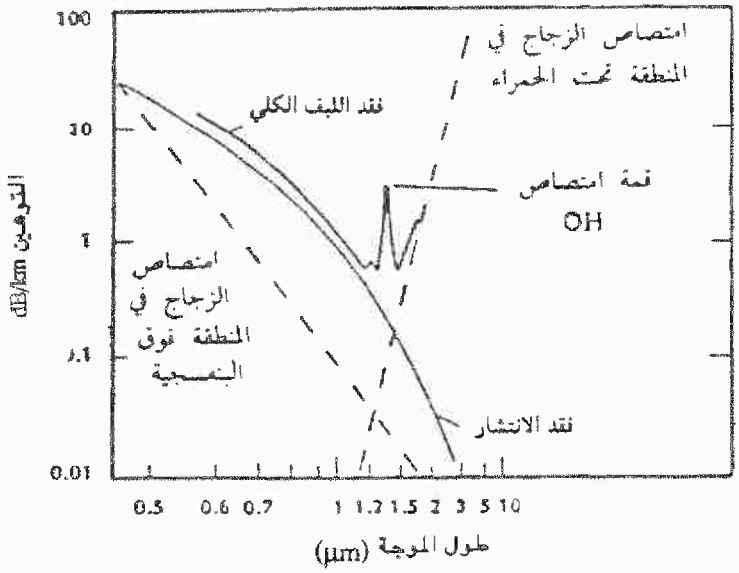
أ - الامتصاص Absorption

ب - الانتشار Scattering

جـ - التأثيرات الهندسية Geometric Effects

١ - الامتصاص Absorption

تتصف كل مادة موجودة في هذا الكون بصفات وخواص تميزها عن غيرها وللزجاج خواصه وصفاته إذ مهما بلغت نقاوته نجده يمتص الضوء عند أطوال موجية معينة ويسمى بالامتصاص الضمني intrinsic absorption ولايمكننا الاقلال منه لأنه ضمن صفاته الطبيعية حيث نجد أن الامتصاص الضمني قوي جداً عند الموجات فوق البنفسجية ذات الأطوال الموجية القصيرة. وسبب هذا الامتصاص يعود لنطاقات الانتقال transition bands الالكترونية والجزيئية حيث يزداد الامتصاص للموجات فوق البنفسجية ويقل كلما اقتربنا من الموجات المرئية ، وحيث أن أنظمة الألياف البصرية لاتعمل في منطقة الموجات فوق البنفسجية ذات الفقد الكبير فإنها تصبح غير ذات أهمية. غير أن منطقة الامتصاص فوق البنفسجية تمتد للمنطقة المرئية والتي تقع ضمنها بعض أنظمة الاتصالات البصرية ولكن قيمة الامتصاص والفقد الناتج عن ذلك قليل جداً كما هو في الشكل (٤-٩).

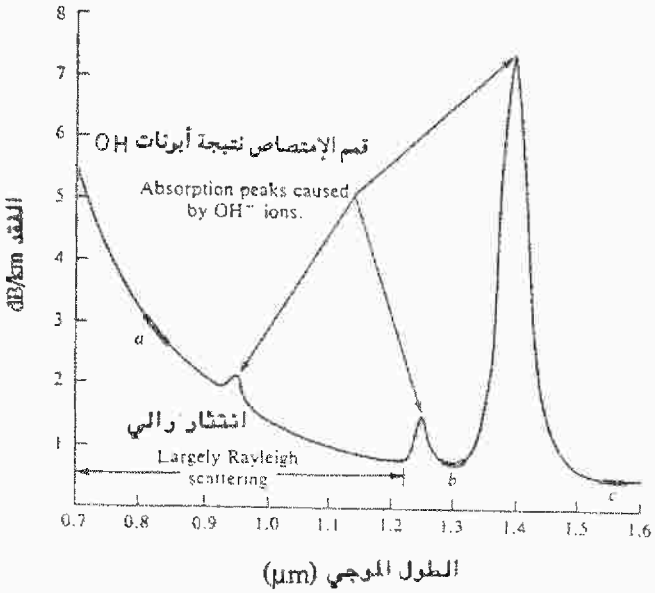


الشكل (٤-٩) توهين ليف زجاجي سيليكا مطعم بالجرمانيوم

هناك منطقة أخرى يزداد فيها الامتصاص الداخلي للزجاج وهي تحت الحمراء وتتراوح أطوال موجاتها بين 7 µm و 12 µm وهذا الفقد ناتج من اهتزاز الروابط bonds الكيميائية بين السليكون والأوكسجين وتتسبب الطاقة الحرارية بتحريك الذرات بصفة مستمرة إذ تمتد وتتقلص روابط أول أوكسيد السليكون SiO ولهذه الاهتزازات تردد طنين في منطقة الأشعة تحت الحمراء وتمتد منطقة امتصاص تحت الحمراء حتى تصل إلى أطوال موجية تعمل عندها الأنظمة البصرية كما هو في الشكل (٤-٩) وتسبب فقداً قليلاً عند $\lambda = 1.6\,\mu m$ لذا فإنها تعيق استخدام الألياف الزجاجية المصنوعة من السليكا بعد هذا الطول الموجي. نستنتج مما سبق أن الفقد الناتج من الامتصاص الضمني غير ذي أهمية للأطوال الموجية التي تعمل عليها الأنظمة البصرية والتي تقع بين 0.8 µm و1.6 µm .

تستخلص السليكا من موارد طبيعية لذلك لاتخلو من وجود الشوائب ومن أهم هذه الشوائب أيونات المعادن الانتقالية وأيونات الهيدروكسيل(OH) Hydroxyl ions . ومن الشوائب المعدنية التي تعلق بالسليكا ، النحاس Cu والحديد Fe، والنيكل Ni ، والكروم Cr ، والكوبالت Co والمنغنيز Mn وغيرها والتي تمتص بقوة عند موجات عمل أنظمة الألياف البصرية فتسبب فقداً في القدرة المنتشرة في الألياف . ويعود ذلك إلى وجود مدارات الكترونية داخلية غير ممتلئة في هذه الشوائب ويؤدي امتصاص الضوء إلى تحرك الالكترونات من المدارات السفلى إلى العليا ، لذا من الضروري تخفيض مستوى الشوائب لعدة أجزاء لكل بليون حتى نحصل على فقد يقل عن 20dB/km .

أن أكثر الشوائب أهمية هي أيونات الهيدروكسيل OH . إذ تهتز ذرات الأوكسجين والهيدروجين نتيجة الحرارة وامتصاص أيون OH شبيه إلى حد كبير بامتصاص SiO . يحدث تردد طنين لأيونات OH عند $\lambda = 2.73\,\mu m$ وتبلغ ذروة الامتصاص عند هذا الطول الموجي والذي يقع خارج نطاق اهتمامنا. غير أن الامتصاص ذو الأهمية هو مايحصل عند الأطوال الموجية 0.95 µm , 1.23µm , 1.37µm كما هو موضح بالشكل (٤-١٠) لذا من الضروري خفض مستوى أيونات OH لعدة أجزاء لكل بليون.

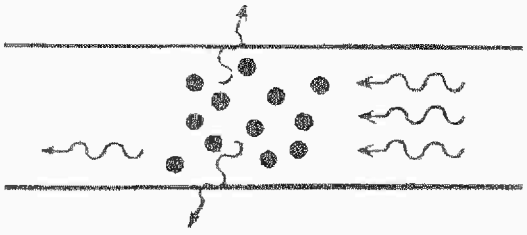


الشكل (٤-١٠) فقد الليف بين 0.7 μm و 1.6 μm ونرى فيه النوافذ الثلاث

للحصول على قيم مختلفة لمعامل الانكسار نعمد إلى تطعيم ، التشكيلة الأولية التي يصنع منها الليف ، بمواد شائبة مثل التايتينيوم Ti^{+4} وأثناء تصنيع الليف تتحول بعض الذرات من Ti^{+4} إلى Ti^{+3} ،تتصف ذرات Ti^{+3} بشدة الامتصاص ويمكن تخفيض هذا التأثير باستخدام طرق تصنيع مناسبة .

ب - الإنتشار Scattering

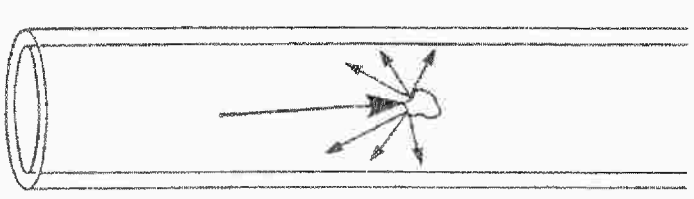
عندما يكون الزجاج في حالة ذوبان نتيجة تعرضه لدرجة حرارة عالية فإن الجزيئات تتحرك عشوائياً وعندما يبرد تتوقف عن الحركة فيصبح توزيع الجزيئات عشوائياً مما يؤدي إلى تغيرات موضعية للكثافة وهذا بدوره يؤدي إلى تغييرات في معامل الانكسار داخل الزجاج المفترض أن يكون متجانساً .عندما تمر حزمة ضوئية خلال هذه البنية فإن بعض طاقاتها تتناثر كما هو في الشكل (٤-١١).



الشكل (٤-١١) انتشار رالي يؤدي إلى التوهين بسبب
التغيرات الموضعية في معامل الانكسار

يدعى الفقد الناتج عن هذه الظاهرة بانتشار رالي Rayleigh ويتناسب هذا الانتشار تناسباً عكسياً مع λ^{-4} لذا تزداد أهميته كلما قل الطول الموجي كما هو واضح في الشكل (٤-٩) مما يحد من استخدام الألياف البصرية للأطوال الموجية القصيرة .

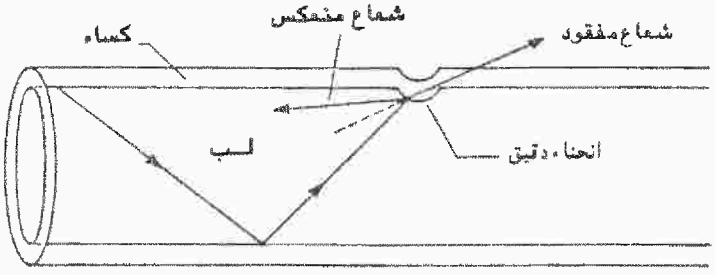
هناك نوع آخر من الانتشار وهو انتشار ماي Mie scattering سببه عدم تجانس الخليط الزجاجي أثناء التصنيع ، أما بسبب عدم ذوبان المواد المضافة أو المزج غير التام وقد تؤدي المعالجة الناقصة إلى تكون سطح خشن بين اللب والكساء . والفقد الناتج في هذه الحالة ينتج عن جسيمات أكبر من الطول الموجي كما في الشكل (٤-١٢) وهذا الفقد لايعتمد على الطول الموجي ويمكن الاقلال منه بطرق تصنيع جيدة .



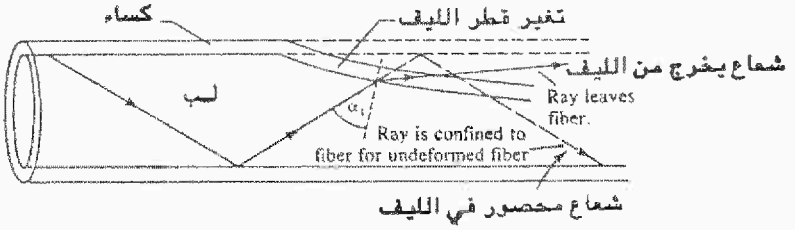
الشكل (٤ - ١٢) التناثر نتيجة الجسيمات الكبيرة

جـ - التأثيرات الهندسية Geometric Effects

تنقسم التأثيرات الهندسية إلى قسمين رئيسيين الأول منهما ناتج عن الانحنائات الدقيقة microbends والثاني ناتج عن الانحنائات الكبيرة . تحدث الانحنائات الدقيقة نتيجة ضغوط موضعية أو تشوهات محورية صغيرة كما في الشكل (٤-١٣) سببها الإجهادات الناشئة من الأغلفة المختلفة التي تدخل ضمن تركيب الكابل وتؤدي الانحناءات الدقيقة إلى اقتران الضوء بين الانماط المختلفة وانتشار الضوء العكسي backscatter وخروج بعض الضوء خارج الليف مما يزيد في كمية الفقد. كما يحدث الفقد أيضاً نتيجة تشوه الليف عند تصنيعه مما يؤدي إلى تغير في قطر الليف (الشكل ٤-١٤) وبسبب هذا التشوه فإن بعض الضوء يسقط بزاوية θ_i تقل عن الزاوية الحرجة θ_C ويخرج من الليف مما يزيد في كمية الضوء المفقود .

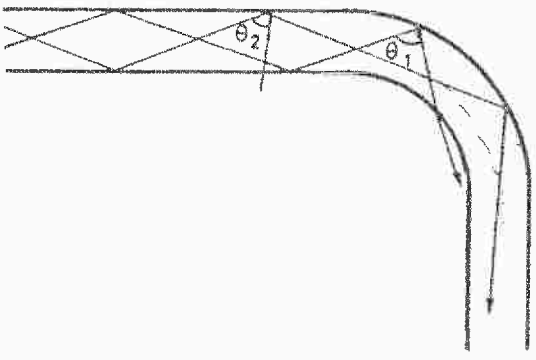


الشكل (٤-١٣) فقد الشعاع نتيجة الانحناء الدقيق



الشكل (٤-١٤) فقد الشعاع نتيجة تغير قطر الليف

تحدث الانحناءات الكبيرة عند لف الليف على بكرات أو سحبه حول زوايا ويجب أن لايزيد ثني الليف عن حد معين والقاعدة المستخدمة لضمان عدم كسر الليف أو هروب الضوء منه هي أن لايقل نصف قطر الانحناء عن 150 ضعف قطر الليف ، فلو اعتبرنا ليف نموذجي قطره 125 μm فإننا يمكننا ثنية إلى 1.875 cm قبل أن ينكسر وهذا يوضح مرونة الألياف البصرية ، وكما رأينا فقد بعض الشعاع نتيجة عدم تجانس القطر فإن ثني الليف سيؤدي إلى سقوط بعض الشعاع بزاوية θ_I تقل عن الزاوية الحرجة θ_C كما في الشكل (٤-١٥) ، وهذا يؤدي بدوره إلى خروج الضوء من الليف فيزداد الضوء المفقود.



الشكل (٤-١٥) فقد الشعاع نتيجة الانحناءات الكبيرة

اتضح لنا مما سبق أن الفقد في الليف الزجاجي يتناسب عكسياً مع الطول الموجي لمنطقة الموجات فوق البنفسجية مما يؤدي إلى عدم امكانية استخدام الليف دون $\lambda = 0.5\mu m$ لارتفاع الفقد بسبب الامتصاص الضمني إذ تصل إلى عدة dB/km وتنخفض إلى 0.1dB/km عند $\lambda = 1.8\mu m$. وعلى الطرف الآخر أي عند الموجات تحت الحمراء فإن الامتصاص الضمني يزداد طردياً مع الطول الموجي غير أن شدته تزداد بعد $\lambda = 1.6\,\mu m$ ،

أما انتشار رالي Rayleigh فإنه يتناسب عكسياً مع الطول الموجي ، ولو جمعنا هذه المؤثرات مع بعضها لحصلنا على التوهين الكلي كما هو في الشكل (٤-١٠) وكما هو واضح فإن الامتصاص الضمني يبلغ أشده عند $\lambda = 0.95\ \mu m$ و $\lambda = 1.23\ \mu m$ و $\lambda = 1.37\ \mu m$ نتيجة أيونات OH إذا كان تركيز هذه الأيونات أكثر من جزء واحد لكل مليون. كما نلاحظ من هذا الشكل وجود ثلاث مناطق يكثر استخدامها في الاتصالات البصرية لسببين هما قلة الفقد للألياف البصرية عند تلك الأطوال الموجية وتوفر المنابع الضوئية والكواشف التي تعمل عند هذه الأطوال الموجية. حيث تقع النافذة الأولى بين $\lambda = 0.8\ \mu m$ و $\lambda = 0.9\ \mu m$ أما النافذة الثانية فهي عند $\lambda = 1.3\ \mu m$ أما النافذة الثالثة فتقع عند $\lambda = 1.55\ \mu m$.

وتستخدم النافذة الأولى عادة في المسافات القصيرة والمتوسطة وربما للمسافات الطويلة وذلك حسب نوع الليف المستخدم ، أما النافذتين الثانية والثالثة فتستخدمان لوصلات المسافات الطويلة .

٤-٤ التشتيت Dispersion

لقد ربطنا بين سرعة الموجات الضوئية v ومعامل الانكسار n بالمعادلة $v = \frac{c}{n}$ ولم نشر إلى الطول الموجي الذي تم عنده قياس معامل الانكسار لأن في الزجاج المستخدم في الألياف البصرية يتغير معامل الانكسار مع تغير الطول الموجي. لذلك تتغير سرعة الموجة أيضاً مع تغير طولها . تطلق كلمة تشتيت بصفة خاصة على تغير السرعة مع تغير طول الموجة .

ينقسم التشتيت إلى قسمين يطلق على الأول التشتيت الضمني intermodal dispersion أو تشتيت النمط modal dispersion أو mode or multimode dispersion والقسم الآخر يدعى التشتيت الباطني intramodal dispersion أو تشتيت اللون chromatic dispersion وهناك

نوعين من هذا التشتيت (١) تشتيت المادة material dispersion (٢) تشتيت الدليل الموجي waveguide dispersion . أياً كان نوع التشتيت فإنه يؤدي إلى تشوه الإشارات التماثلية والرقمية عند مرورها بالليف البصري .

إعتاد العاملون في مجال الاتصالات الأخرى على تسمية التشتيت بتشوه الاشارة delay distortion أو انبساط النبضة pulse spreading للتعبير عن اتساع النبضة عند مرورها في قناة الاتصالات الرقمية غير أن إسهامات الفيزيائيين في مجال الألياف البصرية أدت إلى شيوع استخدام كلمة تشتيت للتعبير عن انبساط الاشارات أو النبضات.

لو نظرنا إلى الشكل (٤-١٦) لوجدنا أن عرض النبضة الداخلة لليف هو tp_1 وعرض النبضة الخارجة هو tp_2 ($tp_2 > tp_1$) . يعرف التشتيت $\Delta\tau$ بالتالي :

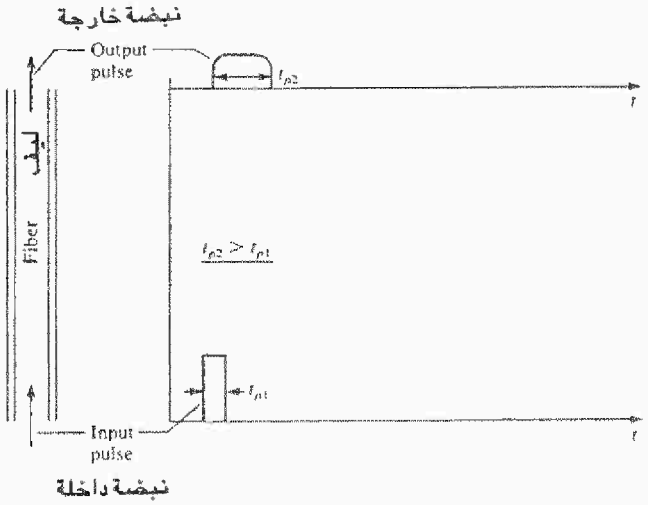
$$\Delta t = (tp_2^2 - tp_1^2)^{1/2} \quad \text{..... (4.9 a)}$$

ويقاس بوحدات الزمن.

ويعتمد التشتيت في الليف على طول الليف . أي أن النبضات المرسلة تزداد اتساعاً كلما زادت المسافة مما يعني تشتيتاً أكبر. لهذا السبب فإن التشتيت يعطى لكل وحدة طولية (ns/km) أو (ps/km) لذا يمكن إيجاد التشتيت $\Delta\tau$ لليف معين كالتالي :

$$\Delta\tau = L \times \text{dispersion / km} \quad \text{..... (4.9 b)}$$

حيث تمثل L طول الليف بالكيلومتر ويعطي التشتيت لكل كيلومتر من قبل المصنّع ، وسندرس في هذا البند تشوه الإشارات في الليف والأنواع المختلفة من التشتيت المسببة لذلك .



الشكل (٤ - ١٦) اتساع النبضة

٤-٤-١ التشتيت النمطي او التشتيت الضمني Intermodal Dispersion

تسلك الإشارات الضوئية مسارات متعددة داخل الليف متعدد الأنماط مما يؤدي إلى وصولها إلى نهاية الليف في أوقات مختلفة ، ولفهم هذه الظاهرة دعنا ننظر إلى ليف بصري بمعامل انكسار عتبي (ليف عتبي) . في الشكل (٤-١٧أ) نرى الموجة رقم 1 تسير في مركز الليف بينما رقم 2 سلكت مساراً متعرجاً وحيث ان معامل الانكسار واحد لكلاهما فإن الوقت اللازم لوصول الموجة رقم 2 سيكون أطول من الوقت اللازم لوصول الموجة رقم 1 . فإذا كان طول الليف L فإن زمن الانتشار للموجة رقم 1 هو :

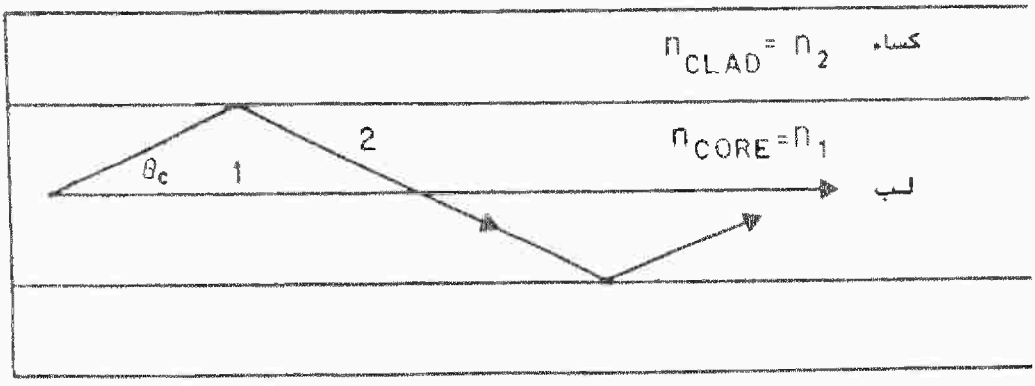
$$\tau_1 = L/(c/n_1) = \frac{L\,n_1}{c} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.10)$$

وتمثل τ_1 أدنى تأخير انتشار minimum propagation delay لأنها أقصر مسافة ممكنة . أما الإشارة رقم 2 فإن تأخيرها سيكون أكبر ويعبر عنه بالتالي :

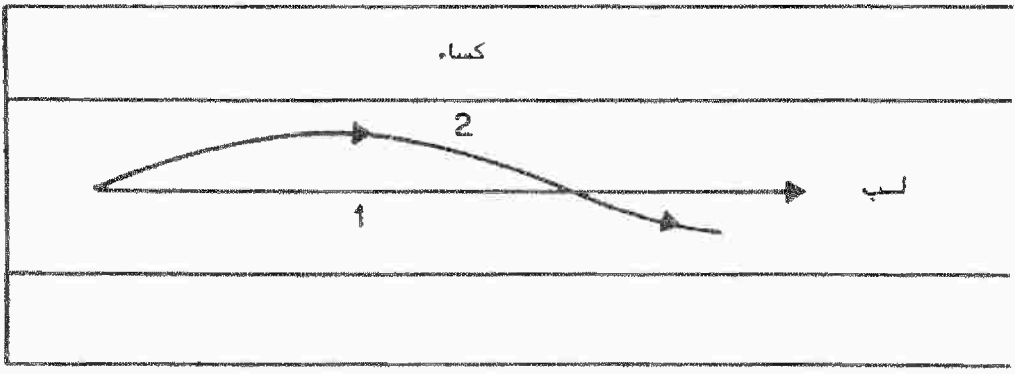
$$\tau_2 = (L/\cos\theta_C)/(c/n_1)$$

$$= \frac{Ln_1}{\cos\theta_C \times c} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.11)$$

تمثل τ_2 أقصى تأخير انتشار maximum propagation delay إذا كانت الموجة رقم 2 تقع في نهاية زاوية القبول للطاقة الضوئية الداخلة لليف وكما رأينا فإن الموجتين دخلتا الليف في وقت واحد إلا أنهما وصلتا نهاية الليف في أوقات مختلفة ، ويمثل الفرق بينهما الزمن الذي تصل خلاله الطاقة الضوئية نهاية الليف.



الشكل (٤ - ١٧ أ) نموذج إشعاعي للانتشار في ليف عتبي



الشكل (٤ - ١٧ب) نموذج إشعاعي للإنتشار في ليف متدرج

دعنا الآن نجد عرض النبضة $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$$

باستخدام المعادلتين (4.10) و (4.11) فإن

$$\Delta\tau = \frac{Ln_1}{\cos\theta_C \times c} - \frac{Ln_1}{c} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.12)$$

وحيث أن $\frac{n_2}{n_1} = \cos\theta_C \cong \sin\theta_C$ فيمكننا كتابة (4.12) على النحو التالي :

$$\Delta\tau = \frac{Ln_1^2}{n_2 c} - \frac{Ln_1}{c}$$

$$= \frac{Ln_1}{c}\left(\frac{n_1 - n_2}{n_2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.13)$$

وحيث أن $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ فإن

$$\Delta\tau = \frac{Ln_1}{c}\Delta$$

أو

$$(\Delta\tau/L) = \frac{n_1 \Delta}{c} \quad \text{..... (4.14)}$$

يمكننا كتابة المعادلة (4.14) بدلالة فتحة النفوذ العددية NA باستخدام المعادلتين (4.4) و(4.8) لنحصل على :

$$\Delta\tau = \frac{[L \times (NA)^2]}{2 n_1 c} \quad \text{..... (4.15)}$$

$$\text{or } \frac{\Delta\tau}{L} = \frac{(NA)^2}{2 n_1 c} \quad \text{..... (4.16)}$$

حيث تمثل $\Delta\tau$ مقدار انبساط النبضة pulse broadening و $\Delta\tau/L$ يمثل الانبساط لكل وحدة طولية لليف ، ولايضاح هذا التأثير دعنا نقدم المثال التالي :

مثال (٤-١): أوجد التشتيت لكل كيلومتر وارسم النبضات الخارجة إذا كان (١)معدل إرسال النبضات 10×10^6 Mb/s (٢) معدل إرسال النبضات 20×10^6 Mb/s إذا كان طول الليف 400 meter و $n_1 = 1.4$ و$n_2 = 1.36$. (أفرض أن عرض النبضة الداخلة قريب من الصفر) .

الحل : أوجد قيمة Δ :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1.4 - 1.36}{1.4} = 0.02857$$

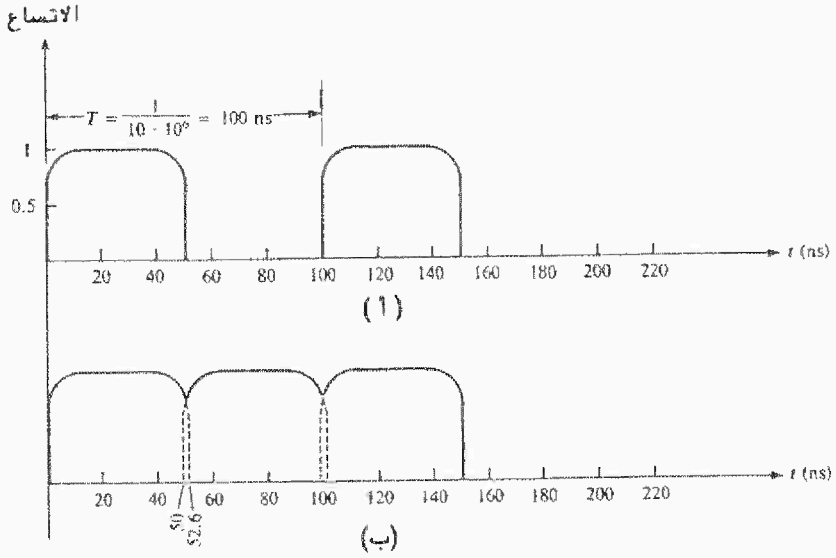
من المعادلة (4.14) :

$$\Delta\tau = \frac{L n_1}{c} \Delta = \frac{400 \times 1.4}{3 \times 10^8} \times 0.02857 = 53 \text{ ns}$$

(١) يمثل الشكل (٤ -١٨أ) قطار النبضات الخارجة عند معدل إرسال 10 Mb/s .

(٢) أما الشكل (٤-١٨ب) فيمثل قطار النبضات الخارجة عند معدل إرسال 20Mb/s .

التشتيت لكل كيلو متر $= \frac{53 \text{ ns}}{0.4} = 131.4 \text{ ns/km}$



الشكل (٤-١٨) (أ) الارسال بمعدل 10 Mb/S (ب) الارسال بمعدل 20Mb/s

نستنتج من هذا المثال محدودية معدل المعلومات المرسلة إذ نرى أن إمكانية تمييز النبضات المرسلة عند معدل 10 Mb/s بينما امتزجت النبضات مع بعضها ولايمكن التمييز بينها عند معدل 20 Mb/s مما يعني عدم امكانية استخدام هذا الليف لإرسال 20 Mb/s لمسافة 400m٠ من الناحية العملية فإن قيمة Δ في حدود 0.01 ولو استخدمنا هذه القيمة في المثال السابق لحصلنا على تشتيت قيمته 18ns أي مايعادل 45ns/km٠ مما يعني إمكانية استخدام هذا الليف لإرسال 20 Mb/s ٠عندما بدأنا مناقشة التشتيت النمطي فرضنا أن الليف متعدد النمط بمعامل انكسار عتبي وعرفنا أن انبساط النبضات ناتج عن تغير مسارات الموجات المختلفة ولو استخدمنا ليف بصري متعدد النمط ولكن بمعامل انكسار متدرج فإننا سنقلل من تأثير التشتيت النمطي حيث نرى في الشكل (٤-١٧ب) الموجه رقم 1 تسير في مركز الليف بينما الموجة رقم 2 تسير في مسار متموج وحيث أن سرعة الموجات داخل الليف تساوي $\frac{c}{n}$ وحيث أن n في مركز الليف المتدرج أكبر من تلك

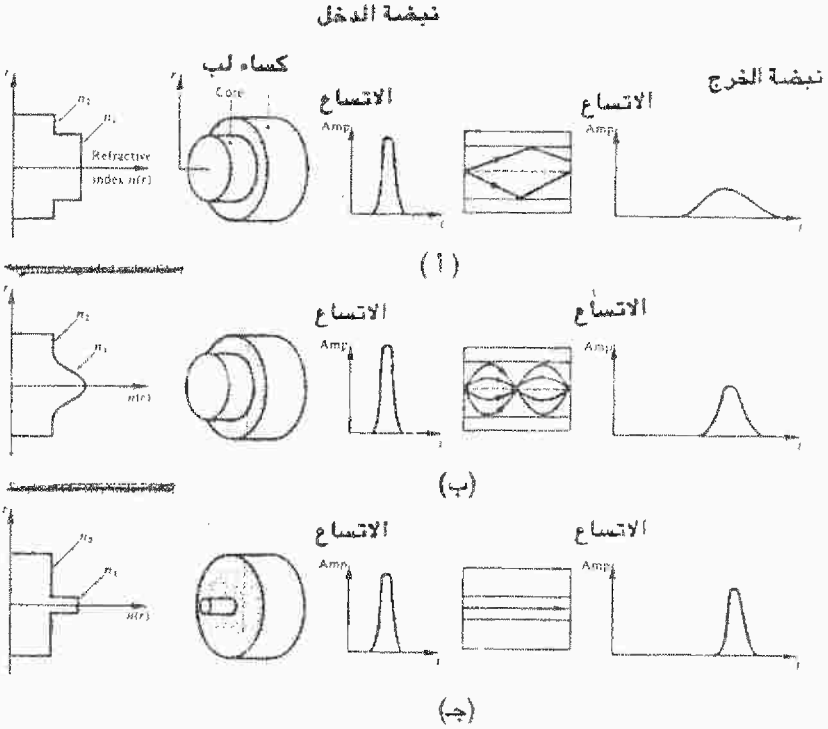
البعيدة عن المحور فإن سرعة انتشار الموجة رقم 1 ستكون أقل من سرعة الموجة رقم 2 والتي تسلك مساراً أطول وهذا بدوره يقلل من وقت وصول الموجتين إلى نهاية الليف. وهذا يؤدي إلى تخفيض انبساط النبضات وتقليل التشتيت النمطي فيرفع من معدل نقل المعلومات ويعبر عن انبساط النبضة النمطي للليف متدرج بالمعادلة التالية :

$$\Delta(\tau/L) = \frac{n_1\Delta^2}{2c} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.17)$$

إن مقارنة هذه المعادلة مع المعادلة (4.14) تبين تخفيضاً في أنبساط النبضة ممثل بالعامل $\frac{2}{\Delta}$ عند استخدام ليف متدرج محل ليف عتبي ، ولو استخدمنا $\Delta = 0.01$ لحصلنا على $\frac{2}{\Delta} = 200$ مما يعني أن قيمة $\Delta\tau/L$ ستنخفض من 45 ns/km إلى 0.225 ns/km . إذا كان معدل نقل المعلومات مرتفع جداً وأردنا التخلص من التشتيت النمطي فلابد من استخدام ليف أحادي النمط والذي لايخلو من مصاعب مثل صعوبة التوصيل وقلة القدرة الضوئية الممكن اقترانها بالليف مقارنة بالليف متعدد النمط . ونرى في الشكل (٤-١٩) اتساع النبضات نتيجة التشتيت النمطي في ثلاثة أنواع من الألياف وهي الليف العتبي متعدد النمط والليف المتدرج متعدد النمط والليف العتبي أحادي النمط ، ولابد من التأكيد هنا على أن التشتيت النمطي لايعتمد على طول موجة المنبع الضوئي أو على عرض خط المنبع .

٤-٤-٢ التشتيت الباطني Intramodal Dispersion

التشتيت الباطني أو تشتيت اللون يحصل في جميع أنواع الألياف البصرية وينتج من عرض خط المنبع البصري حيث أن المنابع الضوئية كما ذكر في البند (١-٥-٦) لاتبعث بطول موجي واحد بل بحزمة من الأطوال الموجية ، وحيث أن معامل انكسار الزجاج المستخدم في الألياف البصرية يتغير مع الطول الموجي سينتج عن ذلك اختلاف في سرعة الإشارات أو النبضات المرسلة مما يؤدي إلى انبساطها وينقسم هذا التشتيت إلى نوعين (أ) تشتيت المادة material dispersion (ب) تشتيت الدليل الموجي waveguide dispersion .



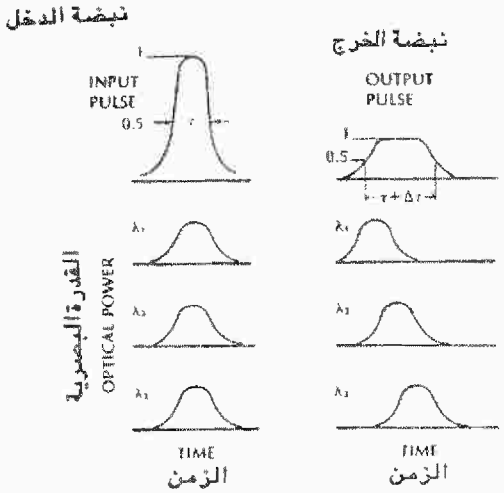
الشكل (٤-١٩) تشتيت النمط لثلاثة أنواع من الألياف

(أ) ليف عتبي متعدد النمط (ب) ليف متدرج متعدد النمط

(جـ) ليف عتبي أحادي النمط

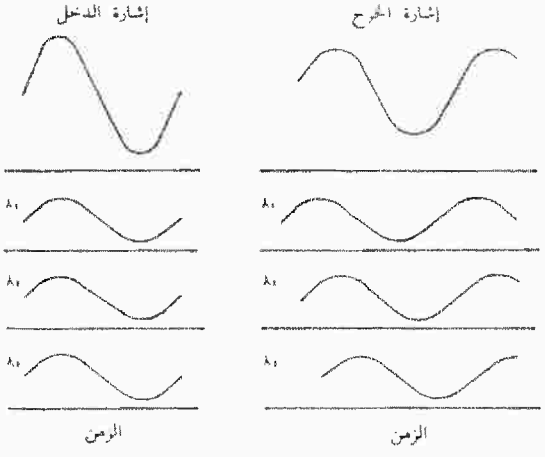
١ - تشتيت المادة Material Dispersion

ينتج انبساط النبضات في الإرسال الرقمي عن السرعات المختلفة للضوء الداخل لليف حيث أن المنابع الضوئية لاتبعث الضوء بتردد واحد أو طول موجي واحد بل ضمن حزمة من الترددات أو الأطوال الموجية ، يوضح الشكل (٤-٢٠) أن نبضة الدخل تتألف من مجموعة من النبضات المتماثلة ماعدا في أطوال موجاتها. تنتشر النبضات المتعددة بسرعات مختلفة وتصل نهاية الليف بأوقات متفاوتة بشكل ضئيل وعندما تجمع عند المخرج فإنها تجمع مع بعض وتعطى خرجاً منبسطاً بالنسبة لاشارة الدخل . يوضح هذا كيف أدى التشتيت إلى تشوه النبضة وكلما زاد سير النبضة كلما ازداد الانبساط .



الشكل (٤ - ٢٠) انبساط النبضة أثناء انتشار في وسط مشتت

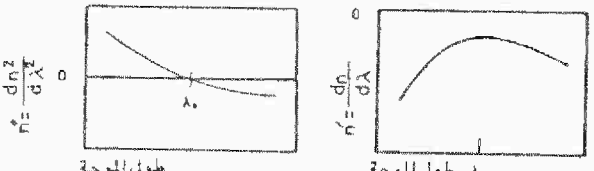
تحتوي النبضة على الأطوال الموجية $\lambda_3 , \lambda_2 , \lambda_1$ وكل واحدة تنتشر بسرعة مختلفة يؤدي التشتيت أيضاً إلى تشوه الإشارة التماثلية ، ويبين الشكل (٤-٢١) موجة تماثلية منتشرة بثلاثة أطوال موجية مختلفة وبعد انتشارها خلال الليف تضاف أطوال الموجة الثلاثة إلى بعضها ويكون تغير اتساع الإشارة المستقبلة أقل من تغير اتساع إشارة الدخل، لايغير التشتيت من القدرة المتوسطة لترددات التشكيل ، ولكنه ينقص من تغير الإشارة. يمكن الإقلال من تأثير تشتيت المادة باستعمال منابع ذات حزم ضيقة مثل ثنائي الليزر بدلاً من الثنائي الباعث للضوء LED .



الشكل (٤-٢١) فقد اتساع الإشارة التماثلية نتيجة التشتيت

دعنا الآن ننظر إلى خواص معامل الانكسار للزجاج المصنع من ثاني أوكسيد السليكون (SiO_2) المستخدم في تصنيع الألياف البصرية . يبين الشكل (٤-٢٢) عدة خواص منها أن معامل الانكسار يتناقص مع تزايد طول الموجة كما في الشكل (٤-٢٢أ) ويتغير مقدار هذا الميل بتغير طول الموجة وعند طول موجي معين λ_o تتكون نقطة انعطاف على منحنى معامل الانكسار ويبلغ الحد الأدنى للميل عند λ_o كما في الشكل (٤-٢٢ب) حيث يبلغ هذا الميل صفراً . وفي الشكل (٤-٢٢ جـ) نرى ميل المنحنى للشكل (٤-٢٢ ب) . حيث أن المنحنى في الشكل (٤-٢٢جـ) هو المشتق الثاني لمعامل الانكسار مع طول الموجه وتبلغ قيمة معامل الانكسار للسليكا النقية حوالي 1.45 عند $\lambda_o = 1.3\ \mu m$ وعند الرغبة في تغيير قيمة معامل الانكسار تطعم السليكا بمواد أخرى مثل أوكسيد البورون B_2O_3 أو أوكسيد الجرمانيوم GeO_2 .

(أ)



شكل رقم (٤ - ٢٢) (أ) اعتماد معامل الانكسار لزجاج السليكا على طول الموجة

(ب) اشتقاق ميل المنحنى في الجزء (أ)

(جـ) اشتقاق ميل المنحنى في الجزء(ب)

من خلال ماسبق رأينا كيف تتشوه الإشارات المارة في الليف الزجاجي نتيجة تغير الطول الموجي للإشارات المرسلة وعلينا الآن أن نجد مقدار إنبساط النبضات لكل وحدة طول كتابع لطول الموجه حيث نرى في الشكل (٤-٢٣) منحنى لهذه العلاقة لوسط مشتت . إذا كان العرض الخطي أو العرض الطيفي spectral linewidth للمنبع هو $\Delta\lambda$ حيث أن $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. فإن الفرق في زمن الانتشار لكل وحدة طول $\Delta(\tau/L)$ لكلا طول الموجتين λ_1 وλ_2 هو :

$$\Delta(\tau/L) = (\tau/L)_2 - (\tau/L)_1 \quad \ldots\ldots\ldots (4.17)$$

حيث أن انبساط النبضة الفعلي هو $\Delta\tau$ وهي تساوي $L\Delta(\tau/L)$. لابد لنا الآن من تعريف بداية ونهاية النبضة والذي يعرف بدوام duration النبضة . يعرف دوام النبضة على أنه الفترة بين الزمن الذي ترتفع فيه القدرة البصرية إلى نصف قيمة ذروتها والزمن الذي تهبط عنده إلى نصف قيمة ذروتها كما هو موضح في الشكل (٤-٢٠) لنبضة الخرج. إن ميل المنحنى في الشكل (٤-٢٣) والذي يرمز له بالرمز $(\tau/L)'$ هو :

$$\Delta(\tau/L)' = \frac{\Delta(\tau/L)}{\Delta\lambda} \quad \ldots\ldots\ldots (4.18)$$

أو

$$\Delta(\tau/L) = (\tau/L)' \ \Delta\lambda \quad \ldots\ldots\ldots (4.19)$$

يمكن أن نعبر عن $(\tau/L)'$ بالتالي :

$$(\tau/L)' = \frac{\lambda}{c}\frac{dn^2}{d\lambda^2} = -\frac{\lambda}{c}n'' \quad \ldots\ldots\ldots (4.20)$$

ومن المعادلتين (4.19) و (4.20) نجد أن :

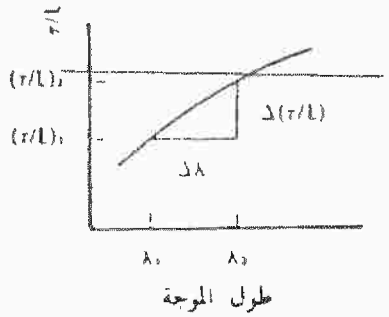
$$\Delta(\tau/L) = -\frac{\lambda n''\Delta\lambda}{c} \quad \ldots\ldots\ldots (4.21)$$

نرى من هذه المعادلة اعتماد انبساط النبضة على تغير معامل الانكسار وعلى العرض الطيفي $\Delta\lambda$. يعرّف تشتيت المادة على أنه :

$$M = \frac{\lambda\, n''}{c} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.22)$$

لذا يمكن كتابة المعادلة (4.21) على النحو التالي للتعبير عن انبساط النبضة لكل وحدة طول :

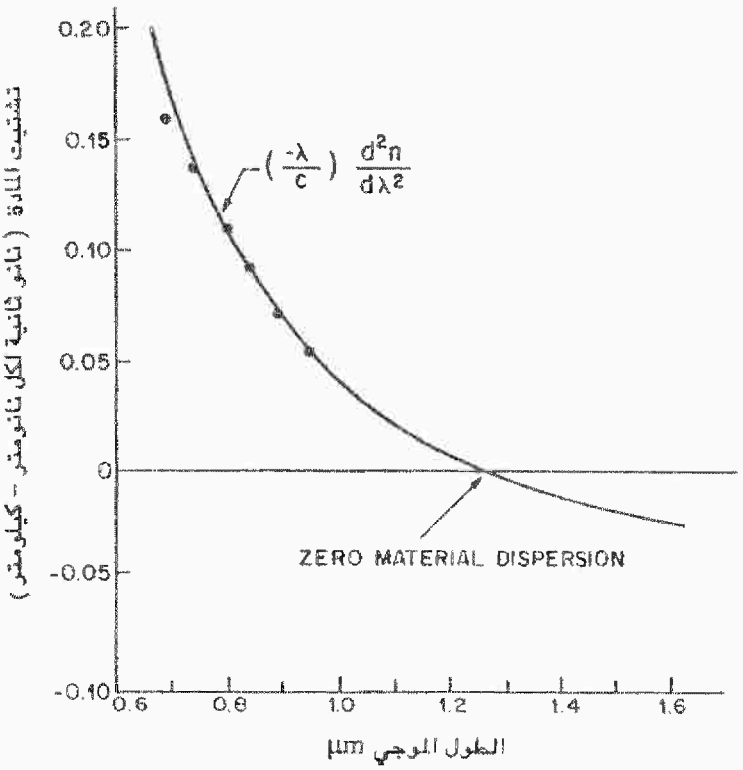
$$\Delta(\tau/L) = -\frac{\lambda}{c}\, n''\, \Delta\lambda = -M\,\Delta\lambda \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.23)$$



الشكل (٤-٢٣) زمن الانتشار لكل وحدة طول لوسط مشتت

يبين الشكل (٤-٢٤) تشتيت المادة مقابل الطول الموجي لزجاج السليكا ونرى التشابه بين الشكل (٤-٢٤) والشكل (٤-٢٢) لأن M تتناسب مع n'' ووحدة قياس M هي (ns /nm- km) وتعبر عن انبساط النبضة بالنانو ثانية لكل نانوميتر من العرض الطيفي للمصدر لكل كيلومتر من طول المسار.

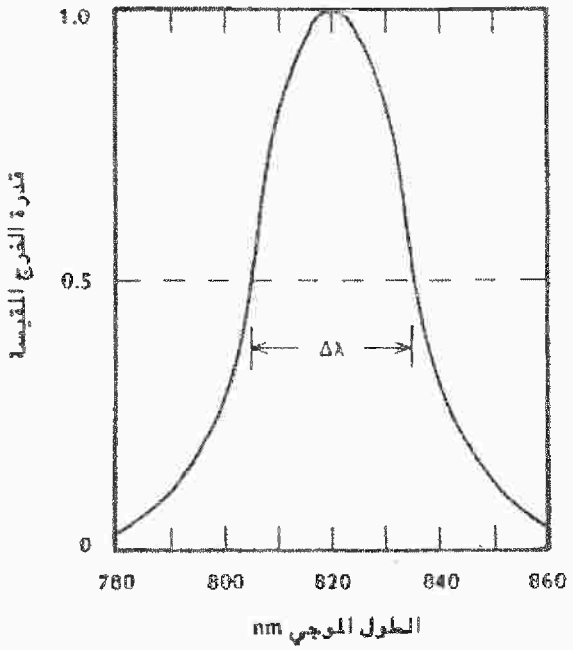
نرى في الشكل (٤-٢٤) أن قيمة M للسليكا النقية موجبة عندما يكون الطول الموجي أقل من 1.3 µm وتصل قيمة M إلى الصفر عند $\lambda = 1.3\ \mu m$ وتصبح قيمة M سالبة إذا زاد الطول الموجي عن 1.3 µm .



الشكل (٤- ٢٤) تشتيت المادة مقابل الطول الموجي

لنعد الآن إلى المعادلة (4.23) لنرى تأثير M على انبساط النبضة وسبب وجود الإشارة السالبة في هذه المعادلة . حيث أن $\Delta\lambda$ موجبة فإن انبساط النبضة يكون سالباً عندما تكون M موجبة أي للأطوال الموجية التي تقل عن 1.3 μm ومعنى هذا أن الموجات التي طول موجتها λ_2 تنتشر بسرعة أكبر من الموجات التي طول موجتها λ_1 والتي تقع ضمن عرض الطيف $\Delta\lambda$ spectral width للمنبع الضوئي ، ولايضاح ذلك أكثر نفرض أن أقصى قيمة لقدرة المنبع الضوئي المستخدم تقع عند $\lambda = 820$ nm وتنخفض إلى نصف قيمتها عند $\lambda_1 = 810$ nm و $\lambda_2 = 830$ nm كما هو موضح في الشكل (٤-٢٥) فإن

سرعة انتشار موجات λ_2 أكبر من سرعة انتشار موجات λ_1 ، وعندما تكون M سالبة لقيم λ التي تزيد عن 1.3 µm فإن انبساط النبضة يكون موجباً أي أن الموجات ذات الطول الأقصر تنتشر بسرعة أكبر من الموجات ذات الطول الأطول. لو فرضنا أن موجتان تقعان ضمن عرض الطيف لمنبع ضوئي يبلغ الطول الموجي لاحداهما $\lambda_1 = 1530$ nm والآخر عند $\lambda_2 = 1570$ nm فإن سرعة انتشار λ_1 أكبر من سرعة انتشار λ_2 . أما عندما تكون $\lambda = 1.3$ µm فإن تشتيت المادة في السليكا النقية يساوي صفراً. وعندما تطعم بالشوائب فإن طول الموجة ذات التشتيت الصفري سيتغير بحوالي 0.1 µm .



الشكل (٤ - ٢٥) عرض الخط أو العرض الطيفي لثنائي باعث للضوء LED

مثال(٤-٢) :

أوجد مقدار انبساط النبضة في ليف بصري مصنوع من السليكا النقية طوله 10 km إذا استخدمنا (أ) ثنائي باعث للضوء LED طول موجته $\lambda_o = 820$ nm وعرض

خطه $\Delta\lambda = 20nm$ (ب) ثنائي ليزر LD طول موجته $\lambda_o = 1500nm$ وعرض خطه $\Delta\lambda = 40\ nm$.

الحل :

(أ) من الشكل (٤-٢٤) نجد أن قيمة M عند $\lambda = 820\ nm$ تساوي 110ps/(nm-km) ومن المعادلة (4.23) نجد أن :

$$\Delta(\tau / L) = 100\ (20) = 2.2\ ns/km$$

وقيمة الانبساط $\Delta\tau$ بعد مسافة 10km تساوي 22ns (ب) من الشكل (٤-٢٤) نجد أن قيمة M عند $\lambda = 1500\ nm$ تساوي 15ps(nm - km) وباستخدام المعادلة (4.23) نجد أن :

$$\Delta(\tau / L) = 15 \times 40 = 600\ ps/km$$

ويكون الانبساط 6ns بعد 10km . من هذا المثال رأينا أن انبساط النبضة تناقص بشكل كبير عند زيادة طول الموجة حتى في حال تزايد عرض خط المنبع . ويمكن الاقلال من انبساط النبضة باستخدام منبع ضوئي عرض طيفه صغير جداً. فلو استخدمنا منبعاً ضوئياً في المثال السابق عرض طيفه 1nm فإن انبساط النبضة بعد 10km سيكون 1.1ns عندما تكون $\lambda = 820\ nm$ و 0.15 ns عندما تكون $\lambda = 1500\ nm$.

ب - تشتيت الدليل الموجي Waveguide Dispersion

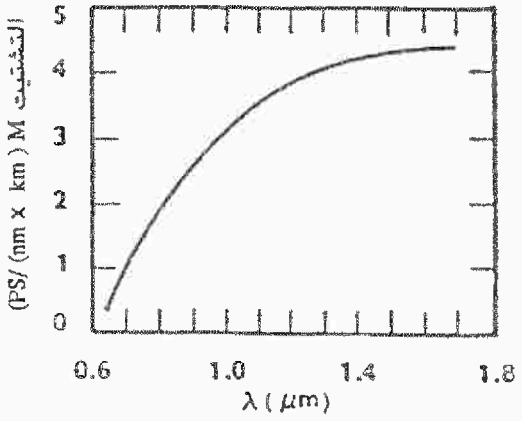
يتغير معامل الانكسار الفعال (n_{eff}) effective index of refraction في الألياف متعدد النمط تبعاً لطول الموجة ويعبر عن ذلك بالمعادلة التالية :

$$\Delta(\tau/L) = \frac{\lambda}{c}\ \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2}\ \Delta\lambda = -\frac{\lambda}{c}\ n''_{eff}\ \Delta\lambda = -M'\ \Delta\lambda \quad \ldots\ldots (4.24)$$

حيث أن $M' = \frac{\lambda}{c}\ n''_{eff}$ ويعبر عن تشتيت دليل الموجه و $\Delta\lambda$ عرض خط المنبع ويحدث تشتيت الدليل الموجي حتى في المواد غير المشتتة . أما إذا كانت المادة المستخدمة في الدليل الموجي مشتتة عندئذ يتواجد تشتيت المادة وتشتيت الدليل الموجي في آن واحد .

يبين الشكل (٤-٢٦) قيم M' عند أطوال موجية مختلفة. بامكاننا إيجاد انبساط النبضة نتيجة تشتيت المادة وتشتيت الدليل الموجي وذلك بجمع المعادلتين (4.23) و(4.24) لنحصل على :

$$\Delta(\tau/L) = -(M + M')\,\Delta\lambda \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.25)$$



الشكل (٤ - ٢٦) تشتيت دليل الموجة في ليف عتبي

وبمقارنة الأشكال (٤-٢٤) و (٤-٢٦) نجد أن تشتيت المادة أكبر بكثير من تشتيت الدليل الموجي فمثلاً عند $\lambda = 820$ nm نجد أن تشتيت المادة 11ps/nm-km بينما يبلغ تشتيت الدليل الموجي عند $\lambda = 820$ nm حوالي 2ps/nm -km .

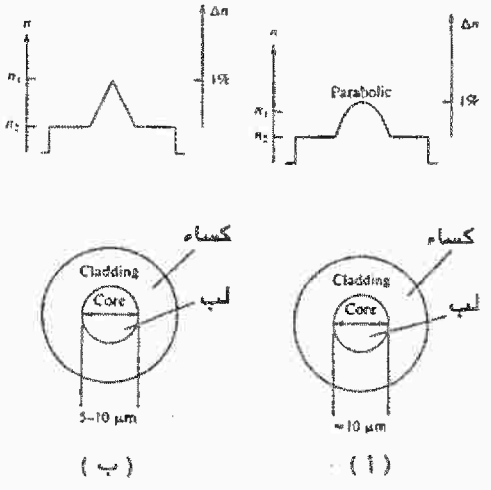
في كلا الحالتين نجد أن انبساط النبضة الناتج من تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة يتناسب طردياً مع عرض خط المنبع الضوئي $\Delta\lambda$ ولايقتصر تواجد تشتيت دليل الموجة على الألياف متعددة النمط بل يتواجد أيضاً في الألياف أحادية النمط حيث ينعدم فيها تشتيت النمط ولكن يبقى تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة . يساهم تشتيت المادة في انبساط النبضة بشكل خاص للأطوال الموجية دون 1.3 μm وعندما يقترب طول موجة التشغيل من 1.3 μm يؤخذ تشتيت دليل الموجة بالاعتبار وبعد $\lambda = 1.3$ μm يصبح تشتيت المادة سالباً وتشتيت دليل الموجة موجباً فيؤدي هذا إلى انبساط نبضة صفري عند طول موجة لايزال قريباً من $\lambda = 1.3$ μm، عند $\lambda = 1.55$ μm يكون التوهين

أقل مايمكن ويبقى تأثير التشتيت المادي والدليل الموجي وباستخدام تصاميم معينة للألياف البصرية أحادية النمط نتمكن من خلالها معادلة تشتيت المادة السالب بتشتيت دليل الموجة الموجب لنحصل على تشتيت صفري عند $\lambda = 1.55\ \mu m$. يحدث تشتيت دليل الموجة في الليف أحادي النمط لأن الطاقة البصرية تنتشر في لب وكساء الليف البصري واللذان يختلفان في قيم معاملات الانكسار مما يجعل الجزء المار بالكساء ينتشر بسرعة أكبر من الجزء المار باللب فيؤدي إلى انبساط النبضة .لهذا السبب تم تصميم أنواع عديدة من الألياف أحادية النمط نوردها في الاشكال (٤-٢٧) و (٤-٢٨).

وقد يكون سبب انبساط النبضة نتيجة كل أنواع التشتيت الآنف ذكرها كما هي الحال في الليف العتبي متعدد النمط . وفي هذه الحالة يعطى انبساط النبضة بالمعادلة التالية :

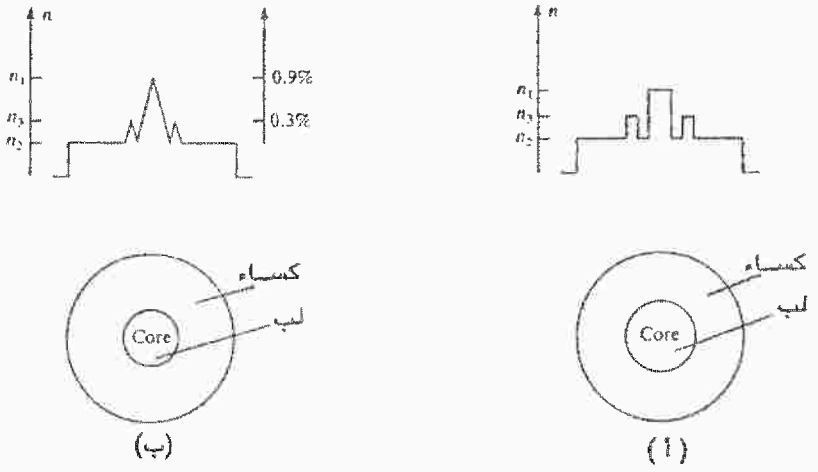
$$(\Delta\tau)^2 = (\Delta\tau)^2_{mod} + (\Delta\tau)^2_{dis} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (4.26)$$

حيث $(\Delta\tau)^2_{mod}$ هو انبساط النبضة نتيجة تشتيت النمط و $(\Delta\tau)_{dis}$. انبساط النبضة نتيجة التشتيت الباطني أو تشتيت اللون .



الشكل (٤-٢٧) ليف أحادي النمط (أ) منظر جانبي ذو قطع مكافىء

(ب) منظر جانبي مثلثي



الشكل (٤-٢٨) ألياف بمنظر جانبي W (أ) منظر جانبي عتبي

(ب) منظر جانبي مثلثي W

٤-٥ معدل المعلومات Information Rate

شرحنا في البند السابق الأسباب التي تؤدي إلى انبساط النبضة والتي تحد بدورها من سعة المعلومات المرسلة عبر انظمة الاتصالات البصرية . ولمعرفة تأثير انبساط النبضة على سعة المعلومات نفرض أن لدينا موجة جيبية مشكلّة كالتي في الشكل (٤-٢١) وأن تردد التشكيل هو f والدور $T=\frac{1}{f}$. نفرض أن المنبع الضوئي المستخدم يبعث ضوء بأطوال موجية تقع بين λ_1 و λ_2 والمطلوب معرفته الآن هو حساب مقدار التأخير المقبول بين λ_1 وλ_2 . نرى في الشكل (٤-٢٩) القدرة المستقبلة عند λ_1 وλ_2 عندما يكون التأخير مساوٍ إلى نصف دور التشكيل أي أن :

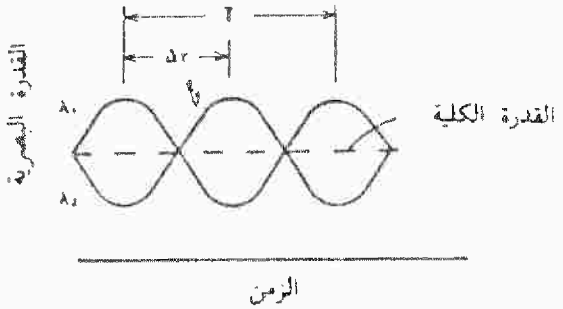
$$(\Delta\tau) = \frac{T}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.27)$$

في هذه الحالة يلغى تأخير التشكيل كلياً عند جمع الموجتان . أما القدرة المشكّلة المنقولة على أطوال موجية تقع بين λ_1 وλ_2 فسيكون فيها تأخير لكنه أقل من T/2 وستلغى جزئياً . نستنتج من هذا أن التأخير يجب أن يقل عن T/2 ($\Delta\tau < T/2$) المذكورة في المعادلة (4.27) فيكون تردد التشكيل:

$$f = \frac{1}{T} \leq \frac{1}{2\Delta\tau} \quad \text{..... (4.28)}$$

وتمثل f في هذه الحالة عرض النطاق bandwidth البصري وتدعى f_{3dB} وإذا أردنا معرفة حد حاصل ضرب التردد في الطول فإن :

$$f_{3dB} \times L = \frac{L}{2\Delta\tau} = \frac{1}{2\Delta(\tau/L)} \quad \text{..... (4.29)}$$



الشكل (٤ - ٢٩) التشكيل عندما يكون لكل من طولي موجة الحامل تأخير مساوٍ إلى نصف دور التشكيل $\Delta\tau = \frac{T}{2}$

حيث أن المستقبلات المستخدمة تعتمد على القدرة الكهربائية فمن الضروري معرفة العلاقة بين عرض نطاق القدرة البصرية وعرض نطاق القدرة الكهربائية .

حيث أن :

$$f_{1.5dB}\ (\text{بصري}) = f_{3dB}\ (\text{كهربائي}) \quad \text{..... (4.30)}$$

و

$$f_{1.5dB}\ (\text{بصري}) = 0.71\ f_{3dB}\ (\text{بصري}) \quad \text{.....(4.31)}$$

وذلك عند استخدام منبع ضوئي جاوسي Gaussian وهي السمة الغالبة لمعظم المنابع الضوئية . من المعادلات (4.28) و (4.30) و (4.31) نستطيع كتابة :

$$f_{3dB}\ (\text{كهربائي}) = \frac{0.35}{\Delta\tau} \quad \text{..... (4.32)}$$

و

$$f_{3dB}\ (\text{كهربائي}) \times L = \frac{0.35}{\Delta(\tau/L)} \quad \text{..... (4.33)}$$

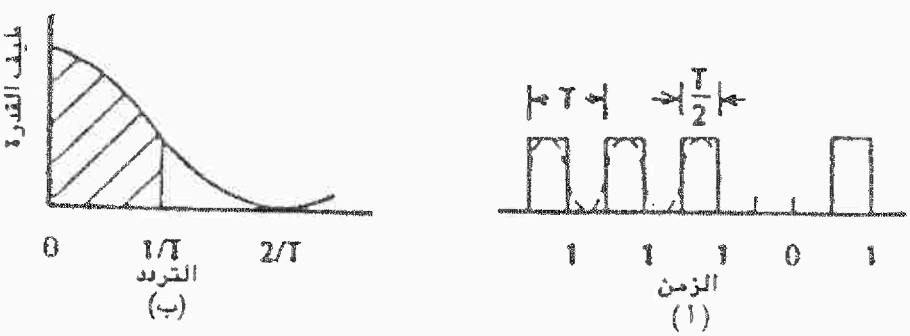
حيث أن معظم الاتصالات البصرية رقمية لنرى الآن تأثير انبساط النبضة على الاشارات المختلفة المستخدمة في هذه الأنظمة ونبدأها باشارات العودة إلى الصفر Return- to Zero (RZ) كما هو في الشكل (٤-٣٠) حيث يحدد لكل بتة bit موقع زمني T. ويكون معدل المعطيات data rate $R = \frac{1}{T}$ b/s. تشغل النبضات نصف الشق الزمني (الشكل ٤-٣٠ أ) وفي الشكل (٤-٣٠ب) يظهر المحتوى الترددي لهذه النبضات. ويعبر عن معدل المعطيات باستخدام المعادلة (4.32) بالآتي :-

$$R_{RZ} = \frac{1}{T} = f_{3dB} \text{ (كهربائي)} = \frac{0.35}{\Delta\tau} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.34)$$

و

$$R_{RZ} \times L = \frac{0.35}{\Delta(\tau/L)} = \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.35)$$

بالإمكان الحصول على هذه النتيجة بإفتراض أن انبساط النبضة المسموح به مساوٍ إلى 70% من مدة النبضة ، حيث أن مدة نبضة RZ هي نصف دور التكرار repetition period نحصل على $\Delta\tau = 0.7\ T/2 = 0.35\ T$ ومعدل المعطيات $R = \frac{1}{T} = \frac{0.35}{\Delta\tau}$. في نظام RZ تكون النبضات منفصلة تماماً عن بعضها ومقدار الانبساط المسموح به يقل عن 35% من الشق الزمني time slot وعندما لايحصل ذلك قد تنبسط أجزاء من النبضة في الشق الزمني المجاور مما يؤدي إلى حدوث تداخل بين الرموز intersymbol interference فيزيد من احتمال أخطاء الكشف في جهاز الاستقبال.



الشكل (٤-٣٠) إشارة العودة إلى الصفر وطيف القدرة لها
(أ) المنحنى ذو الخط المقطع هو المنحنى الجيبي المقارب
(ب) تشير المنطقة المهشرة إلى عرض النطاق المطلوب للارسال

النوع الآخر من الاشارات هي إشارات عدم العودة للصفر non return to zero (NRZ) كما يبينه الشكل (٤-٣١) حيث الزمن المخصص لكل بته هو T ومعدل المعطيات $\frac{1}{T}$. يبلغ عرض النطاق للإرسال $\frac{1}{2T}$ وهو مساوٍ إلى نصف ماهو مطلوب في نظام RZ . والسبب في ذلك أن نبضات NRZ أطول بمرتين من نبضات RZ وعرض نطاق النبضة يتناسب عكسياً مع مدة النبضة .

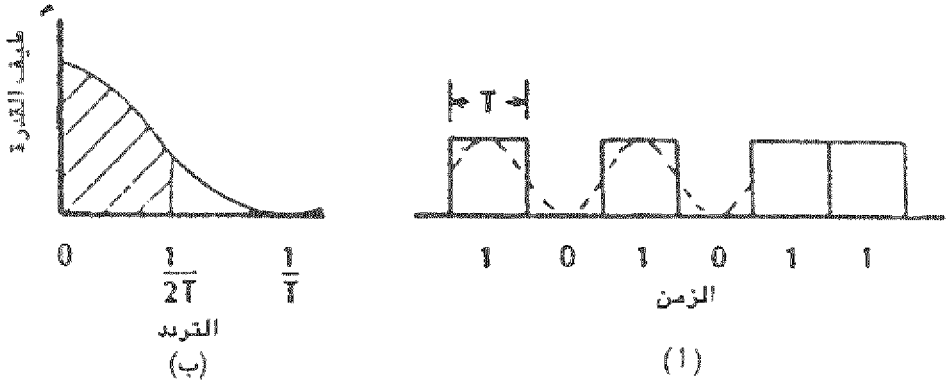
يبلغ معدل المعطيات R المسموح به في هذا النظام $R = 2f$ حيث تمثل f عرض نطاق النظام باستخدام عرض النطاق الكهربائي المذكور في المعادلة (4.32) نجد أن :

$$R_{NRZ} = 2\ f_{3dB}\ (\text{كهربائي}) = \frac{0.7}{\Delta\tau} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (4.36)$$

أو

$$R_{NRZ} \times L = \frac{0.7}{\Delta(\tau/L)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (4.37)$$

يبلغ انبساط النبضة المسموح به 70% من مدة النبضة T لقطار من نبضات NRZ .



الشكل (٤-٣١) اشارة عدم العودة إلى الصفر وطيف القدرة لها

(أ) المنحنى ذو الخط المتقطع هو المنحنى الجيبي المقارب

(ب) تشير المنطقة المهشرة إلى عرض النطاق المطلوب للارسال

مثال (٤-٣) : أوجد (المعدل × الطول) و (التردد × الطول) لليف بصري مصنوع من السليكا طوله 10km إذا استخدمنا (أ) ثنائي باعث للضوء LED طول موجته $\lambda_o = 820$ nm وعرض خطه $\Delta\lambda = 20$ nm .

(ب) ثنائي ليزر LD طول موجته 1500 nm وعرض خطه $\Delta\lambda = 40$ nm .

الحل : سبق وأن وجدنا في المثال (٤-٢) قيم $\Delta\tau$ و $\Delta(\tau/L)$ والتي نوجزها في الجدول (٤-٥) وعند استعمال هذه المعطيات في المعادلات (4.29) و(4.33) و(4.37) نحصل على النتائج المذكورة في الأعمدة الأخيرة من الجدول (٤-٥) .

الجدول (٤-٥) أمثلة عن سعة المعلومات

(محددة بتشتيت المادة في السيليكا)

كهربائي		بصري		المنبع			
$R_{RZ} \times L$	$f_3 - dB \times L$	$R_{NRZ} \times L$	$f_3 - dB \times L$	$\Delta(\tau/L)$	$\Delta\lambda$	λ	
Gbps × km	GHz × km	Gbps × km	GHz × Km	ns/km	nm	μm	
0.16	0.16	0.32	0.23	2.2	20	0.82	LED
0.47	0.47	0.94	0.67	0.75	50	1.5	LED
3.2	3.2	6.4	4.55	0.11	1	0.82	LD
23.3	23.3	46.7	33.33	0.015	1	1.5	LD

تبين النتائج المذكورة في الجدول (٤-٥) ميزات الأطوال الموجية الطويلة مقارنة بالموجات الأقصر وذلك بمقارنة النتائج للطول الموجي 1.5 μm والطول الموجي0.82 μm. ميزة أخرى وهي تفوق ثنائيات الليزر على الثنائيات الباعثة للضوء LED لأن عرض الخط في LD أقل بكثير من عرض الخط في LED. لذا فإن معدل المعطيات للأنظمة التي تستخدمLD أعلى بكثير من معدل المعطيات التي تستخدم LED غير أن تكلفة أنظمة LD التي تعمل في منطقة الأطوال الموجية الطويلة (1.3 – 1.5 μm) أكثر تعقيداً وتكلفة من أنظمة LED التي تعمل في منطقة الأطوال الموجية الأقصر.

٤ - ٦ الأنماط في الألياف البصرية Modes in Optical Fibers

للحصول على الأنماط المنتشرة في الألياف البصرية لابد من أخذ النظرية الكهرومغناطيسية بعين الاعتبار وأساس هذه الدراسة يعتمد على حل معادلات ماكسويل لدليل موجي اسطواني متجانس مكون من مادة عازلة dielectric كما هو الحال في الليف البصري. وتتطلب هذه الدراسة استخدام الجبر والرياضيات ومعادلات معقدة تخرج عن مجال هذا الكتاب. أظهرت هذه الدراسات تواجد أنماط عديدة مثل Transverse Electric (TE) و Transverse Magnetic (TM) وهي أنماط مغناطيسية عرضية وكهربائية عرضية بالإضافة إلى أنماط Hybrid Electric(HE) و Electric Hybrid (EH) وهي أنماط هجينة يحتوي كل منها على مركبات الحقلين الكهربائي والمغناطيسي.

سنستخدم في هذا البند النموذج الشعاعي البصري للتعرف على الأنماط المسموح بها. إن الحقل في النموذج الشعاعي لدليل الموجة هو موجة مستوية تتعرج ذهاباً وإياباً بين الحد الفاصل بين اللب والكساء بزاوية θكما هو في الشكل (٤-٣٢) حيث تقع θ بين الزاوية الحرجة θ_c و 90°. يمكن النظر إلى الحقل الكلي لمجموع موجتين مستويتين منتظمتين إحداهما تنتشر نحو الأعلى بزاوية θ وتنتشر الأخرى نحو الأسفل بنفس الزاوية أيضاً كما هو في الشكل (٤-٣٣) ولهذه الموجات عامل انتشار k حيث:

$$k = k_o n_1 \quad \text{..... (4.38)}$$

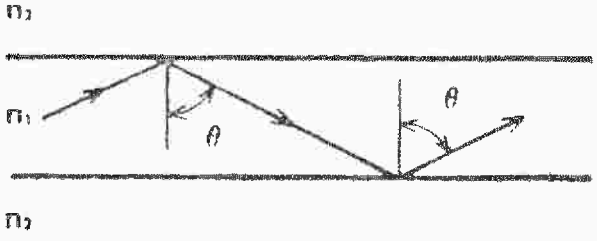
ويمثل $k_o = \frac{2\Pi}{\lambda}$ عامل الانتشار في الفراغ الحر و Π هي النسبة الثابتة = 3.14 .
من الشكل (٤-٣٣) يمكن التعبير عن عامل الانتشار β في الاتجاه الأفقي لهذه الموجة بالآتي :

$$\beta = k \sin\theta = k_o n_1 \sin\theta \quad \ldots\ldots\ldots (4.39)$$

وحيث أن $n_{eff} = \frac{\beta}{k_o}$ فإن :

$$n_{eff} = n_1 \sin\theta \quad \ldots\ldots\ldots (4.40)$$

يمثل معامل الانكسار الفعال n_{eff} المعلمة الرئيسية في الانتشار الموجه تماماً مثل معامل الانكسار n في انتشار الموجة غير الموجّه .

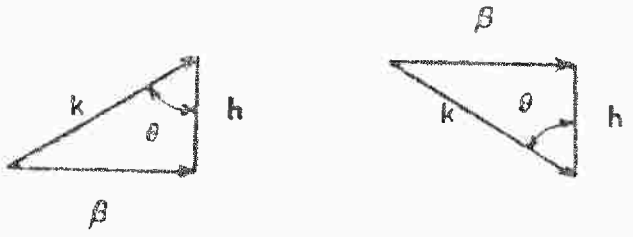


الشكل (٤-٣٢) دورة كاملة لنمط يسلك مسار متعرج حيث تحصل ازاحة لطور أثناء المسار وعلى الحدود العاكسة

في حقيقة الأمر لن تتمكن كافة الموجات المقترنة من الانتشار وسيسمح فقط لبعض اتجاهات الشعاع ، التي تنسجم مع انماط دليل الموجة ، بالانتشار خلال الليف وهي التي تحقق المعادلة التالية :

$$\Delta\phi = m\,2\Pi \quad \ldots\ldots\ldots (4.41)$$

حيث $\Delta\phi$ هي انزياح الطور للدورة الكاملة و m عدد صحيح .



الشكل (٤-٣٣) عوامل الانتشار لموجات في دليل موجي

عندما تتحرك الموجات في النموذج الشعاعي إلى أعلى وإلى أسفل تتداخل وتتراكب ويحصل انزياح للطور عند كل من حدي الفصل العاكسين وعلى طول المسار المتعرج كما هو في الشكل (٤-٣٢) ويمكن تغيير انزياح الطور $\Delta\phi$ لطول موجي ثابت وذلك بتغيير اتجاه الشعاع وتكون الموجات المنتشرة على هذه الزوايا هي أنماط دليل الموجة وهي اتجاهات الانتشار المسموح بها. وان الموجات التي زوايا شعاعها لاتحقق المعادلة (4.41) ستضعف بسرعة بسبب التداخل التهديميdestructive interference.

تشير حلول معادلات ماكسويل والمعادلة(4.41) أن الموجات المسموح بانتشارها ليست مستمرة بل تنتشر كاشعاعات منفردة discrete تفصل بينها زاوية تقريبية مقدارها $\Delta\Psi$ ففي الليف العتبي نجد أن :

$$\Delta\Psi = \frac{\lambda}{d}(1\ \text{rad}) = \frac{\lambda}{d}(57^{\circ}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.42)$$

حيث أن d قطر الليف و λ الطول الموجي و $1\ \text{rad.} = 57^{\circ}$ على فرض أن الفرق بين n_1 و n_2 يعادل 1% .

سنقوم الآن بالتعرف على عدد الأنماط المسموح بها لعدة أنواع من الألياف البصرية مع الأخذ بعين الاعتبار المعلمات التي تحدد عدد الأنماط.

٤-٦-١ الأنماط في الألياف العتبية Modes in Step Index Fibers

تسمح الألياف العتبية متعددة النمط بانتشار عدد محدد من الأنماط يعتمد على مَعْلَمات الدليل الموجي مثل الفرق بين معامل انكسار اللب والكساء وقطر اللب والطول الموجي λ والتي يعبر عنها بالمتغير V ، حيث تدعى V التردد المقيّس normalized frequency ويعبر عنه بالمعادلة التالية :

$$V = \frac{2\,\Pi\, a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.43)$$

حيث a هو نصف قطر اللب و λ هو طول موجة الفراغ الحر. يرتبط V بعدد الأنماط N المسموح بانتشارها لجميع الاستقطابات بالمعادلة التالية :

$$N = \frac{V^2}{2} \qquad V > 10 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.44)$$

مثال (٤-٤) :

كم عدد الأنماط المسموح انتشارها في ليف زجاجي قطر لبه 50 µm و $n_1 = 1.48$ و $n_2 = 1.47$ إذا كان طول موجات التشغيل 0.82 µm و 1.3 µm .

الحل : باستخدام المعادلة (4.43) نحصل على :

$$V = \frac{2\,\Pi \times 25}{0.82}\sqrt{1.48^2 - 1.47^2} = 32.885$$

من المعادلة (4.44) نحصل على عدد الأنماط $N = 541$

أما إذا كانت $\lambda = 1.3\ \mu m$ فإن

$$V = \frac{2\,\Pi \times 25}{1.3}\sqrt{1.48^2 - 1.47^2} = 20.7428$$

وعدد الأنماط $N = 215$

نلاحظ من هذا المثال أنه على الرغم من صغر الليف النسبي إلا أنه يتحمل عدداً كبيراً من الأنماط ولو أن عدد الأنماط قل باستخدام طول موجي أعلى . حيث أن التردد المقيس يتناسب مع الفرق بين معاملي الانكسار في اللب والكساء وإن المحافظة على هذا الفرق صغيراً يقلل من عدد الأنماط المسموح بانتشارها . كذلك يمكن الاقلال من عدد الأنماط باستخدام ليف يكون قطر اللب فيه قريب من الطول الموجي عندها تبرز صعوبة التعامل مع الليف ولكن المزايا التي نكسبها من جراء انتشار نمط واحد مثل زوال تأثير التشتيت النمطي أدت إلى انتشار استخدام هذا النوع من الألياف للمسافات الطويلة والتطبيقات ذات النطاق العريض . وجد أن قيمة التردد المقيّس V التي تعطينا نمطاً واحداً هي :

$$O \leq V < 2.405 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.45)$$

ومن المعادلتين (4.40) و (4.42) نحصل على :

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{2.405}{2\Pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{2.405}{2\Pi\, NA} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.46)$$

كشرط لانتشار نمط واحد .

مثال (٤-٥) :

أوجد الأقطار العظمى المسموح بها لليف زجاجي احادي النمط إذا كانت $n_1 = 1.48$ و $n_2 = 1.47$ و $\lambda = 0.82\ \mu m$ و $\lambda = 1.3\ \mu m$ ؟

الحل :

باستخدام المعادلة (4.46) نحصل على :

$$\frac{a}{\lambda} = \frac{2.405}{2\,\Pi\sqrt{1.48^2 - 1.47^2}} = 2.23$$

إذا كانت $\lambda = 1.3\ \mu m$ فإن $a = 2.9 \mu m$ وقطر اللب $5.8\ \mu m$

وإذا كانت $\lambda = 0.82\ \mu m$ فإن $a = 1.83\ \mu m$ وقطر اللب $3.66\ \mu m$

نستنتج من ذلك أن أقطار الألياف أحادية النمط صغيرة جداً مقارنة بالألياف متعددة النمط ويمكن زيادة قطر الليف إذا كانت قيم n_1 وn_2 متقاربة أكثر واستخدمنا أطوال موجية أطول . تتراوح أقطار الألياف أحادية النمط العملية بين 4 µm و 12 µm .

٤-٦-٢ الأنماط في الألياف المتدرجة Modes in Graded Index Fibers

تصف المعادلة (4.3) تغير المظهر الجانبي لعامل الانكسار في الليف المتدرج. إن أفضل النتائج لانتشار الأنماط المتعددة تم الحصول عليها باستخدام الليف المتدرج ذي القطع المكافيء parabolic المذكور في المعادلة (4.5) حيث $\alpha = 2$.

يعطى معامل الانكسار الفعال n_{eff} للانماط المسموح بانتشارها حسب مايلي:

$$n_{eff} = \frac{\beta_{pq}}{k_o} = n_1 - (p+q+1)\frac{\sqrt{2\Delta}}{k_o a} \quad \ldots\ldots\ldots (4.47)$$

حيث أن :

β = عامل الانتشار الطولي .

$k_o = \frac{2\Pi}{\lambda_o}$ = عامل الانتشار في الفراغ الحر .

p,q = أعداد صحيحة .

n_{eff} = معامل الانكسار الفعال ويتراوح بين n_1 وn_2 $(n_2 < n_{eff} < n_1)$

نحصل على النمط الأدنى أو الأول عندما تكون $p = q = 0$ وعندما تتزايد قيم p ، q نحصل على أنماط أعلى .

يقدر العدد الكلي للأنماط N في الليف المتدرج بالآتي :

$$N = \frac{V^2}{4} \qquad V > 10 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.48)$$

حيث يمثل V التردد المقيّس . نلاحظ من المعادلة (4.48) أن عدد الأنماط في الليف المتدرج يبلغ نصف عدد الأنماط في الليف العتبي كما جاء في المعادلة (4.44).

مثال (٤-٩) :

أوجد عدد الأنماط في ليف قطره 50 μm إذا كانت $n_1 = 1.48$ و $n_2 = 1.47$ للأطوال الموجية 0.82 μm و1.3 μm .

الحل : من المعادلة (4.43) نجد قيمة V عندما تكون $\lambda = 0.82\ \mu m$

$$V = \frac{2\Pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$= \frac{2\Pi \times 25}{.82}\sqrt{1.48^2 - 1.47^2} = 32.88$$

وحيث أن عدد الأنماط N لليف المتدرج تساوي $\frac{V^2}{4}$ فإن عدد الأنماط الكلي عندما يكون الطول الموجي 0.82 μm هو 270 .

عندما تكون $\lambda = 1.3\ \mu m$:

$$V = \frac{2\Pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\Pi \times 25}{1.3}\sqrt{1.48^2 - 1.47^2}$$

$$= 20.7428$$

وعدد الأنماط N عندما يكون الطول الموجي 1.3 μm هو 112 .

سبق وأن عرفنا قيمة معامل الانكسار الفعال n_{eff} بالمعادلة التالية :

$$n_2 \le n_{eff} \le n_1$$

ويحدث قطع cutoff للنمط عندما يساوي معامل انكساره n_2 . يمكن أن نحدد من هذه المعلومة العلاقة بين قطر اللب وطول الموجة ومعاملات انكسار القطع. وإذا طبقنا هذا لمعرفة شروط انتشار نمط واحد بأن نضع $n_{eff} = n_2$ و $p = 1$ و $q = 0$ في المعادلة (4.47) نحصل على العلاقة بين نصف قطر اللب a والطول الموجي λ وهي :

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{1.4}{\Pi\sqrt{n_1\,(n_1 - n_2)}} \qquad \text{..... (4.49)}$$

تشير هذه المعادلة أن الحصول على ليف أحادي النمط ممكن من خلال اختيار قيمة n_1 قريبة من n_2 وبالعمل بطول موجي عالي.

وبمقارنة المعادلة (4.46) مع المعادلة (4.49) نجد أن القيمة العظمى لـ $\frac{a}{\lambda}$ لانتشار نمط واحد في ليف متدرج بقطع مكافيء هي أكبر بـ 1.6 مما هي عليه في الليف العتبي.

مثال(٤-٧) :

(أ) احسب أكبر قطر لب ممكن لانتشار نمط واحد في ليف متدرج على شكل قطع مكافيء فيه $n_1 = 1.48$ و$n_2 = 1.46$ إذا كان الطول الموجي $\lambda = 0.82\ \mu m$. (ب) احسب قيمة معامل الانكسار الفعال n_{eff} مستخدماً المعلومات في الجزء (أ).

الحل :

(أ) لأيجاد القطر نجد قيمة a من المعادلة (4.49)

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{1.4}{\Pi\sqrt{1.48\,(1.48-1.46)}}$$

نجد أن قيمة $\frac{a}{\lambda} = 2.6$ وقيمة a عندما تكون $\lambda = 0.82\ \mu m$ هي 2.1 فيكون قطر لب الليف$4.2\ \mu m$.

(ب) للحصول على معامل الانكسار الفعال n_{eff} نستخدم المعادلة (4.47) وقيم $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0.0135$, $k_o = \frac{2\Pi}{\lambda}$, $p = q = 0$ للحصول على :

$$n_{eff} = n_1 - \frac{\sqrt{2\Delta}}{2\Pi\left(\frac{a}{\lambda}\right)} = 1.48 - \frac{\sqrt{2\times.0135}}{2\Pi\left(\frac{2.1}{.82}\right)} = 1.47$$

للنمط الوحيد (0 ,0)

٤ - ٧ الخلاصة Summary

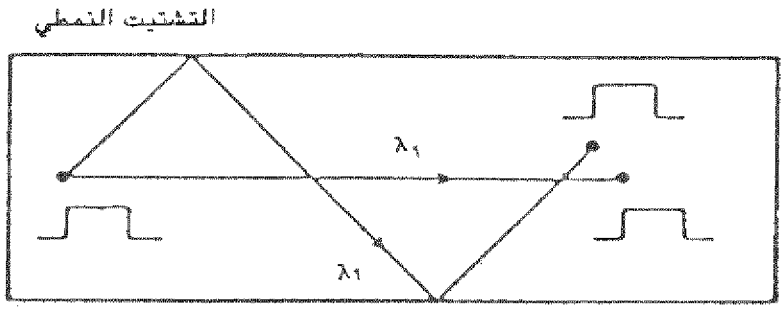
شرحنا في هذا الفصل بنى الألياف العتبية والمتدرجة وخصائص كل نوع والتي تمكننا من اختيار الليف المناسب للنظام البصري . وهذه العناصر هي :

١ - فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture

تمثل فتحة النفوذ العددية العلاقة المثلثية لجيب زاوية القبول والتي ترتفع بارتفاع قيمة زاوية القبول وتعتمد فتحة النفوذ العددية على الفرق بين معاملي انكسار اللب n_1 والكساء n_2 حيث أن $NA = \sin \alpha_o = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. عندما تزداد قيمة NA فإن هذا يعني دخول ضوء أكثر إلى الليف والذي يبدو أنه شيء جيد. لكن ذلك يؤدي إلى توسع انتشار الشعاع الضوئي على زاوية كبيرة مما يؤدي إلى زيادة في تشتيت النمط مما يحد من معدل نقل المعلومات ، لذا نحرص على اختيار قيمة عالية لفتحة النفوذ العددية NA لزيادة كفاءة الاقتران من المنبع في نظام محدود القدرة لايشكل انبساط النبضة فيه عاملاً مهماً (كالشبكات القصيرة ومعدل المعلومات المنخفض) .

