

الفصل الرابع

بنية وخصائص الألياف البصرية

obeikandi.com

الفصل الرابع

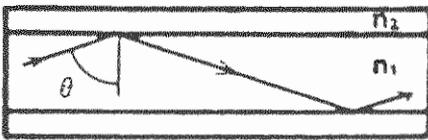
بنية وخصائص الألياف البصرية

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 .

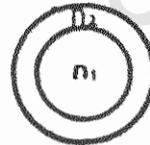
١-٤ ليف بمعامل انكسار عتبي (ليف عتبي) Step Index Fiber

نرى في الشكل (١-٤) 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 .

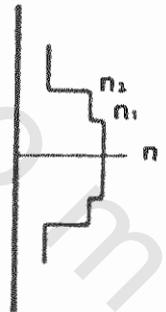


لب
كساء

(ج)



(ب)



(١)

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

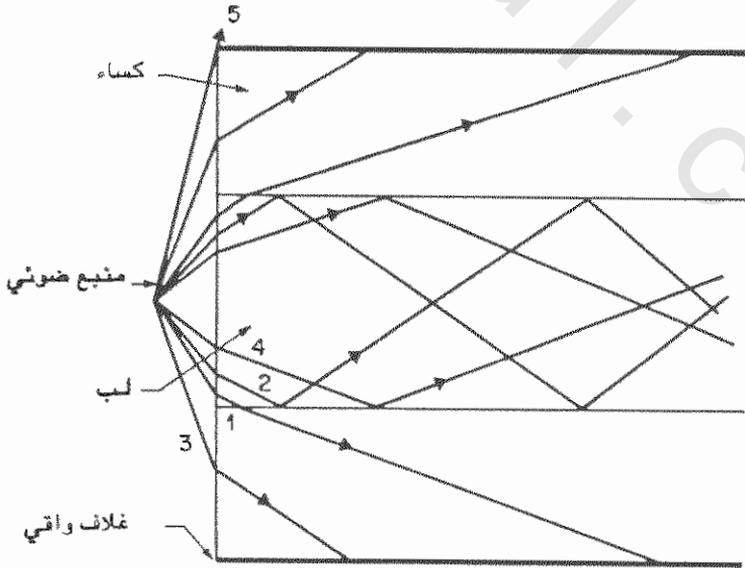
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots (4.1)$$

حيث أن n_1 و n_2 يرتبطان بالعلاقتين الآتيتين :

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

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

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 الواقى وبذا لا يستفاد منها .



الشكل (٤ - ٢)

أما الشعاع رقم أ فإنه يسقط على اللب لكن زاوية سقوطه تقل عن الزاوية المخرجة θ_c فينتشر خلال الكساء ويتبعثر على الغلاف الواقى ، أما الاشعاعات رقم 2 و4 فإنها تحقق الشرط بأن زاوية سقوطها مساوية للزاوية المخرجة 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 تتمكن 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 (٤-٧) 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 الواقى إذا كانت سماكة الكساء بضع عشرات من الميكرونات كما هو الحال في الألياف المستخدمة والتي يصل قطر الكساء إلى $125 \mu m$.

قد يتبادر إلى ذهن القاريء الكريم عن مدى الحاجة إلى وجود الكساء ولماذا لا يستخدم 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 والشني والتلوث أما العنصر الثاني فهو وجود الموجات المضمحلة مما يتطلب استخدام كساء فقده قليل حتى لا يتسبب 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 (١-٤) صفات ألياف متعددة النمط وذات معامل انكسار عتبي

بنية الليف	فتحة النفوذ العددية	الفقد عند $\lambda = 850\text{nm}$ *	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 $\lambda = 790\text{nm}$	مرتفع	منخفض	قصيرة جداً (بضع عشرات من الأمتار)

* تتميز قيمة الفقد بتغير الطول الموجي.

وفي الجدول رقم (٢-٤) نورد صفات ليف بصري ليه وكساؤه مصنوعان من

الزجاج عالي النقاوة ويتراوح قطر اللب بين $5\ \mu\text{m}$ و $10\ \mu\text{m}$ أما الكساء فقطره $125\ \mu\text{m}$.

الجدول (٢-٤) 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 $\leq 16\ \text{dB/km}$ عند $\lambda = 1550\text{nm}$	عال جداً 5G b/s وأكثر	عشرات إلى عشرات مئات الكيلومترات

٢ - ٤ 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 (١-٤) 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 لا يختلف عن الليف البصري بمعامل الانكسار العتبي (الليف العتبي) (step index (SI) ويمكن التعبير عن تغير معامل الانكسار في هذا النوع من الألياف بالمعادلات التالية :

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{2r}{a}\right)^\alpha \Delta} \quad r \leq a \quad \dots\dots\dots (4.3a)$$

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

حيث أن :

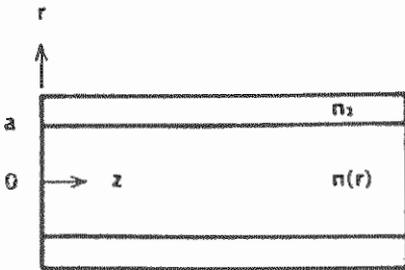
معامل الانكسار عند محور الليف = n_1

معامل انكسار الكساء = n_2

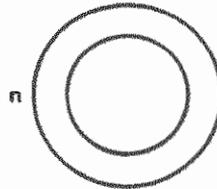
نصف قطر اللب = a

معلمة تصف تغير المظهر الجانبي لمعامل الانكسار = α

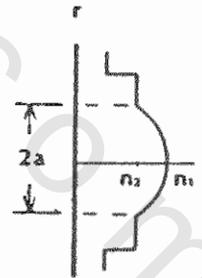
معلمة تحدد مقياس تغير المظهر الجانبي = Δ



(ج)



(ب)



(أ)

الشكل (٤-٣) ليف بمعامل انكسار متدرج

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

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

التالية :

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

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 مكافئ،
parabolic.

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

تستخدم معظم الألياف المتدرجة تغير معامل الانكسار ذي القطع المكافئ، أي أن $\alpha = 2$

ولو استخدمنا هذه القيمة في المعادلة (4.3a) فإنها تصبح كالتالي :

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

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

$$n(r) = n_1 \left(1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \Delta \right) \quad r \leq a \quad (4.6 a)$$

$$n_2(r) = n_1 (1 - \Delta) \quad r > a \quad (4.6 b)$$

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

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

تشير هذه المعادلة إلى تغير فتحة النفوذ العددية مع البعد النصف قطري من المحور في

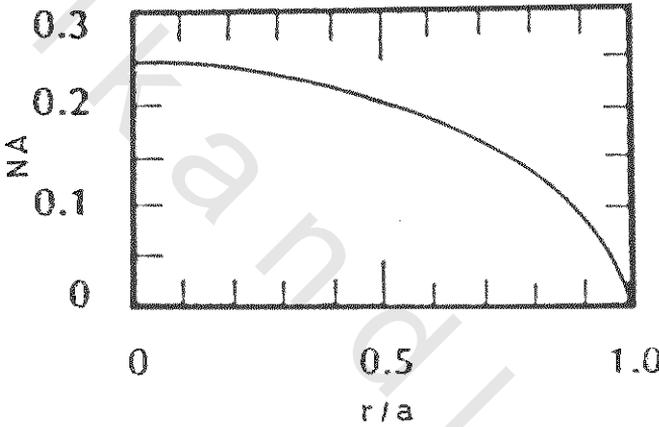
الألياف المتدرجة ولورسمنا هذا التفسير، الشكل (٤-٤)، مستخدمين المعادلة (4.7) وقيم

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

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

وتساوي 0.24 وتنقص قيمتها إلى صفرًا عندما تكون $r = a$ أي أن قيمة NA

عند محور الليف المتدرج بمعامل انكسار ذي قطع مكافئ هي نفسها لليف بمعامل انكسار عتبي وتستخدم لذلك المعادلة (4.8) .

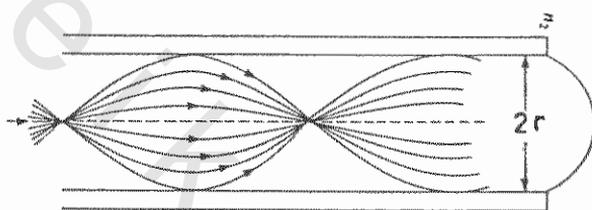


الشكل (٤-٤) فتحة النفوذ العددية لليف بمعامل انكسار قطع مكافئ $n_1 = 1.48$ و $\Delta = 0.0135$

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 .

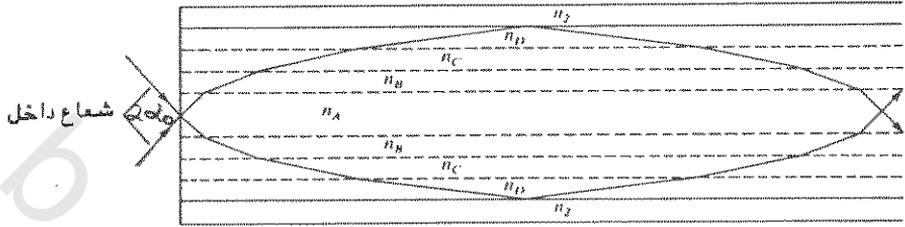
إن طريقة انعكاس الشعاع الضوئي في الليف المتدرج لاتتم في الحد الفاصل بين

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 وتكرر 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 للليف 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	5	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	$\Delta = 0.36\%$	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	$\Delta_{\text{max}} = 0.9\%$ $\Delta_{\text{avg}} = 0.3\%$	—	2.06 @ 850 nm 0.22 @ 1550 nm	>4000 @ 1550 nm (565 Mb/s-80 km)

¹N.A. = numerical aperture.

