الفصل العاشر

الألياف البصرية
Optic Fibers

مقدمة عن الألياف البصرية Introduction of Optic Fibers

لقد أحدث تطوير الليزر والألياف البصرية ثورة في مجال أنظمة الاتصالات. لقد أجريت تجارب على نقل المعلومات بواسطة حملها بالموجات الضوئية عبر جو مفتوح. أثرت الظروف الجوية مثل المطر والضباب وما إلى ذلك على كفاءة الاتصال من خلال موجات الضوء.

للحصول على أنظمة اتصالات فعالة ، يجب أن تحتاج المعلومات التي تحملها الموجات الضوئية إلى وسيط موجه يمكن من خلاله نقلها بأمان. آلية التوجيه هذه هي الألياف البصرية. يُعرف الاتصال عبر الألياف البصرية باسم اتصال الموجة الضوئية أو الاتصال البصري. أن شعاع الضوء الذي يعمل كموجة حاملة قادر على حمل معلومات أكثر من موجات الراديو والميكروويف بسبب عرض النطاق الترددي الأكبر.

تُستخدم الألياف البصرية حاليًا في معظم أنحاء العالم لنقل إشارات الصوت والفيديو والبيانات الرقمية باستخدام موجات الضوء من مكان إلى مكان آخر.

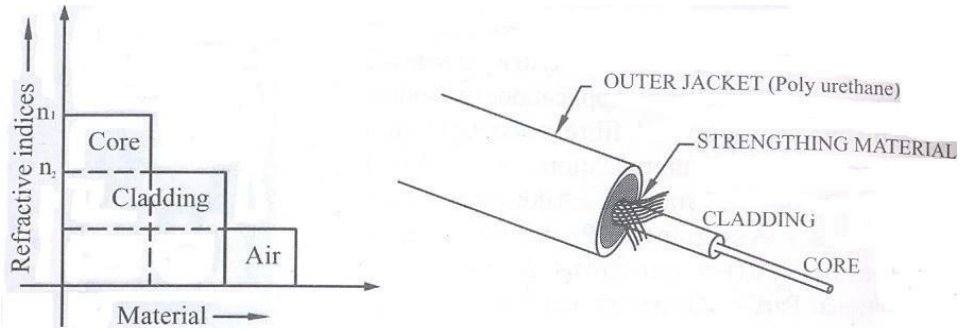
1-10 تركيب الألياف البصرية Structure of Optical Fiber

الألياف البصرية عبارة عن موجه موجي. يتكون من عوازل شفافة (SiO_2) ، (زجاج أو بلاستيك).

هيكل الألياف Fiber Construction

يتكون من أسطوانة داخلية مصنوعة من الزجاج أو البلاستيك تسمى اللب أو النواة. هذا اللب له معامل انكسار عالٍ n_1. هذا اللب محاط بقشرة أسطوانية من الزجاج أو البلاستيك تسمى الكسوة. الكسوة لها

معامل انكسار منخفض n_2. هذه الكسوة مغطاة بغلاف مصنوع من البولي يوريثين. يحمي الطبقة من الرطوبة والتآكل.

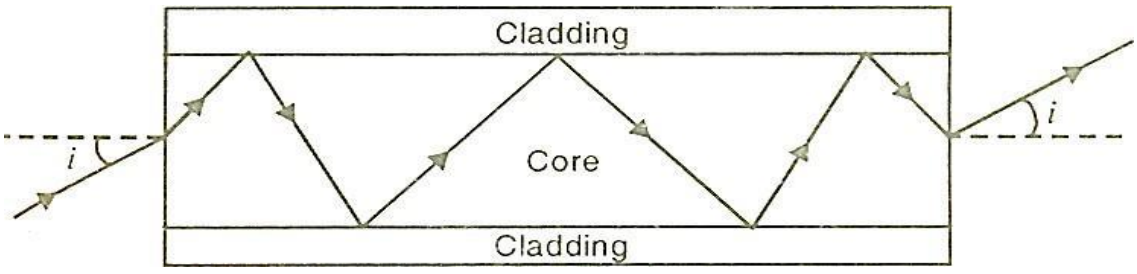


شكل (1): تركيب الألياف الضوئية

3-10 مبدأ انتشار الضوء في الألياف البصرية

Principle of propagation of light in an optical fiber

يتم إطلاق الضوء داخل اللب عند أحد طرفي الألياف و يصل إلى الطرف الآخر بسبب الانعكاس الداخلي الكلي في واجهة بين اللب والغطاء.