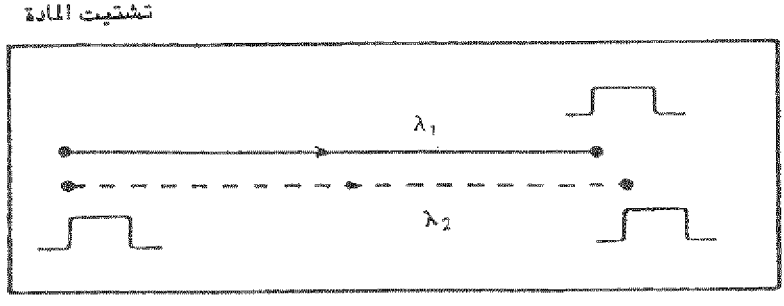
٢ - التشتيت Dispersion

يعبر التشتيت عن انبساط أو اتساع النبضات وينقسم إلى قسمين وهما التشتيت النمطي والتشتيت الباطني . في التشتيت النمطي يؤدي إنتشار الانماط ، ذات الطول الموجي الواحد للألياف متعددة النمط ، في مسارات مختلفة أو زوايا مختلفة إلى وصول الاشارات المرسلة إلى نهاية الليف في أوقات مختلفة نظراً لاختلاف أطوال مساراتها كما هو في الشكل (٤-٣٤). وهذا التشتيت لايعتمد على الطول الموجي أو عرض خط المنبع.

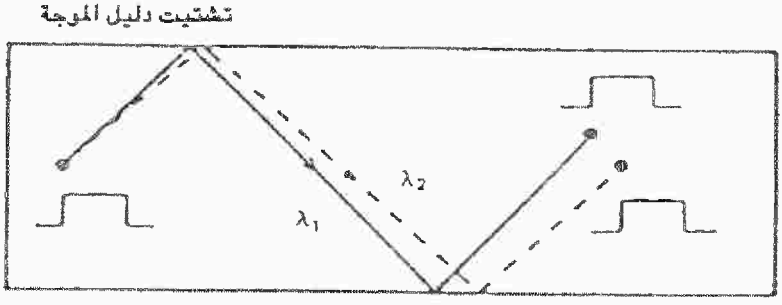


الشكل(٤-٣٤) تشتيت النمط حيث نرى أن نبضة بطول موجي واحد تتوزع قدرتها إلى أنماط تنتشر بسرعات محورية مختلفة بسبب الاختلافات في المسار

أما التشتيت الباطني فينتج من عرض خط المنبع البصري لأن المنابع البصرية لاتبعث الضوء بطول موجي واحد بل بحزمة من الأطوال الموجية وينتج عنه تشتيت المادة الموضح بالشكل (٤-٣٥) وتشتيت دليل الموجة الموضح بالشكل (٤-٣٦) وذلك نتيجة تغير معامل الانكسار مع الطول الموجي وهذا يؤدي إلى تغير سرعة النبضات في الليف لأن سرعة الضوء في الليف $v = \frac{c}{n}$.



الشكل (٤-٣٥) تشتيت المادة حيث تتغير سرعة النبضات في الليف نتيجة اختلاف أطوالها الموجية



الشكل (٤-٣٦) تشتيت دليل الموجة - نبضات بأطوال موجية مختلفة ولها نفس النمط تنتشر بزوايا مختلفة قليلاً فيحدث اختلافاً في السرعات المحورية النهائية ويعطى التشتيت لكل وحدة طولية (ns/km) أو (ps/km) للتشتيت النمطي ولكل وحدة طولية ووحدة عرض الخط (ns/nm - km) للتشتيت الباطني .

٣ - التوهين Attenuation

يؤدي التوهين إلى فقد أو خفض قيمة الاتساع amplitude في الطاقة البصرية المرسلة عبر الليف البصري وذلك لأسباب عديدة كالامتصاص والانتشار والتأثيرات الهندسية وتقاس قيمة التوهين بالديسيبل لكل كيلومتر أي أن قيمته تزداد بازدياد المسافة ويختلف التوهين تبعاً لنوع المادة المصنع منها الليف حيث نجد أن الألياف المصنعة كلياً من زجاج السليكا أقل توهيناً من ألياف السليكا المغطاة بكساء بلاستيك أما الألياف المصنوعة كلياً من البلاستيك ففقدها عالٍ جداً ، ولو نظرنا إلى منحنى التوهين الكلي لألياف الزجاج المصنوعة من السليكا شكل (٤-١٠) وهي الشائعة الاستخدام نجد

أن التوهين يقل عند بعض الأطوال الموجية ويرتفع عند أطوال موجية أخرى حيث تبلغ أقل قيمة له عند $\lambda = 1.3\ \mu m$ و $\lambda = 1.55\ \mu m$ وأقصى قيمة للتوهين عند $\lambda = 0.95\ \mu m$ و $\lambda = 1.23 \mu m$ و $\lambda = 1.39\ \mu m$.

٤ - اختيار الطول الموجي Choice of Wavelength

استخدم الطول الموجي 820nm في المراحل الأولى من أنظمة الاتصالات البصرية نظراً لتوفر المنابع والكواشف البصرية في هذا المجال ويجب أن يكون اختيار الطول الموجي مبني على الاقلال من الفقد والاقلال من التشتيت وقد اظهرت الدراسات فيما بعد تواجد ثلاث نوافذ يكون الفقد عندها منخفضاً ونرى في الجدول (٤-٦) الفقد عند النوافذ الثلاث .

النافذة	الطول الموجي λ (nm)	الفقد dB/km
الأولى	820 - 880	2.2
الثانية	1200 - 1320	0.6
الثالثة	1550 - 1610	0.2

الجدول (٤-٦) النوافذ قليلة الفقد

أثبت العمل في النافذة الأولى حيث الطول الموجي يتراوح بين 820 nm و880 nm أنه عملي جداً لأن الفقد وانبساط النبضة قليل نسبياً لاستخدامه في أنظمة المسافات الطويلة وذات المعدل المرتفع خصوصاً وأن المنابع والكواشف متوفرة . أما في النافذة الثانية فإن الطول الموجي حول $\lambda = 1300\ nm$ مناسب جداً لأن التشتيت الباطني يساوي صفراً وقد تم تصنيع منابع وكواشف تعمل عند هذا الطول الموجي . أما النافذة الواقعة بين 1550 nm و 1610 nm فيكون الفقد عندها أقل مايمكن بينما ترتفع إلى حد ما قيمة التشتيت الباطني وللإقلال من قيمة التشتيت عند هذا المدى من الأطوال الموجية فقد تم

تصميم ألياف يكون التشتيت فيها أقل ما يمكن عند $\lambda = 1550\ nm$ والهدف من ذلك هو الحصول على ألياف يكون الفقد والتشتيت أقل مايمكن عند هذا الطول الموجي وتسمى هذه الألياف مزاحة التشتيت dispersion shifted fibers وتبرز هذه التحسينات بصفة خاصة عند استخدام ألياف أحادية النمط لاختفاء التشتيت النمطي فيها ، لذا نرى أن النافذتين الثانية والثالثة ملائمتين للاتصالات بعيدة المدى وذات المعدلات المرتفعة .

مما سبق تتضح لنا ضرورة تحديد نوع الاستخدام للنظام البصري الذي يوصف أداءه بالتوهين وانبساط النبضة وفتحة النفوذ العددية. من خلال دراستنا للألياف متعددة النمط وجدنا أن الألياف المتدرجة تستطيع إرسال معلومات بمعدلات أعلى من الألياف العتبية غير أن اقتران المنبع إلى الليف العتبي أعلى من اقتران المنبع لليف المتدرج بينما يكون الفقد في كلاهما واحد . وتستخدم الألياف المتدرجة للحصول على تشوه نبضة منخفض مقارنة بالألياف العتبية مما يجعل الألياف المتدرجة مناسبة للمسافات الطويلة ذات المعدل العالي .

أما إذا كان الهدف من نظام الاتصالات هو سعة معلومات عالية ولمسافات طويلة فلابد من استخدام ألياف أحادية النمط عند الأطوال الموجية الواقعة في النافذتين الثانية والثالثة ولابد من الإشارة هنا إلى أن الألياف أحادية النمط أكثر تكلفة من الألياف المتعددة النمط واقتران الضوء فيها أقل من الألياف متعددة النمط .

نورد في الجدول (٤-٧) خواص بعض أنواع الألياف البصرية والتي تشمل حد الطول الترددي وانبساط النبضة والفقد لكل كيلومتر مع ذكر المنابع البصرية المستخدمة وأطوالها الموجية حيث أن التشتيت الباطني والفقد يتغيران مع الطول الموجي. عندما يغلب التشتيت النمطي كما هو الحال في الليف العتبي متعدد النمط والذي لايتأثر بعرض خط المنبع فإن منابع LED مناسبة وان استخدام منابع بعرض خط ضيق لن يؤدي إلى تخفيض الانبساط الاجمالي بشكل كبير . أما عندما يكون التشتيت الباطني هو الغالب كما هو الحال في الليف أحادي النمط أو المتدرج متعدد النمط فإن استخدام منابع ذات

عرض خط ضيق كثنائيات الليزر LD سيؤدي إلى انقاص انبساط النبضات.

عندما نستخدم الأطوال الموجية في النافذتين الثانية والثالثة حيث يقل تأثير التشتيت الباطني الذي يعتمد على $\Delta\lambda$ فإن استخدام الثنائيات الباعثة للضوء LED يصبح مناسباً.

جدول (٤-٧) خواص بعض الألياف البصرية

الوصف	قطر اللب		الفقد	$\Delta(\tau/L)$	$f_{3-dB} \times L$	المنبع	طول الموجة
	µm	NA	dB/km	ns/km	MHz × km		nm
متعدد النمط							
زجاج							
SI	50	0.24	5	15	33	LED	850
GRIN	50	0.24	5	1	500	LD	850
GRIN PCS	50	0.20	1	0.5	1000	LED.LD	1300
SI	200	0.41	8	50	10	LED	80
بلاستيك							
SI	1000	0.53	400	-	-	LED	580
أحادي النمط							
زجاج	5	0.10	4	< 0.5	> 1000	LD	850
زجاج	10	0.10	0.6	0.017	30000	LD	1300
زجاج	10	0.10	< 1	< 0.02	> 25000	LD	1550

الفصل الرابع

أسئلة

١ - ماهي عناصر الفقد الرئيسية في الألياف البصرية.

٢ - ماأنواع فقد المادة ، إشرحها بالتفصيل ؟

٣ - ماهو الانتشار وما أنواعه ؟

٤ - ماهو التشتيت وماهي أنواعه ؟

٥ - هل بالإمكان الحصول على تشتيت صفري؟

٦ - ما الفرق بين التشتيت النمطي والباطني ؟

٧ - ماهي العلاقة بين معدل المعطيات والتشتيت؟

٨ - لماذا نستخدم ألياقاً بتشتيت مزاح ؟

٩ - متى نستخدم الطول الموجي 1.3μm و 1.5μm ؟

١٠ - أين نستخدم الألياف البلاستيكية ؟

١١ - متى نستخدم الألياف أحادية النمط ؟

١٢ - ما العلاقة بين معدل معطيات الليف والآتي :

أ - أنماط الانتشار .

ب - عرض النطاق .

جـ - زاوية القبول .

١٣ - ما العلاقة بين $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ وأنماط الانتشار ؟

١٤ - ماهي أنماط الإنتشار ؟

١٥ - ماهي الموجات المضمحلة ؟

١٦ - قارن بين الليف المتدرج والليف العتبي وأيهما أفضل؟

١٧ - ماهو التردد المقيّس ؟

١٨ - هل هناك أنظمة تستخدم الأطوال الموجية للنافذة الأولى ولماذا ؟

مسائل :

١ - إثبت أن $\cos\theta c = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1}}$ مبتدئاً بالمعادلة (4.1) .

٢ - إذا كانت $n_1 = 1.46$ و $\Delta = 0.01$ و $\alpha = 2$ و $a = 50\,\mu m$ لليف بمعامل انكسار متدرج .

أ - ارسم منحنى بمقياس رسم يبين تغير $n(r)$ ضمن اللب .

ب - كرر ماسبق على نفس الرسم بعد تغيير α إلى 8 .

جـ - كرر ماجاء في جزء أ بعد تغيير Δ إلى 0.001 واعتبار $\alpha = 2$.

٣ - ارسم فتحة النفوذ العددية عبر مقطع ليف متدرج ذو قطع مكافيء فيه $n_1 = 1.5$ و $\Delta = 0.0135$ و $a = 50\,\mu m$.

٤ - لماذا تزداد قيمة الفقد عند $1.37\mu m$.

٥ - ما الفرق بين انتشار رالي وانتشار ماي ؟

٦ - ماسبب التشتيت المادي؟

٧ - أوجد قيمة انبساط النبضة لكل وحدة طول لليف عتبي إذا كانت $NA = 0.2$ و $n_1 = 1.46$ و $n_2 = 1.45$.

٨ - إذا كانت $n_1 = 1.5$ و $\Delta = 0.01$ لليف بالشكل (٤-٦) . إذا كان الشعاع يقطع محور الليف بزاوية 5^0 بالنسبة للمحور أوجد قيم الزوايا حتى يعود الشعاع ويقطع المحور من جديد . وعند أي قيمة لـ $\frac{r}{a}$ يرجع الشعاع .

٩ - لو تم إرسال موجتين λ_1 , λ_2 بحيث أن $\lambda_1 > \lambda_2$ في ليف من السليكا ، أيهما يصل إلى نهاية الليف أولاً λ_1 أم λ_2 ؟

١٠ - احسب مقدار انبساط النبضة لكل وحدة طول إذا كانت $\lambda = 0.9\,\mu m$ و $\Delta\lambda = 20nm$. كرر الحساب إذا كانت $\Delta\lambda = 2nm$.

١١ - أوجد مقدار انبساط النبضة لكل وحدة طول إذا كانت $M = -20ps/(nm-km)$, $\lambda = 1.5\mu m$.

١٢ - استعمل نتائج المسألتين (١٠) و (١١) لحساب معدلات المعطيات العظمى وترددات التشكيل

لمسافات 100m و 10km و 100km .

١٣ - أحسب عامل الانتشار في الهواء وفي الزجاج إذا كان طول الموجة في الفراغ الحر $\lambda = 1.3\ \mu m$.

١٤ - أحسب عدد الأنماط في ليف عتبي قطره $50\mu m$ و $n_1 = 1.46$.

١٥ - إثبت أن القيمة العظمى لـ $\frac{a}{\lambda}$ لليف بقطع مكافيء أحادي النمط هو أكبر بـ 1.6 مرة من ليف عتبي أحادي النمط .

الفصل الخامس

تصنيع الألياف البصرية

الفصل الخامس

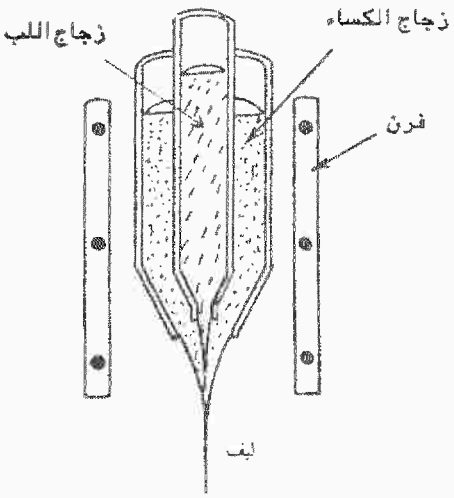
تصنيع الألياف البصرية
Manufacturing of Optical Fibers

تصنع الألياف البصرية بطرق عديدة مما يعطي فرصة لاختيار الأنسب منها للتحكم بخواصها البصرية والميكانيكية والهندسية كما يتيح للمصنع فرصة تصنيعها بسرعة وبكميات اقتصادية كبيرة. أياً كانت طريقة التصنيع المتبعة لابد في البداية من الحصول على تشكيلة أولية preform وهي عبارة عن قضيب زجاجي يحتوي على اللب والكساء مقطعة الجانبي مماثل لليف البصري غير أن حجمه كبير مقارنة بالليف المزمع تصنيعه . يسخن طرف من القضيب لدرجة حرارة عالية ويبدأ سحب الليف ويغطي بطبقة الحماية الأولية أثناء السحب وحيث أن معظم الألياف المصنعة حالياً من الزجاج فإن هذا الفصل سيكرس معظمه للتحدث عن تصنيع الألياف الزجاجية .

٥-١ انتاج التشكيلة الأولية من الزجاج الذائب Preform Production from Melted Glass

أول الطرق التي استخدمت لانتاج الألياف البصرية كانت تستخدم تشكيلة أولية تتكون من قضيب مصنع من زجاج السليكا عالي النقاوة لتكون لب الليف توضع داخل أنبوب مصنع من زجاج السليكا عالي النقاوة وبمعامل انكسار أقل من اللب ليكون الكساء ويترك فراغ قليل جداً بين القضيب والأنبوبة الزجاجيين غير أن عيب هذه الطريقة يكمن في الجسيمات الصغيرة والتموجات بين سطح الأنبوب والقضيب التي تحدث توهيناً كبيراً مما دعى إلى البحث عن طرق أخرى لتجنب هذه المشكلة والحصول على ألياف بصرية بأقل فقد ممكن ، ومن هذه الطرق استخدام البوتقة المزدوجة حيث يتم التعامل مع مادة اللب ومادة الكساء وهما في الحالة المذابة بدلاً من الحالة الصلبة كما هو في الطريقة السابقة حيث يتم استخدام بوتقتين إحداهما تحمل المكونات الأساسية

للب والأخرى تحمل المكونات الأساسية للكساء في حالتهما المذابة كما هو في الشكل (٥-١).



الشكل (٥-١) انتاج الألياف بطريقة البوتقة المزدوجة

تتكون مادة اللب من الزجاج المركب عالي النقاوة مثل lead alkali silicate glass و sodium borosilicate glass وعند سحب الليف تتم تغطية اللب بالكساء وبالإمكان تصنيع ليف بمعامل انكسار متدرج بالانتشار diffusion أو التبادل الأيوني ion exchange بين اللب والكساء وتسمى طريقة (سلفوك selfoc).

يتراوح توهين الليف المصنع بهذه الطريقة بين 5 dB/km و 20 dB/km عند $\lambda = .85\mu m$ ولايقل قطر الليف عن 200 µm.

هناك طريقة ثالثة للحصول على التشكيلة الأولية لانتاج الألياف البصرية تتمثل في احضار قضيب من السليكا عالي النقاوة ليكون المادة الأساسية للب وعند تسخينه

وسحب الليف يغطي الليف المسحوب بطبقة من البلاستيك الشفاف ليكون الكساء . وله معامل انكسار أقل من اللب وبذلك نحصل على ليف لبه من الزجاج النقي وكساءه من البلاستيك الشفاف. يتراوح توهين هذا النوع من الليف بين 5 dB/km و 50 dB/km عند $\lambda = .85\ \mu m$ وقد تصنع ألياف بصرية من البلاستيك فقط حيث يصنع اللب والكساء من مواد بلاستيكية شفافة معامل انكسار اللب فيها أكبر من معامل انكسار الكساء غير أن توهين هذه الألياف عالٍ جداً لكثير من استخدامات الاتصالات وقد يتراوح بين 100 dB/km و 400 dB/km عند $\lambda = 2.6\ \mu m$.

لاحظنا في الطرق السابقة أن التوهين مرتفع مما يحد من استخدام الألياف المصنعة بتلك الطرق في أنظمة الاتصالات وفي البنود القادمة سنشرح الطرق المختلفة لتصنيع ألياف بصرية بتوهين قليل جداً .

٥-٢ إنتاج التشكيلة بترسيب بخار الزجاج Preform Production by Glass Deposition out of the Vapor Phase

تستخدم طرق عديدة للحصول على تشكيلات أولية تصنع منها ألياف بصرية ذات توهين قليل تعتمد في مجملها على تراكم الزجاج خارجياً أو داخلياً . ففي طريقة تراكم البخار الخارجي يستخدم قضيب دوار كهدف لوضع الزجاج عليه أما في تراكم البخار المحوري فيتم وضع الزجاج على نهاية قضيب من زجاج السليكا . أو يتراكم البخار على السطح الداخلي لأنبوب من زجاج السليكا .

٥-٢-١ الترسيب بالتراكم الخارجي Outside Vapor Deposition

يتم انتاج التشكيلة الأولية بهذه الطريقة بالخطوتين التاليتين :

(١) يستخدم قضيب اسطواني من زجاج السليكا أو الألومينا Al_2O_3 أو الجرافين graphine إذ يوضع القضيب في مكينة خراطة تقوم بلفه وتحريكه طولياً بصفة مستمرة كما هو في الشكل (٥-٢) ، تسخن منطقة ضيقة من السطح الخارجي باستخدام موقد

يستخدم غاز الميثان أو البروبين أو خليط من غاز الأوكسجين والهيدروجين .

أثناء ذلك يمرر الأوكسجين النقي بمحاليل تحتوي المكونات الأساسية لتصنيع التشكيلة وغالباً ماتكون من كلوريد السليكا $SiCl_4$ أو كلوريد الجرمانيوم $Ge\ Cl_4$ ثم يمرر الأوكسجين ، مع الأبخره الناتجة من التفاعل المائي للمكونات الأساسية ، خلال الموقد لتترسب على سطح القضيب الدوار لتكون الطبقة الأولى لذلك التشكيل.

ومعادلات التفاعل الكيميائي للمواد المستخدمة هي :

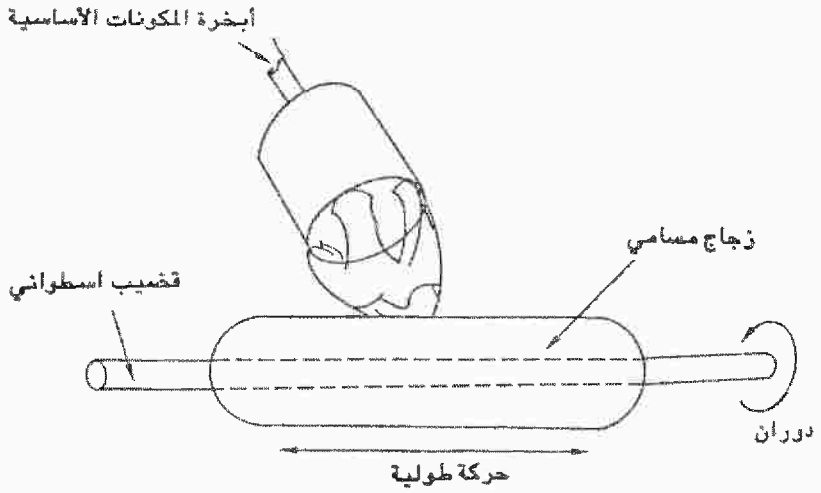
$$Si\ Cl_4 + 2\ H_2\ O \rightarrow SiO_2 + 4HCl$$

$$Ge\ Cl_4 + 2\ H_2\ O \rightarrow GeO_2 + 4HCl$$

تكون هذه المواد طبقات رسوبية على سطح القضيب الدوار وعند تحريكه طولياً للأمام والخلف تتكون تشكيلة أولية من الزجاج المسامي porous glass preform على شكل طبقات تطعم كل طبقة من السليكا بمكونات وتركيز يختلف عن الطبقة التي سبقتها وبذلك نحصل على أنبوبة يقل معامل الانكسار فيها كلما ازدادت سماكتها حتى تخلو الطبقات الأخيرة من المواد المضافة وتصبح الطبقات الأخيرة من مادة السليكا SiO_2 الكساء إذا كان الهدف هو الحصول على ليف بمعامل انكسار متدرج . أما إذا كان الليف بمعامل انكسار عتبي فتطعم مادة السيلكا بالمواد المضافة مثل GeO_2 طبقة بعد طبقة وبعد الحصول على السماكة المناسبة للب يوقف امداد مواد الاضافة ويستمر تكوين الطبقات الأخيرة من مادة السليكا لتكوين الكساء.

بعد تكوين الطبقات الكافية للب والكساء توقف العملية وتفصل الأنبوبة الاسطوانية المكونة من الجسيمات المترسبة soot عن القضيب الاسطواني.

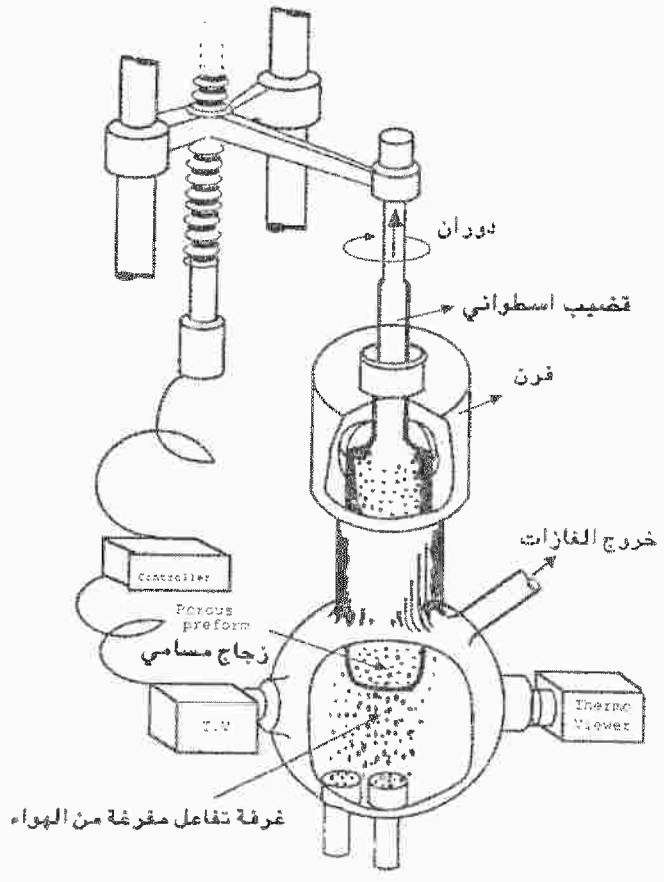
(٢) تسخن الأنبوبة على أجزاء segments طولية حتى درجة الذوبان وفي درجة حرارة تتراوح بين ١٤٠٠ °م و ١٦٠٠ °م تنهار أو تنكمش الأنبوبة وتتحول إلى قضيب زجاجي شفاف وصلب ولابد من تسخين الأنبوبة في جو مليء بغاز الكلور حتى يمنع تسرب أبخرة الماء والا سنحصل على ألياف بصرية ذات توهين مرتفع .



الشكل (٥-٢) تصنيع السليكا المطعمة بالتراكم الخارجي (OVD)

٥-٢-٢ الترسيب بالتراكم المحوري Vapor phase Axial Deposition

تستخدم هذه الطريقة التراكم المحوري لمادة السليكا والمواد المضافة على الجزء الأسفل من قضيب من السليكا . كما هو في الشكل (٥-٣) يتم دورانه وسحبه إلى أعلى بصفة مستمرة ويستخدم لهذا الغرض موقدين أو أكثر للتحكم في معامل انكسار اللب والكساء حيث تعتمد عناصر التحكم بمعامل الانكسار على درجة الحرارة وتركيب المواقد وبعدها عن القضيب وتوزيع كمية المواد المضافة . والمواد المضافة هي نفسها المستخدمة في تصنيع السليكا المطعمة بالتراكم الخارجي ، وتمرر التشكيلة الأولية المسامية بفرن حلقي للحصول على تشكيلة أولية شفافة . تسخن التشكيلة الأولية بالفرن لتنكمش داخل جو ملىء بغاز الكلورين حتى يمنع تسرب الرطوبة ، وكما أشرنا في طريقة التصنيع السابقة يمكن الحصول على ليف بصري بمعامل انكسار متدرج أو عتبي .



الشكل (٥-٣) طريقة الترسيب المحوري للحصول على تشكيلة أولية

٥-٢-٣ الترسيب بالتراكم الكيميائي المعدل Modified Chemical Vapor Deposition

تعتبر هذه الطريقة تعديلاً لطريقة التراكم الخارجي حيث تضاف المكونات من داخل أنبوب السليكا بدلاً من خارجه حيث تبدأ الخطوة الأولى بإحضار أنبوب سليكا ركب في مكينه خراطة تتولى تحريكه وتدويره طوليا كما في الشكل (٥-٤) . يتولى موقد يعمل بخليط من غازات الأوكسجين والهيدروجين تسخين الأنبوب وتمرر داخل الأنبوب في هذه الأثناء أبخرة كلوريد السليكا وهي المادة الأساسية للبلف والمواد المضافة الأخرى مثل كلوريد الجرمانيوم $GeCl_4$ المحمولة بغاز الأوكسجين النقي المار

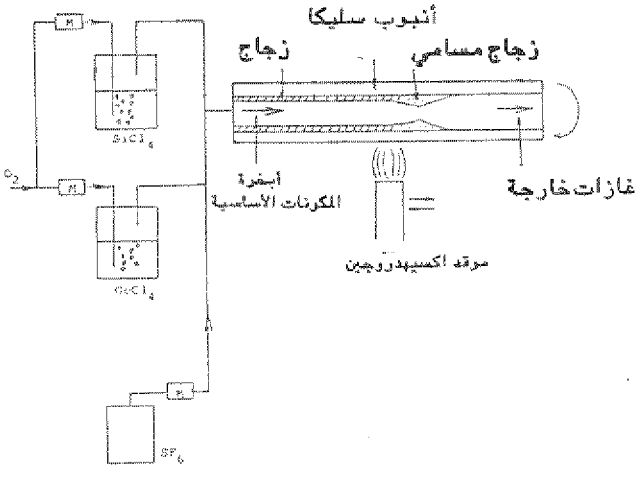
بمحاليل تحتوي على هذه المركبات الغازية . يتحرك الأنبوب أفقيا وبالتوازي مع الموقد فيحدث تأكسد للمكونات الأساسية والمضافة داخل الأنبوب نظراً لوجود الأوكسجين كما هو في المعادلات التالية:

$$Si\ Cl_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2Cl_2$$

$$Ge\ Cl_4 + O_2 \rightarrow GeO_2 + 2Cl_2$$

يتراوح سمك الطبقات المترسبة من أوكسيد السليكا وأوكسيد الجرمانيوم بين 20 µm و 40 µm . يتم التحكم بمعامل الانكسار من خلال المواد المضافة وفي هذه الطريقة يزداد معامل الانكسار كلما ابتعدنا عن الجدار الداخلي للأنبوب. يشكل الأنبوب في هذه الحالة الكساء للليف المزمع صنعه .في الخطوة الثانية بعد تكوين الطبقات الكافية للتشكيلة الأولية يتم تسخين الأنبوب على أجزاء طولية فيتحول الأنبوب إلى قضيب زجاجي شفاف .

إذا كانت الغازات المستخدمة في هذه الطريقة خالية من الهيدروجين فإن الأنبوب لايحتاج إلى تجفيف كما في الحالات السابقة ولأن الغازات المستخدمة في الموقد تقع خارج الأنبوب فإنها لاتؤثر على اللب وكذلك المؤثرات الخارجية الأخرى .

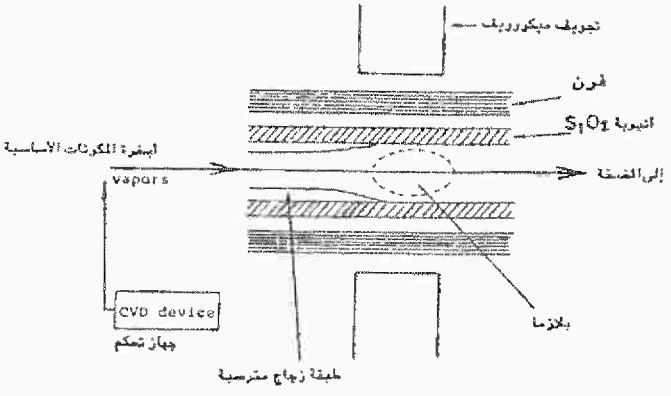


الشكل (٥-٤) طريقة تكوين التشكيلة الأولية بالتراكم الكيميائي المعدل

٥-٢-٤ الترسيب بالتراكم الكيميائي بالبلازما Plasma Chemical Vapor Deposition

يتبع في هذه الطريقة نفس الخطوات المتبعة في طريقة انتاج التشكيلة الأولية بالتراكم الكيميائي المعدل وتختلف عنها في طريقة التفاعل . ففي هذه الطريقة (الشكل ٥-٥) يتم تعرض الغازات لأشعة ميكروويف يتراوح ترددها بين 2GHz و4GHz فتتأين هذه الغازات إذا كان أنبوب السليكا تحت ضغط منخفض (10 torr) وعندما تتحد هذه الأيونات فإنها تطلق طاقة حرارية عالية تستخدم لإذابة المكونات داخل الأنبوب حيث تتفاعل الغازات مثل $Si\,Cl_4$ و$Ge\,Cl_4$ في جو مليء بالأوكسجين لتكوين طبقات من ثاني أوكسيد السليكا والمواد المضافة .

بما أن شعلة البلازما تتحرك بسرعة للأعلى وللأسفل داخل الأنبوب فبالإمكان تصنيع أكثر من ألف طبقة رقيقة مما يتيح الفرصة للحصول على تحكم جيد في تدرج معامل الانكسار .

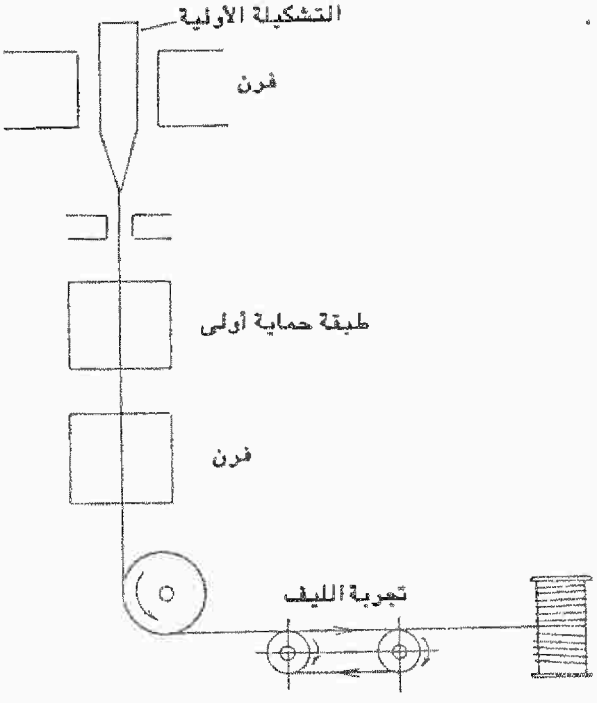


الشكل(٥-٥) تكوين التشكيلة الأولية بالتراكم الكيميائي بإستخدام البلازما

٥-٣ سحب الليف البصري Fiber Drawing

بعد تصنيع التشكيلة الأولية بإحدى الطرق الآنف ذكرها تركب على برج كما في الشكل (٥-٦) ، يوضع الحامل بوضع رأسي يتم التحكم فيه مع ميكانيكا تغذية .

يسخن الجزء الأسفل من التشكيلة الأولية حتى ٢٠٠٠ م حتى تبدأ السليكا بالذوبان حينها يبدأ سحب الليف ، وللحصول على قطر ثابت لليف لابد من سحبه بسرعة ثابتة (حوالي ٢٠٠ متر لكل ثانية) وتحكم دقيق في تغذية التشكيلة الأولية حتى تبقى تحت تأثير الحرارة العالية وتستمر السليكا بالذوبان ، ولابد من الإشارة إلى أن السليكا عند ذوبانها تصبح مطاطية يمكن سحبها وعلى الرغم من أن النسبة بين قطر التشكيلة الأولية وقطر الليف يبلغ ١ : ٣٠٠ فإن المنظر الجانبي لمعامل الانكسار وتناسب اللب والكساء يحافظ عليه طوال فترة السحب ونحصل على ليف بصري متجانس . تتم مراقبة سماكة الليف طول فترة السحب وبعد ذلك يغطي الليف بطبقة الحماية الأولى التي تحسن من قوة الليف وتحميه من الثني الموضعي microbending وتسهل التعامل معه بعد ذلك يمر الليف على مجموعة من البكرات ويتعرض لقوى شد لاختبار تحمله قبل أن يطوى على براميل اسطوانية .



شكل (٥-٦) آلة سحب وتغطية الألياف البصرية

٥-٤ الخلاصة Summary

أدى التعامل مع الألياف البصرية إلى معرفة خصائص هذه الألياف والتعرف على أسباب الترهين والتشتيت المختلفة مما مكن من إيجاد طرق مختلفة يتم بواسطتها التخلص من الشوائب والحصول على ألياف ذات نقاوة عالية وبمواصفات دقيقة جداً تلبي إحتياجات نظم الألياف البصرية . تطورت طرق التصنيع وأصبح بالإمكان تصنيع التشكيلة الأولية بالترسيب وعلى هيئة طبقات يبلغ سمكها بضع مايكرونات وبمعامل إنكسار حسب الطلب باستخدام محاليل ذات نقاوة عالية وفي أجواء محكمة.

الفصل الخامس

أسئلة

١ - ماهي أول الطرق التي استخدمت لتصنيع الألياف البصرية وماهي عيوبها ؟

٢ - أذكر خمس طرق استخدمت لتصنيع الألياف البصرية ؟

٣ - ماهي المواد التي تصنع منها الألياف ؟

٤ - ماهو الشرط الأساسي للحصول على ليف صالح للاتصالات ؟

٥ - ماهي ميزات إنتاج الليف بالنظام الكيميائي المعدل . قارن بينها وبين التراكم الكيميائي بالبلازما ؟

٦ - لماذا لاتصنع الألياف من مادة السليكا الخام مباشرة ؟

٧ - أذكر تركيب المواد المستخدمة للحصول على زجاج عالي النقاوة؟

٨ - لماذا يجب أن يكون معامل إنكسار اللب أكبر من معامل إنكسار الكساء ؟

٩ - هل هناك علاقة بين سرعة سحب الليف وسماكته ؟

١٠- عند أي الأطوال الموجية يحصل أعلى امتصاص لأيونات OH^- ؟

الفصل السادس

الكابلات البصرية

الفصل السادس
الكابلات البصرية
Optical Cables

تتصف الألياف البصرية بأنها صغيرة الحجم قليلة الوزن هشة وقابلة للكسر مما يجعلها عرضة للعوامل المختلفة كما يصعب التعامل معها مما يتطلب وضعها داخل كابلات تسمح بتركيبها وتحميها من العوامل التي تؤثر عليها ، وقد تم تركيب ألياف داخل كابلات بحرية وضعت في قاع المحيط تتحمل الضغط الواقع عليها ودرجات الحرارة المنخفضة التي تتراوح بين درجتين وأربع درجات مئوية ويمكن للكابلات البصرية أيضاً أن تتعرض لتغير شديد في درجة الحرارة تتراوح بين $\overset{\circ}{C}$ 55 - و $\overset{\circ}{C}$ 155 + كما هو الحال في الكابلات المستخدمة في الطائرات . وقد تتعرض لضغط يصل $70\ MN/m^2$ وإلى سوائل وغازات تسبب تآكل الكابلات وتعرضها للتلف . وقد يحتوي الكابل على ليف بصري واحد أومئات الألياف البصرية وذلك محكوم بنوعية الاستخدام ، وقد يضم الكابل بداخله أجزاء معدنية كطبقات حماية أو عنصر للشد وقد يكون خالٍ من أي جزء معدني. مما سبق يتضح أن تصنيع أو اختيار كابل بصري أمر تحكمه نوعية الاستخدام. غير أن هناك نقطتين أساسيتين يجب أن يحققهما أي كابل بصري مهما كان تصميمه. (١) يجب أن لايؤثر الكابل على خصائص الليف البصري في نقل المعلومات (٢) أن يحافظ على تماسك ووحدة الليف البصري خلال التصنيع والتركيب والخدمة .

للحصول على الشرطين السابقين يجب أن نحيط الألياف البصرية بمواد لاتسمح بثني الليف البصري بأكثر من نصف قطر محدد حتى لايخرج الضوء من الليف البصري، ولاتؤدي إلى تعرض الليف البصري لضغوط موضعية تسبب تشتيت الضوء كما يحاط

الليف بعناصر حماية وتقوية تسمح بشده وتعرضه للضغط، كما تعزل عنه العوامل البيئية المختلفة وسنقوم بشرح للطبقات التي تحقق ماسبق في البنود التالية :

٦ - ١ الطبقه الواقية لليف البصري Fiber Buffer

لتوفير حماية كافية وتقوية الليف البصري اتجه معظم المصنعون لتغطية الليف البصري أثناء تصنيعه بطبقة واقية في جو نظيف جداً كي لايتعرض الليف للخدش أو الشوائب وتوضع هذه الطبقة قبل أن يلمس الليف أي سطح آخر ، وتشكل هذه المادة طبقة الحماية الأولى حيث يخرج الليف بطبقات ثلاث وهي اللب والكساء وطبقة الحماية .

ويجب أن تتوفر شروط عديدة في المواد المستخدمة لوقاية الليف ،سنذكر منها مايلي :-

١ - سهولة الاستخدام وسرعة الجفاف .

٢ - أن تعطي طبقة متساوية ومتماثلة.

٣ - أن تقوم بحماية الليف من الضغط والثني الموضعي.

٤ - أن تحافظ على متانة الليف .

٥ - أن تتحمل الظروف المختلفة ولاتتحلل أو تضعف مع مرور الزمن .

لو استعرضنا العناصر السابقة لوجدنا أن الشرط الأول يُسهل عملية التصنيع ويؤثر على اقتصادية الانتاج ، أما الشرط الثاني فيعطي الليف قوة متساوية وحماية من كافة الجوانب ، أما الشرط الثالث فيحد من عدم توازن قوى الضغط على الليف أثناء الشد أو تغير درجة الحرارة ، وقد وجد أن بعض مواد الرقاية تصبح هشة تحت عشرين درجة مئوية وهذا بالطبع يؤثر على كونها طبقة حماية أما الشرط الرابع فهو المحافظة على قوة الليف والذي يعتمد على الشد الطولي وكمية جزيئات OH الموجودة على سطح الليف أما الشرط الخامس فيضمن استخداماً واسعاً للمادة وتحتوي البنود التالية على شرحاً موجزاً لبعض المواد المستخدمة كطبقة وقاية.

أ - بولي ديمثيل سيلوكسين Polydimethyl Siloxane

تعتبر المواد السليكونية المعالجة حرارياً من أفضل المواد المستخدمة في الطبقات الواقية . وهناك العديد منها مثل سلجارد Sylgard والتي أعطت وقاية كافية تمثلت بزيادة قوة الليف وعدم تأثرها بتغير درجة الحرارة، إذ أن معامل التمدد لم يتغير بين $60\ ^{\circ}C$ - و $85\ ^{\circ}C$+ وثبتت صلاحيتها للاستعمال في درجات الحرارة المرتفعة،كما تميزت بالمتانة. غير أن عيوبها تتمثل في بطء سرعة استخدام المادة على الليف وطول زمن جفافها . وقد عولجت هذه المادة بالأشعة فوق البنفسجية فحسنت من خواصها ولاتزال شائعة الاستخدام.

ب - الزيوت السليكونية Silicone Oils

توضع هذه الزيوت على الليف البصري بطبقات سمكها 5 µm تقلل من احتكاك الليف أثناء التصنيع غير أنها تتلاشى ولا تساهم في حماية الليف من الثني الموضعي أو تقوية الليف ، وهناك زيوت عديدة من هذا النوع .

جـ - المبثوقات Extrudates

استخدمت مواد كثيرة مشتقة من البوليمرات والبوليستر كطبقات حماية ووجد أن استخدامها صعب أثناء التصنيع كطبقة وقاية أولى ولكنها استخدمت كطبقة وقاية ثانية.

د - لدائن الإكريليت Acrylates

أول من استخدم هذه اللدائن هم العاملون في مختبرات" بل" في الولايات المتحدة الأمريكية . وقد لاقت استحساناً من قبل كثير من المصنعين للفوائد العديدة التي تتميز بها أثناء التصنيع، تمثلت في سرعة المعالجة أثناء التصنيع،إذ تستخدم خليط من اللدائن الأحادية والمتعددة Acrylate monomers and higher molecular weight oligomers التي تعطي عوامل تمدد مختلفة وتعالج بالأشعة فوق البنفسجية.

ومن الطرق المفضلة لطبقات الوقاية هي استخدام طبقتين الأولى ذات معامل تمدد منخفض والثانية ذات معامل تمدد مرتفع فيتم الحصول على طبقة متينة ناعمة الملمس وتتحمل التعامل الخشن وتوفر حماية ضد الثني الموضعي ويستخدم بعض المصنعين طبقة واحدة فقط كطبقة أولى أما الطبقة التي توفر حماية ضد الثني الموضعي فتوضع في مكان آخر في الكابل .

ومن المزايا الأخرى لهذه المواد إمكان إزالتها بمحاليل كيميائية أو أدوات ميكانيكية عند الحاجة كما أن معامل احتكاكها قليل والتصاقها جيد عند استخدامها مع بعض طبقات الحماية الأخرى كالنايلون والبوليستر والبوليمرات.

٦-٢ التغليف Encapsulation

نلجأ في كثير من الأحيان إلى تغليف الليف البصري المغطى بطبقة واقية حتى يصبح جاهزاً للاستخدام ضمن الكابل البصري . ويستثنى من ذلك الليف المغطى بطبقتين من اللدائن التي سبق شرحها في البند ٦-١-د ، والذي يمكن استخدامه بعد وضع عنصر تقوية وغطاء خارجي . عند تصميم الغلاف الواقي يجب الأخذ بعين الاعتبار العنصرين التاليين :

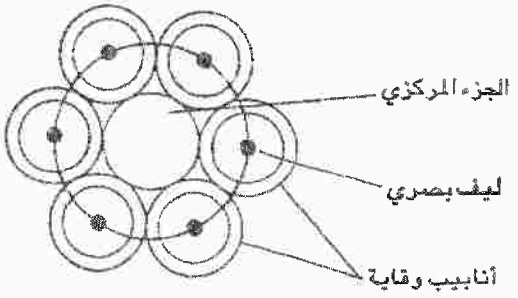
١ - حماية الليف من الثني الموضعي أثناء التركيب .
٢ - توفير صمام أمان عند الشد أو الضغط .

وقد استخدمت تصاميم مختلفة للأغلفة الواقية تقلل من التأثيرات الميكانيكية المختلفة كالشد والثني والضغط الموضعي نشرحها في البنود التالية :

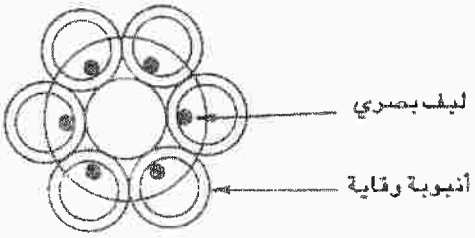
٦-٢-١ الغلاف الواقي لليفة بصرية واحدة Loose Tube for Single Fiber

يستخدم هذا النوع من الأغلفة أنبوب بلاستيكي يُوضع بداخله الليف البصري ، يوفر الأنبوب حماية من التأثيرات الخارجية كما يمنع احتكاك الليف مع مايحيط به ويمنع

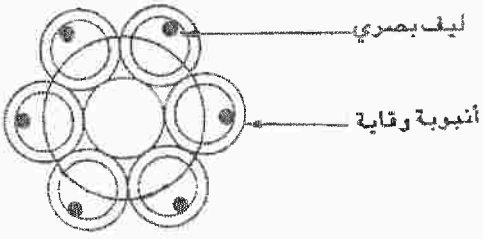
تشوه الليف. ولكي نحصل على نتائج مرضية يجب أن يحتفظ الغلاف بشكله وأن يكون مرناً ولايتأثر بالعوامل الخارجية أو التقادم حتى يسهل التعامل معه ويبقى فترة زمنية طويلة. يتكون هذا النوع من الأغلفة من أنبوب يحتوي على طبقة داخلية تحمي الليف البصري ، كما أن معامل احتكاكها قليل جداً أما الطبقة الخارجية فيجب أن تكون قوية تستطيع أن تحمي الليف البصري من التأثيرات الخارجية كالثني والشد والخدش ، وللحصول على ماذكر سابقاً فقد استخدمت مجموعة من المواد مثل البوليستر والبوليمايد. عند وضع الليف داخل الأنبوب تترك مسافة تقدر بأعشار الملليمتر تسمح لليف بحرية الحركة وعدم تعرضه للضغط كما أن نعومة الأنبوب من الداخل تسهل من حركة الليف داخله . يتميز هذا الغلاف بسهولة إيصال الضوء إليه، وكذلك سهولة عمل الموصلات أو المقارن أو ربطه إلى الكاشف الضوئي عند جهاز الاستقبال .



الشكل (٦-١) مواقع الألياف البصرية داخل أنابيب ضمن الكابل البصري



الشكل (٦-٢) مواقع الألياف عند تعرض الكابل البصري للشد

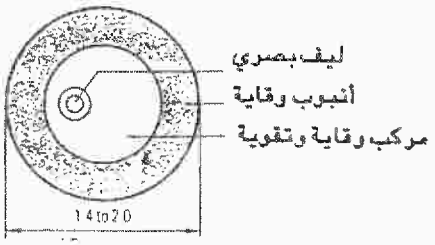


الشكل (٦-٣) مواقع الألياف عند تقلص الكابل البصري

نرى في الأشكال (٦-١) إلى (٦-٣) فوائد هذا النوع من الأغلفة تحت تأثيرات مختلفة. حيث نرى في الشكل (٦-١) موقع الألياف البصرية داخل الأنابيب عند عدم تعرضها للشد. وفي هذه الحالة فإن طول الليف وطول الأنبوب متساوى. وعند تعرض الليف للشد فإنه سيتحرك نحو الجدار الداخلي للأنبوب الواقي دون أن يتعرض للضغط أو التشويه وهما عاملان قد يؤديان إلى توهين الاشارات المارة بالليف البصري ولابد من الإشارة هنا إلى أن هناك حد للشد الذي يتعرض له الكابل البصري وعادة مايصل إلى 1% بعد ذلك يبدأ التوهين بالازدياد. أما في حالة تعرض الكابل للتقلص contraction فإن الليف البصري يتحرك نحو الجدار الخارجي للغلاف الواقي كما يحصل عند وضع الكابل في أماكن باردة.

نظراً لوجود فراغ بين الليف البصري والغلاف الواقي فإن احتمال دخول المياه أو أي سائل آخر قد يؤثر على إنجاز الليف البصري كتجمد الماء أو السائل داخل الأنبوب والذي

يحدث ضغوطاً موضعية وزيادة في التوهين ، لذا نجد أن هذا الفراغ يملأ بمادة جلاتينية تمنع تسرب المياه والسوائل داخل الأنبوب ، الشكل (٦-٤) ، وتتصف هذه المادة بأنها صلبة في حالة السكون وتسيل عند تحريكها كما أنها غير فعالة كيميائياً ولاتتجمد أو تتسرب إلى الخارج بين درجة 30 $\overset{o}{C}$ تحت الصفر وحتى 70 $\overset{o}{C}$، وليس لها أي تأثير على الليف البصري ، كما أنها سهلة التنظيف ويمكن إزالتها بسهولة خاصة عندما نشرع في ربط الألياف مع بعضها وهي غير قابلة للاشتعال .

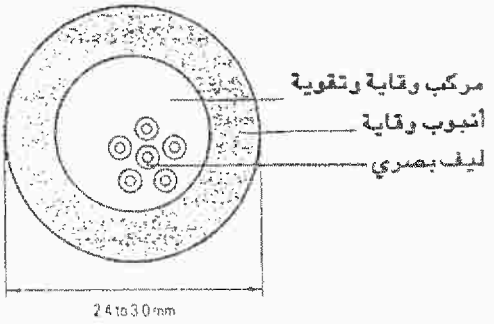


الشكل (٦- ٤) أنبوب مفرد مع مركب وقاية وتقوية

٦ -٢-٢ الغلاف الواقي لعدة الياف Loose Tube for Multifibers

يتراوح قطر الأنابيب المستخدمة لليف بصري واحد بين 1.4mm و 2mm ويستخدم في تصنيع كابلات تحمل ١٤ ليف بصري وعند الرغبة في زيادة عدد الألياف البصرية في الكابل الواحد، فإن حجم الكابل سيصبح كبيراً ويزداد وزن الكابل مما يسبب صعوبة في استخدامه ، وللحد من هذه العيوب فقد صنعت كابلات تحتوي الأنابيب الواقية فيها على عدة ألياف، تتراوح بين ليفين بصريين واثني عشر ليفاً بصرياً أحادي النمط أو متعدد النمط ، وفي هذه الحالة يستخدم أنبوب واقي بقطر يتراوح بين 2.4mm و 3mm ، الشكل(٦-٥) ، ويسمى هذا الأنبوب الواقي لعدة ألياف بصرية ويملأ الفراغ بين الليف

البصري وجدار الأنبوب بالمادة الجلاتينية التي سبق ذكرها في البند السابق. وقد يتم تضفير الألياف البصرية داخل الأنبوب للحصول على زيادة في الطول تصل إلى 8% وقد استخدمت أنابيب يصل قطرها إلى 6mm تستخدم في الكابلات البصرية المعلقة. استخدمت هذه الكابلات لنقل معلومات عالية الجودة رغم تعرضها لتأثيرات بيئية مختلفة كتغير درجة الحرارة وتعرضها للحمولات المختلفة كمرور السيارات والشاحنات وتستخدم إما ككابلات معلقة أو على سطح الأرض أو تحت سطح الأرض أو تحت سطح الماء، وقد استخدمت في عدد من الأقطار ضمن شبكات الاتصالات البعيدة.

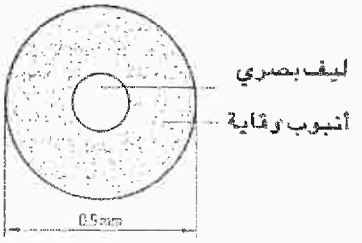


الشكل (٦-٥) كابل بعدة أنابيب وقاية

٦-٢-٣ الغلاف الواقي الضيق Tight Buffer

يوضع الغلاف الواقي في هذا النوع من الكابلات فوق الليف البصري مباشرة لحمايته من التأثيرات الخارجية وتستخدم لهذا الغرض مواد بلاستيكية مناسبة، وهذا النوع من الأغلفة يقلل من قطر الغلاف ليصل إلى 0.9mm ، الشكل (٦-٦) مقارنة بقطر الغلاف الواقي لليف بصري والذي يصل إلى 2mm.

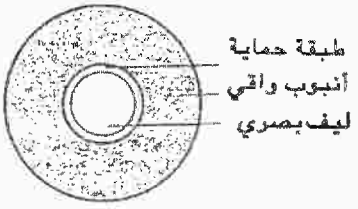
ولابد من الإشارة هنا إلى مطاطية الغلاف الواقي نتيجة الشد قد تؤثر على أداء الليف البصري. نظراً لاختلاف مادة الليف عن مادة الغلاف الواقي لذا فإن صغر الحجم أفقد مزية مهمة وهي مرونة الليف البصري ومحملة للظروف البيئية المختلفة . يستخدم هذا النوع لربط المسافات القصيرة والوصلات داخل لوحات الاتصالات وداخل المباني .



الشكل (٦-٦) ليف بصري داخل غلاف واقي ضيق

٦-٢-٤ الغلاف الواقي المركب Composite Buffer

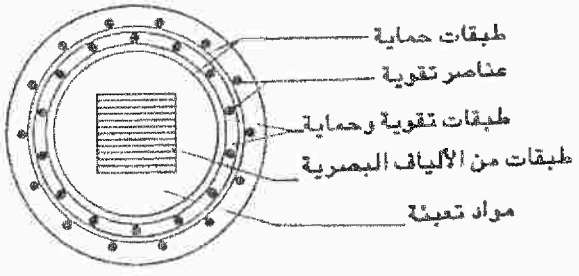
يمثل هذا النوع تركيبة مزدوجة من الغلاف الواقي المفرد الملىء بمادة الجلي والغلاف الضيق ، الشكل (٦-٧) وقد تم اقلال المسافة بين الغلاف الواقي والليف البصري - مقارنة بالمسافة المستخدمة في الأغلفة الواقية لليف بصري واحد إذ يتحرك الليف ضمن طبقة محيط به تتراوح بين 50µm و100µm . يصل القطر الخارجي لهذا الغلاف حوالي 0.9mm مما يقلل من حجم الكابل المستخدم مقارنة بالغلاف المستخدم لعدة ألياف والذي يصل قطره إلى 3mm . يستخدم هذا النوع من الكابلات داخل المباني وللمسافات القصيرة وداخل لوحات التوزيع .



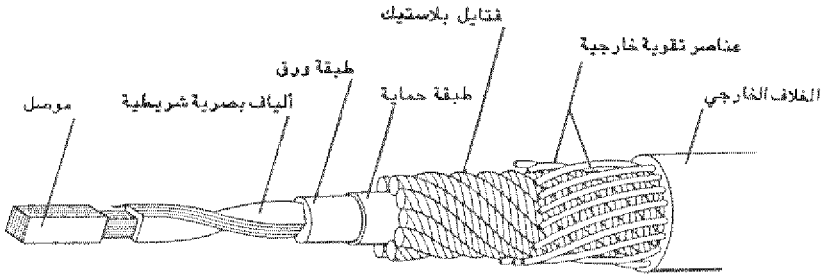
الشكل (٦-٧) غلاف واقي مركب

٦-٢-٥ تركيبة الألياف الشريطية Construction of Ribbon Fibers

رأينا في النماذج السابقة أن الألياف البصرية توضع بشكل متماثل حول الكابل، إذ يوضع الليف في وسط الأنبوب ومحاطاً بأنابيب أخرى تحتوي على الألياف البصرية، غير أن التركيب الشريطي يختلف عن ذلك، كما في الشكل (٦-٨)، حيث يحتوي الشريط على ١٢ ليفاً بصرياً ملتصقة ببعضها بشكل متوازٍ ومستوٍ، وقد يوضع ١٢ شريطاً منها فوق بعض مكونة بذلك شبكة من الألياف البصرية على شكل مربع أو متوازي مستطيلات، ويمكن ثني أو لف twist هذا الشريط ويحاط هذا الشريط عادة بمادة جيلي وطبقات تقوية كالأسلاك الفولاذية كما في الشكل (٦-٩). وعادة مايوضع أكثر من



الشكل (٦- ٨) كابل شريطي



الشكل (٦-٩) بنية كابل بصري شريطي

٥٠ ليف داخل الكابل ويمتاز بسهولة الربط نظراً لرتابة وضع الألياف داخل الكابل ولابد من أن نشير إلى احتمال تعرض الليف البصري للشد أو الضغط مما يزيد في التوهين.

٦-٣ عناصر التقوية Strength Members

تتميز مادة السليكا بمعامل تمدد مرتفع ودرجة عالية من المرونة غير أنها هشة مما يتطلب إضافة عناصر تقوية تساعد على شد الكابلات وسحبها وتحملها للضغط عند تعرضها له ، لذا لابد من تحقق الآتي :-

١ - معامل تمدد يونج مرتفع High Young's Modulus

٢ - جهد يفوق الجهد الأقصى للكابل.

٣ - خفة الوزن.

٤ - المرونة .

إضافة إلى ماسبق هناك عوامل أخرى يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار والتي تشمل عدم تأثر المادة بتغير درجة الحرارة وتحملها للضغط وقلة توصيلها.

وقد وجد أن هناك خمس مواد مناسبة كعناصر تقوية تتصف بأن لها مطاطية عالية high elastic modulus وهي :

١ - أسلاك فولاذية.

٢ - فتايل بلاستيكية أحادية plastic monofilaments

٣ - ألياف قماشية textile fibers.

٤ - ألياف زجاجية .

٥ - ألياف كاربونية.

وقد وجد أن سعر الألياف الكاربونية مرتفع والفتايل البلاستيكية تتأثر بتغير درجات الحرارة مما حد من استخدامها ،لذا ستتم مناقشة ثلاث من العناصرالخمس السابقة.

٦-٣-١ الأسلاك الفولاذية Steel Wires

استخدمت الأسلاك الفولاذية على نطاق واسع لسنوات عديدة ، وقد وجد أنها البديل الجاهز نظراً لقوة تحملها ورخص ثمنها. وتوجد بدرجات متفاوتة في قوة شدها tensile strength مما يجعلها مناسبة لمجابهة الاستخدامات المختلفة ، ونظراً لأن معاملا الشد والضغط tensile compressive moduli عاليين فإن سلك فولاذي مفرد سيكون غير مرن stiff ، لذا عند استخدام الأسلاك الفولاذيةكعنصر تقوية في الوسط فإننا نلجأ لاستخدام خصل strands من الأسلاك الرقيقة حتى تتميز بالقوة والمرونة ،ماعدا الكابلات الصغيرة حيث يمكن استخدام سلك فولاذي مفرد. قد تستخدم الأسلاك الفولاذية كطبقة خارجية كما هو الحال في الكابلات الكهربائية المسلحة، إذ تعمل الأسلاك كعنصر تقوية ودرع وقاية من المؤثرات الخارجية . وللأسلاك الفولاذية مساوئ لبعض الاستخدامات منها :

١ - عدم صلاحيتها في الكابلات التي تتطلب أن تكون كافة عناصر الكابل مصنوعة من مواد عازلة .

٢ - الجاذبية النوعية العالية للفولاذ تتسبب في رفع وزن الكابل .

٦-٣-٢ الياف القماش Textile Fibers

استخدمت خيوط ومنسوجات لعدة مراد وعادة مايكون سمك الفتايل في حدود 10 µm توضع بشكل متواز أو على شكل ضفائر وبالإمكان توجيه جزيئات هذه الفتايل خلال تصنيعها للحصول على قوة طولية عالية ومعامل تمدد عالي وقد وجدت عناصر عديدة تملك هذه الصفات مثل النايلون والداكرون. ونظراً لأنها فتايل فقد استخدمت للتقوية ولملء الفجرات وتعمل كمساند داخل الكابل غير أن استخدامها فقط كعنصر تقوية لم يلق القبول لأنها تنبعج عند تحميلها. ويستثنى من ذلك "الكفلار" kevlar، وهو مادة مصنوعة من البوليستر طورتها شركة دوبونت . ويوجد منها نوعان ، الأول وهو الشائع الاستخدام في الكابلات البصرية ويدعى kevlar 49 وله معامل مطاطية عالي ويصنع على شكل فتايل قطر الواحدة 12 µm ،وجاذبيتها النوعية 1.45 وقوة شدها أكبر من $2.7GN/m^2$ ،ومعامل شدها Tensile Modulus أكثر من 120GN/m2 غير أن انبعاجها تحت الحمولة أكثر من الفولاذ ويوجد الكفلار على شكل فتايل أو اسلاك مكونة من مجموعة من الفتايل ومغمورة داخل غراء epoxy.

ويشكل الكفلار بديلاً ممتازاً للفولاذ إذ أن قوته تعادل قوة الفولاذ ووزنه خمس وزن الفولاذ ولايتأثر كثيراً بتغير درجة الحرارة وتمدده قليل كما يتميز بالمرونة. ولكن ذلك على حساب حماية الكابل من الانبعاج الذي يحصل عند درجات الحرارة المنخفضة.

٦-٣-٣ البلاستيك المقوى بالزجاج Glass - Reinfored Plastics

استخدم الزجاج في أنواع كثيرة من عناصر التقوية، وتتراوح نسب الزجاج المستخدم في بناء هذه العناصر. وعنصر الربط هنا هو البوليستر أو الراتنج وهوغروي. يحدد نوعه حسب درجة الحرارة ومعامل مطاطية البلاستيك المقوى بالزجاج، وقوته تحدد بنوع الزجاج المستخدم ومعامل التعبئة Glass fill factor . تتصف هذه العناصر بقلة معامل الانبعاج creep . كما أنها لاتلتوي أو تنثني عند درجات الحرارة المنخفضة . ونظراً لاستخدام مجموعة من الألياف فإن مدى المطاطية يقع بين 2% و 3% ويجب أخذ

الحيطة عند استخدام عناصر التقوية هذه بعدم ثني الكابل لدرجة قد ينكسر معها عنصر التقوية وغالباً ماتؤخذ هذه النقطة في الاعتبار عند تصميم الكابل . في الجدول (٦-١) نرى خلاصة عناصر التقوية المستخدمة .

الجدول (٦-١) عناصر التقوية المستخدمة وخواصها

عنصر التقوية	معامل يونج Young's Modulus GN/m2	مدى المطاطية Elashc range	الجاذبية النوعية	معامل التمدد Coeffo of thermal Expansion	درجات الحرارة Temp. °C
فولاذ	210	2.0 - 2.5	7.8	1×10^{-5}	< 600
كفلار 49 خيط	120	2.2 -2.8	1.45	-2×10^{-6}	< 250
كفلار 49 سلك	60	2.3 - 2.5	1.1	-1×10^{-6}	< 180
بلاستيك مقوى بالزجاج	45 - 60	3.	2.	↓ 1×10^{7}	< 100

٦ - ٤ خواص المواد الأخرى المستخدمة في الكابل البصري

بالإضافة لما سبق شرحه هناك مواد أخرى تستخدم لطبقات التغليف والتبطين والتعبئة واللف ... إلخ.. Sheathing , cushinoning , fillers , wraps etc.

وتعتمد هذه المواد على نوعية الاستخدام للكابل البصري. وعلى المستخدم أن يحدد نوعية الاستخدام وإن أمكن نوعية المواد المستخدمة وطرق التصنيع والتي يمكن تلخيصها في النقاط الثلاث :

١ - شروط التصنيع مثل البثق والتبريد واللف Extrusion, cooling and winding.

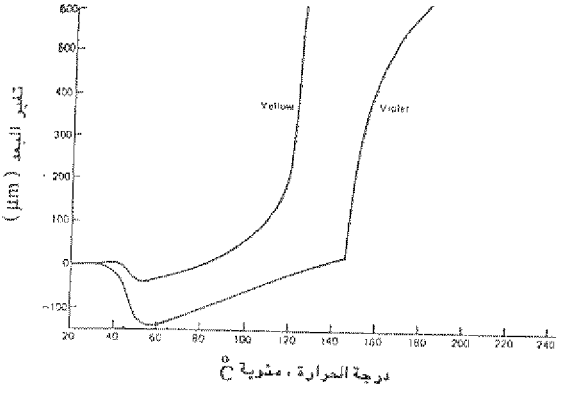
٢ - شروط التخزين : تغيير درجة الحرارة ، التعرض للأشعة فوق البنفسجية والمواد الكيميائية .

٣ - شروط التركيب : تلوث في الأرض ، مواد تشحيم إلى آخره .

مما سبق يتضح أن هناك مواد كثيرة تستخدم ويجب أن تكون اقتصادية سهلة التصنيع يمكن تشكيلها وتلوينها وأن تكون غير سامة وغير قابلة للاشتعال. وقد جرت دراسات كثيرة على مواد مختلفة، وبالذات لمواد الغلاف الخارجي للكابل حيث أنه يتعرض، أكثر من المكونات الأخرى، للظروف البيئية المتعددة ، ووجد أن مركبات كيميائية عديدة صالحة للاستخدام في تصنيع الغلاف الخارجي sheath نذكر منها بولي ايثيلين Polyethylene وبولي فينيل كلورايد polyvinyl chloride (PVC) وبوليستر الاستوميتر Polyester Elastometer ، نايلون Nylon ، نيوبرين neoprene وبوليمرات الفلور fluorinated Polymers وهايترل Hytrel.

٦-٤-١ تاثير المواد المضافة: Influence of Additives

قد تدعو الحاجة أحياناً إلى النظر إلى أبعد من كون المادة صالحة للتصنيع واقتصادية بأن نضيف مواد للحصول على متطلبات أخرى كالتلوين والحماية من الحريق وعدم تغير خواصها عند تعرضها للأشعة فوق البنفسجية وما إلى ذلك ، وقد تؤثر المواد المضافة على الخواص الميكانيكية لهذه المواد، ونرى في الشكل(٦-١٠) تغير الخواص الميكانيكية لمادة تفزل Tefzel عند استخدام مادة مضافة للحصول على لونين مختلفين.



الشكل (٦-١٠) تغير أبعاد مادة تفزل Tefzel مع درجة الحرارة
نتيجة إضافة لونين من المواد المضافة

٦-٤-٢ الاشتعال Flammability

يجب أن تكون الكابلات البصرية ، كما هو الحال في الكابلات المستخدمة في الكابلات الكهربائية الأخرى ، غير قابلة للاشتعال وتستطيع أن تقاوم لفترة طويلة عند حصول حريق وللحصول على هذه الخاصية فقد استخدمت مواد تستخدم بوليمرات مهلجنة ومواد مضافة halogenated polymers and additives ، وفي الفترة الأخيرة اتجه المصنعون لاختبار مواد غير مهلجنة nonhalogenated للاستخدامات داخل المباني والاستخدامات الصناعية وبعض الاستخدامات الحربية . وفي بداية الحريق يسخن الكابل ، وخلال هذه المرحلة يمكن التحكم به باستخدام حرارة نوعية محددة لمادة الغلاف لهذا الغرض ثم استخدام هايدرات غير عضوية nonorganic hydrates كمواد تعبئة fillers وذلك لرفع الحرارة النوعية وزيادة مقاومة الاشتعال ومن هذه المواد Alumina Trihydrates

٦-٤-٣ السُمّية والعدوانية Toxicity and Aggressivity

أثبتت البوليمرات المهلجنة halogenated polymers والمواد المضافة لها فعالية جيدة في مقاومة الاشتعال غير أن سُمّيّة وعدوانية هذه المواد قد تؤدي إلى خسائر فادحة واتجهت المواصفات الآن بالإضافة إلى مقدرتها على مقاومة الاشتعال واللهب بأن تكون قليلة الدخان ولاتصدر غازات سامة أو غازات قابلة للاحتراق ، وبالفعل تم التمكن من الإقلال من الغازات الناتجة عند تعرض الكابل الحاوي على بوليمرات مهلجنة،وبدأ الاتجاه للبحث عن مواد لاتحتوي على الهالوجين ومقاومة للاشتعال ، وقد تم الحصول على بعض المركبات التي يمكن استخدامها في الكابلات البصرية الصغيرة نذكر منها مايلي :-

نوريل Noryl : مركبات أوكسيد البولي فينيلين المعدل

Modified polyphenylene oxides compounds

بيك Peek : بوليثرايثر كيتون polyether -ether ketone

وهو بوليمر بلاستيكي حراري thermoplastic polymer ويحتاج إلى

حرارة معالجة تتراوح بين 270 °C و400 °C والتي تحد من تصنيعه،ويتميز بالمتانة ومقاومة المواد الكيميائية كما أن الدخان والحوامض التي تصدر منه قليلة ويصنع من قبل شركة ICI .

التيم Amorphous Polyethemide Ultem

ودرجة حرارة بثقه extrusion أقل من PEEK وله نفس خواص PEEK غير أن مقاومته للمحاليل أقل .

ولابد من الإشارة هنا إلى أن في اختيار المادة قد تكون التكلفة هي العنصر الأساسي في الاختيار دون التضحية بعنصر السلامة والأمان وهناك مواد كثيرة قد لاترتقي إلى مواصفات المواد الثلاث الآنف ذكرها لكنها تفي بالغرض ، نذكر منها ethylene copolymer وهايدرات غير عضوية inorgamic hydrates التي تستخدم كمواد تعبئة fillers وتحسن من أداء مادة PVC في مقاومة الحريق .

٦ - ٥ وسائل حماية معينة Specific Protection Techniques

٦-٥-١ منع تسرب المياه Water Blocking

استخدم جيلي البترول petroleum jelly لفترة طويلة كمادة مانعة لتسرب المياه داخل الكابلات نظراً لرخص ثمنه وللخبرة الطويلة في التعامل معه. غير أن المشكلة الأساسية في هذه المادة هي تغير لزوجتها في درجات الحرارة المستخدمة (-10 °C to 80 °C) و التي أدت إلى صعوبة استخدام الكابل وفي تغطية الكابل أثناء التصنيع .

استبدلت مادة جيلي البترول بشحوم السليكون silicone greases لأن لزوجتها لاتتغير بين درجة حرارة 50 °C و 200 °C وهي نفس المادة المستخدمة داخل الأغلفة الواقية loose tube buffers .ولابد من الأخذ بعين الاعتبار ضغط الماء الواقع على الكابلات ، فلو استخدمت هذه المادة في الكابلات البحرية فإن هذه الشحوم ستكون أكثر سيولة مما يضطرنا للبحث عن شحوم أو مواد تعبئة ذات لزوجة عالية مثل

Hyvis 2000 بالإضافة إلى استخدام مواد تغليف أخرى لمنع تسرب المياه إلى الألياف البصرية .

٦-٥-٢ الحماية من القوارض Rodent Protection

تتعرض الكابلات بصفة عامة لأنواع كثيرة من القوارض كالفئران والجرذان وغيرها مما دعى إلى استخدام أشرطة معدنية مغطاه بمواد بلاستيكية وأكثر الكابلات تعرضاً للقوارض تلك التي يبلغ قطرها 15mm فأقل، وهو حجم معظم الكابلات البصرية المستخدمة حالياً ، وقد توسعت الأبحاث للحصول على مواد كيميائية لتصنيع أشرطة لاصقة تصلح مع المواد المعدنية المستخدمة لحماية الكابل، ووجد أن أفضل المواد المعدنية هي المواد الفولاذية بنوعيها الكربوني والصامد carbon steel and stainless steel بحيث لايقل سمك طبقة الفولاذ الكربوني عن 150 µm وسمك الفولاذ الصامد عن 75 µm وأشرطة مكونة من خليط من النحاس والفولاذ الصامد.

٦-٥-٣ السيطرة على الهيدروجين Hydrogen Control

تتأثر الألياف المصنوعة من السليكا بالهيدروجين تأثراً كبيراً إما بامتصاص الهيدروجين أو تكون روابط Si - OH في الزجاج. وقد يكون ذلك التأثير وقتياً أو دائماً حيث أن تكوين الروابط يضل دائماً ويمكن الاقلال من تأثيره بالاقلال من شوائب الفوسفات.

وفي بعض الأماكن المعرضة للإشعاع النووي نجد أن تواجد الهيدروجين مع الإشعاع يسبب امتصاص دائم في الليف البصري، مما يزيد في الفقد في الاشارات المارة في الليف البصري - وهناك ثلاثة عناصر يعزى لها توليد الهيدروجين في الليف البصري وهي :

١ - تدهور البوليمر Polymer degradation

٢ - الغازات المعدنية Metallic outgassing

٣ - صدأ الجلفنة Galvanic Corrosion

تُصدر معظم البوليمرات غاز الهيدروجين في كافة درجات الحرارة - أما المواد المعدنية فتعتمد كمية الهيدروجين الناتج على طريقة الانتاج والمعالجة ولايطلق إلا في درجات الحرارة المرتفعة . أما الطريقة الثالثة فتنتج الهيدروجين عند ملامسة الأسطح المعدنية في الكابل للمياه المؤينة .

وفي معظم الاستخدامات فإن نسب الهيدروجين قليلة إلا في بعض الحالات الخاصة كالكابلات المستخدمة في جو ذي درجة حرارة عالية أو تلك المعرضة لإشعاع نووي أو تحت ضغط عال كالكابلات البحرية فهذه تحتاج إلى عناية خاصة للحد من تأثير الهيدروجين.

٦-٦ التأثيرات البيئية Environmental Effects

٦-٦-١ درجة الحرارة

تعرضنا في البنود السابقة لمكونات الكابل البصري ووجدنا أنها تحتوي على مواد تتباين في خواصها. والكابلات البصرية شأنها كشأن الكابلات الأخرى المستخدمة في الاتصالات وإيصال الطاقة الكهربائية لابد وأن تتحمل التغيرات التي تطرأ على محيطها وأول هذه التأثيرات هو تغير درجة الحرارة ، فمعامل تمدد البلاستيك المستخدم يختلف عن الأسلاك الفولاذية المستخدمة للتقوية وكلاهما يختلف عن الألياف البصرية حيث أن اختلاف معاملات التمدد سيؤدي إلى اختلاف في الاستطالة عند تغير درجة الحرارة وهذا بالطبع قد يحدث شداً أو ضغوطاً موضعية على الليف البصري ، فمعامل تمدد البلاستك مثلاً يزيد ١٠٠ مرة عن معامل تمدد السليكا المادة الأساسية لليف البصري بينما يبلغ معامل تمدد أسلاك التقوية الفولاذية أو المقواة عُشُر قيمة معامل تمدد المواد البلاستيكية أو عشرة أضعاف معامل تمدد السليكا.

لهذا السبب يجب النظر بحذر للتغيرات التي تطرأ وبالذات على البلاستيك خاصة عند ارتفاع درجة الحرارة، حيث أن كل المواد تستخدم حتى 40 °C ومعظمها حتى 70 °C بينما هايترل hytrel ،مع المواد المضافة ،يستخدم لأكثر من 100 °C ، بينما بوليمرات الفلور fluorinated polymers تستخدم حتى 155 °C . وإذا أردنا استخدام الكابلات لأعلى من 155 °C لابد من استخدام مادة كيميك PEEK ويجب أخذ الحيطة عند وضعها على الليف البصري وقت تصنيعه . أما عند درجات الحرارة المنخفضة فيجب اختيار بلاستيك لاتتغير خواصه الطبيعية ولاينكمش كثيراً لانخفاض الحرارة كأن تضغط على الليف البصري، وقد تحصل ضغوطاً موضعية والتواء الليف عند انخفاض درجة الحرارة دون مستوى معين مما يزيد من توهين الاشارات المارة في الليف .

٦-٦-٢ الاجهاد الطولي Longitudinal Stress

يؤدي انخفاض درجة الحرارة إلى انكماش الليف البصري مما يحدث مشاكل يمكن تجنبها باستخدام عنصر تقوية مناسب، واستخدام طبقات تسليح ومواد تعبئة مناسبة كما يمكن أن توضع الألياف في الأنابيب الفارغة بطريقة لولبية helical تسمح للألياف بحرية الحركة دون أن يكون للانفعال strain الواقع على الكابل أي تأثير ونفس التصميم يمكن أن يستخدم مع الأغلفة الواقية الضيقة أو المملوءة بالجلي وتوضع هذه الأنابيب بصورة حلزونية أيضاً حول عنصر التقوية حتى تستطيع أن تتحرك نصف قطرياً radially أو تستقيم إذا تعرض الكابل للإجهاد .

٦-٦-٣ الضغط Pressure

الأنابيب المفرغة والمملوءة بمادة الجلي تعطي حماية لليف البصري من تأثيرات الضغط المائي المستقر hydrostatic pressure ولكن في حدود معينة لاتتعدى ١٠٠ ضغط جوي بعدها تبدأ بالانهيار وتزداد قيمة التوهين إلى قيم عالية جداً . وكما يحصل لطبقة الحماية الثانية وهي الأنابيب الفارغة قد يحصل للكابل البصري ككل. عند استخدام

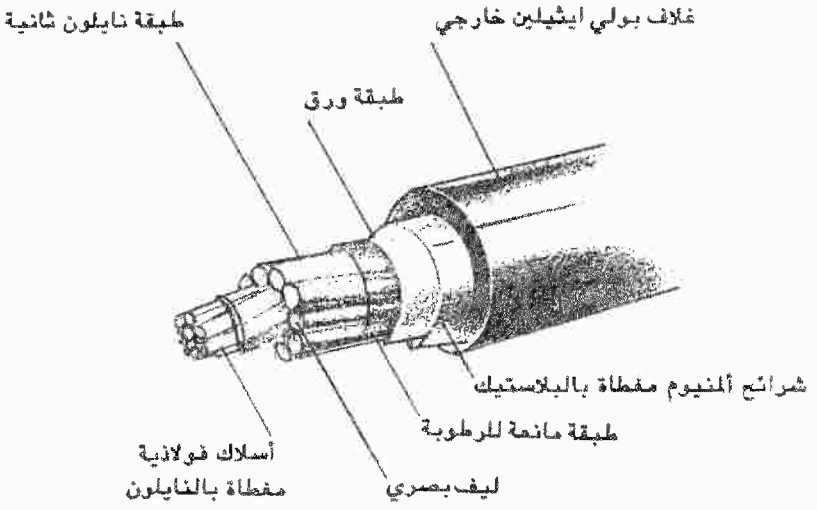
تقنيات مماثلة وباستخدام مواد وسماكات معينة تستطيع أن تصنع أنابيب تتحمل ضغط عال دون المساس بخواص الليف البصري وأياً كانت الأسباب أو الظروف المحيطة بالليف لابد من التأكد من عدم تعرضه للضغط المباشر أو غير المباشر.

٦-٧ أنواع الكابلات البصرية Types of Optical Cables

تعرضنا في البنود السابقة لكثير من النقاط الواجب أخذها بعين الاعتبار عند تصميم الكابل البصري ، وسنوضح فيما يلي نماذج لبعض أنواع الكابلات البصرية .

٦-٧-١ كابلات الاستخدام العام General Purpose Cables

يوضح الشكل (٦-١١) مقطعاً لأول التصاميم التي استخدمت في تصنيع الكابلات البصرية حيث يقع عنصر التقوية المكون من أسلاك فولاذية في وسط الكابل ويغطى بطبقة من النايلون - وضعت الألياف البصرية المحاطة بطبقة واقية وغلاف ضيق بشكل لولبي حول عنصر التقوية . يلي ذلك طبقة من الأشرطة البلاستيكية المانعة للرطوبة ثم طبقة من الورق، تحاط جميعاً بعد ذلك بطبقة من شرائح الألمنيوم المغطاة بمادة بلاستيكية ويغلف الكابل بغلاف من البولي ايثيلين وعند وضع الغلاف الخارجي تضغط مادة البولي ايثيلين، لتحيط بكل الكابل مما يعطي انطباعاً بأن كافة عناصر الكابل ستكون تحت ضغط شديد نتيجة هذه العملية، بينما الواقع العملي يشير إلى أن الجزء الخارجي من الغلاف يتصلب أولاً عندما تبدأ الأجزاء الداخلية من الغلاف بالتصلب تنكمش وتقلل من الضغط الواقع على أجزاء الكابل الداخلية ، لذا فإن الضغط يكون وقتياً أثناء التصنيع ويتلاشى عند الأطوال الموجية الشائعة الاستخدام وهي 1300nm و 1550nm ولابد من الإشارة هنا إلى إمكانية استخدام ألياف محاطة بأنابيب بلاستيكية فارغة أو مملوءة بالجلي بدلاً من المغلفة بغلاف ضيق .

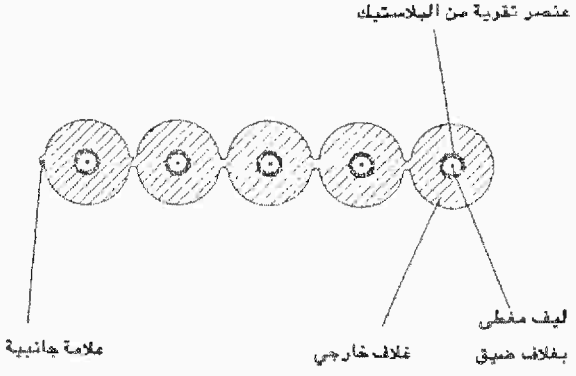


الشكل (٦-١١) كابل بصري للاستخدام العام

٦-٧-٢ الكابلات المغمورة Submarine Cables

يستخدم هذا النوع من الكابلات في المياه العميقة كالمحيطات حيث تتعرض لضغط شديد وقوى سحب عالية قد تصل إلى 100kN، لذا لابد من أخذ الاحتياطات اللازمة واختيار أفضل المواد لمجابهة هذه المتطلبات. ونرى في الشكل (٦-١٢) مقطعاً لكابل مغمور استخدم في المياه العميقة لشبكة اتصالات عبر المحيط. نرى في هذا التصميم استخدام أنبوبة مكونة من مركب من النحاس بدلاً من الألمنيوم للإقلال من توليد الهيدروجين وطبقتين من الأسلاك الفولاذية لموازنة العزم torque وتحمل الوزن كما استخدمت طبقة عازلة من البولي ايثلين لفصل الأسلاك الكهربائية المغذية للمكررات عن مياه البحر، ثم تحاط بطبقة من الأسلاك الفولاذية وتغلف جميعاً بمادة البولي بروبلين .