²Loss at 820 nm unless otherwise specified.

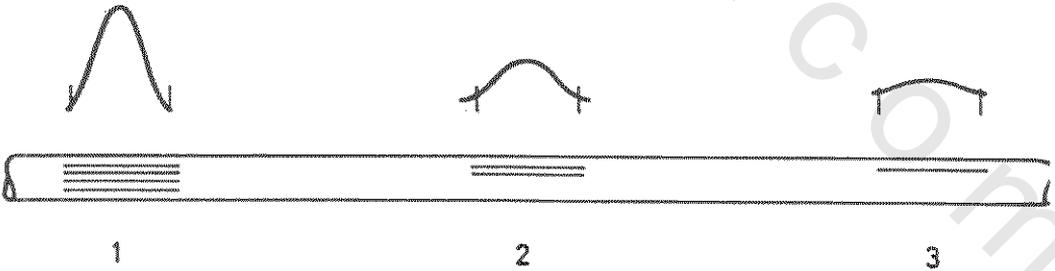
³BW = bandwidth.

الجدول (٤-٣) مواصفات بعض أنواع الألياف البصرية

٣-٤ 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 .

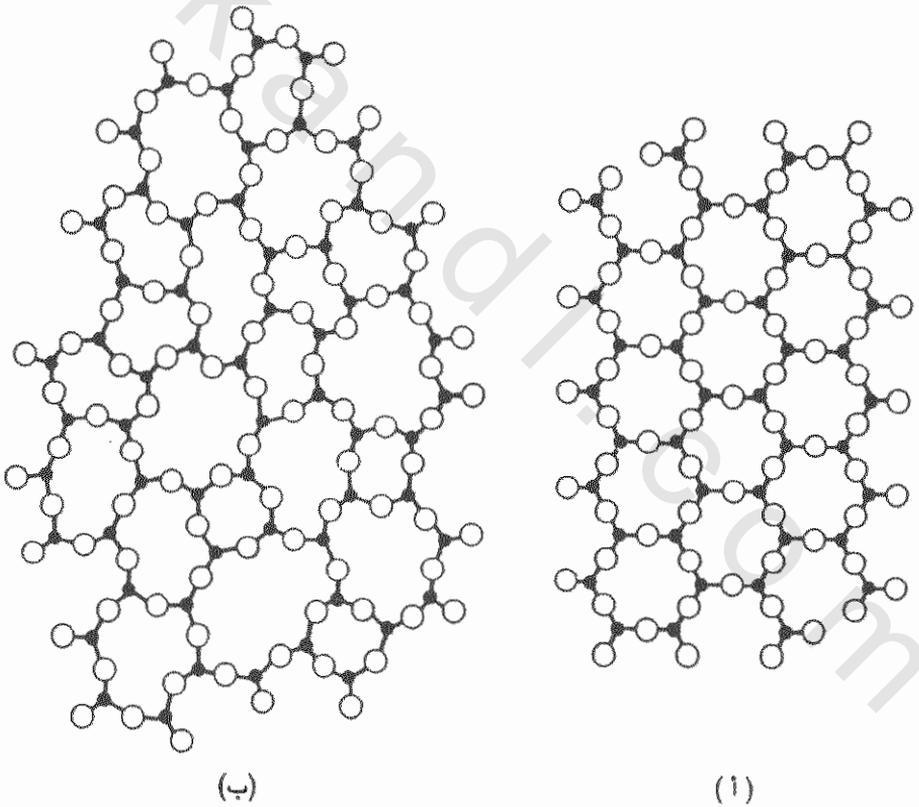
يوضح الشكل (٧-٤) إشارات بصرية في مواقع مختلفة من ليف بصري إذ نرى الموجه رقم 1 عند مدخل الليف ونتيجة لوجود التوهين فإنها تضعف بعد مسافة معينة لتصل إلى شكل الموجه 3 تتوفر منابع وكواشف ضوئية فعالة تعمل في مدى من الأطوال الموجية يتراوح بين $0.5\mu\text{m}$ و $1.6\mu\text{m}$ ونظراً لأن الزجاج هو أكثر المواد استخداماً في تصنيع الألياف وإمكانية 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 (٧ - ٤) 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 أكسيد السيليكون SiO_2) ويتكون هذا الزجاج من مجموعات من جزيئات ثاني أكسيد السيليكون. تشفير 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).



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

وللحصول على زجاج بمعاملات انكسار مختلفة تضاف مواد إلى مزيج جزيئات

ثاني أكسيد السليكون مثل الجرمانيوم Ge والتايتينيوم Ti والثاليوم Tl والبورون B و مواد أخرى فينتج زجاج عالي السليكا يمكن أن يصنع منه ليف يفقد منخفض إذا كانت نقاوة هذا المركب عالية جداً .

المادة	درجة الحرارة (كلثن)
مطاط طبيعي	200
كلوريد البولي فينيل	347
ماء	140
حامض الفوسفور المجفف	359
جلسرول	183
سكر جلوكوز	305
بروبانول	95
سليسيوم	303
ثاني كلوريد الزرنيخ	373
ثاني فلوريد البريليوم	570
ثاني أكسيد الجرمانيوم	800
ثاني أكسيد السليكون	1350

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

يعزى الفقد في الألياف الزجاجية إلى عناصر ثلاث وهي :

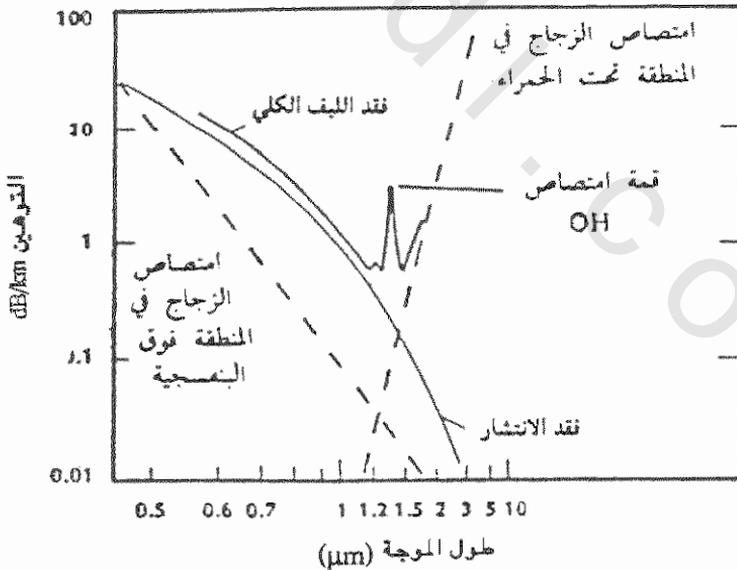
أ - الامتصاص Absorption

ب - الانتثار Scattering

ج - 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* ولا يمكننا 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 والجزئية 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).

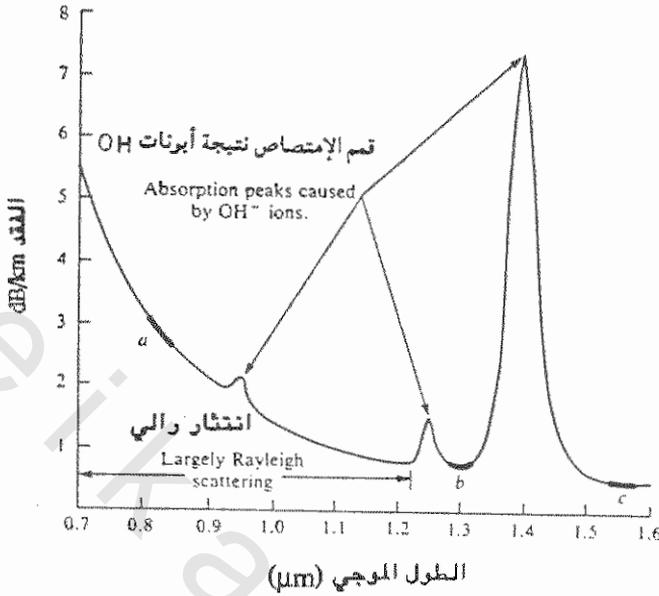


الشكل (٤-٩) توهين ليف زجاجي سيليكات مطعم بالجرمانيوم

هناك منطقة أخرى يزداد فيها الامتصاص الداخلي للزجاج وهي تحت الحمراء وتتراوح أطوال موجاتها بين $7 \mu\text{m}$ و $12 \mu\text{m}$ وهذا الفقد ناتج من اهتزاز الروابط bonds الكيميائية بين السليكون والأكسجين وتتسبب الطاقة الحرارية بتحريك الذرات بصفة مستمرة إذ تمتد وتتقلص روابط أول أكسيد السليكون SiO_2 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 $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$ 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 $0.8 \mu\text{m}$ و $1.6 \mu\text{m}$.

