الباب الخامس

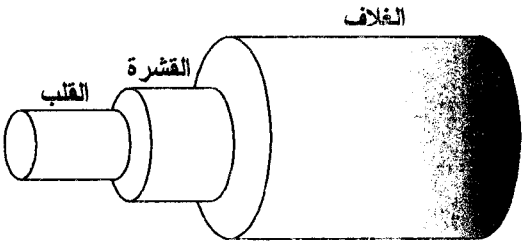
الألياف البصرية
Fiber Optics

1:5 الألياف البصرية: Fiber Optics

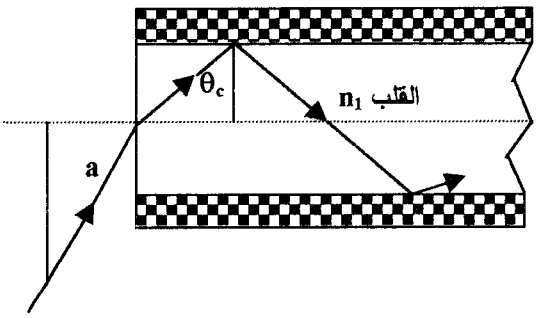
تعمل الألياف البصرية كموجهات للموجة، فكل الضوء الداخل إلى أحد طرفي الليفة يخرج من الطرف الأخر. تتكون الألياف أساسا من طبقتين، قلب مركزي و قشرة خارجية تحيط به شكل(54)، ويمكن أن يوجد العديد من الطبقات الخارجية الأخرى تعمل كدعامة أو حماية للقلب والقشرة. ويصل الضوء داخل القلب بالانعكاس الكلى الداخلي عند السطح بين القلب والقشرة (كما هو موضح بالشكل 55). فى هذا التمثيل ثنائي البعد ينبغي لكي يتم الانعكاس الكلى أن تكون زاوية سقوط الضوء داخل القلب عند سطح التلامس بين القلب والقشرة أكبر من الزاوية الحرجة θ_c، وتحدد هذه الزاوية من معاملي انكسار الطبقتين (n) طبقا لقانون سنل Snells'law

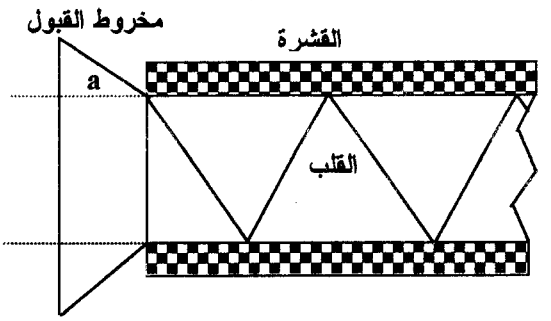
$$\theta c = \sin^{-1}(n_1/n_2)$$

عند زوايا السقوط التي تقل عن θc ينفذ جزء من الضوء إلي القشرة. لكي ينعكس الضوء الداخل إلي أحد نهايتي الليفة انعكاسًا كليًا عند سطح التلامس بين القلب والقشرة يجب أن تكون زاوية سقوطه أقل من زاوية القبول Acceptance Angle (a) والتي تعرف كما يلي:



شكل(54): تركيب الألياف البصرية.





شكل(55): يبين a – الزاوية الحرجة b – زاوية القبول.

$$\text{Sin } a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

وتوصف الألياف البصرية من قبل المستخدمين والصانعين بدلالة فتحة عددية Numerical Aperture NA وتساوى:

$$N A = \text{Sin } a$$

أو

$$F/\# = 1/2 \text{ sin } a$$

الفتحة العددية NA هي مقياس لقدرة الليفة على استقبال الضوء. القيم الأكبر من NA تدل على أن الليفة يمكنها أن تقبل الضوء عند زوايا سقوط أكبر (Grazing angles).