شكل (2): أنتشار الضوء في الليف البصري

لا يمكن أن يحدث الانعكاس الداخلي الكلي في جدار الألياف إلا إذا تم استيفاء شرطين.

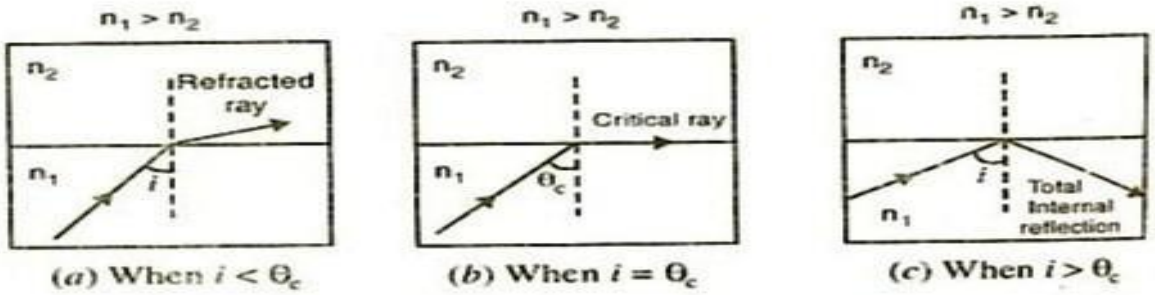
1. معامل الانكسار للمادة الأساسية n_1 أعلى من معامل الانكسار n_2 المحيط به ($n_2 < n_1$).

2. يجب أن تكون زاوية السقوط على السطح البيني بين اللب و الكسوة أكبر من الزاوية الحرجة $(\theta_i > \theta_c)$.

a) عندما $(\theta_i < \theta_c)$ أنكسره إلى وسط يكون مخلخل.

b) عندما $(\theta_i = \theta_c)$ ، فإنه يمر على طول الواجهة بحيث تكون زاوية الانكسار 90°.

c) عندما $(\theta_i > \theta_c)$ ، تنعكس تمامًا مرة أخرى في الوسط الأكثر كثافة نفسه.



شكل (3): الأختلاف في زاوية السقوط على السطح الفاصل بين اللب و الكسوة

عندما $i = \theta_c$، بموجب قانون سنيل ،

$$n_1 \, Sin \, \theta_c = n_2 \, Sin \, 90^o$$

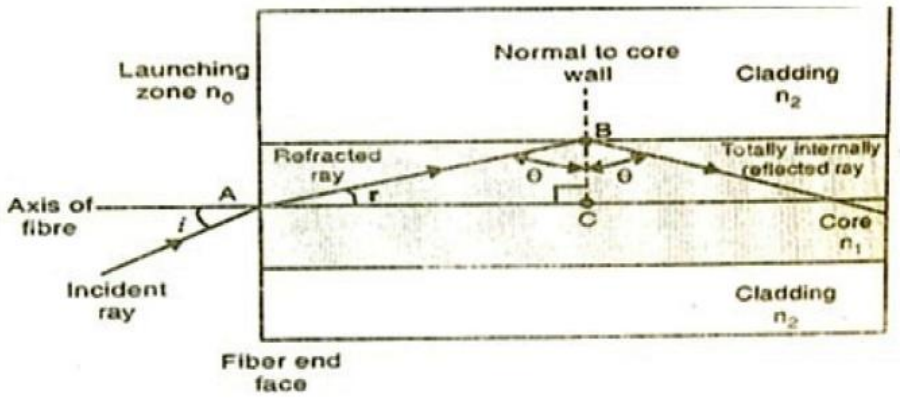
$$Sin \, \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \, Sin \, 90^o$$

4-10 انتشار الضوء في الألياف البصرية Propagation of Light in Optical Fiber

(الزاوية المقبولة و اشتقاق الفتحة العددي)

دعنا نفكر في الألياف البصري التي يتم من خلالها إرسال الضوء. دع مؤشرات الانكسار للب والكسوة تكون n_1 و n_2 على التوالي ؛ $n_1 > n_2$. اجعل معامل الانكسار للوسط الذي ينطلق منه الضوء n_0.