تستخلص السليكا من موارد طبيعية لذلك لا تخلو 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 تقتص 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 تحريك 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_2 . يحدث تردد طنين لأيونات OH عند $\lambda = 2.73 \mu\text{m}$ وتبلغ ذروة الامتصاص عند هذا الطول الموجي والذي يقع خارج نطاق اهتمامنا . غير أن الامتصاص ذو الأهمية هو ما يحصل عند الأطوال الموجية $1.37 \mu\text{m}$, $1.23 \mu\text{m}$, $0.95 \mu\text{m}$ كما هو موضح بالشكل (٤-١٠) لذا من الضروري خفض مستوى أيونات OH لعدة أجزاء لكل بليون.

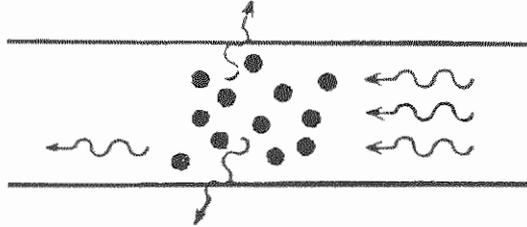


الشكل (٤-١٠) فقد الليف بين $0.7 \mu\text{m}$ و $1.6 \mu\text{m}$ وترى فيه النواخذ الثلاث

للحصول على قيم مختلفة لمعامل الانكسار نعمل على 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 .

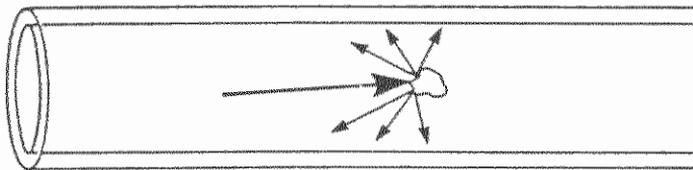
ب - الانتشار Scattering

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 تغييرات 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 طاقتها تتناثر كما هو في الشكل (٤-١١) .



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

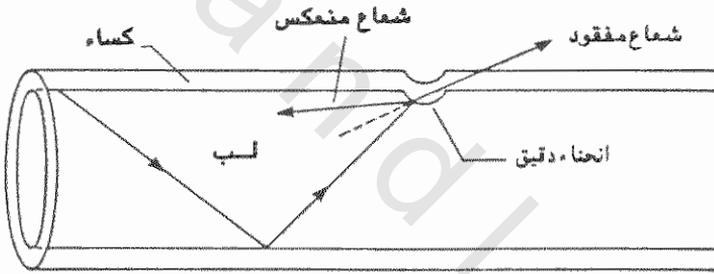
يدعى الفقد الناتج عن هذه الظاهرة بانتشار رالي Rayleigh وتناسب هذا الانتشار تناسباً عكسياً مع λ^{-4} لذا تزداد أهميته كلما قل الطول الموجي كما هو واضح في الشكل (٩-٤) مما يحد من استخدام الألياف البصرية للأطوال الموجية القصيرة . هناك نوع آخر من الانتشار وهو انتشار ماي Mie scattering سببه عدم تجانس الخليط 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 (١٢-٤) وهذا الفقد لا يعتمد على الطول الموجي ويمكن الاقلال منه بطرق تصنيع جيدة .



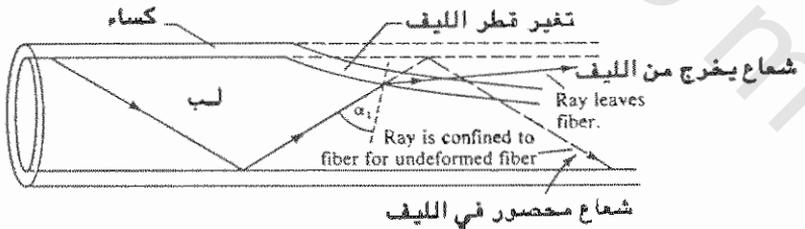
الشكل (١٢ - ٤) التناثر نتيجة الجسيمات الكبيرة

ج - التأثيرات الهندسية Geometric Effects

تنقسم التأثيرات الهندسية إلى قسمين رئيسيين الأول منهما ناتج عن الانحناءات الدقيقة microbends والثاني ناتج عن الانحناءات الكبيرة . تحدث الانحناءات 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 وانتثار 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 بزوايا θ_1 تقل عن الزاوية الحرجة θ_c ويخرج من الليف مما يزيد في كمية الضوء المفقود .

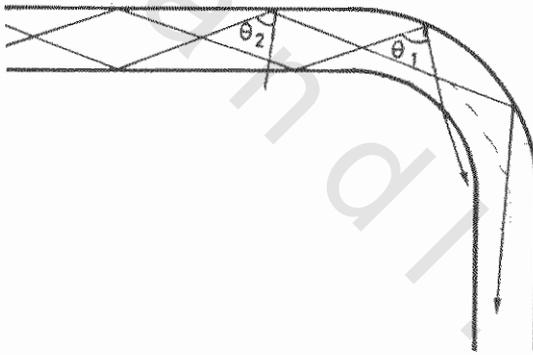


الشكل (٤-١٣) فقد الشعاع نتيجة الانحناء الدقيق



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 لا يقل نصف قطر الانحناء عن 150 ضعف قطر الليف ، فلو اعتبرنا ليف نموذجي قطره $125 \mu\text{m}$ 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_1 تقل عن الزاوية المحرجه 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 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ لارتفاع الفقد بسبب الامتصاص الضمني إذ تصل إلى عدة dB/km وتنخفض إلى 0.1 dB/km عند $\lambda = 1.8 \mu\text{m}$ وعلى الطرف الآخر أي عند الموجات تحت الحمراء فإن الامتصاص الضمني يزداد طردياً مع الطول الموجي غير أن شدته تزداد بعد $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$ ،

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 $\lambda = 0.95 \mu\text{m}$ و $\lambda = 1.23 \mu\text{m}$ و $\lambda = 1.37 \mu\text{m}$ نتيجة أيونات OH إذا كان تركيز هذه الأيونات أكثر من جزء واحد لكل مليون . كما نلاحظ من هذا الشكل وجود ثلاث مناطق يكثُر 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 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ و $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ أما النافذة الثانية فهي عند $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ أما النافذة الثالثة فتقع عند $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.
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 الإشارة 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 الإشارات أو النبضات .

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

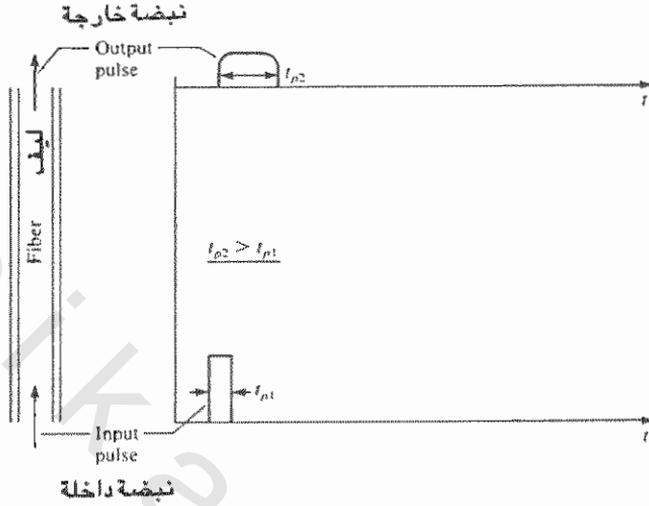
$$\Delta t = (tp_2^2 - tp_1^2)^{1/2} \dots\dots\dots (4.9 a)$$

ويقاس بوحدات الزمن .

ويعتمد التشتيت في الليف على طول الليف . أي أن النبضات المرسله 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 $\Delta\tau$ للليف معين كالتالي :

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

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



الشكل (٤ - ١٦) اتساع النبضة

٤-٤-١ التشييت النمطي او التشييت الزمني Intermodal Dispersion

تسلك الإشارات الضوئية مسارات متعددة داخل الليف متعدد الأنماط مما يؤدي إلى وصولها إلى نهاية الليف في أوقات مختلفة ، وفهم هذه الظاهرة دعنا ننظر إلى ليف بصري بمعامل انكسار عتبي (ليف عتبي) . في الشكل (٤-١٧) 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 :

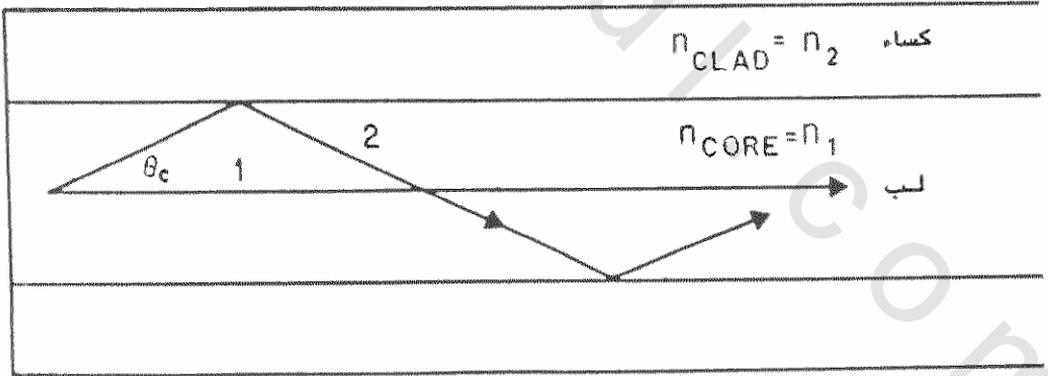
$$\tau_1 = L / (c/n_1) = \frac{L n_1}{c} \dots\dots\dots (4.10)$$