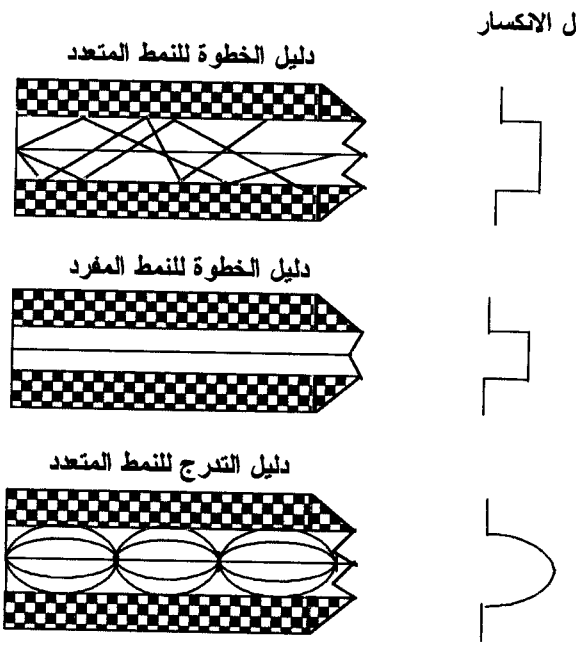
زاوية القبول، NA ، F/ # لثلاث ألياف تجارية شائعة الاستخدام موضحة بالجدول(9)

القلب	القشرة	زاوية القبول	NA	F/#
Glass	Glass	68	0.58	0.9
Silica	Polymer	32	0.27	1.9
Silica	Silica	25	0.22	2.3

الانتشار الحقيقي للضوء خلال الألياف يكون أكثر تعقيدا من ذلك المعرف بالانعكاس الكلى الداخلي باستخدام قانون سنل. الفتحة العددية والمتغيرات الأخرى المعرفة عاليه، مبنية على أساس أن شعاع الضوء يدخل الليفة عند مركز المقطع العرضي تماما (المحور الطولي)، ويمر دائما بعد كل انعكاس من سطح تلامس القلب والقشرة خلال المحور الطولي وهذه الظاهرة نادرا ما تحدث. ويعرف مخروط القبول الحقيقي بقطر القلب كما هو مبين بالشكل (55). يمكن أن تدخل الأشعة الليفة عند أي نقطة فى الوجه النهائي.

كثير من الأشعة عند عبورها الألياف تسلك مسارا لولبيا ويطلق عليها الأشعة المائلة Skew ray.

يعتمد انتشار الأمواج داخل الألياف على حجم القلب والفتحة العددية NA. والليفة التي تنفذ فقط شعاعا منفردا (أو نمطا) يطلق عليها ليفة النمط المفرد (Single mode fiber) بينما تلك التي تنفذ أشعة كثيرة يطلق عليها ليفة متعددة النمط (Multi mode fiber) والأنواع المختلفة من الألياف موضحة بالشكل (56). يعرف تغير معامل الانكسار عند السطح بين القلب والقشرة بدليل الخطوة (Step index) .الألياف التي تمتلك قلبا له دليل خطوة كبير تكون متعددة النمط (الأشعة تدخل عند المحور الطولي عند زوايا كثيرة). والألياف التي تمتلك قلبا ذا دليل خطوة صغير تستخدم لحصر النفاذية فى نمط منفرد، أي أن شعاعا فقط يدخل عند زاوية واحدة تماما. وتصنع أيضا الألياف متعددة النمط باستخدام دليل تدرج (Graded index)، الذي يتكون من قلب لديه معامل انكسار يتغير تدريجيا من المركز إلى القشرة.



شكل(56): يبين النمط الواحد والأنماط المتعددة ودليل التدرج.

أقطار القلب للألياف متعددة النمط تكون في المدى من-50 600µm، وتشتق اسمها من حقيقة أن الضوء يمكن أن يأخذ أحد المسارات العديدة الممكنة فى الليفة. المسارات تختلف فى المسافة بين الانعكاسات الداخلية وفى زوايا الدخول فى الليفة. الألياف متعددة النمط لا تحتفظ باستقطاب الضوء سوى على طول قصير جدا من الليفة. أقطار ألياف متعددة النمط تكون كبيرة بدرجة كافية لتسمح بدخول الليزر والتشتت المجمع فى الليفة. زيادة على ذلك أقطار قلب الألياف متعددة النمط فى المدى من 250µm – 50 تكون مرنة. عندما يزيد قطر القلب عن 300µm يزداد نصف قطر الانحناء الأدنى لليفة وتصبح الليفة أقل مرونة دون تلف.