دع شعاع الضوء يدخل بزاوية "i" لمحور الألياف. ينكسر الشعاع على طول OB بزاوية θ في القلب كما هو موضح في الشكل.



شكل (4): أنتشار الضوء في الليف البصري

زاوية السقوط $\emptyset = (90 - \theta)$ عند واجهة اللب و الكسوة, هذه الزاوية هي أكبر من الزاوية الحرجة $\emptyset_c$ ومن ثم ينعكس الشعاع داخليًا تمامًا .

بتطبيق قانون سنيل عند نقطة دخول الشعاع (AO)

$$n_0 \sin i = n_1 \sin\theta$$

$$\sin i = \frac{n_1}{n_0} \sin\theta$$

$$\sin i = \frac{n_1}{n_0}\left(\sqrt{1 - \cos^2\theta}\right) \quad \longrightarrow (1)$$

تطبيق قانون سنيل عند النقطة B (على الواجهة)

$$n_1 \sin\phi = n_2 \sin 90^0$$

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

$$\sin(90 - \theta) = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\cos\theta = \frac{n_2}{n_1} \quad \longrightarrow (2)$$

بتعويض المعادلة (2) في المعادلة (1)

$$\sin i = \frac{n_1}{n_0}\left(\sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}\right)$$

$$\sin i = \frac{n_1}{n_0}\frac{1}{n_1}\sqrt{{n_1}^2 - {n_2}^2}$$

$$i = \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{{n_1}^2 - {n_2}^2}}{n_0}\right)$$

إذا كان معامل انكسار الهواء $n_0 = 1$ فإن القيمة القصوى لـ $Sin\ i_m$ يعطى كـ

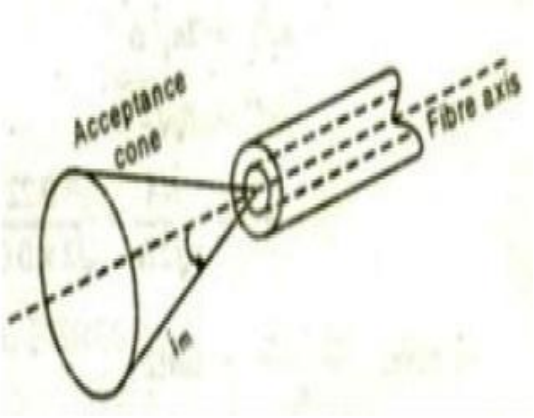
$$\sin i_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \longrightarrow (3)$$

5-10 زاوية القبول Acceptance Angle

التعريف: تُعرَّف زاوية القبول بأنها الزاوية القصوى التي يمكن أن يمتلكها شعاع ضوئي بالنسبة لمحور الألياف وينتشر داخل الألياف. أو الزاوية القصوى التي يمكن للضوء أن يعاني عندها من انعكاس داخلي كلي يسمى زاوية القبول.

مخروط القبول Acceptance cone

يُشار إلى مخروط الأشعة الذي تقبله الألياف ليكون له انعكاس داخلي كامل داخل الألياف بمخروط القبول. الأشعة الضوئية الموجودة داخل المخروط بزاوية كاملة i_m وتنتقل على طول الألياف. لذلك ، يسمى المخروط بمخروط القبول. الضوء الساقط بزاوية تتجاوز i_m , خلال الكسوة تضيع الطاقة الضوئية المقابلة. من الواضح أنه كلما زاد قطر اللب ، زادت زاوية القبول.



شكل (5): مخروط القبول

6-10 الكورة العددية Numerical Aperture

التعريف: الكورة العددية *(NA)* هي قدرة تجميع الضوء للألياف ، والتي تعتمد على زاوية القبول. يتم تعريفه أيضًا على أنه جيب زاوية قبول الألياف.