وقتل τ_1 أدنى تأخير انتشار minimum propagation delay لأنها أقصر

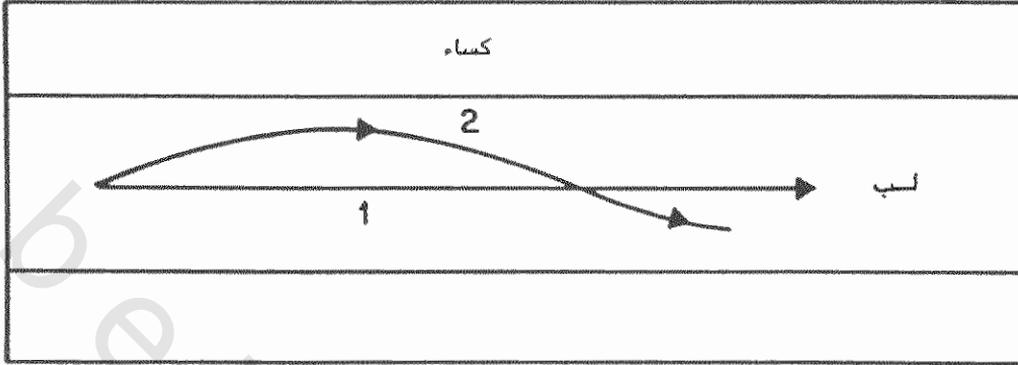
مسافة ممكنة . أما الإشارة رقم 2 فإن تأخيرها سيكون أكبر ويعبر عنه بالتالي :

$$\begin{aligned} \tau_2 &= (L / \cos \theta_C) / (c/n_1) \\ &= \frac{Ln_1}{\cos \theta_C \times c} \dots\dots\dots (4.11) \end{aligned}$$

تمثل τ_2 أقصى تأخير انتشار maximum propagation delay إذا كانت الموجة رقم 2 تقع في نهاية زاوية القبول للطاقة الضوئية الداخلة للليف 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 - ١٧ ب) 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

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

وحيث أن $\sin \theta_C \equiv \cos \theta_C = \frac{n_2}{n_1}$ على النحو التالي :

$$\begin{aligned} \Delta\tau &= \frac{Ln_1^2}{n_2c} - \frac{Ln_1}{c} \\ &= \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \dots\dots\dots (4.13) \end{aligned}$$

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

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

أو

$$(\Delta\tau/L) = \frac{n_1 \Delta}{c} \dots\dots\dots (4.14)$$

يمكننا كتابة المعادلة (4.14) بدلالة فتحة النفوذ العددية NA باستخدام المعادلتين

(4.4) و(4.8) لنحصل على :

$$\Delta\tau = \frac{[L \times (NA)^2]}{2n_1c} \dots\dots\dots (4.15)$$

$$\text{or } \frac{\Delta\tau}{L} = \frac{(NA)^2}{2n_1c} \dots\dots\dots (4.16)$$

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

مثال (٤-١) : أوجد التشتيت لكل كيلومتر وارسم النبضات الخارجة إذا كان 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 $n_2 = 1.36$. (افرض 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) :

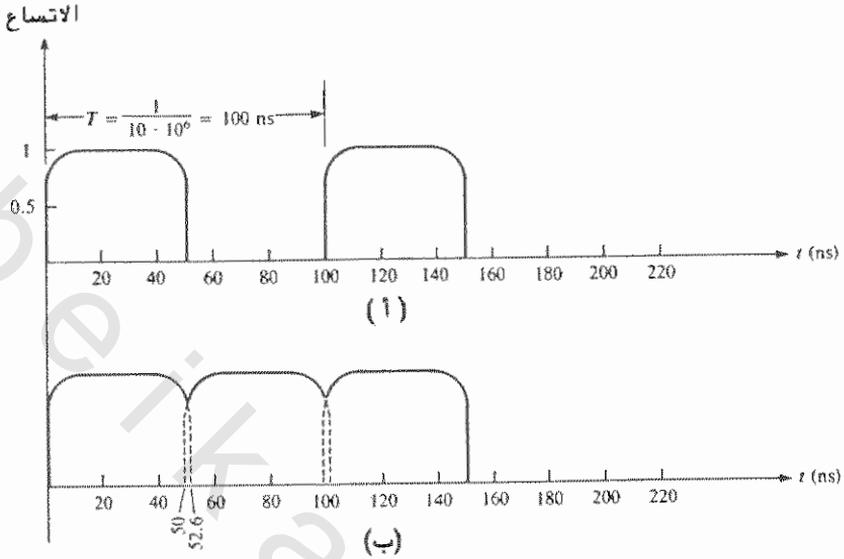
$$\Delta\tau = \frac{Ln_1}{c} \Delta = \frac{400 \times 1.4}{3 \times 10^8} \times 0.02857 = 53 \text{ ns}$$

(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

20 Mb/s

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



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

نستنتج من هذا المثال محدودية معدل المعلومات المرسله إذ نرى أن إمكانية تمييز النبضات المرسله عند معدل 10 Mb/s بينما امتزجت النبضات مع بعضها ولا يمكن التمييز بينها عند معدل 20 Mb/s مما يعني عدم إمكانية استخدام هذا الليف لإرسال 20 Mb/s لمسافة 400m. من الناحية العملية فإن قيمة Δ في حدود 0.01 ولو استخدمنا هذه القيمة في المثال السابق لحصلنا على تشتيت قيمته 18ns أي ما يعادل 0.45ns/km. مما يعني إمكانية استخدام هذا الليف لإرسال 20 Mb/s. عندما 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) الوجه 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 :

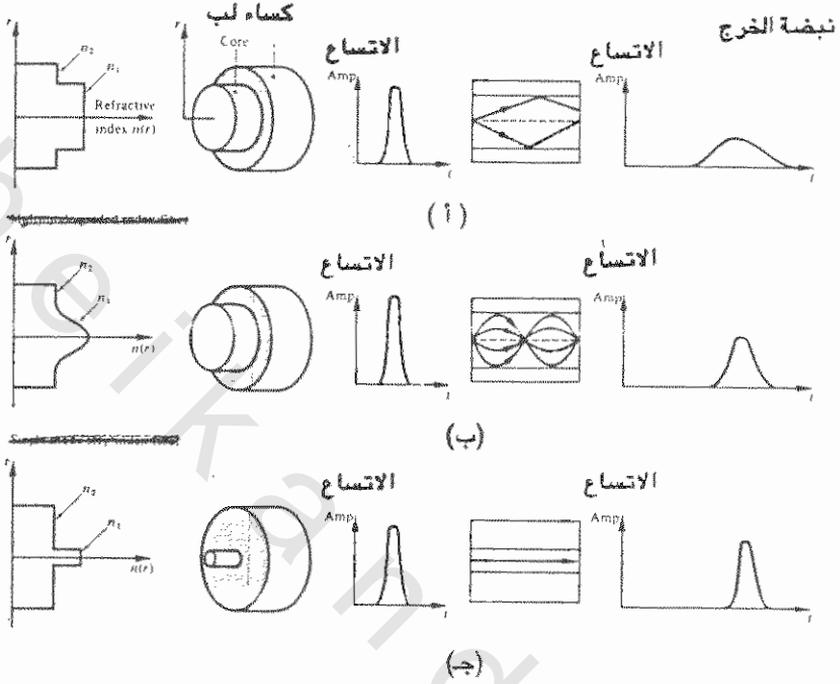
$$\Delta(\tau/L) = \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \dots\dots\dots (4.17)$$

إن مقارنة هذه المعادلة مع المعادلة (4.14) تبين تخفيضاً في أنبساط النبضة يمثل بالعامل $\frac{2}{\Delta}$ عند استخدام ليف متدرج محل ليف عتبي ، ولو استخدمنا $\Delta = 0.01$ لحصلنا على $\frac{L}{\Delta} = 200$ مما يعني أن قيمة $\Delta\tau/L$ ستخفف من 45 ns/km إلى 0.225 ns/km . إذا كان معدل نقل المعلومات مرتفع جداً وأردنا التخلص من التشتيت النمطي فلا بد من استخدام ليف أحادي النمط والذي لا يخلو 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 ، ولا بد من التأكيد هنا على أن التشتيت النمطي لا يعتمد 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) لا تبعث 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 المرسله مما يؤدي إلى انبساطها وينقسم هذا التشتيت إلى نوعين (أ) تشتيت المادة material dispersion (ب) تشتيت الدليل الموجي waveguide dispersion .

