



نظم الاتصالات البصرية

Fiber Optic Communication Systmes





منشورات جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

هندسة الإلكترونيات والاتصالات

نظم الاتصالات البصرية

Fiber Optic Communication Systems

إعداد

الدكتور المهندس

وهبة معمر

الدكتور المهندس

محمد الحسين

1435 - 1434 هـ

2014 - 2013 م

جامعة دمشق



فهرس المحتويات

الصفحة	الموضوع
5	فهرس المحتويات
11	المقدمة
13	الفصل الأول أنظمة الاتصالات بالألياف البصرية
13	1 - 1 نظرة تاريخية
15	2 - 1 نظام اتصالات ليفي
21	3 - 1 ميزات الألياف البصرية
26	4 - 1 حساب سويات القدرة
30	5 - 1 طبيعة الضوء والتصنيف الترددي
33	6 - 1 بعض أجيال أنظمة الاتصالات البصرية
35	7 - 1 تطبيقات الاتصالات بالألياف البصرية
39	الفصل الثاني محددات الليف البصري
39	2 - 1 مقدمة
42	2 - 2 البنية النموذجية لليف البصري
43	3 - 2 فتحة النفوذ العددي
47	4 - 2 أدلة انكسار الضوء في الليف البصري
48	5 - 2 التخماد
49	6 - 2 النماذج في الألياف البصرية
51	7 - 2 تصنيف الألياف البصرية
52	1 - 7 - 2 الليف ذو الدليل الدرجي

137	الموصلات الألياف البصرية والموزعات	الفصل السادس
137	1 - 6 وصلات الألياف البصرية	
138	1 - 1 - 6 الوصلات الدائمة	
140	2 - 1 - 6 الوصلات القابلة للفك	
144	2 - 6 ضياعات الطاقة في وصلات الاتصالات البصرية	
144	1 - 2 - 6 الضياعات الداخلية	
148	2 - 2 - 6 الضياعات الخارجية	
154	3 - 2 - 6 ضياعات الانعكاس	
155	3 - 6 الموزعات البصرية	
159	4 - 6 المفاتيح	
161	5 - 6 تجميع التقسيم حسب طول الموجة	
163	منابع الضوء	الفصل السابع
164	1 - 7 الثنائيات الباعثة للضوء LED	
168	1 - 1 - 7 ثنائيات LED السطحية	
169	2 - 1 - 7 ثنائيات LED ذات حواف باعثة	
169	3 - 1 - 7 خواص العمل للثنائي الباعث للضوء	
175	2 - 7 ثنائيات الليزر LD	
183	الكواشف البصرية	الفصل الثامن
183	1 - 8 مقدمة عامة	
189	2 - 8 أنواع الكواشف البصرية	
189	1 - 2 - 8 ثنائي من نوع PN	
190	2 - 2 - 8 ثنائي بصري من نوع P-I-N	

193	الثلاثي البصري الجرفي APD	3 - 2 - 8
196	الترانزستورات البصرية	4 - 2 - 8
197	الضجيج والكشف	3 - 8
198	نسبة الإشارة إلى الضجيج	1 - 3 - 8
204	الضجيج الفائض للثلاثي البصري الجرفي	2 - 3 - 8
205	القدرة المكافئة للضجيج	3 - 3 - 8
208	معدلات الخطأ	4 - 8
209	معدل الخطأ المحدود بالضجيج الحراري	1 - 4 - 8
215	تصميم أنظمة الاتصالات البصرية	الفصل التاسع
215	اختيار المكونات	1 - 9
216	المثبع الضوئي	1 - 1 - 9
218	الليف البصري	2 - 1 - 9
220	الكبل البصري	3 - 1 - 9
220	الكاشف البصري	4 - 1 - 9
221	ميزانية الخط البصري	2 - 9
223	إجراءات التصميم	3 - 9
228	المكونات الخاملة	4 - 9
230	المكونات الفعالة	5 - 9
237	القياسات والمحوصات في أنظمة الاتصالات البصرية	الفصل العاشر
237	القياسات باستخدام جهاز القدرة	1 - 10
240	فقد وصلات القياس	2 - 10

مستمكن هذه التقنيات المعروضة في هذا الكتاب تقويم أجهزة الاستقبال وأجهزة الإرسال وخطوط النقل.

كلمة أخيرة نتمنى أن نكون بهذا الكتاب قدما لبنة أساسية تخدم مجال الاتصالات ليخدم كأساس مقرر الاتصالات البصرية لطلاب السنة الخامسة في قسم الإلكترونيات والاتصالات.

المؤلفان



الفصل الأول

أنظمة الاتصالات بالألياف البصرية

Fiber Optic Communication Systems

مقدمة

نعرف في هذا الفصل موضوع الاتصالات بالألياف البصرية، ونعرض للمزايا العديدة بالمقارنة مع التقنيات البديلة، ونناقش التطبيقات المهمة.

تعد الاتصالات البصرية من أحدث طرق الاتصالات حيث تم تحقيقها بعد اختراع الليزر *Laser* والألياف البصرية *Optical Fiber*. ويمكن أن يعد عام 1970 بداية لظهور الاتصالات البصرية عملياً. ومنذ عام 1975 أخذت تقانة الاتصالات التي تستخدم الأمواج الضوئية تتقدم بكل المقاييس وبسرعة كبيرة. وقد تطورت هذه التقانة نتيجة الجهد المتواصل لعلماء ومهندسين قاموا بابتكار نظم قادرة على نقل معلومات أكثر، وبسرعة أعلى، وعبر مسافات أطول.

1 - 1 نظرة تاريخية

الضوء دائماً معناه فقد حدثت الاتصالات بوساطة الضوء منذ بداية نشوء الكون والخلقة عندما استعمل الإنسان الإشارات اليدوية في اتصالاته، ويبدو بوضوح أن هذا شكل من أشكال الاتصالات البصرية، ولا يتم هذا في الظلام بل في وضوح النهار حيث تكون الشمس في هذا النظام مصدر الضوء، ويتم حمل المعلومات من المرسل إلى المستقبل على إشعاع الشمس. تعمل حركة اليد في تعديل الضوء، وتكون العين أداة كشف الرسالة فيقوم الدماغ بمعالجتها.

يكون نقل المعلومات في نظام كهذا بطيئاً، ومسافة الانتشار محدودة، وفرص حدوث الخطأ كبيرة. وفي نظام بصري أحدث مفيد من أجل مسافات انتشار أطول كانت الإشارة الدخالية. كانت الرسالة تبعث بواسطة تغيير نمط الدخان الصاعد من النار فينتقل هذا التغير إلى الجهة المستقبلية بواسطة ضوء الشمس. تتطلب هذا النظام وضع طريقة ترميز وتعليمها للمرسل والمستقبل الرسالة. يمكن مقارنة هذه الطريقة بأنظمة رقمية حديثة تستخدم ترميزاً نبضياً.