تحدد الكورة العددية قدرة الألياف على تجميع الضوء.

$$NA = \sin i_{max}$$

$$NA = \sin i_{max} = \sqrt{n_1{}^2 - n_2{}^2\ )} \quad \longrightarrow (4)$$

7-10 تغيير المؤشر الكسري Fractional Index Change

هو نسبة بين فرق معامل الانكسار في اللب والكسوة إلى معامل الانكسار اللب.

$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad \longrightarrow (5)$$

Relation between NA and Δ

$$n_1\Delta = n_1 - n_2 \quad \longrightarrow (6)$$

$$NA = \sqrt{n_1{}^2 - n_2{}^2}$$

$$NA = \sqrt{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)} \quad \longrightarrow (7)$$

$$NA = \sqrt{(n_1 + n_2)n_1\Delta}$$

If $n_1 \approx n_2$

$$NA = \sqrt{2n_1{}^2\Delta}$$

$$NA = n_1\sqrt{2\Delta} \quad \longrightarrow (8)$$

تعطي المعادلة أعلاه العلاقة بين الكورة العددية وتغير معامل أنكسار للألياف البصري.

8-10 أنواع الألياف الضوئية المستندة إلى أنماط المواد و معاملات الانكسار.

Types of Optical Fibers Based on Materials Modes and Refracive Indices

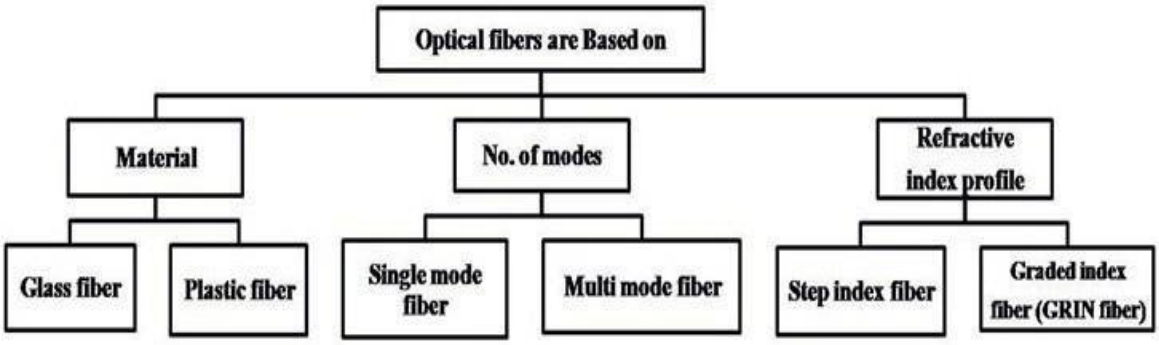
يتم تصنيف الألياف البصرية إلى ثلاث فئات رئيسية حسب:

أولا. نوع المادة المستخدمة

ثانيا. عدد الأنماط

ثالثا. معامل الانكسار.

الزجاج والألياف البلاستيكية



بناءً على نوع المادة المستخدمة ، يتم تصنيف الألياف إلى نوعين على النحو التالي:

الألياف الزجاجية: إذا كانت الألياف البصرية مكونة من خليط من زجاج السيليكا وأكاسيد المعادن ، فإنها تسمى الألياف الزجاجية .

مثال: (1) اللب *Core* : GeO_2 -SiO_2

الكسوة *Cladding* SiO_2

(2) اللب *Core* : SiO_2

الكسوة *Cladding* P_2O_3 - SiO_2

الألياف البلاستيكية: إذا كانت الألياف البصري مكونة من البلاستيك ، فإنها تسمى الألياف البلاستيكية .