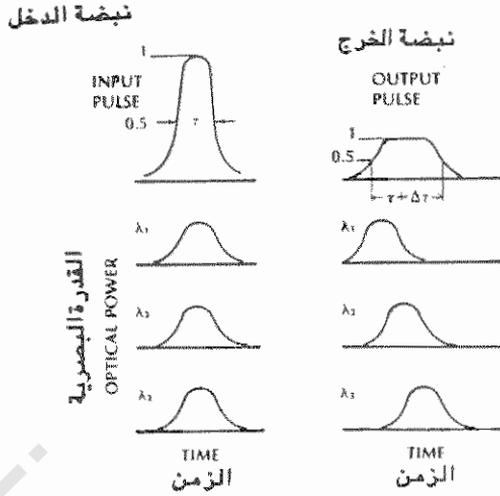
نبضة الدخل



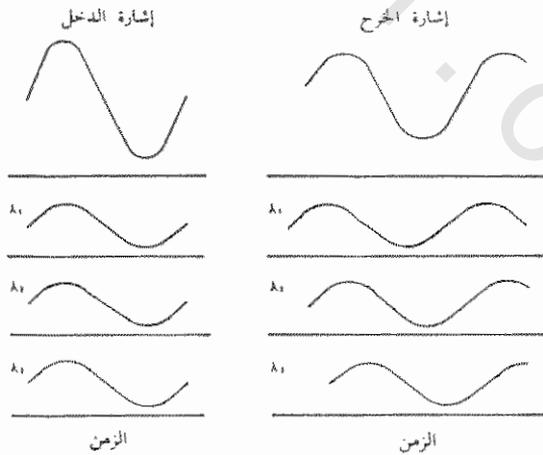
الشكل (٤-١٩) تشتيت النمط لثلاثة أنواع من الألياف
 (أ) ليف عتبي متعدد النمط
 (ب) ليف متدرج متعدد النمط
 (ج) ليف عتبي أحادي النمط

١ - تشتيت المادة Material Dispersion

ينتج انبساط النبضات في الإرسال الرقمي عن السرعات المختلفة للضوء الداخل للليف حيث أن المنابع الضوئية لا تبعث 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 منبسّطاً بالنسبة لإشارة الدخل . يوضح هذا كيف أدى التشتيت إلى تشوه النبضة وكلما زاد سير النبضة كلما ازداد الانبساط .

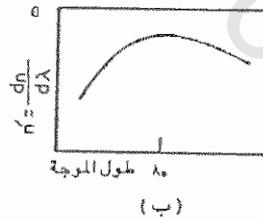
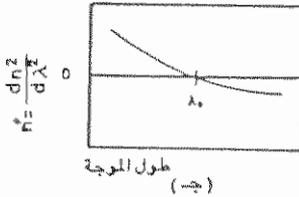
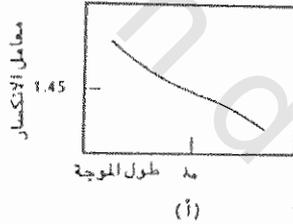


الشكل (٤ - ٢٠) انبساط النبضة أثناء انتشارها في وسط مشتت يحتوي النبضة على الأطوال الموجية $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ وكل واحدة تنتشر بسرعة مختلفة يؤدي التشيت أيضاً إلى تشوه الإشارة التماثلية ، وبين الشكل (٤-٢١) موجة قائلية منتشرة بثلاثة أطوال موجية مختلفة وبعد انتشارها خلال الليف تضاف أطوال الموجة الثلاثة إلى بعضها ويكون تغير اتساع الإشارة المستقبلية أقل من تغير اتساع إشارة الدخل، لا يغير التشيت من القدرة المتوسطة لترددات التشكيل ، ولكنه ينقص من تغير الإشارة. يمكن الإقلال من تأثير تشيت المادة باستعمال منابع ذات حزم ضيقة مثل ثنائي الليزر بدلاً من الثنائي الباعث للضوء LED .



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

دعنا الآن ننظر إلى خواص معامل الانكسار للزجاج المصنوع من ثاني أكسيد 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_0 تتكون نقطة انعطاف على منحنى معامل الانكسار ويبلغ الحد الأدنى للميل عند λ_0 كما في الشكل (٤-٢٢ب) حيث يبلغ هذا الميل صفرًا . وفي الشكل (٤-٢٢ج) نرى ميل المنحنى للشكل (٤-٢٢ب) . حيث أن المنحنى في الشكل (٤-٢٢ج) هو المشتق الثاني للمعامل الانكسار مع طول الموجة وتبلغ قيمة معامل الانكسار للسليكا النقية حوالي 1.45 عند $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ وعند الرغبة في تغيير قيمة معامل الانكسار تطعم السليكا بمواد أخرى مثل أكسيد البورون B_2O_3 أو أكسيد الجرمانيوم GeO_2 .



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

(ب) اشتقاق ميل المنحنى في الجزء (أ)

(ج) اشتقاق ميل المنحنى في الجزء (ب)

من خلال ما سبق رأينا كيف تتشوه الإشارات المارة في الليف الزجاجي نتيجة تغير الطول الموجي للإشارات المرسله وعلينا الآن أن نجد مقدار إنبساط النبضات لكل وحدة طول كتابع لطول الموجه حيث نرى في الشكل (٤-٢٣) منحني لهذه العلاقة لوسط مشتمت . 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 و λ_2 هو :

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

حيث أن انبساط النبضة الفعلي هو $\Delta\tau$ وهي تساوي $L\Delta(\tau/L)$ لا بد 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 المنحني في الشكل (٤-٢٣) والذي يرمز له بالرمز $(\tau/L)'$ هو :

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

أو

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

يمكن أن نعبر عن $(\tau/L)'$ بالتالي :

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

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

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

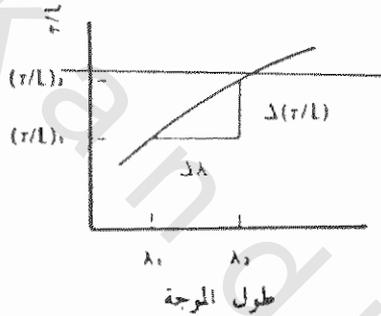
نرى من هذه المعادلة اعتماد انبساط النبضة على تغير معامل الانكسار وعلى العرض الطيفي $\Delta\lambda$. يعرف تشتيت المادة على أنه :

$$M = \frac{\lambda n''}{c} \dots\dots\dots (4.22)$$

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

وحدة طول :

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



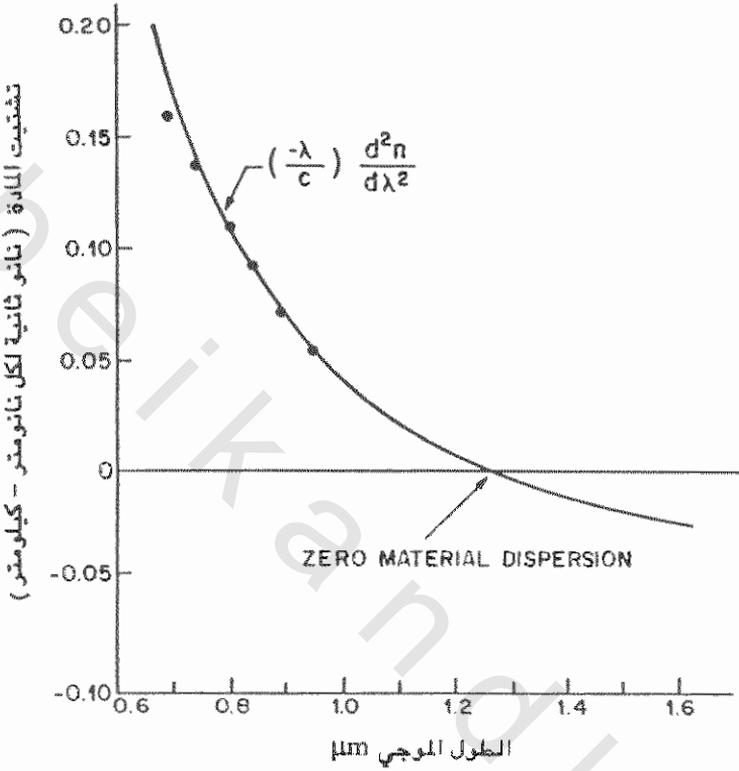
الشكل (٤-٢٣) زمن الانتشار لكل وحدة طول لوسط مشتت

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) وتعبّر عن انبساط النبضة بالنانو ثانية لكل نانومتر من العرض الطيفي للمصدر لكل كيلومتر من طول المسار .