ألياف النمط المفرد Single Mode Fibers

ألياف النمط المفرد تعتمد اعتمادا قويا على الطول الموجي وتنفذ فقط مدى محدود من الأطوال الموجية. ومن جهة أخرى، الألياف متعددة النمط والتي ينتشر فيها مئات من الأنماط يمكن أن تستخدم على مدى واسع من الأطوال الموجية.

أقطار قلب ألياف النمط المفرد تكون صغيرة < 20µm وتحمل فقط نمط توصيلي واحد. وتحتفظ باستقطاب الضوء ولكنها صعبة جدا فى الترتيب والاستخدام، بالرغم من أن ألياف النمط المفرد ذات أهمية فى تطبيقات الاتصالات لكن استخداماتها فى مطيافية رامان محدودة لحالات خاصة قليلة.

ينتقل بعض من طاقة الضوء فى الليفة فعليا فى القشرة كما فى القلب. جزء من موجة الضوء النافذ خلال القشرة يطلق عليه الموجة سريعة الزوال Evanescent Wave. الطاقة فى القشرة تكون نتيجة

للحقيقة أن الموجة التي تنعكس عند سطح تلامس القلب والقشرة تدخل بالفعل القشرة قبل أن تنحني Bent خلفا إلى القلب. ينشأ عن التداخل بين الحزمة الساقطة والمنعكسة موجة موقوفة فى القشرة Standing wave وتكون عمودية على سطح الانعكاس. الطاقة فى هذه الموجة تقل أسيا من السطح الفاصل، ولكنها تستطيع أن تتفاعل مع القشرة. هذه هى نفس الظاهرة التى تؤدى إلى طيف الانعكاس الكلى الموهن.

يتميز النفاذ خلال الألياف البصرية عادة بتوهين Attenuation الضوء الذي يعطى بدلالة ديسيبل Decibels (db) أو الامتصاصية مضروبة فى 10. التوهين يعتمد على طول الليفة. لذا يعبر عنه غالبا بوحدة الطول لكل متر db/m أو لكل كيلومتر db/km.

النفاذ فى الألياف البصرية دالة قوية للطول الموجي. معظم ألياف الاتصالات الفعالة تعمل فى المنطقة من 1100-1300nm. نفاذية الليفة تتبع قانون بير، لكن الامتصاصية يعبر عنها عادة بالديسيبل لكل كيلومتر Decibels/Km أو ديسيبيل لكل متر Decibels/m.

والمعادلة التالية تربط بين الشدة الساقطة على الليفة Io و الشدة النافذة It وطول الليفة L (بالمللي متر) والتوهن αF بالديسيبل لكل متر.

$$I_t / I_o = 10^{-0.1\,\alpha F L}$$

الفقد فى الأشعة فوق البنفسجية (UV) يكون عاليا، لذلك تكون الألياف ذات الأطوال القصيرة فى حدود عدد قليل من الأمتار مناسبا من الناحية العملية، بالرغم أن ذلك يكون مكلفًا جدًا. تمتص السيليكا بقوة الأطوال الموجية أعلى من 2.5 μm ، لذلك يجب تغيير مادة القلب إلي مواد Exotic مثل: معادن القلويات والكالوجينايد Chaleogenides. وفى الوقت الحاضر هذه المواد أيضا مكلفة وتكون مفيدة فقط للأطوال القصيرة فى حدود قليل من الأمتار.

الألياف ذات الفقد المنخفض ممكنة لأطوال موجية فى المنطقة المرئية وتحت الحمراء القريبة شائعة الاستخدام فى مطيافية رامان. مثال على ذلك قيم التوهين المقاسة لليفة 200µm عند الطول الموجي لليزر أيونات الأرجون موجودة فى الجدول(10). فى مدى طول الليفة 3m المناسب فى الاستخدامات المعملية يكون فقد الضوء بسيطا Trivial بينما فى حالة الطول 100m يكون فقد الضوء متوسطا. مجسات رامان التجارية متوفرة لنوعيات من الأطوال الموجية لليزر فى المدى من 450-1064nm.

جدول(10): النفاذية فى ليفة قطر القلب لها 200µm للأطوال الموجية لليزر الأرجون.