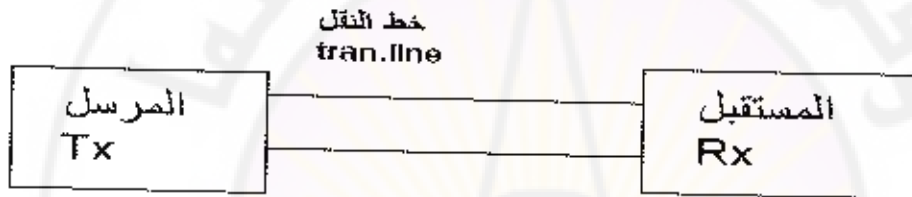
في عام 1880 اخترع العالم *Alexander Graham Bell* نظام اتصالات ضوئي وهو الفونوفون *Photo Phone*، فقد استخدم ضوء الشمس المنعكس عن مرآة رقيقة معدنة صوتياً لتحمل حديثاً وفي جهة المستقبل أسقط ضوء الشمس المعدل على خلية توصيل ضوئية نوع سيلينيوم حيث حولت هذه الخلية الرسالة إلى تيار كهربائي، وقد أكمل هذا النظام بواسطة مستقبل هاتفي مع أن هذا النظام قد عمل بشكل جيد إلا أنه لم يحقق. سمح اختراع المصابيح ببناء نظم اتصالات بصرية بسيطة مثل الأضواء الوامضة من أجل الاتصال بين سفينة وسفينة وشاطئ وسفينة. وكذلك الأضواء الدوارة في السيارات وأضواء المرور. وفي الحقيقة يعتبر أي نوع من مصابيح الإشارة بشكل أساسي نظام اتصالات بصرية.

تتصف جميع الأنظمة الموصوفة سابقاً بسعة معلومات صغيرة. إن التقدم المفاجئ الرئيسي الذي قاد إلى اتصالات بصرية عالية السعة كان اختراع الليزر الذي يلي أول نظام له عام 1960. قدم الليزر منبعاً ذا حزمة ضيقة من الإشعاعات البصرية المناسبة لاستعمالها حاملاً للمعلومات. يمكن مقارنة الليزر بمذاع التردد الراديوي المستعملة في الاتصالات الإلكترونية التقليدية، وقد طورت أنظمة الاتصالات البصرية غير الموجهة (بدون ليف) بعد فترة قصيرة من اكتشاف الليزر. وأنجزت بسهولة الاتصالات بواسطة حزم ضوئية تنتشر في الجو. من مساوئ هذه الأنظمة اعتمادها على صفاء الجو وحاجتها إلى ممر خط نظر بين المرسل والمستقبل، وكذلك إمكانية حدوث أذى لعين الشخص الذي قد ينظر إلى الحزمة بدون معرفة منه. ومع أن استعمال هذه الأنظمة كان محدوداً، فإن التطبيقات الأولى لها أدت إلى الاهتمام

بالأنظمة البصرية التي توجه الحزمة الضوئية وتتغلب على السببات المذكورة. لقد قدم العمل الأولي عن أنظمة الليزر الجوية الكثير عن النظرية الأساسية والعديد من المكونات الفعلية المطلوبة للاتصالات بواسطة الألياف.

2 - 1 نظام اتصالات بصري

يتألف نظام الاتصالات الأساسي كما هو معروف من ثلاثة عناصر أساسية وهي: المرسل *Transmitter*، والمستقبل *Receiver*، وقناة المعلومات *The Information Channel*، التي هنا بمنزلة خط النقل *Transmission Line*.



الشكل (1-1)

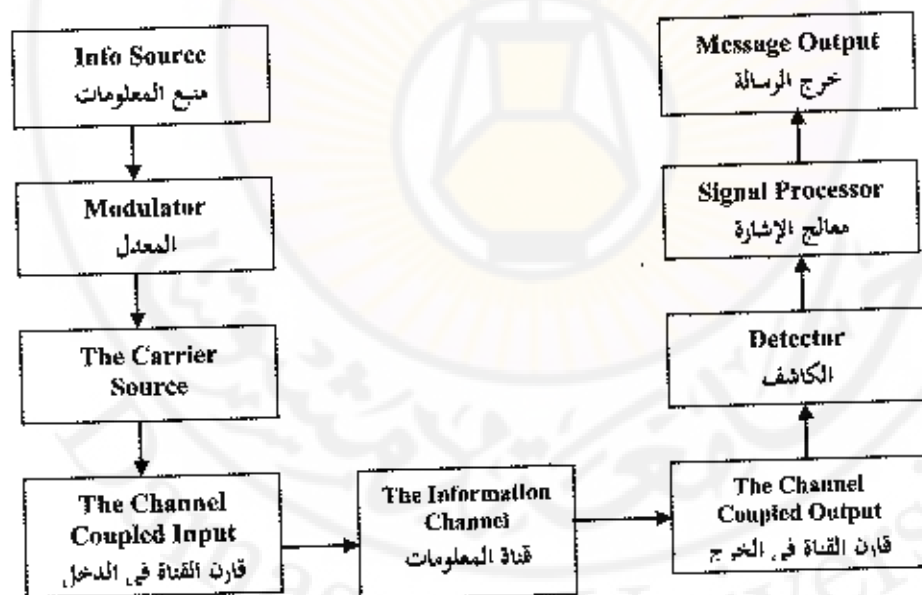
يتم توليد الرسالة عند مرحلة المرسل وتحويلها إلى شكل مناسب من أجل النقل خلال قناة المعلومات، حيث تنتشر المعلومات من المرسل إلى المستقبل خلال هذه القناة. يمكن تقسيم أقدية المعلومات إلى فئتين: أقدية موجهة وأقدية غير موجهة. بعد الجو مثالاً عن قناة غير موجهة حيث يمكن أن تنتشر حولها الأمواج الكهرومغناطيسية. تشمل الأنظمة التي تستعمل أقدية جوية أنظمة الاتصالات الراديوية والتلفزيونية ووصلات الموجات الميكروية. وتكضمن الأقدية الموجهة العديد من بنى إرسال ناقلة منها: الخط ذو السلكين والكابل المحوري ونليل الموجة المستطيل.