الشكل(٦-١٢) كابل بصري يستخدم في المياه العميقة



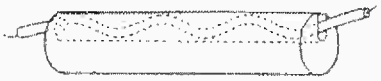
الشكل (٦-١٣) كابل بصري يستخدم للأغراض الصناعية

٦-٧-٣ الكابلات الصناعية Industrial Cables

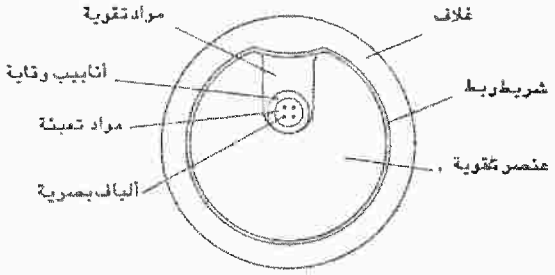
يمكن استعمال كابلات الاستخدام العام في الاستخدامات الصناعية وبصفة خاصة المغطاة بطبقة واقية ضيقة ،إذ تعطى هذه حماية من الضغوط المحورية الأحادية والآثار العديدة التي تتعرض لها الكابلات في الصناعة ، وتستخدم مواد عازلة بما فيها عناصر التقوية للحصول على مناعة من التداخل الكهرومغناطيسي والتوصيل الكهربائي ، وقد صممت كابلات خاصة لهذه الأغراض نراها في الشكل (٦-١٣) ،إذ أحيطت الألياف البصرية بطبقة واقية ضيقة، ووضع عنصر التقوية البلاستيكي فوقها ، ثم غلفت بطبقة خارجية، وتوضع هذه الكابلات على شكل شريط يمكن فصل كل كابل على حده ليخدم المواقع المختلفة .

٦-٧-٤ الكابلات الهوائية Aerial Cables

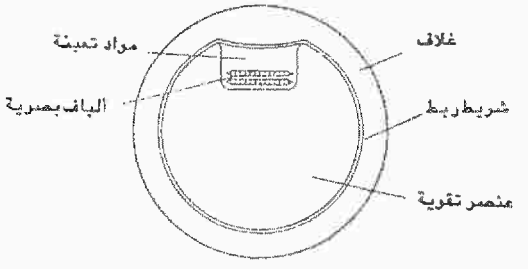
تتعرض الكابلات الهوائية لعوامل عديدة كأشعة الشمس المباشرة والرياح العاتية بالإضافة إلى وزن الكابل عند تعليقه مما يحدث شداً على الكابل لابد من تجنبه ولهذا السبب فقد عملت تصاميم عديدة للحصول على أفضل النتائج ، نرى في الشكل (٦-١٤) تصاميم مختلفة لكابلات هوائية تستخدم قضباناً مصنوعة من البوليمر المقوى بالزجاج كعنصر تقوية لأنه خفيف الوزن، شق في طرفه لوضع أنابيب تحوي في داخلها الألياف البصرية الموضوعة بشكل لولبي ، أما الأنابيب فلا توضع بشكل مستقيم بل بشكل جيبي داخل الشق ، وبهذه الطريقة نضمن، أياً كانت المؤثرات الخارجية، عدم حصول شد على الألياف البصرية . وقد وجد أن هذا النوع من الكابلات يستطيع تحمل 22.5KN ، وهذا يكفي لتركيب الكابل مسافة 1km في المناطق الاستوائية دون حدوث أي إجهاد طولي على الليف البصري. أما في المناطق التي تتعرض للثلوج والرياح فإن المدى Span هو 0.5km.



(أ) كابل معلق لولبي



(ب) كابل معلق يستخدم الأغلفة الواقية

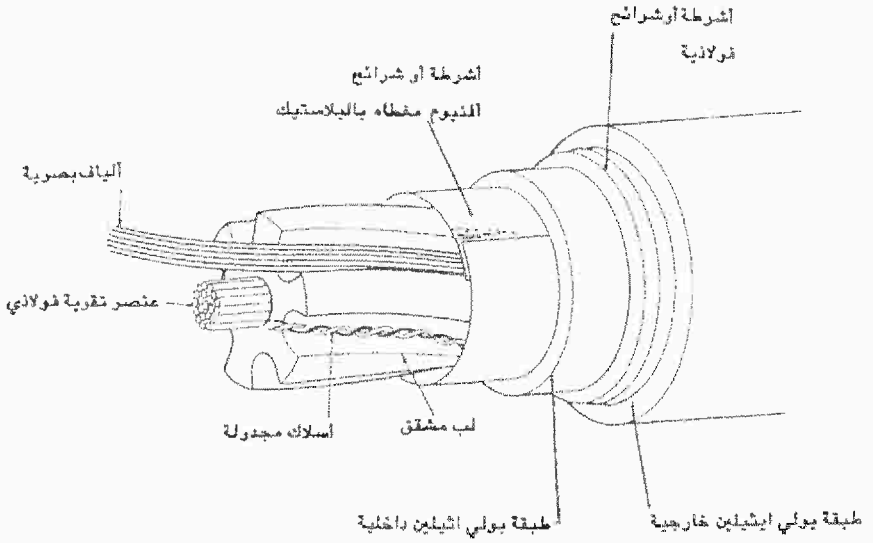


(جـ) كابل معلق شريطي

الشكل رقم (٦-١٤) تصاميم مختلفة لكابلات معلقة

٦-٧-٥ الكابلات المدفونة Buried Cables

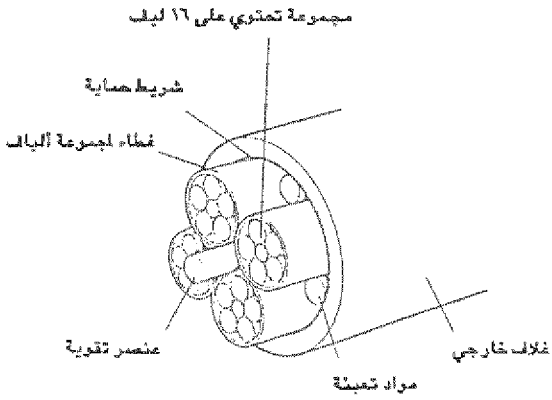
استخدمت كابلات الإستخدام العام تحت سطح الأرض في المراحل الأولى من استخدام الألياف البصرية. غير أن القوارض استطاعت أن تدمر هذه الكابلات مما اضطر المصنعون لاستخدام طبقات حماية لاتستطيع القوارض مهاجمتها، ونرى في الشكل (٦-١٥) مقطعاً لكابل يدفن تحت سطح الأرض. يُحاط عنصر التقوية الفولاذي بلب الكابل المشقق بشكل طولي لولبي يتم وضع كل ليف أو مجموعة من الألياف أو شريط منها في أحد هذه الشقوق ،وبهذه التركيبة يسمح للألياف بالتحرك والاقلال من الشد عليها ثم تغلف جميعاً بطبقات من شرائح الألمنيوم والبلاستيك وبالشرائح الفولاذية المغطاة بأشرطة بلاستيكية ثم تغلف بطبقة خارجية من البولي ايثلين.



الشكل (٦-١٥) كابلات مدفونة تستخدم لب مشقق وحماية ضد القوارض

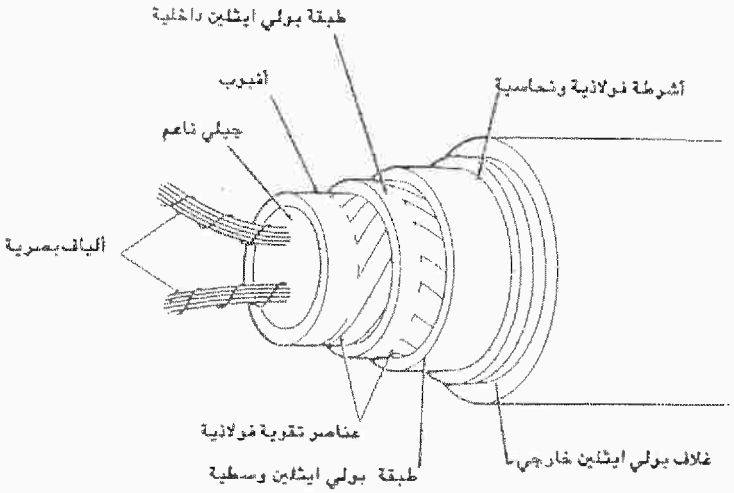
٦-٧-٦ كابلات الاتصالات البعيدة Telecommunications Cables

تتمتع الكابلات المستخدمة في الاتصالات بعيدة المدى بمزايا قد لاتجدها في الاستخدامات الأخرى. فتغير درجة الحرارة قليل ولاتتعرض لضغط أو اهتزازات كثيرة كما هو الحال في الكابلات المغمورة أو المستخدمة في الطائرات. ولكن هناك ضرورة لاستخدام تصاميم اقتصادية تمكن من التوسع المستقبلي، وتقلل تكاليف الانشاء. وفي بداية استخدام الألياف البصرية للاتصالات بعيدة المدى استعملت كابلات الإستخدام العام حيث وضعت داخل مواسير مسلحة .



الشكل (٦ - ١٦) مقطع لكابل بصري يستخدم في الاتصالات البعيدة

وفي الشكل (٦-١٦) وضعت مجموعة منها ضمن كابل واحد باستخدام ألياف محاطة بغلاف ضيق وموضوعة بشكل لولبي حول عنصر التقوية ومجموع الألياف ضمن هذا الكابل يصل إلى ٣٢٠ ليف . لكن حجم الكابل في هذه الحالة أصبح كبير جدا، ووجد من المناسب البحث عن تصاميم أخرى أكثر اقتصادية . ووجد أن التصميم في الشكل (٦-١٥) مع أو بدون الأشرطة الفولاذية سيعطي حجماً أقل مع إمكان وضع كمية كبيرة من الألياف داخل الكابل. وفي تصميم آخر نراه في الشكل (٦-١٧) توضع حزم من الألياف كل حزمة معرفة بلون معين، توضع هذه الحزم داخل أنابيب وتغطى بالجلي الناعم ثم تحمى كل أنبوبة بطبقة من البولي ايثلين تتبعها طبقات فولاذية للتقوية ثم طبقة من الشرائح الفولاذية المغطاة بالبولي اثيلين، فأشرطة نحاسية وتغلف بطبقة خارجية من البولي ايثلين. وبذا تحمى الكابلات من القوارض والصواعق . إن وضع الألياف على شكل حزم يقلل من الشد عليها ويقلل من التوهين أثناء التشغيل.



الشكل (٦-١٧) كابل اتصالات بعيدة محمي من القوارض والصواعق

٦-٧-٧ كابلات الاتصالات العسكرية Military Communications Cables

تتعرض الكابلات المستخدمة في الاتصالات العسكرية أكثر من غيرها لظروف قاسية تتطلب تحملاً جيداً لهذه المؤثرات كالنقل ، والتخزين والاستخدام ويمكن تلخيصها بالآتي:

١ - التحميل ، التنزيل ، التركيب والفك في فترات قصيرة وفي ظروف قاسية.

٢ - تغطيسها في الماء وفي جو مرتفع الرطوبة.

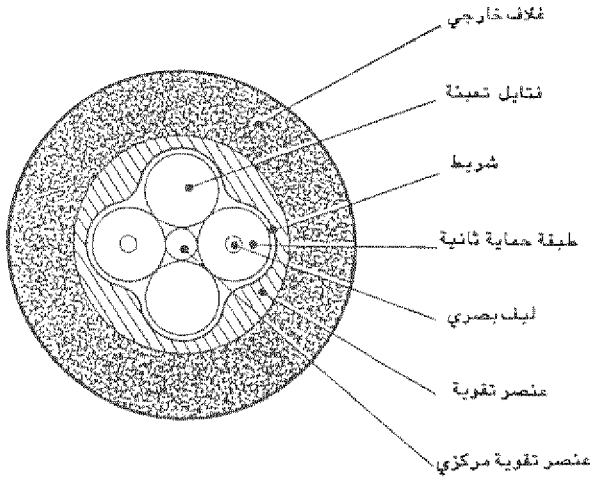
٣ - التعرض للبرودة الشديدة.

٤ - التعرض للحرارة العالية وأشعة الشمس المباشرة والغبار والأتربة.

٥ - تعرضها للمركبات والأسلحة الثقيلة والمجنزرة والسحب واللي.

٦ - تأثرها بالأسلحة النووية والكيميائية والبيولوجية .

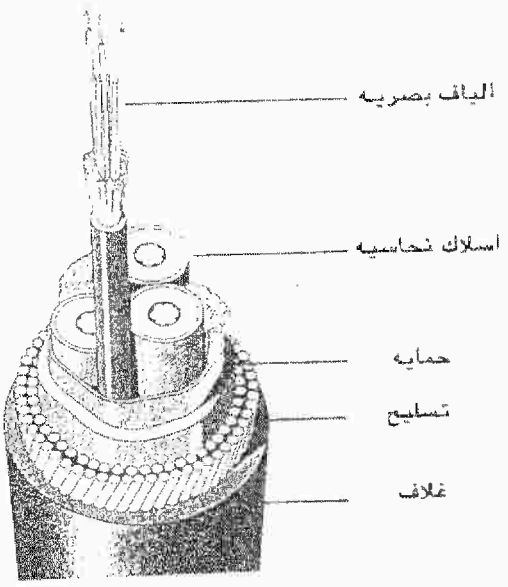
ومن التصاميم المستخدمة لهذا الغرض ماهو موضح بالشكل(٦-١٨) إذ يستخدم في هذا الكابل ليف مغطى بطبقتي حماية ضيقة وطبقة من النايلون وفتايل تعبئة من النايلون بشكل رباعي تلف بعد ذلك بشريط وتحاط بطبقة تقوية ثم تغلف بطبقة خارجية من مادة الهايترل Hytrel ، أما عنصر التقوية المركزي فهو من فتايل النايلون وقد أثبتت هذه الكابلات فعالية جيدة في الاستخدامات العسكرية .



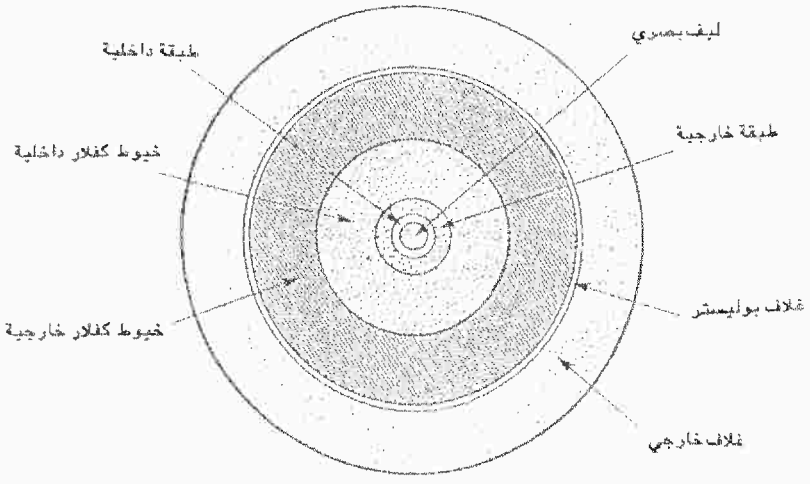
الشكل (٦-١٨) كابل اتصالات للاستخدامات العسكرية

٥-٧-٨ كابلات الاستخدام الخاصة Special Purpose Cables

برزت تصاميم كثيرة للاستخدامات الخاصة يقع كثير منها ضمن التصاميم الآنف ذكرها والأمثلة على ذلك كثيرة منها كابلات تحتوي على أسلاك نحاسية لنقل الطاقة الكهربائية توضع الألياف البصرية ضمن تركيبها ، الشكل (٦-١٩)، وضع أسلاك نحاسية للهاتف ضمن الكابل البصري وهلم جرا. غير أن هناك عائلة من الكابلات البصرية مزودة بليف مفرد تستخدم للأغراض العسكرية ولاتقع ضمن التصاميم التي سبق شرحها. نرى في الشكل (٦-٢٠) مقطعاً لواحد منها حيث يتراوح قطر الكابل بين 0.55mm و 3.5mm يحاط الليف البصري بطبقتي حماية يتبع ذلك طبقتين من خيوط كفلار ثم يغطى بطبقة من البوليستر ويغلف بطبقة خارجية من الهايترل Hytrel وقد أثبت هذا التصميم فعالية جيدة تحت ظروف مختلفة ولم يلاحظ التوهين تحت هذه الظروف أو تحت ضغط مستقر وصل إلى $69MN/m^2$. كما تستخدم الألياف البصرية بالتوازي مع خطوط الضغط العالي الهوائية للتحكم والسيطرة ونقل المعلومات .



الشكل (٦-١٩) ألياف بصرية ضمن كابل نحاسي لنقل الطاقة



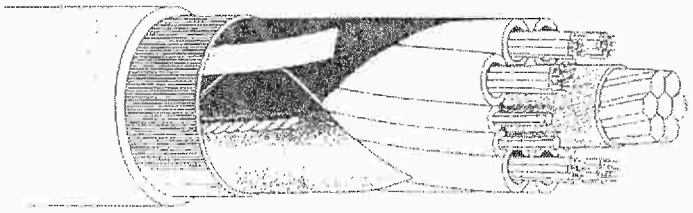
الشكل (٦-٢٠) كابل بصري للاستخدامات الخاصة

٦-٨ الخلاصة Summary

عندما تحدثنا عن الليف البصري أشرنا إلى أن صغر حجمه وخفة وزنه صفات جيدة للوسط الناقل، غير أن هشاشته وصغر حجمه تجعله عرضة للظروف البيئية القاسية التي قد تحد من استخدامه . من هذا المنطلق وجد أن اللب المغطى بالكساء وهي المكونات الأساسية لليف غير قادرة على حماية نفسها ، ووجدنا من الضرورة أن تغطى بطبقة حماية لوقايتها وتقويتها ، وحتى لايتعرض الليف البصري لأي ضغط موضعي وكي يصبح حر الحركة وجد من الضروري تغليفه بغلاف واق يحميه ويعطيه الحركة المنشودة ، ومع كل ذلك قد لايتحمل الاجهاد والشد الواقع عليه ، فأضيفت عناصر تقوية تساعد على التركيب والسحب ، وكي لاتؤثر الألياف على بعضها أضيفت مواد تعبئة تعمل كوسائد حماية، ولمنع الرطوبة والمياه والسوائل الأخرى من التخلخل داخل الكابل البصري أضيفت أشرطة مانعة للرطوبة ومواد جلاتينية ، كما أضيفت شرائح من الفولاذ لمنع القوارض من مهاجمة الكابل تغطى جميعاً بطبقة من البلاستيك التي تتولى حماية الأجزاء الداخلية للكابل من التعرض للأحوال البيئية المتغيرة . وقد يحاط بأسلاك فولاذية لحماية الكابل وتقويته كما هو الحال في الكابلات المغمورة التي توضع في قاع المحيط . وقد استعرضنا في هذا الفصل تصاميم عديدة لكابلات بصرية نوجزها في الفقرات التالية :

يعتمد اختيار الكابل البصري على نوعية الاستخدام والبيئة التي يستخدم بها والتصاميم التي ذكرت في هذا الفصل تغطي مجالاً واسعاً من الاستخدامات تحت ظروف بيئية مختلفة . إن استخدام الكابلات البصرية في الاتصالات البعيدة يعتبر أقلها تعرضاً للبيئة القاسية ، لذا نجد أن الاختيار في هذه الحالة تحكمه التكلفة ، وقد شاع استخدام ثلاثة أنواع من التصاميم في هذا المجال وهي : (١) الكابلات الحاوية على أنابيب طليقة loose - tube كما هي في الشكل (٦-٢١) ، (٢) الكابلات ذات القنوات المفتوحة أو ذات اللب المشقق أو الأخدودية slotted or grooved - core والتي سبق شرحها في البند (٦-٧-٥) وفي الشكل (٦-١٥) مقطع لهذه التصاميم (٣) الكابلات الرزمية

في الشكل (٦-١٧) التي أصبحت تلقى رواجاً في كثير من الاستخدامات ولابد من الإشارة هنا إلى أن الليف البصري في التصاميم السابقة مغطى بطبقة حماية وحر الحركة داخل الأنبوب الواقي ضمن الكابل البصري.



الشكل (٦-٢١) كابل بصري يحتوي على مجموعات من الألياف داخل أنابيب طليقة

وبصفة عامة نجد أن المواصفات المطلوبة للاستخدامات العسكرية دقيقة ذات طبيعة خاصة لمجابهة الظروف البيئية والأحوال التشغيلية التي تتعرض لها . إن معظم هذه الكابلات لاتحتوي على أجزاء معدنية ويمكن استخدامها في درجات حرارة تتراوح بين 65 $\mathring{C}$ و200 $\mathring{C}$ وخاصة في سلاح الجو . ولتوجيه الصواريخ يجب أن لايتعدى قطر الكابل 0.5mm أو بالإمكان استخدام ليف مغطى فقط .

وعلى النقيض من ذلك نرى أن كابلات الاجهاد الديناميكي المستخدمة للقطر أو السحب في سلاح البحرية يوازي قطرها قطر الأسلاك المفمورة . أما الكابلات المستخدمة للاتصالات العسكرية فيجب أن تكون مرنة،عالية التحمل غير معدنية ومقاومة للحرارة. وهذه المتطلبات يمكن تحقيقها باستخدام ألياف بصرية مغطاة بطبقات وقاية ضيقة ، لذا نجد أن في معظم الاستخدامات العسكرية يتم استخدام الأغلفة الضيقة .

تقع مواصفات الكابلات الصناعية بين مواصفات الكابلات المستخدمة للأغراض العسكرية حيث الشدة والقساوة في التركيب والتشغيل والأجواء المحيطة وبين مواصفات الاتصالات بعيدة المدى حيث توضع الكابلات في مجاري خاصة بها . وتحدد مواصفات الكابلات الصناعية الظروف التشغيلية لتلك الصناعة ، وبالإمكان اختيار أي من التصاميم الوارد ذكرها لمواجهة المتطلبات المختلفة .

الفصل السادس

أسئلة

١ - أذكر النقاط الأساسية التي يجب أن يحققها الكابل البصري.

٢ - أذكر العناصر التي يجب أن يتصف بها الكابل الليفي المعلق.

٣ - ماهي صفات الكابلات المدفونة المستخدمة في الاتصالات ؟

٤ - أذكر ثلاثة عناصر تقوية تستخدم في الكابلات البصرية وماهي صفاتها ؟

٥ - أذكر نوعين من أغلفة الوقاية .

٦ - أذكر ثلاثة أنواع من طبقات الوقاية .

٧ - لماذا تستخدم طبقات التبطين ؟

٨ - لماذا تستخدم مواد الجيلي ومتى تستخدم ؟

٩ - أذكر ستة أنواع من الألياف البصرية واعط مثل لاستخدام كل نوع .

١٠ - ما المقصود بالحد الأدنى من الثني وماهي أهمية هذه الصفة ؟

مسائل

١ - لدينا تشكيلة أولية قطرها 5cm وطولها 1m . أوجد طول الليف البصري الممكن تصنيعه من هذه التشكيلة إذا كان قطر الليف 125μm .

٢ - إذا أردنا لف الليف المذكور في المسألة رقم (١) ضمن كابل قطره الخارجي 2mm وأردنا لفه حول بكرة قطرها 20cm وارتفاعها 30cm فماهو قطر البكرة الكلي بعد اللف.

الفصل السابع

توصيل عناصر النظام الليفي البصري

الفصل السابع
توصيل عناصر النظام الليفي البصري
Connection of Fiber Optic Link Elements

واجهت نظم الألياف البصرية في بداية تطبيقها مشاكل كثيرة تتعلق بتوصيل الأجزاء المختلفة من عناصر النظام ، إذ لابد من اقتران الضوء بكفاءة من المنبع إلى الليف ومن الليف إلى الكاشف. كذلك تحتاج إلى توصيل الألياف مع بعضها للحصول على الأطوال المطلوبة من قنوات الاتصال الليفية . إن الأبحاث الدئوبة والاكتشافات المتعددة ذللت الصعاب وأدت إلى شيوع استخدام هذا النظام للمزايا الكثيرة التي سبق شرحها. إن السبب في هذه الصعوبات ناجم من صغر مكونات النظام خاصة الألياف البصرية نفسها. على العكس من نظم الاتصالات الأخرى التي لاتحتاج إلى نفس الدقة والعناية. فعلى سبيل المثال عند قطع سلك هاتفي فإننا نعيد توصيله بلف النهايات حول بعضها أو بلحمها مع بعض. مثل هذا الإجراء غير ممكن في الألياف البصرية إذ لابد من تحضير نهاياتها جيداً وتطابق لبها للحصول على توصيل جيد.

نستعرض في هذا الفصل أنواع الموصلات connectors والمقارن conplers والتوصيلات الدائمة splices وشرح الأسباب المختلفة للفقد فيها ، سنذكر كذلك صفات الموصلات المرغوب فيها للحصول على أفضل النتائج .

٧-١ مبادىء التوصيل Connection Principles

تقسم أسباب الفقد في نظام الاتصالات الليفي البصري إلى نوعين :

١ - عوامل داخلية تتعلق بتركيبة الألياف .

٢ - مسببات خارجية تتعلق بتوصيل الألياف.

١ - العوامل الداخلية أو الضمنية Intrinsic Factors

عند ربط ليفين بصريين يجب أن يكونا متطابقين تماماً . بينما الواقع غير ذلك. إذ من الصعب الحصول على تطابق تام إذ تتفاوت مواصفات الألياف عند تصنيعها. يتبين في الشكل (٧-١) العوامل المؤدية إلى الفقد الضمني ونشرحها فيما يلي :

أ - عدم تطابق فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture Mismatch

يحصل الفقد عندما تكون فتحة النفوذ العددية لليف المرسل أكبر من الليف المستقبل كما في الشكل (٧-١أ) ، كذلك ينتج الفقد عند عدم تطابق اقطار لب الألياف الموصلة كأن يكون قطر لب الليف المرسل أكبر من قطر لب الليف المستقبل كما في الشكل (٧-١ب) . يحصل الفقد أيضاً عند عدم تطابق أقطار الأكسيه claddings للألياف الموصلة - مما ينتج عنه عدم تطابق اللب كما في الشكل (٧-١هـ).

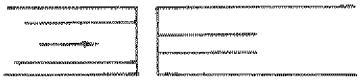
ب - التمركز Concentricity

يحصل فقد التمركز إذا لم يكن اللب في وسط الليف تماماً كما في الشكل (٧-١جـ) ، إذ لابد من تطابق محاور اللب والكساء. يعرف تفاوت التمركز بأنه المسافة بين مركز اللب ومركز الكساء .

جـ - الاهليليجية أو البيضاوية Ellipticity or Ovality

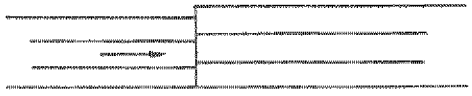
يحدث هذا الفقد عندما يكون اللب أو الكساء اهليليجياً أو بيضاوياً كما في الشكل (٧-١ د) بدلاً من أن يكون دائرياً . لو حاولنا تراصف alignment ليفين بصريين بيضاويين قد لانحصل على تطابق متكامل كما في الشكل (٧-١د) لأن ذلك يعتمد على محاور الليفين . عند تطابق المحاور البيضاوية فإن الفقد سيكون أقل مايمكن ويزداد كلما ابتعدت المحاور عن بعضها.

(جـ) التمركز

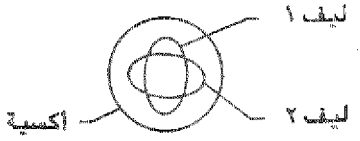


(ب) اختلاف أقطار اللب

(أ) عدم تطابق فتحة النفوذ العددية



(هـ) عدم تطابق أقطار الاكسية



(د) الاهليليجية أو البيضاوية

الشكل (٧-١) عوامل الفقد الداخلي لتوصيل الألياف

إن الأسباب الضمنية الآنف ذكرها تعتمد على طريقة تصنيع الألياف ومقدرة الشركات المنتجة على التحكم بهذه المتغيرات . وقد تحسنت طرق الإنتاج في السنوات القليلة الماضية وأصبح بالإمكان الحصول على ألياف بصرية بمواصفات دقيقة جداً . على سبيل المثال فإن ليفاً بصرياً بقطر 125μm كان مدى تفاوته tolerance يتراوح بين 5μm - و 5μm + مما يعني أن قطر الليف يتراوح بين 120μm و 130μm . يؤدي هذا التفاوت بين ليفين من نفس النوع إلى حدوث فقد مقداره 0.6dB . يتراوح تفاوت الألياف المصنعة حالياً بين 1μm - و 1μm + ويقل الفقد إلى 0.1dB .

لابد من الإشارة هنا إلى أن قيم الفقد المذكورة آنفاً هي القيم القصوى وعادة ماتكون قيمها أقل في التطبيقات العملية عند ربط ليفين مع بعضهما .

نورد في الجدول (٧-١) التفاوتات النموذجية لألياف متوفرة تجارياً .

الجدول (٧-١) التفاوتات النموذجية التي تؤثر بالفقد الداخلي

نوع التغيـــــر	التفـــــاوت
قطر اللب (50μm)	±3μm
قطر الكساء (125μm)	± 3 μm
فتحة النفوذ العددية(0.26)	± 0.015
التمركز	3μm ≥
بيضاوية اللب	0.98 ≤
بيضاوية الكساء	0.98≤

٢ - العوامل الخارجية Extrinsic Factors

لايقتصر الفقد على العناصر الداخلية أو الضمنية الآنف ذكرها . تؤدي الموصلات والوصلات الدائمة إلى الفقد عند ربط عناصر نظم الاتصالات البصرية مع بعضها . على سبيل المثال يحصل الفقد عند ربط ليفين بصريين إذا لم تكن محاورهما المركزية متراصفة حتى وان لم يكن هناك فقد داخلي . ينتج الفقد عند عدم التمكن من انتاج أجهزة ربط بالدقة المناسبة . لقد استخدمت عدة طرق وأجهزة لربط الألياف مع بعضها لتلافي الفقد وتخفيضه لأقل قيمة ممكنة .

هناك خمسة أسباب للفقد يجب التحكم بها وهي :

أ - الانزياح الجانبي Lateral displacement

ب - عدم التراصف الزاوي Angular misalignment

جـ - تباعد النهايات End separation

د - نعومة النهايات وترازيها Smooth and parallel ends

هـ - ألياف مختلفة Different fibers

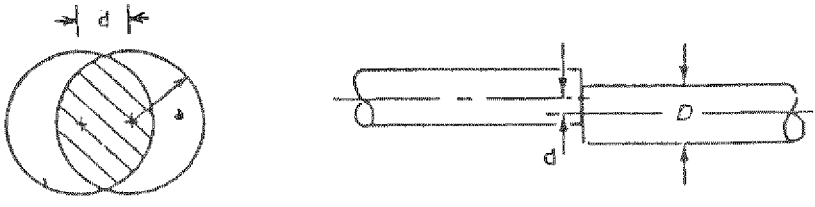
1 - الانزياح الجانبي Lateral Displacement

يجب أن تكون الموصلات المستخدمة لربط الألياف مع بعضها قادرة على رصف محاورها المركزية . عند عدم تراصف المحاور سيحصل فقد في القدرة المنقولة من ليف لآخر. يعتمد الفقد الناتج على مقدار الانزياح الجانبي بين الليفين . يتبين في الشكل (٧-٢) انزياح الليف المرسل عن الليف المستقبل ومدى تراكبهما مع بعضهما . إن كفاءة الاقتران η بين الليف المرسل والليف المستقبل تعتمد على نسبة التراكب بينهما كما هي في الشكل (٧-٢ب) ويمكن حسابها لليف عتبي متعدد الأنماط كما يلي :

$$\eta = \frac{2}{\Pi}\left\{\cos^{-1}\frac{d}{2a} - \frac{d}{2a}\sqrt{\left[1-\left(\frac{d}{2a}\right)^2\right]}\right\} \quad \text{..... (7.1)}$$

ويعبر عن الفقد بالديسيبل بالآتي :

$$L = -10 \text{ Log } \eta \quad \text{.....(7.2)}$$



(ب) (أ)

الشكل (٧-٢) الانزياح الجانبي بين ليفين

(أ) منظر جانبي يبين انزياح المحاور

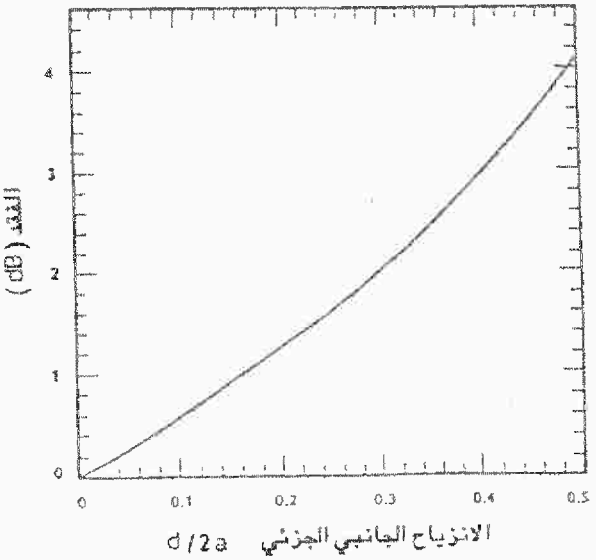
(ب) مقطع يوضح تباعد مراكز الليفين بمسافة d

يبين الشكل (٧-٣) رسماً بيانياً للفقد نتيجه الانزياح الجانبي .

يمكن اختصار المعادلة (7.1) إذا كان مقدار الانزياح صغيراً $\left(\frac{d}{2a} < 0.2\right)$، لتصبح كالآتي :-

$$\eta = 1 - \left(\frac{2d}{\Pi a}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7.3)$$

نظراً لاستخدام أجهزة توصيل جيدة ومجاهر دقيقة فإن مقدار الانزياح الجانبي غالباً مايكون صغيراً والفقد الناتج عن التوصيل يقل عن 1dB . والمثال الآتي يبين مقدار الفقد لانزياحات متعددة .



الشكل (٧-٣) فقد الانزياح الجانبي لليف عتبي متعدد النمط

مثال ٧-١ :

أوجد مقدار الفقد لليف بصري قطر لبه 50μm إذا كان مقدار الانزياح 8 μm و 4.5μm و 1μm.

الحل : من المعادلتين (7.1) و(7.2) والشكل (٧-٣) يمكن إيجاد الفقد للانزياحات المذكورة أعلاه وهي مدونة بالجدول التالي :

مقدار الانزياح d (μm)	نسبة $\frac{d}{2a}$	الفقد dB
1	0.02	0.1
4.5	0.09	0.5
8	0.16	1

يبين هذا المثال مدى أهمية التراصف المحوري ومقدار الفقد للانزياحات المختلفة.

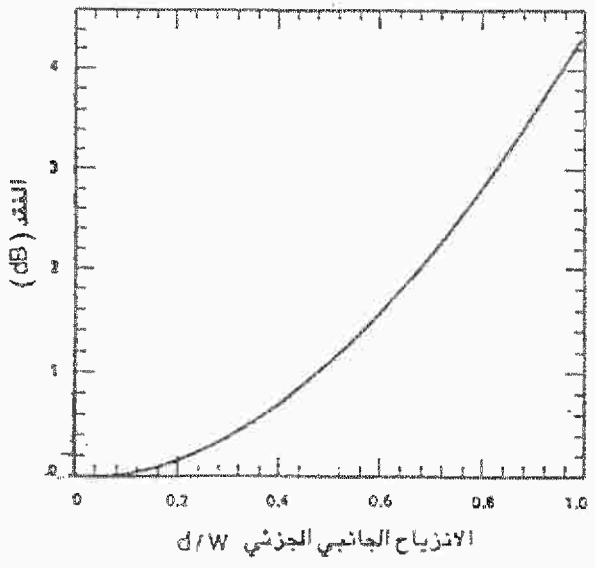
إن القدرة المارة في الليف لاتتوزع بصورة منتظمة عبر مقطع الليف لأن الأنماط العليا والتي تسير بعيداً عن مركز الليف تتوهن بصورة أكبر من الأنماط الدنيا . لذا فإن كثافة القدرة عند نهاية ليف طويل ستكون مركزة عند المركز. نجد عندها أن الانزياح المحوري الصغير يسبب فقداً في القدرة المحمولة في حافة اللب. وحيث أن القدرة عند حافة اللب هي أقل من تلك الموجودة في المركز فإن القدرة المفقودة ستكون أقل مما هو مفترض في المعادلة (7.1). إن افتراض تراكب منتظم وتوزيع منتظم للقدرة عبر مقطع الليف يعطينا تقديرات متحفظة للفقد في ليف عتبي متعدد النمط .

تتغير فتحة النفوذ العددية لليف المتدرج متعدد النمط عبر مقطع اللب مما يؤدي إلى مشاكل نظرية عند حساب الاقتران بين ليف وآخر عند حدوث انزياح بينهما لأن فتحات النفوذ العددية تتغير عبر مقطع لب الليف .عندما يتقابل الليفان تماماً دون انزياح بينهما تتوا ءم فتحات النفوذ العددية لكل منهما عند كل نقطة عبر وجه اللب. في حالة حدوث انزياح يحصل عدم توا ءم في فتحة النفوذ العددية عند كل نقطة عبر وجه اللب . عند النقط التي تكون فيها فتحة النفوذ العددية للمستقبل أكبر من فتحة النفوذ العددية للمرسل فإنه يحدث انتقال كلي للقدرة. وعند النقط التي تكون فيها فتحة النفوذ العددية للمستقبل أقل من فتحة النفوذ العددية للمرسل ستضبع بعض القدرة . إن الكفاءة الجزئية عند هذه النقط تساوي النسبة بين مربعي فتحة النفوذ العددية. لحساب كفاءة الاقتران علينا أن نحسب متوسط الكفاءة المحلية local وذلك بعد تقديرها وفق توزع القدرة على الوجه الطرفي .

يعتمد فقد الانزياح في الألياف أحادية النمط على شكل نمط الانتشار . تكون الحزم الضوئية في الألياف العتبية أو ذات القطع المكافيء ذات توزيع جاوسي تقريباً. يقدر الفقد بين ألياف أحادية النمط ومتماثلة بالمعادلة التالية :

$$L = -10 \text{ Log} \left\{ \exp. \left[-\left(\frac{d}{W}\right)^2 \right] \right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7.4)$$

حيث أن W هي حجم بقعة الحزمة الجاوسية . عندما تكون قيمة v = 2.405 فإن حجم البقعة يكون حوالي 1.1 مرة نصف قطر اللب ، يبين الشكل (٧-٤) مقدار الفقد نتيجة الانزياح المحوري في ليف أحادي النمط . نظراً لأن حجم البقعة يبلغ فقط بضعة ميكرونات فإن الاقتران الفعّال لليف أحادي النماط يتطلب درجة عالية جداً من الدقة الميكانيكية لمواءمة الألياف مع بعضها . على سبيل المثال فإن انزياح قدره 1.9μm وبقعة حجمها 4μm تعطينا فقداً قدره 1dB .



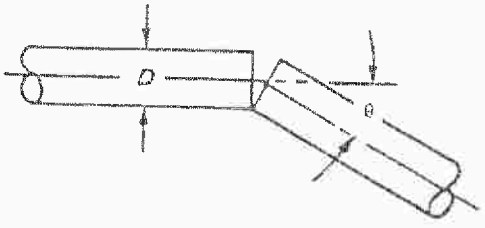
الشكل (٧-٤) فقد الانزياح الجانبي لألياف أحادية النمط ذات بقعة حجمها W

ب - عدم التراصف الزاوي Angular Misalignment

عند ربط ليفين مع بعضهما يجب أن يكونا على استقامة واحدة . إن أي انحراف زاوي بينهما سيؤدي إلى حدوث فقد في القدرة المنقولة بينهما . يعتمد الفقد في هذه الحالة على قيمة فتحة النفوذ العددية . يعبر عن كفاءة الاقتران نتيجة عدم التراصف الزاوي لزوايا صغيرة لألياف عتبية متعددة النمط بالآتي :

$$\eta = 1 - \frac{n_o \theta}{\Pi NA} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7.5)$$

حيث أن n_o معامل انكسار المادة التي تملأ الأخدود الناتج من عدم التراصف الزاوي و θ هي زاوية عدم التراصف الزاوي كما في الشكل (٧-٥) مقدرة بالراديان .

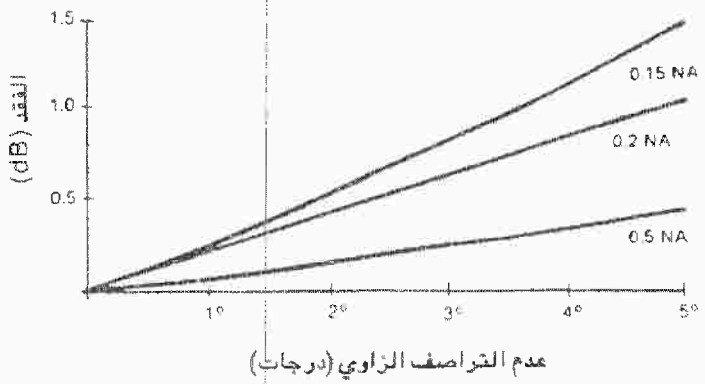


شكل (٧- ٥) عدم التراصف الزاوي بين ليفين

يعبر عن الفقد لليف عتبي متعدد النمط بالمعادلة التالية :

$$L = -10 \, Log \left(1 - \frac{n_o \theta}{\Pi NA} \right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7.6)$$

يبين الشكل (٧-٦) رسماً بيانياً للمعادلة (7.6) لألياف بفتحات نفوذ عددية تتراوح بين NA = 0.15 و NA= 0.5 . تم حساب الفقد بافتراض $n_o = 1$ عندما تكون قيمة n_o أكبر من واحد فإن الفقد الزاوي سيزداد . من الشكل (٧-٦) نرى أن الفقد الزاوي يزداد كلما قلت فتحة النفوذ العددية . إن تغير قيم فتحة النفوذ العددية عبر مقطع لب الليف لن يتم تغطيته في هذا البند .

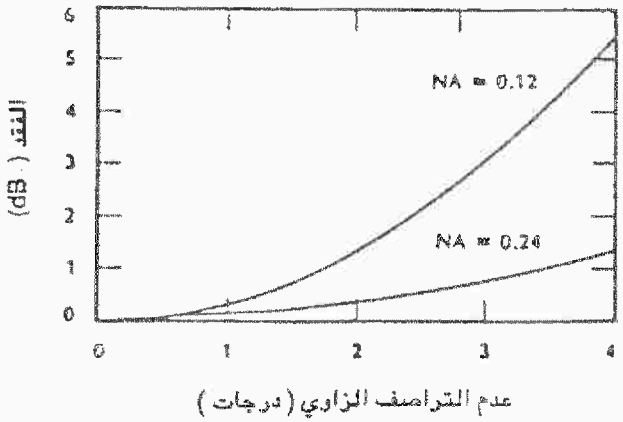


الشكل (٧-٦) فقد عدم التراصف الزاوي لألياف عتبية متعددة النمط

تعبر المعادلة التالية عن الفقد الناتج عن عدم التراصف الزاوي لليف أحادي النمط:

$$L = -10 \operatorname{Log} \left\{ \exp\left[-\left(\frac{\Pi n_2 w \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7.7)$$

حيث أن n_2 هي معامل انكسار الكساء و w هي حجم البقعة الجاوسية و θ هي زاوية عدم التراصف مقدرة بالراديان. يبين الشكل (٧-٧) رسماً بيانياً لليفين لهما نفس التردد المتيس $V = 2.4$ ومعامل انكسار الكساء $n_2 = 1.46$ يعملان عند $\lambda = 0.8\ \mu m$ ونسبة $\frac{w}{a} = 1.1$ ويختلفان في قيم فتحة النفوذ العددية . يتضح من الشكل (٧-٧) أن الفقد الزاوي في الليف أحادي النمط يزداد بانخفاض قيمة فتحة النفوذ العددية لكن سرعة الفقد في الليف أحادي النمط أكبر مما هي عليه في الليف متعدد النمط كلما قلت قيمة فتحة النفوذ العددية.



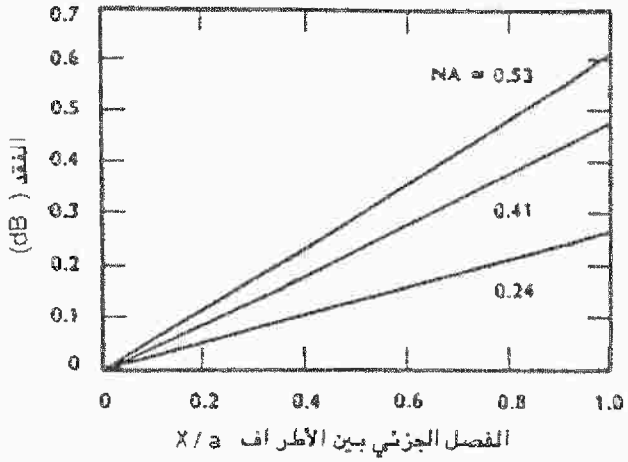
الشكل (٧-٧) فقد عدم التراصف الزاوي لألياف أحادية النمط

جـ - تباعد الأطراف End Separation

يؤدي تباعد أطراف الألياف المراد توصيلها مع بعض إلى حدوث نوعين من الفقد. الأول يسمى بفقد انعكاس فرسنل Fresnel reflection بسبب اختلاف معاملات انكسار الليفين عن معامل انكسار الثغرة الفاصلة بينهما وعادة ماتكون الهواء . يحصل الانعكاس عند مخرج الليف المرسل ومدخل الليف المستقبل. سبق أن حسبنا مقدار الانعكاس عند سطح زجاج هواء بأنه حوالي 4% أو 0.177 dB . وحيث أن هناك سطحان عاكسان فإن الفقد الكلي نتيجة الانعكاس هو 0.35dB . يمكن الإقلال من الفقد الناتج من الانعكاس بملء المسافة الفاصلة بين الليفين بسائل موائمة شفاف transparent index matching liquid معامل انكساره يساوي معامل انكسار الليف البصري ، قد يكون سائل الموائمة على شكل جيلي ويستخدم في الوصلات الدائمة splices أو الموصلات connectors. يحصل النوع الآخر من الفقد بصفة خاصة في الألياف متعددة النمط حيث يؤدي ابتعاد الليفين عن بعضهما إلى عدم اعتراض الليف المستقبل للأشعة المرسلة(الشكل

(٧-٨)) ، وكلما زاد التباعد كلما زاد الفقد نتيجة ضياع كمية أكبر من القدرة المرسلة . حيث تخرج الأنماط العليا بزاوية أكبر من زاوية القبول . يعتمد تباعد الأطراف على قيمة فتحة النفوذ العددية حيث يكون فقد تباعد الألياف أكبر للألياف ذات فتحات النفوذ الأكبر وذلك لأن حزمها تتباعد بشكل أسرع . لو فرضنا أن توزيع القدرة منتظماً فإن الفقد للشغرات الصغيرة بين الألياف يعبر عنه بالآتي :

$$L = -10 \text{Log}\left(1 - \frac{X\,NA}{4a\,n_o}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\



الشكل (٧-٩) الفقد نتيجة تباعد الأطراف لألياف عتبية متعدد النمط

د - نعومة الأسطح وتوازيها Smooth and Parallel Surfaces

تتسبب الأسطح الخشنة في تبعثر الضوء الخارج من الليف المرسل والداخل إلى الليف المستقبل. كذلك فإن أسطح الأطراف الخشنة أو غير المتوازية والتي لاتشكل زاوية قائمة مع محور الليف كما في الشكل (٧-١٠) تؤدي إلى زيادة فقد القدرة المنقولة. يؤدي استخدام سائل المواءمة إلى حل هذه المشاكل وذلك بملىء السطوح غير المستوية.

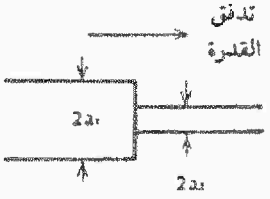
للإقلال من قيمة هذا النوع من الفقد لابد من تحضير النهايات تحضيراً جيداً وأن تكون ملساء ومتوازية. بمقارنة أنواع الفقد الناتج عن ربط الألياف المتماثلة نجد أن الانزياح الجانبي هو أكثر الأنواع تأثيراً .

الشكل (٧-١٠) تساهم الأسطح الخشنة والمائلة في زيادة الفقد

هـ - توصيل الألياف المختلفة Connection of Different Fibers

فرضنا في البنود السابقة أن الألياف الموصلة هي من نفس النوع ولها مواصفات واحدة. ولكن الواقع العملي غير ذلك . إذ قد تختلف ألياف النظام الموصلة في أقطارها أو فتحات نفوذها العددية. على سبيل المثال قد نحتاج إلى توصيل منبع ضوئي مذنب Pigtailed light source، ذو ليف مختلف عن ذلك المستعمل في نظام اتصالنا البصري. كذلك يمكن أن تختلف أقطار الألياف الموصلة عن قصد أو غير قصد. لحساب الفقد الناتج عن توصيل ليفين بصريين مختلفين في القطر نفرض أن ليفاً نصف قطر لبه a_1 يرسل قدرة بصرية إلى ليف نصف قطره a_2 بحيث أن $a_1 > a_2$ كما في الشكل (٧-١١)فإن الفقد L يعبر عنه بالتالي :

$$L = -10 \text{ Log } \frac{a_2^2}{a_1^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.9)$$

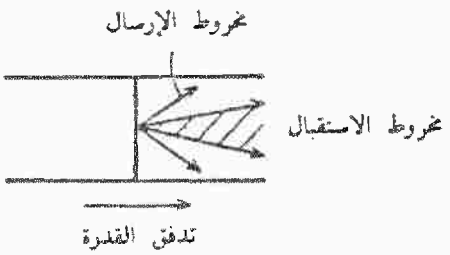


الشكل (٧- ١١) يؤدي عدم توافق لب الألياف إلى حدوث الفقد

أما إذا كان ليف الاستقبال أكبر من ليف الإرسال ($a_1 < a_2$) فإنه لايحصل فقد . يحدث الفقد أيضاً إذا كان الإرسال بين ليف ذي فتحة نفوذ عددية كبيرة إلى ليف ذي فتحة نفوذ عددية صغيرة . نجد في هذه الحالة أن بعض الشعاع المرسل سيقع خارج زاوية القبول لليف

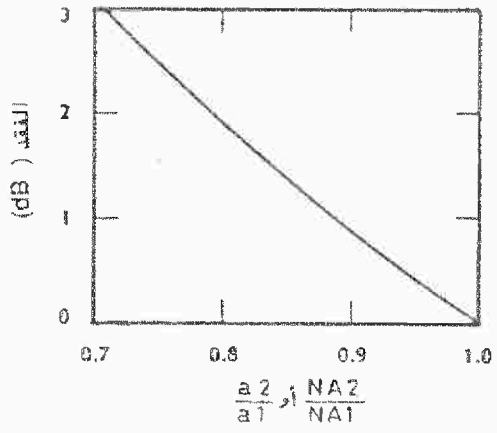
المستقبل كما في الشكل (٧-١٢) . يبلغ الفقد إذا كانت $NA_1 > NA_2$ مايلي :

$$L = -10 \, Log \left(\frac{NA_2}{NA_1} \right)^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7.10)$$



الشكل (٧-١٢) يؤدي عدم تواءم فتحات النفوذ العددية لحصول الفقد بين الليفين

أما إذا كانت فتحة النفوذ العددية للمرسل أصغر من فتحة النفوذ العددية للمستقبل فلا يحدث فقد . يبين الشكل (٧-١٣) رسماً بيانياً يوضح الفقد الناتج عن عدم تساوي أقطار الألياف الموصلة وعدم تساوي فتحات نفوذها العددية . افترضنا في التحليل السابق أن توزيع القدرة منتظماً للألياف العتبية والمتدرجة . عند استخدام ألياف متدرجة تستخدم قيمة فتحة النفوذ العددية على المحور ويجب أن يكون معامل المنظر الجانبي α ذاته لكلا الليفين . عند إرسال القدرة من ليف عتبي إلى ليف متدرج يقطع مكافيء لهما نفس قيمة فتحة النفوذ العددية المحورية وأن أقطارها متساوية فإن الفقد يبلغ حوالي3dB. يحدث ذلك لأن فتحة النفوذ العددية لليف المتدرج المستقبل تتناقص كلما ابتعدنا عن المحور وتصل إلى الصفر عند حافة اللب بينما يشع الليف العتبي بنفس قيمة فتحة النفوذ المحورية من كل نقاط حافته . أما إذا كان الليف المرسل متدرج والمستقبل عتبي فليس هناك فقد .



الشكل (٧-١٣) منحنى الفقد الناتج عن عدم تساوي اقطار لب الألياف
وكذلك عدم تساوي فتحات نفوذها العددية

٧-٢ تحضير الليف Fiber Preparation

من العوامل الهامة للحصول على توصيل جيد بين الألياف هو تحضير نهايات الألياف. عنصرين أساسيين يجب توفرهما للحصول على نهايات صالحة للتوصيل. وهما التعامد والنعومة . يجب أن تكون نهايات الليف متعامدة على محوره ولاتتعدى درجة واحدة أو درجتين من الخط المتعامد على المحور. كذلك يجب أن تكون النهايات ناعمة خالية من التشوهات blemishes والمشق hackles أو الندب أو الخدش أو أي عيوب أخرى .

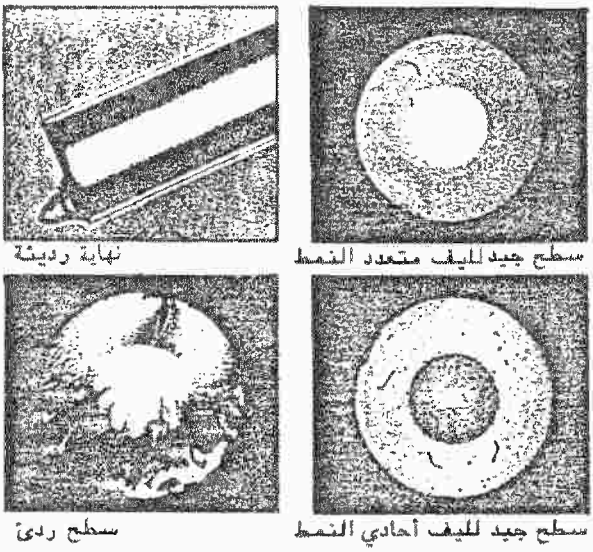
توجد طريقتين لتحضير نهايات صالحة للتوصيل وهما طريقة الخدش والكسر scribe and break وطريقة الصقل والتلميع lap and polish تستخدم طريقة الخدش والكسر عندما يتطلب الأمر عمل توصيلات دائمة splices أما طريقة الصقل والتلميع فتستخدم عندما يتم توصيل طرف الليف بموصل أو مقرن.

أياً كانت الطريقة المستخدمة لتحضير طرف الليف لابد في البداية من إزالة الأغطية والأغلفة الواقية وعناصر التقوية باستخدام أدوات تعرية الأسلاك والقطع أو أي آلة حاده تمكن من إزالة الطبقات الخارجية للكابل والوصول إلى الليف . بعد ذلك تزال طبقة الغلاف الواقي buffer والملصقة بالكساء بمحاليل كيميائية خاصة أو بطرق ميكانيكية.

تتطلب إزالة الغلاف الواقي بالطريقة الكيميائية غمر نهاية الليف في مزيل للدهان أو أي مزيل آخر يقوم بإذابة مادة الغلاف . تستغرق عملية الغمر حوالي دقيقتين . في الطرق الميكانيكية نستخدم آلة خاصة ذات دقة عالية لإزالة الغلاف الواقي . في هذه الطريقة يجب الحذر بعدم خدش أو إتلاف الكساء . بعد تعرية الليف نقوم بتنظيفه بمنظفات كيميائية مثل كحول ايزوبروبيل أو أي منظف آخر لايؤثر على مادة الليف .

في طريقة الخدش والكسر تحز الحافة الخارجية للكساء بواسطة شفرة صلبة حادة مصنوعة من الألماس أو الياقوت الأزرق أو كارباييد التنجستن يمكن سحب الشفرة على ليف ثابت أو سحب الليف على شفرة ثابتة . في كلا الحالتين يجب أن يخضع الليف لشد معتدل خلال عملية الحز وبعد الحز يزداد الشد بواسطة السحب إلى أن ينقطع الليف . تزيد قوة السحب النموذجية عن 1.47N (0.15kg و 0.33 lb).

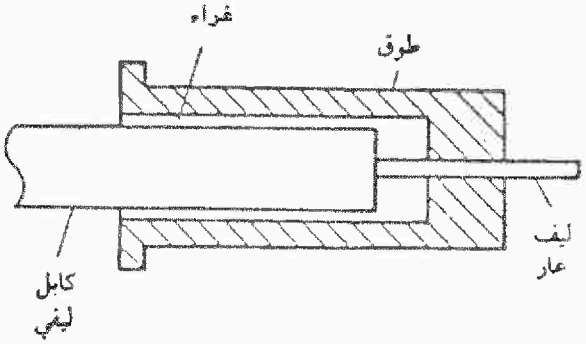
إذا عمل الشق الناتج عن حز الليف بصورة صحيحة فإنه يؤدي إلى الحصول على سطح متعامد مصقول وناعم جاهز للتوصيل. أما إذا لم يعمل بصورة صحيحة فإنه يؤدي إلى حصول ندب أو مشق hackles وشفاه lips كما هو في الشكل (٧-١٤) مما يجعل السطح غير قابل للتوصيل ويجب إعادة الخدش والقطع مرة ثانية .



الشكل (٧-١٤) مقاطع جيدة ورديئة لألياف زجاجية باستخدام طريقة الخدش والقطع

تتم عملية الخدش والقطع إما باليد أو بآلات خاصة تتراوح بين العدد اليدوية الرخيصة إلى الآلات الأوتوماتيكية المعقدة ، أياً كانت الطريقة فإن العبرة هي في الحصول على سطح متعامد مصقول صالح للتوصيل تستخدم طريقة الصقل والتلميع عندما يكون الليف جزءاً من موصل أو مقرن قابل للفك . توجد أنواع كثيرة من الموصلات والمقارن لكل منها طريقة للربط والتلميع . والطريقة العامة التي تنطبق على كافة الموصلات والمقارن تبدأ بإدخال الليف العاري في طوق ferrule معدني أو بلاستيكي كي يحفظ الليف في مكانه ويحميه ولايتسبب في انزياح الليف أو عدم تراصف زواياه . يبين الشكل (٧-١٥) رسماً مبسطاً لطوق اسطواني له ثقب صغير في أحد طرفيه لإدخال الليف وثقب في الطرف الآخر لإدخال غلاف الكابل. يتم وضع الليف في مكانه بدقة باستخدام أداة مناسبة . لتحضير الليف للصقل والتلميع يبرز جزء بسيط منه كما هو واضح في الشكل (٧-١٥) ثم نستخدم مادة لاصقة لتثبيت الليف وغلافه في الطوق حتى لايتحرك أثناء عملية الصقل. تتم عملية الصقل على عدة مراحل تبدأ المراحل الأولى باستخدام مواد كاشطة abrasives خشنة ثم أنعم فأنعم حتى نحصل على سطح لامع. يستعمل الماء مع المواد الكاشطة

لتسهيل انزلاق الليف وتبريده أثناء الصقل ، وتتطلب عملية الانتقال من مرحلة صقل إلى أخرى تنظيف الليف تنظيفاً جيدا .في المرحلة الأخيرة من عملية الصقل والتلميع تستخدم معجون له جزيئات صغيرة جداً تتراوح أقطارها بين 0.3μm و 1μm .

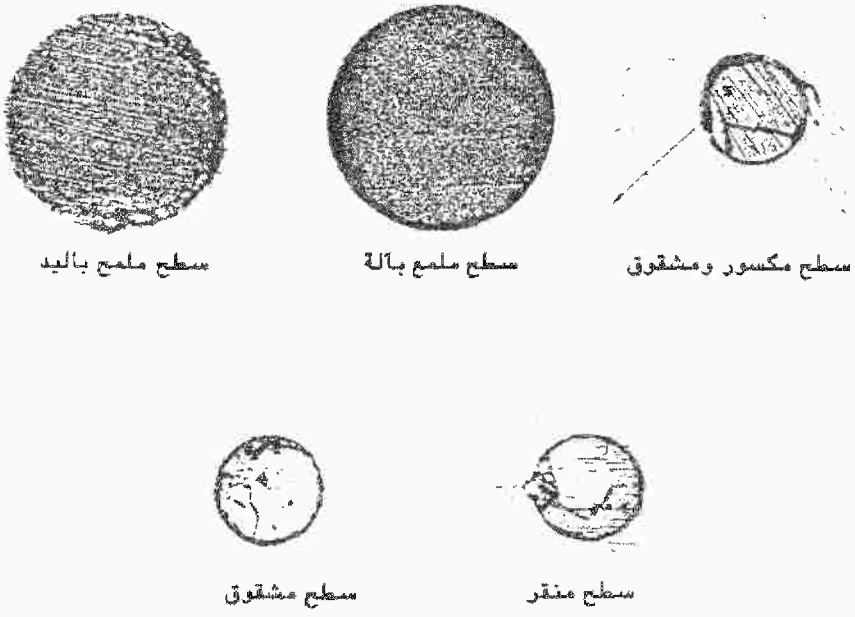


الشكل (٧-١٥) ليف بصري داخل طوق اسطواني

عند انتهاء العملية بالكامل يكون سطح طرف الليف على مستوى سطح طرف الطوق ومتعامداً مع محور الليف ، للتأكد من نعومة سطح الليف لابد من فحصه بالمجهر. قد تكون بعض الخدوش الصغيرة على اللب مقبولة وكذلك الندب على حواف الكساء. أما إذا كانت الخدوش أو الندب كبيرة فهي غير مقبولة ولابد من إعادة التلميع . نرى في الشكل (٧-١٦) صوراً مجهرية مختلفة لأسطح ملمعه بصورة جيدة وغير جيدة.

لاتقتصر عملية الصقل والتلميع آنفة الذكر على الألياف المربوطة بموصلات أو مقارن فكثير من القياسات تتطلب أن تكون نهاية الليف مصقولة ولامعة مثل قياس فتحة النفوذ العددية وقياس توهين الليف .

تستخدم طرق الخدش والقطع والصقل والتلميع بصفة عامة مع الألياف الزجاجية أما في الألياف البلاستيكية فإننا نستخدم التلميع فقط لأن البلاستيك لاينشق بشكل أملس مثل الزجاج .



الشكل (٧-١٦) صور مجهرية لأسطح ألياف ملمعة جيدة وغير جيدة

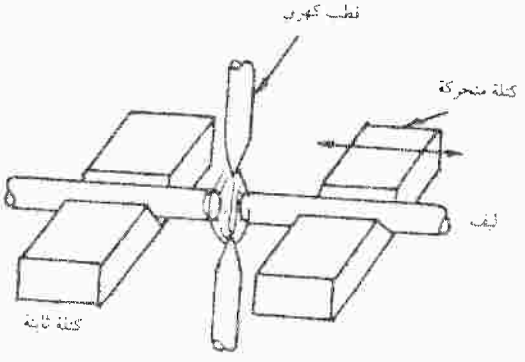
٧-٣ الوصلات الدائمة Splices

تتضمن تقنيات التوصيل الدائم صهر الليفين مع بعضهما أو تقييدهما مع بعضهما بعد التأكد من تراصفهما مستخدمين مواد لاصقة أو ميكانيكية أو كليهما معاً .

٧-٣-١ التوصيل الدائم بالصهر Fusion Splicing

يستخدم في هذه الطريقة القوس الكهربائي لصهر نهاية الألياف البصرية ولحامها مع بعضها كما في الشكل (٧-١٧) ، وقد تطورت الأجهزة المستخدمة لعمل التوصيل تطوراً كبيراً خلال السنوات الماضية فأصبح تراصف نهاية الألياف يتم باستخدام أجهزة تعتمد

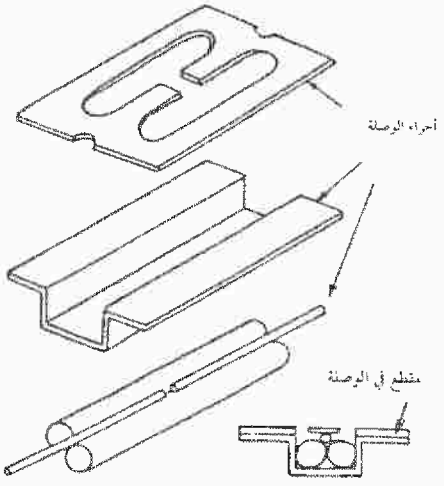
على المعالجات المصغرة microprocessors وشاشات العرض بدلاً من استخدام المجهر والنقل الميكانيكي لتراصف الألياف . كذلك يمكن فحص التراصف بمراقبة قيمة القدرة التي تعبر الوصلة . وذلك قبل أن يتم صهر الليفين . تتم عملية التوصيل بالصهر بعد تحضير أطراف الليف بطريقة الخدش والقطع . يبلغ الفقد في الوصلات الدائمة التجارية حوالي 0.25 dB . ومع الحرص في عمل التوصيل يمكن الإقلال من الفقد لكي ينخفض إلى 0.1dB. يمكن حماية منطقة الوصل بتغطيتها بمواد كيميائية مثل الغراء epoxy أو أنابيب بلاستيكية تتقلص بالحرارة مثل raychem ويستخدم الصهر بالقوس الكهربائي مع الألياف الزجاجية .



الشكل (٧- ١٧) طريقة الاندماج لعمل وصلة دائمة بين ليفين

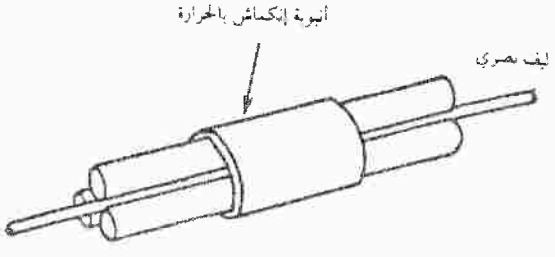
٧ -٣-٢ التوصيلات الميكانيكية Mechanical Splices

استخدمت طرق عديدة لتراصف أطراف الألياف مع بعضها واستخدم الغراء لتثبيتها نبين بعضاً منها في الأشكال (٧-١٨) إلى (٧-٢٢) . ففي الشكل (٧-١٨) توضع الألياف العارية المطلوب توصيلها في الأخدود المكون بين اسطوانتين متماثلتين



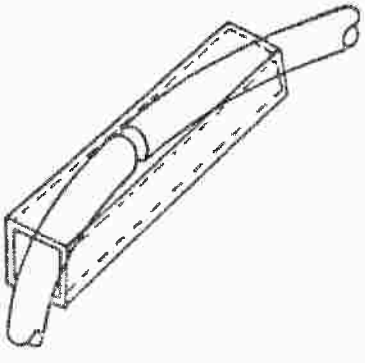
الشكل (٧-١٨) طريقة الزنبرك والمجرى لعمل وصلة دائمة

نصف قطر كل منهما أكبر من نصف قطر الليف . وتستخدم قطعة زنبركية تجعل كل طرف من طرفي الليف يرتكز على المرشدين الاسطوانيين ثم يضاف الغراء لتثبيت الوصلة. وقد استخدمت ثلاثة أسطوانات مرشدة وأنبوبة انكماش بالحرارة لعمل وصلة دائمة كما هي في الشكل (٧-١٩).

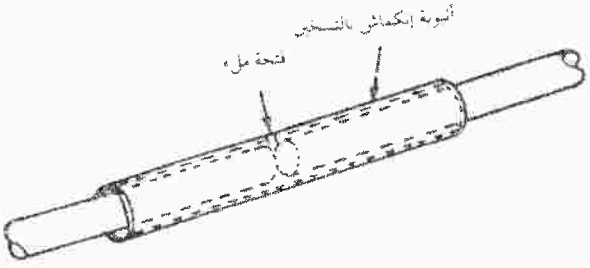


الشكل (٧-١٩) طريقة الثلاث مرشدات وأنبوبة انكماش لعمل وصلة دائمة

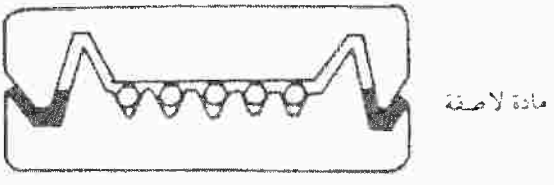
يمكن عمل وصلات دائمة باستخدام أنبوبة ذات مقطع مربع مساحته أكبر من مساحة مقطع الليف (الشكل (٧-٢٠)) . توضع الألياف المراد توصيلها على سطح مستو وبصورة منحنية وهذا الترتيب يجعل الليفين منطبقي المحورين عند مستوى التماس ويدفع الليفين من الطرفين حتى يتقابلا ثم تملأ الأنبوبة بمادة غراء لإتمام الوصلة. يبلغ الفقد في هذا النوع من الوصلات حوالي 0.07dB للألياف المتدرجة . يمكن استخدام أنبوبة انكماش كما في الشكل (٧-٢١) وهي أنبوبة لها مقطع دائري الشكل يدخل بها الألياف المراد وصلها بعد تسوية الأوجه المستوية من نهاية كل منها ثم توضع مادة غروية عند تلاقي الليفين وتسخن أنبوبة الانكماش لتثبت الألياف في محلها وتقوي المنطقة المحيطة بالوصلة . أما في الكابلات متعددة الألياف فتستخدم وصلات مكونة من جزئين كما في الشكل (٧-٢٢) . يتكون الجزء الأول من قطعة من السليكون بها مجارى مستقيمة وهو الجزء الأسفل. أما الجزء الثاني وهو الجزء الأعلى فيتكون من مادة بلاستيكية. عند الوصل توضع الألياف في الأخاديد على شكل V في الجزء الأسفل وتدفع من الطرفين إلى أن تلتقي ثم توضع القطعة البلاستيكية عليها وتضغط الوصلة بضغط مناسب وفي نفس الوقت يوضع الغراء على الأطراف حتى يتماسك الجزء الأعلى والأسفل مع بعضهما . يمكن استخدام هذه الطريقة لوصل عدد كبير من الألياف تقع كل مجموعة منها في مستوى واحد. يبلغ الفقد في هذا النوع من الوصلات حوالي 0.2dB .



الشكل (٧-٢٠)وصلة الأنبوب مربعة المقطع



الشكل (٧ - ٢١) وصلة دائمة باستخدام أنبوبة انكماش بالتسخين



الشكل (٧- ٢٢) وصلة دائمة لكابل متعدد الألياف

٤-٧ الموصلات Connectors

تتطلب بعض الاستخدامات موصلات يمكن اعادة تمشيقها دون أي تغيير في خواص توصيلها. إن الحصول على موصلات ذات مواصفات ميكانيكية متشددة وعالية الجودة جعل تصميمها صعباً وتكلفتها عالية . للحصول على موصل جيد لابد من تحقيق مايلي :

١ - فقد قليل

يجب أن يكون الموصل قادراً على ضمان حد أدنى من عدم التراصف وعدم الانزياح والتلاصق بين أطراف الألياف بشكل تلقائي مع تكرار فصل وتوصيل الموصل. وليس كما هو الحال في الوصلات الدائمة التي لايمكن فيها مشاهدة الوصلة ضمن الموصل ولايمكن إجراء تصحيح للموقع. إذا كان النظام يحتوي على عدة موصلات يجب أن تكون هذه الموصلات فعّالة وأن يكون الفقد أقل مايمكن في كل منها.

٢ - كفاءة الاقتران

يجب أن تكون كفاءة الاقتران ضمن حدود معينة وأن لاتتغير كثيراً مهما تكرر فصل وتوصيل الموصل. وأن لاتتغير كفاءة الاقتران بين المجموعة الواحدة من الموصلات أو تكون كفاءة الاقتران مرتبطة بمهارة العامل المجمّع للموصل.

٣ - قوة التحمل

يجب أن لايتدنى التوصيل نتيجة القوى المؤثرة على جسم الموصل أو الشد على الكابل البصري.

٤ - الانسجام مع المحيط

يجب أن لاتتأثر الموصلات بالعوامل الخارجية مثل الرطوبة والغبار ودرجة الحرارة والمؤثرات الكيميائية والاهتزازات والضغوط العالية .

٥ - سهولة التجميع

يجب أن يكون تحضير الليف وربطه ضمن الموصل سهلاً وسريعاً.

٦ - سهولة الاستعمال

يجب أن يكون توصيل وفصل الموصل سهلاً .

٧ - الاقتصادية

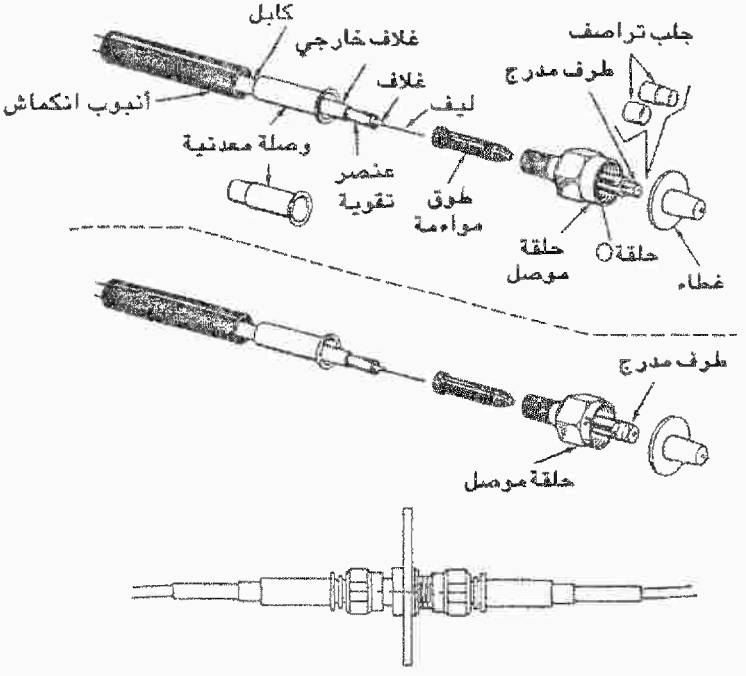
يجب أن يكون ثمن الموصل مناسباً ولو أن تكلفة الموصلات المتقنة ذات الفقد المنخفض عالية جداً وتستخدم في الأنظمة ذات معدلات الإرسال العالية . أما في الأنظمة ذات معدلات الإرسال المتوسط أو المنخفض فتستخدم موصلات بلاستيكية رخيصة .
يتراوح الفقد في الموصلات النموذجية بين 0.5 dB و 3dB وهو أكبر من فقد الوصلات الدائمة . يمكن زيادة كفاءة الاقتران بين الألياف باستخدام سائل مواءمة وهو أمر غير مرغوب فيه بسبب تبخره وتسربه من مكان الاتصال ونقص شفافيته مع الزمن . توجد موصلات بلاستيكية مسكوبة ذات أسعار أقل من الموصلات المعدنية لكنها أقل دقة وبالتالي ذات فقد أعلى.

إن السبب في زيادة الفقد في الموصلات عن الوصلات الدائمة يرجع إلى تباعد نهايات الأطراف عن بعضها في الموصل . إن الإفراط في الضغط عليها للحصول على تلاصق كامل بين الألياف قد يؤدي إلى تلف سطوحها الصقيلة. على العكس من الوصلات الدائمة التي تحرك فيها الألياف باعتدال إلى أن تتلامس وتلتحم.
صممت موصلات متنوعة تعتمد في معظمها على الوصلة التناكبية Butt تتألف الوصلات التناكبية من طوق ferrule لكل ليف ومن جلبة ضبط يركب فيها الليف.
نورد فيما يلي شرحاً موجزاً لأربعة أنواع من الموصلات وهي :(١) المحورية SMA (٢) المستدقة Tapered (٣) الجافة DNP (٤) الصفيفي Array .

١ - الموصلات المحورية SMA SMA Connectors

يشيع استخدام موصلات SMA في أنظمة الاتصالات البصرية العسكرية وفي صناعة أجهزة التجارب . أصبحت موصلات SMA قياسية لاستخدامات كثيرة وتصنع من قبل شركات عديدة . يمكن استبدال موصل مصنع من قبل شركة معينة بموصل مصنع من قبل شركة أخرى. تشمل المواصفات القياسية أبعاد أجزاء التعشيق في الموصل ولاتشمل

التفاصيل الداخلية أو طريقة حصول التراصف . تتشابه موصلات SMA المستخدمة لربط الألياف البصرية مع موصلات SMA المحورية المستخدمة في الترددات الراديوية. ويوضح الشكل (٧-٢٣) أجزاء موصل SMA ذو الجلبة المستقيمة . يحتوي هذا الموصل على جسم معدني بثقب دقيق في مقدمته يمسك الليف العاري بطوق التراصف الأولي ويدخل في الجانب الخلفي بجسم التجميع body assembly ويثبت بغراء . تثبت عناصر التقوية والحماية للكابل بين جسم التجميع ، للحصول على تقوية ميكانيكية . يربط الموصل ببطاقة صقل معدنية ويقطع الليف الزائد ثم يصقل طرف الليف ويلمع . يتم الحصول على تراصف زاوي ومحوري من التكيف السلس للاطواق في الجلب الأنبوبية ، تستخدم بعض موصلات SMA نهاية مستدقة بها نقر dimples صغيرة توجه الليف نحو المركز.

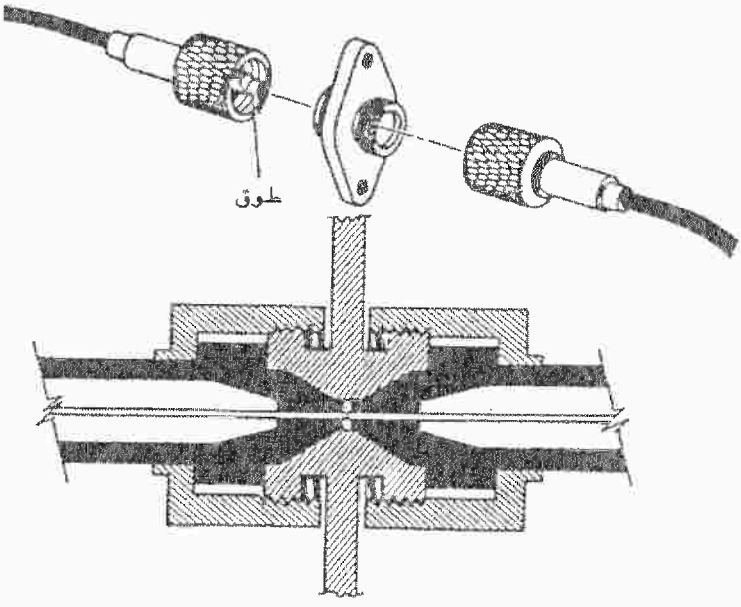


الشكل (٧-٢٣) أجزاء موصل SMA بجلبة مستقيمة

٢ - الموصل البسيط ذو الطوق البلاستيكي Plastic - Ferrule Simplex Connector

تمسك الألياف في الموصل البسيط ذو الطوق البلاستيكي بواسطة أطواق مستدقة تعشق داخل جلب مستدقة كما في الشكل (٧-٢٤) . تُدْخَل الجلب المستدقة داخل جسم اسطواني له ثقب في مركزه.يؤدي استخدام طوق مستدق وجلبة مستدقة إلى سهولة التراصف والتعشيق. يساعد بروز موجود على الطوق في التحكم بعمق اختراق الطوق داخل الجلبة .

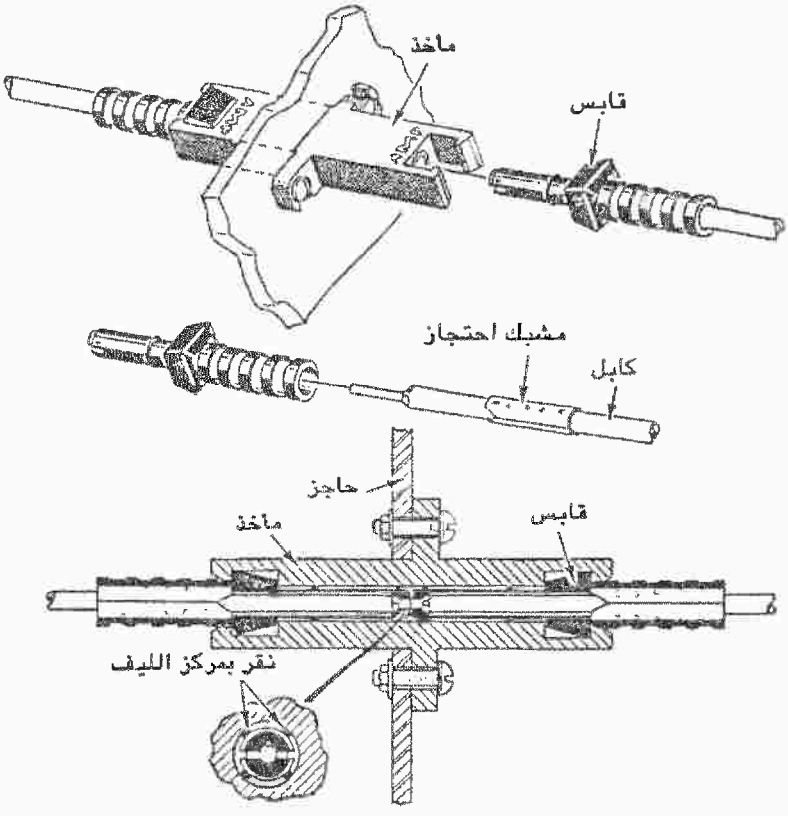
تثبت أجزاء الموصل مع بعضها بالغراء أو بالحصر crimp . يتولى الغراء ربط الليف داخل الطوق ، أما الحصر المعدني فيخدم غرضين (١) يربط الأجزاء المعدنية للموصل مع الطوق (٢) يتولى ربط عناصر الحماية في الكابل مع الموصل حيث تحصر بين الطوق والأجزاء المعدنية للموصل .



الشكل (٧-٢٤) موصل بسيط بطوق بلاستيكي

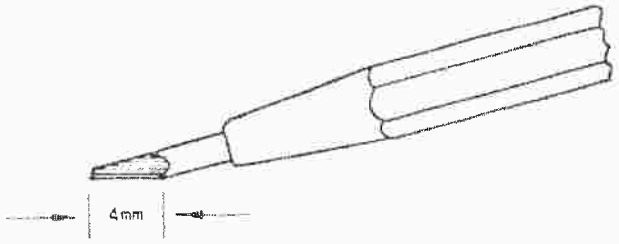
٣ - الموصل الجاف غير المصقول Dry No Polish (DNP) Connector

يصنع هذا النوع من الموصلات من مواد بلاستيكية ويشيع إستخدامه مع الألياف البلاستيكية . يستخدم غالباً في أنظمة الاتصالات البصرية الرخيصة حيث الاهتمام ينصب على التكلفة بدلاً من الأداء . يتراوح الفقد في هذه الموصلات بين 2dB و 3dB . وهو فقد قليل مقارنة بالفقد الإجمالي للنظام . تستخدم الألياف البلاستيكية لوصلات لايتجاوز طولها ٣٠ متراً وبسرعة تقل عن 30Mb/s.



الشكل (٧-٢٥) أجزاء موصل جاف غير مصقول DNP

لايحتاج موصل DNP الموضح بالشكل (٧-٢٥) إلى غراء أو حصر كما هو الحال في الموصلات التي تم شرحها آنفاً . تحتوي القوابس plugs الحاملة لليف على نهايات منشطرة باخاديد على شكل V . تسمح فتحة النهايات بمرور ألياف أكبر بقليل من المعتاد وتتولى الأخاديد تمركز الليف . يقوم مشبك احتجاز retention clip بمسك غلاف الليف داخل القابس . يحتوي المشبك على شوك barbs داخلي وخارجي تتولى ربط غلاف الليف مع الجزء الداخلي للقابس . يعشق القابسين بواسطة مقبس جلبة مستقيمة كما هو واضح في الشكل (٧-٢٥) . تعمل النقر dimples الموجودة على السطح الخارجي للقابس كنقاط ضغط تساعد على تمركز الليف . يكتفى بالحصول على نهاية ليف مصقولة باستخدام أداة قطع حادة كالتي بالشكل (٧-٢٦) دون الحاجة للتلميع .

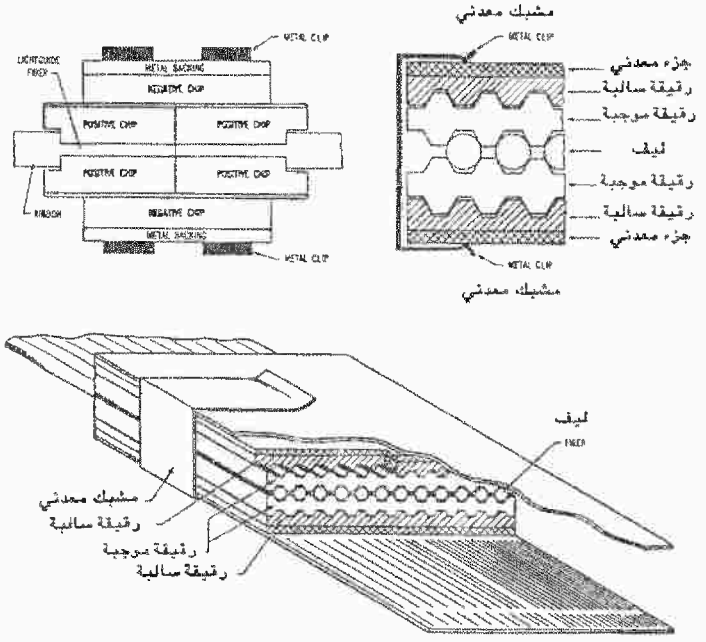


الشكل (٧ - ٢٦) أداة قطع حادة مصنوعة من الكاربايد لقطع الليف

٤ - الموصل الصفيفي للكابل الشريطي Ribbon Cable Array Connector

يستخدم هذا النوع من الموصلات لتوصيل الكابلات الشريطية ribbon يتكون الموصل الصفيفي من نصفين ورقيقتين chips سالبتين بخلفيات معدنية ومشابك زنبركية spring clips كما هو موضح بالشكل (٧-٢٧) . يحتوي كل نصف صفيفي على

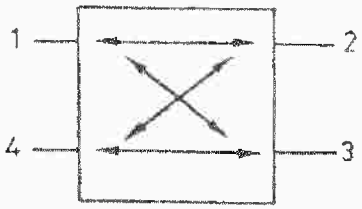
رقيقتين سليكونيتين موجبتين محفور بهما أخاديد. تلصق الألياف بالأنصاف الصفيفية قبل شحنها من المصنع . يؤدي صقل وتلميع الصفيفة إلى تحضير نهايات الليف للتوصيل. يتم تجميع الموصل بتراصف نصفي الصفيفة ضمن الرقيقتين الساليتين . تتراكب كل رقيقة سالبة مع نصفي الصفيفة ليتم تراصف الألياف . تستخدم المشابك الزنبركية لمنع أي تغير في وضع الألياف. ويستخدم سائل موائمة للإقلال من الفقد .قد يصل عدد الألياف الموصلة إلى ١٤٤ ليفاً مقسمة إلى ١٢ شريطاً يحتوي كل شريط على ١٢ ليفاً .