مثال: (1) اللب *Core*: بولي ميثيل مينثا كريلات *Poly methyl mentha crylate*

الكسوة *Cladding*: بوليمر *Co- Polymer*

(2) اللب *Core* : البوليسترين *Polystyrene:*

الكسوة *Cladding*: ميثيل مينثا كريلات *Methyl mentha crylate*

8-10 ألياف أحادية ومتعددة الأنماط *Single and Multi Mode Fibers*

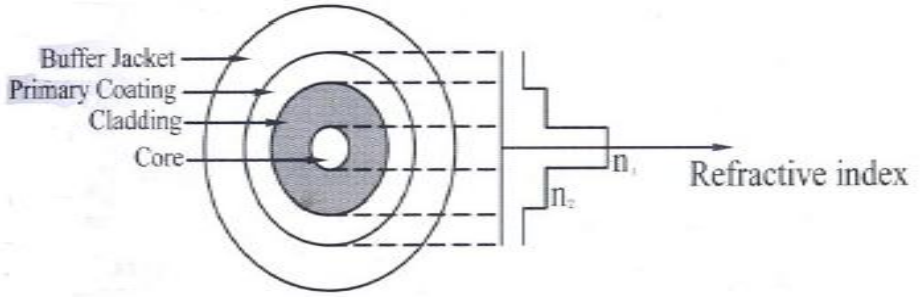
حسب عدد أنماط الانتشار ، يتم تصنيف الألياف الصرية إلى نوعين, فيتم تصنيفها على أنها:

(1) ألياف أحادية النمط و (2) ألياف متعددة الأنماط.

(1) الألياف أحادية النمط

إذا تم نقل نمط واحد فقط عبر الألياف البصرية ، فإن الألياف البصري تسمى الألياف أحادية النمط.
بشكل عام ، الألياف أحادية النمط هي ألياف مؤشر متدرج. هذه الأنواع من الألياف مصنوعة من السيليكا المشوب doped silica. لها قطر اللب أو نواة صغير جدًا بحيث يمكن أن تسمح فقط بنمط واحد من الانتشار ومن ثم تسمى الألياف أحادية النمط.

يجب أن يكون قطر الكسوة كبيرًا جدًا مقارنة بقطر اللب. وبالتالي في حالة الألياف أحادية النمط ، يتم تقليل الفقد البصري إلى حد كبير. هيكل الألياف أحادية النمط كما هو موضح في الشكل.



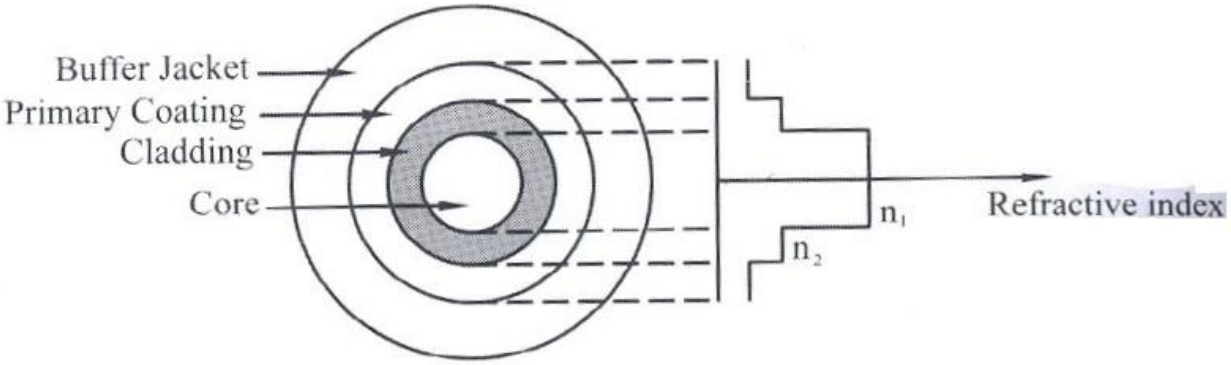
شكل (6): تركيب الألياف الاحادية النمط

عرض النطاق: أكثر من 50 ميجا هرتز كم.
التطبيق: بسبب النطاق الترددي العالي ، يتم استخدامها في أنظمة الاتصالات طويلة المدى.

(2). الألياف متعددة الأنماط: إذا تم إرسال أكثر من نمط عبر الألياف البصرية ، لذا فإن الألياف البصرية تسمى الألياف متعددة الأنماط.