الشكل (2-1)

تكلف الخطوط الموجهة في تصنيفها وتركيبها وتخدمها أكثر مما تكلفه الأتنية الجوية، وتتميز الأتنية الموجهة بسرعتها وعدم اعتمادها على الطقس، وبقابلية نقل الرسائل ضمن وتحت وحول بنى فيزيائية. تتمتع أدلة الموجة الليفية بهذه المزايا وبغيرها أيضاً يجري في جهة المستقبل استخلاص الرسالة من قناة المعلومات ويتم وصفها في شكلها النهائي.

يبين الشكل (3-1) مخططاً إجمالياً لنظام الاتصالات بشكل عام حيث يعطينا فكرة جيدة عن العناصر الرئيسية لنظام اتصالات. حيث يبين هذا الوصف ما هو مناسب من أجل الأنظمة الليفية مع أن المخطط نفسه يمكن تطبيقه في أنواع أخرى من وصلات الاتصالات.

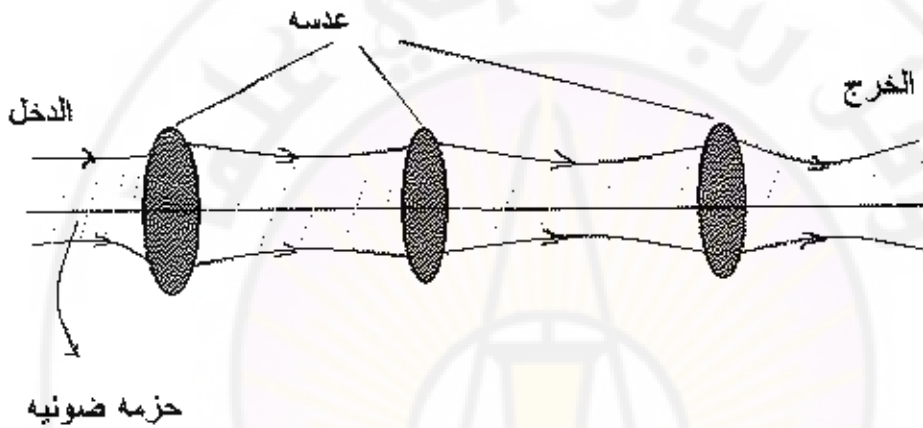


الشكل (3-1)

يمكن أن تكون المعلومات الناشئة عن المنبع بعدة أشكال فيزيائية، ويقوم المبدل بتحويل الرسالة غير الكهربائية إلى إشارة كهربائية، على سبيل المثال يقوم الميكروفون بتحويل الأمواج الصوتية إلى تيارات كهربائية، وكذلك كاميرات التلفزيون تقوم بتحويل الصور إلى تيارات كهربائية أيضاً. تتضمن الأمثلة الألياف المستعملة في الجزء الأرضي من نظام اتصالات فضائية، وكذلك الألياف المستعملة في الإشارات التلفزيونية لكابلات الربط. وفي أي حال يجب أن تكون المعلومات بالشكل الكهربائي قبل إرسالها سواء بالاتصالات الإلكترونية أو بالاتصالات البصرية. يؤدي المعدل وظيفتين رئيسيتين: أولاً يحول الرسالة الكهربائية إلى الصيغة المناسبة وثانياً يحمل الإشارة على موجة مولدة بوساطة منبع الإشارة الحاملة، يوجد نوعان مميزان من صيغ التعديل وهما التعديل التماثلي والتعديل الرقمي. عند تحميل إشارة رقمية على حامل يحتاج المعدل فقط أن يجعل المنبع في حالة وصل أو قطع في أوقات مناسبة. إن سهولة بناء معدلات رقمية يجعل هذه الصيغة جذابة جداً لأجل الأنظمة الليفية. يولد منبع الموجة الحاملة الموجة التي تنقل عليها المعلومات حيث يتم إنتاج هذه الموجة بوساطة مذبذب (مهتز) إلكتروني في أنظمة الاتصالات الراديوية. أما من أجل أنظمة الألياف البصرية يستعمل ثنائي ليزر (LD) $Laser Diode$ أو ثنائي باعث للضوء (LED) $Light Emmitting Diode$ حيث يمكن تسمية هذين الجهازين ($LD-LED$) بالمذبذبات البصرية. إن ثنائيات الليزر والثنائيات الباعثة للضوء صغيرة وخفيفة تستهلك كميات صغيرة من القدرة، ويتمتع نسبياً بسهولة التعديل أي تحميل المعلومات على إشعاعاتها. يعمل كل من هذين الجهازين بوساطة تمرير تيار كهربائي فيه. ويمكن جعل كمية القدرة التي يشعها الجهاز تتناسب مع هذا التيار، وبهذه الطريقة تأخذ قدرة الخرج البصرية شكل تيار الدخل القادم من المعدل. يجب أن نوضح أن التغيرات في القدرة البصرية تحتوي على المعلومات المرسلّة، ويسمى هذا التعديل بتعديل الشدة IM .

يحتاج ثنائي الليزر إلى تيار عتبة محدد حتى يبدأ بالإشعاع بينما الثنائي الباعث للضوء لا يحتاج إلى أية عتبة حيث يدخل في حالة العمل حالما يتدفق فيه تيار موجب. تصنع

ثنائيات الليزر LD والثنائيات الباعثة للضوء LED بحيث إنها تشع عند ترددات تكون عندها الألياف الزجاجية مرسلات فعالة للضوء أي حيث يكون تخميد الألياف *Attenuation* ضعيفاً. يكون قارن القناة في الأنظمة الراديوية عبارة عن هوائي *Antenna* أما من أجل نظام بصري جوي يكون قارن القناة عدسة تستعمل لتسديد ضوء المبع وتوجيهه متوازياً نحو المستقبل كما هو موضح في الشكل (4-1).



الشكل (4-1)

أما في الاتصالات البصرية يجب أن ينقل القارن بشكل فعال حزمة الضوء المعدل من المنبع إلى الليف البصري. ليس من السهل إنجاز هذا النقل من غير انخفاض كبير نسبياً في القدرة، أو استعمال وسائل اقتران معقدة التصميم إلى حد ما. وتظهر إحدى الصعوبات بسبب صغر حجم الألياف المعروفة إذ تبلغ أقطارها بحدود $50[\mu m]$. على أي حال تحدث الخسارة الكبيرة بشكل أساسي لأن منابع الضوء تبعث ضوءها على امتداد زوايا كبير بينما يمكن للألياف فقط أن تلتقط الضوء ضمن زوايا أكثر تحديداً الشكل (5-1).