نرى في الشكل (٤-٢٤) أن قيمة M للسليكا النقية موجبة عندما يكون الطول

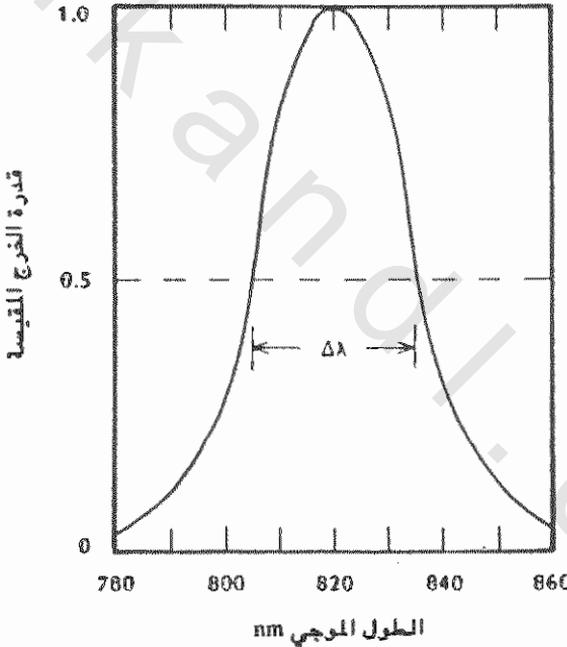
الموجي أقل من $1.3 \mu\text{m}$ وتصل قيمة M إلى الصفر عند $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ وتصبح قيمة M سالبة إذا زاد الطول الموجي عن $1.3 \mu\text{m}$.



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 $1.3 \mu\text{m}$ 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 $\lambda = 820 \text{ nm}$ وتنخفض إلى نصف قيمتها عند $\lambda_1 = 810 \text{ nm}$ و $\lambda_2 = 830 \text{ nm}$ 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 $1.3 \mu\text{m}$ 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 لمتبع ضوئي يبلغ الطول الموجي لهما $\lambda_1 = 1530 \text{ nm}$ والآخر عند $\lambda_2 = 1570 \text{ nm}$ فإن سرعة انتشار λ_1 أكبر من سرعة انتشار λ_2 . أما عندما تكون $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ فإن تشتت المادة في السليكا النقية يساوي صفراً . وعندما تطعم بالشوائب فإن طول الموجة ذات التشتت الصفري سيتغير بحوالي $0.1 \mu\text{m}$.



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 $\lambda_0 = 820 \text{ nm}$ وعرض

خطه $\Delta \lambda = 20 \text{ nm}$ (ب) ثنائي ليزر LD طول موجته $\lambda_0 = 1500 \text{ nm}$ وعرض خطه $\Delta \lambda = 40 \text{ nm}$

الحل :

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

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

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

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

ويكون الانبساط 6 ns بعد 10 km . 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 1 nm فإن انبساط النبضة بعد 10 km سيكون 1.1 ns عندما تكون $\lambda = 820 \text{ nm}$ و 0.15 ns عندما تكون $\lambda = 1500 \text{ nm}$.

ب - تشتيت الدليل الموجي Waveguide Dispersion

يتغير معامل الانكسار الفعال (n_{eff}) effective index of refraction

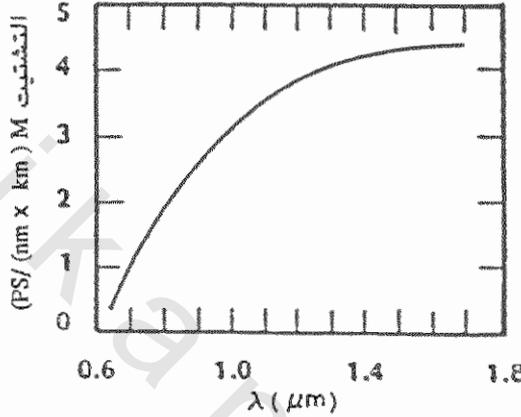
في الألياف متعدد النمط تبعاً لطول الموجة ويعبر عن ذلك بالمعادلة التالية :

$$\Delta (\tau / L) = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \Delta \lambda = - \frac{\lambda}{c} n_{\text{eff}}'' \Delta \lambda = - M' \Delta \lambda \dots (4.24)$$

حيث أن $M' = \frac{\lambda}{c} n_{\text{eff}}''$ ويعبر عن تشتيت دليل الموجة 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. بإمكاننا إيجاد انبساط النبضة نتيجة تشتيت المادة وتشتيت الدليل الموجي وذلك بجمع المعادلتين (4.23) و (4.24) لنحصل على :

$$\Delta (\tau/L) = -(M + M') \Delta \lambda \dots\dots\dots (4.25)$$



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

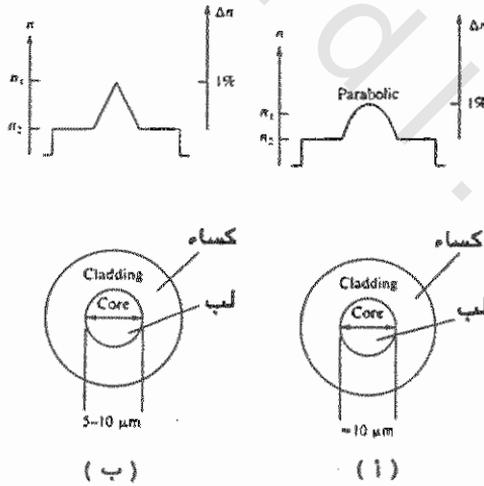
وبمقارنة الأشكال (٤-٢٤) و (٤-٢٦) نجد أن تشتيت المادة أكبر بكثير من تشتيت الدليل الموجي فمثلاً عند $\lambda = 820 \text{ nm}$ نجد أن تشتيت المادة 11 ps/nm-km بينما يبلغ تشتيت الدليل الموجي عند $\lambda = 820 \text{ nm}$ حوالي 2 ps/nm-km . في كلا الحالتين نجد أن انبساط النبضة الناتج من تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة يتناسب طردياً مع عرض خط المنبع الضوئي $\Delta \lambda$ ولا يقتصر 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 $1.3 \mu\text{m}$ وعندما يقترب طول موجة التشغيل من $1.3 \mu\text{m}$ يؤخذ تشتيت دليل الموجة بالاعتبار وبعد $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ يصبح تشتيت المادة سالباً وتشتيت دليل الموجة موجباً فيؤدي هذا إلى انبساط نبضة صفري عند طول موجة لا يزال قريباً من $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$. عند $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ يكون التوهين

أقل ما يمكن ويبقى تأثير التشتيت المادي والدليل الموجي وباستخدام تصاميم معينة للألياف البصرية أحادية النمط تتمكن من خلالها معادلة تشتيت المادة السالب بتشتيت دليل الموجة الموجب لنحصل على تشتيت صفري عند $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. 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 الأشكال (٤-٢٧) و (٤-٢٨).

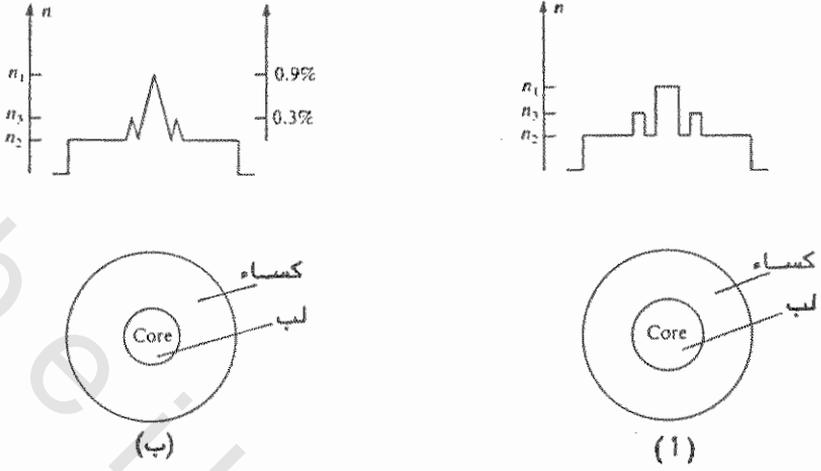
وقد يكون سبب انبساط النبضة نتيجة كل أنواع التشتيت الأنف ذكرها كما هي الحال في الليف العتبي متعدد النمط. وفي هذه الحالة يعطى انبساط النبضة بالمعادلة التالية :

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

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



الشكل (٤-٢٧) ليف أحادي النمط (أ) منظر جانبي ذو قطع مكافئ ،
(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 المرسل عبر أنظمة الاتصالات البصرية . لمعرفة تأثير انبساط النبضة على سعة المعلومات نفرض أن لدينا موجة جيبيية مشكّلة كالتي في الشكل (٤-٢٩) وأن تردد التشكيل هو f والدور $T = \frac{1}{f}$. نفرض أن المنبع الضوئي المستخدم يبعث ضوءاً بأطوال موجية تقع بين λ_1 و λ_2 والمطلوب معرفته الآن هو حساب مقدار التأخير المقبول بين λ_1 و λ_2 . نرى في الشكل (٤-٢٩) القدرة المستقبلية عند λ_1 و λ_2 عندما يكون التأخير مساوياً إلى نصف دور التشكيل أي أن :

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

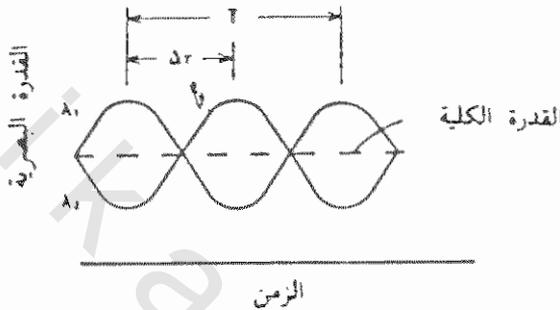
في هذه الحالة يلغى تأخير التشكيل كلياً عند جمع الموجتان . أما القدرة المشكّلة المنقولة على أطوال موجية تقع بين λ_1 و λ_2 فسيكون فيها تأخير لكنه أقل من $T/2$ وستلغى جزئياً . نستنتج من هذا أن التأخير يجب أن يقل عن $T/2$ (المذكورة في المعادلة (4.27) فيكون تردد التشكيل :

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

وقتل f في هذه الحالة عرض النطاق البصري وتدعي f_{3dB} وإذا

أردنا معرفة حد حاصل ضرب التردد في الطول فإن :

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



الشكل (٤ - ٢٩) التشكيل عندما يكون لكل من طولي موجة الحامل تأخير

$$\Delta\tau = \frac{T}{2} \text{ مساوٍ إلى نصف دور التشكيل}$$

حيث أن المستقبلات المستخدمة تعتمد على القدرة الكهربائية فمن الضروري

معرفة العلاقة بين عرض نطاق القدرة البصرية وعرض نطاق القدرة الكهربائية .