تعد الألياف متعددة الأنماط مفيدة في تصنيع كل من ألياف المؤشر المتدرج والألياف المتدرجة. يتم تصنيع الألياف متعددة الأنماط بواسطة مركبات زجاجية متعددة المكونات مثل الزجاج - الزجاج المكسو بالزجاج ، السيليكا - المكسو - السيليكا ، السيليكا المشوبة وما إلى ذلك, و هي سائط يمكن ان تمر من خلالها الأنماط و لذا تسمى ألياف الأنماط المتعدد.

قطر الكسوة أكبر أيضًا من قطر الألياف أحادية النمط. هيكل الألياف متعددة الأنماط كما هو موضح في الشكل.



شكل (6): تركيب الألياف متعددة الأنماط

عرض النطاق: أقل من 50 ميجا هرتز.

التطبيق: نظرًا لقلة عرض النطاق ، فهو مفيد جدًا في أنظمة الاتصالات قصيرة المدى.

9-10 مؤشر الخطوة والألياف المتدرجة Step Index and Graded Index Fibre (GRIN)

بناءً على التباين في معامل الانكسار للنواة والكسوة ، يتم تصنيف الألياف الضوئية إلى نوعين:

(1) ألياف مؤشر الخطوة و (2) ألياف مؤشر متدرج.

(1) ألياف مؤشر الخطوة Step-index fiber

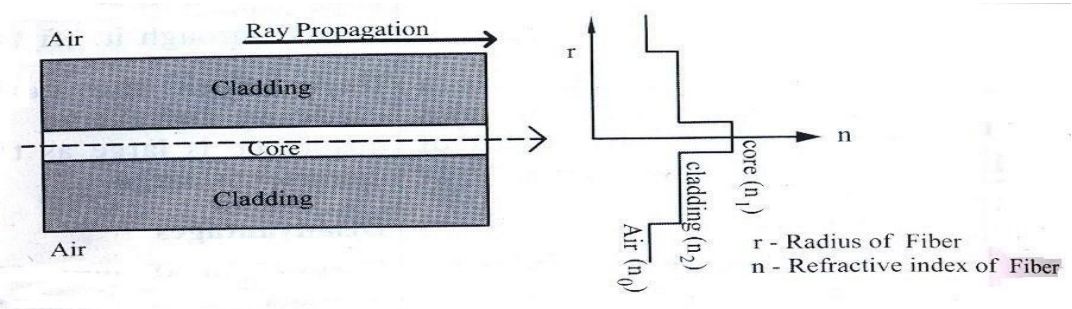
هي الألياف المتدرجة ، يختلف التباين في مؤشرات الانكسار للهواء والكسوة واللب خطوة بخطوة.
ومن ثم ، يُعرف هذا النوع من الألياف بالألياف ذات المؤشر التدريجي.

استنادًا إلى مؤشر الانكسار وعدد الأنماط ، يتم تصنيف مؤشر الألياف إلى نوعين ،

(أ) مؤشر الخطوة - الألياف أحادية النمط (ب) مؤشر الخطوة - الألياف متعددة الأنماط.

(أ) ليف مؤشر الخطوة النمط المنفرد Single Mode Step Index Fiber

في خطوة النمط الواحدة يتكون مؤشر الألياف من لب رقيق جدًا ذو معامل انكسار منتظم و محاطة بكسوة من معامل انكسار أقل من اللب. يتغير معامل الانكسار فجأة عند حدود الكسوة الأساسية. ينتقل الضوء على طول مسار جانبي ، أي على طول المحور فقط.