الشكل (٧- ٢٧) أجزاء موصل صفيفي لربط الكابل الشريطي

٧ - ٥ المقارن Couplers

لايقتصر ربط عناصر نظام الاتصالات على توصيل الألياف مع بعضها بل نحتاج إلى تقسيم القدرة أو تجميعها وكذلك ربط المنابع والكواشف بالألياف . يعرف المقرن coupler بأنه جهاز متعدد المنافذ . والمنفذ هو نقطة دخول أو خروج الضوء . توجد عدة أنواع من الفقد في المقرن . يبين الشكل (٧-٢٨) مقرن اتجاهي بأربعة منافذ . تشير الأسهم لاحتمال اتجاه سريان القدرة الضوئية خلال المقرن . إن الضوء الداخل إلى منفذ رقم1 يخرج من المنفذ رقم 2 والمنفذ رقم 3 ولايخرج ضوء من المنفذ رقم 4 . كذلك فإن الضوء الداخل إلى منفذ رقم 4 يخرج من منفذ رقم 2 ومنفذ رقم 3 ولاشيء يخرج من منفذ رقم1 . يعمل المنفذين 1 و 4 كمنافذ دخل أما المنفذين 2 و 3 فهي منافذ خرج . لو عكسنا اتجاه القدرة فستعمل المنافذ 2 و 3 كمنافذ دخل والمنافذ 1 و 4 كمنافذ خرج .



الشكل (٧-٢٨) مقرن اتجاهي بأربعة منافذ

لحساب مقدار الفقد في القدرة نفرض أن المنفذ رقم1 هو منفذ الدخل والمنفذين 2 و3 هما منافذ الخرج حيث أن المنفذ رقم 2 هو منفذ الخرج الرئيسي throughput . أي أن القدرة الخارجة من منفذ رقم 2 دائما تساوي أو أكبر من القدرة الخارجة من منفذ رقم 3 وهي القدرة المتفرعة .

يعبر عن الفقد الرئيسي في المنفذ رقم 2 للقدرة الداخلة من منفذ رقم 1 بالآتي :

$$Loss_2\,(dB) = 10\,Log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad \ldots\ldots\ldots (7.11)$$

يعبر عن الفقد الفرعي للمنفذ رقم 3 للقدرة الداخلة من منفذ رقم 1 بالآتي :-

$$Loss_3\,(dB) = 10\,Log\left(\frac{P_3}{P_1}\right) \quad \ldots\ldots\ldots (7.12)$$

يعبر عن الاتجاهية directionality بأنها النسبة بين القدرة غير المرغوبة إلى القدرة الداخلة من مدخل رقم 1 .

$$Loss_4\,(dB) = 10\,Log\left(\frac{P_4}{P_1}\right) \quad \ldots\ldots\ldots (7.13)$$

عادة ماتكون قيم العزل isolation أو الاتجاهية directionality لتفرع جيد عالية تصل إلى 40dB أو أكثر.

يعبر عن الفقد الزائد excess بأنه النسبة بين القدرة الخارجة من المنفذين 2 و 3 إلى القدرة الداخلة من المنفذ رقم 1 . يحصل الفقد الزائد إذا كان المقرن غير مثالي. إن سبب الفقد داخل المقرن يرجع إلى مكونات المقرن نفسه إذ قد يحتوي على ألياف لها فقد مرتفع أو غير متراصفة أو عدسات غير مثالية بالإضافة لفقد الانعكاس عند دخول الضوء وعند خروجه. أنواع أخرى من الفقد يجب اعتبارها وهي ناتجة عن عدم تواءم الأقطار ومنافذ فتحات النفوذ العددية للمقرن coupler والليف المُقْرَنْ coupled. تستخدم المقارن لشطر split القدرة الداخلة وتعبر عن النسبة بين القدرة الرئيسية والقدرة الفرعية أي $\frac{P_2}{P_3}$.

ويتراوح بين 1:1 حتى 1:10 . يبين الجدول رقم (٧-٢) نسب الانشطار splitting ratios والقدرات الرئيسية والفرعية .

الجدول رقم (٧-٢)

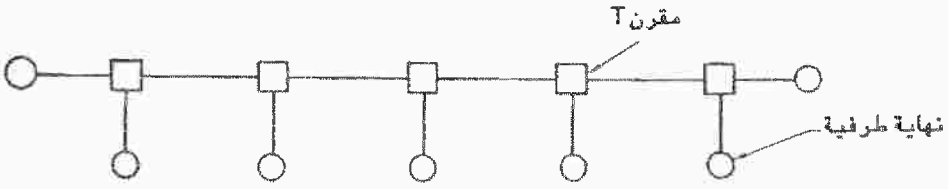
الفقد لمقارن نموذجية اتجاهية ذات أربعة منافذ

نسبة الانشطار	الفقد الرئيسي (dB)	الفقد الفرعي (dB)
1:1	3	3
1:2	1.8	4.8
1:3	1.25	6
1:6	0.66	8.5
1:9	0.46	10
1:10	0.41	10.4

توجد عدة أنواع من المقارن تستخدم بصفة خاصة في شبكات الاتصالات المحلية. نعطي فيمايلي نبذة عن (١) المقرن T (٢) المقرن النجمي.

(١) مقرن T Tee Coupler

يتكون مقرن T من ثلاثة منافذ . يبين الشكل (٧-٢٩) استخدام المقرن T مع خط رئيسي Bus . يقوم المقرن عند كل نقطة التقاء node بشطر جزء من القدرة الرئيسية المحمولة في الخط الرئيسي ويعطيها إلى مرسل ومستقبل في الأجهزة المرفقة. كلما ازداد عدد نقاط الالتقاء على الخط الرئيسي كلما ازدادت نسب الانشطار وقلت قيمة الضوء المتفرع .

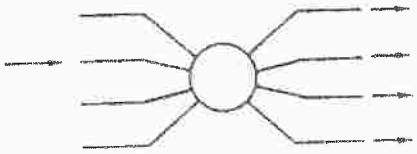


الشكل (٧-٢٩) شبكة T

(٢) المقرن النجمي Star Coupler

يبين الشكل (٧-٣٠) رسماً تخطيطياً لموصل نجمي له عدد متساوي من المداخل والمخارج . إذا كانت الشبكة تحتوي على نهايات طرفية بعدد N فيجب أن يكون عدد المنافذ للمقرن هو 2N . يتوزع الضوء الداخل إلى أي منفذ بالتساوي على بقية منافذ المخرج .

إن فقد الإدخال insertion loss في المقرن النجمي هي النسبة بين القدرة عند أي منفذ خرج إلى القدرة الداخلة . لذا فإن فقد الإدخال يتناسب عكسياً مع عدد النهايات الطرفية terminals .



الشكل (٧-٣٠) مقرن نجمي

$$Loss_{ins} = 10 \text{ Log } \frac{1}{N} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.14)$$

إن الفقد لايزداد خطياً بزيادة عدد النهايات الطرفية.

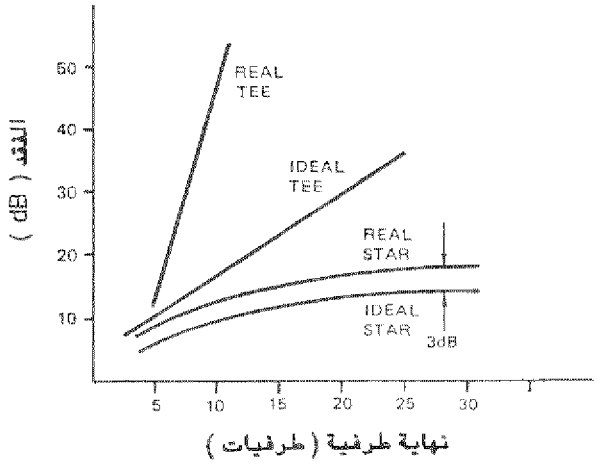
إذا أضفنا الفقد الزائد وفقد المقرن فإن الفقد الاجمالي L_T يصبح :

$$L_T = 10 \text{ Log } \frac{1}{N} + 10 \text{ Log } \left(\frac{P_2 + P_3}{P_1} \right) + 2\, L_C \quad \ldots\ldots\ldots (7.15)$$

حيث أن L_C هو فقد المقرن.

تستخدم المقارن النجمية لربط عدد كبير من النهايات الطرفية للشبكة.

فرضنا في النقاش السابق عن توزيع القدرة في المقارن بأنها نموذجية والواقع العملي غير ذلك. يبين الشكل (٧-٣١) مقارنة للفقد مقابل عدد النهايات الطرفية لمقارن T ونجمية مثالية ideal وواقعية real.



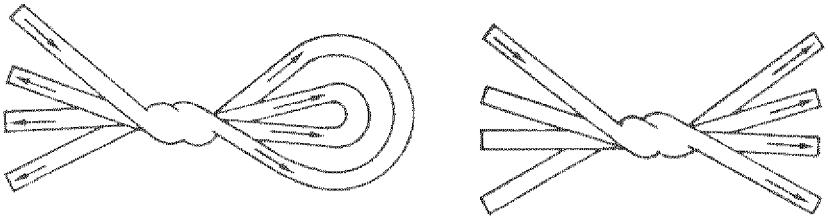
الشكل (٧ - ٣١) الفقد مقابل عدد النهايات الطرفية لمقارن T ومقارن نجمية

٧ - ٥-١ بنية المقرن Coupler Structure

ابتدعت أنواع كثيرة من المقارن تقوم بتقسيم القدرة وتجميعها وقرن المنابع والكواشف إلى الليف البصري ، تعامل معظم المقارن كصناديق سوداء قد لايهتم كثير من المستخدمين ببنيتها الداخلية . لتعميم الفائدة نستعرض فيما يلي بنى (١) المقارن المنصهرة (٢) مقرن شاطر الحزمة (٣) مقرن تجميع التقسيم حسب طول الموجة.

(١) المقارن المنصهرة Fused Couplers

تتكون المقارن المنصهرة من مجموعة من الألياف تلف حول بعضها في المركز ثم تسخن . عندما يذوب الزجاج تتكون كتلة في المركز تسمح للضوء الداخل من أي ليف بالتوجه إلى الألياف الأخرى . يبين الشكل (٧-٣٢ أ) مقرن نجمي مرسل حيث تقع أطراف الألياف على نهايتي القسم المنصهر. وفي الشكل (٧-٣٢ ب) المقرن العاكس حيث تقع نهايات الألياف في جهة واحدة من القسم المنصهر.



(ب) (أ)

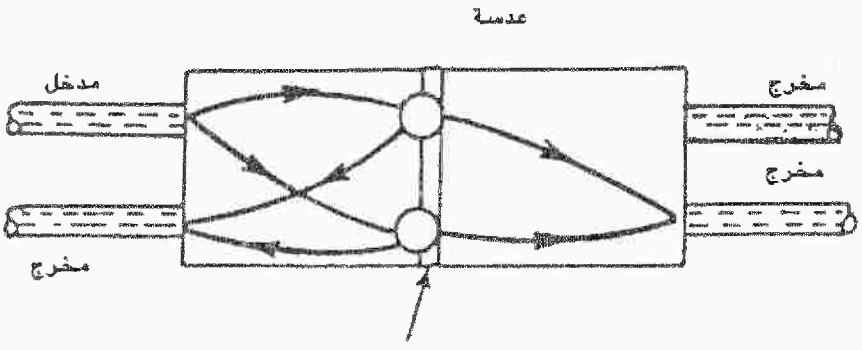
الشكل (٧ - ٣٢) مقارن نجمية منصهرة (أ) النجمة الناقلة (ب) النجمة العاكسة

(٢) مقرن شاطر الحزمة Beam Splitter Coupler

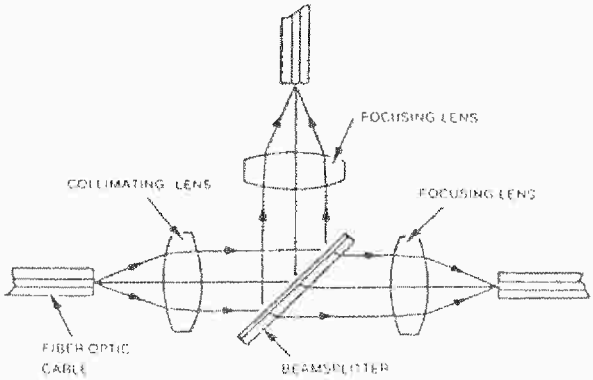
يحتوي المقرن على صفيحة شطر الحزمة beamsplitting plate كما في الشكل (٧-٣٣ أ) وهي صفيحة مغطاة بمادة عاكسة جزئياً . تعكس الصفيحة جزءاً من الضوء الساقط عليها وتمرر الجزء الآخر. تعتمد النسبة بين الضوء المنعكس والمار خلالها على طبقة التغطية coating . نظراً لتباعد شاطر الحزمة عن الألياف يحصل فقد في الضوء . لذا تستخدم عدسات لتجميع الضوء وتركيزه على الليف .

يبين الشكل (٧-٣٣ب) شكلاً آخر لمقرن شاطر الحزمة . يتألف المقرن من عدستين وصفيحة عاكسة جزئياً . يكون ليفا التوصيل منزاحين عن محوري العدستين عندما تكون البوابة 1 مدخلاً تنقل العدستان المجمعتان الضوء من البوابة 1 إلى الليف في البوابة رقم 2 أما الضوء المنعكس من الصفيحة فإنه يرتسم imaged على البوابة 3 ولايصل أي جزء من الضوء إلى البوابة 4 . وتتوزع المداخل عند البوابات الأخرى بطريقة متشابهه .

المقارن شاطرة الحزمة هي أجهزة تقسيم الاتساع . فهي توزع اتساع الموجة الواردة إلى النسب المرغوبة. يمكن انتاج مقارن تقوم بتقسيم جبهة الموجه wave front .



(أ) الاقتران باستخدام العدسات



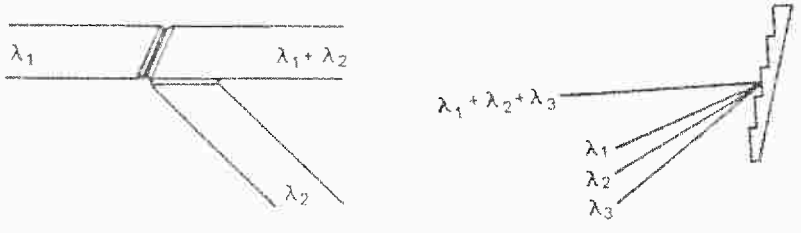
(ب) الاقتران باستخدام شاطر الحزمة

الشكل (٧ - ٣٣) الاقتران باستخدام العدسات وشاطر الحزمة

٣- مقرن تجميع التقسيم حسب طول الموجه Wavelength Division MutiplexingCoupler

في هذا النوع من المقارن ينقسم الضوء المنعكس أو المار حسب الطول الموجي للإشارة. يبين الشكل (٧-٣٤) نوعين من هذه المقارن. يستخدم أحدهما محزز الانعراج diffraction grating وهو صفيفة array من خطوط عاكسة دقيقة ومتوازية موزعة حسب الطول الموجي. بسبب حجم المحزز فإن قوانين الانعكاس والانكسار تستبدل بقوانين الانعراج. يحصل الانعراج بسبب التفاعل بين الموجة والشيء object وهو المحزز في هذه الحالة . يؤدي الانعراج إلى حيود الموجات عن طريقها. حيث يركز المحزز الضوء في عدة اتجاهات. تحدد عدد الخطوط المتوازية والمسافة بينها عدد القنوات المنعرجة . يمكن استخدام المحزز بشكل عكسي إذ يقوم بتجميع الأطوال الموجية مع بعضها بدلاً من تفريقها . يمكن استخدام محزز الانعراج لنظم تستخدم حتى ١٠ قنوات .

النوع الآخر من هذا المقارن يستخدم المرشح البصري optical filter لتفريق الأطوال الموجية . تستخدم لهذا الغرض مادة تلوانية dichroic وهي مادة تعكس أو تمرر الضوء حسب الطول الموجي : يبين الشكل (٧-٣٤ ب) رسماً توضيحياً لهذا المقرن حيث يتكون من ثلاثة ألياف بصرية . توضع المادة التلوانية بين الليفين اللذين على استقامة واحدة وذلك للتحكم بالضوء حسب الطول الموجي. يمكن لهذا المرشح أن يفرق أطوال موجية الفرق بينها في حدود 100nm.



(ب) مرشح بصري (أ) محزز الانعراج

الشكل (٧ - ٣٤) مقارن تجميع التقسيم حسب طول الموجة

٧-٥-٢ اقتران المنبع Source Coupling

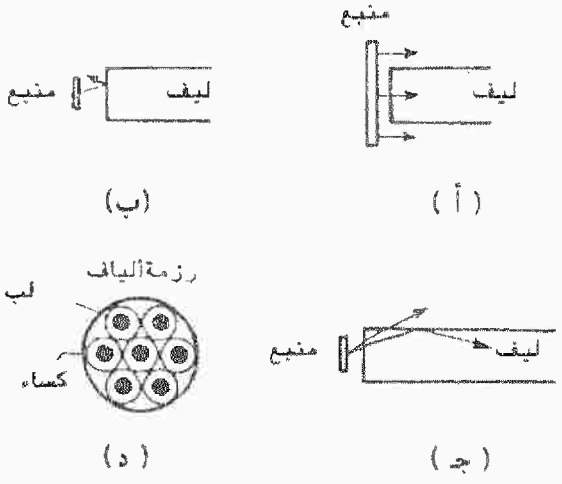
للحصول على أكبر اقتران ممكن للقدرة الضوئية بين المنبع والليف البصري · يجب موائمة مساحيتهما وفتحات نفوذهما العددية والاقلال من الضوء المنعكس من سطح الليف وفقد الرزم · اقترحت عدة طرق لزيادة كفاءة الاقتران المعرفة بالمعادلة التالية :

$$\eta = \frac{P_f}{P_S} \quad \text{..... (7.16)}$$

حيث أن P_f هي القدرة في الليف و P_S هي القدرة المنبعثة من المنبع · ويقدر الفقد L بالديسبل كما يلي :

$$L = -10 \text{ Log } \eta \quad \text{..... (7.17)}$$

ويبين الشكل (٧ - ٣٥) المشكلات التي تؤدي إلى فقد الاقتران نستعرضها في الفقرات التالية ·



الشكل (٧-٣٥) أنواع فقد اقتران المنبع

أ - فقد عدم مواءمة المساحة Area Mismatch

إذا كانت مساحة المنبع أكبر من مساحة لب الليف فإن جزءاً من القدرة المنبعثة سيسقط على المساحة الواقعة خارج مساحة اللب الشكل (٧-٣٥ أ) . لذا لايتمكن من الاقتران ويقاس النقص في الكفاءة بواسطة النسبة بين مساحة لب الليف A_c إلى مساحة المنبع A_s أي $\frac{A_c}{A_s}$. أما إذا كانت مساحة المنبع أصغر من مساحة الليف فإن الفقد يزول . يمكن معالجة ذلك باستخدام عدسات مناسبة تقوم بتركيز الضوء المنبعث من المنبع ليواءم لب الليف .

ب - فقد الإنعكاس Reflection Loss

يؤدي وجود ثغرة هوائية بين المنبع والليف إلى انعكاس الضوء الساقط على الليف (الشكل ٧-٣٥ ب) . فإذا كان الليف مصنوعاً من الزجاج فإن الفقد الحاصل عند السطح هواء - زجاج يبلغ 0.177dB . إذا أردنا الاقلال من هذا النوع من الفقد يمكن وضع سائل مواءمة بين المنبع والليف أو أن يكون المنبع على تماس مع الليف .

جـ - فقد فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture Loss

يشترط في اقتران الضوء المنبعث من المنبع أن تكون زاوية سقوطه ضمن زاوية قبول الليف كما في الشكل (٧ - ٣٥ جـ) . تعطي كفاءة الاقتران نتيجة ذلك بالآتي :

$$\eta = NA^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.18)$$

وذلك لليف عتبي ومنبع لامبرتي مثل الثنائي السطحي الباعث للضوء LED . للإقلال من هذا النوع من الفقد يمكن استخدام منابع ذات فتحات نفوذ عددية صغيرة ومواءمة لفتحات النفوذ العددية للألياف مثل ثنائي الليزر وثنائي الحافة .

د - فقد الرزم Packing Fraction Loss

تستخدم في بعض التطبيقات مجموعة من الألياف البصرية على شكل حزمة كما

هو في الشكل (٧-٣٥ د) حيث ترزم عدة ألياف وتتلامس أغلفتها . يؤدي ذلك إلى : (١) زيادة مساحة الليف المستقبل ليتواءم مع مساحة المنبع (٢) تصدر المنابع الكبيرة ضوءاً أكثرمن المنابع الصغيرة فيمكن قرن قدرة أكثر بالحزمة مما هو بالنسبة لليف المفرد .

(٣) ان انقطاع أحد الألياف لايؤدي إلى قطع الاتصال وسيتأثر مقدار القدرة المنقولة فقط (٤) يمكن أن تستعمل الحزمة لتوزيع المعلومات إلى عدة محطات بواسطة فصل الحزمة وتحويل الألياف المنفصلة إلى عدة مسارات .

إن ضوء المنبع الذي يصطدم بالكساء أو الفراغ الهوائي بين الألياف سيفقد . وإن كفاءة الاقتران ستنقص بسبب كفاءة الرزم (η_{Pf} packing fraction) التي تساوي نسبة مجموع مساحات اللب إلى مساحة الرزمة . تتراوح قيم كفاءات الرزم النموذجية بين 0.4 و 0.75 . قد يحصل تبادل معلومات بين الألياف رقيقة الكساء ولكن ذلك ليس مهماً لأن كل ليف يحمل نفس المعلومات .

للإقلال من الفقد الناتج من اقتران ضوء المنبع لليف البصري فإن شركات منتجة كثيرة بدأت تُسوّق منابع بذيل ليفي قصير مربوط بالمنبع وجاهز للتوصيل الدائم أو التوصيل غير الدائم إلى الليف المرسل . سنستعرض طريقة توصيل هذا الليف مع المنبع في الفصل الثامن . ولو أن تفاصيل الاقتران بين المنبع والذيل قد لاتكون معروفة للمستخدم . يحتاج مصمم النظام أن يعرف القدرة المنبعثة من الذيل وحجم اللب ذاته وهل هو عتبي أو متدرج . يجب التأكد عند شراء المنبع إذا كانت قدرة الخرج الصادرة من الباعث مباشرة أو القدرة التي تنبثق من الليف المذنّب ، إن القدرة الصادرة من طرف الليف هي أصغر بكثير في معظم الحالات من القدرة المنبعثة من الباعث بسبب كفاءة الاقتران الصغيرة .

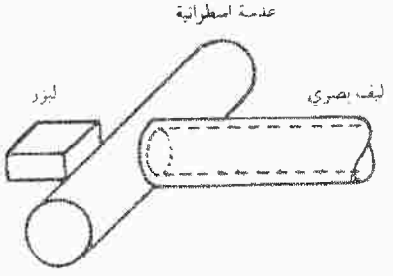
٧ - ٦ الخلاصة Summary

أن صغر الألياف البصرية والمنابع المستخدمة في اتصالات الألياف البصرية حتمت ضرورة وجود مواصفات دقيقة لعناصر النظام المستخدمة للحصول على أكبر اقتران للضوء في النظام . استعرضنا في بداية الفصل العوامل المختلفة المسببة للفقد في النظام وقسمناها إلى عوامل داخلية وخارجية ووجدنا أن الإقلال من أسباب الفقد الداخلية تحتاج إلى دقة متناهية للحصول على ألياف متماثلة تماماً من حيث تمركز لبها وشكله وحجمه وفتحة نفوذه العددية . أما الأسباب الخارجية فتتطلب كثيراً من الحرص والانتباه للحصول على وصلات دائمة وفعالة وموصلات ومقارن تعطي أكبر كفاءة اقتران ممكنة . وجدنا أن تحضير نهايات الليف بدقة وعناية وتراصف الألياف وعدم انزياحها يؤديان إلى الحصول على وصلات دائمة ذات فقد لايتعدى 0.2dB كما أن الموصلات الجيدة لها فقد يقل عن 1dB .

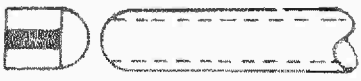
تستخدم المقارن في تقسيم القدرة البصرية واقتران الضوء من المنبع إلى الليف أو من الليف إلى الكاشف . وقد وجدنا أن كفاءة الاقتران مع المنبع تعتمد على نمط الاشعاع للمنبع وعلى فتحة النفوذ العددية للمنبع . يكثر الفقد كلما زادت زاوية إشعاع المنبع ، إذ نجد الضوء المنبعث من الباعثات السطحية يقع جزء كبير منه خارج زاوية قبول الليف مما يضطرنا إلى استخدام منابع ذات زوايا إشعاع أقل أو استعمال العدسات للحصول على حزم ضيقة كما في الشكل (٧-٣٦) تناسب الليف المستخدم ، أما اقتران الضوء من الليف الى الكاشف فإنه لايسبب مشكلة نظراً لكبر حجم الكاشف مقارنة بلب الليف .

(أ) الليف البصري المنحنى في نهايته

(ب) عدسة صغيرة تلامس المنبع والليف البصري



(جـ) طريقة العدسة الاسطوانية لربط ليزر بليف بصري



(د) تشكيل كروي لسطح المنبع البصري والليف البصري

الشكل (٧-٣٦) استخدام العدسات لاقتران المنبع بالليف

الفصل السابع

أسئلة

١ - ماهي مبادئ توصيل الألياف البصرية ، إشرحها بالتفصيل.

٢ - توجد ثلاثة أسباب لعدم تراصف الألياف ، إشرحها.

٣ - لماذا تصقل وتلمع النهايات عند عمل الموصلات ؟

٤ - لماذا نستخدم سائل موائمة في الموصلات والوصلات الدائمة ؟

٥ - ماهي العناصر التي تسبب الفقد عند توصيل ألياف مختلفة ؟

٦ - ماهي أهم أسباب الفقد عند عدم تراصف الألياف ؟

٧ - لماذا يكون الفقد في الليف أحادي النمط أكثر حساسية لعدم تطابق الموصل أو الوصلة الدائمة عما هو عليه في الليف متعدد النمط ؟

٨ - كيف يتأثر تباعد الأطراف وعدم التراصف الزاوي بفتحة النفوذ العددية .

١٠ - لماذا يحصل الفقد في الوصلات الدائمة ؟

١١ - أذكر أنواع الموصلات ومتى نستخدم كل نوع؟

١٢ - أذكر أنواع المقارن ومتى نستخدم كل نوع ؟

١٣ - ماهو المرشح البصري وما فكرته الأساسية ؟

١٤ - ماهي أسباب الفقد في إقتران المنبع الضوئي مع الليف البصري؟

١٥ - كيف يمكن الإقلال من فقد الاقتران ؟

مسائل

١ - استنتج المعادلة رقم (7.1) بواسطة حساب التراكب للب الليفين وذلك باستخدام التكامل .

٢ - بإستخدام المعادلة رقم (7.1) إرسم بيانياً الفقد مقابل الانزياح الجانبي مستخدماً ست نقاط في الأقل.

٣ - إرسم بيانياً الفقد بالديسيبل مقابل عدم التراصف الزاوي لليف عتبي متعدد النمط فتحة نفوذه العددية NA= 0.2 · يملأ الفراغ الفاصل بينهما هواء وتتراوح زاوية عدم التراصف الزاوي بين 0^{o} و 15^{o} ·

٤ - أرسم بيانياً الفقد بالديسيبل مقابل عدم التراصف الزاوي لليف أحادي النمط فيه $V = 2.4$, $n_2 = 1.475$, $n_1 = 1.48$ يتراوح عدم التراصف الزاوي بين 0^{o} و 15^{o} · افرض أن الطول الموجي $\lambda = 0.82\ \mu m$ كرر المسألة لطول موجي $\lambda = 1.55\ \mu m$ ·

٥ - استنتج المعادلة رقم (7.6) ·

٦ - أرسم بيانياً الفقد بالديسيبل مقابل تباعد أطراف ليف قطره $50\ \mu m$ وفتحة نفوذه العددية NA = 0.2 ومعامل انكسار اللب $n_1 = 1.48$ ومعامل انكسار الكساء $n_2 = 1.475$ ·

٧ - إحسب كفاءة الاقتران بين منبع بصري زاوية إشعاعه عند منتصف القدرة تساوي 35^{o} وبين ليف متعدد النمط فتحة نفوذه العددية تساوي 0.2 ·

٨ - أوجد الفقد الناتج عن انزياح جانبي مقداره $10\mu m$ لليف عتبي قطره $50\mu m$ ومعامل انكساره $n_1 = 1.48$ وفتحة نفوذه العددية 0.25 (افرض أن الفراغ بين الليفين هو الهواء) ·

٩ - أوجد الفقد في ليف أحادي النمط قطره $10\mu m$ وقطر الحزمة الجاوسية الساقطة عليه $6\mu m$ إذا كان مقدار الانزياح الجانبي $2\mu m$ على فرض أن الليفين ملتصقين مع بعضهما ·

١٠- ماهو مقدار فقد الانعكاس عند الأطراف في الليف المذكور بالمسألة رقم ٩ ·

١١- إذا كان لدينا ليف قطره $50\mu m$ ومعامل انكساره $n_1 = 1.47$ وفتحة نفوذه العددية 0.24 أوجد الآتي :

أ - مقدار الفقد إذا كان هناك عدم تراصف زاوي مقداره 5^{o} · ولايوجد سائل موائمة بين الليفين ·

ب - مقدار الفقد إذا استخدمنا سائل موائمة معامل انكساره 1.47 ·

جـ - أوجد الفرق بين الفقد في الجزء أ والجزء ب وأيهما أفضل ؟

١٢ - أوجد زاوية الانزياح القصوى لليف المذكور في المسألة رقم ٤ إذا كان فقد عدم التراصف الزاوي لايزيد عن 0.4dB ·

١٣ - أوجد حجم البقعة الجاوسية اللازمة للحصول على فقد مقداره 1dB في ليف أحادي النمط قطره 10μm و $n_1 = 1.48$ و $n_2 = 1.47$ يعمل عند $\lambda = 1.3\ \mu m$ وعدم التراصف الزاوي يبلغ 2° ·

١٤ - أوجد الفقد نتيجة تباعد الألياف في المسألة رقم ٤ إذا كانت المسافة الفاصلة بين الليفين 15μm ·

أ - عدم وجود سائل موائمة ·

ب - وجود سائل موائمة معامل انكساره 1.47 ·

١٥ - إذا كان لدينا ليف قطره 100 μm ومعامل انكساره $n_1 = 1.48$ وفتحة نفوذه العددية 0.2 أردنا توصيله بليف آخر من نفس النوع أوجد الآتي إذا كان الانزياح الجانبي 12 μm وعدم التراصف الزاوي 5° وتباعد الأطراف 10μm ·

أ - الفقد الكلي بدون سائل موائمة ·

ب - الفقد الكلي بوجود سائل موائمة معامل انكساره 1.48.

جـ - أوجد الفقد نتيجة الانعكاس ·

١٦ - لو أردنا توصيل ليفين قطر الليف المرسل 62 μm ومعامل انكساره $n_1 = 1.46$ وفتحة نفوذه العددية $NA = 0.2$ وقطر الليف المستقبل 50μm ومعامل انكساره $n_1 = 1.46$ وفتحة نفوذه العددية 0.24 · أوجد الفقد نتيجة الآتي :

أ - عدم تساوي أقطار الألياف ·

ب- عدم تطابق فتحات النفوذ العددية ·

١٧ - أوجد الفقد نتيجة إقتران الضوء بين منبع قدرته $P_S = 100\ \mu w$ ولليف قدرة دخله $P_f = 50\ \mu w$ ·

الفصل الثامن

المنابع الضوئية

الفصـــل الثامن
المنابع الضوئية
Light Sources

نقدم في هذا الفصل طبيعة وأنواع المنابع الضوئية المستخدمة في نظم الألياف البصرية وكذلك دراسة خصائصها . تشمل هذه الدراسة مواصفات عدة أنواع من الثنائيات الباعثة للضوء Light Emitting Diodes (LED's) وثنائيات الليزر Laser Diodes (LD) ومعرفة ملائمتها للتطبيقات المختلفة وسنقدم بإيجاز بعض الدوائر الالكترونية المستخدمة مع هذه المنابع وعناصر تصميمها .

٨-١ خصائص عامة General Characteristics

تتصف المنابع الضوئية بخاصية تحويل الإشارات الكهربائية إلى إشارات ضوئية تمكن من استخدامها في أنظمة الاتصالات البصرية ولكي تستخدم هذه المنابع لابد أن تحقق الصفات التالية :

١ - يجب أن تكون شدة الضوء أو القدرة البصرية كبيرة لدرجة تمكن من استخدامها في الاتصالات بعيدة المدى .

٢ - أن تسمح بنيتها باقتران فعّال للضوء في الليف البصري.

٣ - أن يكون الطول الموجي المنبعث من المنبع ملائماً للبصريات الليفية Fiber Optics والأطوال الموجية الشائعة الاستخدام في نظم الاتصالات البصرية هي 1.55μm , 1.3μm, 0.82μm .

٤ - عرض الخط أو عرض الطيف يجب أن يكون ضيقاً لكي يستخدم في إرسال معدل معطيات عال.

٥ - عرض النطاق يجب أن يكون عالياً أو زمن الاستجابة يجب أن يكون قصيراً لإرسال معدل معطيات عال. وأن تكون الدوائر الالكترونية بسيطة .

٦ - أن تكون القدرة المنبعثة من المنبع مستقرة ولاتتأثر بتغير درجة الحرارة أو الظروف المحيطة ويجب أن يكون المنبع الضوئي ذو اعتمادية عالية .

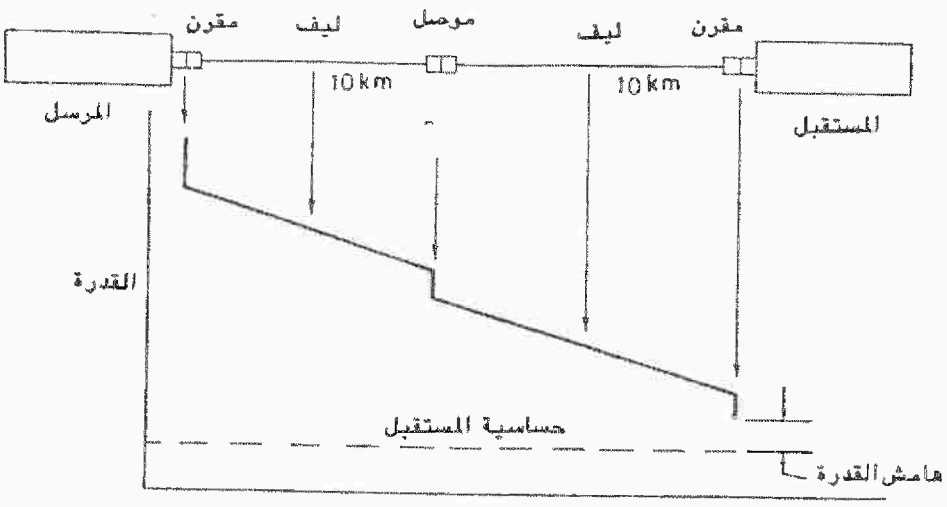
٧ - أن تكون تكلفته مناسبة للنظام البصري.

بعد ذكر الصفات الرئيسية للمنابع الضوئية سنقوم الآن بشرح كل صفة من هذه الصفات.

٨-١-١ القدرة والكفاءة Power and Efficiency

من الطرق المتبعة في تخطيط نظم الاتصالات البصرية هي استخدام حسابات القدرة ويطلق عليها ميزانية القدرة power budget وتمثل هذه الميزانية الفرق بين القدرة المرسلة والقدرة المستلمة والتي تعتمد على عناصر كثيرة ضمن النظام ، نبدأ هذه الطريقة بمعرفة الحد الأدنى من القدرة الواجب استلامها عند جهازالاستقبال P_R received power ولنقل أنها 100nw والتي تعادل 40dBm -. نفرض أن الفقد في قناة الاتصال المبين في الشكل (٨-١) هو 30dB منها 24dB تمثل الفقد في الليف البالغ طوله 20km و 6dB أخرى نتيجة الموصلات والمقارن عندئذ نكون قد وصلنا إلى بداية الليف البصري عند المنبع الضوئي وهذا يعني أن تكون القدرة المقرونة بالليف لاتقل عن 0.1mw أي -10dBm =- 40dBm + 30dBm .

تبلغ القدرة المنبعثة من الثنائيات الباعثة للضوء حوالي 1mw بينما تبلغ القدرة المنبعثة من ثنائيات الليزر بضع ملي وات . والسؤال الآن هل بامكاننا الحصول على 0.1mw من خلال استخدام مثلاً ثنائي باعث للضوء بقدرة 1mw . الإجابة على هذا السؤال تعتمد على كفاءة الاقتران بين المنبع والليف η_C .



الشكل (٨ -١) مخطط وصلة ميزانية القدرة

وللحصول على 1mw من القدرة البصرية قد نحتاج إلى قدرة كهربائية تزيد عن مائة ضعف (100- 500mw) إذاً هناك عنصران آخران يدخلان ضمن الحسابات آنفة الذكر وهما الكفاءة الكمية quantum efficiency وتمثل عدد الفوتونات المولدة مقابل كل إلكترون يحقن في مادة المنبع ويرمز لها بالرمز η_Q وتسمى أيضاً بالكفاءة الداخلية والكفاءة الخارجية أو كفاءة القدرة η_p تعرف كالتالي :

$$\eta_P = \frac{P_S}{P_e} \quad \text{.....} \quad (8.1)$$

حيث أن P_S هي القدرة البصرية المنبعثة و P_e هي القدرة الكهربائية الداخلة إلى المنبع الضوئي . مايهمنا الآن هو مقدار الضوء الممكن اقترانه بالليف ممثلاً بكفاءة الاقتران η_C :

$$\eta_C = \frac{P_f}{P_s} \text{.....} (8.2)$$

حيث أن P_f هي القدرة المقرونة بالليف و P_s القدرة البصرية المنبعثة من المنبع ، أما الكفاءة

η_T للمنبسطة device فستعطي العلاقة بين القدرة البصرية المقرونة بالليف P_f والقدرة الكهربائية الداخلة P_e أي أن :

$$\eta_T = \eta_P \times \eta_C = \left(\frac{P_s}{P_e} \times \frac{P_f}{P_s}\right)$$

$$= \frac{P_f}{P_e} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.3)$$

وتعتمد كفاءة الاقتران على بنية المنبع وتوزيع شدة الإضاءة المنبعثة منه بالإضافة إلى فتحة النفوذ العددية لليف .

٨-١-٢ كفاءة الاقتران Coupling Efficiency

تختلف الثنائيات الباعثة للضوء LED وثنائيات الليزر LD عن بعضها من حيث كفاءة القدرة والكفاءة الكمية لكن كفاءة الاقتران في كلا النوعين لها صفات موحدة . تعتمد كفاءة الاقتران على (١) المساحة الفعالة وتوزيع الضوء المنبعث من المنبع (٢) فتحة النفوذ العددية ومقطع الليف البصري ، ولتبسيط الأمر نفرض الآتي :-

١ - المساحة الفعالة للمنبع أي التي تبعث الضوء أقل من مساحة مقطع الليف .

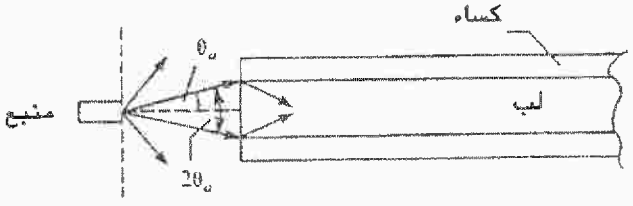
٢ - أن يغطي الضوء المنبعث لب الليف كما في الشكل ٨-٢ أ .

٣ - إن توزيع شدة الضوء لامبرتي Lambertian كما في الشكل (٨-٢ ب) .

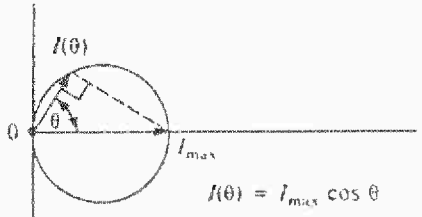
تعتمد كفاءة الاقتران على نمط الاشعاع المنبعث من المنبع الضوئي وتشع الباعثات الثنائية الضوء ضمن توزيع لامبرتي كما في الشكل (٨-٢ب) حيث تتناقص القدرة كتابع لجيب تمام الزاوية θ ($\cos\theta$) حيث أن θ هي الزاوية بين اتجاه الرؤية والعمود على السطح . يكون سطح الباعث مضيئاً بشكل منتظم ويتناقص كدالة لجيب تمام الزاوية θ ($\cos\theta$) وتنقص قيمة القدرة إلى 50% من قيمة ذورتها عند الزاوية $\pm 60^\circ$ حيث يبلغ عرض النطاق عند منتصف القدرة 120° لباعث لامبرتي كالباعث السطحي ، وتبلغ كفاءة الاقتران η_C لهذه الحالة .

$$\eta_C = \sin^2 \theta = (NA)^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.4)$$

إن الشعاع الوارد لليف من خارج زاوية قبوله لن يقرن وحيث أن زاوية القبول محددة بفتحة النفوذ العددية والتي عادة ماتكون قليلة فإن كمية كبيرة من الضوء سوف ترفض ، فعلى سبيل المثال لو أن فتحة النفوذ العددية (NA=0.24) فإن زاوية المخروط الكلية هي 28° ومعنى هذا أن الشعاع خارج هذه الزاوية لن يتمكن من الاقتران بالليف .



(أ)



يقاس حجم I بالمسافة النصف قطرية من صفر

(ب)

الشكل (٨- ٢) اقتران المنبع الضوئي بالليف البصري (أ) الاقتران بالليف

(ب) توزيع الشدة لمنبع لامبرتي

مثال ٨-١:

أوجد القدرة المقرونة بين ثنائي سطحي باعث للضوء وليف بصري إذا كانت قيمة فتحة النفوذ العددية NA = 0.24 و NA = 0.4 على فرض أن قدرة خرج الثنائي هي 1.2mw ومساحة الانبعاث أقل من لب الليف ؟

الحل :

باستخدام المعادلة (8.4) نجد أن كفاءة الاقتران η_C عندما تكون NA= 0.24

$$\eta_C = (0.24) = 0.0576 \text{ (or 5.76 \%)}$$

$$\eta_C = \frac{P_f}{P_S} = .0576$$

$$P_f = .0576 \times 1.2 = 69\ \mu w$$

عندما تكون NA = 0.4 فإن :

$$\eta_C = (.4)^2 = 0.16 \text{ (or 16 \%)}$$

$$P_f = .016 \times 1.2 = 192\ \mu w$$

من هذا المثال نرى أن كفاءة الاقتران تزداد بازدياد فتحة النفوذ العددية ولابد أن تتذكر أن زيادة فتحة النفوذ العددية تؤدي إلى تشتيت أكبر ومعدل معطيات أقل.

٨-١-٣ الطول الموجي وعرض الخط Wavelength and Linewidth

ذكرنا في الفصل الرابع وجود ثلاث نوافذ تشغيلية للأطوال الموجية الأولى تقع بين 800-900nm والثانية عند 1300nm والثالثة عند 1550nm لذا فإن المنابع الضوئية المستخدمة يجب أن تعمل ضمن هذه الأطوال الموجية . يتأثر تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة بعرض خط المنبع الضوئي المستخدم وكلما قل عرض الخط كلما زادت سعة النطاق مما يعطي معدل معطيات أعلى . والأبحاث جارية الآن لإرسال معطيات بمعدل يتراوح بين 100 Gbps و 1000 Gbps .

٨-١-٤ عرض النطاق وزمن الاستجابة Bandwidth and Response Time

تحمّل موجة المعلومات المراد إرسالها على موجة أخرى تدعى بالموجة الحاملة carrier لنحصل على موجة تتضمن معلومات قابلة للإرسال عبر الألياف البصرية تدعى بالموجة المشكّلة modulated wave أو موجة التشكيل modulation wave وفي

نظام الاتصالات البصري نستخدم تشكيل الشدة intensity modulation لتحميل الموجات الكهربائية على الموجات الضوئية ويتم ذلك بتغير شدة الإضاءة أو القدرة المنبعثة من المنبع. ترسل المعطيات الرقمية عن طريق فتح وغلق المنبع الضوئي "ON" و"OFF" والتي تقابل "1" و "0" على التوالي والمنبع النافع هو الذي نتمكن من فتحه وغلقه بسهولة وبسرعة .

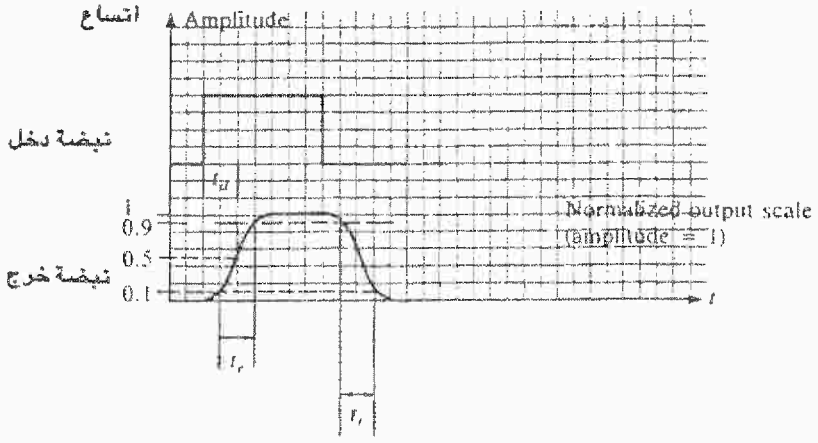
وللتعبير عن سرعة فتح وغلق المنبع تستخدم زمن الصعود t_r والنزول t_f للنبضة ونرى في الشكل (٨-٣) نبضة دخل مثالية والنبضة الناتجة من تشغيل وغلق المنبع حيث تمثل t_r الوقت اللازم لكي ترتفع قدرة المنبع من 10% إلى 90% من القدرة الكلية الخارجه وتمثل t_f الزمن اللازم لتنخفض القدرة من 90% إلى 10% من القدرة الكلية الخارجة .

من أجل معدل معطيات عالي يجب أن تكون قيم t_r و t_f للمنبع منخفضة وعادة مايذكر المصنع قيمها لأي منبع يقوم بتصنيعه - العلاقة بين عرض النطاق البصري f_{3dB} وزمن صعود النبضة يعبر عنها بالتالي :

$$f_{3dB} = \frac{0.35}{t_r} \quad \text{..... (8.5)}$$

يجب أن تكون الدوائر الالكترونية المستخدمة لتشكيل الموجه الحاملة وهي موجة المنبع بسيطة . ينطبق هذا الشرط على الدوائر المستخدمة في الثنائيات الباعثة للضوء LED لكن الدوائر المستخدمة مع ثنائيات الليزر أكثر تعقيداً ويجب أن لاننسى في نفس الوقت فوائد استخدام ثنائيات الليزر .

عند استخدام تشكيل شدة الإضاءة التماثلية فإن شدة الضوء تمثل اتساع amplitude الاشارة المرسلة . وللحصول على إشارة مرسلة مطابقة يجب أن تكون العلاقة خطية بين الطاقة الضوئية واتساع الإشارة الداخلة للمنبع ماأمكن .



الشكل (٨-٣)زمن الصعود t_r وزمن الهبوط t_f وزمن التأخير t_d

٨-١-٥ الاستقرار والاعتمادية Stability and Reliability

يجب أن تعتمد الطاقة الضوئية الصادرة من المنبع الضوئي على الإشارة الكهربائية الداخلة له فقط وأن لاتتأثر بتغير درجة الحرارة أو الظروف المحيطة . استخدمت طرق متعددة لتبريد الجيل الأول من ثنائيات الليزر مما حد من استخدامها في البداية وقلل من استقرارها أو الاعتماد عليها . ولاتزال ثنائيات الليزر حساسة لدرجة الحرارة ولكن بصورة أقل مما كانت عليه . يبلغ العمر الافتراضي للمنابع المستخدمة في أنظمة الاتصالات البصرية حوالي ١١ سنة .

٨-١-٦ التكلفة Cost

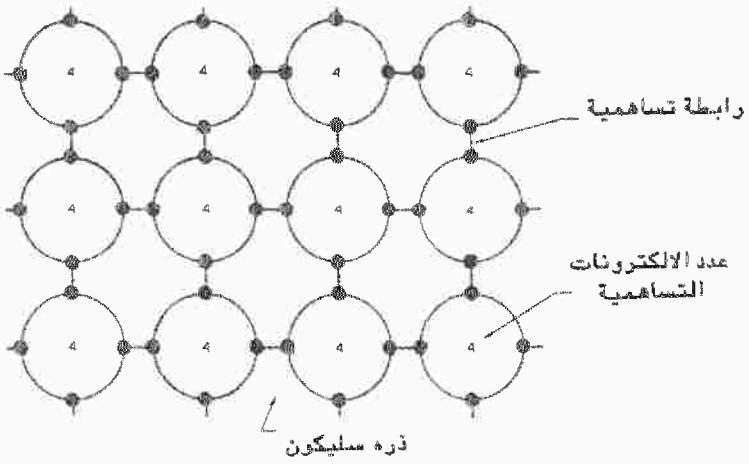
تعتبر الثنائيات الباعثة للضوء أبسط تركيباً وأقل تكلفة من ثنائيات الليزر وقد استخدمت بكثرة في الجيل الأول من أنظمة الاتصالات البصرية ولاتزال تستخدم على نطاق واسع في الأنظمة التي لاتحتاج إلى قدرة عالية وترسل بمعدل معطيات منخفض أو

متوسط. تستخدم ثنائيات الليزر في الأنظمة التي تحتاج إلى قدرة عالية ومعدل معطيات مرتفع والدوائر المستخدمة لتشغيلها أكثر تعقيداً من تلك المستخدمة مع الثنائيات الباعثة للضوء وتكلفتها أعلى. يبلغ متوسط سعر الثنائي الباعث للضوء بضع دولارات ومتوسط سعر ثنائي الليزر بضع مئات من الدولارات .

٨-٢ وصلة PN PN Junction

تستخدم إشباه الموصلات semiconductors بشكل واسع في تصنيع منابع وكواشف ضوئية تستخدم في أجهزة الإرسال والاستقبال للأنظمة الليفية البصرية. إن أشباه الموصلات كالسليكون والجرمانيوم هي مواد تقع من حيث التوصيل الكهربائي بين المواد العازلة كالزجاج والخشب والمواد الموصلة كالنحاس والألمنيوم. نظراً لأهمية أشباه الموصلات لابد من إعطاء فكرة موجزة عنها وتقديم طريقة تكوين وصلة PN التي تكون البنية الأساسية في النبائط الكهروضوئية المستخدمة في البصريات الليفية كالليزر والثنائيات الضوئية والكواشف بالإضافة إلى الثنائيات والترانزستورات.

تحتوي ذرة السليكون على سبيل المثال على أربعة الكترونات في المدار الخارجي outer shell ويسمى بنطاق التكافؤ valence band . تكون هذه الالكترونات روابط bonds تمسك الذرات مع بعضها لتعطي البنية البلورية crystalline structure لهذا العنصر. تسمى هذه الروابط بالروابط التساهمية أو المتكافئة covalent bonds حيث تشترك الذرات المتجاورة في الالكترونات الموجودة في المدار الخارجي . عندئذ يصبح عدد الالكترونات في المدار الخارجي لكل ذرة ثماني الكترونات ، أربعة من الذرة وأربعة من الذرات المجاورة وتكون كل الالكترونات ضمن الروابط التساهمية ولايوجد أي منها طليق كما هو في الشكل (٨-٤).



شكل رقم(٨- ٤) الروابط التساهمية لذرات السليكون

لو أضفنا إلى مادة السليكون النقية intrinsic silicon مادة أخرى لها خمسة الكترونات متكافئة أي خمسة الكترونات في المدار الخارجي فإن أربعة منها ستشترك في تكوين رابطة تساهمية ويبقى الالكترون الخامس طليقاً يتحرك في البنية البلورية عندئذ يقال أنه إلكترون طليق ولكن ضمن مايسمى بنطاق التوصيل conduction band . تصبح مادة السليكون الآن ذات شحنة سالبة نظراً لوجود الالكترونات الزائدة ويطلق على هذه المادة نوع N حيث ترمز N إلى سالب Negative . لو أضفنا مادة لها ثلاثة إلكترونات في المدار الخارجي إلى مادة السليكون النقي فإن هذه الالكترونات ستشارك في تكوين الرابطة التساهمية ويبقى أحد مواقع الرابطة التساهمية فارغاً بدون الكترون ويطلق على هذا الفراغ بالفجوة أو الثقب. وتعامل الفجوة كحاملة شحنة شبيهة بالالكترون غير أنها موجبة وتبدو المادة وكأنها تحتوي على فجوات زائدة موجبة. لذا يطلق عليها اسم مادة نوع P حيث ترمز P إلى موجب Positive . لتصنيع الثنائي نحتاج إلى إحضار مادة شبه موصلة نقية

تطعم doped بمواد شائبة impurities من مواد العمود الثالث من الجدول الدوري مثل الألمنيوم أو الجاليوم لتكوين طبقة P ومواد شائبة من العمود الخامس من الجدول الدوري مثل الزرنيخ لتكوين طبقة N . عند توصيل هاتين الطبقتين مع بعضهما تبدأ الالكترونات الزائدة بالتحرك من طبقة N نحو طبقة P وتتحرك الفجوات من طبقة P نحو طبقة N لتعبر الحد الفاصل وتبدأ الالكترونات والفجوات بالاتحاد recombination عبر مايسمى بوصلة PN (PN Junction) . ومعنى الاتحاد هنا هو أن الالكترونات الطليقة تقع في الفجوات فتتحول من نطاق التوصيل إلى نطاق التكافؤ وتصبح جزءاً من الروابط التساهمية للذرات . ويختفي الالكترون والفجوة كحاملات شحنة وينتج عن هذا الالتحام إشعاع طاقة قد تكون ضوءاً أو حرارة . إن أكثر الذرات مشاركة في هذه العملية هي تلك الواقعة على مقربة من الحد الفاصل بين طبقتي P و N . حيث أن الذرات على جانب N لديها الكترون زائد وتسمى الذرات الواهبة أو المعطية donor atoms لاستعدادها لإعطاء الالكترون الزائد ، أما على جانب P فلديها نقص إلكترون واحد أي وجود فجوة وهي مستعدة لقبول إلكترون واحد فتسمى بالذرات القابلة acceptor atoms . عندما يتم الاتحاد تتأين الذرات الواهبة لتكون أيوناً موجباً وتتأين الذرات القابلة لتكون أيوناً سالباً فيتكون من جراء ذلك حقل كهربائي electric field يكون حاجزاً مانعاً لمرور مزيداً من الالكترونات والفجوات مالم تستخدم طاقة خارجية ، وتسمى المنطقة الخالية من هذه الشحنات بالمنطقة الفقيرة depletion region أو وصلةPN أو منطقة الشحنة الفراغية space - charge region.

إن الثنائي الباعث للضوء LED هو شبه موصلPN كما هو في الشكل (٨-٥أ) ينبعث الضوء منه عندما ينطبق عليه جهد أمامي forward bias أي أن القطب السالب من البطارية يربط في طبقة N والقطب الموجب للبطارية يربط في طبقة P . ينتج عن ذلك أن الالكترونات تحقن في طبقة N أو بمعنى آخر أن الالكترونات ذات الشحنة السالبة تتنافر مع القطب السالب للبطارية فتتجه نحو المنطقة الفقيرة عند الوصلة بين P و N . أما الفجوات فتحقن في منطقة P وتتجه نحو المنطقة الفقيرة عند الوصلة بين P و N أو

الالكترونات ذات الشحنة السالبة في P تنجذب نحو القطب الموجب للبطارية . تتحد الالكترونات القادمة من طبقة N مع الفجوات القادمة من طبقة P في المنطقة الفقيرة فينتج عن هذا الاتحاد انبعاث طاقة على شكل ضوء أو حرارة تحكمها في ذلك معادلة بلانك حيث أن :

$$Eg = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.6)$$

أو

$$\lambda = \frac{hc}{Eg} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.7)$$

تقدر طاقة الثغرة energy gap بالجول وطول الموجه λ بالمتر و h هي ثابت بلانك ويساوي $6.626\ 10^{-34}\ J \times S$. أما إذا قدرنا طاقة الثغرة بالالكترون فولت وطول الموجة بالميكرون فإن المعادلة (8.7) تصبح على الشكل التالي :

$$\lambda = \frac{1.24}{Eg} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.8)$$

تمتلك المواد المختلفة والسبائك طاقات نطاق ثغرة مختلفة ويبين الجدول (٨-١) المواد الباعثة الشائعة واطوال موجات التشغيل والطاقات التقريبية لنطاق الثغرة . نرى من هذا الجدول إمكانية اختيار الطول الموجي لأشباه الموصلات المصنعة من Al Ga As و In Ga As و In Ga As P وذلك بتغيير نسب الذرات المكونة . إذ يؤدي هذا إلى تغيير طاقة نطاق الثغرة وكذلك طول موجة الانبعاث حسب المعادلة (8.7).

جدول (٨-١) شبه موصلات باعثة للضوء

المـــادة	مدى الطول الموجي µm	طاقة نطاق الثغرة Eg ev
Ga As	0.9	1.4
Al Ga As	0.8-0.9	1.4-1.55
In Ga As	1.0 - 1.3	0.95- 1.24
In Ga As P	0.9 - 1.7	0.73-1.35

٨-٣ الثنائيات الباعثة للضوء Light Emitting - Diodes

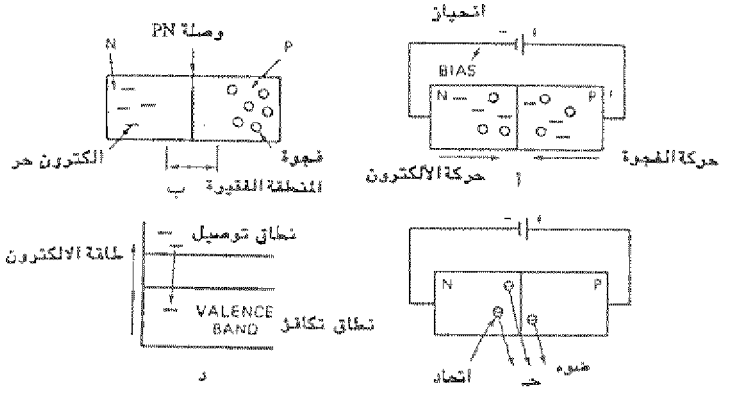
تستخدم الثنائيات الباعثة للضوء في كثير من الأجهزة الالكترونية كالحاسبات والساعات الرقمية وأجهزة الفيديو وغيرها غير أن تلك المستخدمة في أنظمة الاتصالات البصرية أكثر تعقيداً من الثنائي الذي تم شرحه في البند السابق ، ولو أن مبدأ تشغيلهما واحد . وسبب هذا التعقيد هو الرغبة في بناء منبع له خواص توائم متطلبات نظم البصريات الليفية . تشمل هذه المتطلبات الحصول على طول موجي معين وعلى شكل اشعاع محدد . تسمى وصلة PN التي تم شرحها في البند (٨-٢) بالوصلة المتجانسة homojunction لأنها تصنع من مادة شبه موصلة واحدة مثل السليكون أو الجرمانيوم. تشع الثنائيات الباعثة الضوء ، والمصنعة من هذه المواد ، الضوء من سطحها ومن جوانب وصله PN مما يؤدي إلى انبعاث الضوء في كافة الاتجاهات مما يؤدي إلى إشعاع منخفض لايمكن استخدامه بصورة فعالة مع الألياف البصرية.

لحل هذه المشكلة تستخدم ثنائيات ذات وصلات غير متجانسة heterojunction وهي وصلات PN مكونة من مواد لها نفس البنية البللورية لكن مستويات طاقاتها ومعاملات انكسارها مختلفة . تقوم الثنائيات المصنعة من مواد غير متماثلة بحصر الحاملات carriers (الالكترونات والفجوات) في المنطقة الفعالة من الرقاقة chip المصنع عليها الثنائي - إن اختلاف معامل الانكسار يؤدي على سبيل المثال إلى حصر الضوء وتوجيهه بنفس الطريقة التي يحصر فيها الضوء في الليف البصري وهذا يعني إن الشعاع الناتج سيكون عالياً .

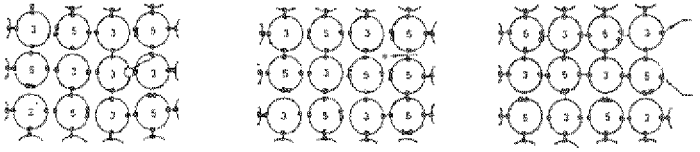
لتصنيع الثنائيات ذات الوصلة غير المتجانسة heterojunnction LED نستخدم سبائك من مواد من عناصر العمودين الثالث والخامس من الجدول الدوري تمتلك عناصر العمود الثالث ثلاثة الكترونات في المدار الخارجي وتمتلك عناصر العمود الخامس خمسة الكترونات في المدار الخارجي . عند خلط combine عدد متساوٍ من ذرات لها ثلاثة الكترونات في المدار الخارجي مع عدد متساوٍ من ذرات لها خمسة الكترونات في المدار الخارجي سنحصل على بنية مشابهة لبلورة السليكون النقي كما هو مبين في الشكل

(٨-٦ أ) . تكوّن الذرات روابط متكافئة وتختفي الشحنات الطليقة . للحصول على مادة من نوع N نخلط عدد أكبر من ذرات المجموعة الخامسة مع ذرات المجموعة الثالثة .

تمتلك البنية الناتجة عن ذلك الكترونات زائدة طليقة . وبالمثل يمكن تكوين بنية من نوع P وذلك بخلط عدد أكبر من ذرات المجموعة الثالثة مع ذرات من المجموعة الخامسة فنحصل على فجوات زائدة طليقة . من أكثر المواد شيوعاً في هذا المجال هي ذرات الجاليوم من المجموعة الثالثة وذرات الزرنيخ من المجموعة الخامسة . يبين الشكل (٨-٦أ) بنية شبه موصل يحتوي على عددٍ متساوٍ من ذرات الجاليوم والزرنيخ.في الشكل (٨-٦ب) بنية جاليوم زرنيخ Ga As نوع N (عدد ذرات الزرنيخ أكبر من عدد ذرات الجاليوم) وفي الشكل(٨-٦ جـ) بنية زرنيخ الجاليوم Ga As نوع P (عدد ذرات الجاليوم أكبر من عدد ذرات الزرنيخ) .



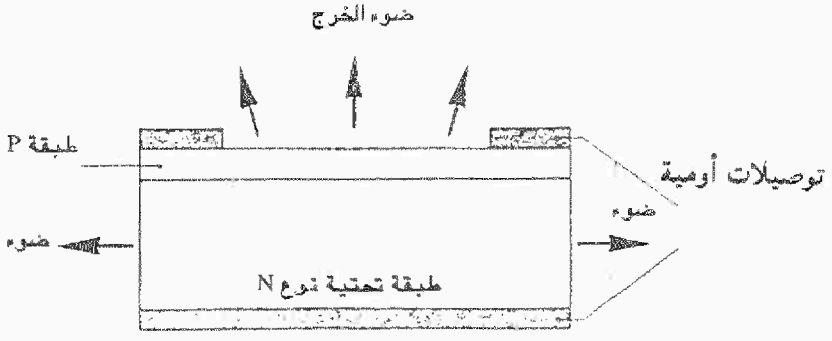
الشكل (٨-٥) النظرية المبسطة لتشغيل الثنائي الباعث للضوء



الشكل (٨-٦) الالكترونات والفجوات في سبيكة زرنيخ الجاليوم GaAs

٨-٣-١ ثنائي مستوي Planar LED

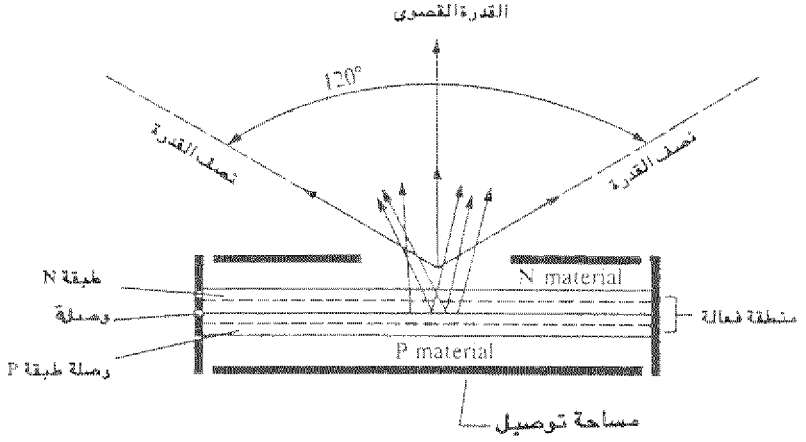
يمثل هذا النوع أبسط أنواع الثنائيات الباعثة للضوء ويصنع بطريقة التبخير أو السائل الطبقي epitaxial على طبقة تحتية من سبيكة Ga As ويتم بهذه الطريقة تفلغل طبقة P في طبقة تحتية من نوع N لنحصل على الوصلة الموضحة بالشكل (٨-٧) . يؤدي استخدام الجهد الأمامي أوالانحياز الأمامي forward bias إلى مرور التيار خلال الوصلة فينتج إشعاع تلقائيspontaneous لامبرتي . ينبعث هذا الإشعاع من كافة الأسطح . غير أن كمية قليلة من الضوء تهرب من البنية نظراً للانعكاسات داخل بنية الثنائي مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة الثنائي.



الشكل (٨- ٧) بنية ثنائي باعث للضوء مستوى حيث نرى انبعاث الضوء من كافة الاتجاهات

لتحسين انجاز الثنائي المستوى البسيط اضيفت طبقات أخرى من نوع P وN للبنية. يوضح الشكل (٨-٨) ثنائي باعث للضوء بعدة طبقات تسمى البنية غير المتجانسة heterostructure . تختلف طبقات NوP عن بعضها بنوع وتركيز الشوائب المضافة . وفي هذه البنية يرتفع تركيز الالكترونات والفجوات في المنطقة الفعالة active region

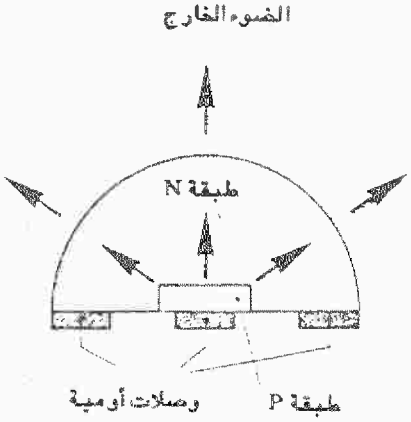
ويؤدي ذلك إلى حصر الضوء المنبعث ضمن هذه المنطقة فيشع إلى أعلى. تقوم طبقة P السفلى بعكس الإشعاع بينما طبقات N شفافة . تبلغ زاوية الحزمة عند نقاط منتصف القدرة حوالى 120° يستخدم هذا الثنائي في أجهزة التحكم بالتلفزيون والفيديو وأجهزة الإنذار وفي أحيان قليلة أنظمة الاتصالات البصرية.



الشكل (٨ - ٨) باعث سطحي بعدة طبقات

٨-٣-٢ ثنائي القبة Dome LED

يبين الشكل (٨-٩) بنية ثنائي القبة الباعث للضوء . يتكون هذا الثنائي من نصف كرة من سبيكة زرنيخ الجاليوم Ga As نوع N محيط بمنطقة من نوعP. يُختار قطر القبة ليعطي أقصى مقدار من الانبعاث الداخلي ضمن الزاوية الحرجة بين سطح سبيكة Ga As والهواء المحيط بها. يمتلك هذا الثنائي كفاءة قدرة خارجية تزيد عما هي عليه في الثنائي المستوى . يستخدم هذا الثنائي في الأجهزة المنزلية كالتلفزيون والفيديو والانذار وأجهزة السيطرة.

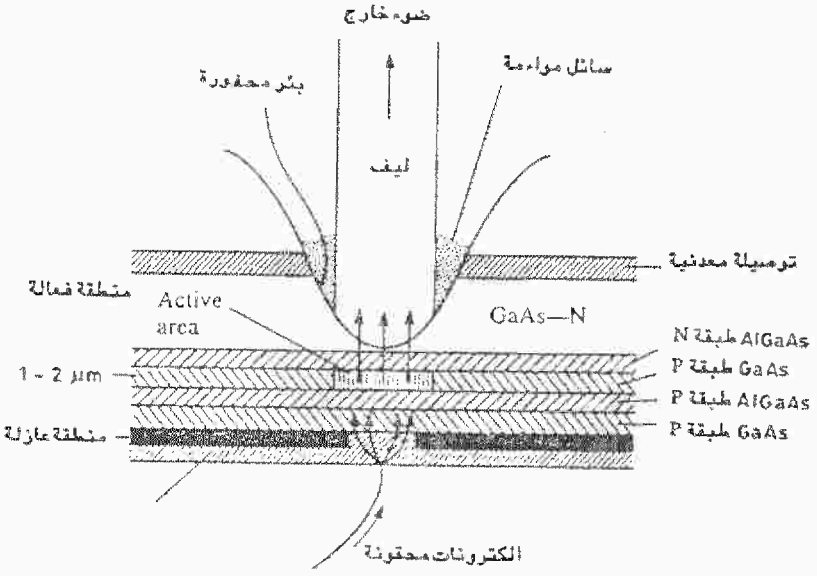


الشكل (٨ - ٩) ثنائي القبة

٨-٣-٣ ثنائي باعث سطحي (نوع Burrus) Surface Emitter LED

تم تطوير هذا الثنائي من قبل مختبرات بل (Bell Labs) في الولايات المتحدة الأمريكية ويسمى أحياناً ثنائي بوروس Burrus نسبة إلى الشخص الذي طوره ويعتبر هذا الثنائي من أكثر الثنائيات الباعثة للضوء كفاءة .

نرى في الشكل (٨-١٠) أن المساحة الفعالة جعلت صغيرة عن طريق السماح بالاتصال الكهربائي من خلال جزء من سطح P السفلي. تعمل طبقة ثاني أوكسيد السليكون SiO_2 على عزل الطبقة المعدنية من طبقة P . تخدم طبقتي P السفليتين (Al Ga As و Ga As) غرضين أولهما عكس الضوء وثانيهما حصر اتحاد الالكترونات والفجوات في المساحة القريبة من وصلة PN . تقوم الحفرة الدائرية المحفورة في طبقة N العليا بتركيز الضوء المنبعث من المساحة الفعالة على الليف البصري .



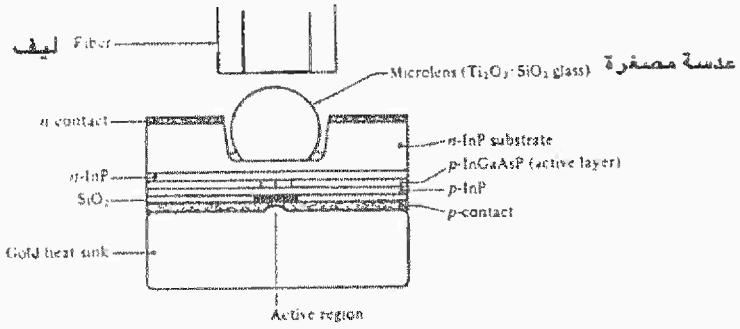
الشكل (٨-١٠) ثنائي باعث سطحي نوع بوروس Burrus

رأينا في الثنائيات التي قدمناها أن الضوء الصادر منها ينبعث في زوايا كبيرة مما يقلل من كفاءة اقترانه بالليف البصري. استخدمت طرق عديدة لتبئير focusing الضوء المنبعث من هذه الثنائيات ، إضافة إلى الحفرة الدائرية التي تم ذكرها، وهي :

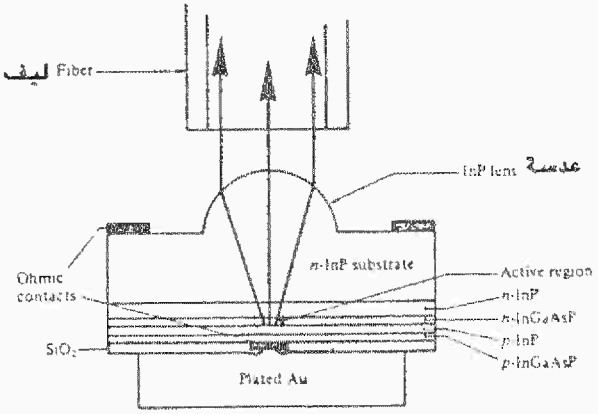
١ - استخدام عدة صغيرة جداً كما في الشكل (٨-١١).

٢ - استخدام عدسة نصف كروية كما في الشكل (٨-١٢).

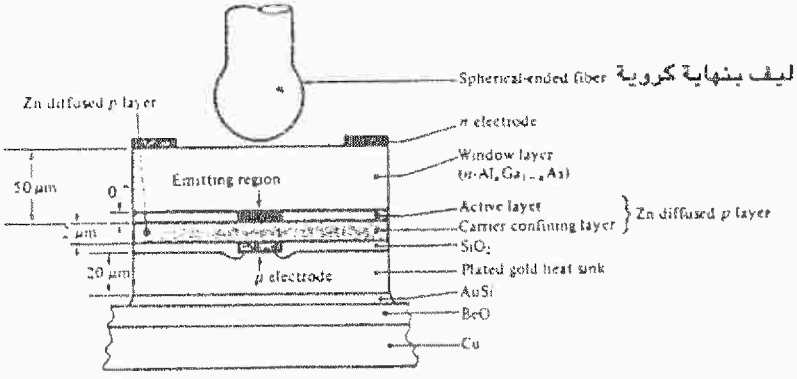
٣ - تشكيل طرف الليف البصري القريب من الثنائي على هيئة عدسة كما هو في الشكل (٨-١٣).



الشكل (٨-١١) استخدام العدسة المصغرة لقرن الضوء بالليف البصري

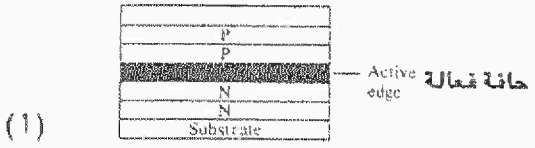


شكل (٨-١٢) استخدام عدسة متكاملة على شكل قبة لقرن الضوء لليف البصري

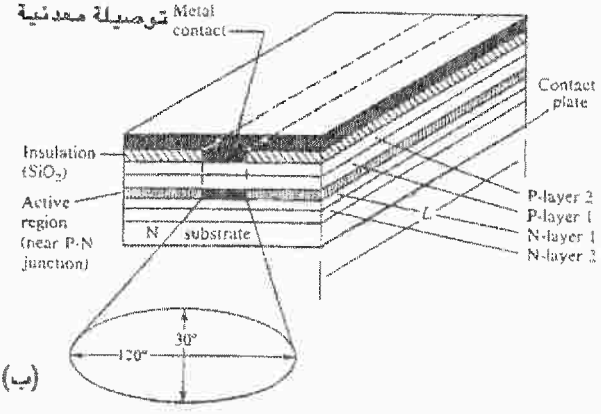


الشكل (٨-١٣) استخدام ليف بنهاية كروية لقرن الضوء المنبعث من الثنائي

عند شراء الثنائي تقوم الشركة بإرفاق ليف بطول ٣٠ سم مثبت أحد طرفيه في الثنائي مستخدمين أحد الطرق المذكورة أعلاه لقرن الضوء والطرف الآخر يقوم المستخدم بتوصيله مع ليف النظام البصري .



(أ)



(ب)

الشكل (٨-١٤) ثنائي باعث حافيٌ (أ) منظر جانبي (ب) رسم تفصيلي

٨-٣-٤ ثنائي باعث حافيٌ Edge Emitter LED

يمثل هذا النوع ثاني أكثر أنواع الثنائيات الباعثة للضوء شيوعاً ويشبه في تركيبه، إلى حد كبير ثنائيات الليزر ، ويخرج الضوء المنبعث من هذا الثنائي من حافة واحدة كما هو في الشكل (٨-١٤) أما الحافة الأخرى فتحتوي على عاكس يعكس الإشعاع القادم له من الداخل. تخدم الطبقات المتعددة غرضين . طبقة P1 وطبقة N1 . تركزان الالكترونات والفجوات المحقونه من قبل جهد التغذية في المنطقة الفعالة. تتولى الطبقات P2 و N2 حصر الضوء المولد قرب المنطقة الفعالة. بهذه الطريقة يتم الحصول على تركيز عال للالكترونات والفجوات ، يؤدي هذا بدوره إلى زيادة في الضوء المنبعث. كذلك فإن الضوء

المنبعث من الحافة ينبعث على طول الثنائي بطول L وليس محصوراً على المنطقة الفعالة قرب الحافة . تتولى الطبقتان P2 و N2 توجيه الضوء نحو الحافة. تسمح الطبقة العازلة المكونة من ثاني أوكسيد السليكون SiO_2 بالاتصال مع طبقات الثنائي على طول شريط stripe ضيق. يؤدي ذلك إلى تركيز التيار المحقون في منطقة صغيرة ويحسن من كفاءة الضوء المولّد .

ويتميز الضوء المنبعث من هذا الثنائي أن زاوية انطلاقه ضيقة مما يزيد من كفاءة الضوء الداخل إلى الليف البصري وعادة ماتكون زاوية الانطلاق في حدود 30° في الاتجاه العمودي على وصلة PN ويبلغ 120° في الاتجاه الموازي نظراً لعدم وجود مايحصر الضوء في هذا الاتجاه. وتستخدم ثنائيات الحافة عندما تكون فتحة النفوذ العددية NA أقل من 0.3 بينما تستخدم الثنائيات السطحية عندما تكون فتحة النفوذ العددية أكبر من 0.3تتراوح قدرة ثنائي الحافة على إيصال الضوء إلى الليف البصري بين ٥ . ٤ و٦ أضعاف قدرة الثنائيات السطحية عندما تكون فتحة النفوذ العددية صغيرة ،وفي كلا الثنائيين يمكن زيادة كفاءة إيصال الضوء إلى الليف البصري باستخدام العدسات.

٨-٤ خصائص الثنائي الباعث للضوء Characteristics of LED

يتطلب تشغيل الثنائي الباعث للضوء معرفة العناصر الخمس التالية :-

(١) الكفاءة (٢) تناسب الجهد مع التيار والقدرة مع التيار (V-I,P-I curves) (٣) عرض الخط linewidth (٤) زاوية الإشعاع (٥) زمن الاستجابة وعرض النطاق .

١ - الكفاءة Efficiency

تربط الكفاءة بين القدرة الكهربائية الداخلة إلى الثنائي والقدرة الضوئية الخارجة منه ويجب أن نكون حذرين هنا في تعريف المقصود من القدرة الخارجة. سبق لنا وأن أشرنا إلى أن الكفاءة الكمية η_Q تربط بين التيار الداخل والضوء المولد داخلياً وليس الضوء المنبعث من الثنائي (بند ٨-١-١) . عملياً تتغير η_Q بين 50% و 80% وهذا يعني أن ليس كل

الالكترونات المحقونة تستطيع توليد الضوء بل أن 50% تقريباً تستطيع توليد الضوء .

ولتبسيط الأمر تعرف η_Q كما يلي :

$$\eta_Q = P_{int} / P_e \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.9)$$

حيث أن P_{int} هي القدرة الضوئية المولدة داخلياً و P_e هي القدرة الكهربائية المبددة dissipated وتختلف η_Q عن η_p المعطاة في المعادلة (8.1) .

لابد لنا من إدراك أن الضوء المنبعث من الثنائي أقل من الضوء المولد داخليا P_{int} لعوامل عديدة وهي :

(١) يجب أن يمر الضوء المولد خلال عدة طبقات من شبه الموصل قبل أن يصل خارج الثنائي .

(٢) يؤدي الاختلاف بين معامل انكسار الثنائي (3.5-3.7) ومعامل انكسار الهواء (1.0) إلى انعكاس جزء من الضوء داخل الثنائي مما يؤدي إلى فقد لايستهان به . لذا نجد أن قيمة الكفاءة الخارجية η_p صغيرة جداً (0.5% - 2%) . يضاف إلى ماسبق أن ليس كل الضوء المنبعث يمكن اقترانه بل جزء منه فقط كما ذكر في المعادلة (8.2) .

مثال ٨-٢ :

أوجد القدرة المنبعثة P_S لثنائي باعث للضوء فيه

$$\eta_p = 1\%$$

$$I_D = 50 \text{ m A} \qquad \text{(تيار الثنائي)}$$

$$V_F = 1.6 \text{ V} \quad \text{(هبوط جهد الثنائي)}$$

الحل :

القدرة الكهربائية للثنائي P_e = الجهد × التيار

$$I_D \times V_F = P_e$$

$$80\text{mw} = 50 \times 10^{-3} \times 1.6 = P_e$$

من المعادلة (8.1) : $\eta_p = \dfrac{P_S}{P_e}$

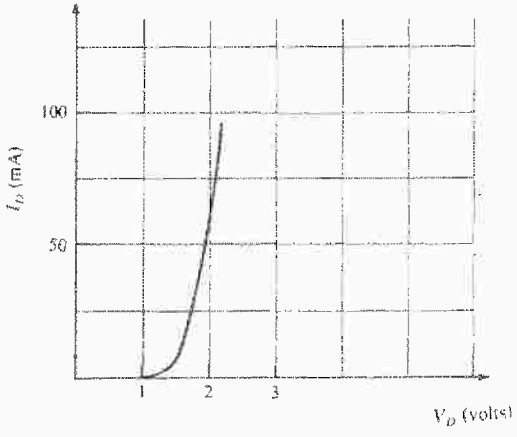
$$P_S = \eta_p P_e = \frac{1}{100} \times 80 \text{ mw}$$

$$= 800 \, \mu m$$

لاحظنا هنا أن 800 μw تشع في كافة الاتجاهات وجزء منها فقط يمكن اقترانه بالليف.

٢ -علاقات الجهد مع التيار والقدرة مع التيار: V-I and P-I Relationships

إن العلاقة بين الجهد والتيار في الثنائي الباعث للضوء تشبه العلاقة في الثنائي العادي. نرى في الشكل (٨-١٥) منحنى للعلاقة بين الجهد الأمامي والتيار للثنائي الباعث للضوء . يتراوح هبوط الجهد الأمامي بين 1.3V و 2V والتيار الأمامي المستمر بين 50mA و 100mA . أما في التشغيل النبضي فالحد الأقصى للتيار النبضي حوالي 3A . سبق وأن أشرنا عند مناقشة كفاءة الثنائي الباعث للضوء بأن القدرة الخارجة تتناسب طردياً والتيار الداخل . ونرى في الشكل (٨-١٦) منحنيين يمثل المنحنى رقم 1 العلاقة بين التيار والقدرة الناتجة لثنائي باعث للضوء بقدرة عالية والمنحنى رقم 2 العلاقة بين التيار والقدرة لثنائي باعث للضوء بقدرة منخفضة.



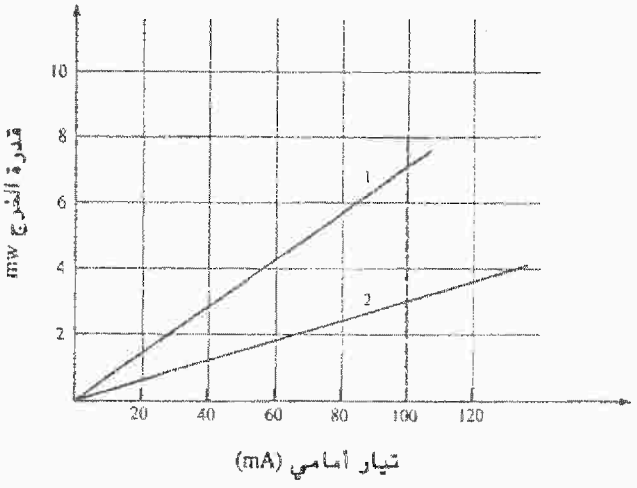
الشكل (٨ - ١٥) منحنى العلاقة بين الجهد الأمامي والتيار الأمامي لثنائي باعث للضوء

إذا كان التيار i هو الشحنة المحقونة بالثانية . عندئذ يكون عدد الشحنات بالثانية $N = \frac{i}{q}$ ، حيث أن q هي شحنة الالكترون فإذا كان η_Q هو الجزء من هذه الشحنات الذي سيتعد وينتج فوتونات سيكون خرج القدرة البصرية :

$$P = \eta_Q N E_g = \frac{\eta_Q i E_g}{q} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8.10)$$

تعبر المعادلة (8.10) عن العلاقة الخطية بين القدرة الضوئية والتيار . في هذه العلاقة تم تقدير طاقة الثغرة E_g energy gap بالجول. إذا قدرت E_g بالالكترون فولت فإن المعادلة (8.10) تصبح :

$$P = \eta_Q \; i \, E_g \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8.11)$$

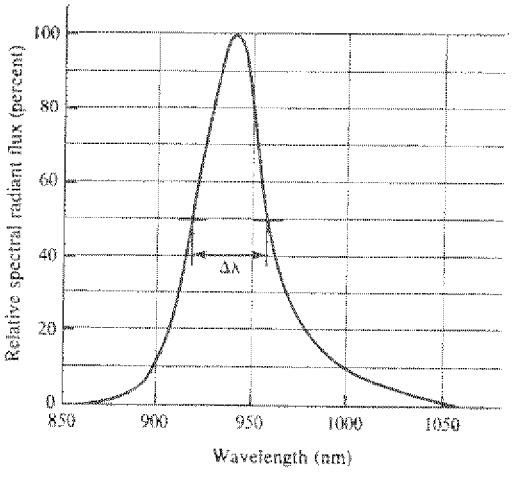


الشكل (٨-١٦)سريان الإشعاع مقابل التيار الأمامي
المستمر لثنائي باعث للضوء نموذجي

٣ - عرض الخط Linewidth

يتصف الضوء المنبعث من الثنائيات الباعثة للضوء بكبر عرض الخط مقارنة بالضوء المنبعث من ثنائي الليزر . تختلف تسمية عرض الخط تبعاً للشركة المصنعة، تستخدم عدة تسميات لوصف مدى الطول الموجي للأنبعاث مثل عرض الطيف، استجابة الطيف spectral response، جريان إشعاع الطيف spectral radiant flux وطيف الانبعاث emission spectrum . نرى في الشكل (٨-١٧) منحنى استجابة الطيف لثنائي باعث للضوء نموذجي . يعرف عرض الخط على أنه مدى الأطوال الموجية الواقعة بين نقطتي انخفاض القدرة إلى نصف قيمة القدرة القصوى .