حيث أن :

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

و

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

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 :

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

و

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

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 بته bit موقع زمني $\cdot T$ ويكون معدل المعطيات data rate $\cdot R = \frac{1}{T}$ b/s تشغل النبضات نصف الشق الزمني (الشكل ٤-٣٠ أ) وفي الشكل (٤-٣٠ ب) يظهر المحتوى الترددي لهذه النبضات.

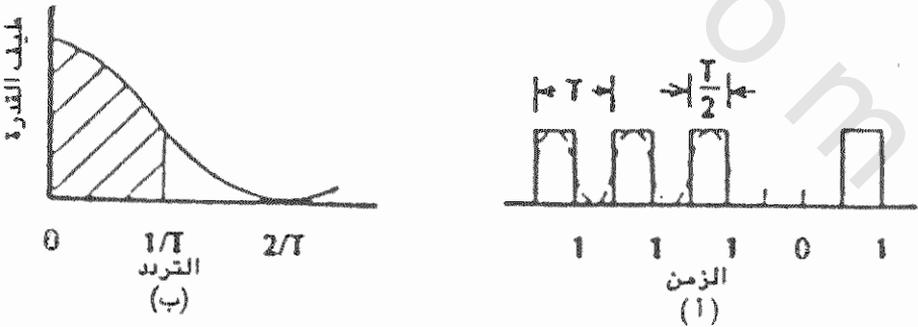
ويعبر عن معدل المعطيات باستخدام المعادلة (4.32) بالآتي :-

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

و

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

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 $\cdot R = \frac{1}{T} = \frac{0.35}{\Delta\tau}$ في نظام RZ تكون النبضات منفصلة تماماً عن بعضها ومقدار الانبساط المسموح به يقل عن 35% من الشق الزمني time slot وعندما لا يحصل 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 المهيمنة إلى عرض النطاق المطلوب للإرسال

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

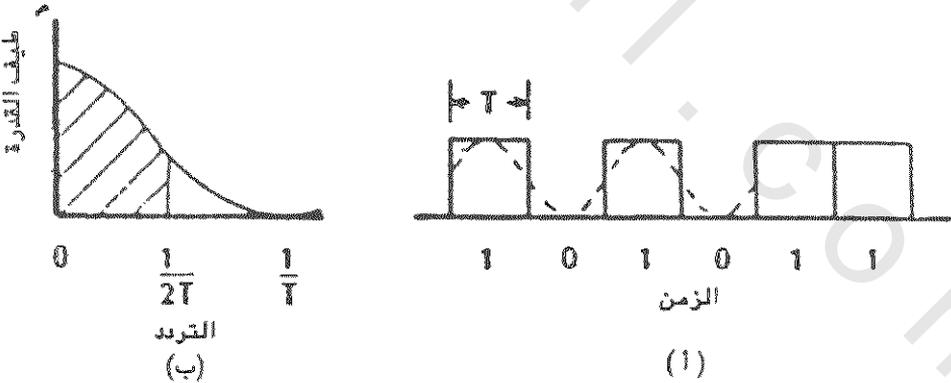
يبليغ معدل المعطيات R المسموح به في هذا النظام $f = \frac{1}{2T}$ حيث تمثل f عرض نطاق النظام باستخدام عرض النطاق الكهريائي المذكور في المعادلة (4.32) نجد أن :

$$R_{NRZ} = 2 f_{3dB} \text{ (كهريائي)} = \frac{0.7}{\Delta\tau} \dots\dots\dots (4.36)$$

أو

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

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



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

(أ) المنحنى ذو الخط المتقطع هو المنحنى الجببي المقارب

(ب) تشير المنطقة المهيمنة إلى عرض النطاق المطلوب للإرسال

مقال (٣-٤) : أوجد (المعدل × الطول) و (التردد × الطول) لليف بصري مصنوع من السليكا طوله 10km إذا استخدمنا (أ) ثنائي باعث للضوء LED طول موجته

• $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$ وعرض خطه $\lambda_0 = 820 \text{ nm}$

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

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

الجدول (٥-٤) أمثلة عن سعة المعلومات
(محددة بتشتيت المادة في السليكا)

كهربائي		بصري		المنبع			
$R_{RZ} \times L$	$f_3 - \text{dB} \times L$	$R_{NRZ} \times L$	$f_3 - \text{dB} \times L$	$\Delta(\tau/L)$	$\Delta\lambda$	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 $1.5 \mu\text{m}$ والطول الموجي $0.82 \mu\text{m}$. 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 تستخدم LD أعلى بكثير من معدل المعطيات التي تستخدم LED غير أن تكلفة أنظمة LD التي تعمل في منطقة الأطوال الموجية الطويلة ($1.3 - 1.5 \mu\text{m}$) أكثر تحقيداً 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 اسطوانى 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 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 θ كما 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:

$$k = k_0 n_1 \dots\dots\dots (4.38)$$

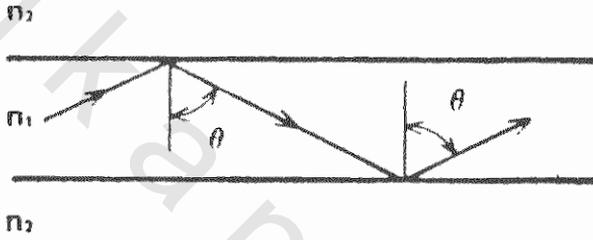
ويمثل $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ عامل الانتشار في الفراغ الحر و Π هي النسبة الثابتة = 3.14 .
 من الشكل (٤-٣٣) يمكن التعبير عن عامل الانتشار β في الاتجاه الأفقي لهذه الموجة
 بالآتي :

$$\beta = k \sin \theta = k_0 n_1 \sin \theta \dots\dots\dots (4.39)$$

وحيث أن $n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$ فإن :

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

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

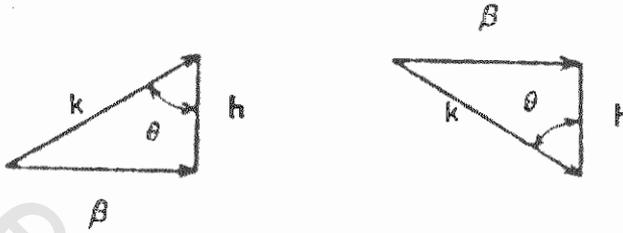


الشكل (٤-٣٢) دورة كاملة لثمط يسلك مسار متعرج حيث تحصل
 ازاحة لطور أثناء المسار وعلى الحدود العاكسة

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 :

$$\Delta \phi = m 2 \Pi \dots\dots\dots (4.41)$$

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 وتتراكم ويحصل انزياح للطور عند كل من حدي الفصل العاكسين وعلى طول المسار المتعرج كما هو في الشكل (٤-٣٣) 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 لا تحقق المعادلة (4.41) ستضعف بسرعة بسبب التداخل التهديمي destructive 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 :

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

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 العلامات التي تحدد عدد الأنماط.

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

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

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

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

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

مثال (٤-٤) :

كم عدد الأنماط المسموح انتشارها في ليف زجاجي قطر لبه $50 \mu\text{m}$ و $n_1 = 1.48$ و $n_2 = 1.47$ إذا كان طول موجات التشغيل $0.82 \mu\text{m}$ و $1.3 \mu\text{m}$.

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 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 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 المقيس V التي تعطينا نمطاً واحداً هي :

$$0 \leq V < 2.405 \quad \dots\dots\dots (4.45)$$

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

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

كشرط لانتشار نمط واحد .
مثال (٤-٥) :

أوجد الأقطار العظمى المسموح بها لليف زجاجي احادي النمط إذا كانت

$$n_1 = 1.48 \text{ و } n_2 = 1.47 \text{ و } \lambda = 0.82 \mu\text{m} \text{ و } \lambda = 1.3 \mu\text{m} \text{ ؟}$$

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 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ فإن $a = 2.9 \mu\text{m}$ وقطر اللب $5.8 \mu\text{m}$

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

نستنتج من ذلك أن أقطار الألياف أحادية النمط صغيرة جداً مقارنة بالألياف متعددة النمط ويمكن زيادة قطر الليف إذا كانت قيم n_1 و n_2 متقاربة أكثر واستخدمنا أطوال موجية أطول . تتراوح أقطار الألياف أحادية النمط العملية بين $4 \mu\text{m}$ و $12 \mu\text{m}$.