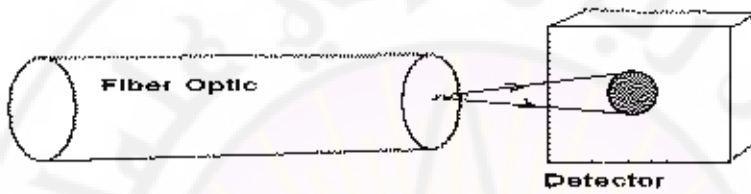


الشكل (5-1)

تشير قناة المعلومات إلى المسار بين المرسل والمستقبل ففي الاتصالات بالألياف البصرية يكون الليف الزجاجي (أو البلاستيكي) هو القناة. تتضمن الخواص المرغوبة لقناة المعلومات تخميداً ضعيفاً وزاوية مخروط قبول ضوئي كبيرة. إن التخميد الضعيف وتجميع الضوء الفعال ضروريان عملياً من أجل الإرسال لمسافات طويلة. ومع أنه تتوفر مستقبلات حساسة جداً فإن القدرة المسلمة إلى المستقبل يجب أن تتجاوز قيمة ما محددة من أجل الحصول على الرسالة المرغوبة بوضوح مناسب. هناك خصيصة أخرى مهمة لقناة المعلومات وهي زمن انتشار الأمواج خلالها، وبصورة عامة يعتمد زمن الانتشار على تردد الضوء وعلى المسار الذي تأخذه الأشعة الضوئية. تحتوي عادة الإشارة المنتشرة في الليف مجموعة من الترددات الضوئية وذلك لأن المصادر الضوئية تبعث بمجموعة من الترددات، وتوزع قدرتها على عدة مميزات للأشعة، ويؤدي هذا إلى تشوه الإشارة المنتشرة.

إن المتطلبات متناقضة من أجل زاوية قبول ضوئية كبيرة وتشوه إشارة منخفض تمثل الألياف العملية حلاً وسطاً بين هاتين النوعيتين. من أجل أنظمة ذات طول خطوط ومعدل معلومات متواضع يمكن الحصول على ألياف بقيم مناسبة من زاوية القبول وتشوه الإشارة.

في نظام اتصالات إلكتروني جوي يجمع الهوائي الإشارة من قناة المعلومات ويوجهها نحو المستقبل. أما في الأنظمة الليفية يوجه قارئ القناة (في الخرج) الضوء المنبثق من الليف نحو كاشف الضوء، ويشع هذا الضوء بنمط مماثل لمخروط قبول الليف، وحيث إن الكواشف الضوئية الشائعة ذات مساحة سطح كبيرة وزاوية قبول واسعة، فإنه يتم بشكل فعال استخلاص الضوء من الليف بواسطة طرف اتصال بسيط الشكل (1-6).



الشكل (1-6)

يمكن للمعلومات المرسل أن تستخلص من الموجة الحاملة في النظم الإلكترونية. تدعى هذه العملية لكشف التعديل (إزالة التعديل) *Demodulation*. وفي النظم البصرية يتم تحويل الموجة الضوئية إلى تيار كهربائي بواسطة كاشف ضوئي *Photodiode*. تستعمل حالياً بشكل شائع ثنائيات ضوئية من أنصاف النواقل من مختلف التصاميم. ويتناسب التيار الناتج في هذه الكواشف مع قدرة الموجة الضوئية (البصرية) الواردة. وحيث إن تغيرات القدرة البصرية تحتوي على المعلومات المرغوبة فإن تيار خرج الكاشف يحتوي على هذه المعلومات وهذا التيار يمثل للتيار المستعمل في قيادة متبع الموجة الحاملة.

تشمل المميزات المهمة للكواشف الضوئية الحجم الصغير، والاقتصادية، والعمر الطويل، واستهلاك قدرة منخفض، وحساسية عالية للإشارات البصرية، واستجابة سريعة للتغيرات السريعة في القدرة البصرية.

يتضمن معالج الإشارة *Signal Processor* تكبير الإشارة في أنظمة إرسال الإشارة التماثلية وترشيحها. أما في الأنظمة الرقمية يحتوي المعالج على دائرة قرار تحدد فيما إذا كان قد استقبل عدداً ثنائياً (1) أو (0) خلال الحيز الزمني لأي خانة مفردة، بالإضافة إلى تكبير الإشارة وترشيحها. يستعمل مباشرة الشكل الكهربائي للرسالة الخارجة من معالج الإشارة، وتحدث هذه الحالة على سبيل المثال عندما توصل حواسيب أو آلات أخرى إلى نظام ليفي، ويحدث هذا أيضاً عندما يكون النظام الليفي فقط جزءاً من شبكة أكبر عما هو الحال في وصلة ليفية بين مقاسم هاتفية أو في خط وصلة رئيسية حاملة لعدد من البرامج التلفزيونية.

1 - 3 مميزات الألياف البصرية

قبل التطرق إلى مميزات الألياف البصرية (الضوئية) لابد أن نذكر بعض المحاذير، وهي أن الأنظمة الليفية ليست كاملة حيث لها قيود اقتصادية وتقنية، من أجل أي نظام مرغوب يجب تقويم المميزات النسبية للتقنية الموجهة مقابل غير الموجهة، وللموصلات المعدنية مقابل الألياف.

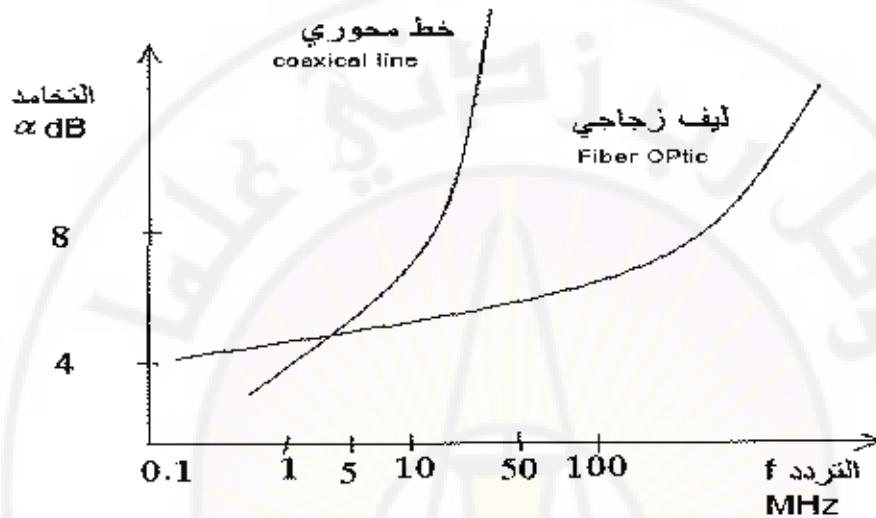
1. إن المادة الأساسية للألياف الزجاجية هي ثاني أكسيد السليكون (SiO_2) المتوفر بكثرة. وتصنع بعض الألياف البصرية من البلاستيك الشفاف، وهي مادة الزجاج الذي يحتوي على بعض الشوائب المعدنية وغيرها، ولم تتم تنقيتها في أثناء المعالجة خلال تصنيع الزجاج. فالكلفة هي الاعتبار الأكثر أهمية في النظام، ويجب إجراء المقارنات بين الليف والكابلات المعدنية بعناية. يتوفر العديد من الكابلات الليفية وبعضها أرخص من مثيلاتها المعدنية. ويظهر التوفير بوضوح عندما تتم المقارنة على أساس الكلفة لوحدة المعلومات المنقولة. مثلاً: إن المقارنة الصحيحة لوصلة هاتفية تكون على أساس الكلفة لميلي متر لكل قناة هاتفية، وليس لكل متر طولي. يظهر هذا الاعتبار أن للألياف إمكانيات أكبر في حمل المعلومات مما للتقنية المعدنية.