يبلغ عرض الخط للثنائي في الشكل (٨-١٧) حوالي 40nm (بين 920nm و 960nm) وكما أشرنا سابقاً عندما تكون $\Delta\lambda$ كبيرة فإن التشتيت يزداد ويؤدي ذلك بدوره إلى تخفيض عرض نطاق التشكيل وتخفيض معدل المعطيات .

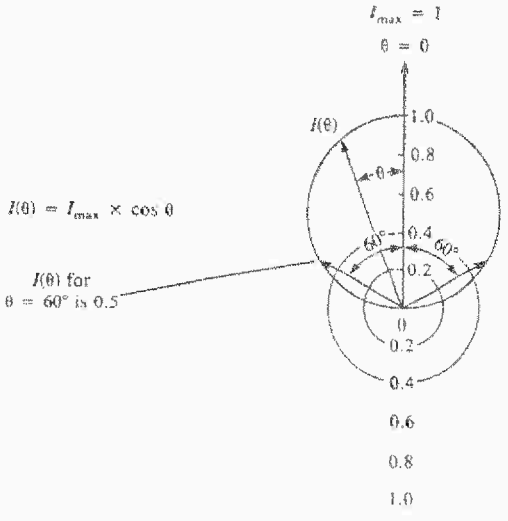


طول الموجة (nm)

الشكل (٨- ١٧) منحنى استجابة الطيب لثنائي باعث للضوء نموذجي

٤ - زاوية الإشعاع Angle of Radiation

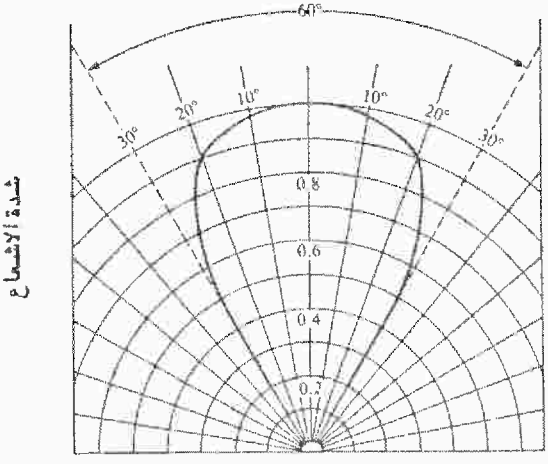
تتناسب شدة الشعاع المنبعث من الثنائي الباعث للضوء تناسباً طردياً مع جيب تمام زاوية الإشعاع. يسمى توزيع الشعاع هذا بالتوزيع اللامبرتي ويسمى المنبع الباعث لهذا الشعاع بأنه منبع لامبرتي. يوضح الشكل (٨-١٨) هذا التوزيع. عند الخط المتعامد على سطح المنبع تكون قيمة الزاوية $\theta = 0$ عندها تبلغ شدة الإشعاع أعلى قيمة لها. كلما زادت قيمة θ كلما قلت شدة الإضاءة. عند $\theta = \pm 60^\circ$ تهبط شدة الإضاءة إلى نصف قيمتها عند $\theta = 0^\circ$. تكون الزاوية الكلية بين نقطتي منتصف القدرة 120° (-60 to $+60^\circ$).



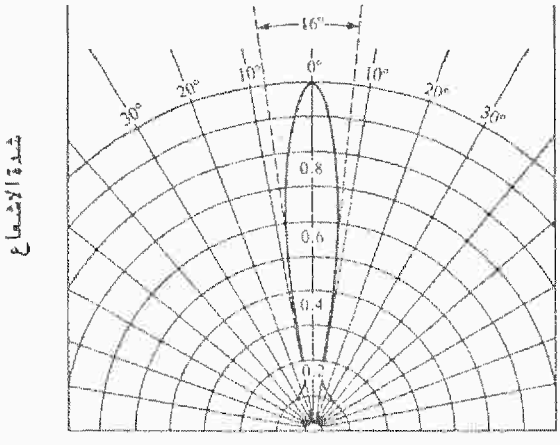
الشكل (٨-١٨) توزيع لمنبع لامبرتي

نستطيع الإقلال من زاوية الاشعاع دون 120° باستخدام العدسات أو تصنيع ثنائيات بتصاميم خاصة والتي تم شرحها في البنود ٨-٣-٢ و ٨-٣-٣ و ٨-٣-٤. نرى في الشكل (٨-١٩) رسماً لتوزيع شدة الإضاءة لقيم زوايا إشعاع مختلفة لنوعين من الثنائيات

الباعثة للضوء. نرى في الشكل (٨-١٩أ) أن عرض حزمة الإشعاع عند نقاط منتصف القدرة تقع بين $+30^\circ$ و-30° . وفي الشكل (٨-١٩ب) يبلغ عرض حزمة الضوء 16° ($+8^\circ$ ، -8°).



أ - زاوية الاشعاع



ب - زاوية الاشعاع

الشكل (٨-١٩) رسم بياني نموذجي لزاوية الاشعاع مقابل الشدة النسبية

(أ) زاوية إشعاع واسعة تتراوح بين $+30^\circ$ ، -30°

(ب) زاوية اشعاع ضيقة نتيجة استخدام العدسات وتتراوح بين $+8^\circ$ ، -8°

٥ - زمن الاستجابة وسعة النطاق Response Time and Bandwidth

يحدد زمن الاستجابة سرعة نقل المعلومات ومعدل المعطيات. إن المقصود بزمن الاستجابة هنا هو سرعة فتح وغلق الثنائي الباعث للضوء. يشير هذا التعريف إلى الاشعاع الضوئي وليس للتيار الثنائي . ذكرنا في البند ٨-١-٤ العلاقة بين زمن الصعود وعرض النطاق. استخدمت الثنائيات الباعثة للضوء لإرسال عرض نطاق مقداره 30MHz .

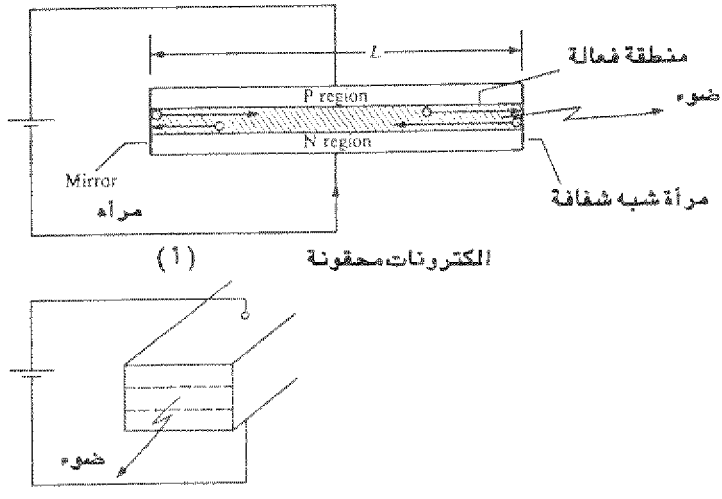
٨-٥ ثنائيات الليزر Laser Diodes

تتكون كلمة ليزر من الأحرف الأولى للكلمات الانجليزية Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation وتعني تضخيم الضوء بالانبعاث المثار للإشعاع.

رغم تشابهه بنى الثنائيات الباعثة للضوء وثنائيات الليزر فإنهما يختلفان في طريقة انبعاث الضوء. يعتمد اشعاع الضوء في الليزر على الانبعاث المثار stimulated emission حيث تقوم الفوتونات المولدة نتيجة الانحياز الأمامي بالاصطدام بالالكترونات فتسبب انتقال الالكترونات من مستوى طاقة أدنى إلى مستوى طاقة أعلى. تبعاً لذلك تقوم هذه الالكترونات بتوليد فوتانات جديدة تصطدم مع إلكترونات أكثر فتسبب انتقالها إلى مستويات طاقة أعلى وهلم جرا. للوصول إلى الانبعاث المثار نحتاج في بداية الأمر إلى (١) مصدر تحفيز مثل منبع ضوء خارجي أو انبعاث تلقائي كما هي الحال في الثنائي الباعث للضوء. (٢) حصر الفوتونات المولدة في مساحة صغيرة لزيادة فرص تصادم الالكترونات الضوئية . في ثنائي الليزر ، تتولد الفوتونات الابتدائية بسبب الالكترونات المحقونة بواسطة التيار الكهربائي. تحصر الفوتونات المولدة في المساحة الفعالة عن طريق مرايا موضوعة في نهايتي الثنائي . يبدأ الانبعاث المثار عندما يكون عدد الالكترونات في مستويات الطاقة العليا أكبر من عددها في مستويات الطاقة الدنيا أي الحالة الأرضية ground state وتسمى هذه الحالة بالانقلاب السكاني population inversion .

٨-٥-١ ثنائي ليزر بوصلة متجانسة Homojunction Laser Diode

نرى في الشكل (٨-٢٠)رسماً مبسطاً لبنية ثنائي ليزري شبه موصل. تتجه الفوتونات المولدة نتيجة تيار الحقن إلى المرايا الموجودة على حافتي الثنائي وتنعكس إلى داخل المساحة الفعالة . تستمر الالكترونات والفوتونات ذهاباً وإياباً حتى نحصل على الانبعاث المثار. لابد أن نشير هنا إلى أن أحد المرايا أو كلاهما يسمح بمرور جزء من الضوء إلى خارج الثنائي . إذ نتمكن من استخدام الضوء الخارج من أحد المرايا ونقيس الضوء الخارج من المرآة الأخرى بصفة دائمة كما أن كافة ثنائيات الليزر تبعث الضوء من الحافة.



الشكل (٨- ٢٠) بنية ليزر شبه موصل أساسية

(أ) منظر جانبي (ب) مسقط

من أجل الحصول على موجة مستقرة ساكنة يجب أن يكون طول الثنائي l مساوٍ إلى عدد صحيح من نصف طول الموجة أي :

$$l = \frac{m\lambda}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.12)$$

حيث λ هو طول الموجة كما هو في مادة الثنائي و m عدد صحيح موجب. من هذه المعادلة نستطيع أن نصنع ثنائي ليزر يبعث الضوء بالطول الموجي المرغوب وبالإمكان كتابة (8.12) على النحو التالي :

$$\lambda = \frac{2l}{m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.13)$$

للحصول على الترددات الطيفية المولدة في الثنائي نستخدم المعادلة (8.13) والعلاقة $V = \frac{c}{n}$ نجد أن :

$$f = \frac{mc}{2nl} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.14)$$

حيث أن n هو معامل الانكسار داخل المساحة الفعالة . تكون مجموعة الترددات الطيفية هذه الانماط الطولية longindinal modes كما في الشكل (٨-٢١).

المسافة بين نمطين متجاورين هي :

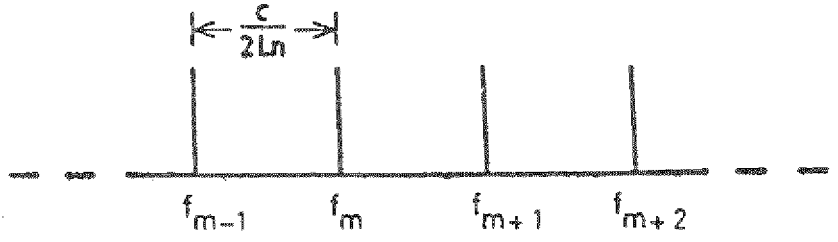
$$\Delta f_C = \frac{c}{2ln} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.15)$$

ولمعرفة عدد الأنماط المولدة داخل ثنائي الليزر لابد أن نعرف عرض الخط $\Delta\lambda$ والمسافة بين أطوال موجات الطنين resonance عن بعضها $\Delta\lambda_C$ حيث أن :

$$\frac{\Delta f_C}{f} = \frac{\Delta\lambda_C}{\lambda_o} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.16)$$

حيث أن λ_o هو متوسط الطول الموجي في الفراغ الحر و $f = \frac{c}{\lambda_o}$ هي متوسط التردد من المعادلة (8.16) نجد أن :

$$\Delta\lambda_C = \frac{\lambda_o \Delta f_C}{f} = \frac{\lambda_o^2 \Delta f_C}{c} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.17)$$



الشكل (٨-٢١) ترددات الطنين في ليزر ثنائي - الأنماط الطولية

مثال ٨-٣ :

أوجد عدد الأنماط الطولية المولدة وتباعد الترددات والأطوال الموجية لثنائي باعث للضوء مصنع من سبيكة زرنيخ جاليوم ألمونيوم Al Ga As طوله $l = 0.4mm$. ومتوسط طوله الموجي $0.84\mu m$ ومعامل انكساره 3.65 وعرض خطه 2nm .

الحل :

باستخدام المعادلة (8.15) نحصل على تباعد الأنماط في مجال الترددات

$$\Delta f_C = \frac{c}{2ln} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times (0.4 \times 10^{-3}) \times 3.65} = 103 \times 10^9 \text{ Hz}$$

لإيجاد المسافة بين نمط وآخر في مجال الأطوال الموجية $\Delta\lambda_C$ نستخدم المعادلة (8.17) .

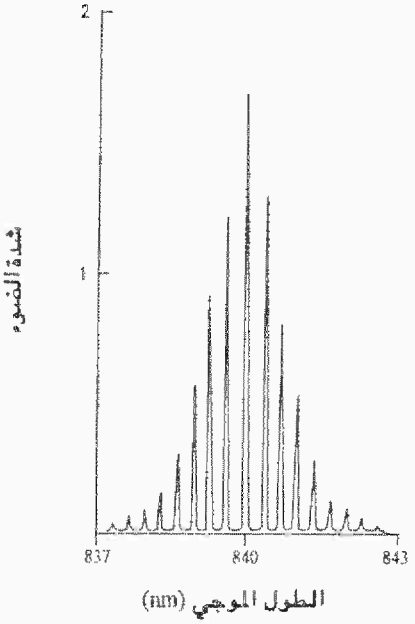
$$\Delta\lambda_C = \frac{\lambda_o^2 \Delta f_C}{c} = \frac{(0.84 \times 10^{-6})^2 \times (103) \times 10^9}{3 \times 10^8}$$

$$= 24.22 \times 10^{-11} = 0.2422 \text{ nm}$$

عدد الأنماط المولدة هو :

$$\frac{\Delta \lambda}{\Delta \lambda_C} = \frac{2\,nm}{0.2422} = 8$$

يوضح الشكل (٨-٢٢) هذه الأنماط. بالإمكان أن يكون عرض كل نمط صفراً لو كانت المرايا تعكس بشكل تام ولكن الواقع العملي غير ذلك فرسمت الانماط موسعة قليلاً. حيث أن تشوه النبضة نتيجة تشتيت المادة يعتمد على الانبساط بين أقصر وأطول موجة منبعثة من المصدر وتوزيع القدرة بين الانماط الطولية غير مهم . بالإمكان الحصول على ثنائيات ليزرية بنمط واحد باستخدام تصاميم أكثر تعقيداً وأكثر تكلفة من الثنائيات الليزرية متعددة النمط .

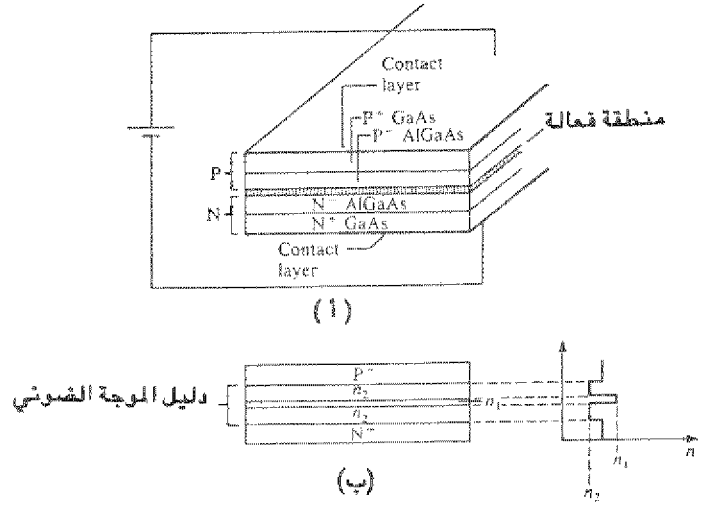


الشكل (٨-٢٢) طيف الانبعاث لليزر ثنائي متعدد النمط

٨-٥-٢ ثنائي ليزر ببنية غير متجانسة Heterostructure Laser Diode

يوضح الشكل (٨-٢٣) البنية الأساسية لليزر مكون من عدة طبقات من سبيكة زرنيخ الجاليوم مطعمة بشوائب بنسب مختلفة للحصول على طبقات N و P وبتركيز مختلف لكل طبقة . الغرض من ذلك هو حصر المساحة الفعالة والحصول على قيم محددة لمعامل الانكسار ورفع كفاءة الإشعاع .

ترمز إشارة + في P^+ أو N^+ إلى إرتفاع تركيز الشوائب في المادة وترمز إشارة - في P^- أو N^- إلى قلة في تركيز الشوائب في المادة .



الشكل (٨-٢٣) ثنائي ليزر ببنية غير متجانسة

(أ) رسم تخطيطي لمكونات ثنائي الليزر

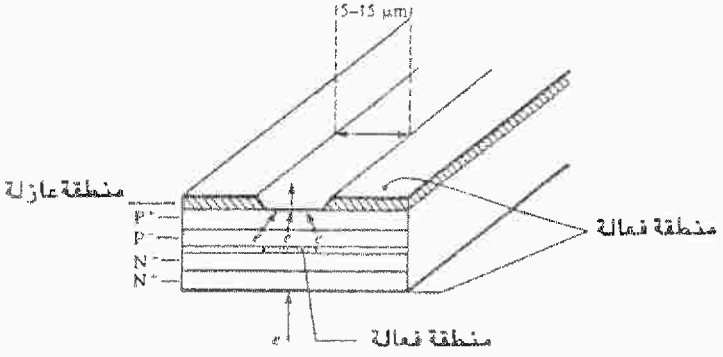
(ب) منظر جانبي لمعاملات الانكسار

يتطلب حجم الليف البصري الصغير أن يكون المنبع صغيراً أيضاً . لذا توضع طبقة من زرنيخ الجاليوم عند الوصلة وبسماكة تتراوح بين 0.2 µm و0.5 µm حيث تمثل هذه المساحة الفعالة . تؤدي إضافة هذه الطبقة من زرنيخ الجاليوم إلى زيادة اتحاد الالكترونات

مع الفجوات ، يؤدي ذلك بدوره إلى رفع كفاءة الاشعاع. طبقات P^- و N^- لها معاملات انكسار n_2 أقل من معامل انكسار طبقة زرنيخ الجاليوم n_1 . تشكل هذه الطبقات دليل موجي يقوم بحصر الضوء في المنطقة الفعالة . في الشكل (٨-٢٣ب) نرى المنظر الجانبي لمعاملات الانكسار آنفة الذكر.

ينبعث الضوء من مقدمة ومؤخرة الثنائي حيث توجد مرايا عاكسة (نسبة الانعكاس حوالي 99%) . يستخدم الضوء الخارج من الأمام في نظم الاتصالات والضوء الخارج من الخلف لقياس كمية الضوء الخارج بصفة مستمرة.

ينبعث الضوء من العرض الإجمالي للثنائي الموضح في الشكل (٨-٢٣) . تحدد هذه العناصر القدرة الخارجة وعدد الأنماط والأطوال الموجية المرغوبة . من هذه الأنواع ثنائي الليزر الشريطي stripe الموضح في الشكل (٨-٢٤) . ينحصر الضوء المولد في طبقة يتراوح عرضها بين 15 μm , 5 μm لتناسب مقطع الليف .



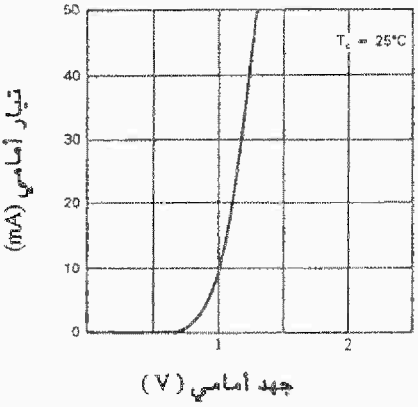
الشكل (٨-٢٤) بنية غير متجانسة لثنائي ليزر شريطي

٨-٦ خصائص ثنائيات الليزر Characteristics of Laser Diodes

نشرح في هذا البند خصائص ثنائي الليزر وهي (١)علاقة الجهد بالتيار (٢)تيار العتبة والقدرة الخارجة (٣) الطول الموجي (٤) زاوية الاشعاع (٥) زمن الصعود وزمن الهبوط (٦) الاعتمادية .

١ - علاقة الجهد بالتيار Voltage - Current Relationship

لايختلف الثنائي الليزري عن الثنائي العادي عند استخدام الجهد الأمامي . يتزايد التيار الأمامي بسرعة مع الجهد كما في الشكل (٨-٢٥) .

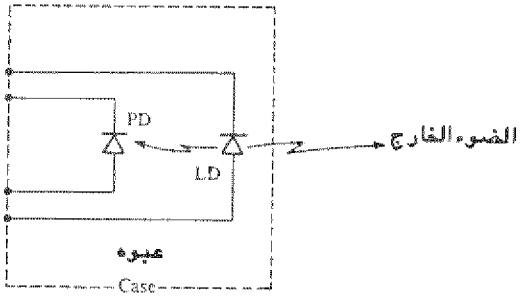


الشكل(٨-٢٥) العلاقة بين الجهد الأمامي والتيار الأمامي لثنائي عادي

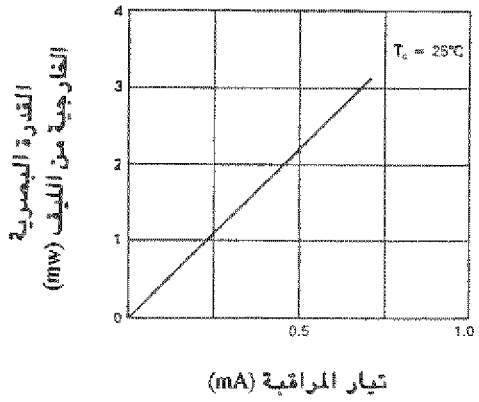
٢ - تيار العتبة والقدرة الخارجة Threshold Current and Output Power

يعتبر تيار العتبة من المعلمات الهامة في تشغيل ثنائي الليزر إذ يمثل تيار العتبة أقل تيار أمامي نحتاجه لكي يبدأ الثنائي عمله .

عندما بدأ تشغيل الجيل الأول من الثنائيات الليزرية كان تيار العتبة I_{th} حوالي 500 mA وفي التصاميم الحديثة تم تقليص المساحة الفعالة وتتراوح قيمة I_{th} في ثنائيات الليزر المستخدمة حالياً بين 30mA و100mA ، أدى ذلك إلى إستخدام دوائر الكترونية مبسطة والاقلال من القدرة المبددة . يؤدي تغير درجة الحرارة إلى تغير مقدار القدرة الخارجة. لذا تبرد الثنائيات الليزرية كي نحصل على قيمة ثابتة لقدرة الخرج P_{out} . للحصول على قيمة ثابتة لـ P_{out} لابد من مراقبة قيمتها باستخدام ثنائي ضوئي يستقبل الضوء الخارج من النهاية الخلفية - كما في الشكل (٨-٢٦) وتغذى ثنائي الليزر دائرة راجعة مربوطة بالثنائي الضوئي للتحكم في التيار المستخدم لثنائي الليزر. ترتبط القدرة الخارجة من الليف بتيار المراقبة I_{mon} بعلاقة خطية كما هو في الشكل (٨-٢٧).



الشكل (٨-٢٦) رسم تخطيطي لعبوة تحتوي على ثنائ ليزر وثنائي ضوئي



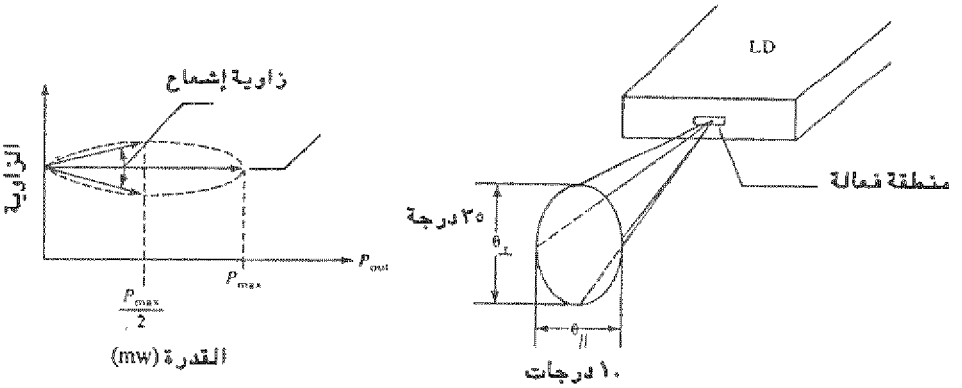
الشكل (٨-٢٧) العلاقة بين القدرة الخارجة من الليف وتيار المراقبة

٣ - الطول الموجي وعرض الخط Wavelength and Linewidth

تتميز الثنائيات الليزرية بعرض خط ضيق يتراوح بين 1nm و 5nm مما يجعلها مناسبة لإرسال معدل عال من المعطيات . تستخدم معظم هذه الثنائيات في الأطوال الموجية الطويلة التي تقع حوالي 1300nm . يتأثر طيف انبعاث الأنماط الطولية بدرجة الحرارة شأنه في ذلك شأن القدرة P_{out} . معنى هذا أن الطول الموجي الأقصى ينزاح بتغير درجة الحرارة . قد نرغب الحصول على اقصى انبعاث عند 1300nm بدرجة حرارة الغرفة ولنقل $25\,^{\circ}C$. لو ارتفعت الحرارة مثلاً إلى $40\,^{\circ}C$ ربما يكون أقصى انبعاث عند 1310nm . يعتمد هذا الانزياح أيضاً على قيمة قدرة الخرج .

٤ - زاوية الإشعاع Angle of Radiation

إن زاوية الاشعاع في ثنائي الليزر أقل مما هي عليه في حالة الثنائي الباعث للضوء. يمكن تقسيم زوايا الاشعاع إلى زاويتين وهما الزاوية العمودية $\theta\perp$ والزاوية الأفقية $\theta 11$. نرى في الشكل (٨-٢٨) نموذج اشعاع لثنائي ليزر حيث نرى أن الزاوية العمودية $\theta\perp$ قيمتها $35^{\circ}C$ والأفقية $\theta 11$ تساوي 10°. يؤدي صغر زاوية الانبعاث إلى تسهيل اقتران الضوء بين ثنائي الليزر والليف البصري. نرى في الشكل (٨-٢٨) أن ضوء الليزر يتبع قانون الانعراج diffraction حيث أن تباعد الحزمة يتناسب عكسياً مع أبعاد المشع. ينطبق هذا على الضوء المتماسك coherent وهي توضح تباعد الحزمة العريضة المطابقة إلى البعد الضيق للحافة وتباعد الحزمة الأصغر المطابقة للبعد العريض للحافة.



الشكل (٨-٢٨) زوايا الحزمة الضوئية لثنائي الليزر

(أ) الزاوية المتعامدة $\theta\perp$ والزاوية الأفقية $\theta 11$

(ب) تعريف زاوية الحزمة - الزاوية الكاملة عند نقطتي منتصف القدرة

٥ - زمن الصعود وزمن الهبوط Rise and Fall Time

تبلغ قيم زمن الصعود وزمن الهبوط في بعض الثنائيات الليزرية حوالي0.5ns و 0.7ns على التوالي . تعادل هذه القيم عرض نطاق تشكيل أكثر من 500 MHz . استخدمت ثنائيات حديثة بعرض نطاق تشكيل يفوق هذه القيمة .

٦ - الاعتمادية Reliability

تطورت ثنائيات الليزر ذات البنية غير المتجانسة المصنعة من زرنيخ جاليوم ألمنيوم منذ بداية السبعينات وأصبحت أكثر وثوقية . تجاوزت أعمار الثنائيات التي تعمل عند درجة حرارة الغرفة مدة ١١ سنة . يتدنى مستوى الثنائيات الليزرية بشكل أسرع عند تشغيلها بدرجات حرارة مرتفعة .

٨-٧ دوائر إلكترونية Electronic Circuitry

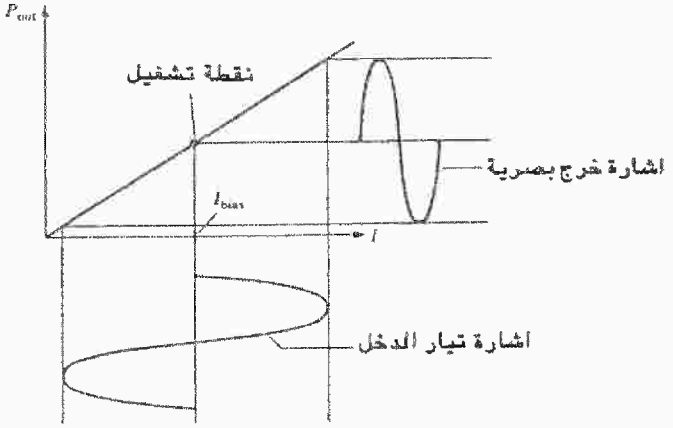
تتميز الدوائر الالكترونية المستخدمة في تشغيل الثنائيات الباعثة للضوء LEDs ببساطتها لأن الثنائيات الباعثة للضوء لاتحتاج إلى تثبيت الجهد أو التيار . كذلك لاتحتاج إلى تبريد أو طاردات حرارة heat sinks أو عناصر تبريد إلكترونية .

على النقيض من ذلك نجد أن الدوائر الالكترونية المستخدمة في تشغيل ثنائيات الليزر تبدي مشاكل كثيرة لمصمم الدائرة وذلك للأسباب التالية :

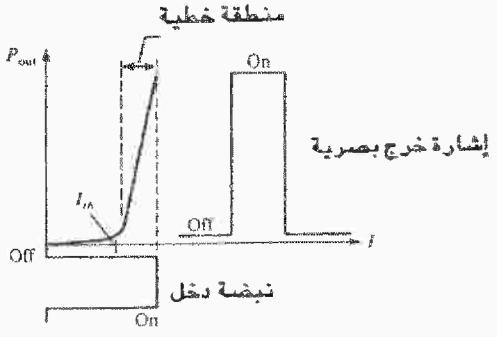
١ -وجود تيار العتبة ٢ - اعتماد تيار العتبة على التقادم ٣ - اعتماد تيار العتبة على درجة الحرارة ٤ - اعتماد القدرة على درجة الحرارة ٥ - اعتماد طول موجة البث على درجة الحرارة .

فرق آخر بين ثنائيات LED وLD هو أن ثنائيات الليزر تستخدم فقط في حالة التطبيقات الرقمية أو النبضية . بينما تستخدم ثنائيات LEDs في الإرسال الرقمي

والتماثلي. يعود ذلك إلى العلاقة غير الخطية بين التيار والقدرة الخارجة لثنائيات الليزر LD. نرى في الشكل (٨-٢٩) منحنيات العلاقة بين التيار والقدرة لثنائيات LED وLD.



أ



ب

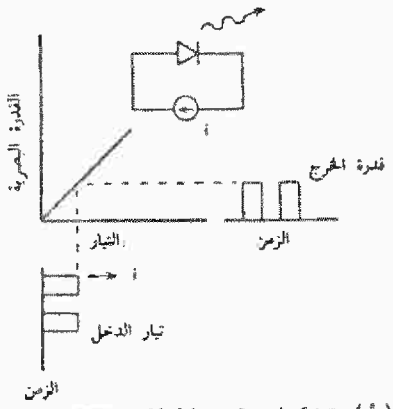
الشكل (٨-٢٩) علاقة الدخل بالخرج

(أ) ثنائي باعث للضوء (ب) حالة تبديل "ON" و "OFF" لثنائي ليزر

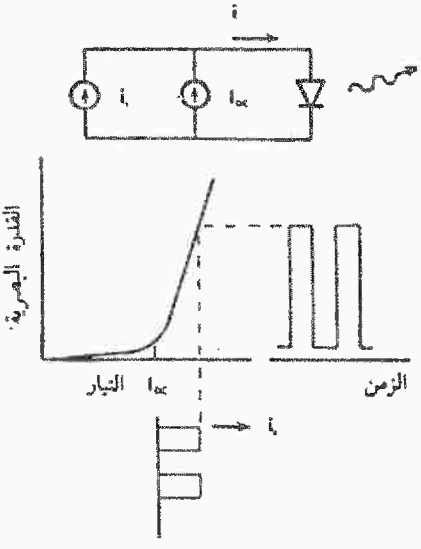
حيث أن الإشارة المؤثرة بعد Ith

في الشكل (٨-٢٩ أ)نرى أن المنطقة الخطية واسعة لثنائيات LED مما يجعلها ملائمة للتشكيل التماثلي. في ثنائيات LD نرى أن المنطقة الخطية صغيرة كما في الشكل (٨-٢٩ب) مما يعيق استخدامها في التشكيل التماثلي. يتطلب استخدام ثنائي LED في التشكيل التماثلي

وجود تيار انحياز حتى يتم تشغيله في المنطقة الخطية حتي تسمح بظهور الإشارات الموجبة والسالبة كما في الشكل (٨-٢٩أ). في التطبيقات الرقمية لانحتاج إلى تيار انحياز لتشغيل ثنائيات LED كما في الشكل (٨-٣٠ أ) بينما نحتاج إلى تيار انحياز مستمر I_{DC} مقداره I_{th} ليكون تيار العمل عند العتبة عندما يكون تيار الإشارة صفراً كما في الشكل (٨-٣٠ب).



(أ) تشكيل رقمي لثنائي LED



(ب) تشكيل رقمي لثنائي ليزر

الشكل (٨-٣٠) استخدام ثنائي LED وثنائي الليزر في التطبيقات الرقمية

(أ) لانحتاج إلى تيار انحياز (ب) ضرورة وجود تيار انحياز

٨-٧-١ دوائر تشغيل LED الرقمية LED Digital Drive Circuits

نستخدم دوائر مبسطة لتشغيل ثنائي LED قد تكون مبنية من قطع منفردة من ترانزستورات ومقاومات أو على شكل دوائر متكاملة integrated circuits ، في الشكل (٨-٣١) نرى دائرة مبسطة . يتشبع الترانزستور عند استخدام جهد مقداره 3V أو أكثر أي أن تيار الانحياز الأمامي I_F لـLED يساوي تيار المجمّع collector المشبع $I_{c\,sat}$. لإيجاد I_F نحتاج لمعرفة I_{csat} . في الشكل (٨-٣١) نستخدم قانون خروشوف Kirchoff's للجهد على دائرة الخرج لنحصل على :

$$I_F = I_{c\,sat} = \frac{V_{CC} - V_F}{R_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.18)$$

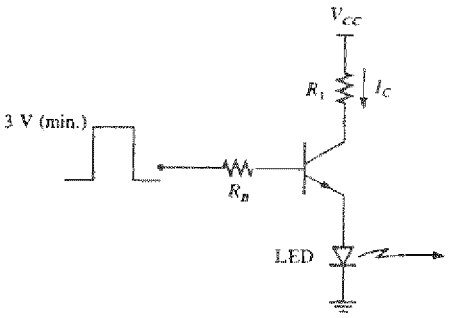
حيث أن V_{CC} هو جهد الانحياز المستمر و V_F هو هبوط الجهد الأمامي للثنائي، $I_{c\,sat}$ هو تيار المجمّع المشبّع وقيمة $V_{CE} \approx 0$. نستطيع اختيار R_B للحصول على تيار القاعدة I_B اللازم لتشبع الترانزستور .

$$I_B \geq \frac{I_{csat}}{\beta} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.19)$$

حيث أن β هو معامل تكبير الترانزستور $= \frac{I_C}{I_B}$.

باستخدام قانون خروشوف Kirchoffs للجهد على دائرة الدخل في الشكل (٨-٣١) فإن :

$$I_B = \frac{V_{in} - V_{BE} - V_F}{R_B} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.20)$$



الشكل (٨-٣١) دائرة إلكترونية تستخدم الترانزستور لتشغيل ثنائي LED

مثال ٨ -٤ :

أوجد قيم R_1 وR_2 في الشكل (٨-٣١) إذا كانت $V_{CC} = 12$ و$\beta = 120$ و $I_F = 40mA$ و $V_F = 1.2\ V$ و $V_{in} = 3\ V$ إذا كان الترانزستور مصنع من السليكون ·

الحل : من المعادلة (8.18) نجد أن :

$$I_F = 40\ mA = \frac{12 - 1.2}{R_1}$$

$$R_1 = 270\ \Omega$$

من المعادلة (8.19) نجد أن :

$$I_B = \frac{40}{120} = 333\ \mu A$$

وباستخدام المعادلة (8.20) نحصل على :

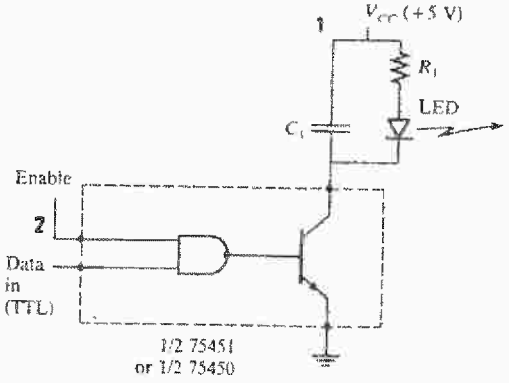
$$I_B = 333 \times 10^{-6} = \frac{3 - 0.7 - 1.2}{R_B}$$

$$R_B = 3.3\ K\Omega$$

نلاحظ أن $V_{BE} = 0.7\ V$ لترانزستور السليكون Si و $V_{BE} = 0.3$ لترانزستور الجرمانيوم Ge بالإمكان استخدام دوائر متكاملة بدلاً من الترانزستور لتشغيل ثنائي LED حيث نرى في الشكل (٨-٣٢) دائرة قياسية رقم 75450 أو 75451 والتي تحتوي على بوابة Nand وترانزستور. عند استخدام جهد مقداره 5V على النهاية رقم 1 يبدأ الثنائي بالعمل والمعلمات الداخلة من النهاية رقم 2 تتحكم بالثنائي. نستطيع اختيار قيمة R_1 لتشغيل الثنائي LED عند قيم محددة للتيار الأمامي I_F كما يلي:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} \quad \text{..... (8.21)}$$

وضع المكثف C_1 للتخفيف من الارتفاعات المفاجئة والعشوائية للجهد وتبلغ قيمة المكثف حوالي 1nF .

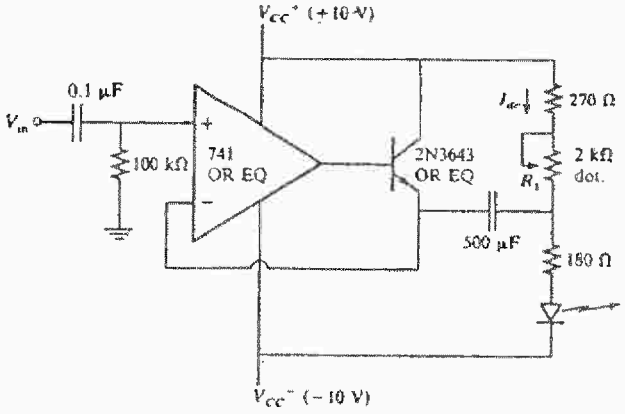


الشكل (٨ -٣٢) دائرة الكترونية متكاملة لتشغيل ثنائي LED

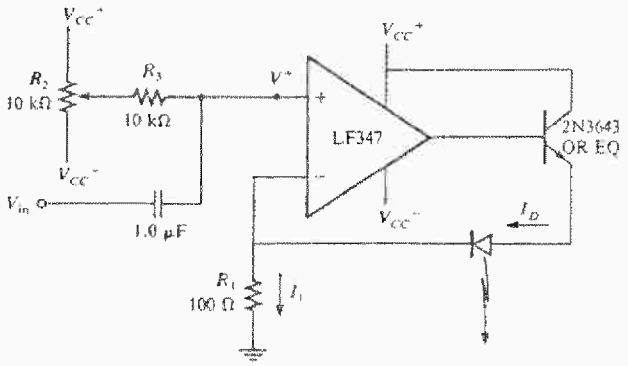
٨-٧-٢ دوائر تشغيل LED التماثلية LED Analog Drive Circuits:

يحتاج تشغيل ثنائيات LED إلى استخدام تيار انحياز مستمر كما ورد في الشكل (٨-٢٩) . تتسبب الإشارة الداخلة إلى تغير تيار LED فوق وتحت تيار الانحياز.

يبين الشكل (٨-٣٣) أحد الدوائر الشائعة الاستخدام التي تعتمد على وجود المضخم التشغيلي Operational Amplfier . اختيرت المقاومات للحصول على تيار الانحياز المناسب . تتراوح قيمة تيار الانحياز بين 7.5mA و 40mA وذلك حسب قيمة R_1 . على سبيل المثال في هذه الدائرة تتغير قيمة تيار الثنائي بين 10mA- و 10mA+ عندما تتغير قيمة الإشارة الداخلة من 2V- و 2V+ . دائرة أخرى تستخدم التغذية الراجعة feedback نراها في الشكل (٨-٣٤).



الشكل (٨-٣٣) دائرة إلكترونية تماثلية شائعة الاستخدام
في تشغيل ثنائي LED

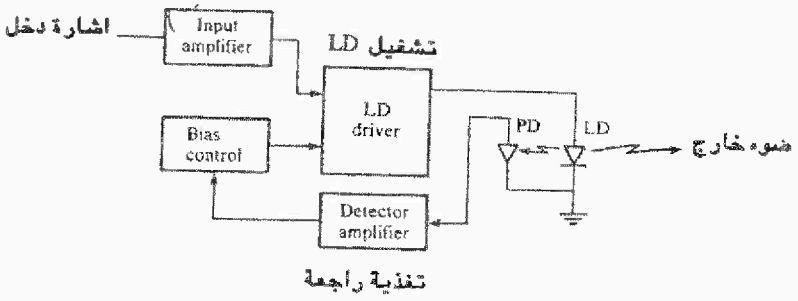


الشكل (٨ - ٣٤) دائرة تماثلية لتشغيل ثنائي LED تستخدم التغذية الراجعة

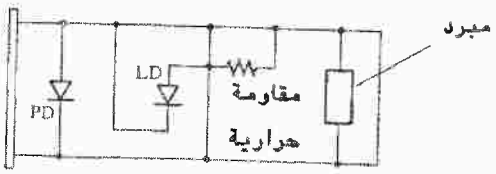
٨-٧-٣ دوائر تشغيل ثنائيات الليزر Laser Diode Drive Circuits

أن الدوائر المستخدمة في تشغيل ثنائيات الليزر أكثر تعقيداً من تلك المستخدمة في تشغيل ثنائيات LED لأن هذه الدوائر تستخدم لتثبيت تيار الانحياز وللإقلال من تأثير درجة الحرارة . يشغل ثنائي LD بتيار انحياز I_{th} والنبضة الداخلة تفتح أو تقفل الثنائي. رأينا في الشكل (٨-٣٠ب) العلاقة بين النبضة الداخلة والقدرة الخارجة . يستخدم الثنائي الضوئي photodiode لتثبيت القدرة الخارجة ومراقبتها من تأثير تغير درجة الحرارة. يوضح الشكل (٨-٣٥) مخطط صندوقي لدائرة التغذية الراجعة حيث تتحكم القدرة الخارجة P_{out} بتيار الدائرة من خلال الثنائي الضوئي ومضخم الكشف detector amplifier لضمان ثبوت قيمة القدرة الخارجة . على سبيل المثال يكشف الثنائي الضوئي ارتفاع P_{out} فيؤدي إلى الاقلال من قيمة تيار الانحياز الداخل إلى LD فيقلل من قيمة P_{out} . هناك طرق أخرى لتثبيت تيار الانحياز باستخدام نبيطة المقاومة

الحرارية thermistor حيث تنخفض قيمة المقاومة بارتفاع درجة الحرارة . تربط هذه المقاومة الحرارية على التوالي مع ثنائي الليزر LD كما في الشكل (٨-٣٦) . عند ارتفاع درجة الحرارة ترتفع قيمة I_{th} ، كما في الشكل (٨-٣٧) ، نظراً لأن المقاومة الحرارية تنخفض بارتفاع درجة الحرارة فإنها تتسبب بارتفاع قيمة I_{th} فتلاحق تغير قيمة I_{th} .

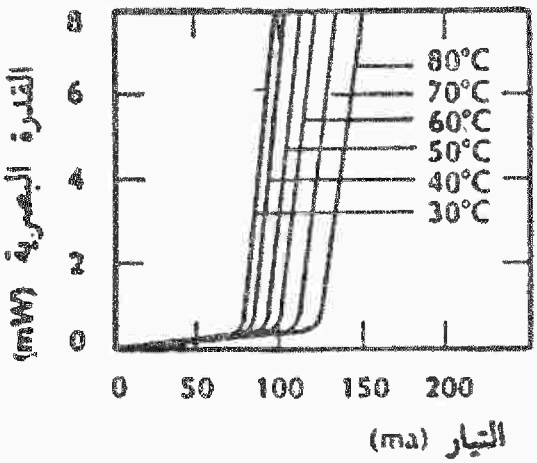


الشكل (٨ - ٣٥) رسم تخطيطي لدائرة تثبيت درجة الحرارة لثنائي ليزر



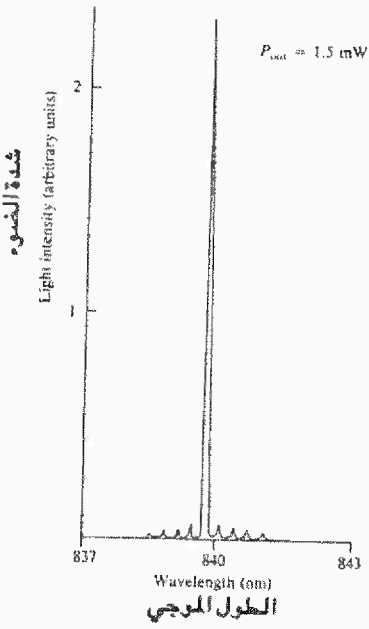
الشكل (٨- ٣٦) عبوة دائرة الكترونية متكاملة لثنائي

ليزر رقم NDL 5007 P



الشكل (٨ - ٣٧) تغير تيار العتبة I_{th} والقدرة مع درجة الحرارة

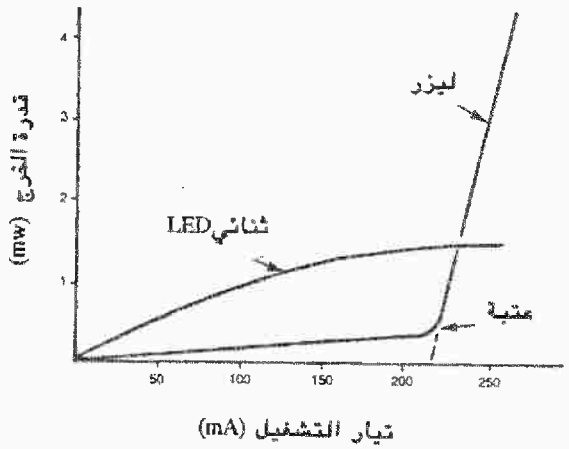
عند تشغيل ثنائي الليزر بتيار أكثر من تيار العتبة قليلاً فإن الثنائي يبعث أنماطاً متعددة. عند تزايد التيار يتناقص عرض الخط ويتناقص عدد الأنماط الطولية . عند تيار كبير بما فيه الكفاية سيحتوي الطيف المنبعث على نمطاً واحداً كما في الشكل (٨-٣٨)، عرض خطه أصغر بكثير من عرض خط ثنائي الليزر متعدد الأنماط. يبلغ عرض الخط بحدود 0.2nm.



الشكل (٨ - ٣٨) طيف الانبعاث لثنائي ليزر أحادي النمط

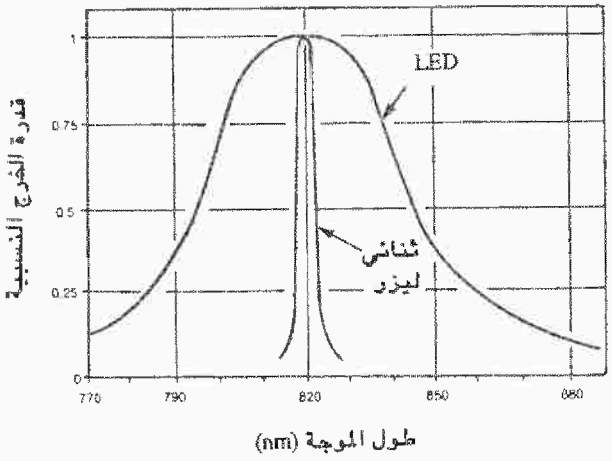
٨-٨ الخلاصة Summary

قدمنا في هذا الفصل نوعين من الثنائيات المستخدمة في الاتصالات البصرية وهما الثنائي الباعث للضوء LED وثنائي الليزرLD . تلخص في الجدول (٨-٢) صفات وتطبيقات كل نوع . تصنع هذه الثنائيات من أشباه الموصلات وشرحنا بإيجاز المبادئ الأساسية لتشغيلها. ووجدنا أن مبادئ التشغيل متشابهه إلى حد ما ونوضح في الشكل (٨-٣٩) العلاقة بين القدرة الخارجة والتيار الأمامي للثنائي الباعث للضوء وثنائي الليزر. إن القدرة المنبعثة من الثنائي LED أكبر من تلك المنبعثة من ثنائي الليزر عند تشغيله بتيار يقل عن تيار العتبة I_{th} . بعد تيار العتبة ترتفع القدرة المنبعثة من ثنائي الليزر بسرعة مع ارتفاع تيار التشغيل. بصفة عامة تقل القدرة الخارجة من الثنائيات السابق شرحها حسب التسلسل التالي : (١) ثنائي الليزر (٢) ثنائي الحافة الباعث للضوء (٣) ثنائي العتبة (٤) الثنائي الباعث السطحي.



الشكل (٨ - ٣٩) منحنيات العلاقة بين التيار والقدرة لثنائي LED وثنائي ليزر

تختلف ثنائيات الليزر عن الثنائيات الباعثة للضوء بسعة طيفها أو عرض خطها . ونرى في الشكل (٨-٤٠) رسماً نموذجياً لعرض طيف LED وعرض طيف LD . بالإمكان الاقلال من عرض طيفLD باستخدام ثنائي ليزر أحادي النمط .



الشكل (٨ - ٤٠) عرض الطيف لثنائي LED وثنائي ليزر

أدى تطوير ثنائيات LED بانبعاث عالٍ لاستخدامها مع ألياف متدرجة وقليلة الفقد ذات تشتيت منخفض إلى عدم الاعتماد على ثنائيات ليزر متعددة النمط ، استخدمت ثنائيات LED في الجيل الأول من نظم الاتصالات الليفية لنقل معدل معطيات منخفض ولمسافات قصيرة مستخدمين ألياناً بمعامل انكسار عتبي. غير أن تطوير ثنائياتLED كالباعث الحافي edge emitter أو الألياف المتدرجة أديا إلى استخدام ثنائيات LED للمسارات المعتدلة ومعدل معطيات أو سعة نطاق معتدلة. أما للمسارات الطويلة ومعدلات المعطيات العالية فيمكننا استخدام ثنائيات ليزر مع ألياف متدرجة أو أحادية النمط. تتطلب المسارات الطويلة جداً ومعدلات المعطيات المرتفعة جداً استخدام

الاستخدامات في منطقة الأطوال الموجية الطويلة عند حوالي 1.3μm و 1.55μm حيث تحصل على توهين وتشتيت منخفضين .

إن الدوائر المستخدمة لتشغيل ثنائيات الليزر أكثر تعقيداً وتكلفة من تلك المستخدمة لتشغيل ثنائيات LED لأنها تحتاج إلى تثبيت التيار والإقلال من تأثير تغير درجات الحرارة.

الجدول (٨-٢) خواص نموذجية لمنابع ثنائية ضوئية (LD,LED)

الخاصـــــــة	ثنائي باعث للضوء LED	ثنائي ليزر LD	ثنائي ليزر أحادي النمط
العرض الطيفي(nm)	20 - 100	1-5	< 0.2
زمن الصعود(ns)	2 - 250	0.1-1	
عرض نطاق التشكيل MHz	< 300	< 2000	> 2000
كفاءة الاقتران (بدون عدسات)	منخفضة جداً	معتدلة	معتدلة
الليف الموافـــق	عتبي متعدد النمط 0.8-0.9μm ليف متدرج متعـدد النمط عند 1.55μ m , 1.3μm	متدرج متعدد النمط أحادي النمط	أحادي النمط
الحساسية لدرجة الحرارة	منخفضة	عالية	عالية
درجة تعقيد الدائرة	بسيطة	معقدة	معقدة
العمر (ساعات)	10^5	$10^4 - 10^5$	$10^4 - 10^5$
التكاليف	منخفضة	مرتفعة	عاليـة
مجال التطبيقات	مسارات متوسطة معدلات معطيات معتدلة	مسارات طويلة معدلات معطيات عالية	مسارات طويلة جداً معدلات معطيات عالية جداً

الفصل الثامن

أسئلة

١ - ماهي أهم خصائص المنبع الضوئي ؟

٢ - ماالفرق بين الكفاءة الكمية والكفاءة الخارجية ؟

٣ - ماأهمية كفاءة الاقتران ؟

٤ - ماهو توزيع الشدة الامبرتي ؟

٥ - ماهي العلاقة بين كفاءة الاقتران وفتحة النفوذ العددية ؟

٦ - ماهي العلاقة بين زمن الصعود وعرض النطاق ؟

٧ - لماذا تستخدم أشباه الموصلات في تصنيع الثنائيات الضوئية ؟

٨ - ماهي الروابط التساهمية ؟

٩ - عرف الفجوة ؟

١٠ - ماهي وصلة PN ؟

١١ - ماالفرق بين LED و LD ؟

١٢ - أين تقع المنطقة الفقيرة وكيف تتكون ؟

١٣ - قارن بين الوصلة المتجانسة وغير المتجانسة ؟

١٤ - ماهي أنواع LED's ، رتبها حسب قدرتها الخارجة ؟

١٥ - ماهي طرق التبئير لزيادة كفاءة الاقتران ؟

١٦ - ماهي خصائص الثنائي الباعث للضوء LED's ؟

١٧ - ماهو المقصود بعرض الخط ؟

١٨ - قارن بين عرض خط LED و LD ؟

١٩ - ماالمقصود بكلمة ليزر وكيف يعمل ؟

٢٠ - ماهو تيار العتبة لثنائي LD ؟

٢١ - هل يمكن استخدام LED للإرسال التماثلي والرقمي ؟ أشرح ذلك ؟

٢٢ - هل يمكن إستخدام LD للإرسال التماثلي والرقمي؟ إشرح ذلك .

٢٣ - متى يكون إستخدام الانحياز الأمامي ضروري عند إستخدامLED ؟

٢٤ - لماذا يستخدم المنبع الضوئي المذنّب ؟

مسائل

١ - يتمكن LED من قرن 10dBm - من القدرة البصرية في ليف بصري فإذا كان الفقد الكلي للموصلات والألياف حوالي 30dB . فما مقدار القدرة المستقبلة عند الكاشف؟

٢ - أوجد القدرة الداخلة لليف إذا كانت $\eta_p = 1\ \%$ و $\eta_c = 5\ \%$ والقدرة الداخلة لثنائي LED هي 100mw .

٣ - أوجد قيمة η_p الدنيا إذا كانت القدرة المقرونة بالليف 200μw وفتحة نفوذ الليف العددية 0.24 والقدرة الداخلة لثنائي LED تساوي 250 mw .

٤ - أوجد القدرة المقرونة من منبع LED قدرته1.2mw إلى ليف بصري زاوية قبوله 54°.

٥ - أوجد عرض النطاق إذا كان زمن الصعود 100s ؟

٦ - أوجد الطول الموجي والتردد إذا كانت طاقة الفوتون1.6ev ؟

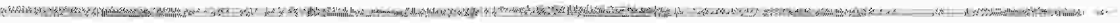
٧ - أوجد طاقة نطاق الثغرة لثنائي LED يعمل عند $\lambda = 1.3\mu m$.

٨ - إحسب طاقة الفوتون عند $\lambda = 1.3\mu m\ ,\ 0.82\mu m\ ,\ 0.65\mu m$ وأيهما يملك طاقة أكبر فوتون الأشعة المرئية أم فوتون الأشعة تحت الحمراء ؟

٩ - كم عدد الفوتونات التي تصل بالثانية إلى مستقبل إذا كانت القدرة 5nw عند طول موجي 0.82μm .

الفصل التاسع

الكواشف الضوئية



الفصل التاسع
الكواشف الضوئية
Light Detectors

نقدم في هذا الفصل مبادىء وأنواع الكواشف الضوئية الشائعة الإستخدام في أنظمة الاتصالات البصرية ، نبدأها بتقدمة عن بنية الثنائي الضوئي photodiode وخصائصه . سنقدم أيضاً الأنواع المختلفة من الكواشف الضوئية ودوائرها التشغيلية وطرق تصميمها والمعلمات الأساسية الواجب معرفتها .

٩-١ خصائص عامة General Characteristics

تقوم الكواشف الضوئية وبصفة خاصة الثنائي الضوئي photodiode بعكس عمل الثنائيات الباعثة للضوء LED . تتولى الثنائيات الضوئية تحويل الإشارات الضوئية إلى إشارات كهربائية . إن المبادىء الأساسية لعمل الثنائي الضوئي والثنائي الباعث للضوء واحدة . هنا يتولى الكاشف الضوئي امتصاص فوتونات وبعث الكترونات ، أي أنه يقوم بانتاج تيار كهربائي . لكي يستخدم الكاشف الضوئي في نظم الاتصالات البصرية يجب أن يحقق الصفات التالية :-

١ - الاستجابية Responsivity (ρ)

تعرف الاستجابية للكاشف ρ على أنها النسبة بين تيار الخرج I_p وقدرة الدخل P_{in} ويعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$\rho = \frac{I_p}{P_{in}} \quad \text{.....} \quad (9.1)$$

ووحدات الاستجابة هي أمبير لكل وات .

حيث تولد القدرة البصرية الساقطة على سطح الثنائي تياراً في خرج الثنائي لو أخذنا ، مثلاً ، ثنائي ضوئي نوع PIN لوجدنا أن استجابيته تتراوح بين 0.4A/w

و 0.6A/W . لوفرضنا أن قدرة الضوء الساقطة على الثنائي 50 μw فإن التيارالخارج من الثنائي يساوي 30 μA لأن التيار :

$$I_p = \rho P_{in}$$

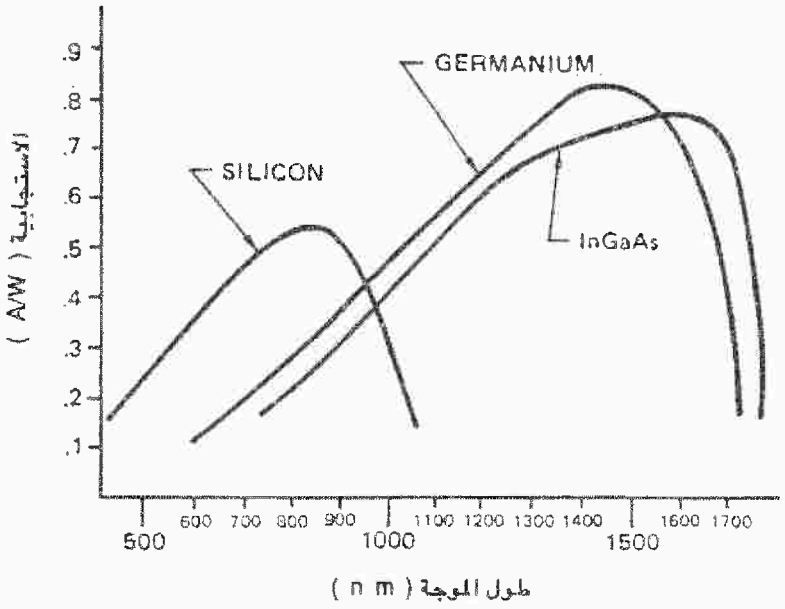
$$= 50\ \mu w * \frac{0.6\ A}{w} = 30\ \mu A$$

تبلغ القيمة النموذجية لاستجابية ثنائي ضوئي جرفي APD حوالي 75A/W . هذا يعني أن قدرة مقدارها 50 μw تولد تياراً مقداره 3.75mA .

تتغير الاستجابية مع الطول الموجي ، لذا فإنها تحدد بالطول الموجي حيث تبلغ الاستجابية أقصى قيمة لها عند الطول الموجي المرغوب . كأن نقول عند λ= 820 nm أو λ= 1300 nm . إن أكثر المواد شيوعاً للاستخدام في الكواشف الضوئية هي مادة السليكون Si وتعمل ضمن المدى الموجي بين 800nm و 900 nm . تبلغ أعلى استجابية للسليكون 0.7A/W عند λ = 900 nm . عند استخدام ألياف بلاستيكية تعمل على الطول الموجي 650nm وهو اللون الأحمر في الطيف المرئي نجد أن الاستجابية تنخفض إلى 0.4A/W .

إذا أردنا استخدام كواشف للأطوال الموجية 1300nm أو 1500nm لابد من البحث عن كواشف أخرى لعدم صلاحية كواشف السليكون لهذه الأطوال الموجية . نرى في الشكل (٩-١) منحنيات الإستجابية لمدى من الأطوال الموجية لثلاث مواد وهي السليكون Si والجرمانيوم وزرنيخ جاليوم انديوم In Ga As . إن مادة الجرمانيوم وسبيكة زرنيخ جاليوم انديوم In Ga As هي أكثر المواد ملائمة للأطوال الموجية الطويلة .

إن الثنائي الضوئي نوع PIN المصنع من In Ga As له منحنى استجابية واسع ومستوى وتتعدى استجابيته 0.5A/W بين الأطوال الموجية 900nm و 1650nm لذا فإنه ملائم للاستخدام عند الأطوال الموجية 1300nm و 1550nm .



الشكل (٩ -١) استجابية بعض المواد التي تصنع منها الكواشف

٢ - **الكفاءة الكمية** (η_d) Quantum Efficieny

تعرف الكفاءة الكمية (η_d) هنا على أنها النسبة بين الالكترونات الصادرة إلى الفوتونات الواردة عليه أي أن :

$$\frac{\text{عدد الالكترونات الصادرة}}{\text{عدد الفوتونات الواردة}} = \eta_d \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9.2)$$

تعطي الكفاءة الكمية كنسبة مئوية . لو فرضنا أن الكفاءة الكمية هي 50% فهذا يعني أن خمسة فوتونات من كل عشرة فوتونات ساقطة على الكاشف فقط تولد إلكترونات. يمكن حساب الإستجابية ρ المذكورة في المعادلة (9.1). حيث أن القدرة البصرية هي الطاقة الساقطة على الكاشف كل ثانية و hf هي طاقة كل فوتون عندئذ يكون عدد الفوتونات التي تصطدم بالكاشف كل ثانية هو $\frac{P_{in}}{hf}$. من المعادلة (9.2) نرى أن :

$$\text{عدد الالكترونات الصادرة كل ثانية} = \frac{\eta_d P_{in}}{hf} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9.3)$$

وحيث أن كل الكترون يحمل شحنة مقدارها q فإن التيار الخارج من الكاشف I_p (عدد الشحنات الصادرة كل ثانية) :

$$I_p = \frac{\eta_d\, q\, P_{in}}{hf} = \frac{\eta_d\, q \lambda\, P_{in}}{hc} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9.4)$$

ومن المعادلة (9.1)

$$\rho = \frac{I_p}{P_{in}} = \frac{\eta_d q}{hf} = \frac{\eta_d \lambda q}{hc} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9.5)$$

لو فرضنا أن هناك مقاومة خارجية R_L مربوطة بالكاشف كما هو في الشكل (٩-٢) فإن جهد الخرج V_o هو :

$$V_o = I_p R_L = \frac{\eta_d\, q\, p_{in}\, R_L}{hf} = \rho\, p_{in}\, R_L \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9.6)$$

٣ - تيار الظلام Dark Current

يتولد تيار الظلام نتيجة التأثير الحراري على الكاشف وهو نوع من أنواع الضوضاء الحرارية . تزداد قيمة تيار الظلام بنسبة 10% لكل ارتفاع في درجة الحرارة قيمته درجة مئوية واحدة. قيمة تيار الظلام للكاشفات الضوئية المصنعة من السليكون التي تعمل عند أطوال موجية قصيرة أقل بكثير من قيمته لكاشفات الجرمانيوم وIn Ga As التي تعمل عند أطوال موجية أعلى .

٤ - الحد الأدنى من القدرة القابلة للكشف Minimun Detectable Power

يمثل الحد الأدنى من القدرة القابلة للكشف أقل مقدار من القدرة الضوئية التي يمكن للكاشف أن يتعامل معها . تتعلق هذه الكمية بتيار الظلام لأن تيار الظلام يحدد قيمة هذا الحد. هناك عناصر ضوضاء أخرى يتعلق بعضها بالكاشف والبعض الآخر بجهاز الاستقبال والتي سبق شرحها عند مناقشة الضوضاء .

٥ - زمن الإستجابة Response Time

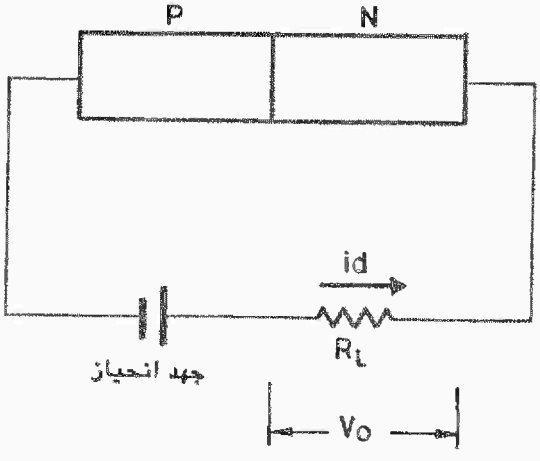
زمن الاستجابة هو الزمن اللازم للكاشف كي يستجيب للقدرة البصرية الداخلة وانتاج تيار خارجي. عادة مايعرف زمن الاستجابة بزمن الصعود وزمن الهبوط. تتراوح أزمنة الصعود بين 0.5ns إلى 10ns أو أكثر. يحدد زمن الصعود نتيجة سرعة انتقال الشحنات عبر المنطقة الفقيرة depletion region. يتأثر زمن الصعود بجهد الانحياز حيث ترتفع قيمة زمن الصعود بارتفاع جهد الانحياز. على سبيل المثال فإن ثنائي ضوئي نوع PIN له زمن صعود مقداره 5ns عند 15V و 1ns عند 90V فولت. كما ذكرنا سابقاً فإن زمن الصعود يرتبط بعرض النطاق بالمعادلة التالية:

$$BW = \frac{0.35}{t_r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9.7)$$

قد تحد المقاومة والمكثف الداخليين للثنائي الضوئي من قيمة عرض النطاق. عندئذ يصبح عرض النطاق للدائرة في الشكل (٩ - ٢) :

$$BW = \frac{1}{2\Pi R_L C_d} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9.8)$$

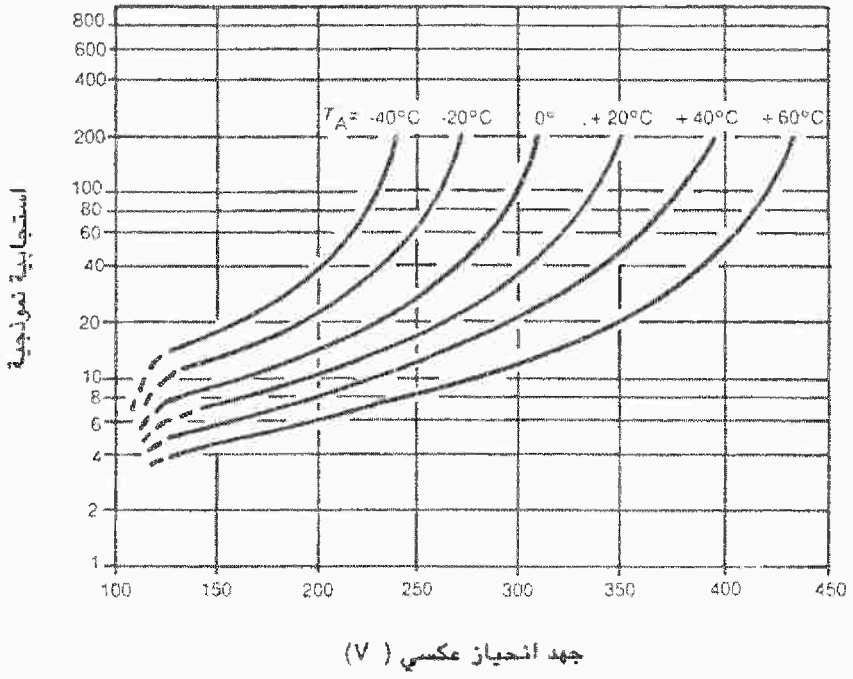
عادة ماتكون قيمة Cd للكواشف المستخدمة في أنظمة الاتصالات السريعة بضع بيكوفاراد Picofarads.



الشكل (٩-٢)دائرة كاشف PN

٦ - جهد الانحياز Bias Voltage

يتراوح جهد الانحياز العكسي بين 5V لبعض كاشفات PIN الى بضع مئات من الفولتات للكاشفات الضوئية الجرفية APDs. يؤثر جهد الانحياز على تشغيل الكاشف لأن تيار الظلام والاستجابية وزمن الاستجابة ترتفع مع ازدياد جهد الانحياز. نرى في الشكل (٩-٣) منحنيات العلاقة بين الاستجابية والجهد العكسي لثنائي ضوئي جرفي APD. يتضح من الشكل حساسية هذا النوع من الثنائيات لتغيرات درجة الحرارة. لذا فإن الدوائر المستخدمة في هذه الثنائيات عادة ماتكون معقدة نظراً لارتفاع جهد الانحياز وحساسيتها لدرجة الحرارة. لذا يقتصر استخدامها في الأنظمة التي تحتاج إلى استجابية عالية وكسب مرتفع .



الشكل (٩ - ٣) تأثير جهد الانحياز والحرارة على ثنائي APD

٩-٢ الكواشف الضوئية Photodetectors

تستخدم نظم الألياف البصرية كواشف مصنعة من مواد شبه موصلة لأنها صغيرة الحجم وخفيفة الوزن وحساسة وسريعة ويمكن أن تعمل بجهد انحياز يبلغ بضعة فولتات . سنقدم في هذا البند خمسة أنواع من هذه النبائط وهي : APD, PIN, PN والترانزستور الضوئي و PIN-FET.

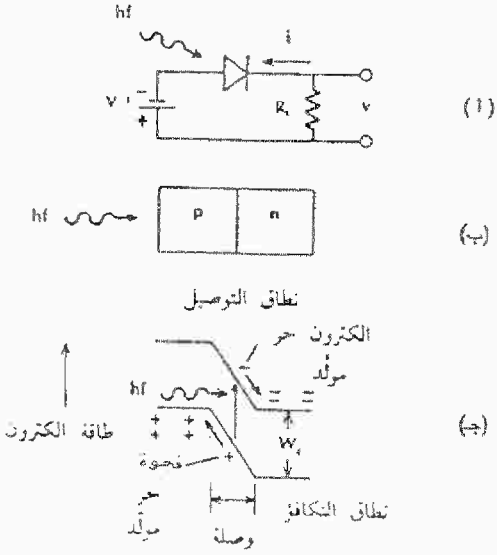
٩-٢-١ ثنائي ضوئي نوع PN PN Photodiode

قدمنا في البند ٨-٢ فكرة موجزة عن أشباه الموصلات وتكوين وصلة PN. يبين الشكل (٩-٤) ثنائياً ضوئياً نوع PN. عند استخدام انحياز عكسي ، كما هو الحال في الكاشفات الضوئية ، يتزايد حاجز الطاقة الكموني potential energy barrier بين المنطقتين P و N ولاتستطيع الالكترونات الطليقة في طبقة N أو الفجوات الطليقة في طبقة P اختراق حاجز الطاقة وبذلك لايتدفق أي تيار. نظراً لعدم وجود شحنات طليقة حول وصلة PN فقد سميت بالمنطقة الفقيرة depletion region وحيث أنها لاتملك شحنات طليقة تكون مقاومتها عالية وينتج عن ذلك أن يظهر الجهد عبر الثنائي تقريباً على طرفي وصلة PN. فتكون القوى الكهربائية كبيرة في المنطقة الفقيرة وصغيرة خارجها.

تؤدي زيادة قيمة جهد الانحياز العكسي إلى توسع المنطقة الفقيرة مما يتيح لها استقبال كمية أكبر من الطاقة الضوئية . يؤدي سقوط الفوتونات على المنطقة الفقيرة إلى تحرير أزواج من الالكترونات والفجوات (الحاملات المتحركة Mobile Carriers). لأن طاقة الفوتون تمتص في الوصلة فيؤدي ذلك إلى إعطاء الالكترون طاقة تعادل طاقة الثغرة Eg فينتقل من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل فيصبح لدينا إلكترون طليق في نطاق التوصيل وفجوة طليقة في نطاق التكافؤ فتتولد لدينا نوعين من الشحنات الطليقة لكل فوتون يُمْتَص . تتحرك الحاملات الطليقة في المنطقة الفقيرة نتيجة جهد الانحياز المطبّق على الثنائي.

تتسبب الحاملات المتحركة في تدفق التيار خلال الدائرة الخارجية للثنائي وقد تمتص بعض الفوتونات خارج المنطقة الفقيرة في منطقتي P و N وتتولد حاملات متحركة في هذه المناطق تتحرك بسرعة بطيئة وقد تتحد بعيداً عن المنطقة الفقيرة ولكن تأثيرها لايذكر.

مما سبق شرحه في البند (٨-٢) وفي هذا البند نجد أن وصلة PN استخدمت كباعث ضوئي عند استخدام جهد انحياز أمامي حيث يؤدي اتحاد الشحنات المحقونة إلى اصدار فوتونات. عند استخدام جهد انحياز عكسي تؤدي الفوتونات الساقطة على الوصلة إلى توليد أزواج إلكترون - فجوة فينتج تياراً كهربائياً . يتضح من ذلك إمكانية تصميم نبيطة PN كي تستخدم كباعث وكاشف .



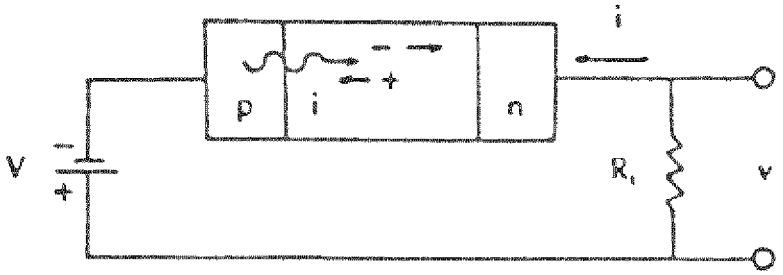
الشكل (٩ - ٤) ثنائي ضوئي شبه موصـــــل

(أ) ثنائي بانحياز عكسي (ب) وصلة PN

(جـ) مخطط مستوى الطاقة

٩ -٢-٢ ثنائي ضوئي نوع PIN PIN Photodiode

لاحظنا أن زيادة جهد الانحياز العكسي تؤدي إلى توسيع المنطقة الفقيرة وأدت بالتالي إلى زيادة المساحة المستقبلة للفوتونات وبالتالي زيادة تيار خرج الثنائي الضوئي. للحصول على مساحة أكبر لاتعتمد كلياً على استخدام جهد عكسي ، فقد تم تصنيع ثنائي ضوئي نوع PIN . يتكون هذا الثنائي من طبقة شبه موصل ضمنية عريضة بين المنطقتين P و N كما هو في الشكل (٩-٥) . تحتوي الطبقة الضمنية على عدد قليل من الشحنات الطليقة. تشبه هذه الطبقة المنطقة الفقيرة . بتعبير آخر يمكن النظر إلى ثنائي PIN على أنه ثنائي مجهز بطبقة فقيرة عريضة وهي الطبقة الضمنية دون الحاجة لاستخدام جهد انحياز عكسي. نظراً لأن الطبقة الضمنية عريضة جداً فإن احتمال امتصاص الفوتونات فيها قوي جداً وليس في المنطقتين P و N الرقيقتين. يؤدي ذلك إلى تحسين الكفاءة والسرعة مقارنة بالثنائي الضوئي نوع PN. إن السرعة العالية وقلة الجهد المستخدم في ثنائيات PIN أديا إلى شيوع استخدام هذه الثنائيات في أنظمة الاتصالات البصرية. على سبيل المثال نجد أن الجهد المستخدم في ثنائيات PN يتراوح بين 20V و 40V أو أكثر بينما يتراوح الجهد المستخدم في ثنائيات PIN بين 8V و 10V . كذلك بالإمكان تشغيل ثنائي PIN دون استخدام أي جهد ولكن ذلك يقلل من سرعة الاستجابة حيث أن زيادة الجهد العكسي تؤدي إلى زيادة سرعة الاستجابة .



الشكل (٩ - ٥) ثنائي ضوئي PIN

٩-٢-٣ ثنائي ضوئي جرفي Avalanche Photodiode

تتشابه البنى الأساسية للثنائيات الضوئية الجرفية والثنائيات نوع PIN . لذا فإن المواد المستخدمة والمجالات الطيفية لكلا النوعين واحده . يبين الشكل (٩-٦) أحد بنى الثنائي الضوئي الجرفي ، إذ يتكون من أربعة طبقات . الطبقتين P^+ و N^+ هما طبقتان لهما تطعيم عالٍ ومقاومة منخفضة ولهما هبوط جهد منخفض جداً أما الطبقة P فهي منطقة ذات تطعيم متوسط . أما المنطقة Π فهي ضعيفة التطعيم وتكاد تكون منطقة ضمنية . إن معظم الفوتونات تمتص في هذه المنطقة منتجة أزواج (إلكترون - فجرة) . لتشغيل هذا الثنائي نطبق جهداً عكسياً عالياً قد يصل إلى عدة مئات من الفولتات . عند سقوط الفوتونات على الثنائي تمتص في المنطقة الفقيرة وتتولد الكترونات من جراء ذلك . تتحرك الإلكترونات المولّدة إلى المنطقة P التي أصبحت تفتقر إلى الشحنات الطليقة نتيجة الجهد العكسي الكبير حيث يؤدي الجهد العكسي الكبير إلى توسع الطبقة الفقيرة عند الوصلة ($P-N^+$) إلى أن تبلغ الطبقة Π . لهذا السبب فإن هذا النوع من الثنائي الضوئي الجرفي APD يسمى بالثنائي المنشور reach through إن هبوط الجهد العكسي المطبّق على الثنائي يكون بشكل أساسي عبر الوصلة ($P-N^+$) حيث تؤدي القوى الكهربائية الكبيرة إلى حدوث تضاعف جرفي avalanche multiplication إذ تقوم القوى الكهربائية الكبيرة بتعجيل الالكترونات المولّده نتيجة الضوء الساقط على الثنائي فتنقل بطاقات حركية كبيرة . تصطدم الالكترونات المُعَجّلة بالذرات فتولد الكترونات طليقة جديدة والتي تصطدم بدورها بذرات أخرى مولّدة إلكترونات طليقة جديدة أخرى ، وهكذا دواليك . قد يتسبب الالكترون المولد ضوئياً في توليد ١٠٠ إلكترون طليق وهذا مايسمى بالتضاعف الجرفي . تعتمد قيمة التضاعف الجرفي على قيمة الجهد العكسي المطبق على ثنائي APD حيث ترتفع قيمة الكسب M بارتفاع الجهد العكسي V_B حسب المعادلة التالية :

$$M = \frac{1}{1-(V_B/V_{BR})^{\zeta}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9.10)$$

حيث أن V_{BR} هو جهد الانهيار العكسي reverse breakdown voltage وع هي

مَعْلَمَة تحدد تجريبيا وقيمتها أكبر من واحد ، تتراوح جهود الانهيار بين 20V و 500V .

من المعادلة (9.4) وجدنا أن التيار :

$$I_p = \frac{\eta_d q P_{in}}{hf}$$

حيث تمثل η_d الكفاءة الكمية عندما تكون قيمة الكسب M تساوي واحد . تبلغ قيمة التيار I_p عندما يكون كسب ثنائي APD هو M كالتالي .

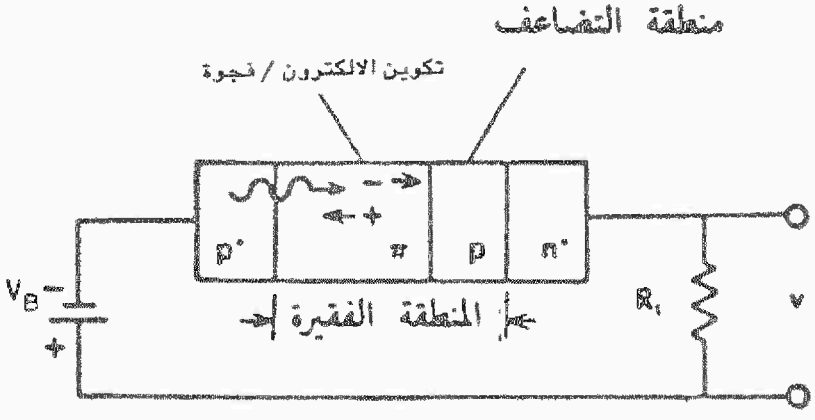
$$I_p (APD) = \frac{M \eta_d q P_{in}}{hf} = \frac{M \eta_d q \lambda P_{in}}{hc} \quad \ldots\ldots (9.11)$$

وحيث أن الاستجابية ترتبط بالتيار حسب ماجاء في المعادلة (9.1) فإن :

$$\rho (APD) = \frac{M \eta_d q}{hf} = \frac{M \eta_d q \lambda}{hc} \quad \ldots\ldots (9.12)$$

تتراوح قيم ρ (APD) بين 20 A/w و 80 A/w

تتصف ثنائيات APD بارتفاع مستوى الضوضاء الداخلية مقارنة بثنائياتPN و PIN كما أنها حساسة لتغير درجة الحرارة مقارنة بثنائيات PN وPIN . يتناقص كسب ثنائي APD مع إرتفاع درجة الحرارة .

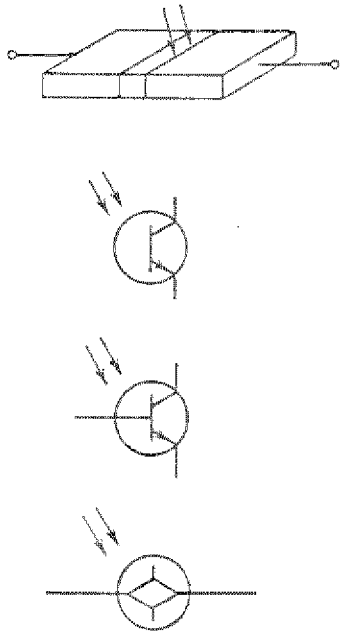


الشكل (٩ - ٦) ثنائي ضوئي جرفي APD

٩-٢-٤ الترانزستورات الضوئية Phototransistors

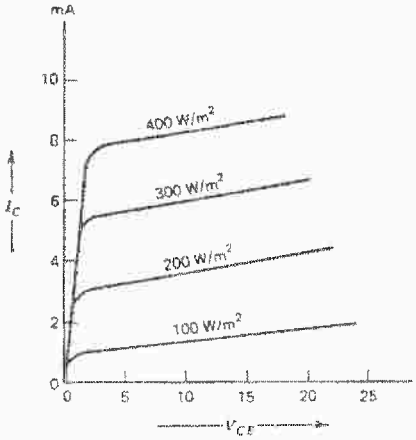
تستخدم الترانزستورات الضوئية عندما يكون مستوى شدة الإضاءة منخفضا ويوجد نوعان منها الأول وهو ترانزستور الوصلة ثنائية القطبية Bipolar Junction Transistor (BJT) والآخر يستخدم تركيبه مكونة من ترانزستور تأثير الحقل Field Effect Transistor (FET) وثنائي ضوئي PIN ضمن دائرة متكاملة تدعى PIN-FET.