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

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

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

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta_{pq}}{k_0} = n_1 - (p+q+1) \frac{\sqrt{2\Delta}}{k_0 a} \dots\dots\dots (4.47)$$

حيث أن :

• عامل الانتشار الطولي $\beta =$

• عامل الانتشار في الفراغ الحر $= \frac{2\pi}{\lambda_0} = k_0$

• أعداد صحيحة $= p, q$

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

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 :

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

حيث يمثل V التردد المقيس . 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 (٤-٦) :

أوجد عدد الأنماط في ليف قطره 50 μm إذا كانت $n_1 = 1.48$ و $n_2 = 1.47$ للأطوال الموجية 0.82 μm و 1.3 μm .

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

$$V = \frac{2\Pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$
$$= \frac{2 \Pi \times 25}{.82} \sqrt{1.48^2 - 1.47^2} = 32.88$$

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 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$:

$$V = \frac{2 \Pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \Pi \times 25}{1.3} \sqrt{1.48^2 - 1.47^2}$$
$$= 20.7428$$

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

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

$$n_2 \leq n_{\text{eff}} \leq n_1$$

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 $n_{\text{eff}} = n_2$ و $p = 1$ و $q = 0$ في المعادلة (4.47) نحصل

على العلاقة بين نصف قطر اللب a والطول الموجي λ وهي :

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{1.4}{\Pi \sqrt{n_1 (n_1 - n_2)}} \dots\dots\dots (4.49)$$

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

ومقارنة المعادلة (4.46) مع المعادلة (4.49) نجد أن القيمة العظمى لـ $\frac{a}{\lambda}$ لانتشار

نقط واحد في ليف متدرج بقطع مكافئ هي أكبر بـ 1.6 مما هي عليه في الليف العتبي.

مثال (٧-٤) :

(أ) احسب أكبر قطر لب ممكن لانتشار نمط واحد في ليف متدرج على شكل قطع مكافئ فيه $n_1 = 1.48$ و $n_2 = 1.46$ إذا كان الطول الموجي $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$. (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 $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$ هي 2.1 فيكون قطر لب

الليف $4.2 \mu\text{m}$.

(ب) للحصول على معامل الانكسار الفعال n_{eff} نستخدم المعادلة (4.47) وقيم

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0.0135, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad p = q = 0$$

$$n_{\text{eff}} = n_1 - \frac{\sqrt{2\Delta}}{2\pi \left(\frac{a}{\lambda}\right)} = 1.48 - \frac{\sqrt{2 \times 0.0135}}{2\pi \left(\frac{2.1}{.82}\right)} = 1.47$$

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 :

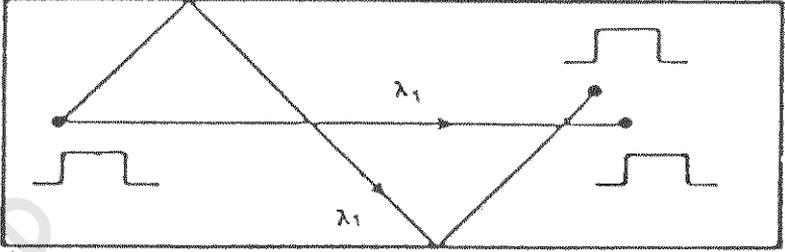
١ - فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture

تمثل فتحة النفوذ العددية العلاقة المثلية 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 $NA = \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. 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 (كالتشبيكات التصيرة 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 المرسله 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 .

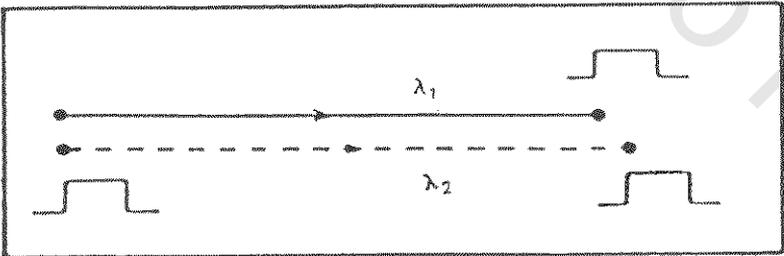
التشتيت النمطي



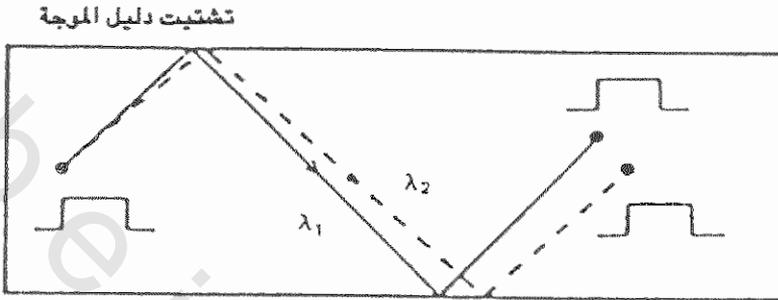
الشكل (٣٤-٤) تشتيت النمط حيث نرى أن نبضة بطول موجي واحد تتوزع قدرتها إلى أنماط تنتشر بسرعات محورية مختلفة بسبب الاختلافات في المسار

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 (٣٥-٤) وتشتيت دليل الموجة الموضح بالشكل (٣٦-٤) وذلك نتيجة تغير معامل الانكسار مع الطول الموجي وهذا يؤدي إلى تغير سرعة النبضات في الليف لأن سرعة الضوء في الليف $v = \frac{c}{n}$

تشتيت المادة



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



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

٣ - التوهين Attenuation

يؤدي التوهين إلى فقد أو خفض قيمة الاتساع amplitude في الطاقة البصرية المرسله 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 المقطاة بكساء بلاستيك أما الألياف المصنوعة كلياً من البلاستيك ففقدتها عال 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 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ و $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ وأقصى قيمة للتوهين عند $\lambda = 0.95 \mu\text{m}$ و $\lambda = 1.23 \mu\text{m}$ و $\lambda = 1.39 \mu\text{m}$

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 و 880 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 $\lambda = 1300 \text{ nm}$ 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 ما يمكن 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 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ والهدف من ذلك هو الحصول على ألياف يكون الفقد والتشتيت أقل مما يمكن 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 .

كما سبق تنضخ لنا ضرورة تحديد نوع الاستخدام للنظام البصري الذي يوصف أداً بالتوهين وانسباط 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 للليف 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 ومسافات طويلة فلا بد من استخدام ألياف أحادية النمط عند الأطوال الموجية الواقعة في النافذتين الثانية والثالثة ولا بد 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 وانسباط 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 لا يتأثر بعرض خط المنبع فإن منابع LED مناسبة وان استخدام منابع بعرض خط ضيق لن يؤدي إلى تخفيض الانسباط 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
	NA	dB/km	ns/km	MHz × km		الموجة nm
متعدد النمط						
زجاج	SI	5	15	33	LED	850
GRIN	SI	5	1	500	LD	850
GRIN	SI	1	0.5	1000	LED,LD	1300
PCS	SI	8	50	10	LED	80
بلاستيك	SI	400	-	-	LED	580
أحادي النمط						
زجاج	SI	4	< 0.5	> 1000	LD	850
زجاج	SI	0.6	0.017	30000	LD	1300
زجاج	SI	< 1	< 0.02	> 25000	LD	1550

الفصل الرابع

أسئلة

- ١ - ماهي عناصر فقد الرئيسية في الألياف البصرية .
- ٢ - ما أنواع فقد المادة ، إشرحها بالتفصيل ؟
- ٣ - ماهو الانتثار 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 أليافاً بتشتيت مزاح ؟
- ٩ - متى نستخدم الطول الموجي $1.3\mu\text{m}$ و $1.5\mu\text{m}$ ؟
- 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 .
 - ج - 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 المقيس ؟
- ١٨ - هل هناك أنظمة تستخدم الأطوال الموجية للنافذة الأولى ولماذا؟

مسائل :

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

٢ - إذا كانت $n_1 = 1.46$ و $\Delta = 0.01$ و $\alpha = 2$ و $a = 50 \mu\text{m}$ للليف 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 .

ج - 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 مكافئ، فيه $n_1 = 1.5$

و $\Delta = 0.0135$ و $a = 50 \mu\text{m}$

٤ - لماذا تزداد قيمة الفقد عند $1.37 \mu\text{m}$

٥ - ما الفرق بين انتشار رالي وانتشار ماي ؟

٦ - ماسبب التشتيت المادي؟

٧ - أوجد قيمة انبساط النبضة لكل وحدة طول للليف عتبي إذا كانت $NA = 0.2$ و

$n_1 = 1.46$ و $n_2 = 1.45$

٨ - إذا كانت $n_1 = 1.5$ و $\Delta = 0.01$ للليف بالشكل (٤-٦) . إذا كان الشعاع يقطع

محور الليف بزاوية 5° 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 $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ و $\Delta\lambda = 20\text{nm}$

كرر الحساب إذا كانت $\Delta\lambda = 2\text{nm}$

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

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

• مسافات 100m و 10km و 100km

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

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

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

• أحادي النمط