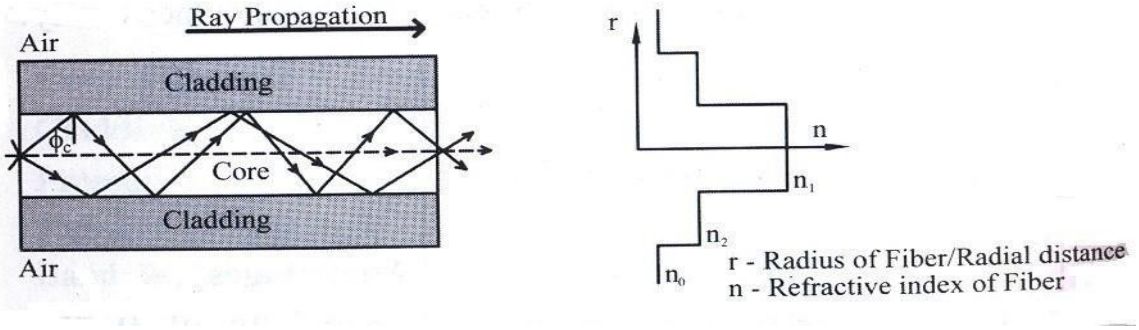


شكل (7): لبف مؤشر الخطوة النمط المنفرد

(ب) مؤشر الخطوة - الألياف متعددة الأنماط. Multimode Step Index Fiber

يتكون ليف مؤشر الخطوة متعدد الأنماط من لب ذو معامل انكسار منتظم محاط بكسوة من معامل انكسار أقل من اللب. يتغير معامل الانكسار فجأة عند حدود الكسوة الأساسية.

اللب ذو قطر كبير. يتبع الضوء مسارات متعرجة داخل الألياف. يُسمح بالعديد من مسارات الانتشار المتعرجة



شكل (8): لبف مؤشر الخطوة الأنماط المتعددة

في الألياف متعددة الأوضاع. الفتحة العددية للألياف متعددة الأوضاع أكبر نظرًا لأن قطر اللب أكبر.

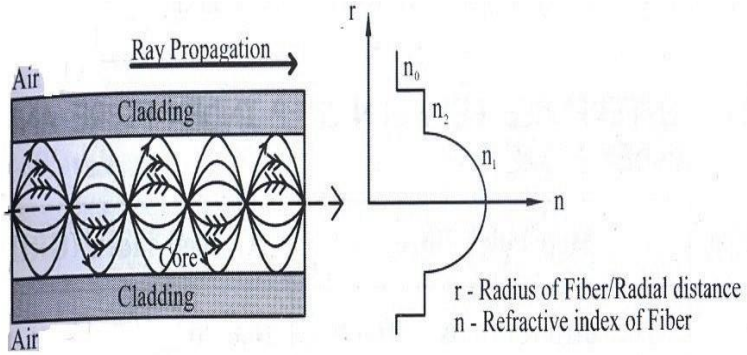
(2) ألياف المؤشر المتدرج Graded Index Fiber

هي تلك التي يختلف فيها معامل الانكسار شعاعيًا ، ويتناقص باستمرار بطريقة مكافئة من القيمة القصوى ل n_1، في مركز اللب إلى قيمة ثابتة n_2 في واجهة الكسوة الأساسية.

في الألياف ذات المؤشر المتدرج ، تنتقل أشعة الضوء بسرعات مختلفة في أجزاء مختلفة من الألياف لأن معامل الانكسار يختلف في جميع أنحاء الألياف. بالقرب من الحافة الخارجية ، يكون معامل الانكسار أقل. نتيجة لذلك

، تنتقل الأشعة القريبة من الحافة الخارجية أسرع من الأشعة الموجودة في مركز القلب. وبسبب هذا ، تصل الأشعة إلى نهاية الألياف في نفس الوقت تقريبًا.

في الواقع ، تصل أشعة الضوء إلى نهاية الألياف ويتم إعادة تركيزها باستمرار أثناء انتقالها عبر الألياف. تستغرق جميع الأشعة نفس القدر من الوقت في عبور الألياف. هذا يؤدي إلى تشتت النبضات الصغيرة.



شكل (10): الألياف المؤشر المتدرج

10-10 الخسائر في الألياف البصرية Losses in Optical Fibers

عندما ينتشر الضوء عبر الألياف البصرية ، تُفقد نسبة صغيرة من الضوء من خلال آليات مختلفة. يقاس فقدان القدرة الضوئية بواسطة ديسيبل لكل كيلومتر لخسائر التوهين.

التوهين Attenuation : يتم تعريفه على أنه نسبة خرج الطاقة الضوئية (P_{out}) من ألياف بطول "**L**" إلى دخل الطاقة (P_{in})

بالتوهين (α)

$$(\alpha) = \frac{-10}{L} \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad dB/Km$$

نظرًا لأن التوهين يلعب دورًا رئيسيًا في تحديد مسافة الإرسال ، يجب مراعاة آليات التوهين التالية عند تصميم الألياف البصرية.