يمكن النظر إلى الترانزستور الضوئي نوع BJTعلى أنه ترانزستور يتم التحكم بتياره بواسطة الضوء الساقط عليه أو كأنما هناك ثنائي ضوئي وضع في دائرة القاعدة. نرى في الشكل (٩-٧) رموز متعددة للترانزستور الضوئي وفي الشكل (٩-٨) الرمز الشائع للترانزستور الضوئي ونموذج لخصائص المخرج الخاصة به وتأثير شدة الإضاءة. عادة مايكون الترانزستور الضوئي BJT بطيئاً ويصلح للسرعات المنخفضة لأن زمن الصعود $t_r = 10\mu s$.



الشكل (٩ - ٧) رموز الترانزستور الضوئي

يصنع الترانزستور الضوئي PIN-FET على شكل دائرة متكاملة تتكون من كاشف PIN ومضخم FET والهدف من وضعها ضمن دائرة متكاملة هو الإقلال من الضوضاء الداخلية وتحسين الحساسية ، وقد تم تصنيع هذه الدائرة لتعمل بعرض نطاق يتعدى 100MHz .



(ب)

(أ)

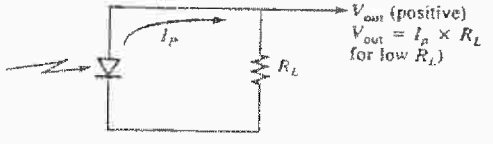
الشكل (٩ - ٨) (أ) رمز شائع للترانزستور الضوئي
(ب) خصائص خرج الترانزستور الضوئي

٩- ٣ دوائر الكواشف Detector Circuits

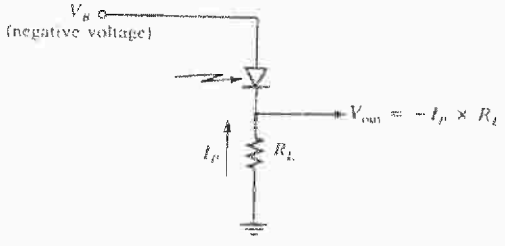
يمكن تشغيل الثنائيات الضوئية بأسلوبين : الأول هو أسلوب الفولت ضوئي Photovoltaic حيث لايستخدم جهد انحياز للثنائي والثاني هو أسلوب الموصل الضوئي Photoconductive في حالة الفولت ضوئي تكون سرعة التشغيل بطيئة والحساسية منخفضة غير أن الدائرة في هذه الحالة غير معقدة . إذ لاتحتاج إلى جهد انحياز. تستخدم الترانزستورات الضوئية في أجهزة التحكم وأنظمة الانذار وأجهزة الترحيل الضوئية Photorelays لأنها لاتحتاج إلى سرعة عالية .

٩-٣-١ دوائر PN و PIN PN and PIN Circuits

تتكون أبسط دائرة كاشف من ثنائي ضوئي ومقاومة حمل load resistor كما هو مبين بالشكل (٩-٩) . نرى في الشكل (٩-٩ أ) أن اتجاه التيار الضوئي بعكس اتجاه استقطاب الثنائي . مما يجعل الثنائي يتصرف وكأنه بطارية . أو بصورة أدق كمنبع تيار يمثل المصعد anode طرفه الموجب . وهذا هو إتجاه التيار المستقطب عكسياً . يصبح الثنائي مستقطب للأمام بجهد كمونه potential المولّد . هذا الأسلوب من التشغيل بطيء كما أن الضوضاء الداخلية قليلة لأن تيار الظلام I_d قليل وترتفع قيمة التيار الضوئي I_p . للحصول على دوائر أكثر عملية نستخدم مضخمات التشغيل كما هي في الشكل (٩-١٠) . إن التيار الداخل إلى مضخم التشغيل هو التيار الضوئي. في كلتا الدائرتين يكون الجهد عبر الثنائي ثابتاً لأن النقطة A تمثل أرضي مجازي virtual ground بجهد صفري.



(أ)



(ب)

الشكل رقم (٩-٩) دوائر الثنائي الضوئي

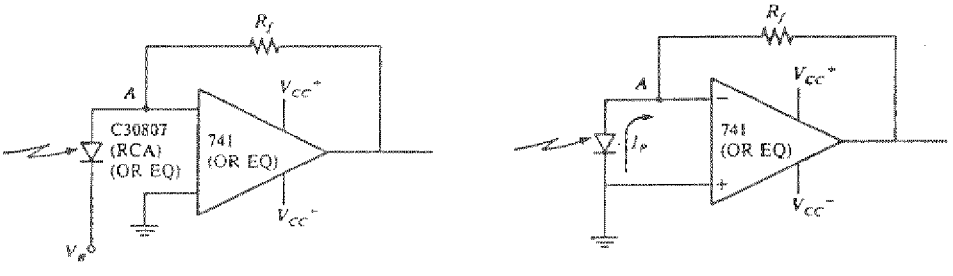
(أ) فولت ضوئي Photovoltaic (ب) ذي موصلة ضوئية

يعمل الثنائي في الدائرة بالشكل (٩ - ١٠ أ) بجهد انحياز مقداره صفر . يتكون التيار الضوئي من التيار الضوئي لدائرة القصر بمقاومة حمل مقدارها صفر ، تعطي هذه الدائرة تشغيلاً مستقراً مقارنه بالدائرة في الشكل (٩-٩ أ) . وهي أيضاً أبطأ من الدائرة المذكورة في الشكل (٩-١٠ب) . يعطى جهد الخرج لكلتا الدائرتين في الشكل (٩-١٠) بالمعادلة التالية :

$$V_{out} = - I_P \times R_f \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9.13)$$

حيث أن R_f هي مقاومة التغذية الراجعة feedback resistor . يمكن الحصول على I_P من استجابية الثنائي إذا كانت القدرة البصرية الساقطة على الثنائي معروفة وذلك باستخدام المعادلة (9.1) وهي أن :

$$I_P = \rho P_{in}$$



(ب) (أ)

الشكل (٩-١٠) كواشف ضوئية مع مضخمات تشغيلية

(أ) فولت ضوئي Photovoltaic (ب) ذي موصلة ضوئية

٩-٣-٢ دوائر PIN- FET PIN-FET Circuits

تمثل الدائرة في الشكل (٩-١١) أبسط الدوائر المستخدمة في المستقبلات الضوئية التي تستخدم ثنائي PIN للكشف تليها دائرة مضخم يستخدم ترانزستور FET. يصنع ترانزستور FET من سبيكة زرنيخ الجاليوم Ga As والذي يمتاز بقلة الضوضاء. لايجاد قيمة V_{out} في الدائرة بالشكل (٩-١١) يجب أولاً حساب قيمة V_{in}.

$$V_{in} = I_p \times R_L // R_G \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (9.14)$$

ومن تحليل دائرة ترانزستور FET المكافئة نجد أن كسب الجهد للترانزستور هو:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - g_m \times R_D \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (9.15)$$

حيث أن g_m هي المواصلة العابرة التشغيلية operating transconductance لترانزستور FET وتقاس بالسيمنز Siemens و R_D هي مقاومة المصب drain resistance.

مثال : أوجد قيمة $V_{out\ p\text{-}p}$ (قيمة جهد الخرج من الذروة إلى الذروة Peak - to - peak output voltage) للدائرة المبينة في الشكل (٩-١١) إذا كانت $g_m = 2.5ms$, $\rho = .6A/w$. تتراوح القدرة الضوئية الداخلة بين $0.5\mu w$ و $1.5\mu w$. وقيمة الذروة للقدرة البصرية هي $1\ \mu w$.

الحل :

قيمة التيار الضوئي من الذروة للذروة I_{pp-p} :

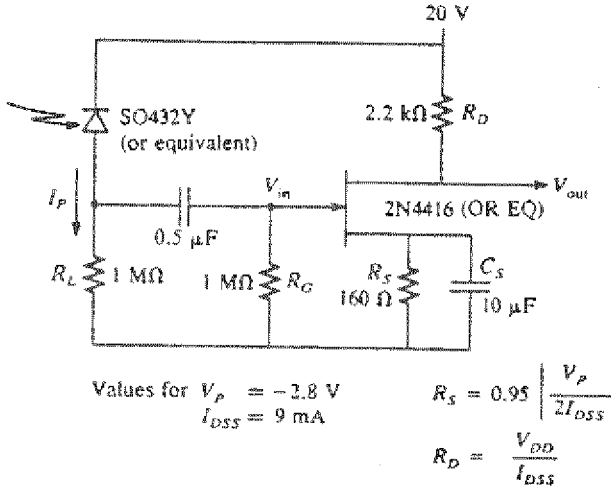
$$I_{pp-p} = \rho \times P_{inp-p} = 0.6 \times 1 \times 10^{-6} = 0.6\mu A$$

من المعادلة (9.14) نجد أن :

$$V_{in\ p-p} = I_p \times R_L // R_G = 0.6 \times 10^{-6} \times IM\Omega // IM\Omega$$
$$= 0.3V$$

من المعادلة (9.15)

$$V_{out\ p-p} = -g_m R_D V_{in\ p-p}$$
$$= -2.5 \times 10^{-3} \times 2.2 \times 10^{3} \times 0.3 = -1.65\ V$$



الشكل (٩-١١) دائرة مضخم ضوئي نوع FET

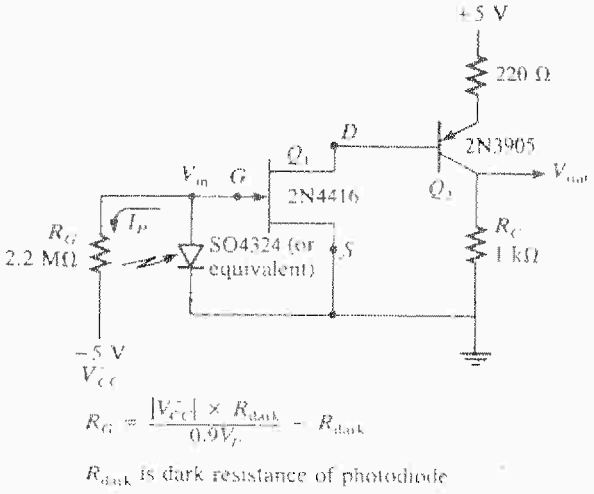
تستخدم الدائرة المبينة بالشكل (٩-١١)للإشارات التماثلية ولاتصلح للإشارات الرقمية لاحتوائها على تيار مستمر. حيث أن هذه الدائرة لاتستجيب جيداً للتيار المستمر. لذا تستخدم الدائرة المبينة في الشكل (٩-١٢) للإشارات الرقمية . عندما تكون قدرة الدخل صفر أو حالة غلق OFF فإن ترانزستور FET يكون في حالة قطع cut off . أي أن الجهد Vgs عبر الثنائي وهو الجهد المتردد بين البوابة Gate والمنبع Source يجب أن يكون سالباً أكثر من جهد البنر Pinch off Voltage.

يعتمد ذلك على قيمة R_G وتيار الظلام I_d لأن التيار الضوئي I_p يساوي صفر.

لذا فإن :

$$V_{gs} = -5 + (I_p + I_d)\ R_G \quad \ldots\ldots\ldots (9.16)$$

عند هذه الشروط تكون قيمة V_{out} صفراً . (ترانزستور Q_2 مقفل). عندما يكون دخل المنطق 1 يصبح مستوى القدرة البصرية كافياً لجعل V_{gs} قادرة على تشغيل ترانزستور FET عندها تكون قيمة V_{out} حوالي +5V .



الشكل (٩ - ١٢) دائرة مضخم ضوئي نوع FET للاشارات الرقمية

٩-٣-٣ دوائر APD APD Circuits

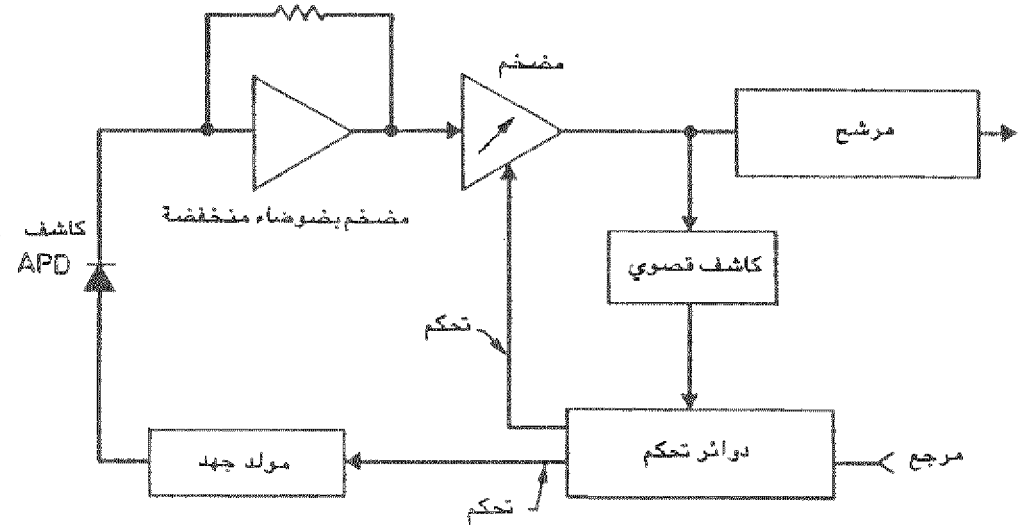
إن الدوائر المستخدمة في تشغيل الثنائيات الضوئية الجرفية APD أكثر تعقيداً من تلك المستخدمة مع الكواشف الأخرى للأسباب التالية:

(١) تأثر الاستجابية بجهد الانحياز ودرجة الحرارة كما في الشكل (٩-٣) مما يؤثر على قيمة الكشف .

(٢) يحتاج إلى جهد مرتفع لتشغيله يتراوح بين 20V و 500V .

(٣) زيادة الضوضاء نتيجة الطبيعة العشوائية لآلية الكسب.

يبين الشكل (٩-١٣) مخططاً صندوقياً لدوائر التحكم في كسب ثنائي APD . عند سقوط الضوء على ثنائي APD يتولد تيار عند خرج الثنائي ويمثل هذا التيار دخل المضخم منخفض الضوضاء . يتبع ذلك مضخمات أخرى ودوائر تغذية راجعة تتولى التحكم بجهد الانحياز المطبق على الثنائي والاقلال من تأثير تغير درجة الحرارة على كسب الثنائي والحصول على تيار ثابت ضمن عرض نطاق محدد .



الشكل (٩-١٣)دائرة تغذية راجعة للتحكم في كسب ثنائي APD

٩-٤ الخلاصة Summary

تدمنا في هذا الفصل الخصائص العامة للكواشف المستخدمة في نظم الاتصالات البصرية. تمثل العلاقة بين القدرة البصرية الواردة والتيار الكهربائي المتولد في الكاشف، والتي تسمى بالاستجابية ، أهم خصيصة من الخصائص الآنف ذكرها.

يمثل الثنائيان الضوئيان PIN و APD أكثر الأنواع استخداماً في نظم الاتصالات الليفية البصرية . غير أن ثنائي PIN يمتاز برخص ثمنه وقلة حساسيته لدرجة الحرارة ويتطلب جهد انحياز عكسي أقل مما يتطلبه ثنائي APD . إن سرعة الثنائيين متقاربة لذلك يفضل استخدام ثنائيPIN في معظم الأنظمة . يقتصر استخدام ثنائي APD عندما يكون فقد النظام الليفي البصري مرتفعاً . لذا فإن كسب هذا الثنائي يجعله قادراً على كشف مستويات قدرة تقل عن تلك التي يستطيع ثنائي PIN كشفها. تمكن هذه الخاصية من زيادة المسافات بين المكررات . لرفع كسب PIN استخدمت دوائر متكاملة تحتوي على ثنائي PIN ملحق به مضخم ترانزستور FET.كما أدت المشاكل التي واجهت استخدام APD في منطقة الأطوال الموجية الطويلة إلى الرجوع للترانزستورات الضوئية نوع BJT.

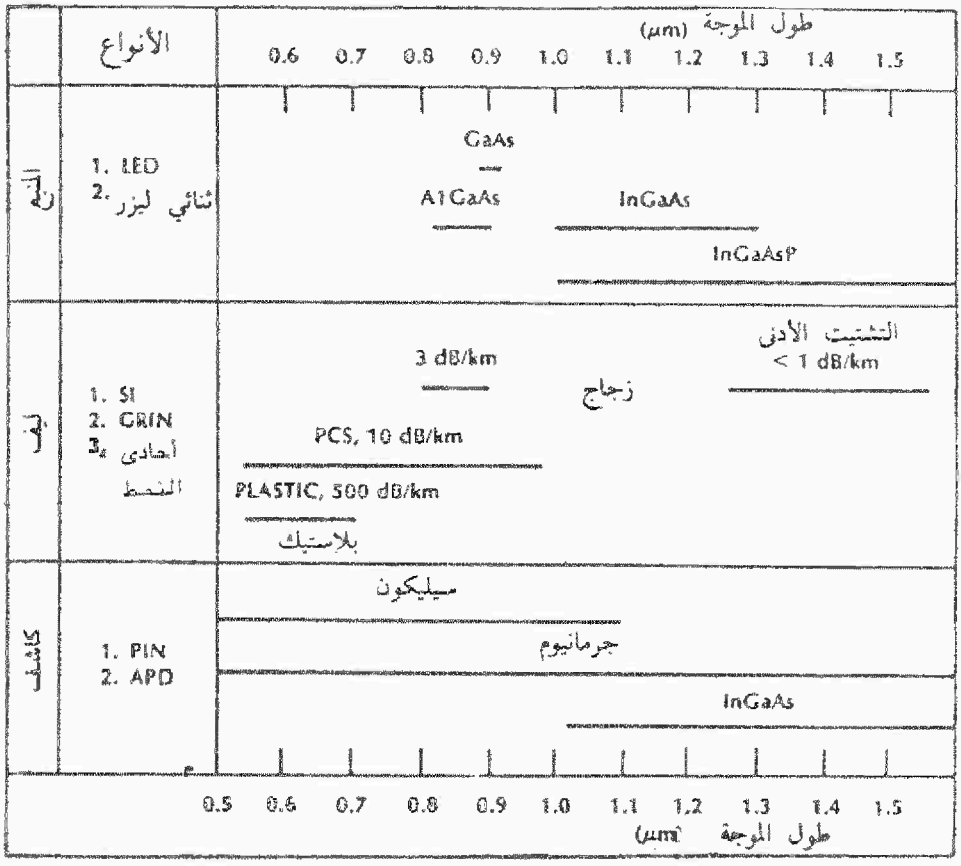
تصنع الثنائيات الضوئية من مواد شبه موصلة مثل السليكون والجرمانيوم وسبائك زرنيخ الجاليوم . يعتمد نوع المادة على الطول الموجي لاختلاف استجابية المواد لمدى الأطوال الموجية المختلفة .

نقدم في الجدول (٩-١) المعلمات المهمة للكاشفات الضوئية PIN و APD .

جدول (٩-١) مَعْلَمات الكاشفات الضوئية PIN و APD

المادة البنية	الطول الموجي	الاستجابية	زمن الصعود	الكسب	تيار الظلام
	nm	A/W	ns		na
السليكون PIN	300-1100	0.5	.5	1	1
الجرمانيوم PIN	500-1800	07	0.1	1	200
PIN In Ga As	1000-1700	0.6	0.3	1	10
سليكون APD	400-1000	77	0.5	150	15
جرمانيوم APD	1000-1600	30	1	50	700

بتقديم الكواشف الضوئية ودوائرها في هذا الفصل نكون قد قدمنا العنصر الرئيسي الثالث من عناصر وصلة الاتصالات الليفية البصرية التي تتكون من جهاز الارسال وهي المنبع ودوائره وقناة الاتصال ممثلة في الليف البصري وجهاز الاستقبال وتشمل الكاشف الضوئي ودوائره . يستطيع المصمم للنظام الليفي البصري في هذه المرحلة من تحديد متطلبات العناصر المختلفة لذلك النظام . من هذه العناصر (١) الطول الموجي (٢) نوع المنبع (٣) مادة الليف (سليكا أو بلاستيك) (٤) نوع الليف (عتبي ، متدرج ، متعدد النمط ، أحادي النمط) (٥) الكاشف الضوئي(PIN أو APD). تلخص في الشكل (٩-١٤) العناصر الرئيسية لنظام اتصالات ليفي بصري ، بالإضافة لذلك لابد من اعتبار ميزانية القدرة للنظام واحتساب الفقد الناتج عند المقارن Couplers والموصلات Connectors والوصلات الدائمة Splices .



الشكل (٩ - ١٤) المكونات الرئيسية لنظام اتصالات بالألياف البصرية

الفصل التاسع

أسئلة

١ - ماهي خصائص الكواشف الضوئية ؟

٢ - ماهي الاستجابية وماأهميتها للكاشف الضوئي؟

٣ - عرف الكفاءة الكمية للكاشف وكيف تقارنها بالكفاءة الكمية للمنبع؟

٤ - كيف يولد تيار الظلام وماعلاقته بتغير درجة الحرارة ؟

٥ - على أي شيء يعتمد عرض النطاق للكاشف؟

٦ - ماهي أنواع الكواشف الضوئية ؟ قارن بينها .

٧ - هل تعمل الكواشف بانحياز أمامي أو انحياز عكسي ؟

٨ - هل تتأثر الاستجابية بزيادة أو نقص المساحة الفعالة للكاشف ؟ أوضح ذلك.

٩ - ماسبب الضوضاء في الكاشف ؟

١٠- إشرح طريقة تشغيل الثنائي الفولت ضوئي؟

مسائل

١ - أوجد قيمة تيار الخرج لكاشف ضوئي له استجابية مقدارها 0.6A/w وقدرة الدخل -30dBm؟

٢ - أوجد قيمة تيار الخرج لكاشف ضوئي كفاءته الكمية تساوى 60% وقدرة الدخل -30dBm عند $\lambda = 1.3\ \mu m$ ؟

٣ - أوجد قيمة جهد الخرج للمسألة رقم ٢ إذا كانت مقاومة الحمل $R_3 = 1\ K\Omega$ ؟

٤ - ماهو أقصى طول موجي يمكن لثنائي ضوئي أن يكشفه إذا كانت طاقة الثغرة تساوي 1.4ev .

٥ - إرسم الاستجابية مقابل أطوال موجية تتراوح بين $\lambda = 0.5\mu m$ و $\lambda = 1.6\mu m$. (أفرض أن الكفاءة الكمية 80%).

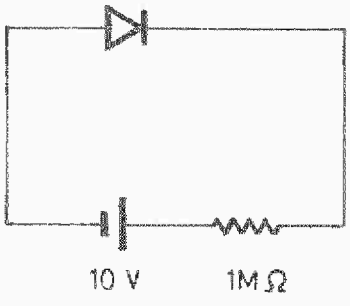
٦ - إذا كان تيار الظلام لكاشف ضوئي نوع PIN هو 0.05nA عند درجة حرارة $20c^{\circ}$ ويتضاعف كل $10c^{\circ}$ إحسب تيار الظلام وارسمه بيانياً لدرجات حرارة تتراوح بين $20c^{\circ}$ و $100c^{\circ}$.

٧ - ماهي القدرة الدنيا التي يمكن كشفها من قبل ثنائي PIN له استجابية مقدارها 0.6A/w وتيار ظلام 1nA .

٨ - في الدائرة التالية تبلغ الاستجابية 0.5A/w وتيار الظلام 0.5 nA وجهد الانحياز 10v ومقاومة الحمل 1MΩ .

أ - إرسم بيانيا التيار مقابل الجهد للثنائي في منطقة التوصيل الضوئي لقيم قدرة تتراوح بين 10 µw و100µw ويفارق 10 µw .

ب - ارسم منحنى جهد الخرج بدلالة قدرة الدخل البصرية .



دائرة المسألة رقم ٨

٩ - احسب إستجابية ثنائي ضوئي جرفي (APD) يعمل عند $\lambda = 0.82\ \mu m$ وكفاءة كمية تساوى 0.75 وكسب يساوي 90 .

مامقدار القدرة البصرية المطلوبة لهذا الكاشف كي ينتج 20nA ؟

١٠ - احسب استجابية ثنائي ضوئي جرفي (APD) يعمل عند $\lambda = 1.5\ \mu m$. وكفاءة كمية تساوي 0.7 وكسب يساوي 20 . مامقدار القدرة البصرية لهذا الكاشف لكي ينتج 20nA ؟

الفصل العاشر

قياسات الألياف البصرية

الفصل العاشر
قياسات الألياف البصرية
Optical Fiber Measurements

تبدأ قياسات الألياف البصرية قبل تصنيع الليف البصري حيث تفحص التشكيلة الأولية preform فحصاً دقيقاً للتأكد من دقتها هندسياً وتجانس معامل الانكسار فيها وإذا ثبتت عدم صلاحيتها لاتستخدم لانتاج الليف وخلال انتاج الليف يتولى المصنّع فحص سماكة وتمركز concentricity اللب والطبقة الواقية.

ويتولى المصنّع أيضاً فحص العناصر والمكونات التي تستعمل في شبكة الإتصالات البصرية. والقياسات التي يتعرض لها الليف هي : التوهين ، عرض النطاق (لليف متعدد النمط) ، فتحة النفوذ العددية (لليف متعدد النمط) ، طول موجة القطع (لليف أحادي النمط) ، قطر الحقل النمطي (لليف أحادي النمط) ، تشتيت اللون chromatic dispersion ، الاستقطاب (لليف أحادي النمط) ، فقد الثني ، القوة ، الاجهاد ، مقاومة الظروف البيئية (الحرارة ، الغمر ، الهيدروجين ، الإشعاع النووي ، اللوي torsion إلخ.

تعمل هذه القياسات أو بعضها لفائدة المستفيد ، وقد يتولى بعض منها المصنّع وذلك حسب نوعية الاستخدام وشروط المستفيد ، ويستمر فحص الليف البصري بعد تصنيعه ضمن كابل بصري ، والعناصر الهامة في هذه الحالة هي التوهين ، عرض النطاق (لليف متعدد النمط) ، اللغط crosstalk ، فقد التوصيل الدائم splicing loss ، شد الكابل مقارنة بشد الليف ومقاومة الكابل للظروف البيئية . بعد تركيب الكابل البصري تعمل القياسات التالية : التوهين ، تشتيت اللون (لليف أحادي النمط) عرض النطاق (لليف متعدد النمط) ، فقد التوصيل ، الاستقطاب ، القدرة الموصلة من المنبع ،

القدرة الموصلة للكاشف ، نسبة الإشارة إلى الضجيج ، معدل خطأ البتات BER. وسيوجه هذا الفصل للمستفيد حتى يتمكن من التعرف على المعلمات parameters اللازم قياسها وطرق التقييس المستخدمة ، وقد تكون أجهزة القياس ثابتة كما هو في المختبرات والمصانع أو تكون محمولة كما هو الحال في الميدان، والأجهزة المحمولة عادة ماتكون صغيرة وتعمل بالبطارية .وتستخدم بعض الأجهزة لقياس عدد من المعلمات الوارد ذكرها ، وقد وضعت أسس لهذه القياسات تولت هيئات متخصصة وضع تفصيل لشروط القياس لكل مَعلَمَة من المَعلَمَاتْ السابقة التي صدرت في الولايات المتحدة و CCITT وهناك مواصفات مماثلة تصدر في أوروبا واليابان ، ويتركز الشرح في هذا الفصل على القياسات القياسية standardized measurements .

١٠-١ قياسات القدرة Power Measurements

تعتبر قياسات القدرة من الأساسيات الهامة لطرق الاختبار المستخدمة في أنظمة الألياف البصرية حيث تتغير القدرة مع الطول الموجي والوقت ، وقد تكون مستمرة أو مشكلة بموجات تماثلية أو رقمية كما أنها تتغير حسب الزاوية ومكان القياس بالإضافة إلى تغيرها مع الاستقطاب .

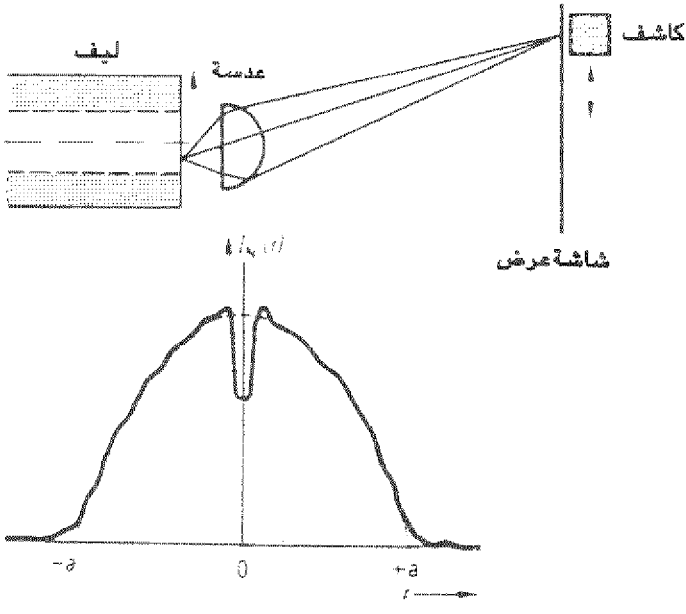
١٠-١-١ المنابع والكواشف Sources and Detectors

تعتبر لمبات هالوجين التنجستن (Tungsten Halogen) من أهم المنابع المستخدمة لقياس القدرة في الألياف البصرية لاحتوائها على مدى واسع من الموجات وإذا أردنا الحصول على طول موجي معين فما علينا إلا استخدام مرشح أو محزز الانعراج أو معلل طيفي كي يمرر اللون المرغوب ، أما الكاشف فعادة مايكون من السليكون الحساس حتى 1050nm وإذا كان الطول الموجي أكبر من ذلك يستخدم كاشف مصنوع من سبيكة مكونة من الفوسفات والزرنيخ والجاليوم والأنديوم (In Ga As P). ويمكن استخدام كواشف الجرمانيوم إذا كانت كثرة الضوضاء وقلة الحساسية الناتجة من كاشف الجرمانيوم

لاتؤثر كثيراً على النتيجة .

٢-١-١٠ توزيع الحقل Field Distribution

يتطلب استخدام نظام الاتصالات البصرية معرفة توزيع القدرة البصرية في الحقل القريب والبعيد وذلك لتحديد كمية القدرة الناتجة من المنبع والداخلة إلى الليف وكذلك القدرة الخارجة من الليف والداخلة للكاشف. إن قياس شدة الاضاءة يعتمد على المسافة من المنبع فإذا كانت المسافة قريبة جداً فإننا نتحدث عن توزيع القدرة أو شدة الإضاءة في الحقل القريب. وهناك نشرات عديدة توضح كيفية قياسها فعند قياس شدة الإضاءة قرب سطح ثنائي باعث للضوء LED أو نهاية ليف بصري ، فيمكن الرجوع إلى النشرة رقم (FOTP-43) والموضحة بالشكل(١٠-١) حيث نرى عدسة صغيرة وضعت أمام المصدر لتكبير مساحة الانبعاث، ويستخدم كاشف أو مجموعة كواشف لمعرفة توزيع الحقل.



الشكل (١٠-١) قياس توزيع الحقل القريب

أما إذا كانت مسافة القياس بعيدة عن المصدر فإننا نتحدث عن توزيع الحقل البعيد ونوضح ذلك في الشكل (١٠-٢ أ) ويمكن الرجوع إلى النشرة رقم (FOTP-47) لمزيد من التفاصيل . حيث أن المسافة Z بين الكاشف والباعث للضوء بقطر d يجب أن تحقق في المعادلة التالية :

$$Z > \frac{(10\,d)^2}{\lambda} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.1)$$

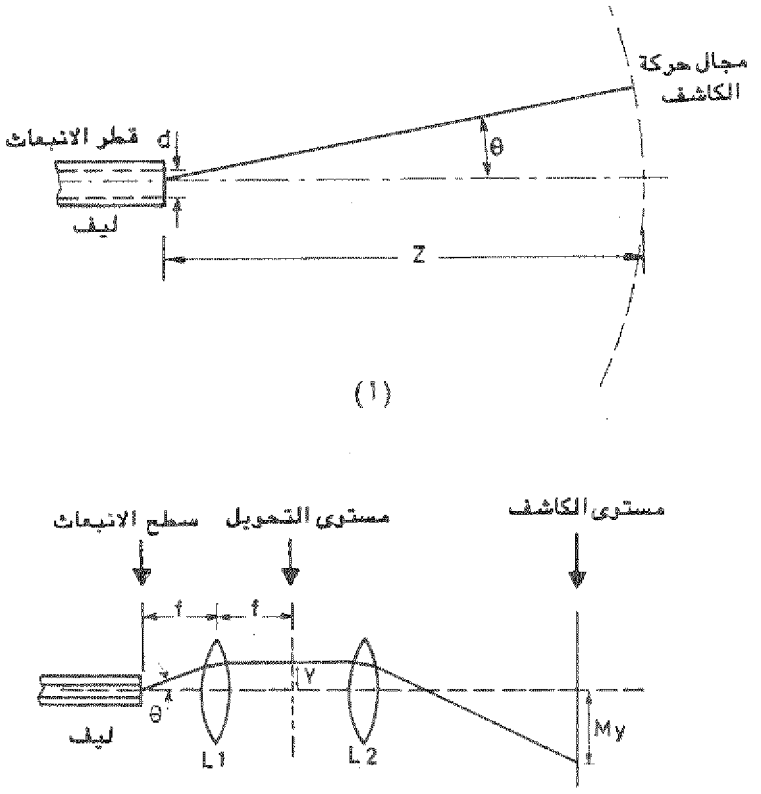
حيث أن :

λ هو طول موجة الضوء المستخدم ، و d هو قطر الليف متعدد النمط أو قطر الحقل النمطي لليف أحادي النمط .

والشرط المذكور في المعادلة (10.1) يضمن أن المنبع يبدو للكاشف كنقطة أو مصدر صغيراً جداً . ولاعطاء القاريء فكرة عن قيمة Z في المعادلة (10.1) نفرض أن d=10mm . لنحصل على Z = 1.2m ، فإذا قلت d عن القيمة السابقة فإن Z ستقل أيضاً للإقلال من هذه المسافة يمكن استخدام البديل المذكور في الشكل (١٠-٢ ب) والتي تعبر عنها المعادلة التالية :

$$Y = f \sin \theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.2)$$

حيث أن : f هو البعد البؤري للعدسة ، θ هي زاوية الحقل البعيد ، Y موقع القياس في تحويل" فوريير" . وعند استخدام الليف البصري في القياس أو نظم الإتصالات البصرية لابد من تحضير النهايات بصورة جيدة (النشرة FOTP-57) ، حيث نبدأ بإزالة الغلاف الواقي إما بإداة تسليخ الغلاف أو بمحلول كيميائي وربما بالحرق وذلك حسب نوع الليف وتوصيات المصنع . بعد ذلك تتم صنفرة وصقل النهايات وتفحص بواسطة ميكروسكوب للتأكد من نعومتها أو بالامكان تسليط أشعة ليزر الهليوم نيون على السطح المصقول وملاحظة الضوء المنعكس من الليف والساقط على سطح يبعد مسافة معينة من الليف . أو بالامكان استخدام ميكروسكوب تداخل interference microscope (النشرة FOTP-179) لمعرفة نعومة السطح .



الشكل (١٠-٢) توزيع القدرة للحقل البعيد

(أ) الطريقة القياسية

(ب) طريقة بديلة تستخدم العدسات لقياس حقل القدرة البعيد

١٠-١-٣ فقد القدرة في الليف البصري Optical Fiber Power Loss

يتطلب تصميم نظام الاتصالات البصري معرفة القدرة الداخلة والقدرة الخارجة والفرق بينهما يحدد مقدار الفقد في النظام . ولابد من التعرف على أسباب الفقد وكيفية الاقلال منه .

أ - التوهين Attenuation

يعرّف التوهين على أنه الفقد في قدرة الإشارة المارة بالليف. وهناك سببان رئيسان للتوهين هما الامتصاص absorption والتناثر scattering ويعرف الامتصاص على أنه تحويل الضوء إلى حرارة ، وهناك نوعان من الامتصاص أحدهما داخلي والآخر خارجي . يتم الامتصاص الداخلي نتيجة انتقال الألكترونات بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل والذي يقع عند $\lambda = 140nm$ ، ويمثل الامتصاص فوق البنفسجي أو نتيجة حركة الجزيئات، والذي يبلغ حده الأقصى عند $8\mu m$ وهو الامتصاص الحراري.

أما النوع الآخر وهو الامتصاص الخارجي ويشمل الامتصاص نتيجة وجود الشوائب كأيونات OH في مادة السليكا التي تبلغ ذروة اهتزازها عند $\lambda = 2700\ nm$ وكذلك عند $\lambda = 1385\ nm$ و $\lambda = 1245\ nm$ ولكن بصورة أقل. قد يحصل الامتصاص الخارجي أيضاً نتيجة امتصاص الهيدروجين أو بعض المشاكل الأخرى خلال التصنيع .

أما التناثر فهو تحويل الضوء المحصور في الليف البصري إلى موجات متسربة أو مشعة أو عشوائية وقد يحصل التناثر الداخلي نتيجة تغير معامل الانكسار على مستوى الجزيئ ، أو نتيجة الحرارة، أو تراوح التركيب لمكونات الليف البصري.

كما قد يحصل التناثر نتيجة تغير شكل توزيع معامل الانكسار أو الثني. ويدعى هذا بالتناثر الخارجي . أياً كانت المؤثرات أو الأسباب فالكمية التي تقاس دائماً هي التوهين.

فلو فرضنا أن طول الليف هو L_1 كيلومتر و $\alpha(L)$ معامل التوهين (dB/Km) فإن اضمحلال القدرة بين L_1 و L_2 $(L_2 > L_1)$ يعبر عنه بالتالي :

$$P(L_2) = P(L_1)\ 10^{-A/10} \quad \text{..... (10.3a)}$$

حيث أن التوهين الكلي هو

$$A = \int_{L_1}^{L_2} \alpha(L)\, dL.\ dB \quad \text{..... (10.3b)}$$

والوحدات المستخدمة للقدرة P هي الوات أو الملي وات أو الميكروات.

من المعادلة (10.3 a) يمكن التعبير عن التوهين الكلي بين نقطتي القياس بالمعادلة التالية :

$$A = 10 \log \frac{P(L_1)}{P(L_2)} \text{ dB} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10.4)$$

إذا كان التوهين ثابتاً لكل وحده طول فإن معامل التوهين α يعبر عنه بالتالي :

$$\alpha = \frac{A}{L_2 - L_1} \text{ dB/ km} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10.5a)$$

وباستخدام المعادلة (10.4) فإن :

$$\alpha = \frac{10}{L_2 - L_1} \log \frac{P(L_1)}{P(L_2)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10.5b)$$

ب - طرق قياس التوهين Attenuation Measurement Methods

تستخدم ثلاث طرق لقياس التوهين في الليف البصري وهي :-

(١) طريقة القطع .

(٢) طريقة الإدخال أو التعويض.

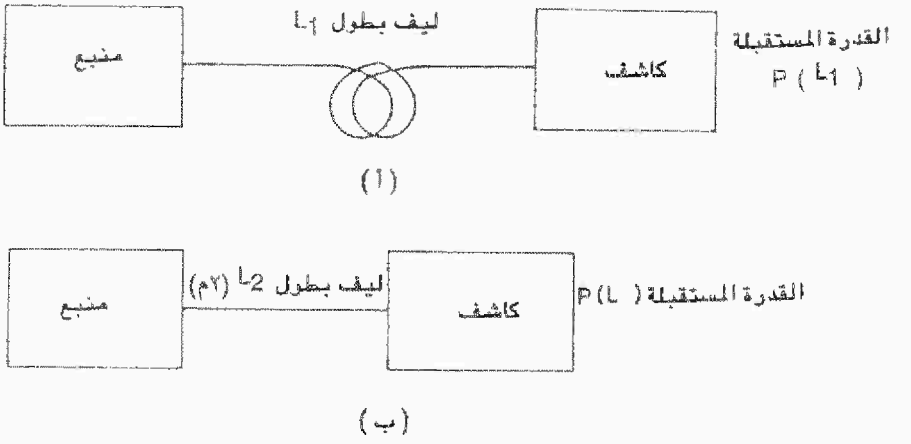
(٣) طريقة التناثر العكسي.

(١) طريقة القطع Cutoff Method

يوضح الشكل (١٠-٣) هذه الطريقة ، حيث تقاس القدرة البصرية في بداية الأمر عند نهاية الليف البصري ولنقل عند النقطة L_2 ثم يقطع الليف في نقطة قريبة من المصدر (حوالي مترين) وتقاس القدرة عند النقطة ولنقل L_1 ، فيصبح عندنا قيمتين للقدرة وطول الليف البصري بين L_1 ، L_2 . ولابد من التأكيد على ابقاء شروط ايصال الضوء لليف كما هي وعدم تغيير الطول الموجي للمصدر. باستخدام المعادلة (10.4) يمكن إيجاد التوهين A:

ومعامل التوهين α يوجد من المعادلة (10.5).

لاتخلوا هذه الطريقة من مشاكل عملية حيث تتطلب قطع الليف والتخلص من الوصلة القصيرة (مترين) بعد قياس التوهين وتحضير النهايات للقياس ، وقد تصلح هذه الطريقة للمختبر أو المصنع ولكنها لاتصلح للقياس في الميدان العملي .



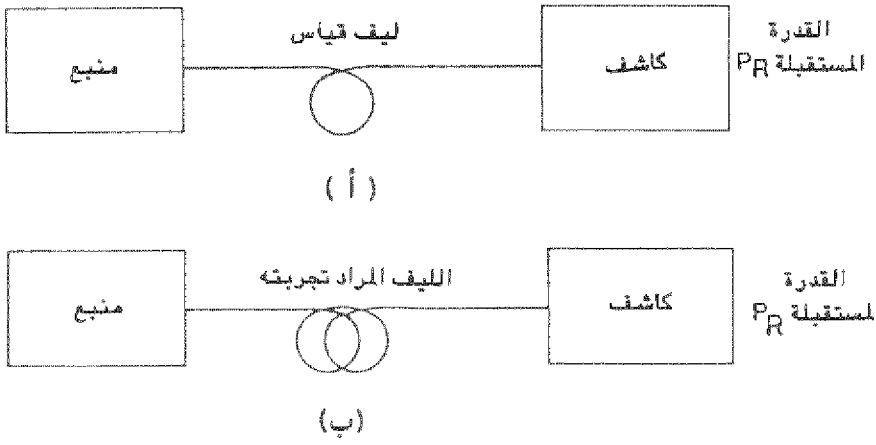
الشكل (١٠-٣) قياس التوهين بطريقة القطع (FOTP - 46)

(٢) طريقة الإدخال والتعويض Insertion or Substitution Method

تتفادى هذه الطريقة مساوىء الطريقة السابقة حيث يستخدم في هذه الطريقة (الشكل(١٠-٤)) نوعان من الليف أحدهما قياسي والآخر الليف المراد قياس توهينه. في بداية الأمر يتم تركيب الليف بين المنبع والكاشف وتقاس القدرة عند الكاشف ولتكن P_R كما في الشكل (١٠-٤ أ) ثم يستبدل بالليف المراد قياس توهينه ولابد من التأكيد على ضرورة إيصال الضوء من المنبع إلى الليف وكذلك الطول الموجي للضوء بنفس الطريقة التي تمت عند استخدام الليف القياسي. تقاس القدرة عند الكاشف P_T كما في الشكل (١٠-٤ب) . يعبر عن توهين الليف A_T بالمعادلة التالية :

$$A_T = A_R + 10 \log \frac{P_R}{P_T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10.6)$$

حيث أن A_R هو توهين الليف القياسي. ولابد من الإشارة إلى أن الليف القياسي له مواصفات شبيهه بالليف المراد قياس توهينه .



الشكل (١٠- ٤) قياس التوهين بطريقة الإدخال والتعويض (FOTP - 53)

(٣) طريقة التناثر العكسي Backscattering Method

يتم في هذه الطريقة إرسال الضوء واستقباله من نهاية واحده لليف كما في الشكل (١٠-٥)، حيث تعتمد طريقة القياس هذه على التناثر العكسي نتيجة تناثر رالي Rayleigh scattering . وعند قياس قدرة الموجات الراجعة يؤخذ بعين الاعتبار توهينها أثناء الرجوع .ومن خلال قياس قدرة الضوء المنعكس وزمن الانتقال transit time يمكن معرفة معامل التوهين على طول الليف البصري كما في الشكل (١٠-٦). إن قيمة التناثر العكسي في بداية الليف عالية للاختلاف في قيمة معامل الانكسار. وبقياس الزمن Δt بين القيمتين، يمكننا إيجاد طول الليف المقاس حيث أن :

السرعة = $\frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}}$ ، وحيث أن الزمن الكلي للذهاب والمجيء هو Δt ، فيمكن التعبير عن طول الليف L بالتالي :

$$L = \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{c}{n}$$

حيث أن : طول الليف بالكيلومتر = L

الزمن بين النبضة الأولى والأخيرة بالثانية = Δt

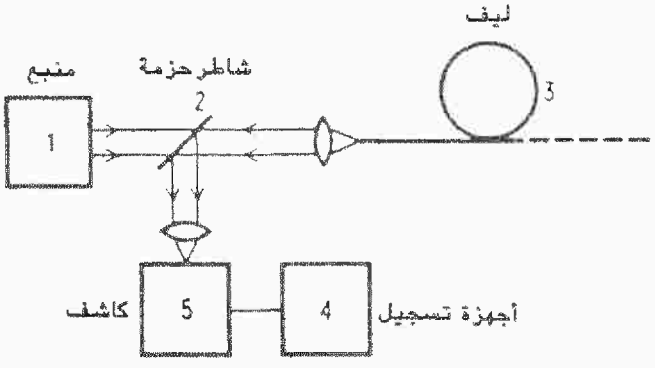
سرعة الضوء. $c = 3 \times 10^8$ m/s

معامل الانكسار = n

ومعامل التوهين α :

$$\alpha = \frac{5}{L_2 - L_1} \log \frac{P(L_1)}{P(L_2)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10.7)$$

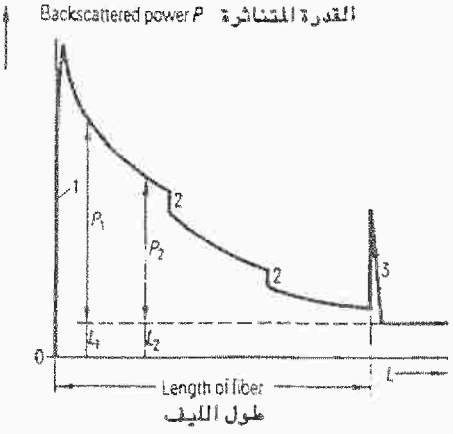
نلاحظ أن الرقم 10 استبدل بالرقم 5 في هذه المعادلة لأن الضوء يذهب ويرجع ثانية. ولابد من التأكيد على أن هذه المعادلة صحيحة إذا كانت قيم معامل التناثر وفتحة النفوذ العددية وقطر اللب على طول الليف ثابتة .



الشكل (١٠-٥) قياس التوهين بطريقة التناثر العكسي

نظراً لأن القدرة المنعكسة قليلة جداً مما يتطلب استخدام مستقبل بحساسية عالية. وتستخدم لهذا الغرض أجهزة تدعى optical time domain reflectometer OTDR ، بالإضافة إلى قياس التوهين يمكنها أن تحدد مواقع الكسور fractures والفقد نتيجة الموصلات والمقارن والتوصيلات الدائمة .

ولابد من الإشارة إلى أن التوهين الكلي يمكن قياسه بمعرفة مقدار القدرة الضوئية المرسلة من المنبع ومقدار القدرة الضوئية المستلمة عند الكاشف، ولكنها لاتعطينا مقدار الفقد في العناصر المختلفة لليف كالموصلات والمقارن وغيرها . ولمزيد من المعلومات عن هذه الطريقة يمكن الاطلاع على المواصفات الوطنية الألمانية رقم DIN VDE 0472 الجزء 252، والمواصفات العالمية رقم ورمز IEC 793-1-C_1 , C_2 ، أما طريقة التناثر العكسي فيمكن الرجوع إلى النشرات التالية :DIN VDE 0472 الجزء 251 و IEC 793-1- C3 ،والنشرات ذات العلاقة المذكورة في آخر الفصل وهي FOTP-59 , FOTP-61 و FOTP- 60 , FOTP-.



الشكل (١٠- ٦) منحنى قياس التناثر العكسي . التناثر العكسي في بداية الليف عند الرقم 1 والتناثر العكسي عند الوصلات عند الرقم 2 والتناثر العكسي في نهاية الليف عند الرقم 3

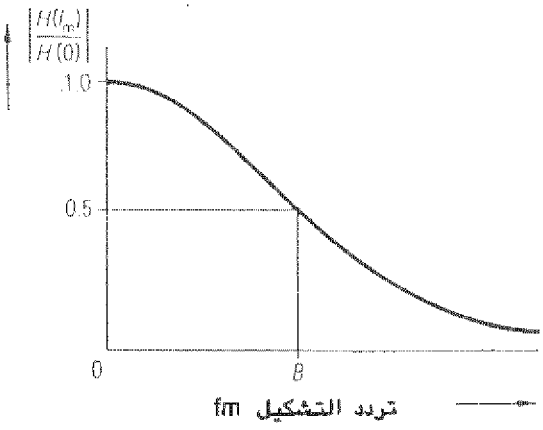
١٠-٢ عرض النطاق Bandwidth

يشكل عرض النطاق العنصر الثاني من حيث الأهمية لمعرفة خصائص نقل المعلومات عبر الليف البصري ، وعادة مايستخدم حاصل ضرب عرض النطاق في مسافة النقل. يعطي التوهين مقدار فقد القدرة عبر الليف البصري بينما يعطي عرض النطاق مؤشراً عن التشتيت في الليف البصري حيث يؤدي التشتيت إلى توسعة النبضات وشغلها لحيز كبير مما يؤدي إلى تداخلها . ويعد ذلك من عدد الترددات فهذا يعني أن الليف البصري يبدو كمرشح تمرير منخفض low pass filter أي أن اتساع الموجه الضوئية ينخفض بازدياد تردد التشكيل fm لذا فإن الليف البصري يسمح بمرور الترددات المنخفضة ويزداد التوهين بازدياد التردد إلى أن تختفي الإشارة. بقياس اتساع القدرة الضوئية عند ترددات التشكيل في بداية الليف $P_1(fm)$ ونهايته $P_2(fm)$ وإيجاد نسبة الاتساع في الحالتين نعبر عن دالة النقل بالتالي :

$$H(fm) = \frac{P_2(fm)}{P_1(fm)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.8)$$

حيث أن $H(fm)$ بدلالة (fm). وعادة مانقيس $H(fm)$ بتقسيمها على $H(o)$ حيث أن $H(o)$ هي دالة النقل عند $fm = 0Hz$ أي بدون تشكيل عادة مايكون شكل دالة النقل في الليف البصري جاوسي Gaussian كما في الشكل (١٠-٧) حيث يقاس عرض النطاق بين نقطتين الأولى عندما تكون القدرة الضوئية بدون تشكيل $(fm = 0Hz)$ والثانية عندما تكون القدرة الضوئية لتردد التشكيل نصف القدرة الضوئية قبل التشكيل أو تسمى 3 db point ويعبر عنها بالتالي :

$$\frac{H(fm = B)}{H(o)} = 0.5 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.9)$$



الشكل (١٠-٧) دالة التحويل لليف بصري

١٠-٢-١ قياس عرض النطاق Bandwidth Measurements

يتأثر عرض النطاق بعوامل كثيرة من أهمها المنظر الجانبي أو شكل معامل الانكسار والذي يمكن إيجاده لليف متعدد النمط وأحادي النمط (النشرة(FOTP-44) ، أو استخدام القياسات الخاصة بالحقل القريب لمعرفة توزيع القدرة حيث هناك علاقة بين توزيع القدرة وشكل معامل الانكسار n(r) (النشرة FOTP-43) ، وهل يسمح بحصول تشتيت نمطي أم لا؟. أما العامل الآخر فيتعلق بإيصال القدرة البصرية لليف البصري وعدد الأنماط الممكن إثارتها في الليف من خلال زاوية سقوط الضوء وفتحة النفوذ العددية ، ولمزيد من التفاصيل يمكن الرجوع إلى النشرات رقم , CCITT G650) FOTP-54 , FOTP-43 , FOTP-177) .

سبق وأن ذكرنا أن قيم التوهين تتناسب طردياً مع طول الليف البصري .وهذا صحيح تحت شروط معينة لقياس عرض النطاق. وفي الواقع نجد أن اعتماد عرض النطاق على طول الليف يمكن التعبير عنه بالمعامل γ والذي يعتمد على طول الليف وفي هذه الحالة يمكن استخدام المعادلة التالية :

$$\frac{B}{B_1} = \left(\frac{L}{L_1}\right)^{-\gamma} \quad \text{..... (10.10)}$$

حيث أن : B :عرض نطاق النظام (MHz)

B_1 : عرض نطاق الليف عند L_1 (MHz)

L : طول الليف البصري (km)

L_1 : طول الليف L_1 عادة مايكون 1km عند عرض نطاق B_1

γ : عامل

وتتراوح قيمة γ بين 1 في بداية الليف البصري وتصل إلى0.5 للمسافات الطويلة. وفي المسافات المتوسطة تتراوح بين 1.0 و 0.5 . والطريقة الوحيدة لقياس γ عملياً تتم عن طريق قياس عرض النطاق بدلالة طول الليف L مما يعني قطع الليف إلى قطع صغيرة وهو حل غير عملي، وغير مقبول. لذا لابد من اللجوء إلى طرق أخرى لمعرفة عرض النطاق B وقيمة دالة التحويل H(fm) وتستخدم لذلك طريقتان (١) القياس في مجال التردد Measurement in the frequency domain .

(٢) القياس في مجال الزمن Measurement in the time domain

(١) القياس في مجال التردد

سبق أن ذكرنا عند تعريف دالة التحويل أن قيمة قدرة الضوء لتردد التشكيل fm تتغير مع التردد fm وتنخفض كلما ابتعدنا عن المركز كما هو في الشكل (١٠-٧). وعندما تصل قيمة القدرة الضوئية إلى النصف فهذا يعني أن هذا هو الحد الأعلى لتردد التشكيل fm . أي لو أن القدرة المرسلة من المرسل هي P_1 (fm) بحيث أن قيمة هذه القدرة تظل ثابتة ولاتتأثر بالتردد ، فإن عرض النطاق يمكن معرفته بقياس قيمة القدرة عند جهاز الاستقبال حيث تسجل قيمته بدون تشكيل، ثم نبدأ بتغيير قيمة التردد إلى أن تنخفض قيمة القدرة الضوئية P_2 (fm) إلى النصف ، يمثل هذا التردد عرض النطاق B ويسمى عرض النطاق البصري 3dB (يعادل هذا 6dB- الكهربائي) ويمكن معرفة تفاصيل أكثر عن طريقة القياس هذه بالاطلاع على النشرة (FOTP - 30).

(٢) القياس في مجال الزمن

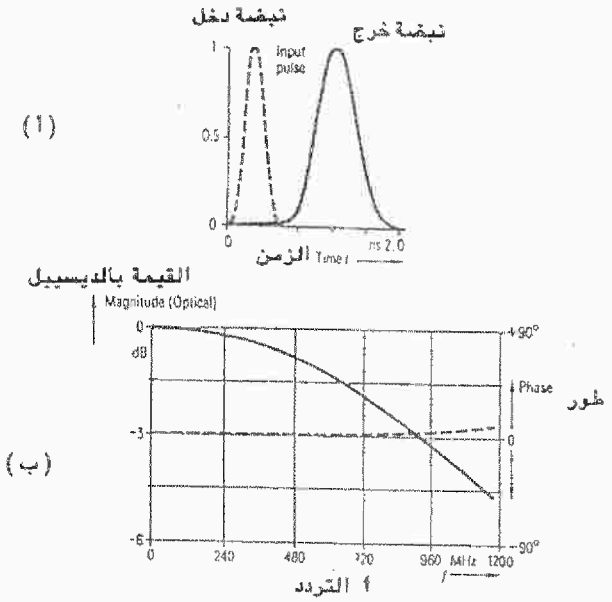
تستخدم هذه الطريقة لقياس توسع broadening النبضات الزمني بسبب التشتيت. لذلك تستخدم نبضات قصيرة (100ps) لتجربة الليف البصري، نظراً لوجود التشتيت المادي والنمطي material and modal dispersion فإن هذه النبضات تتسع عند عبورها خلال الليف البصري. وتستقبل هذه النبضات بواسطة الكاشف في جهاز الاستقبال وتكبر ثم تظهر على شاشة راسم ذبذبات العينات sampling oscilloscope مربوط بجهاز الاستقبال . ثم تجرى هذه التجربة على ليف بصري بطول مترين لمعرفة النبضة الداخلة لليف . فإذا كان جذر متوسط مربع عرض النبضة الداخلة root mean square هو τ_1 وجذر متوسط مربع عرض النبضة الخارجة τ_2 فإن التوسع في جذر متوسط مربع النبضة هو :

$$\Delta\tau = \sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2} \quad \text{..... (10.11)}$$

ويعبر عن عرض النطاق تقريباً بالمعادلة التالية :

$$B = \frac{0.35}{\Delta\tau} \quad \text{..... (10.12)}$$

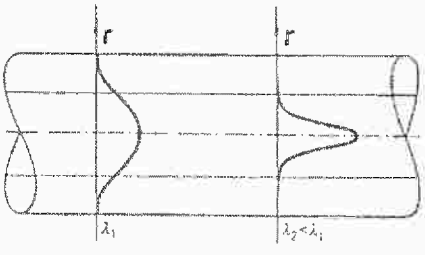
إذا كان شكل النبضة جاوسي. ولمعرفة عرض النطاق في المجال الترددي بدقة أكثر لابد من عمل تحويل فوريير للنبضات من المجال الزمني إلى المجال الترددي وهذا يتطلب معرفة مقدار وطور دالة التحويل لنبضات الدخل والخرج ، حيث أن انخفاض مقدار دالة التحويل إلى النصف عند تردد معين يعني أن هذا التردد يمثل عرض النطاق ، ونرى في الشكل (١٠-٨ أ) نبضات زمنية مقاسة وفي الشكل (١٠-٨ ب) دالة التحويل. ولمزيد من التفاصيل يمكن الرجوع إلى النشرات رقم DIN VDE 0472 Part 253 و IEC 793-1-C4 and C5 والنشرات ذات العلاقة المذكورة في آخر الفصل.



الشكل (١٠ - ٨) قياس عرض النطاق في مجال الزمن

١٠-٣ تشتيت اللون Chromatic Dispersion

تختلف سرعة مرور الموجات الضوئية خلال الليف البصري باختلاف أطوال موجاتها حيث أن معامل الانكسار يتغير بتغير الطول الموجي . أياً كان المنبع الضوئي المستخدم، فإن الضوء المنبعث ليس له طول موجي واحد بل عدة أطوال موجية $\Delta\lambda$ ، ويسمى بعرض الطيف spectral width وهذه الخاصية لمادة السليكا تؤدي إلى تشتيت الموجات عند مرورها بالليف ويسمى هذا التشتيت بالتشتيت المادي material dispersion وتختلف قيمته باختلاف الطول الموجي للضوء المار في الليف البصري.

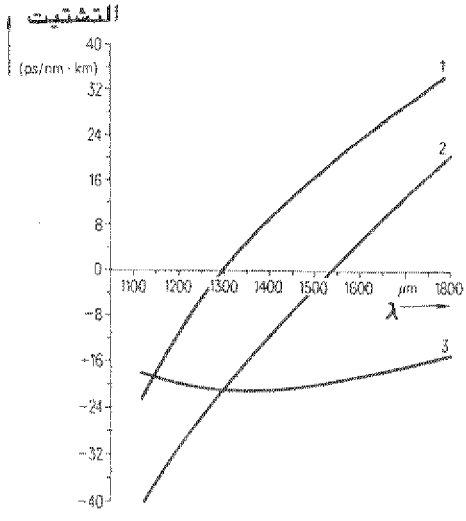


الشكل (١٠- ٩) توزيع الطاقة للنمط الأساسي لطولين موجيين مختلفين

وهناك نوع آخر من التشتيت له أهمية في الليف أحادي النمط حيث يتسع انتشار الموجات المارة بالليف كلما زاد الطول الموجي، أي أن الموجات ذات الطول الموجي العالي يتسع انتشارها فيخرج جزء منها لينتشر خلال الكساء ، الشكل (١٠-٩) . حيث أن معامل الانكسار فيها أقل من اللب وحيث أن سرعة الموجات تعتمد على معامل الانكسار، فإن الجزء المار بالكساء يسير بسرعة أعلى من الجزء المار باللب، وهذا يؤدي إلى تشتيت الموجة ويسمى هذا بتشتيت الدليل الموجي waveguide dispersion وباستخدام المعادلات المذكورة بالفصل الرابع نجد أن مجموع التشتيت المادي وتشتيت الدليل الموجي يعطي تشتيت اللون Mc .

$$M_c(\lambda) = M(\lambda) + M'(\lambda) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.13)$$

عند طول موجي معين λ_o تتعادل قيمة التشتيت المادي وتشتيت الدليل الموجي .وحيث أن أحدهما موجبة والأخرى سالبة، نحصل على قيمة تشتيت تساوي صفر . ونرى في الشكل (١٠-١٠) منحنيات التشتيت حيث أن التشتيت يساوي صفر عند $\lambda = 1300\ \mu m$ والتشتيت المزاح يساوي صفر عند $\lambda = 1500\ \mu m$.



الشكل (١٠-١٠) منحنيات التشتيت في ليف أحادي النمط
(1) تشتيت المادة (2) تشتيت اللون
(3) تشتيت الدليل الموجي

١٠-٣-١ طرق قياس تشتيت اللون Measumemeats Methods of Chromatic Dispersion

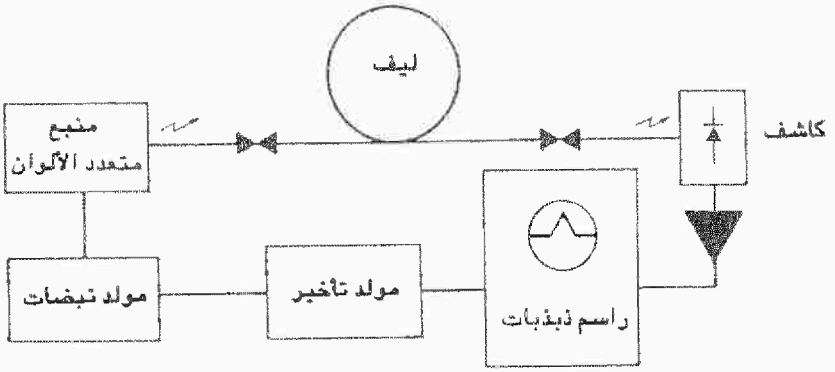
توجد طرق عديدة لقياس تشتيت اللون وتشمل (١) إرسال نبضات قصيرة في ألياف طويلة وقياس توسع النبضات (٢) مسح التردد frequency sweeping. (٣) استخدام نظام تخفيقي heterodyne والتماسك coherence (٤) نظام التداخل interfermometry للألياف القصيرة ، وقد وضعت مواصفات قياسية وصنعت أجهزة للقيام بهذه القياسات.

يتطلب إنجاز قياسات التشتيت وجود منابع تصدر موجات بأطوال مختلفة. وللقياس في مجال الزمن يستخدم منبع ضوئي مكون من ليزر Nd - YAG (نيوديميوم - اتريوم المونيوم جارنت) يرسل نبضات بأطوال موجية مختلفة مع ليف رامان raman غير خطي كما في الشكل (١٠-١١)، حيث يسلط شعاع الليزر على وصلة ليف أحادية النمط مشبعة بالشوائب بطول يبلغ عدة مئات من الأمتار للحصول على تناثر رامان Raman scattering. وباستخدام وحيد اللونmonochromatorتحصل على اللون المراد ،ويطلقlaunched على الليف البصري تحت التجربة (النشرة FOTP-168) . فإذا كانت $\Delta\tau(\lambda)$ تمثل الفرق في التأخير لفرق في الطول مقداره L فإن مجموع التأخير لكل وحدة طول هو :

$$\frac{\Delta\tau(\lambda)}{L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.14)$$

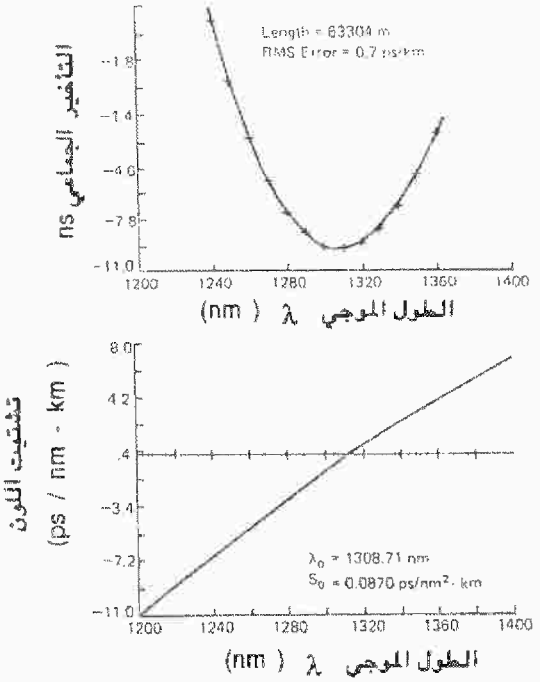
وحيث أن معامل تشتيت اللون $M_c(\lambda)$ يرتبط بالتأخير τ بالمعادلة التالية :

$$\Delta(\tau/L) = M_c(\lambda)\,\Delta\lambda \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.15)$$



الشكل (١٠ - ١١) قياس تشتيت اللون بالتأخير الزمني

نستطيع من المعادلة (10.15) إيجاد قيمة معامل تشتيت اللون ونرفق في الشكل (١٠-١٢) منحنيات للتأخير الجماعي مع الطول الموجي ومعامل تشتيت اللون مع الطول الموجي لليف بطول 63km. للإطلاع على مزيد من طرق قياس التشتيت يمكن الرجوع إلى النشرات(FOTP-169,IEC793-1-C5 , DIN VDE 0472,FOTP-175)



الشكل (١٠-١٢) التأخير الجماعي وتشتيت اللون لليف بطول 63 km

١٠-٤ طول موجة القطع Cutoff wavelength

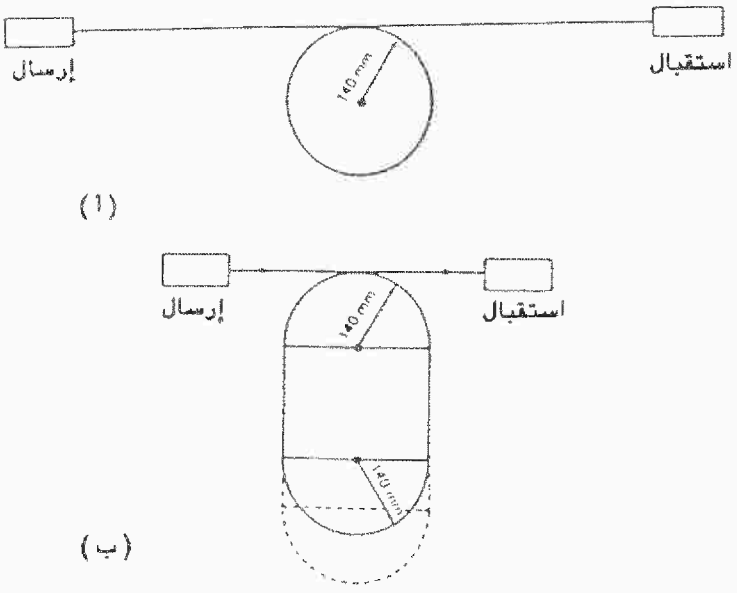
يشكل الطول الموجي أحد العناصر التي تحدد عدد الأنماط الممكن انتشارها في الليف البصري . ويعرّف طول موجة القطع λc بأنه أقل طول موجي يمكن مروره خلال الليف، أي أن الليف يصبح أحادي النمط لقيم λ أكبر من λc . ومتعدد النمط لقيم λ أقل من λc . لذا يجب معرفة الطول الموجي λc الذي يمكن من انتشار الموجة الأساسية. سبق أن ذكرنا أن عدد الأنماط الممكن انتشارها في الليف متعدد النمط ومتدرج معامل الانكسار هو :

$$N = \left(\frac{\pi a}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.16)$$

من هذه المعادلة نرى أن عدد الأنماط يقل بازدياد الطول الموجي،ويقل بصغر قطر اللب وكذلك الفرق بين معامل انكسار اللب n_1 ومعامل انكسار الكساء n_2 . للحصول على ليف بصري بنمط واحد نستخدم الطول الموجي $\lambda = 1300\ nm$ كي يكون تشتيت اللون صفراً ، وقطر اللب يصل إلى $10\ \mu m$ أو أقل والفرق بين n_1 و n_2 يصل إلى 0.35% بدلاً من 1% أو 2% .

١٠-٤-١ طرق قياس طول موجة القطع Measuremeats Methods of Cutoff Wavelength

تستخدم طرق عديدة لقياس طول موجة القطع لليف أحادي النمط أو مزدوج النمط وذلك بقياس الحقل القريب والحقل البعيد ، وفصل النبضات والاستقطاب و التماسك coherence ونقل القدرة الضوئية. وقد اعتمدت المواصفات القياسية FOTP-80 و DINVDE 0472 Part 225 و IEC 793-1-C7A والتي تعتمد على نقل القدرة الضوئية لقياس طول موجة القطع ،حيث يستخدم لهذا الغرض ليف بطول مترين وبثني نصف قطر 140mm ويعمل بإحدى الطريقتين ،ففي الشكل (١٠-١٣أ) تستخدم لفة واحدة أو كما في الشكل (١٠-١٣ ب) نستخدم بكرة منفصلة يلف حولها الليـــف .



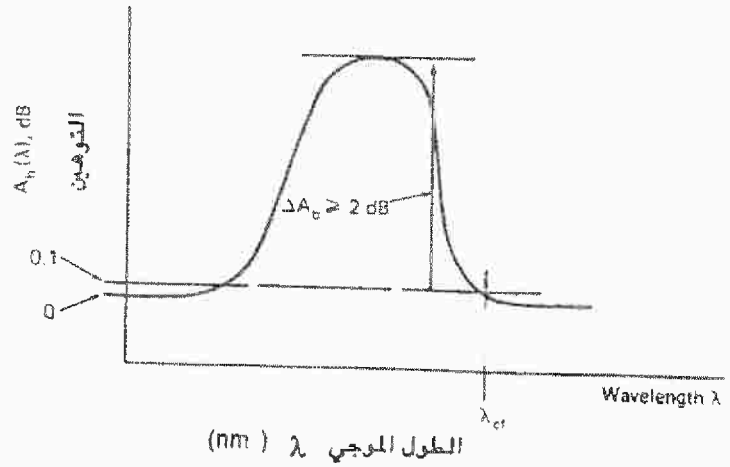
الشكل (١٠ - ١٣) قياس موجة القطع بصري

(أ) لفة واحدة (ب) بكره (FOTR80)

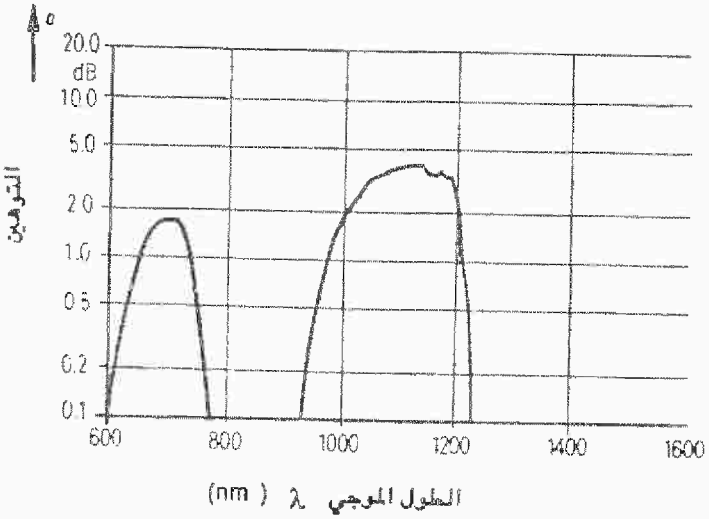
تقاس القدرة المرسلة $Ps(\lambda)$ عندما يكون نصف قطر الثني 140mm أو أكثر ثم يثنى أكثر حتى يصل نصف القطر إلى 60mm أو أقل بحيث يتم منع النمط الثانوي وتقاس القدرة $P_b(\lambda)$ ونحصل على توهين الثني من المعادلة التالية :

$$Ab(\lambda) = 10 \, Log \frac{Ps(\lambda)}{Pb(\lambda)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10.17)$$

كما في الشكل (١٠-١٤) فإن موجة القطع هي أطول موجة تكون عندها قيمة التوهين تساوي 0.1dB وبتغير التوهين $Ab(\lambda)$ بتغير قيمة λ كما في الشكل (١٠-١٥).



الشكل (١٠-١٤) تغير التوهين بتغير λ بإستخدام طريقة الثني



الشكل (١٠-١٥) إيجاد طول موجة القطع بطريقة الثني

١٠ - ٥ خواص التوصيل والوصل الدائم Connection and Splicing Properties

تتأثر وصلات الألياف البصرية بعوامل عديدة تؤدي إلى فقدان القدرة في الوصلة، وقد تكون هذه العوامل داخلية أو خارجية. فالعوامل الداخلية قد تنجم عن عدم تطابق الألياف على جانبي الموصل أو عدم توسط اللب أو عدم استدارة الكساء. وبالنسبة للألياف متعددة النمط فإن العوامل الهامة هي عدم استدارة اللب وعدم تطابق أشكال معامل الانكسار أو قطر اللب أو فتحة النفوذ العددية مما يؤدي إلى فقدان القدرة. أما بالنسبة لليف أحادي النمط، فهذه العناصر هي عدم استدارة الحقل النمطي وعدم تطابق قطر الحقل النمطي عند ربط الألياف مع بعضها. أما الأسباب الخارجية فتتركز في أطراف الليف، حيث تؤدي خشونة النهايات وتباعد الأطراف أو انحرافها عن بعض إلى فقدان القدرة، كما أن المقارن والوصلات الدائمة تؤدي إلى فقدان القدرة. وسنتعرض إلى هذه العوامل في البنود القادمة.

١٠-٥-١ هندسة الليف Fiber Geometry

تتوزع القدرة البصرية في الليف متعدد النمط بنفس توزيع معامل الانكسار، لذا يمكن استخدام طريقة قياس الحقل القريب لمعرفة المنظر الجانبي أو شكل معامل الانكسار لليف البصري حيث يستخدم منبع ضوئي أبيض (لمبة هالوجين مثلا) لإنارة مقطع ليف بصري قصير بحيث تثار كافة الأنماط بصورة متساوية. ويمكن التخلص من أنماط الكساء بإزالة الكساء وعلى الجانب الآخر كما في الشكل (١٠-١) يتم قياس شدة الاضاءة عبر مقطع الليف البصري باستخدام عدسة وحاسوب ومسح مقطع الخيال Image يمكن معرفة أطراف اللب والكساء، وتمركز اللب وعدم استدارة اللب والكساء كما في الشكل (١٠-١٦) حيث أن :

$$d_c = \frac{d_{max} + d_{min}}{2} \quad \text{قطر اللب} \quad \ldots\ldots\ldots (10.18a)$$

$$D_c = \frac{D_{max} + D_{min}}{2}$$ قطر الكساء ..... (10.18b)

$$e_c = \frac{d_{max} - d_{min}}{do} \times 100\ \%$$ عدم استدارة اللب .....(10.18c)

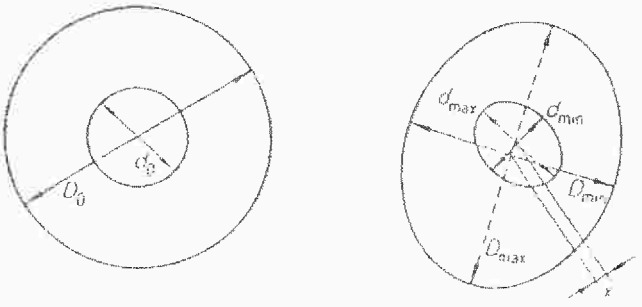
$$E = \frac{D_{max} - D_{min}}{Do}$$ عدم استدارة الكساء ..... (10.18d)

$$C_y = \frac{x_c}{d_c} \times 100\ \%$$ التمركز .....(10.18e)

حيث أن :

قطر اللب	d_c
قطر الكساء	D_c
عدم استدارة اللب	e_c
قطر اللب إذا كان دائري	do
عدم استدارة الكساء	E
قطر الكساء إذا كان دائري	Do
التمركز	C_y
الانحراف عن مركز اللب	x_c

وقد تمت تغطية هذه المقاييس في النشرة (FOTP-176) وهناك طرق أخرى تستخدم الأدوات الميكانيكية أو بالميكروسكوب مذكورة بالنشرات (FOTP-27 و FOTP -45)



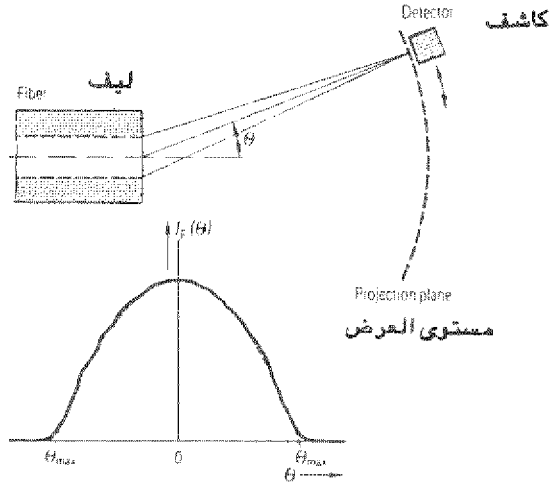
الشكل (١٠-١٦) عدم تمركز وعدم استدارة اللب والكساء

١٠-٥-٢ فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture

لإيجاد فتحة النفوذ العددية لليف بصري متعدد النمط تستخدم قياسات الحقل البعيد حيث تقاس شدة الإضاءة الخارجة من الليف البصري عن بعد كما في الشكل (١٠-١٧) وتقاس زاوية المسح θ كالتالي :

لو فرضنا أن شدة الإضاءة هي I_R وأن توزيعها جاوسي فإن أقصى قيمة لزاوية المسح θ_m تقع عندما تنخفض شدة الإضاءة إلى 2.5 % من قيمتها عند المركز ونستطيع الحصول على فتحة النفوذ العددية من المعادلة التالية :-

$$NA = \text{Sin}\ \theta_{max} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.19)$$



الشكل (١٠-١٧) قياس الحقل البعيد لمعرفة فتحة النفوذ العددية

١٠-٥-٣ قطر الحقل النمطي Mode Field Diameter

من المهم معرفة توزيع الضوء في النمط الأساسي fundamental mode للليف البصري أحادي النمط بدلاً من فتحة النفوذ العددية لأنها تمكننا من تقييم إيصال

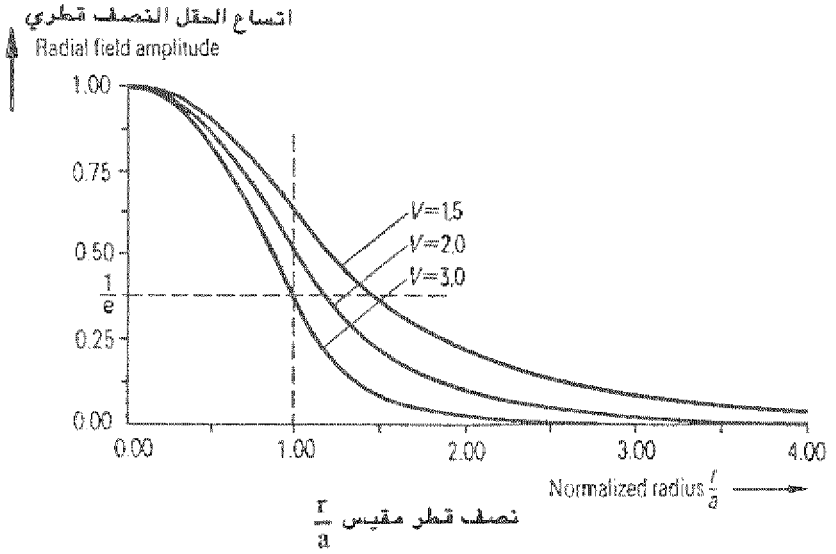
الضوء لليف وحساب الفقد عند الثني والربط . نرى في الشكل (١٠-١٨) أن قطر الحقل النمطي هو $2W_o$ حيث أن W_o تمثل نصف القطر وهي النقطة التي تصبح عندها شدة الإضاءة $\frac{1}{e}$ أو 37% من قيمتها عند المركز ($r = 0$) ، ويعتمد قطر الحقل النمطي على الطول الموجي ، ويزداد بازدياد الطول الموجي ، ونستطيع الحصول على قيمة W_o من خلال العلاقة بين نصف قطر اللب a والتردد المقيس V حيث أن :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.20)$$

وإذا كان الليف أحادي النمط وعتبي معامل الانكسار فإن V تتراوح بين 1.6 و 2.6 ($1.6 < V < 2.6$) . ونستطيع كتابة العلاقة بين W_o و a تقريباً كالتالي :

$$W_o = \frac{2.6}{V} a \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10.21)$$

وقيم V السابقة تشمل الأطوال الموجية بين 1150nm و 1875nm والتي تقع ضمنها الأطوال الموجية التشغيلية 1300nm و 1550nm .



الشكل (١٠-١٨) الاعتماد النصف القطري لاتساع الحقل لموجة الأساس

١٠-٦ الانعكاس البصري في المجال الزمني Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)

يعتبر جهاز الإنعكاس البصري في المجال الزمني من أهم الأجهزة لمجال البصريات الليفية حيث يستخدم في المختبر وفي الميدان ، إذ يستطيع تزويدنا بمعلومات كثيرة عن الليف البصري باستخدام نهاية واحدة فقط . وقد أرفقنا في نهاية الفصل النشرات التي تعطي أهداف واستخدامات هذا الجهاز .

يحتوي جهاز OTDR على مرسل يحتوي ثنائي ليزري ويرسل نبضات مستطيلة rectangular إلى الليف يتناثر الضوء المرسل خلال مروره بالليف حسب مستوى الإشارة المرسلة ، ويقاس الضوء المتناثر عكسياً سواءً من الليف أو الوصلات ويستخدم كاشف لقياس الضوء المتناثر عكسيا . يتراوح زمن النبضات المرسلة بين 0.1ns و 10 µs .

ونستطيع باستخدام هذا الجهاز معرفة طول الليف ومقدار التوهين وموقع الوصلات والمقارن والموصلات والخلل إلى وصلة الاتصالات الليفية وموقعها ، ولمعرفة المزيد عن طرق القياس هذه يمكن الرجوع إلى النشرات المذكورة في آخر الفصل.

١٠ - ٧ الخلاصة Summary

قدمنا في هذا الفصل بعض طرق القياس المختلفة لمعلمات الليف البصري الأساسية كما أشرنا إلى المقاييس التي تستخدم لعمل هذه القياسات. لايزال مجال الألياف البصرية في تطور مستمر مما يتطلب متابعة مستمرة لتطوراته ومعرفة المقاييس والمواصفات التي تصدر من قبل الهيئات المخصصة المذكورة في آخر الفصل .

الفصل العاشر

أسئلة

١ - ماهي القياسات التي تتم للتشكيلة الأولية ؟

٢ - ماهي القياسات التي تتم خلال إنتاج الليف ؟

٣ - ماهي القياسات التي تتم لليف بعد تصنيعه .

٤ - ماهي القياسات التي تتم بعد وضع الليف ضمن كابل بصري ؟

٥ - ما الفرق بين انعراج فرسنل وانعراج فرانهوفر؟

٦ - لماذا تصقل نهاية الليف قبل قياس توزيع الحقل ؟

٧ - أذكر طرق قياس التوهين ؟ وأي طريقة أفضل ؟

٨ - ماهي الطرق المستخدمة لقياس عرض النطاق ؟ إشرح كل منهما ؟

٩ - ماهو التشتيت المادي وما علاقته بالطول الموجي ؟

١٠- ماهي طرق قياس تشتيت اللون ؟

١١- لماذا يعتبر جهاز OTDR أهم الأجهزة المستخدمة في نظم البصريات الليفية؟

بيان بالهيئات والمواصفات القياسية لنظم الإتصالات الليفية البصرية

STANDARDS ORGANIZATIONS

Because standardization organizations emerge and change charters often as demand dictates, it is not possible to mention all of those that have contributed to the technology. A few of the key organizations are referenced here.

American National Standards Institute (ANSI)

Committee X3T9 is developed the fiber distributed-data interface (FDDI) standard for high-speed LANs operating in the 100 Mb/s range. FDDI is aimed at high-speed interconnection between mainframes, minicomputers, and their associated peripherals. Other ANSI standards important to fiber, or digital, network design are

T1.101-1987 Synchronous Interface Standards for Digital Network.
T1.102-1987 Digital Hierarchy Electrical Interfaces.
T1.103-1987 Digital Hierarchy Sync DS-3 Format Spec (SYNTRAN).
T1.106-1988 Digital Hierarchy Optical Interface Specs: Single Mode (see ECSA).
T1.107-1988 Digital Hierarchy Format Specs (T1X/87-127).