2. تعد الكابلات الليفية أقل تكلفة للنقل، وأسهل للتركيب من الكابلات المعدنية، وذلك لأن الألياف أصغر وأخف. في تصميم ذي كابل مفرد يبلغ قطر الليف $125[\mu m]$ ويحتويه غلاف بلاستيكي ذو قطر خارجي $2.5[mm]$ ويبلغ وزن الكابل $6[kg/km]$ وتبلغ الخسارة $5[db/km]$. لنقارن هذا الكابل مع الكابل السحوري (RG-19/U) الذي يبلغ تخميده $22.6[db/km]$ عندما يحمل إشارة بتردد $100[MHz]$. ويبلغ قطره الخارجي $28.4[mm]$ ويبلغ وزنه $1110[kg/km]$. يظهر هذا المثال المميزات الكبيرة للوزن والحجم للكابلات الليفية.

3. تطورت الألياف والكابلات الليفية لتصبح قوية ومرنة. وبعض الألياف رفيعة بحيث إنها لا تنكسر عندما تلف حول قوس بنصف قطر يبلغ فقط بضعة سنتيمترات. إن مرونة الليف صفة جذابة من أجل التركيبات التي تحتوي على عدة لفات على مسار الإرسال. من أجل انحناءات ذات قطر كبير توجه الألياف الضوء بخسارة مهمة. ويوجد على أي حال بعض الخسارة عند الانحناءات الضيقة جداً. وعندما يحمي الليف مثلاً بتغليفه بغلاف بلاستيكي يصعب ثني الكابل إلى نصف قطر صغير فلا ينكسر الليف. والألياف التي تحتويها كابلات لا تنكسر بسهولة. تؤدي إضافة غلاف بلاستيكي إلى زيادة قوة الشد لخط إرسال ليفي. ويمكن إضافة قضبان فولاذية داخل الكابل البلاستيكي من أجل (وهو ليف بوليمر تركيبي *Kelven*) زيادة إضافية للقوة إذا احتاج الأمر. توجد مادة دعم أخرى وهي ذات قوة شد عالية بالرغم من الطبيعة الهشة الظاهرية للزجاج. تعد الكابلات الليفية قوية البنية ومفيدة.

4. تطورت التقنيات من أجل إنتاج ألياف ذات خسارة إرسال منخفضة جداً حيث توجد عدة تصاميم ليفية. إن تخميده مقداره $4[db/km]$ يعد نموذجياً لأجل ألياف زجاجية تجارية عالية الجودة. ويمكن إنشاء وصلات اتصال طويلة جداً نتيجة جاهزية الألياف ضعيفة الخسارة، ويمكن تحديد مواقع المكررات *Repeaters* المطلوبة من أجل تكبير

الإشارات الضعيفة على مسافات متباعدة تزداد خسارة خطوط النقل السلكية بسرعة مع التردد الشكل (7-1) من أجل كابل محوري RG-19/U. فعند الترددات العالية ستقتصر بشكل كبير أطوال الوصلات والمسافات بين مراكز التكرار للأنظمة السلكية أكثر مما للأنظمة الليقية.



الشكل (7-1)

5. إن أحد أكثر ميزات الألياف أهمية هي قابليتها في حمل كمية كبيرة من المعلومات بالشكل الرقمي أو التماثلي. مثلاً يمكن للليف مفرد من النوع المطور لخدمة هاتفية أن ينقل المعلومات بالمعدل $T_3 (44.7 [Mbps])$ الجدول (1-1)، وهذا الليف ينقل 672 قناة صوتية، وتتوفر ألياف بمسعات أكبر أيضاً. ومع أن التضايق النبضة يحد من المعدل الأعظمي فإن إمكانيات الليف تؤمن متطلبات معظم أنظمة معالجة المعطيات.

عدد الأتية الصوتية	دلالة الإرسال	معدل التعطيات
1	---	64KbPs
24	T ₁	1.544MbPs
96	T ₂	6.312 MbPs
672	T ₃	44.736 MbPs
4032	T ₄	274.175 MbPs

الجدول (1-1)

6. إن الألياف البصرية سواء الزجاجية منها أم البلاستيكية هي عوازل لا يتدفق خلالها تيارات كهربائية سواء أكانت ناتجة عن الإشارة المرسلية أو عن الإشعاعات الخارجية التي تصطمم بالليف، وبالإضافة لذلك فإن الموجة الصوتية داخل الليف تكون محجوزة ولا يحدث لذلك أي تسرب خلال الإرسال، يمكن أن يتداخل مع إشارات في ألياف أخرى، وعلى العكس لا يمكن للضوء أن يدخل الليف من جانبه. نستنتج من هذا أن الليف محمي تماماً من التداخل والاقتران مع ألياف الاتصالات أخرى سواء أكانت كهربائية أم صوتية. ولأسباب *RFT* المذكورة أعلاه تتمتع الألياف بممانعة ممتازة لتداخل التردد الراديوي وللتداخل الكهرومغناطيسي *EMT*. يظهر تفوق الليف في طرحه خارجياً الضجيج الخلفي المحدث. إن قدرة الليف في عزل نفسه عن محيطه يسمح لنا بحزم عدة ألياف مع بعضها في كابل من أجل عدة ألياف من المعلومات على طول خط مفرد فلا يحدث تداخل.

7. بسبب كون الألياف عوازل فإنها لن تلتقط أو تنقل النبضات الكهرومغناطيسية *EMP* التي تسببها الانفجارات الذرية التي يمكن أن تخرص ملايين الفولطيات لخط إرسال

ناقل، يمكن انبضعة الجهد أن تنتقل عدة أميال على طول السلك وتحطم في نهاية الأمر (بسبب قوتها) التجهيزات الإلكترونية عند نهاية المسار.