النفاذية			
100m	3m	α_F(dB/m)	λ ميكرومتر
0.66	0.988	0.018	514.5
0.72	0.990	0.014	496.0
0.72	0.990	0.014	488.0
0.63	0.986	0.020	476.5
0.62	0.985	0.021	457.9

مجسات الألياف البصرية Fiber- Optics Probes

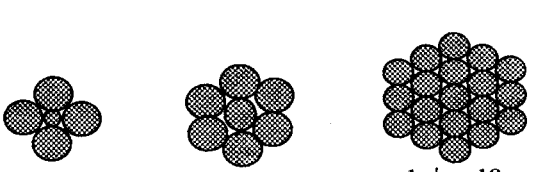
السطح بين ليفة الإثارة، ألياف التجميع و العينة يوجد عند المجس (Probe) أو رأس العينة Sampling head الموضوعة على مسافة تتراوح بين عدة أمتار إلى مئات من الأمتار، من السبيكترومتر. المجس ينبغي أن يضاعف كثيرا من وظائف بصريات العينة، مثل تركيز

الليزر- تجميع الضوء المشتت والترتيبات المصاحبة لذلك. وهناك نوعيات كثيرة من المجس ولكن جميعها تنقسم إلى نوعين: المجسات غير المرشحة Unfiltered probes وهي التي تطورت أولا ومن مميزاتها صغر حجمها ورخصها وبساطتها. على أي حال، التشتت غير المرن داخل ألياف الإثارة والتجميع تولد إشارة خلفية يصعب تفاديها في أوضاع عملية كثيرة. المجسات المرشحة تحتوى على مرشحات بصرية موجودة فى رأس المجس للتخلص من خلفية الألياف. رأس العينة تحتوي أيضا على بصريات تركيز لإعادة تكوين الوضع الهندسي 180^{o} عند العينة. المجسات المرشحة أطول ومعقدة أكثر من المجسات غير المرشحة ولكنها أكثر فائدة فى تطبيقات عديدة.

مجسات الألياف البصرية لرامان غير المرشحة

Unfiltered Fiber- Optics Probes

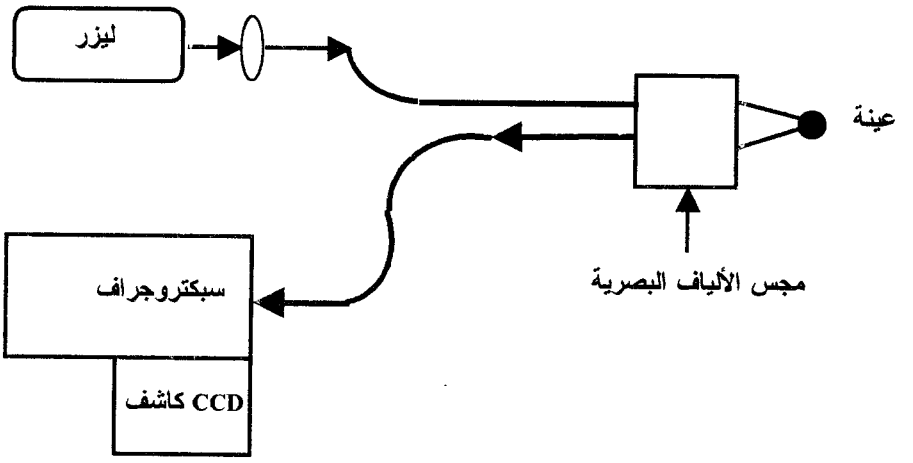
كان أول مثال على نقل ضوء الإثارة وضوء التشتت فى مطيافية رامان عام 1983م ثم تطورت التصميمات الأولية كثيرا وأصبحت تعرف بهندسة المجس المتوازية أو n حول واحد Parallel or n - around – 1 probe geometries . يمكن غمس المجس فى السوائل أو بالقرب من العينات الصلبة. الليفة المركزية تحمل ضوء الليزر إلي العينة، والألياف المجمعة المحيطة تجمع ضوء التشتت الخلفي وتعيده إلي السبيكترومتر. إذا كانت كل الألياف لها نفس القطر فإن ترتيبات الحزم 6 – حول 1–، 18– حول 1–، 36 – حول– 1، تعطى أقصى كثافة تحزيم للقطر الكلى (الشكل يبين n – حول 1–)