North Atlantic Treaty Organization (NATO)

Among other activities, NATO subcommittees have been developed fiber and cable standards for NATO applications. One such committee is NIAG Subgroup 6, which developed fiber-optic interface standards for shipboard application.

National Bureau of Standards (NBS)

The NBS at Boulder develops certain measurement standards for fiber-optic components. One key measurements document is Special Publication 637, Optical Fiber Characterization.

Exchange Carriers Standards Association (ECSA)

ECSA is the secretariat for the ANSI and has submitted the following key documents to ANSI for approval:

(a) T1X1/87-126, the proposed draft, American National Standard for the Fourth Hierarchical Level, was developed by ECSA to be compatible with the CCIT's 139.264 Mbs/s signal as presented in Rec. G.703 and G.755.

(b) T1X1/87-129R1, Digital Hierarchy Optical Interface Rates and Formats Specification, or ANSI draft standard T1.105-1988. ECSA T1X1.2 Working Group is developing this standard, also known as the synchronous optical network (SONET) standard, that will establish synchronous compatibility between optical transmission equipments. The building block synchronous transport-signal level 1 (STS-1) is at a rate of 51.840 Mb/s with an optical-carrier level 1 (OC-1) optical counterpart also at 51.840 Mb/s. This standard is to be consist with the work of the CCITT on network-node interface (NNI) using synchronous multiplexing techniques.

(c) T1X1/87-128R1, American National Standard for Telecommunications Digital Hierarchy Optical Interface Specifications: Single Mode. This standard describes the performance characteristics of the single-mode interface to be used with SONET and provides references to other standards that define component performance and "joint" engineering methodologies. It, along with EIA document TSB20, forms some key standards for fiber transmission-systems design.

(d) T1M1.2/87-037R2, Functional Requirements for Optical Terminating Equipment.

(e) T1X1.4/87-702R2, proposed draft on Digital Hierarchy Formats.

Electronic Industries Association (EIA)

The EIA contains the following subcommittee organiza-tions:

FO-2 Optical Communications Systems

FO-2.1 Optical Fiber Telecom Systems
FO-2.2 Fiber Optics LAN
FO-2.3 Jitter and Wander
FO-2.5 Cable Plant Installation

FO-6 Fiber Optics

FO-6.1 Field Tooling and Test

FO-6.2 Terminology Definition and Symbology

FO-6.3 Interconnection Devices

FO-6.4 Test Methods and Instrumentation

FO-6.6 Optical Fibers and Materials

FO-6.7 Fiber Optics Cables

The EIA has initial work on over 170 fiber-optic test procedures (FOTP) and standards. some of the key test procedures are listed in Table A. Other key EIA documents on fiber optics include.

RS-440-1978 Connector Terminology

RS-458,-459 Standards for Fiber Classes and Materials

RS-472-1985 Generic Spec, Cables

472A-XX0-86 Cables for Outside Aerial Use

472B-XX0-86 Cables for Underground and Burial Use

472C-XX0-86 Cables for Indoor Use

472D-XX0-86 Cables for Outside Plant Use

RS-475-1986 Generic Spec, Connectors

RS-492-1987 Generic Spec, Optical Waveguide

RS-509-1984 Generic Spec, Fiber Optic Terminal Devices

RS-515-1986 Generic Spec, Fiber and Cable Splices

TSB-20 Single Mode Fiber Optic System Transmission Design

TABLE A EIA RS-455-XXX, FIBER-OPTIC TEST PROCEDURES

Procedure number FOTP-XXX	Component type	Test description
1	Connectors	Cable flex test
2	All devices	Impact test measurement
3	Connectors	Temperature cycling
4	Connect/component	Temperature life
5	Connectors	Humidity test
6	Connectors	Cable retention test
11	Connectors	Vibration test procedure
12	Connectors	Fluid immersion
13	All devices	Visual and mechanical inspection
14	All devices	Shock test
15	All devices	Altitude immersion
16	Components	Salt spray
17	Cable assemblies	Maintenance aging
18	Component/assembly	Acceleration testing
20	Optical	Optical-transmittance change

TABLE A (contd.)

Procedure number FOTP-XXX	Component type	Test description
22	System	Ambient-light susceptibility
23	Component seals	Air-leakage testing
25	Cable assemblies	Impact testing
26	Cable	Crush resistance
27	Fibers	Outside-Diameter measurement
28	Fibers	Tensile failure point
29	Fiber	Rafractive index profile, transverse method
30	Multimode fiber	Bandwidth measurement, frequency-domain method
31	Fiber	Tensile proof test method
32	System	Fiber-optic circuit discontinuities
33	Cable	Tensile loading and bending
33	Cable	Tensile loading and bending
34	Connector	Insertion-loss test
35	Connector	Dust (fine-sand) test
36	Cable assembly	Twist test
37	Cable	Bend test, low and high temperatures
39	Cable	Wicking test
40	Cable	Fluid immersion
41	Cable	Compressive-loading resistance
42	Components	Optical crosstalk
43	Fibers	Output near-field radiation pattern
44	Fibers	Refractive index profile, refracted ray method
45	Fibers	Fiber geometry, microscope method
46	Long GI fibers	Spectral-attenuation measurements
47	Fibers	Output far-field radiation pattern
48	Fibers	On-line diameter measurement
49	Components	Nuclear radiation effects measurement method
50	GI fiber	Light launch for attenuation measurement
51	Multimode fiber	Pulse-distortion measurements
52	Fibers	Temperature dependent of attenuation
53	Long fiber	Attenuation by substitution method
54	Fiber	Bandwidth, mode scrambler requirements
55	Fibers	Coating geometry measurement
56	Fibers	Fungus resistance
57	Fibers	End preparation and examination
58	GI fiber	Core-diameter measurement
59	Fiber/cable	OTDR attenuation measurement
60	Fiber	Length by time-of-flight measurement
61	Components	Nuclear thermal-blast resistance
62	Fiber	Macrobend attenuation
63	Fiber	Torsion test
65	Fiber	Flexure test
66	Fiber	Abrasion resistance of buffer coatings
67	Coated fiber	Self-sticking (blocking) test
68	Fiber	Microbending
69	Fibers	Max and min use temperature
70	Fibers	Advanced aging
71	Components	Temperature shock effects
72	Components	Temperature cycling effects
73	Fibers	Temperature and humidity cycling
74	Fibers	Humidity testing
75	Fibers	Fluid-immersion test

TABLE A (contd.)

Procedure number FOTP-XXX	Component type	Test description
78	SM fiber	Spectral attenuation, cutback method
80	SM fiber	Cuttoff wavelength by transmitted power
81	Filled cable	Compound flow (drip) test
82	Filled cable	Fluid-penetration test
83	Cable to connector	Axial compressive loading
84	Cable	Jacket self-adhesion (block) test
85	Cable	Twist test
86	Cable	Jacket-shrinkage test
87	Cable	Knot test
88	Cable	Bend test
89	Cable	Jacket elongation and tensile strength
91	Cable	Twist and bend
94	Cable	Stuffing-tube compression
95	Fiber/cable	Absolute optical-power test
96	Cable	Storage temperature and humidity
98	Cable	Freezing test
99	Cable	Gas-flame test
100	Gas blocking cable	Gas-leakage test
101	Cable	Accelerated oxygen aging
102	Cable	Water-presssure cycling
103	Buffered fiber	Bend test
104	Cable	Cyclic flexing test
107	Terminal	Return loss
109		Reference-point temperature
110	Transmitter	Type verification
111	Receiver	Type verification
112	Power supply	Current
113	Digital terminal	General measurement requirements
114	Terminal	Data-input current
115	Terminal	Control-input current/voltage
116	Terminal	Data-output voltages
117	Transmitter	Optical output power
118	System	Output propagation delay
119	Receiver	Sensitivity and dynamic range
120	Transmitter	Optical output power
121	System	Output propagation delay
122	Receiver	Responsivity and rms noise voltage
123	Receiver	Output voltage and switching times
124	Detector	Dark currents
125	Detector	Numerical aperture
126	Source	Modulation index
160	Cable	Temperature shock test
161	Cable	Temperature cycling
162	Cable	Temperature/humidity cycling
163	Cable	Fungus resistance
164	SM fiber	Mode field diameter, far-field scan
165	SM fiber	Mode field diameter, near-field scan
166	SM fiber	Mode field diameter, transverse offset
167	SM fiber	Mode field diameter, far-field variable aperture
168	Fiber	Chromatic dispersion, spectral group delay
169	Fiber	Chromatic dispersion, phase shift
170	SM fiber	Cutoff wavelength by transmitted power
171	Short fiber	Attenuation by substitution method

TABLE A (contd.)

Procedure number FOTP-XXX	Component type	Test description
172	Firewall connector	Flame resistance
174	SM fiber	Mode filed diameter, far-field knife edge scan
175	Fiber	Chromatic dispersion, differential phase shift
176	Fiber	Geometry measurement by Grey-scale analysis
179	Fiber	Inspect cleaved ends by inter-ferometry

Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)

The Standards Coordinating Committee on Definitions (SCC 10) is responsible for the development of terms and definitions. Key documents include

ANSI/IEEE STD 100-1984	IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms
IEEE 812-1984	Definition of Terms Relating to Fiber Optics

International Electro-Technical Commission (IEC)

The IEC has established the TC46 technical subcommittee on wire and cables, the SC46E subcommittee on fiber optics, and the following working groups:

WG0 Terminology
WG1 Fiber and Cable
WG2 Connectors
WG3 Safety

The IEC has produced the following key documents:

IEC/SC 46E (CO)9 and IEC/SC 46E (sec)66	Optical Fibers Measurements Dimensional Tests Sections One and Two
IEC/SC 46E (SEC)55	Generic Spec, Connectors
IEC/SC 86B(CO) 15	Revision to Generic Spec for Connectors Regarding Climatic Environmental Tests

IEC/SC 86B (CO) 16,17	Generic Spec for Fiber Optic Branching Devices: Insertion Loss and Return Loss
IEC 693	Dimensions of Optical Fibers
IEC 793-1	Generic Spec, Optical Fibers
IEC 794-1	Generic Spec, Optical Fiber Cables
IEC 874-1-1986	Generic Spec, Connectors
IEC 875-1-1986	Generic Spec, Branching Devices
IEC 875-2-1986	Generic Spec, Branching Devices, Star Coupler
IEC 876-1-1986	Generic Spec, Fiber Optic Switches

Consultative Committee in International Telegraphy and Telephony (CCITT, Geneva).

Under the CCITT, Subgroup SG XV and others are developing fiber-optic transmission standards. Subgroup SG XVIII is developing broadband ISDN standards. Key Documents include:

Rec G651 Standardization of Fiber Physical Parameters
Rec G652 Characteristics of Single Mode Fiber Optics Cable

Society of Automotive Engineers (SAE)

It was the SAE that began some of the earliest work on military fiber-optic standards. Some early activity includes

SAE A-2H Subcommittee: Wire and Cable Standards; developed DOD-STD-1678 and DOD-C-85045.

SAE A2-K Subcommittee: developed the fiber-optics version of the MIL-STD-1553 data bus standard (MIL-STD-1773).

The SAE has two standards committees working on the fiber-optic data bus:

AS-2 Committee: High Speed Data Bus standards AS 4074.2 High Speed Ring Bus (HSRB), Tri-Service JI-AWG committee.

AS 4074.1 Linear Token Passing Multiples Data Bus

AS-3 Committee: DOD-STD-1773 Development and Enhancement STANAG 3910 (NATO) Standard Support

Department of Defense (DOD)

Standards activity is within the Defense Materials Specifications and Standards Office (DMSSO) of the Office of the Undersecretary of Defence for Research and Engineering. There exist Departmental Standards Offices (DEPSO) for parts in the Defense Logistics Agency (DLA) and for systems separately in the Army, Navy, and Air Force. For the Army, the assignee activity is the Army CECOM at Ft. Mon-mouth, New Jersey. For standard parts, the assignee activity for DLA is the Defense Electronics Supply Center (DESC) in Dayton, Ohio. These groups work with various DOD standards working groups and industry committees and coordinate their activities with the standards and specifications test and evaluation activities within the Tri-Service Fiber Optic Coordinating Structure (TSFOCS). TSFOCS is the R & D arm of the Office of the Undersecretary of Defense for R & D. Within the DESC, Federal Stock Group 60 has been established to cover fiber-optic materials, components assemblies, and accessories. Some key DOD publications include

DOD-STD-1678	Fiber Optic Test Methods
DOD-C-85045	Fiber Optic Cable Standard
FSC 6625	Test Equipment
MIL-STD-1773	Fiber Optics Mechanization and Aircraft Internal Time Division Command/ Response Multiplex Data Bus System
MIL-STD-188-111	Subsystem and Engineering Standards for Common Long Haul/Tactical Fiber Optics Communications
MIL-STD-1863	Standards for Mechanical Interfaces
MIL-HDBK-141	Fiber Optic Design Practices

الفصل الحادي عشر

التشكيل وتعدد الإرسال

الفصل الحادي عشر
التشكيل وتعدد الارسال
Modulation and Multiplexing

يتطرق هذا الفصل إلى طرق نقل المعلومات بما في ذلك بعض طرق التشكيل وتعدد الارسال المستخدمة في أنظمة الاتصالات ، سنقدم بعض الدوائر المبسطة المستخدمة لتشكيل الثنائيات الباعثة للضوء LED's وثنائيات الليزر LD's . في نهاية الفصل نقدم تعدد الارسال بتقسيم الزمن وتعدد الارسال بتقسيم التردد وتعدد الارسال بتقسيم الطول الموجي .

١١ - ١ التشكيل Modulation

نقوم بعملية التشكيل بتحميل موجة المعلومات المراد نقلها والتي تسمى بالموجة المُشَكِّلة modulating wave على موجة أخرى تسمى الموجة الحاملة carrier wave وتدعى الموجة الناتجة من ذلك بالموجة المُشَكَّلة modulated wave .

توجد عدة طرق لتشكيل الموجة الحاملة تقع ضمن الفئات التالية :

أ - التشكيل التماثلي analog modulation: مثل تشكيل الاتساع amplitude modulation وتشكيل الزاوية angle modulation الذي يتفرع منه تشكيل التردد frequency modualtion وتشكيل الطور phase modulation وتكون الموجة الحاملة للمعلومات في أنواع التشكيل هذه موجة جيبية عالية .

ب - التشكيل النبضي التماثلي Analog Pulse Modulation

تكون الموجة الحاملة للمعلومات نبضية مكونة من قطار من النبضات pulse train ويشمل هذا النوع من التشكيل تشكيل اتساع النبضات pulse amplitude modulation وتشكيل الفترة الزمنية للنبضات pulse duration modulation وتشكيل مركز النبضات pulse position modulation .

جـ - التشكيل النبضي الرقمي Digital Pulse Modulation

مثل تشكيل رمز النبضات pulse code modulation وتشكيل دلتا delta modulation.

د - الإرسال الرقمي Digital Transmission

يتم في هذا الإرسال تحميل التشكيل النبضي على موجات جيبية عالية التردد لتسهيل الإرسال عبر المسافات وتشمل أنواع الإرسال الرقمي (١) الابراق بزحزحة الاتساع amplitude - shift keying (٢) الابراق بزحزحة التردد frequency - shift keying (٣) الابراق بزحزحة الطور phase shift keying. وتقابل هذه الأنواع تشكيل الاتساع ، تشكيل التردد وتشكيل الطور على التوالي.

١١-٢ التشكيل التماثلي Analog Modulation

استعرضنا آنفاً أنواع التشكيل المختلفة ووجدنا أننا نتعامل مع مَعْلمات عديدة مثل الاتساع والتردد والطور. غير أن استخدامها في الاتصالات البصرية قد لايكون ممكنا. والسبب في ذلك يرجع إلى الصعوبات الرئيسية التي نواجهها في كشف الإشارة حيث أن الكواشف الضوئية تستجيب فقط لسطوع irradiance الاشعاع الساقط عليها.

لإيضاح مفهوم التشكيل سنقوم بشرح أول أنواع التشكيل وأقلها تعقيداً وهو تشكيل الاتساع ثم نقدم بعد ذلك بعض أنواع التشكيل المستخدمة في أنظمة الاتصالات البصرية.

١١-٢-١ تشكيل الاتساع Amplitude Modulation

يتم في تشكيل الاتساع تغيير اتساع الموجة الحاملة عالية التردد طبقاً لتغيرات الموجة المُشَكِّلة المطلوب إرسالها. وتكون الموجة الحاملة عادة جيبية الشكل وثابتة التردد. أما الموجة المُشَكِّلة فغالبا ماتتكون من مجموعة من الموجات الضوئية والتي تكون في

مجموعها أصواتاً لكلمات تقال speechأو موسيقى. لو فرضنا أن الموجة الحاملة هي $v_C(t)$ فإنه يمكن التعبير عنها بالتالي :

$$v_c(t) = V_c \cos \omega_c t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11.1)$$

حيث أن V_c هو قيمة الحد الأقصى للاتساع peak amplitude وω هو التردد الزاوي للموجة الحاملة و t هو الوقت .

وإذا فرضنا أن الموجة الصوتية المُشَكِّلَة هي $v_m(t)$ فيمكن التعبير عنها بالتالي :

$$v_m(t) = \sum_{m=1}^{m=N} V_m \cos \omega_m t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11.2)$$

حيث أن V_m هو الحد الأقصى للاتساع . ولتبسيط العمليات الرياضية نفرض أن هناك تردد واحد للموجة المُشَكِّلَة عندها نكتب المعادلة (11.2) كالتالي :

$$v_m = V_m \cos \omega_m t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11.3)$$

طبقاً لمبدأ تشكيل الاتساع فإن اتساع الموجة الحاملة $v_c(t)$ يتغير تبعاً لتغير الموجة v_m وذلك للحصول على موجة مُشَكِّلَة modulated wave ويرمز لها بالرمز $v(t)$، لها نفس تردد الموجة الحاملة $v_c(t)$ ويتغير اتساعها تبعاً لتغير الموجة المُشَكِّلَة $v_m(t)$. ويعبر عن ذلك رياضياً بالمعادلة التالية :

$$v(t) = (V_C + V_m \cos \omega_m t) \cos \omega_C t \quad \ldots\ldots\ldots (11.4)$$

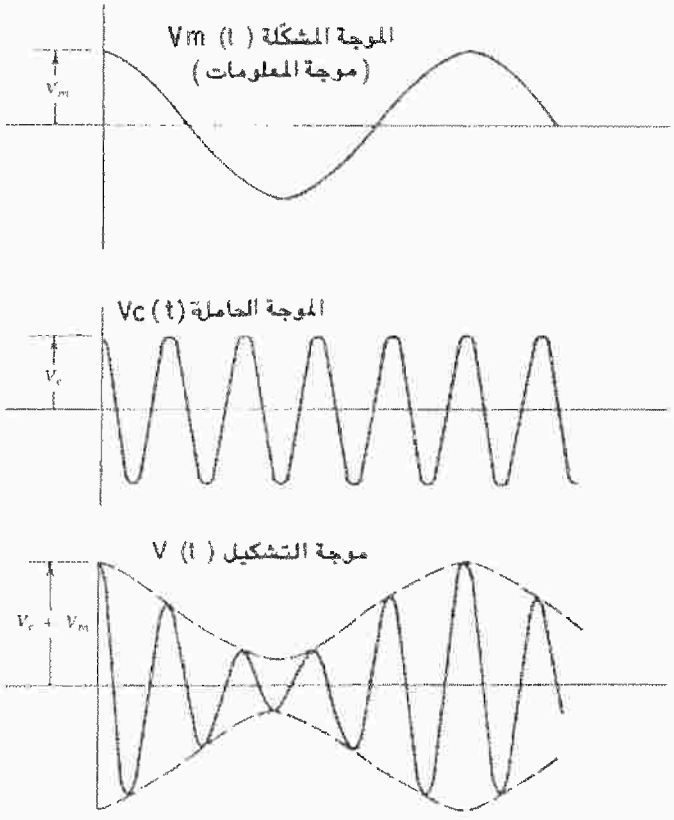
وباخراج V_C خارج القوسين تصبح المعادلة (11.4) كالآتي :-

$$v(t) = V_C \left(1 + \frac{V_m}{V_C} \cos \omega_m t\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.5)$$

تدعى النسبة $\frac{V_m}{V_C}$ بعامل التشكيل modulation factor ويرمز له بالرمز M وباستخدام هذا العامل تصبح $v(t)$ كالتالي :

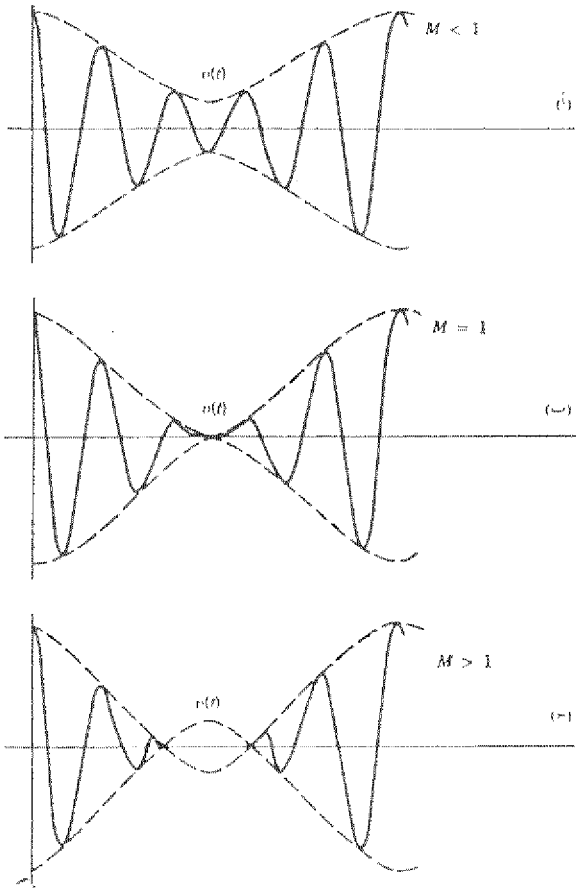
$$v(t) = V_C (1 + M \cos \omega_m t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.6)$$

ولتوضيح شكل الموجة $v(t)$ بالمقارنة مع $v_m(t)$ و $v_c(t)$، يبين الشكل (١١-١) رسماً توضيحياً لكلٍ من هذه الموجات الثلاث .



الشكل (١١-١) تشكيل الاتساع

تؤثر قيمة عامل التشكيل M على شكل الموجة v(t) فإذا كانت قيمة هذا العامل M<1 فإن التشكيل في هذه الحالة يكون منخفضاً undermodulation ويبين الشكل (١١-٢أ) الموجة v(t) في هذه الحالة وإذا كان عامل التضمين M = 1 ، فإن التشكيل يكون كاملاً full modulation ويبين الشكل (٣-٢ب) الموجة v(t) في هذه الحالة . أما إذا كان عامل التشكيل M > 1 فإن التشكيل يكون متجاوزاً overmodulation ويبين الشكل (١١-٢جـ) الموجة v(t) في هذه الحالة . يؤدي التشكيل المتجاوز إلى إحداث تشويه distortion غير مرغوب فيه في الموجة v(t) . لهذا السبب يجب أن تكون قيمة عامل التشكيل واحد أو أقل (M≤1) .

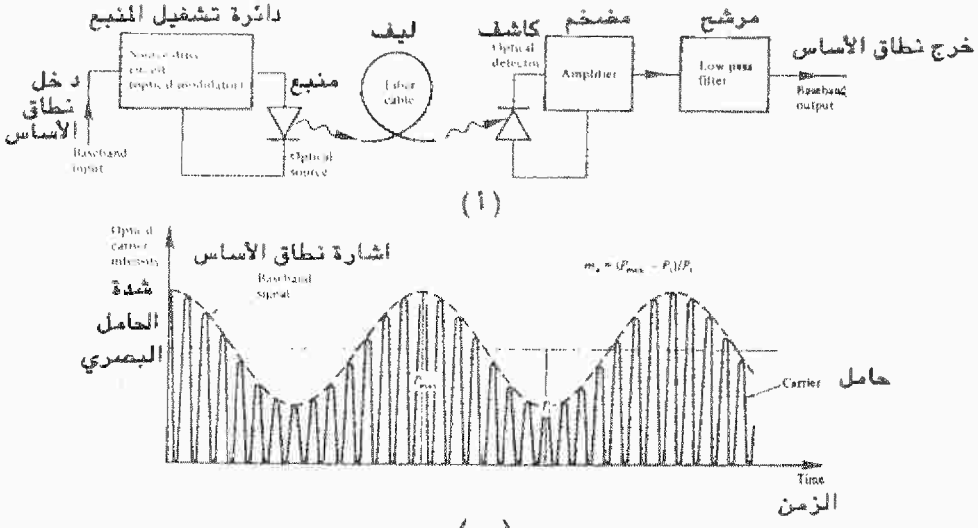


الشكل (١١-٢) تغير موجة التشكيل (أ) و (ب) تبعاً لتغير قيم عامل التشكيل M

كثيراً مايعطى عامل التشكيل كنسبة مئوية أي (M × 100%) . عندئذ تدعى هذه النسبة بنسبة التشكيل المئوية percent modulation ويجب أن لاتتجاوز 100% .

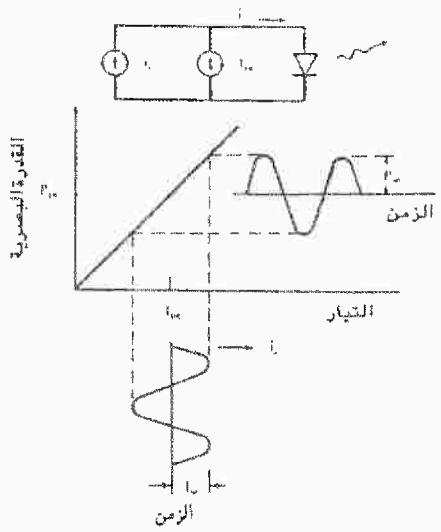
١١-٢-٢ تشكيل الشدة المباشر Direct Intensity Modulation

يمثل تشكيل الشدة المباشر أبسط أنواع التشكيل المستخدمة في أنظمة الاتصالات البصرية. يبين الشكل (١١-٣) رسماً تخطيطياً لنظام اتصالات بصري يستخدم التشكيل المباشر لشدة المنبع البصري بواسطة إشارة نطاق الأساس baseband . يختلف تشكيل الشدة المباشر عن تشكيل الاتساع بأن القدرة تتغير بما يتناسب وشكل موجة المعلومات بدلاً من تغير اتساع الموجة الحاملة كما هو الحال في تشكيل الاتساع.



الشكل (١١-٣) (أ) نظام ليفي بصري تماثلي يستخدم تشكيل الشدة المباشر
(ب) استخدام نطاق الأساس لتشكيل الشدة المباشر للحامل
البصري مرسومة بالمجال الزمني

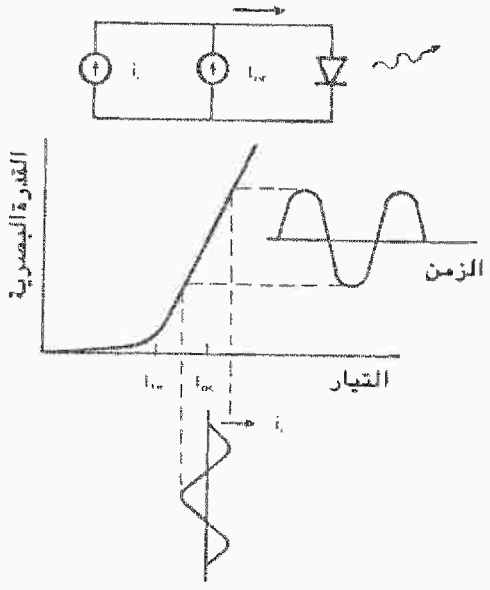
تطبق الإشارة المُشَكّلة على التيار المستخدم لقيادة drive الثنائي الباعث للضوء LED أو ثنائي الليزر وتتغير تبعاً لذلك القدرة البصرية الخارجة. لضمان التشغيل في المنطقة الخطية من خواص (التيار - القدرة) للمنبع فإننا نضع تيار إنحياز مستمر I_{DC}.
نرى في الشكل (١١-٤) العلاقة بين التيار والقدرة البصرية لثنائي باعث للضوء وتشكيل تماثلي وفي الشكل (١١-٥) العلاقة بين التيار والقدرة البصرية لثنائي ليزري - وتشكيل تماثلي .



الشكل (١١ - ٤) تشكيل تماثلي LED

يمثل I_{DC} تيار الانحياز المستمر و I_S تيار الإشارة

و P_{sp} هو اتساع الذروة للجزء المشكّل من قدرة الخرج



الشكل(١١ - ٥) تشكيل تماثلي لثنائي ليزر

يمكن التعبير عن التيار والقدرة البصرية الناتجة بالمعادلتين التاليتين :

$$i = I_{DC} + I_m \cos \omega t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.7)$$

$$P = P_{DC} + P_m \cos \omega t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.8)$$

يعرف عامل التشكيل للتيار m' على أنه النسبة بين التيار Im ومتوسط التيار I_{DC} أي :

$$m' = \frac{I_m}{I_{DC}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.9a)$$

وحيث أن تيار الذروة الكلي وتيار القيمة الدنيا هما $I_{DC} + I_m$ و $I_{DC} - I_m$ على التوالي فإن اتساع الإشارة I_m يصل إلى أكبر قيمة له إذا كان انحياز التيار المستمر هو نصف القيمة العظمى المسموح بها لتيار الثنائي . في هذه الحالة يكون $I_{DC} = I_m$ وينتج تياراً قيمته عند الذروة $2 I_{DC}$ وقيمته الدنيا صفراً وبعامل تشكيل يساوي الواحد .

يعرف عامل التشكيل البصري بدلالة القدرة البصرية كما يلي :

$$m = \frac{P_m}{P_{DC}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.9b)$$

يتيح لنا تعريف عامل التشكيل للتيار m' بأن نكتب المعادلة (11.7) بالصيغة التالية:

$$i = I_{DC} (1 + m' \cos \omega t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.10)$$

وكتابة المعادلة (11.8) بالصيغة التالية :

$$P = P_{DC} (1 + m' \cos \omega t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.11)$$

١١-٢-٣ تشكيل الشدة بحامل فرعي Subcarrier Intensity Modulation

يستخدم تشكيل الشدة المباشر للمنبع البصري إذا كان الهدف هو نقل إشارة نطاق أساس تماثلية . غير أن السعة العالية لنطاق الليف البصري تسمح بإرسال إشارات كثيرة للحصول على أحد مزايا الليف البصري . في هذه الحالة لابد من تجميع multiplexing عدد من قنوات نطاق الأساس baseband ضمن وصلة ليفية واحدة . يمكن الحصول على ذلك باستخدام تعدد ارسال تقسيم التردد frequency division multiplexing لقنوات

نطاق الأساس . في بداية الأمر تضع قنوات نطاق الأساس على حامل ذي تردد أكبر بكثير من أي الترددات التي يحتويها نطاق الأساس باستخدام تشكيل الأتساع الذي تم شرحه في البند (١١-٢-١) أو استخدام تشكيل التردد أو تشكيل الطور.

أياً كانت طريقة التشكيل فإن إشارات نطاق الأساس التماثلية تُحَمّل على حاملات فرعية subcarriers ثم تجمع بتقسيم التردد لتكون إشارة كهربائية مركبة قبل استخدامها لتشكيل قدرة المنبع البصري . يبين الشكل (١١-٦) رسماً تخطيطياً لوصلة اتصالات بصرية تستخدم تشكيل الشدة بحامل فرعي . تشكّل إشارات نطاق الأساس على حاملات فرعية بترددات راديوية باستخدام تشكيل الاتساع أو تشكيل التردد أو تشكيل الطور ثم تجمع قبل أن تطبق applied على دائرة قيادة المنبع . بعد تطبيقها على المنبع نحصل على إشارة بصرية خارجة ذات تشكيل شدة - تشكيل اتساع AM-IM أو تشكيل شدة - تشكيل تردد FM- IM لنفرض أننا استخدمنا إشارة جيبية وحيدة مُشَكّلة اتساعياً يعبر عن تيارها بالآتي :

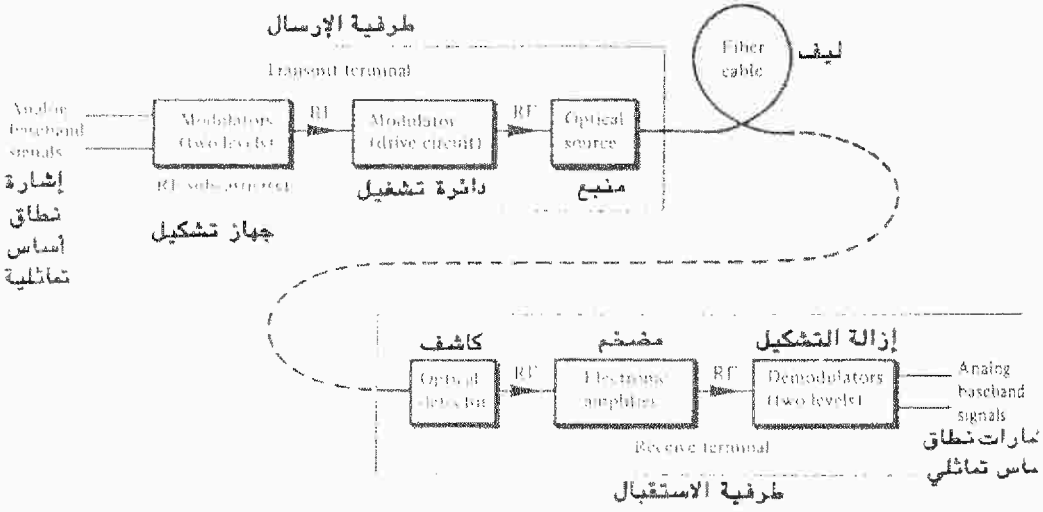
$$i = I_m (1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_C t \quad \text{..... (11.12)}$$

كي نعمل ضمن الجزء الخطي من خواص (التيار - القدرة) للمنبع لابد من إضافة تيار انحياز مستمر I_{DC} إلى المعادلة (11.12) .

لو قدنا بالتيار الناتج منبعاً بصرياً سواءً كان ثنائياً باعثاً للضوء LED أو ثنائياً ليزرياً فسنحصل على شدة لحزمة ضوئية مُشكّلة اتساعياً وهذا هو تشكيل الشدة - تشكيل الاتساع amplitude modulation - intensity modulation . سنحصل على قدرة بصرية وتيار مكشوف شبيه بالموجة المشكّلة في الشكل (١١-١جـ) والتي تمثل الحامل الفرعي في حالتنا هذه ، يعبر عن القدرة البصرية الناتجة بالمعادلة التالية :

$$P = P_{DC} + P_m (1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_C t \quad \text{..... (11.13)}$$

يتذبذب تردد الحامل البصري بسرعة كبيرة بينما يكون الحامل الفرعي ذو التردد الراديوي أبطأ وتردد موجة المعلومات أكثر بطأ .يكون شكل التيار المكشوف نفس شكل القدرة البصرية وتتولى دائرة الاستقبال استخلاص المعلومات من هذا التيار .



الشكل (١١- ٦) نظام نقل ليفي بصري تماثلي يستخدم تشكيل الشدة لحامل فرعي

١١-٢-٤ تشكيل الشدة بتشكيل تردد حامل فرعي Subcarrier Frequency Modulation

وضعت نظرية تشكيل التردد frequency modulation في أنظمة الاتصالات التقليدية للتغلب على مشاكل الضوضاء في تشكيل الاتساع. فمعظم الضوضاء تظهر على اتساع الموجة المرسلة الذي يتغير تبعاً للموجة المشكّلة المطلوبة . وكما هو الحال في تشكيـــل الاتساع تكون الموجة الحاملة جيبية الشكل ومحددة التردد .إذا كان تشكيل التردد

لإثارة جيبية وحيدة تتذبذب عند تردد $f_m = \frac{\omega_m}{2\Pi}$ فإن تيار تشكيل التردد FM يأخذ الشكل التالي :

$$i = I_m \cos (\omega_C t + \beta \sin \omega_m t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.14)$$

حيث β هو عامل تشكيل التردد و ω_m التردد الزاوي للموجة المشكّلة وω_C التردد الزاوي للموجة الحاملة .

يُشْغِل طيف إشارة تشكيل التردد منطقة تحيط بتردد الموجة الحاملة f_C وله عرض نطاق يساوي :

$$BW = 2 \Delta f + 2 B \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.15)$$

حيث أن Δf هو إنحراف التردد الأعظم maximum frequency deviation وB هو عرض نطاق النطاق الأساس ويساوي f_m للإشارة الجيبية .

يعبر عن Δf بالمعادلة التالية :

$$\Delta f = \beta f_m \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.16)$$

حيث أن f_m هو أعلى تردد تشكيل للإشارة المرسلة .

يعبر عن عرض نطاق النطاق الأساس بالمعادلة التالية طبقاً لقاعدة كارسون Carson's rule :

$$BW = 2 f_m (1 + \beta) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11.17)$$

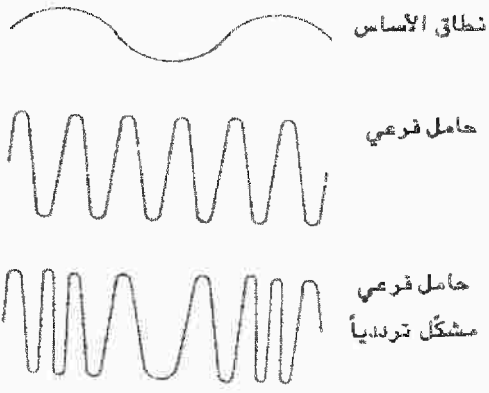
إذا كانت قيم β أقل من واحد بكثير فإن عرض نطاق النظام الكلي من المعادلة (11.17) يصبح $2 f_m$. ويماثل هذا عرض نطاق نظام التشكيل الاتساعي . أما إذا كانت $\beta >> 1$ وهو الوضع السائد في تشكيل التردد فإن طيف تشكيل التردد سيتجاوز ذلك المطلوب لتشكيل الاتساع. يتطلب تشغيل الثنائيات الباعثة للضوء LED وثنائيات الليزر LDفي المنطقة الخطية من خواص التيار - القدرة للمنبع استخدام تيار انحياز مستمر I_{DC} فيمكننا كتابة المعادلة (11.14) بالصيغة التالية :

$$i = I_{DC} + I_m \cos (\omega_C t + \beta \sin \omega_m t) \quad \ldots\ldots (11.18)$$

عند استخدام هذا التيار لإجراء تشكيل شدة لمنبع بصري ينتج تشكيل الشدة بتشكيل تردد حامل فرعي. وتتغير القدرة البصرية لموجة جيبية وحيدة كالتالي :

$$P = P_{DC} + P_m \cos (\omega_C t + \beta \sin \omega_m t \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11.19)$$

يبين الشكل (١١-٧) موجات تشكيل التردد حيث نرى أن شكل التيار المكشوف له نفس شكل القدرة البصرية . تسترجع دوائر إزالة التشكيل المعلومات من طور التيار المكشوف والذي يساوي $\beta \sin \omega_m t$.



الشكل (١١- ٧) موجات PM للحامل الفرعي للقدرة البصرية وللتيار المكشوف نفس شكل الموجة كما للحامل الفرعي المشكل

يمكن إرسال عدة قنوات تشكيل التردد FM باستخدام تعدد ارسال تقسيم التردد بنفس الطريقة التي تم فيها إرسال قنوات تشكيل الاتساع AM وحيث أن عرض النطاق FM أكبر من عرض نطاق AM فإن عدد قنوات FM الممكن إرسالها سيكون أقل من قنوات AM .

١١-٣ تشكيل النبضات Pulse Modulation

يكتسب تشكيل النبضات أهمية خاصة بسبب الاعتماد المتزايد على الاتصالات الرقمية digital communications . يشمل تشكيل النبضات التشكيل التماثلي

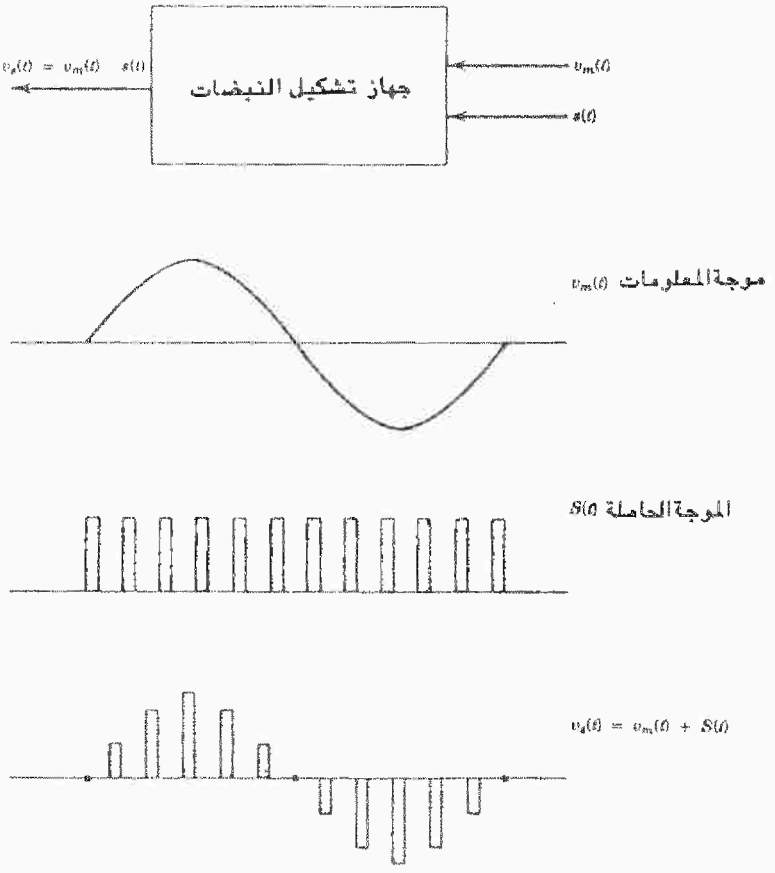
والذي يندرج تحته تشكيل اتساع النبضات pulse amplitude modulation (PAM) وتشكيل الفترة الزمنية للنبضات pulse duration modulation (PDM) وتشكيل مركز النبضات pulse position modulation (PPM) أما تشكيل النبضات الرقمي فيندرج تحت تشكيل رمز النبضات pulse code modulation(PCM) وتشكيل دلتا delta modulation.

١١-٣-١ تشكيل اتساع النبضات Pulse Amplitude Modulation (PAM)

عند دراستنا لتشكيل الاتساع وتشكيل التردد رأينا كيف يمكن إرسال الموجات المتغيرة مع الزمن بكاملها. يختلف أسلوب تشكيل النبضات عن أساليب تشكيل الاتساع والتردد في أنه يعتمد على إرسال الموجات المطلوبة من خلال إرسال عينات منفصلة ومتكررة repeated discrete samples من هذه الموجات بدلاً من إرسالها بالكامل.

تكمن فائدة الإرسال النبضي في وجود فراغات زمنية بين عينات الموجة المطلوب إرسالها، حيث يمكن إستغلال هذه الفراغات في إرسال عينات موجات أخرى ضمن نفس المجال الزمني وتحقيق مايسمى تعدد الارسال بتقسيم الزمن time division multiplexing.

يوضح الشكل (١١-٨) مبدأ تشكيل اتساع النبضات حيث نرى أن الموجة الحاملة ليست جيبية كما هو الحال في تشكيل الاتساع، بل هي موجة دورية تتكون من قطار من النبضات train of pulses تعمل طبقاً لمبدأ نظرية العينات sampling theorem. كما هو واضح من الشكل(١١-٨) تتم عملية ضرب الموجة $v_m(t)$ بدلالة العينات $S(t)$ والحصول على موجة العينات $v_s(t) = v_m(t)\ S(t)$ والتي ترسل بعد تضخيمها إلى دائرة تشغيل المنبع الضوئي.



الشكل (١١-٨) الحصول على موجة العينات V_s (t) للموجة V_m (t) عن طريق ضرب V_m (t) بتابع العينات S (t)

يتم بهذه الطريقة أخذ عينات للموجة تشابه بصفة تقريبية الموجة الحقيقية. ويجب أن تعبر هذه العينات عن التغير الفعلي للموجة وأن يكون معدل تكرار النبضات للحامل النبضي ضعف تردد الموجة المُشَكَّلة. وللحصول على مناعة جيدة من الضوضاء يجب أن يكون معدل العينات ثلاثة إلى أربعة أمثال تردد الموجة المشكلة . على سبيل المثال لو أردنا إرسال موجة صوتية عرض نطاقها 4000Hz فإننا نستخدم حامل نبضي بتردد 16kHz . أي أربعة أضعاف أعلى تردد للموجة الداخلة. إن العدد الإجمالي للعينات لكل ثانية = عدد الدورات cycles لكل ثانية x عدد العينات لكل دورة وهي مايسمى بمعدل العينات sample rate أي أن الموجة الصوتية الآنف ذكرها تحتاج إلى $4 \times 4000 \times 8 = 128000$

نبضة لكل ثانية . يتأثر تشكيل الاتساع بعدم خطية المنبع لذا فهو أقل كفاءة من التشكيل المباشر ولايعتد به .

١١-٣-٢ تشكيل الفترة الزمنية للنبضات Pulse Duration Modulation(PDM)

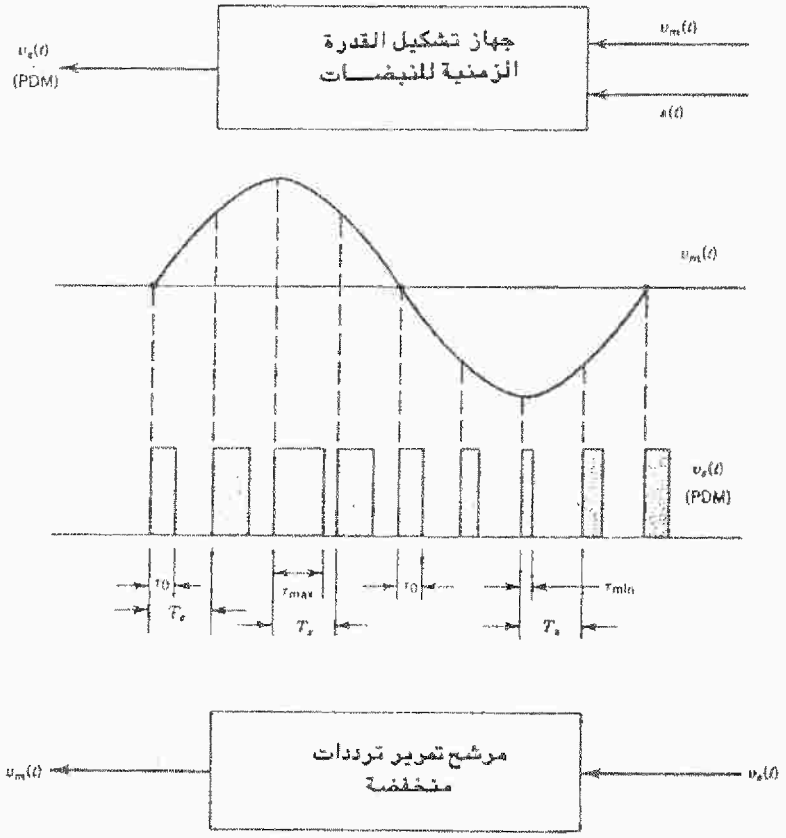
يعتمد تشكيل الفترة الزمنية للنبضات على تغير الفترة الزمنية التي تستغرقها النبضة طبقاً لتغير الموجة المطلوب إرسالها كما في الشكل (١١-٩) . ويدخل هذا النوع من التشكيل في نطاق مايعرف بتشكيل زمن النبضات pulse time modulation(PTM) لأنه يعتمد على تغيير أحد العوامل الزمنية للنبضة وهو فترتها . لتشكيل الفترة الزمنية للنبضات أسماء أخرى مثل تشكيل عرض النبضات pulse width modulation (PWM) أو تشكيل امتداد النبضات pulse length modulation (PLM) .

يتميز تشكيل الفترة الزمنية للنبضات عن تشكيل اتساع النبضات بأنه أقل عرضة للضوضاء غير أن كفاءته قليلة لأن جزءاً كبيراً من الطاقة المرسلة لاتحمل معلومات ومانهتم به هو التغير في عرض النبضة حول قيمة معينة . ترسل الموجة المشكّلة إلى دائرة تشغيل المنبع للحصول على قدرة خارجة تناسب تشكيل الفترة الزمنية للنبضات.

١١-٣-٣ تشكيل مركز النبضات Pulse Position Modulation (PPM)

يعتبر تشكيل مركز النبضات نوعاً من أنواع تشكيل زمن النبضات PTM . لكن الفترة الزمنية للنبضة الواحدة pulse duration في هذا النوع تكون ثابتة بينما يتغير حدوث النبضة أو مركز النبضة طبقاً لتغير الموجة المطلوب إرسالها . فإذا كانت الموجة المطلوب إرسالها $V_m(t)$ موجة جيبية حسب المعادلة التالية :

$$V_m(t) = V_m \cos \omega_m t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11.20)$$



الشكل (١١- ٩) مبدأ تشكيل القدرة الزمنية للنبضات

فإن مقدار التغير الزمني في حدوث النبضة وليكن $\delta(t)$ يعطى على النحو التالي :

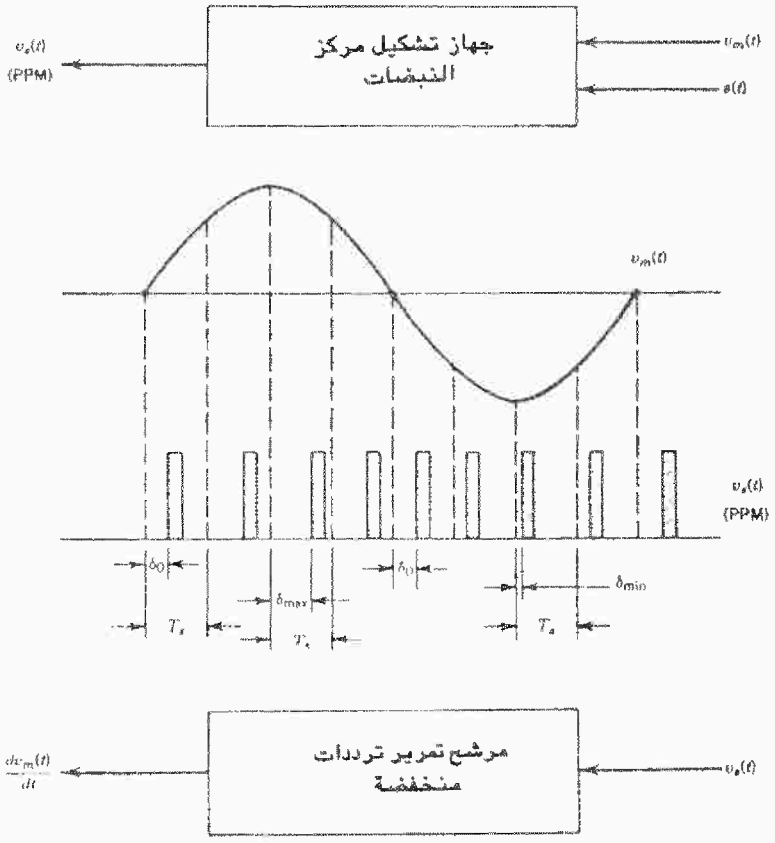
$$\delta(t) = \delta_0 \ (1 + M \cos \omega_m t) \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ (11.21)$$

حيث يمثل الرمز δ_0 مقدار انزياح حدوث النبضة عند $v_m(t) = 0$ ويمثل الرمز M عامل التشكيل ويجب أن نلاحظ أن مقدار انزياح حدوث النبضة $\delta(t)$ مضافاً إليه الفترة الزمنية الثابتة للنبضة T_0 يجب أن لايتجاوزا معاً قيمة دور النبضات T_s ويمكن التعبير عن ذلك

رياضياً بالعلاقة التالية :

$$(\delta(t)+T_0)<T_s$$

ويوضح الشكل (١١-١٠) مبدأ تشكيل مركز النبضات.



الشكل (١١-١٠) مبدأ تشكيل مركز النبضات

ترسل الموجات المشكّلة لدائرة تشغيل المنبع للحصول على تغير شدة يعتمد على مبدأ تشكيل مركز النبضات . يتميز تشكيل مركز النبضات بأنه لايتأثر بعدم خطية المنبع ،كما ان التشكيل يؤثر على توقيت النبضات ، لذا فهو يسمح بنقل نبضات ضيقة جداً . يتميز

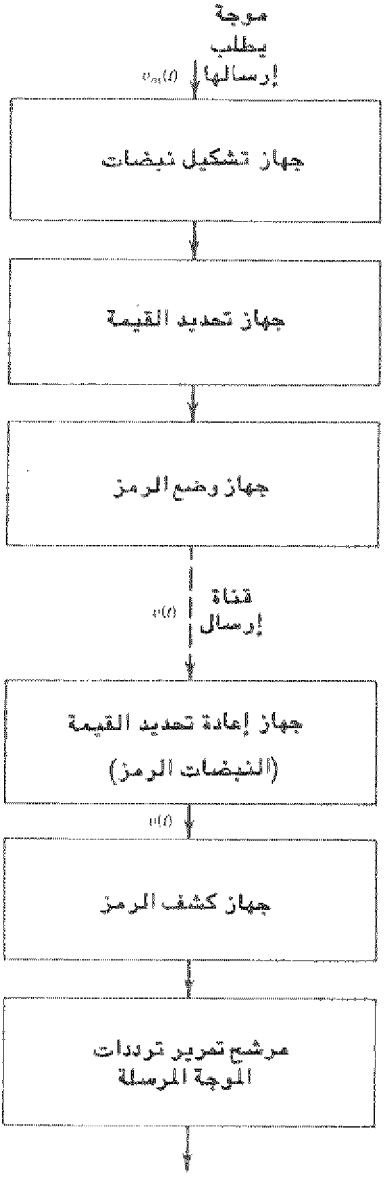
تشكيل مركز النبضات بأنه لايتأثر بعدم خطية المنبع ،كما ان التشكيل يؤثر على توقيت النبضات ، لذا فهو يسمح بنقل نبضات ضيقة جداً . يتميز تشكيل الشدة بتشكيل مركز النبضات بكفاءة تفوق قليلاً تشكيل الشدة المباشر لكن التحسن في نسبة الإشارة للضوضاء أقل . لذا يستخدم في الوصلات البصرية التماثلية الطويلة.

يوجد نوع آخر من التشكيل ويدعى تشكيل تردد النبضات pulse frequency modulation (PFM) والذي يعطي كسب تشكيل تردد نطاق واسع كما أن الأجهزة المستخدمة في هذا التشكيل غير معقدة ، لذا يشيع استخدامه في الأنظمة التماثلية النبضية.

١١-٣-٤ تشكيل رمز النبضات Pulse Code Modulation

تتميز أنواع التشكيل التي درسناها لحد الآن في هذا الكتاب بخاصة مشتركة هي الطبيعة التماثلية لتشكيل الموجة المطلوب إرسالها داخل الموجة الحاملة . ففي طرق التشكيل السابقة يجري تغيير أحد عوامل الموجة الحاملة ، الاتساع أو التردد أو الزمن بشكل مستمر تبعاً لتغير الموجة المرسلة.

ندرس في هذا البند نوعاً جديداً من التشكيل يختلف عن الأنواع السابقة بأن له طبيعة رقمية وليس طبيعة تماثلية ، ففي هذا النوع من التشكيل يجري أخذ عينات للموجة المطلوب إرسالها ، ثم يتم وضع رموز لهذه العينات ، غالباً ماتتكون من مجموعات متسلسلة من الوحدات الرقمية الثنائية sequence of binany digits حيث يجري إرسال هذه الرموز عبر قنوات الاتصال . وفي الاستقبال يجري كشف هذه الرموز واستعادة الموجة المرسلة . يدعى هذا النوع من التشكيل بتشكيل رمز النبضات ويتمتع بمزايا عديدة أدت إلى انتشار استخدامه . يتكون تشكيل رمز النبضات من المراحل التالية عند الإرسال كما هو موضح في الشكل (١١-١١).



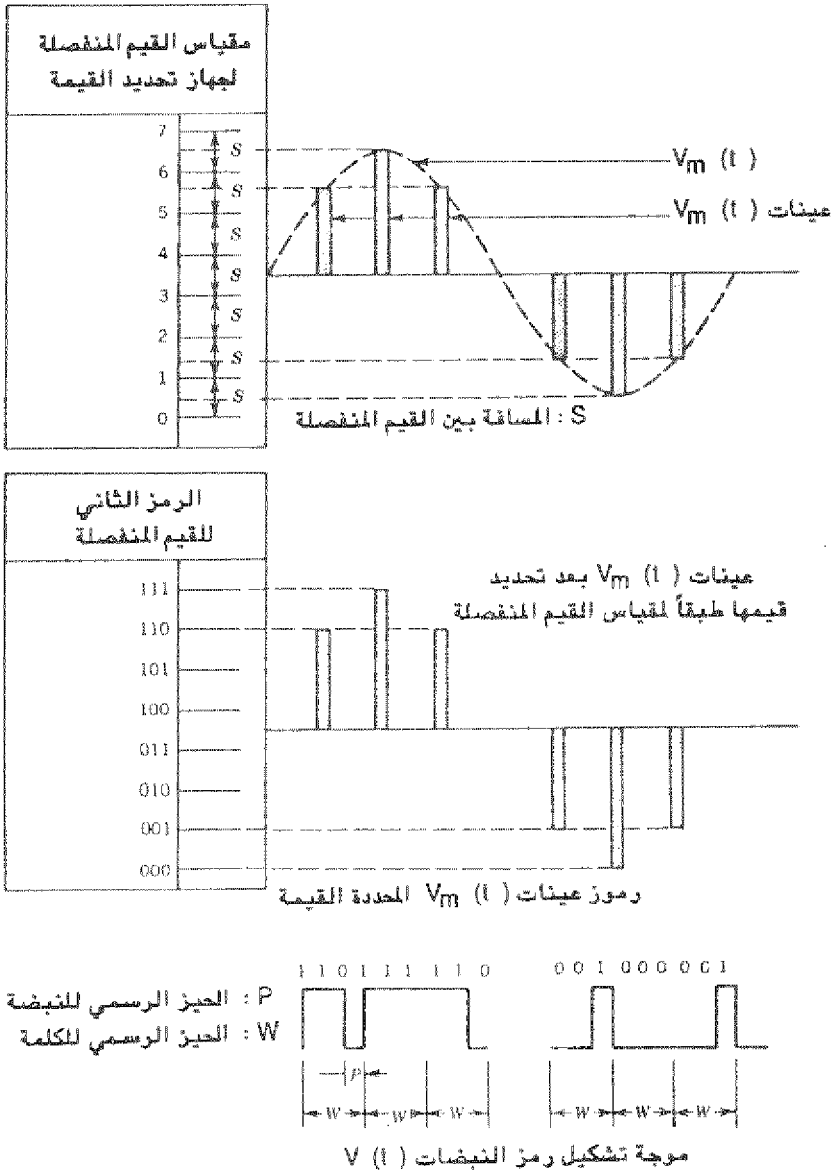
الشكل (١١-١١) مراحل تشكيل رمز النبضات

أ - جهاز تشكيل النبضات أو جهاز أخذ العينات ، ويعمل هذا الجهاز ، على ضرب الموجة المطلوب إرسالها بموجة دالة العينات التي تتكون من قطار من النبضات الدورية التي يبلغ اتساع كل منها وحدة قياسية واحدة ويتجاوز ترددها ضعف تردد الموجة المطلوب إرسالها طبقاً لنظرية العينات. وينتج عن هذا الجهاز قطار من النبضات المختلفة الاتساع ، التي يعبر تغير اتساعها عن تغيرات الموجة المرسلة كما هو موضح بالشكل (١١-٨).

ب- جهاز تحديد القيمة quantizer ،ويعمل هذا الجهاز على أخذ موجة العينات الناتجة عن جهاز تشكيل اتساع النبضات ،ومقارنة كل من هذه النبضات بمقياس يتكون من عدد محدد من القيم المتتالية والمنفصلة عن بعضها discrete values . ثم اختيار أقرب قيمة من هذه القيم لمقدار اتساع النبضة. وتحديد اتساع النبضة بهذه القيمة الجديدة. وعلى ذلك يكون اتساع أي من النبضات الخارجة من هذا الجهاز محدد بإحدى القيم المنفصلة التي يحددها المقياس المستخدم. ويوضح الشكل (١١-١٢) عملية تحديد القيمة هذه.

جـ- جهاز وضع الرمز encoder ، يعمل هذا الجهاز على أخذ موجة العينات المحددة الاتساع طبقاً لمقياس جهاز تحديد القيمة ، ثم يقوم بتحويل كل نبضة من نبضات هذه الموجة إلى رمز تمثله مجموعة من النبضات ثابتة الاتساع والفترة الزمنية . يعطي معدل البتات لتشكيل رمز النبضات بالتعبير التالي ، معدل البتات = عرض النطاق × عينات لكل دوره × بتات لكل عينة .

د - تمرر النبضات التي تعبر بالرمز عن عينات الموجة المرسلة إلى دائرة قيادة أو تشغيل المنبع . يأخذ الضوء الخارج من المنبع شكل موجة تشكيل رمز النبضات وترسل عبر الليف البصري. ويبين الشكل (١١-١٢) عملية وضع الرموز بالوحدات الرقمية الثنائية لموجة نبضات محددة القيمة ، وموجة تشكيل رمز النبضات التي تعبر عن ذلك. ويوضح الشكل (١١-١١) عملية استقبال موجة تشكيل النبضات واستخراج الموجة المرسلة منها ، المراحل الرئيسية التالية :



الشكل (١١-١٢) شكل الموجة عبر مراحل تشكيل رمز النبضات

أ - جهاز إعادة تحديد القيمة ، ويعمل هذا الجهاز على كشف الموجة المرسلة وتنقيتها من الضوضاء وإعادة تكوين الموجة المستقبلة خالية من الضوضاء من جديد.

ب - جهاز كشف الرمز decoder ويعمل هذا الجهاز على أخذ موجة تشكيل رمز النبضات بعد إعادة تكوينها وتنقيتها من الضوضاء ، ثم تحديد قيمة كل عينة من عينات الموجة المرسلة ، عن طريق كشف رمز كل عينة والممثل عادة بمجموعة من النبضات التي تعبر عن مجموعة من الوحدات الرقمية الثنائية التي تعطي قيمة معينة. وتعاكس هذه العملية عملية وضع الرمز الوارده فيما سبق والموضحة بالشكل (١١-١٢).

جـ - دوائر المرشح والمضخم وتعمل هذه الدوائر على استعادة الموجة المرسلة بشكلها الأصلي وتضخيمها.

يتميز تشكيل رمز النبضات بالصفات التالية :

أ - انخفاض التشويش وبالتالي ارتفاع نسبة الأشارة إلى الضوضاء ويعود ذلك إلى إمكانية استعادة موجة التشكيل عن طريق كشف وجود أو عدم وجود نبضة في كل حيز زمني لنبضة واحدة.

ب - يناسب هذا النوع من التشكيل الاتصالات عبر مسافات طويلة ، لأن أجهزة تكرار الإرسال الموجودة عبر مسافة الإرسال تستطيع إعادة تشكيل الموجة والتخلص من الضوضاء قبل إرسالها ثانية بقدرة أعلى إلى مكرر آخر أو إلى مقصدها الإخير.

جـ - يتوافق هذا النوع من التشكيل مع أنظمة إرسال البيانات data transmission التي تتزايد أهميتها في هذا العصر حيث يكثر تخزين وتبادل المعلومات.

يتعرض تشكيل رمز النبضات إلى مشاكل نوجزها فيما يلي :

أ - يتطلب إستخدام هذا التشكيل نطاقاً واسعاً من الترددات .

ب - تشمل مراحل تنفيذ هذا التشكيل دوائر إلكترونية أكثر تعقيداً من دوائر أنواع التشكيل الأخرى.

جـ - لايعتبر إستخدام هذا التشكيل اقتصادياً للمسافات القصيرة غير أن تقدم الإلكترونيات

وانخفاض كلفة الدوائر الألكترونية المعقدة بدأ يقلل من أهمية هذه المشكلة.

١١-٤ تعدد الإرسال Multiplexing

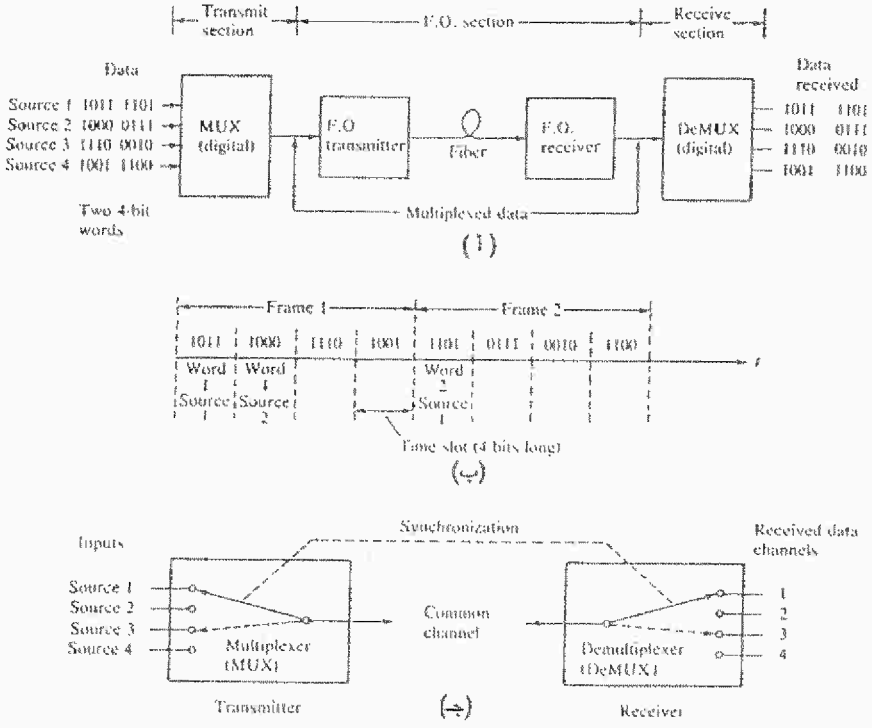
إن الغرض الأساسي من تعدد الارسال هو استغلال عرض نطاق قناة المعلومات لعدة مستخدمين. قناة المعلومات أو الاتصال هنا هي الليف البصري والموجة الحاملة هي الضوء. سنفرض في دراستنا أن منابع المعلومات المستقلة تخضع لنفس الشروط العامة مثل الاتساع والمعدل وعرض النطاق.

١١-٤-١ تعدد الإرسال بتقسيم الزمن Time Division Multiplexing (TDM)

يمكن في هذا النظام إرسال موجات من خلال إرسال عينات منها وفق تردد معين وينتج إرسال عينات موجة ما، وجود فراغات زمنية، يمكن استغلالها لإرسال عينات موجات أخرى. ويدعى إرسال عدد من الموجات من خلال إرسال عينات منها بشكل متتابع ضمن مجال زمني واحد بتعدد إرسال تقسيم الزمن ويبين الشكل (١١-١٣أ) مخططاً صندوقياً لنظام تعدد الإرسال بتقسيم الزمن يشمل عمليتي الإرسال والاستقبال.

وقد تكون المعلومات المرسلة مشكّلة بأحد طرق التشكيل الآنف ذكرها مثل تشكيل اتساع النبضات PAM أو تشكيل رمز النبضات PCM حيث ترسل النبضات لتعبر عن الموجة التماثلية الداخلة.

يتم في هذا الإرسال تحديد فترة زمنية يقوم فيها كل منبع معلومات ضمن نظام الإرسال بإرسال المعطيات. ففي الشكل (١١-١٣) تشترك أربعة منابع في نفس قناة الاتصال. ترسل معطياتها بالتتابع كما هو في الشكل (١١-١٣ب). عندما يكمل المنبع رقم 4 نقل معلوماته يحدد الشق الزمني الذي يليه إلى المنبع رقم 1. وهلم جراً. قد توجد طرق لتعدد الإرسال تسمح لمنبع معين بإرسال معلومات أكثر من المنابع الأخرى يعبر عن تتابع المنابع 1 إلى 4 بالرتل frame. نلاحظ أن المعطيات في الشكل (١١-١٣) تتكون من أربعة بتات.



الشكل (١١-١٣) تعدد الإرسال بتقسيم الزمن (أ) مخطط صندوقي للنظام

(ب) معطيات مجمعة في شقوق زمنية

(جـ) نموذج مبسط لمعدد الإرسال ومزيل تعدد الإرسال

يبين الشكل (١١-١٣جـ) فكرة مبسطة عن تشغيل معدد الإرسال multiplexer حيث يقوم مفتاح إلكتروني بأخذ عينات من كل قناة تتابعياً ومن ثم هناك تواقت synchronization بين معدد الارسال ومزيل تعدد الارسال demultiplexer يبدأ ثانية فينتج رتلاً آخر . من الناحية العملية يقوم كل مصدر دخل input source بتغذية مرحلة دخل وسيطة input buffer تتولى تخزين المعطيات بصفة مؤقتة . ثم تجمع في قناة رئيسية وهي الليف البصري . بهذه الطريقة يمكن استخدام قناة ذات سرعة عالية لنقل عدد كبير من المعطيات ذات المعدلات المنخفضة .

يرتبط عدد قنوات الدخل المتعددة N ومعدل معطيات قناة الدخل ومعدل معطيات الخرج بالعلاقة التالية :

$$\text{MUX Output rate} = N \times \text{Input rate} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11.22)$$

حيث تعني mux معدد الإرسال.

بالإضافة إلى ذلك تضاف إشارات الترقيت والتحكم والتي اهملت في المعادلة (11.22) .

يجب أن تكون سعة القناة المشتركة وهي الليف البصري في هذه الحالة والمربوطة بمعدد الارسال multiplexer مساوية أو أكبر من معدل الخرج المذكور في المعادلة (11.22) . فرضنا في المعادلة (11.22) أن معدل معطيات قنوات الدخل متساوي . عندما تتغير المعدلات فإننا نستخدم أعلى معدل لحساب سعة القناة المشتركة. وهذا الشرط صحيح فقط لتعدد الارسال بتقسيم الزمن الثابت.

مَعْلَمَةٌ أخرى تذكر دائماً مع تعدد الارسال بتقسيم الزمن وهي معدل التبديل switching rate وهي تشير إلى عدد مرات الدخل لكل ثانية (يمثل كل دخل قناة معطيات) .

بالإضافة إلى الموجات المرسلة هناك إشارات تراقت synchronization وهي نبضات إضافية ذات طبيعة خاصة ضمن كل رتل frame من ارتال موجة النبضات لتوجيه عمل إزالة تقسيم الزمن ونقل عينات كل رتل إلى مكانها الصحيح.

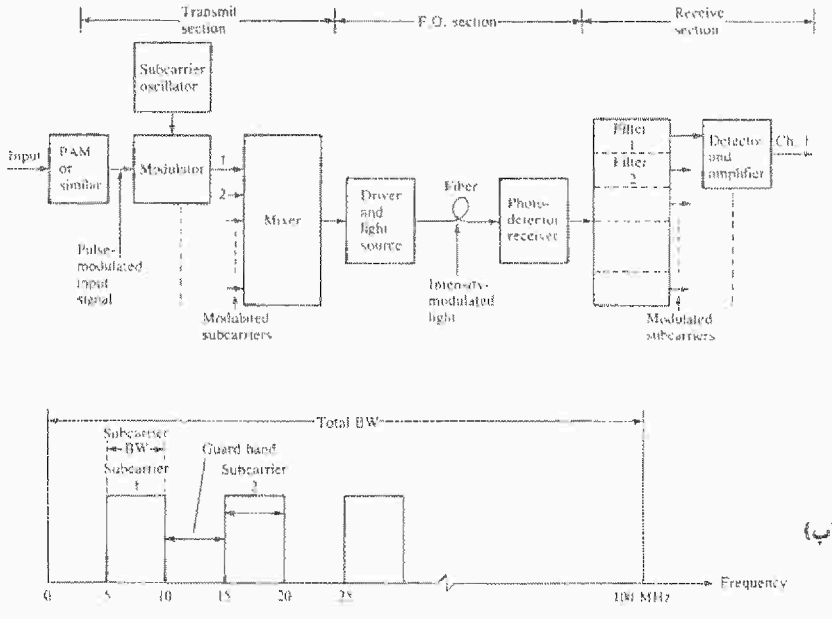
١١-٤-٢ تعدد الإرسال بتقسيم التردد Frequency Division Multiplexing

يتم في تعدد الارسال بتقسيم التردد تقسيم عرض نطاق قناة المعلومات إلى شقوق ترددات frequeny slots (حاملات فرعية subcarriers) يخصص لكل منبع حامل فرعي. يوضح الشكل (١١-١٤أ) مخططاً صندوقياً لنطاق تجميع تقسيم التردد FDM . لو فرضنا أن عرض نطاق النظام الليفي هو 100MHz (وهذا يعني أن الضوء المرسل يمكن تشكيله بواسطة موجة أو موجات حاملة بتردد يصل حتى 100MHz) : بعدها نرصد حاملات مختلفة (حاملات فرعية) لمنابع المعطيات المختلفة . نرى في الشكل

(١١-١٤ب) وجود نطاقات حراسة guard bands تفصل الحاملات الفرعية عن بعضها. يسهل هذا الإجراء فصل الحاملات الفرعية عن بعضها في جهاز الاستقبال.

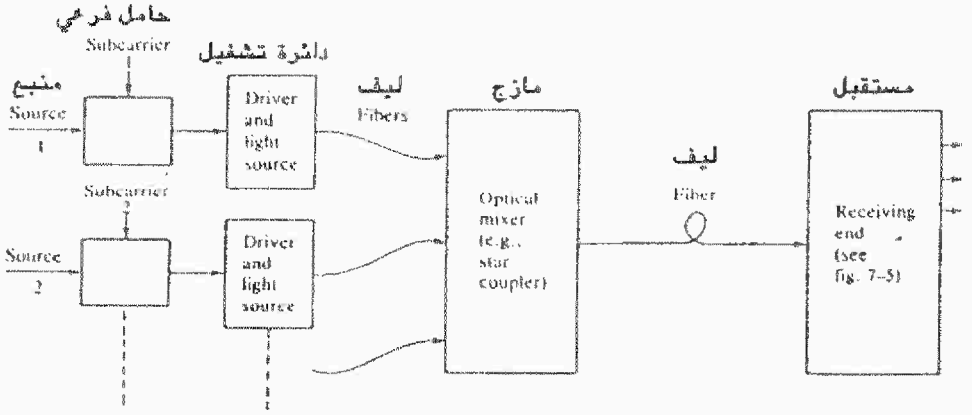
لو نظرنا إلى الشكل (١١-١٤ب) ثانية لوجدنا أن عرض نطاق الحاملات الفرعية هو 5MHz . في حقيقة الأمر يتغير تخصيص عرض النطاق حسب التطبيق. يشكل كل حامل فرعي بمنبع معطياتها data source الذي قد يكون تشكيل اتساع النبضات أو تشكيل رمز النبضات أو أي معطيات أخرى. وقد يكون هناك ثلاث مستويات من التشكيل. إذ تشكل المعطيات التماثلية قطار من النبضات(PAM) والذي يستخدم لتشكيل حامل فرعي (AM أو FM). تقوم الحاملات الفرعية المشتركة بتشكيل المنبع الضوئي.

تتولى مجموعة من مرشحات تمرير النطاق band pass filters باستعادة recover الحاملات الفرعية الأصلية عند جهاز الاستقبال لتسمح هذه المرشحات بمرور مدى محدود من الترددات بالعبور دون توهين.



الشكل(١١-٤) تعدد الارسال بتقسيم الزمن (أ) مخطط صندوقي للنظام
(ب) نطاقات التردد للإرشارة المرسلة

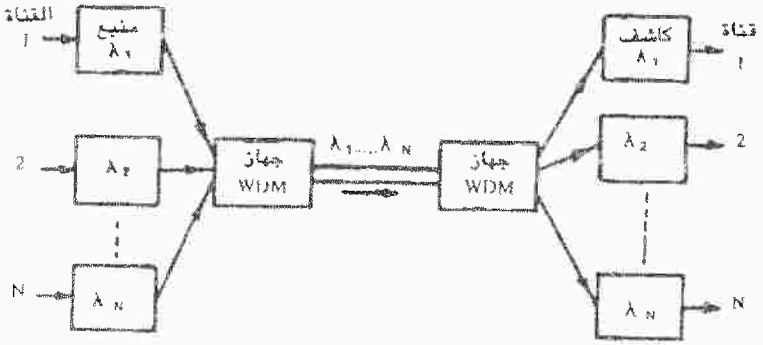
تمزج الحاملات الفرعية على مستوى الموجات الألكتروني كما هو واضح في الشكل (١١-١٤أ). يؤدي ذلك إلى حدوث لغط cross talk وتداخل الحاملات مع بعضها. يمكن التخلص من اللغط بعمل المزج على المستوى البصري. يبين الشكل (١١-١٥) مخططاً صندوقياً لهذا النظام. نلاحظ أن جهاز الاستقبال لم يتغير. عندما يتم تعدد الارسال على المستوى البصري، يشكّل منبع معطيات حاملاً فرعيا يقوم بقيادة المنبع الضوئي وسيكون عدد المنابع الضوئية بعدد منابع المعطيات المجمّعة. في تعدد الارسال المذكور في الشكل (١١-١٤) يوجد منبع واحد موصل بالليف. يسبب العدد الكبير من المنابع الضوئية إلى حدوث مشاكل تشبع عند الكاشف، لذا لابد من تحديد عدد المنابع المستخدمة وشدتها حتى لايتشبع جهاز الكشف.



الشكل (١١- ١٥) تعدد الإرسال بتقسيم الزمن - المزج على مستوى الإشارة البصرية

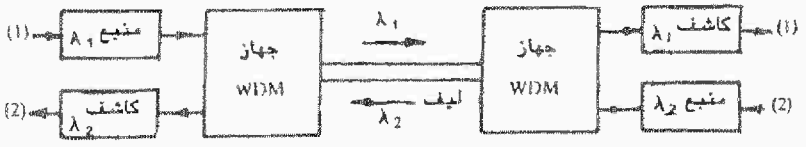
١١-٤-٣ تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي Wavelength Division Multiplexing

يتم في نظام الاتصالات البصري - البسيط استخدام طول موجي واحد لإرسال المعلومات ولاتمكن هذه الطريقة من الاستفادة من عرض نطاق الليف. لذا فقد استحدثت طرق عديدة لإرسال عدة أطوال موجية في آن واحد. حيث يخصص لكل منبع معطيات ، أو مجموعة من منابع المعطيات ، طول موجي لإرسال المعلومات.



الشكل (١١-١٦) رسم صندوقي لنظام تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي باتجاه واحد

يبين الشكل (١١-١٦) رسماً صندوقياً لنظام تعدد الارسال بتقسيم الطول الموجي باتجاه واحد . أما في الشكل (١١-١٧) فنرى نظام تعدد الارسال بتقسيم الطول الموجي مزدوج الإتجاه. قد يستخدم مع كل طول موجي أياً من نظم تعدد الارسال التي تمت مناقشتها سابقاً وبذا تزداد سعة نقل المعطيات لنظام الاتصالات .



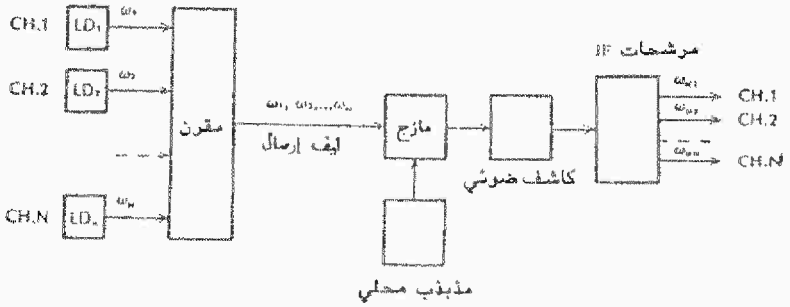
الشكل(١١-١٧)رسم صندوق لنظام تعدد الارسال بتقسيم الطول الموجي مزدوج الاتجاه

تؤدي كثرة المنابع المستخدمة في الإرسال إلى حدوث تشبع في الكاشف البصري لجهاز الاستقبال نظراً لازدياد القدرة البصرية المرسلة . أما في نظام WDM فإن الأطوال الموجية تعرّف قبل أن تصل الكاشف البصري. ويذهب كل طول موجي إلى كاشف مختلف لذا فإن حصول التشبع غير وارد . نستطيع في تعدد ارسال FDM وWDM إرسال عدد من قنوات المعلومات في آن واحد بينما لايمكن من إرسال أكثر من قناة واحدة في أي وقت في تعدد إرسال TDM .

١١-٤-٤ تعدد الإرسال بتقسيم التردد البصري Optical Frequency - Division Multiplexing(OFDM)

يمكن استخدام عدة منابع لإرسال المعلومات عبر الليف البصري بواسطة تعدد الارسال بتقسيم التردد البصري (OFDM) مترافقاً مع الكشف التخفيقي heterodyne حيث تمتزج حزمة الضوء من المتذبذب المحلّي local oscillator بالموجة المعدّلة عند مدخل الكاشف الضوئي. يحول الكاشف التخفيقي تغيرات الطور في تردد الحامل البصري إلى

تغيرات طور في الشدة البصرية. يبين الشكل (١١-١٨) مخططاً صندوقياً لهذا النوع من تعدد الإرسال. يعاير حرارياً عدد N من ثنائي ليزري متماثل لكي تبث هذه الثنائيات عند ترددات متفاوتة قليلاً ω_1 , ω_2 ..... ω_N وتشكّل الثنائيات بالرسائل المرغوبة . يقرن خرج كل ثنائي إلى الليف وتقرن الألياف المتعددة إلى ليف الإرسال. وعند المستقبل يمتزج الضوء من متذبذب محلي وعميد بكل حزمة مرسلة فينتج تردد متوسط intermediate frequency لكل قناة. تفرز sort لترددات المتوسطة ω_{IF1} , ω_{IF2} ..... ω_{IFN} إلكترونياً بواسطة مرشحات . تحدد سرعة الكاشف الضوئي التردد المتوسط الأعظمي المسموح به .



الشكل (١١-١٨) رسم صندوقي لتجميع تقسيم التردد البصري

يتشابه تعدد الارسال بتقسيم التردد البصري OFDM وتعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي حيث يستعمل كل منهما منابع بصرية منفصلة لكل قناة. أما الفروق بينهما فهي كما يلي :

١ - يتطلب تعدد الارسال بتقسيم التردد البصري OFDM كشفاً تخفيقياً بينما يستعمل تعدد الارسال بتقسيم الطول الموجي WDM كشفاً مباشراً .

٢ - تفرز sort أنظمة WDM القنوات في المجال البصري (قبل الكشف الضوئي) بينما

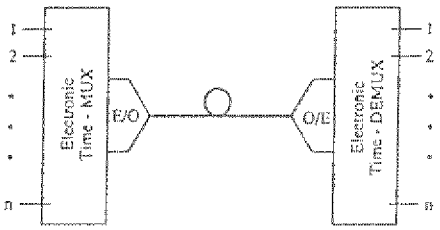
تفرزها أنظمة OFDM إلكترونياً بعد الكشف الضوئي.

٣ - أن الفرز الكهربائي عند الترددات الراديوية أكثر انتقاءً من الفرز البصري. لذا تكون القنوات المتجاورة في أنظمة OFDM أقرب إلى بعضها مما هو في أنظمة WDM. يسمح الفاصل الأضيق بين الأقنية المتجاورة بإرسال عدد أكثر من القنوات في نافذة طول الموجة الطويلة ذات التبعثر والفقد القليلين.

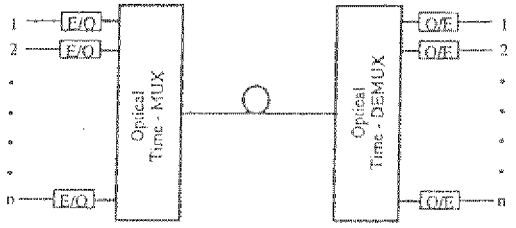
١١-٤-٥ تعدد الإرسال بتقسيم الزمن البصري Optical Time Division Multiplexing

شرحنا في البند (١١-٤-١) تعدد الارسال بتقسيم الزمن ونشرح في هذا البند تعدد الارسال بتقسيم الزمن البصري. يبين الشكل (١١-١٩أ) رسماً توضيحياً لتجميع تقسيم الزمن الآنف ذكره حيث يحصل تعدد الارسال في المجال domain الكهربائي أي قبل حدوث التحويل الكهروضوئي electrooptical(E/O). أما إزالة تعدد الارسال demultiplexing فتحدث بعد تحويل الموجات الضوئية إلى موجات كهربائية . فإذا كان لدينا عدد من قنوات الأساس يساوي N ومعدل بتات B فإن معدل بتات التجميع هو NB. تحصل مشاكل عديدة في جهاز الإزالة حيث يجب أن تعمل الدوائر الألكترونية بمعدل معطيات كامل. تبرز هذه المشاكل نتيجة (أ) محدودية سرعة الدوائر المتكاملة الرقمية (ب) محدودية سرعة المضخمات الخطية ذات القدرة العالية والضوضاء المنخفضة التي تقود ثنائي الليزر أو المشكّل modulator في أجهزة التحويل الكهروضوئي أو الضوكهربائي (جـ) محدودية عرض نطاق التشكيل لثنائيات الليزر والمشكّلات modulators . أدت هذه العوامل إلى تحديد الحد الأقصى لمعدل البتات المجمّعة كهربائياً إلى حوالي 10Gb/s.