8. تتميز الطبيعة العازلة للليف بعدة نتائج عملية أخرى، ففي المحيط حيث توجد خطوط جهد عالي قد تؤدي وصلة اتصالات ملكية إلى إحداث دارة قصر على الخطوط نتيجة سقوطها عليها مؤدياً هذا إلى حدوث عطل كبير، وقد يؤدي حدوث الشرارة في هذه الطريقة إلى اشتعال غازات الاحتراق في المنطقة. إن هذه المشكلة تختفي بوجود الألياف، وإضافة إلى ما ورد يمكن إصلاح الليف أثناء تشغيل النظام من غير إمكانية حدوث قصر للإلكترونيات عند المرسل أو المستقبل، قد يمكن لهذه المشكلة أن تحدث عند إصلاح كابل معدني.

9. توفر الألياف درجة من السرية والخصوصية. حيث إن الألياف لا تشع الطاقة ضمنها فمن الصعب على متطفل كشف الإشارة المرسل. وحتى يمكن الحصول على الإشارة يجب أن يجري اقتحام مادي على الكابل. إن كسر الليف أو دمج ليف جديد في الليف المرسل يؤدي إلى الحصول على منفذ إلى الحزمة البصرية. يمكن للمستقبل حساس أن يقيس هذه الخسارة بالفترض أخذ العلم على أن تطفلاً قد حدث، ومن أجل تحسين فرصة الكشف يجب أن يراقب النظام بشكل دائم.

10. إن التآكل نتيجة الماء أو المواد الكيميائية أقل قسوة على الزجاج مما هو بالنسبة إلى النحاس الذي يحل محله. وعلى أي حال يجب ألا يتخلل الماء الزجاج من أجل التطبيقات المغمورة في الماء تغلف الألياف ضمن كابلات تحميها من الماء. يمكن أن تتحمل الألياف الزجاجية ذاتها درجات حرارة عالية قبل أن تتلف، فلا يتأثر الليف الزجاجي حتى درجات حرارة تقارب 800°C . بينما تكون العناصر الأخرى في النظام اللبني أكثر حساسية لارتفاع درجة الحرارة، حيث يمكن أن ينصهر غلاف الكابل

البلاستيكي تاركاً الليف من غير حماية، ومن المحتمل أن يتشوه الليف وسيزيد هذا التشوه الضارة فيه. يتوفر تجارياً بتكاليف متواضعة كابلات ليفية تعمل بين $25^{\circ}C$ - و $65^{\circ}C$.

11. تتوفر الألياف بأطوال كبيرة مما يقلل الحاجة إلى وصلات دائمة متعددة. إن طولاً مقداره $1[km]$ يعدّ طولاً شائعاً، وقد أمكن إنتاج جدائل متواصلة بأطوال تبلغ عدة كيلومترات. من أجل أن تكون منطقيين يجب أن نذكر شيئاً ما عن إحدى سيناث الألياف البصرية. إن كلفة الوصلة الضوئية *Connector* مرتفعة وخسارته أيضاً كبيرة ويتطلب تركيبه الكثير من الوقت. أما أسباب هذا الحال فهي صغر قطر الليف الضوئي إذ يتطلب توصيله بدقة عالية جداً بمرتبة المايكرومتر. ترتفع كلفة الوصلات الضوئية من أجل الحصول على خسارة أقل من $1[db]$ عندما يتكرر اقتران الألياف وانفصالها.

1 - 4 حساب سويات القدرة بالديسبل dB

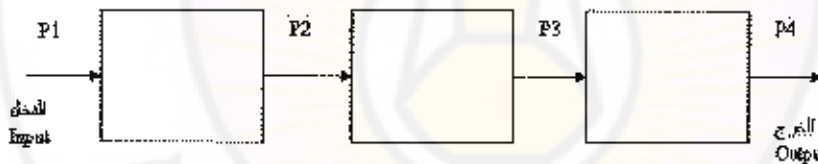
إن جزءاً رئيسياً من تصميم الأنظمة يتضمن المحافظة على قيمة القدرة الضوئية على طول وصلة الاتصالات، وهذا ضروري عادة من أجل أن نضمن بأن الموجة الواردة إلى الكاشف ذات شدة كافية من أجل أن نميز بشكل صحيح ويوضح. في حالات أخرى قد تكون القدرة المستقبلية كبيرة جداً من أجل المستقبل. ويجب على المصمم أن يتأكد أن هذا لا يحدث. يعدّ الديسبل dB مقياساً مناسباً لسويات القدرة النسبية في نظام اتصالات ما.

إذا كانت القدرة عند نقطة ما في نظام تساوي $P_1[W]$ وعند نقطة أخرى أبعد في الوصلة كانت $P_2[W]$. تمثل عندئذ P_2/P_1 كفاءة الإرسال بين النقطتين، ويعبر عن هذه النسبة بالديسبل:

$$dB = 10 \log_{10}(P_2 / P_1) \quad (1-1)$$

وتعطى P_1 و P_2 بنفس الوحدات (وات أو ميللي وات مثلاً)، ويكون لوغاريتم الأعداد التي هي أصغر من الواحد سالباً وهكذا تكون نتيجة الديسبل سالبة إذا كانت P_2 أقل من P_1 . وهذه هي الحالة عندما يكون للنظام خسارات. وعندما يكون P_2 أقل من P_1 (كما هي الحال عندما يوضع مكبر بين موقعين) يكون الديسبل موجباً. إن المقياس اللوغاريتمي ملائم للاستعمال بسبب السهولة التي يمكن بها إيجاد التغير الكلي في سوية القدرة عندما تربط عدة عناصر على التوالي *Cascaded*. نعتبر النظام المكون من ثلاثة عناصر والمبين في الشكل (8-1) حيث يمكن أن تمثل الكتل الثلاثة وصلة من منبع الضوء إلى الليف والليف ذاته والموصل، ومن ثم إلى الكاشف، وتحدد قدرة الخرج بضرب كفاءات الكتل وفقاً للتعبير التالي:

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} \times \frac{P_3}{P_2} \times \frac{P_2}{P_1}$$



الشكل (8-1)

ويعبر عن الخسارة كما يلي :

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_1} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_3} \times \frac{P_3}{P_2} \times \frac{P_2}{P_1} \right)$$