المشكلة التي تواجه استخدام الألياف البصرية لعينات رامان هي الخلفية التي تتولد من التشتت غير المرن داخل الليفة. السيليكا المستخدمة فى الألياف البصرية ليست كلها قوية التشتت لرامان، لكن يمكن أن يكون المسار طويلا جدا. كثير من تشتت الليفة يحدث داخل NA لها، لذلك فهو يرجع إلى السبيكترومتر مؤديا إلى مسار طويل فعال. طيف السيليكا عريض ويوجد فى منطقة طيف رامان بشدات مختلفة.

مجسات الألياف البصرية لرامان المرشحة
Filtered – Fiber Optics Raman - Probes

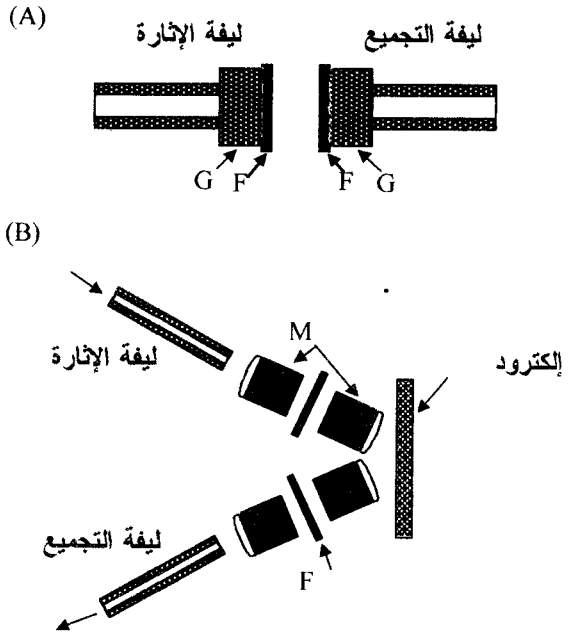
ينقسم تجميع المرشحات، الألياف البصرية وبصريات العينة إلى نوعين، تشمل إما مرشحات فى الخط أو رءوس المجس المتكاملة. تصميمات المرشح فى الخط تشبه المجسات غير المرشحة، لكن مع إضافة مرشحات نطاق مرور ومرشحات نطاق استبعاد إلى الألياف بالقرب من أو عند موضع العينة. رءوس المجس تشبه دائما وضع العينة الهندسي 180^{o}. وتستخدم الألياف لتوصيل الضوء من الليزر لرأس المجس ومن الرأس إلي السبيكترومتر. الشكل (57) يوضح توصيل الألياف البصرية بالسبيكترومتر والعينة.



شكل(57): يوضح توصيل الألياف البصرية بالسبيكترومتر والعينة.

المجسات المرشحة فى الخط Inline Filtered Probes

يوضح شكل (57) التصميم الملائم للمجس المرشح فى الخط بوضعين مختلفين للعينة. توضع عدسات دليل تدرج صغيرة Miniature Graded (GRIN)Lenses عند نهاية كل ليفة لتجميع الضوء، كما تستخدم مرشحات بصرية عند نهاية كل عدسة (GRIN)



شكل(58): يبين الوضعين المختلفين للمجس المرشح فى الخط G عدسة F مرشح GRIN ، M شيئية ميكروسكوب.

لاستبعاد انبعاثات الخلفية التي تنشأ عند مصدر الليزر (انبعاث البلازما) أو فى الألياف البصرية. وهذا التشكيل الهندسي يتميز بكفاءة تجميع عالية. وتعطى المرشحات المجس استبعادا ممتازا أيضا.

يستبعد انبعاث البلازما من مصدر الليزر انبعاث الخلفية لليفة، وتفلور العدسة بواسطة مرشح نطاق مرور موضوع بعد عدسة الإثارة مباشرة شكل (A). ويمنع ضوء الليزر من دخول بصريات التجميع بواسطة مرشح مرور طويل موضوع قبل عدسة التجميع مباشرة. هذا يمنع توليد رامان أو تفلور فى البصريات المجمعة والليفة. ويستخدم الترتيب B فى الشكل على وجه الخصوص فى حالة العينات المعتمة. كما يمكن استخدامه فى قياسات SER على سطح الإلكترود.