أما في أنظمة تعدد الارسال البصرية المبينة في الشكل (١١-١٩ب) فقد تم التخلص من المشاكل في أجهزة التحويل الكهروضوئي والضوكهربائي . ينجز تعدد الارسال في OFDM بعد أن يتم التحويل الكهروضوئي أما الإزالة فتحدث قبل التحويل الضوكهربائي . تعمل الأجهزة الألكترونية المستخدمة في النظام بمعدل بتات نطاق الأساس.



(أ)



(ب)

الشكل (١١- ١٩) نظام تعدد الارسال بتقسيم الزمن البصري

(أ) تعدد الارسال بتقسيم الزمن في المجال الكهربائي

(ب) تعدد الارسال بتقسيم الزمن في المجال البصـــري

١١ - ٥ الخلاصة Summary

ناقشنا في هذا الفصل أنظمة التشكيل التماثلية والنبضية بنوعيها التماثلي والرقمي المستخدمة في أنظمة الاتصالات البصرية ووجدنا أن استخدام بعض المعلمات المستخدمة في أنظمة التشكيل مثل الاتساع والتردد والطور قد لايمكن استخدامها بصورة مباشرة في الاتصالات البصرية ويرجع ذلك إلى الصعوبات الرئيسية التي يواجهها كشف الإشارات حيث أن الكواشف الضوئية تستجيب فقط لسطوع الإشعاع الساقط عليها . لهذا السبب استخدمت حاملات فرعية تقوم بتشكيل الموجات وينتج عنها تشكيل الشدة مثل

تشكيل الاتساع - تشكيل الشدة ، وتشكيل التردد - تشكيل الشدة في الأنظمة التماثلية. أما تشكيل النبضات بأنواعه المختلفة فإنه يعتمد على إرسال عينات منفصلة ومتكررة تعكس مضمون المعلومات المراد إرسالها. يلخص الجدول (١١-١) جدولاً بصيغ التشكيل التي نوقشت في هذا الفصل .

الجدول (١١-١) صيغ التشكيل في النظام البصري

الأسم	الوصف	التعليق
تشكيل الشدة المباشر	تتغير القدرة البصرية طردياً مع نطاق الأساس	أبسط أنواع التشكيل التماثلي
تشكيل الشدة - تشكيل الاتساع AM-IM	تشكّل إشارة المنبع البصري بواسطة اشارة ذات تردد أقل مشكّلة اتساعياً	يسمح بتجميع تقسيم التردد لحامل فرعي.
تشكيل الشدة- تشكيل التردد FM-IM	تشكل إشارة المنبع البصري بواسطة إشارة مشكّلة ترددياً	يسمح بتجميع تقسيم التردد لحامل فرعي.
تشكيل اتساع النبضات (PAM)	تتكون من قطار من النبضات تعبر عن الموجة الأصلية	يتأثر هذا التشكيل بخطية المنبع
تشكيل الفترة الزمنية للنبضات(PDM)	تتغير الفترة الزمنية للنبضة طبقاً لتغير الموجة	لايتأثر كثيراً بالضوضاء كفاءته قليلة.
تشكيل مركز النبضات (PPM)	يتغير مركز النبضة طبقاً لتغير الموجة.	كفاءته تزيد عن تشكيل الشدة المباشر.
تشكيل رمز النبضات (PCM)	تؤخذ عينات من الموجة وترمّز	تشويش قليل. مناسب للإرسال الرقمي يتطلب نطاقاً واسعاً ودوائر متعددة .

إن الهدف من تعدد الارسال هو استغلال عرض نطاق قناة المعلومات وإستخدامها من قبل عدد من المستخدمين . شرحنا طرق تعدد الارسال الشائعة والتي تنقسم إلى قسمين الأول يعتمد على تعدد الارسال الالكتروني مثل تعدد الارسال بتقسيم الزمن (TDM) تعدد الارسال بتقسيم التردد(FDM) والقسم الثاني بصري ويضم ثلاثة أنواع وهي تعدد الارسال بتقسيم الطول الموجي (WDM) وتعدد الارسال بتقسيم التردد البصري (OFDM) وتعدد الارسال بتقسيم الزمن البصري(OTDM) نوجزها فيما يلي :

١ - تعدد الارسال بتقسيم التردد FDM

يتم بهذه الطريقة تقسيم عرض نطاق قناة المعلومات إلى مجموعة ترددات ويخصص لكل منبع ضوئي تردد معين على هيئة حاملات فرعية تمزج إلكترونياً وترسل عبر الليف البصري وفي جهاز الاستقبال يتم فصلها إلكترونياً من خلال مرشحات وتضخم بعد ذلك. يتأثر هذا النظام بخطية المنبع مما يؤدي إلى حدوث لغط بين القنوات .

٢ - تعدد الارسال بتقسيم الزمن TDM

ترتب بتات المعطيات المعبرة عن الموجات المرسلة وتتشارك زمنياً في مرورها بالليف. نستخدم في هذا النظام منبعاً بصرياً واحداً وكاشفاً ضوئياً واحداً . يتم في هذ النظام تداخل وفصل الإشارات كهربائياً . يناسب TDM الاتصالات الرقمية فهو لايغير سعة المعلومات بل يوزع البتات المتاحة بين عدة رسائل .

٣ - تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي WDM

تسير عدة رسائل في قناة الاتصال وكل رسالة تحمل على طول موجي مختلف يتطلب هذا النظام وجود عدة منابع تبث الضوء على أطوال موجية مختلفة . يتم الكشف المباشر في هذا النظام .

٤ - تعدد الإرسال بتقسيم التردد البصري OFDM

تشكّل الرسائل على منابع ذات أطوال موجية مختلفة قليلاً . يستخدم في هذا النظام الكشف التخفيقي وتفرز القنوات إلكترونياً بعد الكشف الضوئي . يزيد هذا النظام في سعة الليف .

٥ - تعدد الإرسال بتقسيم الزمن البصري OTDM

يعتبر من أسرع أنظمة تعدد الارسال نظراً لسرعة نقل المعلومات التي يتميز بها هذا النظام حيث يتم تعدد الارسال بعد تحويل الإشارات الكهربائية إلى ضوئية في جهاز الإرسال ويزال تعدد الارسال قبل تحويل الإشارات الضوئية إلى كهربائية فأمكن بذلك التخلص من كثير من المشاكل التي تحدثها بعض الدوائر الإلكترونية المستخدمة في نظام TDM .

الفصل الحادي عشر

أسئلة

١ - ماهي الموجة الحاملة ؟

٢ - ماهي الموجة المشكلة ؟

٣ - عرف التشكيل واشرح تشكيل الاتساع ؟

٤ - أشرح تشكيل التردد ؟ وقارن بينه وبين تشكيل الاتساع؟

٥ - أذكر أنواع التشكيل وصفها باختصار ؟

٦ - ما الفرق بين تشكيل PAM وتشكيل PCM ؟

٧ - ما معنى تعدد الإرسال وما فائدته ؟

٨ - إشرح تعدد إرسال TDM .

٩ - إشرح تعدد إرسال FDM .

١٠- إشرح تعدد إرسال WDM .

١١- قارن بين تعدد إرسال FDM وتعدد إرسال OFDM .

١٢- قارن بين تعدد إرسال TDM وتعدد أرسال OTDM .

مسائل :

١ - لدينا الموجة $V_m(t)$ يطلب إرسالها بإستخدام تشكيل الاتساع على الموجة الحاملة $V_c(t)$ حيث أن

$$V_m(t) = 4\cos 2\Pi(1000)t + 8\cos 2\Pi(2000)t + 4\cos 2\Pi(3000)t$$

(أ) أوجد طول الموجة λ_c للموجة الحاملة $V_c(t)$.

(ب) أوجد التعبير الرياضي لموجة التشكيل $V(t)$.

(جـ) أوجد عوامل التشكيل M_1 , M_2 و M_3 لمركبات الموجة $V_m(t)$.

(د) أوجد الاتساع الأعظمى Maximum Amplitude والاتساع الفعال r m s والتردد لكل مركبة من مركبات موجة التشكيل .

٢ - لدينا الموجة $V_m(t)$ يطلب إرسالها بإستخدام تشكيل الاتساع على الموجة الحاملة $V_c(t)$ حيث :

$$V_m(t) = A_1 \cos \omega_m t + A_2 \cos 2\omega_m t + A_3 \cos 3\omega_m t$$

$$V_c(t) = A_c \cos \omega_c t$$

(أ) أوجد موجة التشكيل $V(t)$.

(ب) أذا كانت قيم الاتساع على النحو التالي :

$A_c = 40$ volts $\qquad A_1 = 10$ volts

$A_2 = 20$ volts $\qquad A_3 = 30$ volts

أوجد عوامل التشكيل M_1 , M_2 و M_3 لكل من المركبات الثلاثة للموجة $V_m(t)$.

(جـ) إذا كانت قيمة التردد الزاوي للحامل ω_c والتردد الزاوي ω_m على النحو التالي $\omega_m = 2\Pi\,(1\,000)$, $\omega_c = 2\Pi\,(100\,000)$. ماهي الترددات التي تظهر في موجة التشكيل ، وضح ذلك بالرسم .

٣ - لدينا الموجتان التاليتان :

$$i_c(t) = I_c \cos (215.2\,\Pi)(10^6)\,t$$

$$i_m(t) = I_m \cos (14\,\Pi)(10^3)\,t$$

حيث يجرى تحميل الموجة $i_m(t)$ على الموجة $i_c(t)$ طبقاً لمبدأ تشكيل التردد ، ويؤدي ذلك إلى إنحراف التردد الحامل Δf قدره $\Delta f = 70$ kHz .

(أ) أوجد تردد الموجة الحاملة f_c والموجة المحمولة f_m .

(ب) أوجد مقدار تأرجح التردد لموجة تشكيل التردد وكذلك أعلى قيمة وأقل قيمة يصلها هذا التردد .

(جـ) أوجد قيمة عامل التشكيل β وعرف نطاق التردد BW قارن بين عرض نطاق التردد مع تأرجح التردد .

(د) أكتب التعبير الرياضي لموجة التشكيل $i(t)$ على أن تؤخذ القيم الناتجة بعين الاعتبار .

٤ - لدينا موجة تشكيل التردد قيمة عامل التشكيل فيها $\beta = 5$ وتردد موجتها المحمولة $f_m = 3\ kHz$.

(أ) أوجد قيمة انزياح التردد Δf .

(ب) أوجد نسبة تشكيل التردد في الإرسال الاذاعي (88 – 108 MHz) حيث تسمح بانزياح أعظمي في التردد قدره $\Delta f_{max} = 75\ kHz$

٥ - إفرض أن لدينا ثنائي LED عرض نطاق 3dB يساوي 60MHz يبلغ ميل منحنى القدرة البصرية مقابل تيار الدخل 0.12mw/mA . يتكون تيار الدخل من تيار مستمر قدره 40mA وإشارة جيبية ترددها 35MHz كما يبلغ اتساع التيار الأقصى 30mA .

(أ) أحسب عامل التشكيل لتيار الدخل.

(ب) أحسب وارسم القدرة البصرية الناتجة.

(جـ) أحسب عامل التشكيل البصري.

(د) أرسم مخططاً لعدد من دورات الدخل.

٦ - إذا كان لدينا موجة عالية التردد $V_c(t)$ حيث :

$$V_c(t) = A_c \cos \omega_c t$$

ماهو نوع التشكيل المطبق على الموجة $V_m(t)$ المنخفضة التردد في كل من الحالات التالية :

التالية :

$$v(t) = [A_c + v_m(t)\cos\omega_c t] \quad (أ)$$

$$v(t) = \left(\frac{A_m}{2}\right)\cos(\omega_c - \omega_m)\, t \quad (ب)$$

حيث $v_m(t) = A_m \cos \omega_m t$

الفصل الثاني عشر

نظم الاتصالات الليفية البصرية

الفصل الثاني عشر

نظم الاتصالات الليفية البصرية

Optical Fiber Communication Systems

استعرضنا في الفصول السابقة المكونات الأساسية لوصلة اتصالات ليفية بصرية والتي اشتملت على المنابع الضوئية والمرسلات والمقارن والموصلات والألياف والكابلات والكواشف والمستقبلات . نستعرض في هذا الفصل كيفية تكوين وصلة ليفية بصرية بإحضار المكونات مع بعضها واختيار الأنسب منها لتكوين الوصلة المناسبة بناءً على معطيات سنقوم بشرحها .

١٢-١ منهجية تصميم نظم الألياف البصرية

Optical Fiber System Design Methodology

تتشابه أسس تصميم نظم النقل الليفية مع نظم نقل المعلومات الأخرى مثل الراديو والموجات الصغرية والكابلات المحورية والسواتل . وتختلف عنها في تصميم النظم الفرعية المكونة من عناصر البصريات الليفية . لايقتصر تصميم النظام البصري الليفي على الوسط الناقل أو العناصر البصرية الليفية الأخرى كالمنبع والكاشف بل يشتمل على إلكترونيات معالجة الاشارات وطرق التشكيل والتجميع والتشفير بالإضافة إلى الاعتمادية والكلفة .

لن نتمكن من تقديم معايير التصميم كاملة في هذا الفصل إذ يحتاج ذلك إلى كتاب مستقل . بل سنقوم بتقديم مواصفات العناصر الأساسية في نظام الاتصالات البصرية واجراءات التصميم وكذلك اعطاء أمثلة على أهم عنصرين في التصميم وهما ميزانية القدرة ومعدل المعلومات .

يتكون نظام الاتصالات من ثلاثة عناصر أساسية وهي المرسل والمستقبل وقناة الاتصال . تحدد استخدامات النظام البصري الليفي مواصفات العناصر الداخلة ضمن

المكونات الأساسية الآنف ذكرها.

عند تخطيط نظام بصري ليفي يجب علينا في البداية تحديد نوعية هذا الاستخدام والتي يمكن أن يقع ضمن التقنيات الآتية :-

١ - رقمي Digital.

إذا كان الإرسال رقمياً فيجب علينا معرفة مايلي :

أ - معدل خطأ البتات bit error rate (BER) .

ب - مدى درجات حرارة التشغيل بالدرجات المئوية.

٢ - تماثلي Analog.

أما في حالة الإرسال التماثلي فلابد من معرفة الآتي :

أ - عرض النطاق بالهيرتز Hertz.

ب - التشوه مقاساً بالديسيبل.

جـ - مدى درجات حرارة التشغيل بالدرجات المئوية .

٣ - صوت Audio

عندما تكون الرسالة المرسلة صوتية فعلينا معرفة الآتي :-

أ - عرض النطاق بالهيرتز Hertz.

ب - التشوه بالديسيبل.

جـ - اللغط بالديسيبل (لعدة قنوات).

د - مدى درجات حرارة التشغيل بالدرجات المئوية .

٤ - فيديو Video.

أما إرسال الصورة والذي يحتاج لعرض نطاق أوسع من ذلك المستخدم في الصوت فيجب معرفة مايلي :-

أ - عرض النطاق بالهيرتز Hertz.

ب - التشوه بالديسيبل.

جـ - اللغط بالديسيبل (لعدة قنوات).

د - مدى درجات حرارة التشغيل بالدرجات المئوية.

١٢-١-١ مواصفات عناصر الوصلة الليفية البصرية

Specifications of Fiber Optic Link Elements

أ - مواصفات المرسل Transmitter Specifications

١ - مقاومة الدخل بالأوم (Ω).

٢ - أقصى إشارة دخل بالجهد المستمر(V_{dc}) أو V_{rms} أو الاتساع الأقصى للجهد V_p.

٣ - طول موجة الضوء λ بالميكرومتر (μm).

٤ - مقدار قدرة الخرج البصرية بالميكروواط (μw).

٥ - زمن الصعود rise time للخرج البصري بالنانوثانية (μs).

٦ - جهد التغذية المستمر (DC) لتشغيل دائرة المرسل.

ب - مواصفات المنبع الضوئي Light Source Specifications

١ - التيار الأمامي المستمر (Continuous) بالملي أمبير(mA).

٢ - التيار الأمامي النبضي بالملي أمبير (mA).

٣ - الطول الموجي للانبعاث الأقصى بالنانوميتر(nm).

٤ - عرض الطيف بالنانوميتر(nm).

٥ - الجهد العكسي بالفولت المستمر(V_{dc}).

٦ - مدى درجات الحرارة بالدرجات المئوية (^{o}C).

٧ - قدرة الخرج البصرية الكلية بالميكروواط (μW).

٨ - أوقات الصعود والهبوط بالنانوثانية (ns).

جـ - مواصفات الليف Fiber Specifications

١ - أحادي النمط أو متعدد النمط.

٢ - عتبي أو متدرج .

٣ - التوهين بالديسيبل لكل كيلومتر (dB/km).

٤ - فتحة النفوذ العددية NA.

٥ - التشوه النمطي intermodaldistortion بالنانوثانية لكل كيلومتر (ns/km).

٦ - معامل انكسار اللب.

٧ - معامل انكسار الكساء.

٨ - قطر اللب بالميكروميتر (µm).

٩ - قطر الكساء بالميكروميتر (µm).

١٠- قوة الشد بالرطل لكل انش مربع (psi).

١١- نصف قطر الثني بالسنتيمتر(cm).

د - مواصفات الكابل Cable Specifications

١ - عدد ا لألياف .

٢ - قطر اللب بالميكروميتر (µm) .

٣ - قطر الكساء بالميكرومتر (µm).

٤ - قطر الكابل بالملي ميتر(mm).

٥ - وزن الكابل بالكيلوجرام لكل كيلومتر (kg/km).

٦ - نصف القطر الأدنى لثني الكابل بالسنتيمتر (cm).

٧ - عناصر التقوية والحماية.

هـ - مواصفات الكاشف Detector Specifications

١ - التيار الأمامي المستمر Continuons بالملي أمبير (mA).

٢ - التيار النبضي الأمامي بالملي أمبير (mA).

٣ - الجهد العكسي الأقصى بالفولت المستمر(V_{dc}).

٤ - مدى درجات الحرارة بالدرجات المئوية (^{o}C)

٥ - قدرة المخرج البصرية بالميكروواط (μw).

٦ - تيار العتبة بالملي أمبير (mA).

٧ - زمن الصعود والهبوط بالنانوثانية (ns).

٨ - نمط الاشعاع بالدرجات الزاوية angular degrees.

و - مواصفات المستقبل Receiver Specifications

١ - قيمة معاوقة impedance المخرج بالأوم (Ω).

٢ - مستوى اشارة المخرج بالفولت المستمر(Vdc) أو الفولت الفعال (Vrms).
أو الفولت الأقصى (V_p).

٣ - الحساسية البصرية بالميكروواط(μw) أو النانووات (nw) أو الديسيبل(dB)
أو ميجابت لكل ثانية (Mb/s).

٤ - المدى الحركي dynamic البصري بالديسيبل (dB).

٥ - الحمولة الزائدة overload للخرج التماثلي بالنسبة المئوية(%).

٦ - زمن الصعود للخرج التماثلي بالنانوثانية (ns).

٧ - زمن الصعود للخرج الرقمي بالنانوثانية (ns).

٨ - جهد التغذية المستمر(DC) لتشغيل دائرة المستقبل.

٢-١٢ اعتبارات التصميم Design Considerations

قبل التفكير في تصميم النظام البصري لابد من أخذ عوامل عديدة بعين الاعتبار نذكرها فيما يلي :-

١ - هل الإشارة المراد إرسالها واستقبالها تماثلية أم رقمية ؟

٢ - ماعرض نطاق المعلومات اللازم ؟

٣ - مامقدار القدرة اللازمة ؟

٤ - ماهي مسافة خط النقل أو المسافة بين المرسل والمستقبل ؟

٥ - ماهي العوائق المحتملة في خط النقل؟

٦ - ماهي معلمات الإشارة المحتملة tolerable ؟

٧ - مامقدار القيمة المقبولة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء للنظام التماثلي.

٨ - مامعدل خطأ البتات المقبول وزمن الصعود للنظام الرقمي؟

يتيح تحديد المعلمات آنفة الذكر فرصة البدء في تصميم النظام البصري الليفي.

١٢-٢-١ اجراءات التصميم Design Procedures :

نورد فيما يلي إجراءات تصميم النظام البصري الليفي :

١ - حدد عرض نطاق الإشارة.

٢ - حدد نسبة الإشارة إلى الضوضاء إذا كانت الإشارة تماثلية ويعبر عنها بالديسيبل.

٣ - حدد معدل خطأ البتات ، وهي نسبة البتات الخطأ إلى المجموع الكلي للبتات، إذا كانت الإشارة رقمية .

٤ - حدد مسافة الوصلة أي المسافة بين المرسل والمستقبل.

٥ - اختر الليف بناءً على التوهين .

٦ - احسب عرض نطاق النظام . يحسب هذا بتقسيم معامل عرض النطاق، محسوبا بالميجاهرتز لكل كيلومتر (MHz/ km)،على مسافة الوصلة. (يعطي معامل عرض النطاق من قبل الشركة الصانعة) .

٧ - حدد هامش القدرة power margin ، يمثل هامش القدرة الفرق بين قدرة خرج المنبع الضوئي وحساسية المستقبل.

٨ - أوجد الفقد الكلي لليف وذلك بضرب قيمة الفقد بالديسيبل لكل كيلومتر في طول الوصلة بالكيلومترات.

٩ - أحسب عدد الموصلات . اضرب فقد كل موصل بعدد الموصلات.

١٠- إحسب عدد الوصلات الدائمة. اضرب فقد كل وصلة دائمة بعدد الوصلات الدائمة.

١١ - أضف فقد بمقدار 1dB لمقرن الكاشف.

١٢ - أضف فقد بمقدار 3dB نتيجة تأثير درجة الحرارة.

١٣ - أضف فقد بمقدار 3dB نتيجة تأثير العامل الزمني.

١٤ - أجمع الفقد الكلي لليف مضافاً إليه فقد الموصلات والوصلات الدائمة واقتران الكاشف وتأثيرات درجة الحرارة والزمن (وهي القيم المذكورة في الخطوات من ٨ إلى ١٣) للحصول على التوهين الكلي للنظام .

١٥ - اطرح التوهين الكلي للنظام من هامش القدرة إذا كان الفرق سالباً يمكن معالجة ذلك بعمل أحد أو مجموعة من الاختيارات التالية :

أ - استخدام مرسل بقدرة أكبر .

ب - استخدام ليف يفقد أقل.

جـ - استخدام وصلات نقل قصيرة .

د - استخدام مستقبل بمستوى حساسية أقل.

هـ - تعديل بعض المواصفات مثل تقليل قيمة معدل خطأ البتات في النظام الرقمي أو نسبة الإشارة إلى الضوضاء في النظام التماثلي.

١٦ - أوجد زمن الصعود . لإيجاد زمن الصعود الكلي تجمع أزمنة الصعود للعناصر الحرجة مثل المنبع الضوئي والتشتيت النمطي والتشتيت الباطني والكاشف . قم بتربيع أزمنة الصعود وأضفها لبعض . أوجد الجذر التربيعي للمجموع للحصول على زمن الصعود لكلي للنظام. حسب المعادلة التالية :

$$\text{زمن الصعود} = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (12.1)$$

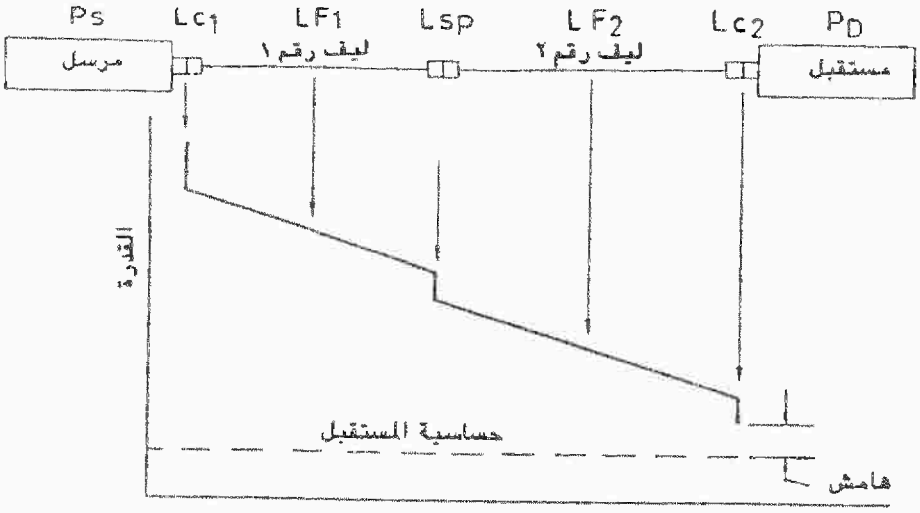
١٢-٣ ميزانية القدرة Power Budget

ذكرنا في البند السابق عدداً من خطوات التصميم ، (الخطوات من ٧ إلى ١٥) ، التي تدخل ضمن حساب مايسمى بميزانية القدرة ، حيث رأينا أن التوهين الكلي للنظام الليفي البصري يحسب بطرح القدرة البصرية الداخلة للكاشف من القدرة البصرية الخارجة من المنبع.

يبين الشكل (١٢-١) الفقد في عناصر النظام المختلفة . يشير الرمز P_S إلى قدرة المنبع الضوئي و L_{C1} إلى فقد اقتران القدرة بين المنبع والليف وهو في حدود 1dB لكل مقرن. L_{F1} هو فقد الليف الواقع بين المنبع والوصلة الدائمة L_{SP} هو فقد الوصلة الدائمة و L_{F2} هو فقد الليف الواقع بين الوصلة الدائمة ومقرن الكاشف. L_{C2} هو فقد الاقتران بين الليف والكاشف . P_D هي القدرة المستقبلة من قبل الكاشف . يضاف لعناصر الفقد الآنف ذكرها الفقد نتيجة درجة الحرارة والزمن وهي في حدود 3dB لكل منها.

يمكن التعبير عن القدرة عند الكاشف P_D بالمعادلة التالية :

$$P_D = P_S - (L_{C1} + L_{F1} + L_{SP} + L_{F2} + L_{C2}) \quad .....(12.2)$$



الشكل (١٢- ١) ميزانية القدرة لوصلة ليف بصرية

مثال ١٢-١ :

أوجد مقدار هامش القدرة للوصلة في الشكل (١٢-١) إذا كان لدينا مايلي :

المرسل	الليف رقم ١
القدرة البصرية = (odBm) 1mw	حجم الليف = $100/140_{\mu m}$
قطر الشعاع = $100\ \mu m$	فتحة النفوذ العددية (NA) = 0.3
فتحة النفوذ العددية (NA) = 0.3	التوهين = 6dB/km
فقد المقرن = 1dB	الطول = 2km
فقد الوصلة الدائمة = 1.0 dB	

المستقبل	الليف رقم ٢
حساسية المستقبل = 125nA (-39dBm)	حجم الليف = $100/140\ \mu m$
قطر الكاشف = $140\ \mu m$	فتحة النفوذ العددية = 0.3
فتحة النفوذ العددية = 0.3	التوهين = 5dB/km
فقد المقرن = 1dB	الطول = 2.2km

الحل : يحصل الفقد في عناصر النظام نتيجة عدم تطابق الاقطار أو فتحات النفوذ العددية وحيث أنها متطابقة في هذا المثال فيمكننا حساب هامش القدرة الكلي بالديسيبل باستخدام المعادلة (12.2) :

$$P_D = P_S - (L_{C1} + L_{F1} + L_{SP} + L_{F2} + L_{C2})$$
$$= 0 - (1 + 2 \times 6 + 1 + 11 + 1)$$
$$= -26\ dB\ .$$

وحيث أن حساسية المستقبل تساوي 39dBm - فإن القدرة عند الكاشف P_Dتساوي $2\ \mu w$ ؟ . لم نحسب في هذا المثال النقص في كفاءة النظام نتيجة التقادم الزمني وتأثير درجة الحرارة والذي يقدر 3dB لكل منهما أي أن الفقد الكلي سيكون 32dB - ويكون مستوى القدرة عند الكاشف 7dB فوق مستوى حساسية المستقبل.

تمثل القيم المذكورة في هذا المثال قيماً نظرية حيث أشرنا إلى تطابق قيم قطر المنبع وقطر لب الليف وكذلك تطابق أقطار لب الألياف المستخدمة في الوصلة وتساوي فتحات نفوذها العددية إضافة إلى تطابق قطر الكاشف مع قطر لب الليف الموصل للكاشف، إن مايحدث في التصميم العملي غير ذلك إذ ليس من السهولة تطابق كافة عناصر النظام ، لذا سنقوم بتغيير بعض القيم في عناصر النظام وحساب الفقد الكلي بناءً على المعطيات الجديدة والتي ندرجها في المثال التالي .

مثال ١٢-٢ :

أوجد مقدار القدرة للوصلة في الشكل (١٢-١) إذا كان لدينا مايلي :

المرسل	الليف رقم ١
القدرة البصرية = 1mw (odBm)	حجم الليف 85/125 μm
قطر الشعاع = 100 μm	فتحة النفوذ العددية (NA) = 0.26
فتحة النفوذ العددية (NA) = 0.3	التوهين = 6dB/km
فقد المقرن = 1dB	الطول = 2km
فقد الوصلة الدائمة = 1.5 dB	الليف رقم ٢
المستقبل:	حجم الليف = 100/140 μm
حساسية المستقبل = 125nA (-39dBm)	فتحة النفوذ العددية (NA)= 0.3
قطر الكاشف = 150 μm	التوهين = 5dB/km
فتحة النفوذ العددية= 0.4	الطـــول = 2.2 km
فقد المقرن = 1dB	

الحل : نرى في هذا المثال عدم تطابق أقطار العناصر المستخدمة وعدم تساوي فتحات نفوذها العددية وهو مانراه في الحياة العملية ولابد من حساب الفقد عبر عناصر الوصلة.

- فقد المرسل :

بالإضافة إلى فقد مقداره 1dB هناك نوعين آخرين من الفقد سببهما عدم تطابق فتحة النفوذ العددية للمنبع والليف وعدم تطابق أقطارهما وسنقوم فيما يلي بحساب الفقد لكل عنصر .

الفقد بسبب اختلاف قطر المنبع وقطر لب الليف هو :

$$L_{SF} = 10 \text{ Log } \left(\frac{\text{diam f}}{\text{diam s}} \right)^2$$

حيث تمثل diam f قطر الليف و diam s قطر المنبع

$$L_{SF} = 10 \text{ Log } \left(\frac{85}{100} \right)^2$$

$$= -1.4 \text{ dB.}$$

الفقد نتيجة عدم تطابق فتحات النفوذ العددية هو :

$$L_{NA} = 10 \text{ Log } \left(\frac{NA_F}{NA_S} \right)^2$$

حيث تمثل NA_F فتحة النفوذ العددية لليف و NA_S فتحة النفوذ العددية للمنبع .

$$L_{NA} = 10 \text{ Log } \left(\frac{0.26}{0.3} \right)^2$$

$$= -1.2 \text{ dB}$$

يبلغ الفقد الكلي عند السطح البيني interface للمرسل 3.6dB . لذا فإن الفقد الكلي حتى هذه النقطة هو 3.6dB .

- الفقد في الليف رقم ١ :

حيث أن الفقد لكل كيلومتر هو 6dB فإن الفقد الكلي لليف يساوي 12dB فيبلغ الفقد الكلي للنظام حتى هذه النقطة 15.6dB .

- فقد التوصيل بين الليف والليف :

نظراً لأن قطر وفتحة النفوذ العددية لليف رقم ٢ أكبر من مثيلاتها لليف رقم ١ فلا يحصل فقد إنما يضاف الفقد نتيجة الوصلة الدائمة فيكون الفقد الكلي بعد الوصلة الدائمة 17.1dB.

- فقد الليف رقم ٢ :

يبلغ الفقد لكل كيلومتر 5dB وحيث أن طول الليف يساوي 2.2km فان فقد الليف يساوي 11dB فيكون الفقد الكلي حتى نهاية الليف رقم ٢ 28.1dB.

- فقد المستقبل :

نظراً لأن قطر الكاشف وفتحة نفوذه العددية أكبر من نظيرتها لليف الواصل للكاشف فلا يحصل فقد وإنما هناك فقد مقداره 1dB نتيجة مقرن الكاشف فيصبح الفقد الكلي 29.1dB.

من القيم السابقة نستطيع أن ندرج الميزانية بالجدول التالي :

قدرة المرسل	o dBm
حساسية المستقبل	- 39 dBm
ميزانية القدرة	39 dB
فقد المرسل	3.6 dB
فقد الليف رقم ١	12 dB
فقد الوصلة الدائمة	1.5dB
فقد الليف رقم ٢	11 dB
فقد المستقبل	1 dB
الفقد الكلي	29.1 dB
هامش القدرة	9.9 dB.

الجدول (١٢-١) ميزانية القدرة للمثال رقم (٢) :

الجدول (١٢-١) ميزانية القدرة للمثال رقم (٢) :

لو أضفنا التأثير الزمني وتأثير درجة الحرارة على عناصر النظام والذي يقدر بحوالي 6dB لكلاهما فإن الفقد الكلي سيصبح 35.1dB ويصبح هامش القدرة 3.9dB

١٢-٤ ميزانية زمن الصعود او عرض النطاق Rise Time or Bandwidth Budgets

يضمن التحليل في البند السابق توفر مقدار كافٍ من القدرة في الوصلة البصرية الليفية لمجابهة الاستخدامات المصممة من أجلها . تشكل القدرة أحد المعيارين الهامين في تصميم الوصلة البصرية الليفية ، حيث يمثل زمن الصعود أو عرض النطاق المعيار الآخر. يجب أن تعمل كافة مكونات النظام لمجابهة احتياجات عرض النطاق. يرتبط عرض النطاق BW وزمن الصعود t_r بالمعادلة التالية :

$$BW = \frac{0.35}{t_r} \quad \text{..... (12.3)}$$

١٢-٤-١ النظم التماثلية Analog Systems

توصف النظم التماثلية بدلالة عرض النطاق الكهربائي BW . لحساب زمن الصعود الكلي للنظام يتم اختيار عناصر النظام المختلفة للحصول على زمن الصعود الذي يحقق عرض النطاق الكهربائي المذكور في المعادلة (12.3) . لتبسيط الأمر يقسم النظام إلى مجموعات :

(١) دوائر تشغيل المرسل t_1.

(٢) زمن صعود المنبع t_2.

(٣) تشتيت الليف t_3.

(٤) زمن صعود الكاشف t_4.

(٥) دوائر تشغيل المستقبل t_5.

مثال ١٢-٣ :

أوجد عرض النطاق الكهربائي لنظام ليفي بصري بالمواصفات التالية :

(١) طول الوصلة 2km .

(٢) عرض النطاق xBW المسافة 25MHz × km (عرض النطاق البصري) .

(٣) زمن صعود دوائر تشغيل المرسل $t_1 = 10ns$.

(٤) زمن صعود المنبع $t_2 = 2ns$.

(٥) تشتيت الليف $t_3 =$

(٦) زمن صعود الكاشف $t_3 = 3\ ns$.

(٧) زمن صعود دوائر تشغيل المستقبل $t_5 = 12\ ns$.

الحل :

أولاً : نجد عرض النطاق البصري للوصلة بطول 2km وهو :

$$BW\ (opt) = \frac{25\ MHz \times Km}{2\ Km} = 12.5\ MHz$$

عرض النطاق الكهربائي $= 0.707 \times BW\ (Opt.)$

$0.707 \times 12.5 =$

$8.8375\ MHz =$

يرتبط عرض النطاق الكهربائي لليف بزمن الصعود حسب المعادلة (12.2)

$$t_r = \frac{0.35}{Bw} = \frac{0.35}{8.8375 \times 10^6}$$

$$= 39.6\ ns$$

زمن الصعود الكلي t_r :

$$t_r = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 + t_4^2 + t_5^2}$$

$$= \sqrt{10^2 + 2^2 + 39.6^2 + 3^2 + 12^2}$$

$$= 42.72 \text{ ns}$$

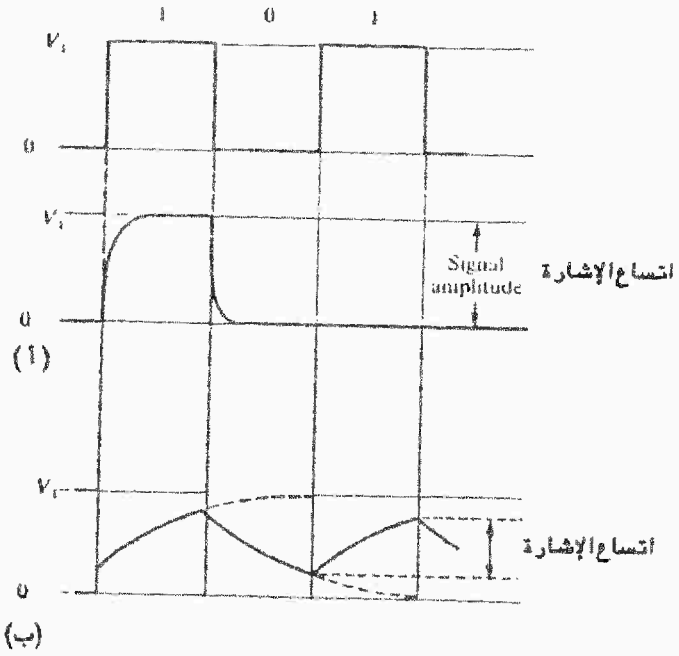
باستخدام المعادلة (12.3) نحصل على عرض النطاق الكهربائي للنظام

$$BW = \frac{0.35}{42.72 \times 10^{-9}} = 8.2 \text{ MHz}$$

نلاحظ من هذا المثال أن السبب الرئيسي لانخفاض عرض النطاق هو تشتيت الليف وأن اختيار ليف بتشتيت أقل سيؤدي إلى زيادة عرض النطاق. لتحسين عرض النطاق في أي نظام نبدأ عادة بتحسين المركبة التي تعطي أسوأ إنجاز والقياس في هذا المثال هو زمن الصعود . في هذا المثال إذا لم يجدي تغيير الليف نستخدم مستقبلاً بزمن صعود أقل وإن لم يجدي نستخدم مرسلاً بزمن صعود أقل وهلم جرا.

١٢-٤-٢ النظم الرقمية Digital Systems

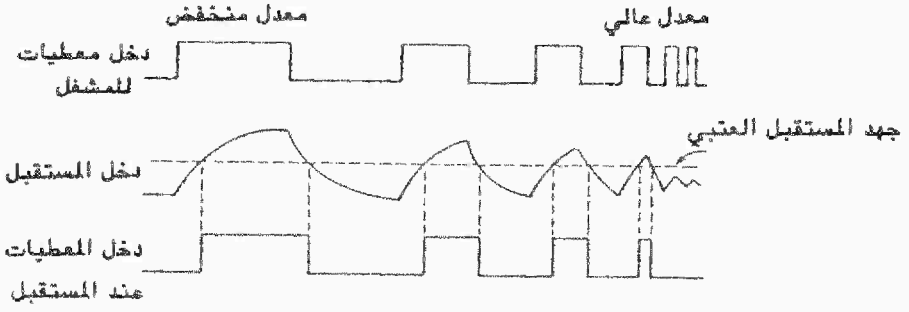
يتم تحليل النظم الرقمية عن طريق معرفة معدل المعطيات ونسق التشفير code format . نرى في الشكل (١٢-٢) تأثير زمن الصعود على النبضة المنقولة ، حيث نرى في الشكل (١٢-٢أ) شكل النبضة المرسلة عندما يكون زمن الصعود منخفضاً (استجابة سريعة) حيث يلاحظ عدم وجود تشوه يذكر أما في الشكل (١٢-٢ب) فنرى شكل النبضة المرسلة عندما يكون زمن الصعود مرتفعاً (استجابة بطيئة) ويبدو تشوه النبضات واضحاً فيحصل تداخلاً بين النبضات وهو مايسمى تداخل بين الرموز intersymbol interference وعندما يرتفع معدل النبضات ينخفض اتساعها فيصبح من الصعب التمييز بين (0) و (1) كما في الشكل (١٢-٣).



الشكل (١٢- ٢) تأثير زمن الصعود

(أ) زمن صعود قصير

(ب) زمن صعود طويل



الشكل (١٢- ٣) تشوه بتات المعطيات لمعدلات معطيات مختلفة

نظراً لصعوبة الحصول على نظام لايؤثر على زمن الصعود أو زمن الهبوط فلابد من وضع مواصفات criterion بشكل الموجة المقبول. يرتبط زمن صعود النبضة ارتباطاً مباشراً بارتفاع أو بطء البتات في النظام ، يتحقق هذا الشرط إذا كان زمن الصعود t_r يساوي أو يقل عن 70% من عرض النبضة T_p.

$$t_r \leq 0.7 \times T_p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (12.4)$$

لو نظرنا إلى نسق العودة للصفر RZ، حيث تشغل T_p نصف زمن البتة T كما في الشكل (١٢-٤) نجد أن :

$$t_r \leq 0.7 \times \frac{T}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (12.5)$$
$$\leq \frac{0.35}{B_r}$$

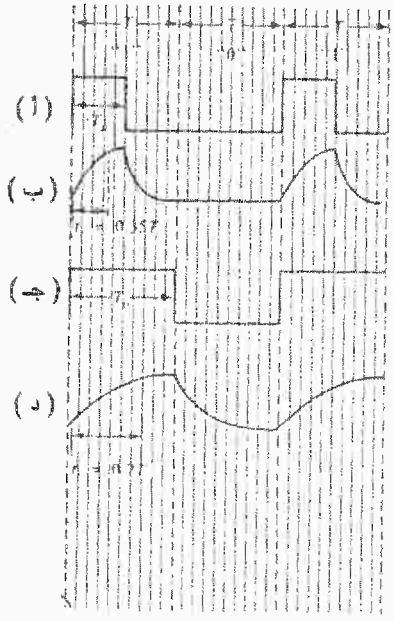
حيث أن $B_r = \frac{1}{T_p}$ وتمثل معدل المعطيات .

لو نظرنا إلى نسق عدم العودة إلى الصفر Non Return to Zero (NRZ) حيث $T_p = T$.

نحصل على :

$$t_r \leq \frac{0.7}{B_r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (12.6)$$

نلاحظ من المعادلتين (12.5) و(12.6) أن لنفس معدل المعطيات نحتاج إلى قيمة t_r لنسق العودة للصفر تساوي نصف قيمة t_r لنسق عدم العودة للصفر بصورة أخرى يمكن أن نقول أن نقل العودة للصفر يحتاج إلى نظام أسرع.



زمن البتة T = Bit time

$B_r = \frac{1}{T}$

زمن الصعود $tr = 0.7T_p$

الشكل (١٢-٤) تأثير زمن الصعود لنظام العودة للصفر وعدم العودة للصفر

(أ) إشارة العودة للصفر المرسلة

(ب) إشارة العودة للصفر المستقبلة مع زمن الصعود المسموح به tr

(جـ) إشارة عدم العودة للصفر المرسلة

(د) إشارة عدم العودة للصفر المستقبلة مع زمن الصعود المسموح به tr

مثال ١٢-٤:

لدينا نظام اتصالات بصري ليفي بالمكونات التالية :

زمن صعود الثنائي الباعث للضوء LED = 6ns

تشتيت الليف النمطي Intramodal = 20ns/km

تشتيت الليف الباطني Intermodal = 2ns/km

زمن صعود الكاشف PIN = 8ns

أوجد معدل المعطيات الأقصى لنسق NRZ إذا كان (١) طول الليف 5km

(٢) طول الليف 500 m. (٣) أوجد التشتيت لكل كيلومتر والممكن استفادة في وصلة طولها 5km ومعدل المعطيات 50Mb/s باستخدام نسق NRZ.

الحل :

(١) يبلغ التشتيت للوصلة التي بطول 5km مايلي :

التشتيت النمطي = $10\text{ns} \times 5 = 50\text{ns}$

التشتيت الباطني = $2\text{ns} \times 5 = 10\text{ns}$

زمن الصعود نتيجة التشتيت = $(50^2 + 10^2)^{\frac{1}{2}} = 5\ \text{Ins}$

زمن الصعود الكلي للنظام t_r.

$$t_r = (6^2 + 51^2 + 8^2)^{\frac{1}{2}} = 52\ \text{ns}$$

معدل البتات B_r يساوي $\frac{0.7}{t_r}$

$$B_r = \frac{0.7}{52 \times 10^{-9}} = 13.46\ \text{Mb/s}$$

(٢) يبلغ التشتيت للوصلة التي بطول 500m مايلي :

التشتيت النمطي = $10\text{ns} \times 0.5 = 5\text{ns}$

التشتيت الباطني = $2\text{ns} \times 0.5 = 1\text{ns}$

زمن الصعود نتيجة التشتيت = $(5^2 + 1^2)^{\frac{1}{2}} = 5.1\ \text{ns}$

زمن الصعود الكلي للنظام t_r.

$$t_r = (6^2 + 5.1^2 + 8^2)^{\frac{1}{2}} = 11.22\ \text{ns}$$

أما معدل البتات B_r فيبلغ مايلي :

$$B_r = \frac{0.7}{11.22 \times 10^{-9}} = 68.5 \text{ Mb/s}$$

(٣) باستخدام المعادلة (12.6) نحصل على زمن الصعود الكلي للنظام

$$t_r = \frac{0.7}{50 \times 10^6} = 14 \text{ ns}$$

$$= (6^2 + t_F + 8^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$t_F = (14^2 - 6^2 - 8^2) = 9.8 \text{ ns}$$

إن زمن الصعود لليف t_F والبالغ 9.8ns هو نتيجة تشتيت الليف ، وحيث أن طول الليف يساوي 5km فإن التشتيت لكل كيلومتر يساوي $\frac{9.8}{5} = 1.96$ ns/km . معنى هذا وجوب استخدام ليف أحادي النمط بدون تشتيت نمطي للوصول على هذه القيمة المنخفضة من التشتيت.

١٢ - ٥ الخلاصة Summary

قدمنا في هذا الفصل منهجية تصميم نظم الألياف البصرية وذكرنا مواصفات المكونات الأساسية لوصلة الاتصالات البصرية الليفية تبعها بعد ذلك الاجراءات المتبعة في تصميم هذه الأنظمة . لابد من الإشارة هنا إلى أن تصميم الأنظمة لايعتمد على التحليل النظري فحسب بل لابد من التجربة لمعرفة النتائج الفعلية. غير أن التحاليل النظرية الجيدة تعطي مؤشرات لمواءمة مكونات النظام مع بعضها ومع تكرار التصميم ومقارنة النتائج العملية والتعديلات اللازمة يصبح تصميم الأنظمة سهلاً .

قدمنا في هذا الفصل نبذة مختصرة عن إجراءات تصميم نظم البصريات الليفية والتي تلخصت في طريقتين مكملتين لبعضهما الأولى تعتمد على ميزانية القدرة والتي تضمن حدوث أقل فقد ممكن والحصول على القدرة المطلوبة عند المستقبل ، أما الطريقة الأخرى وهي ميزانية زمن الصعود أو عرض النطاق فيتم فيها اختيار مركبات النظام التي تحقق زمن الصعود أو عرض النطاق المطلوب. بعبارة أخرى يمكن القول أن تصميم النظام يعتمد على القدرة ومعدل المعطيات آخذين بعين الاعتبار نسبة الإشارة إلى الضوضاء في النظام التماثلي

ومعدل خطأ البتات في النظام الرقمي ولابد من حساب تكلفة واعتمادية النظام للمكونات المقترحة.

نظراً للتطور السريع في هذا المجال فلابد للمصمم من قراءة الكتب والدوريات المتخصصة والاطلاع على المقاييس التي تصدر من قبل الهيئات المختصة - تصدر بعض الشركات الصانعة ملحوظات تطبيقية application notes توزع مجاناً أو تباع بسعر رمزي وتكتب عادة بلغة مبسطة عن المركبات التي تنتجها الشركة .

الفصل الثاني عشر

أسئلة

١ - إرسم مخططاً لوصلة ليفية بصرية واذكر عناصرها المختلفة .

٢ - ماهي أسباب الفقد بين المرسل والمستقبل في وصلة ليفية بصرية ؟

٣ - لماذا تستخدم المكررات في الوصلات الليفية البصرية ؟

٤ - ماالغرض من إستخدام التجميع ؟

٥ - ماهي العلاقة بين عرض النطاق ومعدل المعلومات وزمن الصعود ؟

٦ - عرف نسبة الإشارة إلى الضوضاء SNR .

٧ - عرف معدل خطأ البتات BER .

٨ - ماهي العلاقة بين مسافة النقل ومعدل نقل المعلومات لوصلة ليفية بصرية ؟

٩ - ما المقصود بميزانية القدرة ؟

١٠- قارن بين نسق العودة إلى الصفر RZ ونسق عدم العودة إلى الصفر NRZ .

مسائل

١ - أفرض أن لدينا منبع بصري مساحته الفعالة $960\,\mu m^2$. ماهو أصغر قطر لليف بصري يستخدم مع هذا المنبع للحصول على فقد اقتران يقل عن 1dB .

٢ - أوجد الفقد الناتج عند اقتران خرج منبع LED قطره $60\,\mu m$ مع ليف قطره $50\,\mu m$

٣ - أوجد فقد الاقتران نتيجة فتحة النفوذ العددية وعدم توائم المساحة بين منبع لامبرتي يبلغ قطره الفعال $60\,\mu m$ وقطر الليف $50\,\mu m$ وفتحة نفوذه العددية 0.22 .

٤ - صمم وصلة ليفية بصرية لإرسال إشارة فيديو عرض نطاقها 6MHz وطولها 20km . وافرض أن نسبة الإشارة إلى الضوضاء SNR في المرسل تساوي 40dB مستخدماً التشكيل التماثلي .

٥ - أوجد عرض نطاق نظام ليفي يستخدم فيه ثنائي LED زمن صعوده 15ns وتشتيت الليف 30ns وكاشف زمن صعوده 10ns .

٦ - لدينا ليف بصري طوله 10km قيمة جداء الطول في عرض النطاق البصري 50MHz x km . وزمن صعود المنبع 20ns وزمن صعود الكاشف 15ns أوجد عرض نطاق النظام .

- أوجد معدل نقل المعلومات الرقمي باستخدام نسق NRZ لوصلة طولها 2km وفيها مايلي :

- زمن صعود المنبع = 12ns
- تشتيت الليف = 24ns
- زمن صعود الكاشف = 10ns
- زمن صعود دائرة المنبع = 5ns
- زمن صعود دائرة الكاشف = 5ns

٧ - أعد المسألة رقم ٦ مستخدماً نسق العودة للصفر RZ .

٨ - أوجد تشتيت الليف لكل كيلومتر الذي يسمح بتشغيل الوصلة في المسألة رقم ٦ للعمل عند معدل معلومات قدره 30MHz .

٩ - لدينا نظام ليفي يستخدم فيه ثنائي LED تبلغ القدرة المنبعثة منه 2mw وفقد الاقتران بين الليف والمنبع يساوي 17dB . يبلغ فقد الليف 5dB/km وفقد موصل قدره 6dB . لكل موصل والفقد بين الليف والكاشف 1.2dB وتبلغ حساسية الكاشف 38dBm .

(أ) أوجد ميزانية القدرة إذا كان طول الليف 3km وبه ثلاثة موصلات .

(ب) ارسم مخطط ميزانية القدرة . إفرض وجود مقارن عند المنبع والكاشف بعد كل كيلومتر من الليف .

REFERENCES

[1] Joseph C. Palais, "Fiber Optic Communications", 2nd edition, 1988, Prentice-Hall International N.J., USA.

[2] John Senior, "Optical Fiber Communications", Principles and Practice", 1985, Prentice-Hall International N.J., USA.

[3] Robert J. Hoss, "Fiber Optic Communications: Design Handbook", 1990, Prentice-Hall International N.J., USA.

[4] Bellcore, "Fiber Optics: Technology and Applications Video Tapes", 1990, Bellcore Livingston, NJ, USA.

[5] Henry Zanger and Cynthia Zanger, Fiber Optics, Communication and Other Applications", 1991, Maxwell Macmillan Publishing Group, NJ, USA.

[6] Donald J. Sterling, Jr., "Technician's Guide to Fiber Optics", 1987, Delman Publishers Inc., NY, USA.

[7] Frederick C. Allard, "Fiber Optics Handbook, for Engineers and Scientists", 1990, McGraw Hill Publishing Co., NY, USA.

[8] J. Wilson and J.F. Hawkes, "Optoelectronics: An Introduction", 1983, Prentice-Hall International, NJ, USA.

[9] Peter K. Cheo, "Fiber Optics, Devices and Systems", 1985, Prentice-Hall International N.J., USA.

[10] Gerd Keiser, "Optical Fiber Communication", 2nd Edition, 1991, McGraw-Hall International Editions, NY, USA.

[11] Robert J. Hoss and Edward A. Lacy, "Fiber Optics", 2nd Edition, 1993, Prentice-Hall International N.J., USA.

[12] Gunther Mahike and Peter Gossing, "Fiber Optics Cables", 1987, John Wiley and Sons, NY, USA.

المراجع العربية

١ - سعد الحاج بكرى ومحمد عبدالرحمن الحيدر " مقدمة في الاتصالات " ١٤٠٩هـ (١٩٨٨م) ، مطابع جامعة الملك سعود ، الرياض ، المملكة العربية السعودية .

٢ - جوزيف باليز " الاتصالات بالألياف البصرية " ترجمة جورج صنيج ومراجعة أحمد مرسي نفاخ ، ١٩٩٢م ، المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر ، دمشق ، الجمهورية العربية السورية .

٣ - حسن الكمشوشي " نظرية الاتصالات الليفية البصرية " ، ١٩٨٧م ، دار الراتب الجامعية ، بيروت ، لبنان .

معجم المصطلحات العلمية

A

Aberration	زَيْغ
aberration loss	فقد الزيغ
aberration of light	زيغ الضوء
Abrasive	كاشط
abrasive paper	ورق كاشط
Absolute	مُطلق
absolute temperature	درجة الحرارة المطلقة
Absorption	امتصاص
Acceptance	قبول
acceptance angle	زاوية القبول
acceptance cone	مخروط القبول
acceptor atoms	ذرات قابلة
Acoustic	صوتي
Active region	منطقة فعّالة
Aggressivity	عدوانية/هجومية
Alignment	تراصف
Alternating	متناوب
alternating current (A.C.)	تيار متناوب
A.C. coupling	إقتران تيار متناوب
Amplify	يضخم / يكبر
signal amplification	تضخيم الإشارة
amplitude modulation (AM)	تشكيل الاتساع

Analog	تماثلي
analog modulation	تشكيل تماثلي
analog signal	إشارة تماثلية
Angle	زاوية
angle of incidence	زاوية السقوط
angle of reflection	زاوية الانعكاس
angle of refraction	زاوية الانكسار
angular dispersion	التشتيت الزاوي
angular misalignment	عدم التراصف الزاوي
critical angle	الزاوية الحرجة
divergence angle	زاوية التباعد
viewing angle	زاوية تسديد البصر
Anode	مصعد
Antenna	هوائي
Antireflection	مضاد للانعكاس
Aperture	فتحة النفوذ
numerical aperture	فتحة النفوذ العددية
Apex	قمة / رأس
Approximate	تقريبي
apporximate sinusoid	جيبي تقريبي
Area	منطقة / مساحة
area mismatch loss	فقد التوا ءم المساحي
Array	صَفيف
array connector	موصل صفيفي

Atoms	ذرات
Attenuation	توهين
preferential attenuation	توهين تفضيلي
spectral attenuation	توهين طيفي
Audio	سمعي
audio wave	موجه سمعية
audio message	رسالة سمعية
Automatic	آلي
automatic gain control	التحكم الآلي بالكسب
Avalanche	جرفي
avalanche multiplication	تضاعف جرفي
avalanche photodiode	ثنائي ضوئي جرفي
average	متوسط / وسطي
average time	الزمن الوسطي
Axial	محوري

B

Background	خلفية
Band	نطاق
band gap	ثغرة النطاق
bandwidth	عرض النطاق
baseband	النطاق الأساس
base bandwidth	عرض النطاق الأساس
valence band	نطاق التكافؤ

combination band	نطاق مركب
Barrier	حاجز
energy barrier	حاجز الطاقة
Base	قاعدة
base current	تيار القاعدة
Beam	حزمة
collimated beam	حزمة متوازية
convergent beam	حزمة متقاربة
divergent beam	حزمة متباعدة
BER	معدل خطأ البتات
Bias	انحياز
bias voltage	جهد انحياز
forward biased	منحاز أمامياً
Binary	ثنائي
Bipolar	ثنائي القطبية
bipolar transistor	ترانزستور ثنائي القطبية
Bit (s)	بتة (بتات)
bit rate	معدل البتات
data bits	بتات المعطيات
Block	كتلة
block diagram	مخطط كتلي/ مخطط صندوقي
Bombardment	قصف
ion bombardment	قصف أيوني
Bond	رابطة

chemical bonds	روابط كيميائية
Bound	مقيد
bound electron	إلكترون مقيد
Boundary	حد
Breakdown	انهيار
Broadcast	يذيع
Buckling	انبعاج
Budget	ميزانية
Buffer	طبقة واقية
Bus	خط رئيسي
data bus	خط معطيات رئيسي
Butt	تناكب/ يوصل طرفي الشيء بالتناكب
butt join	وصلة تناكبية
By - pass	تجاوز / تبديل
by - pass capacitor	مكثف تجاوز
by - pass switch	مفتاح تجاوز

C

Cable	كيبل ، كابل
cable television	تلفزيون / يستقبل الإشارة عن طريق الكابل
Call	نداء
Capacity	سعة / إمكانية
stray capacitance	سعة شاردة
Capacitor	مكثف

Carrier	حامل / ناقل
carrier lifetime	مدة حياة الحامل
Cathode	مهبط
Cavity	تجويف
cavity resonance	طنين التجويف
laser cavity	تجويف ليزري
Channel	قناة
information channel	قناة معلومات
Characteristics	خصائص
Charge	شحنة
electron charge	شحنة الالكترون
charge carriers	حاملات الشحنة
Chip	رقيقة
Chromatic	لوني
chromatic dispersion	تشتيت اللون
Circuit	دائرة
Cladding	كساء
cladding mode	نمط كسائي
Cleave	يشق
Coaxial	محوري
Code	رمز / شفرة / نسق
coding	تشفير
Coefficient	معامل
reflection coefficient	معامل الانعكاس
Coherent	متماسك

coherent source	منبع متماسك
Collector	مُجمِّع
Collimator	مسدِّد
collimated beam	حزمة أشعة مسددة
collimator lens	عدسة مسددة
collimator rod	قضيب مسدد
Combine	يخلط / خلط
Communications	اتصالات
Compatible	متلائم
Compliant	لين / مطاوع
compliant plastic	بلاستيك لين
Composite	مركب
Compression	ضغط
Computer	حاسوب
Concave	مقعر
conccave mirror	مرآه مقعرة
Concentricity	تمركز
Condenser	مكثف
Conduction	توصيل
conduction band	نطاق التوصيل
conductor	موصل
conductance	توصيلية / ناقلية
Confine	يقيد / يحصر
confined emission	إنبعاث مقيد

Connector	موصل
Considerations	اعتبارات
Construction	بنية / بناء / انشاء
Contact	تلامس
Continuous	مستمر
Continuous wave	موجة مستمرة (متصلة)
Contrast	تباين
Control	سيطرة / تحكم
control circuit	دائرة تحكم
Convergence	تقارب
coverging rays	أشعة متقاربة
Converter	محوال
Coordinates	إحداثيات
Core	لب
core mode	نمط اللب
Corposcular	جسيمات / دقائق
Corrugate	مموج
corrugated aluminium sheath	غلاف ألومنيومي مموّج
Cosmic	كوني
Coupling	مقترن / اقتران / قارن
coupling efficiency	كفاءة اقتران
coupling ratio	نسبة الاقتران
coupler	مقرن
edge coupling	الاقتران الحافي

source coupling	اقتران المنبع
tapered coupler	مقرن مستدق
directional coupler	مقرن اتجاهي
surface coupler	مقرن سطحي
Creep	تزحف (زحف)
Crimp	حصر
Critical	حرج
critial angle	الزاوية الحرجة
Crosstalk	لغط
Crystal	بلورة
Current	تيار
driving current	التيار القائد / التيار التشغيلي
Curvature	تقوس
Cushioning	تخميد الصدمة / تحشية للوقاية
Cutoff	قطع
cutoff frequency	تردد القطع
Cycle	الدورة

D

Dark	قاتم / مظلم
dark current	تيار الظلام
Data	معطيات
data rate	معدل معطيات

data handling system	نظام تداول المعطيات
Decay	تناقص
Decision	قرار
decision circuit	دائرة قرار
Degradation	تداعي
signal degradation	تداعي جودة الإشارة
Delay	تأخر
delay distortion	تشوه التأخر
delay line	خط تأخير
Demodulation	إزالة التشكيل
Demultiplexer	مزيل تعدد الإرسال / مزيل التجميع
Depletion	استنفاد
depletion region	المنطقة الفقيرة
Deposition	تراكم
vopour deposition	تراكم بخاري
Design	تصميم
Destination	مقصد
Destructive interference	تداخل تهديمي
Detector	كاشف
light detector	كاشف ضوئي
coherent detection	كشف متماسك
Deviation	الانحراف
frequency deviation	انحراف التردد
Device	جهاز /أداة / نبيطة

Dichroic	تلواني
dichroic layer	طبقة تلوانية
Dielectric	مادة عازلة
Differenciate	يفاضل
Diffraction	إنعراج
diffraction grating	محرز إنعراج
Diffuse	منتشر
diffuse reflections	انعكاسات منتشرة
Digital	رقمي
digital system	نظام رقمي
Diode	ثنائي
Direct	مباشر
direct current	تيار مستمر
directional	اتجاهي
directional coupler	مقرن اتجاهي
directionality	اتجاهية
Discontinuity	انقطاع
impedance discontinuity	انقطاع الممانعة
Discrete	متقطع
Dispersion	تشتيت
dispersion shifted fiber	ليف مزاح التشتيت
angular dispersion	التشتيت الزاوي
material dispersion	تشتيت المادة
waveguide dispersion	تشتيت دليل الموجة

Dissipate	يبدد
Distortion	تشوه
signal distortion	تشوه الإشارة
Distribution	توزيع
distribution network	شبكة توزيع
Divergence	تباعد
divergence angle	زاوية التباعد
diverging rays	أشعة متباعدة
diverging source	منبع متباعد
Domain	مجال
Dome	قبة
Donor	مانح / معطي / واهب
donar atoms	ذرات واهبة / ذرات معطية
Dope	يطعم
Dopant	مادة التطعيم
doped- deposited - silica	سيليكا مطعمة بالتراكم
Doping	تطعيم
Drain	مصب
Drive	قيادة ، تشغيل
Drop	هبوط
voltage drop	هبوط الجهد
Duplex	مزدوج
Duration	دوام
pulse duration	مدة النبضة

Duty cycle	دورة التشغيل
Dynamic	حركي
Dynode	مصعد جانبي

E

Echo	صدى
Edge	حافة
edge encoder	مرمّز حافّي
edge emitting diode	ثنائي باعث حافي
edge emitters	باعثات حافية
Effective	فعّال
effective index of refraction	معامل الانكسار الفعّال
Efficiency	كفاءة
Electrical	كهربائي
electrical field vector	مركبة الحقل الكهربائي
Electron	إلكترون
photoelectron	إلكترون ضوئي
electromagnetic	كهروضغناطيسي
electronic	إلكتروني
electronic circuit	دائرة إلكترونية
electric circuit	دائرة كهربائية
Ellipticity	بيضاوية
Emission	انبعاث / بث
confined emission	انبعاث مقيّد

Emission	انبعاث / بث
confined emission	انبعاث مقيّد
spontaneous emission	انبعاث تلقائي
stimulated emission	انبعاث مثار
Emitter	باعث
light emitting diode (LED)	ثنائي باعث للضوء
emitter follower	تابع باعثي
Encapsulation	أغلفة/تغليف
Encoder	مرمز / مشفر
End	نهاية
end separation	تباعد نهايات
Energy	طاقة
energy barrier	حاجز الطاقة
energy level	مستوى الطاقة
gap energy	طاقة الثغرة
energized electromagnet	مغناطيس كهربائي منشط
Enhance	يعزّز
Epitaxial	طبقي
Epoxy	غراء
Equalizer	دائرة تسوية / مسو
Equivalent	مكافيء
Error	خطأ
error rate	معدل الخطأ
Etched	محفور
Evanescent	سريع الزوال / مضمحل
evanescent field	حقل سريع الزوال / حقل مضمحل

evanescent waves	موجات مضمحلة
Excited	مهيج
excited state	الحالة المهيجة
Excess	زائد / فائض
excess loss	فقد فائض / زائد
Excursion	تأرجح / جولة
Extrinsic	خارجي
extrinsic factors	عوامل خارجية

F

Factor	عامل
propagation factor	عامل الانتشار
modulation factor	عامل التشكيل
Fading	خمود
Falltime	زمن الهبوط أو النزول
Farfield diffraction	انعراج الحقل البعيد
Feedback	تغذية راجعة
Ferrule	طوق
Fiber	ليف
fiber system	نظام ليفي
fiber optics	بصريات الليف
fiber link	وصلة ليفية
fibered city	مدينة مليفة / مدينة تستخدم الألياف في اتصالاتها الداخلية

Field	حقل
Fill	تعبئة
Filter	مرشح
low pass filter	مرشح تمرير منخفض
optic filter	مرشح بصري
Flint	صوان
flint glass	زجاج صوّاني
Flared	قمعي / بوقي
flared openings	فتحات قمعية
Fluctuation	تراوح
Flux	جريان / تدفق
Focal point	نقطة بؤرية
Focus	بؤرة
focusing	تبئير
Format	صيغة
analog format	صيغة تماثلية
optic format	صيغة بصرية
Forward	أمامي
forward bias	إنحياز أمامي
Fracture	كسر
Fraunhofer diffraction	انعراج فرانهوفر
Frame	إطار / رتل
frame rate	معدل الأطر / الأرتال
Free	حر
free space	الفراغ الحر

Fresnel diffraction	انحراج فرسنل
Frequency	تردد
normalized frequency	التردد المقيّس
intermediate frequency	التردد المتوسط
frequency shift	إزاحة التردد
frequency deviation	انحراف التردد
frequency division multiplexing	تعدد الارسال بتقسيم التردد
frequency modulation (FM)	تشكيل تردد
Front end	المقدمة
Fusion	اندماج/ صهر
Function	تابع
work function	تابع العمل
Fundamental	أساس / جوهر
fundamental frequency	التردد الأساسي
Fuzzy	غائم / ضبابي
fuzzy picture	صورة غائمة

G

Gain	كسب / ربح
automatic gain control	التحكم الآلي بالكسب
Gap	ثغرة
gap energy	طاقة الثغرة
band gap	ثغرة النطاق
Gate	بوابة
Geometric effects	تأثيرات هندسية

Geometric optics	بصريات هندسية
Graded	متدرج
graded index	معامل الانكسار المتدرج
granded index fiber	الليف ذو معامل الانكسار المتدرج
Grating	محزّز
grating multiplexer	محزّز مجمّع
diffraction grating	محزّز الانعراج
grating coupling	اقتران محزّز
phase grating	محزّز طوري
bar grating	محزّز قضيبي
blazed reflection grating	محزّز انعكاس براق
Gravitation	الجاذبية الأرضية
gravitational acceleration	تسارع الجاذبية الأرضية
Groove	أخدود
Ground	أرضي
ground state	حالة أرضية
Guide	دليل
guiding layer	طبقة موجّهة
guided channel	قناة موجّهة
waveguide	دليل موجه

H

Halogenated	مهجنة
Harmonic	توافقية
harmonic distortion	تشويه التوافقيات

total harmonic distortion (THD)	تشويه التوافقيات الكلي
Heat	حرارة
heat sink	طارد حرارة
Hetero	غير متماثل / مختلف
heterojunction	وصلة غير متماثلة / غير متجانسة
heterodyne	تخفيقي (نظام هيتروداينى)
High pass filter	مرشح تمرير مرتفع
High voltage	ضغط عالي
Hole	فجوة
Homo	متماثل
homojunction	وصلة متماثلة / متجانسة
Hybrid	هجيني
Hydrolysis	التحليل المائي

I

Image	صورة
imaging system	نظام تصوير
Impedance	ممانعة
transimpedance	ممانعة عابرة
Impurity	شائبة
Incidence	سقوط
incident ray	شعاع ساقط
Index	معامل /دليل

modulation index	معامل التشكيل
refractive index	معامل الانكسار
index matching	موائمة معامل الانكسار
index matching liquid	سائل موائمة
Induction	حث
Information	معلومات
information capacity	سعة المعلومات
Infrared	تحت الحمراء
Input	دخل / مدخل
Insertion	إدخال
insertion loss	فقد الإدخال
Integrate	يكامل
integrated optics	بصريات متكاملة
Intensity	شدة
intensity modulation	تشكيل شدة
Interface	سطح بيني
Interference	تداخل
interference pattern	نمط التداخل
destructive interference	تداخل تهديمي
Intermodal dispersion	تشتيت باطني
Intersymbol interference	تداخل بين الرموز
Intrinsic	ضمني / نقي
intrinsic absorption	امتصاص ضمني
intrinsic semiconductor	شبه موصل نقي

Irradiance	سطوع
Isolate	يعزل

J

Jacket	غلاف واقٍ
Junction	وصلة
semiconductor junction	وصلة شبه موصل
junction photodiode	ثنائي ضوئي ذو الوصلة
PN juction	وصلة PN

K

Keyboard	لوحة مفاتيح
Keying	ابراق
on-off keying (OOK)	ابراق بالوصل والقطع
phase shift keying (PSK)	ابراق بإزاحة الطور
frequency shift keying (FSK)	ابراق بإزاحة التردد
Kinetic	حركي
kinetic energy	طاقة حركية

L

Lap	صقل
lap and polish	صقل وتلميع
Laser	ليزر
laser diode	ثنائي ليزري

Leakage	تسرب
leakage current	تيار التسرب
Lens	عدسة
lensed connector	موصل عدسي
lens coupled fiber	ليف ذو اقتران عدسي
Level	مستوى
power level	مستوى القدرة
Light	ضوء
light detector	كاشف ضوئي
light emitting diode	ثنائي باعث للضوء
lightwave	موجة ضوئية
Linearity	خطية
Linewidth	عرض الخط
Link	وصلة
telephone link	وصلة هاتفية
Load	حمل
load line	خط الحمل
Local area network (LAN)	شبكة حاسوب محلية
Lock - in	انحياس
lock-in phenomenon	ظاهرة الانحياس
Loss	فقد / خسارة
bending loss	فقد الانحناء
coupling loss	فقد الاقتران
tap loss	فقد التفرع

excess loss	فقد زائد
insertion loss	فقد الادخال
aberration loss	فقد الزيغ
area mismatch loss	فقد عدم التواؤم المساحي
lossy material	مادة فاقدة
loud speaker	مجهار

M

Macrobends	إنحناءات كبيرة
Macroscopic	يرى بالعين المجردة
Magnification	تكبير / تضخيم
Mandrel	عمود دوران المخرطة
Match	يوائم
Mate	يعشّق
mated connector	موصل معشّق
rematable attatchments	أربطة يمكن إعادة تعشيقها
Maximum acceptance angle	زاوية القبول القصوى
Measurements	قياسات
Mechanism	آلية
Message	رسالة
audio message	رسالة سمعية
Microbends	انحناءات دقيقة
Microphone	ميكروفون
Microprocessor	معالج صغري
Microwave	أمواج صغرية

Mobile	متحرك
mobile carrier	حاملة متحركة / ناقلة متحركة
Modal	نمطي
modal dispersion	تشتيت نمطي
Mode	نمط
mode mixing	اختلاط النمط
mode chart	خريطة النمط
mode energy	طاقة النمط
odd modes	أنماط فردية
modal distortion	تشوه نمطي
propagating mode	نمط منتشر
hybrid mode	نمط هجين
Modeling	نمذجة / محاكاة
Modulate	يشكّل / يعدّل
voice-modulated mirror	مرآة مشكلة صوتياً
Modulation	تشكيل / تعديل
modulation factor	عامل التشكيل
amplitude modulation	تشكيل الاتساع
analog modulation	تشكيل تماثلي
digital modulation	تشكيل رقمي
frequency modulation	تشكيل ترددي
intensity modulation	تشكيل الشدة
phase modulation	تشكيل طوري
pulse code modulation	تشكيل نبضي مرمّز

pulse duration modulation	تشكيل مدة النبضة
pulse position modulation	تشكيل موقع النبضة
refractive index modulation	تشكيل معامل الانكسار
modulated wave	موجة مشكلة
Modulus	معامل
Molecules	جزيئات
Monochromator	وحيد اللون
Monolithic	متراص
monolitic photodiode	ثنائي ضوئي متراص
Motor	محرك
Multimode fiber	ليف متعدد النمط
Multimode graded index fiber	ليف متعدد النمط بمعامل انكسار متدرج
Multimode step index fiber	ليف متعدد النمط بمعامل انكسار عتبي
Multiplexing	التجميع / تعدد الارسال
frequency division multiplexing(FDM)	تعدد الارسال بتقسيم التردد
wavelength division multiplexing	تعدد الارسال بتقسيم الطول الموجي
wavelength multiplexed systems	أنظمة تعدد الارسال حسب طول الموجه
grating multiplexer	محزِّز مجمِّع/محزز تعدد الارسال

N

Near field diffraction	إنعراج الحقل القريب
Network	شبكة
Node	نقطة التقاء
Noise	ضوضاء
noise figure	رقم الضوضاء

shot noise	ضوضاء الطلقة
excess noise	ضوضاء زائدة
modal noise	ضوضاء النمط
noise equivalent power (NEP)	القدرة المكافئة للضوضاء
thermal noise	الضوضاء الحرارية
Normalized frequency	مقيّس
normalized frequency	تردد مقيّس
Numerical	عددي
numerical aperture	فتحة النفوذ العددية

O

Offset	انزياح / تخالف
Operate	يُشَغِّلْ
operating current	تيار التشغيل
operating characteristics	خواص التشغيل
operational amplifier	مضخم تشغيلي
Optical	بصري
optical filter	مرشح بصري
optical time domain reflectometer	جهاز قياس الانعكاس البصري في المجال الزمني
Optics	بصريات
fiber optics	بصريات الليف
optical fibers	الألياف البصرية
integrated optics	البصريات المتكاملة

Orbit	مدار
Oscillate	يتذبذب
R.F. oscillator	متذبذب تردد راديوي
Oscilloscope	راسم ذبذبات
Outershell	مدار خارجي
Output	خرج / مخرج
Ovality	إهليجية
Overlap	متراكب
overlap connector	موصل متراكب
Overtone	توافقية
overtone band	نطاق التوافقيات

P

Package	عبوة
dual in line package	عبوة مزدوجة الخط
Packing fraction loss	فقد الرزم
Porabolic	ذي قطع مكافيء
Parameter	مَعْلَمة
Parasitic	طفيلي
parasitic capacitance	سعة طفيلية
Particle	جسيم
Passband	نطاق مرور
Pattern	مخطط / نمط / نموذج
radiation pattern	مخطط الإشعاع
speckle pattern	مخطط البقع

interference pattern	مخطط تداخل
Peak	ذروة / قمة
peak power	القدرة عند القمة
peak excursion	تأرجح القمة
Period	دور
Periodical	دوري
Phase	طور
phase difference	فرق الطور
Photon	فوتون
photodiode	ثنائي ضوئي
photodetector	كاشف ضوئي
photoelectron	الكترون ضوئي
photolithography	الطباعة بالتصوير الضوئي
photomultiplier	مضاعف ضوئي
photovoltaic	فولت ضوئي
Piezoelectric	كهروضغطي
peizoelectric effect	تأثير كهروضغطي
Pinch off voltage	جهد البتر
PIN diode	ثنائي PIN
Pitch	خطوة
quarter pitch lens	عدسة ربعية الخطوة
Plastic clad fiber	ليف بكساء بلاستيكي
Plane	مستوى
plane wave	موجة مستوية

planar surface	سطح مستو
Plug	قابس
Polarization	استقطاب
Polarity	قطبية
Polarized wave	موجة مستقطبة
Polish	تلميع
lap and polish	صقل وتلميع
Polymers	لدائن / بوليمرات
Population inversion	انقلاب سكاني
Porous	مسامي
Potential	كمون / كامن
potential difference	فرق كمون
potential energy	طاقة كامنة
potential energy barrier	حاجز طاقة كموني
Power	قدرة
Preferential	تفضيلي
preferential attenuation	توهين تفضيلي
Preform	تشكيلة أولية
Prism	موشور
sliding prism	موشور منزلق
Processor	معالج
Profile	منظر جانبي
Propagation	انتشار
propagation factor	عامل الانتشار

Properties	صفات / خواص
P.Type material	مادة نوع P
Pulse	نبضة
pulse spreading	انبساط النبضة
pulse train	قطار / سلسلة / نبضات
pulsed laser	ليزر منبّض

Q

Quantum	كَمّ
quantum limited	محدود بالكَمّ
quantum efficiency	كفاءة الكَمّ
Quantize	يكمي

R

Radian	راديان
Radiation	إشعاع
radiation pattern	مخطط الاشعاع / نمط الاشعاع
Radiator	مُشِعّ
Radio	راديو
radio frequency (R.F.)	تردد راديو
R.F.sputtering	الذر بالتردد الراديوي
radio station	محطة إذاعة
Raleigh scattering	إنتشار رالي
Random	عشوائي
Range	مدى

Rate	معدّل
bit error rate (BER)	معدل خطأ البتّات
bit rate	معدل البتّات
data rate	معدل المعطيات
Ratio	نسبة
coupling ratio	نسبة الاقتران
splitting ratio	نسبة الانشطار
Ray	شعاع
tapered ray	شعاع محصور
ray optics	بصريات الشعاع
Reactance	مفاعلة
Receiver	جهاز استقبال / مستقبل
Receptacle	مقبس
Recombine	يتحد / يجمع
recombination region	منطقة الاتحاد
stimulated recombination	اتحاد مثار
Rectangle	مستطيل
Redundancy	زيادة عن الحاجة / فيضية
redundant information	معلومات فائضة
Reflection	إنعكاس
reflection angle	زاوية الانعكاس
reflection of light	إنعكاس الضوء
Refraction	إنكسار
refraction angle	زاوية الانكسار

refractive index	دليل الانكسار
refraction of light	انكسار الضوء
Region	منطقة
Relay	مرحل
Reliability	موثوقية / وثوقية / اعتمادية
Repeater	مكرّر
Repetition	تكرار
Representative	تمثيلي
Reproducibility	تكرارية معيارية
Resistance	مقاومة
Resistor	مقاومة
Resonance	طنين
resonance frequency	تردد الطنين
Response	إستجابة
response curve	منحنى الاستجابة
responsivity	إستجابية
Restrictions	قيود
Retention clip	مشبك احتجاز
Reverse bias	انحياز عكسي
Reverse breakdown voltage	جهد الانهيار العكسي
Ribbon	شريط
Rise time	زمن الصعود

S

Sample	عينّة
sampling	اعتيان
samplinge rate	معدل الاعتيان
Sandwitching	تصفيف
Satellite	ساتل
Saturation	تشبع
Scale	مقياس
scale factor	عامل المقياس
Scatter	ينثر / يتناثر
scattering objects	أجسام متناثرة
Mie scattenng	انتثار ماي
scribe and break	الخدش والقطع
scribe	خدش
Segnents	أجزاء
Sensor	محساس / مجس
Semiconductor	شبه موصل
semiconductor junction	وصلة شبه موصلة
Shell	مدار
electron shell	مدار إلكتروني
Shift	إنزياح / إزاحة
phase shift	إزاحة الطور
Shielding	تحجيب
Shot	طلقة

shot niose	ضوضاء الطلقة
Signal	إشارة
signal to noise ratio	نسبة الإشارة إلى الضوضاء
Signalling	التشوير
signalling pulses	نبضات التشوير
signalling rate	معدّل التشوير
signal processing	معالجة الإشارة
Single mode fiber	ليف أحادي النمط
Sinking	طرْح
heat sinking	الطرح الحراري
Sinter	يتلبد
Sinusoid	جيبي
Skew	منحرف
skewrays	أشعة منحرفة
Skin effect	تأثير الجلد
Slab	طبقة
slab waveguide	دليل موجة طبقي
Sleeve	جلبة /كُم
precision sleeve	جلبة ضبط
Slot	شِقْ
time slot	الشق الزمني
Solid	صلب
solid state	الحالة الصلبة
Soliton	نبضة طبيعية

Soot	مواد مترسبة
Source	منبع / مصدر
Space	فراغ / حيز / فضاء
free space	الفراغ الحر
empty space	الخلاء
Spacer charge region	منطقة الشحنة الفراغية
Speaker	مجهار
Specifications	مواصفات
Speckle	بقعة / لطخة
speckle pattern	نمط البقع
Spectral	طيفي
spectral analysis	تحليل الطيف
spectral width	العرض الطيفي
spectral response	الاستجابة الطيفية
Spectrum	طيف
Speed	سرعة
Spin	يغزل / مغزل/ يدور
Splice	وصل دائم / غير مؤقت
adhesive splicing	الوصل الدائم باللصق
splices and connectors	وصلات دائمة وموصلات
Split	يشطر
splitting ratio	نسبة الانشطار
beam splitting plate	صفيحة شطر الحزمة
beam splitting cube	مكعب شطر الحزمة

Spontaneous	تلقائي
spontaneous emission	انبعاث تلقائي
Spool	ملف
Spot	بقعة
Spread	انبساط
pulse spread	انبساط النبضة
modal spread	الانبساط النمطي
beam spread	انبساط الحزمة
wave length spread	انبساط طول الموجة
frequency spread	انبساط التردد
Stable	مستقر
State	حالة
ground state	حالة أرضية
excited state	حالة مهيّجة
Standard	معياري / قياسي
Step	درجة / قفزة
step signal	إشارة قفزة
step index fiber	ليف ذو معامل انكسار عتبي
Stimulated	مثار
stimulated emission	إنبعاث مثار
stimulated photon	فوتون مثار
stimulated recombination	إتحاد مثار
Strain	انفعال
Strand	خصلة

Stray	شارد
stray capacitance	سعة شاردة
Stress	إجهاد
Strip	شريط
stripe contact	تماس شريطي
stripe contact laser diode	ثنائي ليزري ذو تماس شريطي
Subcarrier	حامل فرعي
Submarine	مغمور / بحري
submarine cable	كابل بحري
Substitution	تعويض
Substrate	طبقة تحتية
Superheterodyne	خفاق فوقي
Surface	سطح
surface emitters	باعثات سطحية
planar surface	سطح مستوي
Switch	مفتاح
electro -optic switch	مفتاح كهروبصري
switching mechansism	آلية التبديل
switching speed	سرعة التبديل
Symmetric	متناظر
Synchronize	يزامن
System(s)	نظام (أنظمة)

I

Tap	تفرُّع / تفريع
tap loss	فقد التفرع / التفريع
Tapered	مُستدق
tapered coupler	مقرن مستدق
Technical	تقني
Technology	تكنولوجيا / تقنية
Telephone	هاتف
Telegraph	تلغراف
Television	تلفزيون
cable television	تلفزيون يستقبل الإشارة عن طريق كابل
boadcast television	تلفزيون يستقبل الإشارة عن طريق الهوائي
Tensile	شَـدْ
tensile strength	قوة الشد
Terminal	نهاية طرفية
Thermo	حراري
themoelectric	كهروحراري
thermistor	مقاومة حرارية / ثيرمستور
Threshold	عتبة
threshold current	تيار العتبة
Tilt	إنحدار
tilt angle	زاوية الانحدار
Time	زمن / وقت
time division multiplexing	تجميع أو تعدد بتقسيم الزمن

Tolerance	تفاوت
Tolerate	يحتمل
Tone	نغمة
Total internal reflection	انعكاس داخلي كلي
Toxicity	سمية
Transconductance	مواصلة عابرة
Transducer	محول طاقة
Transfer	نقْـل
transfer characteristics	خواص النقل
Transformer	محول
Transistor	ترانزستور
Transit	عبور
transit time	زمن العبور
transition	انتقال
transition metal ions	أيونات العبور للمعدن
transimpedance	ممانعة عابرة
Translucent	شاف (نصف شفاف)
Transmission	إرسال / نقل
Transmitter	جهاز إرسال / مرسل
Transparent	شفاف
Transverse	عرضي
transverse magnetic polarization	استقطاب مغناطيسي عرضي
transverse mode	نمط عرضي
Trunk	وصلة طويلة

Tube	أنبوب
loose tube cable	كابل ذو أنبوب غير مقيد
fiber cable	كابل ليفي
photo emissive tube	أنبوب باعث ضوئي
Tune	يولف
tuned amplifier	مكبر مولف
Twist	تضفير / تجديل
Type	نوع
Typical	نموذجي

U

Ultraviolet	فوق البنفسجية
Unbounded	غير محدد
unbounded medium	وسط غير محدد
Uniform	منتظم
uniform plane wave	موجة مستوية منتظمة
Unipolar	وحيد القطبية

V

Vacuum	تفريغ / فراغ
vacuum evaporation	التبخير بالتفريغ
Valence	تكافؤ
valence band	نطاق التكافؤ
Vapor	بخار

Velocity	سرعة
Vibration	اهتزاز
Video	ڤيديو
video signal	إشارة ڤيديوية
Viewing	رؤيـة
viewing angle	زاوية الرؤية
viewing direction	إتجاه الرؤية
Visible	مرئي
Voltage	جهد
voltage drop	هبوط الجهد

W

Wave	موجة
waveguide	دليل موجة
wavenumber	العدد الموجي
wavelength division multiplexing	تجميع تقسيم الطول الموجي
Wire	سلك
Wireless	لاسلكي
Wrap	تغليف

X

X - ray	أشعة سينية