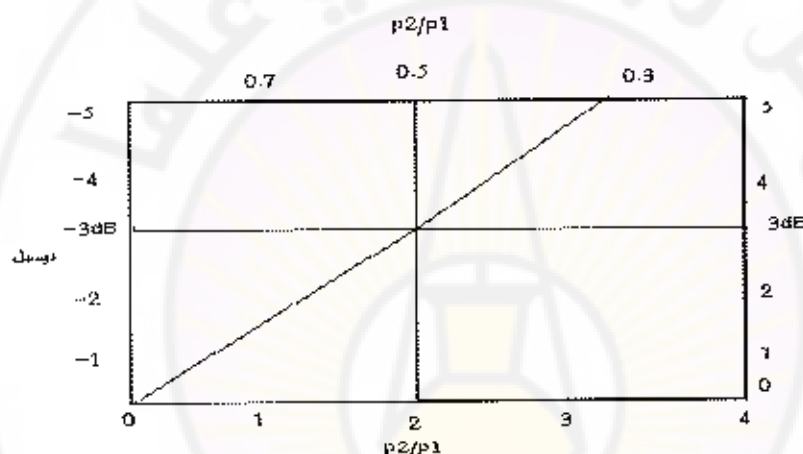
وإذا استعملنا الخاصة بأن لوغاريتم جداء حدود يساوي مجموع لوغاريتمات هذه الحدود

نجد:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_1} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_3}{P_2} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2-1)$$

وهذا يعني أن الكفاءة الإجمالية بالديسبل تساوي مجموع الكفاءات بالديسبل، وهذا

يوضح الميزة الرئيسية للمقياس اللوغاريتمي المبين في الشكل (1-9).



الشكل (1-9)

مثال 1 - 1

لنفترض أن للعناصر الثلاثة المبينة بالشكل (1-8) الخسائر التالية على التوالي

$(-11[dB], -6[dB], -3[dB])$. أوجد الخسارة الكلية للمجموعة. وأوجد الخرج إذا كانت قدرة

الدخل $5[mW]$.

الحل:

نجد بموجب المعادلة (2-1) أن الخسارة الكلية تساوي المجموع:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_3} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_3}{P_2} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$10 \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_3} \right) = -20 [dB] \Rightarrow \frac{P_4}{P_3} = 10^{-2} = 0.01 \Rightarrow$$

$$P_4 = 0.01 \times P_3 = 0.01 \times 5 [mW] = 0.05 [mW]$$

مثال 1 - 2

تبلغ الخسارة لنظام ما $-23 [dB]$ احسب كفاءته.

الحل:

من المعادلة (1-1) من أجل نسبة القدرة نجد:

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{dB/10} = 10^{-2.3} = 0.005$$

وهكذا تساوي كفاءة إرسال القدرة 0.5% ، ويتوجب علينا أيضاً الحصول على نسب

سويات القدرة المطابقة إلى $-23 [dB]$ من مقياس الديسيبل.

نلاحظ أن: $-23 [dB] = -20 [dB] - 3 [dB]$. من الشكل (1-9) نجد خسارة مقدارها 0.01

من أجل $-20 [dB]$ ونجد أننا نحصل على خسارة مقدارها 0.5 من أجل $-3 [dB]$ وتكون

الخسارة الكلية التي هي حاصل جداء الخسارتين الجزئيتين مساوية:

$$0.01 \times 0.5 = 0.005$$

وهكذا يستعمل مقياس الديسيبل للدلالة على سويات القدرة النسبية.

ويمكن أيضاً أن نستعمل الديسيبل لتعبر عن القدرة المطلقة. فمن أجل هذا نقارن القدرة

P_2 بقيمة مرجعية ثابتة. إن السوية المرجعية المناسبة هي الميللي وات ويشار إلى قيمة القدرة

بالديسيبل نسبة إلى واحد ميلي وات بالمصطلح dBm . يوضع $P_1 = 1[mW]$ ويكتابة P_2 بالميلي وات نجد مايلي:

$$dBm = 10 \log_{10} P_2 + 30$$

حيث تقدر P_2 بالميكرووات. عندها يمكن أن نكتب:

$$dB\mu = 10 \log_{10} P_2 + 60$$

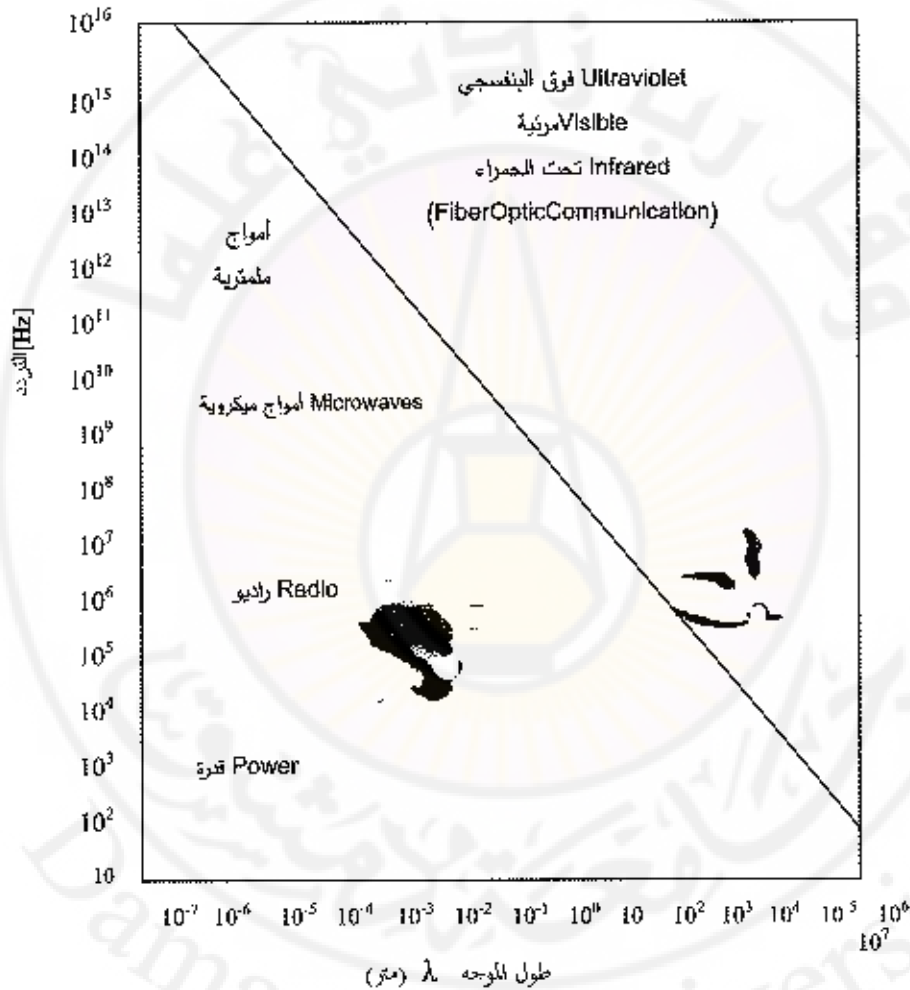
تعرض بعض أجهزة قياس القدرة الضوئية قراءاتها مباشرةً بوحدة dBm أو $dB\mu$. بينما تشير أجهزة أخرى إلى القدرة الضوئية مباشرةً بالوات.