1. الامتصاص Absorption

عادةً ما يحدث امتصاص الضوء بسبب عيوب في التركيب الذري مثل الجزيئات المفقودة وأيونات الهيدروكسيد (OH^-) ومجموعة الذرات عالية الكثافة وما إلى ذلك ، والتي تمتص الضوء.

2. التشتت **Scattering**

هو أيضًا خسارة تعتمد على الطول الموجي ، والتي تحدث داخل الألياف. نظرًا لاستخدام الزجاج في تصنيع الألياف ، فالتركيب غير المنتظم للزجاج سيحدث بعض الاختلافات في معامل الانكسار داخل الألياف. نتيجة لذلك ، إذا تم تمرير الضوء من خلال الذرات الموجودة في الألياف ، فإن جزءًا من الضوء يتناثر (تشتت مرن) وهذا النوع من التشتت يسمى تشتت رالي.

خسائر تشتت رالي

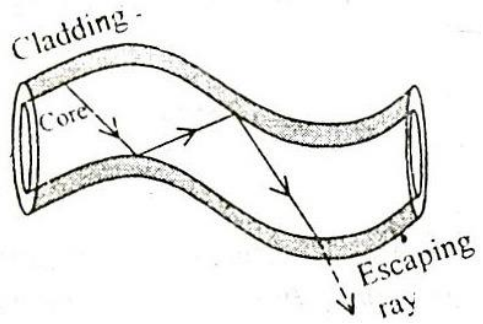
$$\text{Raleigh scattering loss} \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

3. الخسائر الإشعاعي أو خسائر الانحناء **Radiative loss or bending loss**

يحدث الخسارة الإشعاعية في الألياف بسبب ثني نصف قطر محدود للانحناء في الألياف الضوئية. أنواع الانحناءات هي: أ. الانحناءات العيانية ب.الانحناءات المجهرية.

أ. الانحناءات العيانية Macroscopic bends .

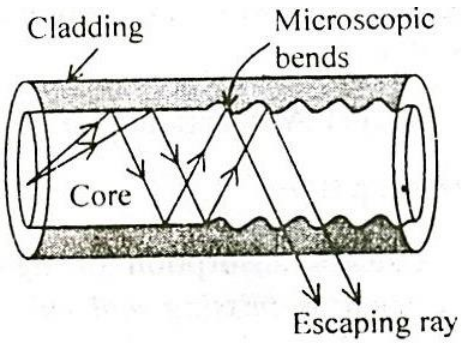
إذا كان نصف قطر اللب كبيرًا مقارنة بقطر الألياف ، فقد يتسبب ذلك في حدوث انحناء كبير في الموضع الذي يتحول فيه كابل الألياف عند الزاوية. في هذه الزوايا ، لن يفي الضوء بشرط الانعكاس الداخلي الكلي وبالتالي يخرج من الألياف. وهذا ما يسمى خسائر الانحناء العيانية / الكلية. لاحظ أيضًا أن هذه الخسارة لا تذكر في الانحناءات الصغيرة.



شكل (1): تركيب الألياف الضوئية

ب. الانحناءات المجهرية Microscopic bends

تحدث خسائر الانحناءات الدقيقة بسبب عدم الانتظام أو الانحناءات الدقيقة داخل الألياف كما هو موضح في الشكل. تظهر هذه الانحناءات الدقيقة في الألياف بسبب الضغوط غير المنتظمة التي تنشأ أثناء توصيل كابلات الألياف أو حتى أثناء التصنيع نفسه. هذا يؤدي إلى فقدان الضوء عن طريق التسرب عبر الألياف.



شكل (1): تركيب الألياف الضوئية

العلاج: يمكن التقليل من خسائر الانحناء الصغير عن طريق بثق extruding (الضغط للخارج) بغلاف قابل للضغط فوق الألياف. في مثل هذه الحالات ، حتى عندما يتم تطبيق القوى الخارجية ، فإن الغلاف سوف يتشوه ولكن الألياف ستبقى مستقيمة وآمنة نسبيًا ، دون التسبب في مزيد من الخسائر.