يؤدى الترشيح فى الخط إلى تخفيض الخلفية لليفة مما يساعد على ملاحظة التشتت الضعيف لليفة طولها 100 متر. وبما أن المرشحات والعدسات المدرجة (GRIN) صغيرة (أقل من 5mm فى القطر) فإنها لا تزيد الحجم الكلى للمجس. البديل لنظام الترتيب فى الخط يستخدم الألياف نفسها كمرشحات. تصنع ألياف تحتوى على أكاسيد الأرض النادرة Rare-earth Oxides، لتمتص مدى معين من الأطوال الموجية. على سبيل المثال: يمكن استخدام الطول القصير من هذه الألياف (عدة سنتيمترات) لإضعاف ضوء الليزر قبل الانتقال بين العينة والسبيكترومتر أي تخفيض خلفية الليفة فى ليفة التجميع. هذا التصميم يتفادى الفقد المزدوج فى عدسات مدرجة (GRIN) والمرشحات، ويحتفظ بقطر صغير لحزمة الألياف.

وقد تم تحسين هذا التصميم فى عام 1992م. بترشيح ألياف الإثارة وألياف التجميع بواسطة مرشحات مرور Bp ومرشحات استبعاد BR كما ذكر عاليه، لكن يشترك محور ضوء الليزر المرشح مع محور التجميع بواسطة مرآة ثنائية. المرآة تنفذ ضوء الليزر لكن تعكس ضوء إزاحة رامان أي توجهه إلي ليفة التجميع. هذا التشكيل له عدة مميزات هامة أكثر من تصميمات الترشيح فى الخط أو غير المرشحة.

معظم رءوس مجسات الألياف شائعة الاستخدام حاليا تتحد فيها محاور الإثارة والتجميع لتكوين وضع العينة الهندسي متحد المحور 180^{o}. ويجب أخذ بعض المعايير الهامة فى الاعتبار عند تقدير رءوس مجسات الألياف البصرية، مثل: الحجم الطبيعي، والاستقرار البيئي (الحرارة- الرطوبة...لخ)، ومسافة التشغيل بين رأس المجس والعينة والأطوال الموجية لليزر والحساسية لنوع العينة المعنية.

ويقدر معيار الحساسية مع العينات المطلوبة من المستخدم، حيث تؤثر خواص العينة كثيرا على الإشارة. من الأفضل عمليا مقارنة المجسات بدلالة الإشارة لكل وحدة من قدرة الليزر والزمن المستخدم (الإلكترونات لكل مللي واط

لكل ثانية[1] (e^{-} mw^{-1} sec^{-1}) لأي عينة معطاة. من الممكن عادة إرسال عينات معينة لصناع الجهاز لاختبارها برءوس مجساتهم والاسبيكترومترات، من المهم أن نعرف قدرة الليزر والزمن الذى يستخدمه المصنع عند عمل هذه المقارنات.

مميزات استخدام الألياف البصرية

العديد من مميزات الألياف البصرية كان معروفًا من قبل معرفة (CCDS) ومطياف رامان بتحويل فورير وليزرات الدايود، وإدخال الألياف البصرية فى مطيافية رامان ساهم بجزء كبير في تطوير هذه المطيافية. ونذكر فيما يلى بعض مميزات لاستخدام الألياف البصرية فى مطيافية رامان.

1 – التحليل عن بعد:

يمكن قياس أطياف رامان في البيئة غير الملائمة لحالة المطياف أي البيئة التي يمكن أن تضر المطياف مثل: العينات المشعة أو السامة أو الحارقة أو القابلة للاحتراق أو الاشتعال والانفجار. وهذه العينات يمكن قياس طيف رامان وهى بعيدة عن الجهاز حتى 300 متر وأيضا قياس أطياف العينات الموجودة في درجة حرارة عالية أو عند ضغط مرتفع، ولكن نأخذ في الاعتبار أن الإثارة تضعف عند انتقالها في الكابلات الطويلة.

2 – فحص ومراقبة الأنظمة البيولوجية الحية.

3 – التحكم في العمليات الكيميائية.