5 - 1 طبيعة الضوء (Nature of Light) والتصنيف الترددي

إن الضوء هو موجة كهرومغناطيسية ذات تردد اهتزاز عالٍ جداً، وطول موجة قصيرة جداً، يبين الشكل (1-10) ترددات الطيف الكهرومغناطيسي ويعطي طول موجة الفراغ الحر. وكذلك الأسماء العامة لمدى الترددات المختلفة. نركز الدراسة على الأجزاء تحت الحمراء والمرئية فوق البنفسجية من الطيف، وذلك لأن العديد من تقنيات التحليل والأجهزة تستخدم في مدى هذه الترددات جميعاً.

إن المدى الترددي (أو أطوال الموجات) التي تهتمنا مبدئياً في الاتصالات تقع ضمن مجال الترددات تحت الحمراء (*Infrared*). إن الألياف الزجاجية ليست مرسلات جيدة جداً للضوء في منطقة الرؤية ($0.4[\mu m] - 0.7[\mu m]$) حيث تخمد هذه الألياف الأمواج إلى الحد الذي تكون فيه فقط وصلات الإرسال القصيرة عملية. وتكون الخسارة في حال الموجات فوق البنفسجية كذلك أكبر. وفي مدى الموجات تحت الحمراء يوجد على أي حال منطقتان يكون فيهما الزجاج فعالاً جداً. ويحدث هذا عند أطوال موجات قريبة من $0.8[\mu m]$ وفي المنطقة من $1.1[\mu m]$ إلى $1.6[\mu m]$.

مع أن الأمواج الضوئية ذات ترددات أعلى بكثير من الأمواج الراديوية فإن كليهما يخضع لنفس القوانين ويشترك بالعديد من الخصائص. إن لجميع الأمواج الكهرومغناطيسية حقول كهربائية ومغناطيسية تلازمها وتنتشر جميعها بسرعة عالية. تنتشر الأمواج الكهرومغناطيسية في الفراغ بسرعة $3 \times 10^8 [m/s]$.



الشكل (10-1)

وتخص هذه السرعة انتشار الموجة في الجو. أما في الأوساط الصلبة فتختلف سرعة الموجة وتعتمد قيمتها على المادة وعلى الشكل الهندسي لأي بنية موجهة للموجة قد تكون موجودة. يعطى طول موجة حزمة ضوئية بالعلاقة :

$$\lambda = v / f \quad (3-1)$$

حيث v هي سرعة الحزمة و f ترددها.

مثال على ذلك: لنعتبر إشعاعاً بطول موجة $0.8[\mu m]$ وباعتبار أن $v=c$ يكون التردد: $f = 3.75 \times 10^{14} [Hz]$. أما الدور T هو: $T = 2.67 \times 10^{-15} [s]$.

تستعمل الطبيعة الموجية للضوء من أجل تحليل كيفية انتشار الحزم الضوئية خلال الألياف. تبين مثل هذه التحاليل الشروط الضرورية من أجل الضوء الذي سيوجه بواسطة الليف. وتبين هذه التحاليل السرعة التي تنتشر بها الأمواج، وضجنا أعلاه الضوء كموجة إلا أنه أحياناً لا يسلك الضوء مسلك الموجة وإنما مسلكاً كما لو كان مصنوعاً من جزيئات صغيرة جداً تدعى الفوتونات. تعطى طاقة الفوتون الواحد بالعلاقة:

$$w = h.f \quad (4-1)$$

حيث $h = 6.626 \times 10^{-34} [J.s]$ ويدعى ثابت بلانك.

مثال 1 - 3

أوجد عدد الفوتونات الواردة في الثانية على كاشف إذا كانت القدرة الضوئية $1[\mu W]$ وطول الموجة $0.8[\mu m]$.

الحل:

نحدد طاقة الفوتون عند $0.8[\mu m]$ وفق ما يلي:

$$w_p = h.f = h \frac{C}{\lambda} = 2.48 \times 10^{-19} [J]$$

وحيث إن القدرة هي معدل تسليم الطاقة يمكن أن نكتب الطاقة الكلية كما يلي:

$$w = P.t$$

ويضرب القدرة $1[\mu W]$ بالفترة الزمنية $1[sec]$ ينتج طاقة $1[\mu J]$ ويكون عدد الفوتونات المطلوب للحصول على $1[\mu J]$:

$$\frac{w}{w_p} = \frac{10^{-6} [J]}{2.48 \times 10^{-19} [J / photon]} = 4.03 \times 10^{12} [photons]$$

تقاس الطاقة بوحدة مناسبة هي (الإلكترون فولت) eV وهي الطاقة الحركية التي يكتسبها إلكترون واحد عندما يسرع بواسطة فرق كمون مقداره واحد فولت. وتحدد العلاقة بين الإلكترون فولت و الجول كما يلي:

$$1[eV] = 1.6 \times 10^{-19} [J]$$

نعطي طاقة الفوتون عند طول الموجة $0.8[\mu m]$ بالإلكترون فولت كما يلي:

$$\frac{2.48 \times 10^{-19} [J]}{1.6 \times 10^{-19} [J / eV]} \approx 1.55 [eV]$$

1 - 6 بعض أجيال أنظمة الاتصالات البصرية

وضع الباحثون في الخدمة خمسة أجيال من نظم الاتصال بالأمواف الضوئية، ويمثل كل منها تقدماً رئيسياً لهذه التقنية، ويكون تردد الأمواف الضوئية المستخدمة في الاتصالات البصرية من مرتبة $10^{14} [Hz]$.

ظهرت نظم الجيل الأول من الاتصالات البصرية نحو عام 1975 تبين أنه باستطاعتها نقل معلومات أكثر بكثير مما كانت تستطيع نقله النظم التي تنقل إشارات كهربائية عبر الأسلاك النحاسية. وقد كانت الألياف البصرية في هذا الجيل تسبب ضياعاً (خسارة) بحدود 20[dB/km] .

بحلول عام 1978 أصبح بالإمكان نقل مليار بت ($Gbits$) كل ثانية عبر نظام اتصالات لمسافة 10[km] بحيث أصبحت سعة النقل 10[Gbit.km/s] ومع ظهور الجيل الثاني نحو عام 1980 حققت نظم الاتصالات البصرية سعة تقارب 100[Gbit.km/s] حيث تمكن العلماء من تحسين التقنية بطريقتين: الأولى بتغيير مواصفات الليف وتم الحصول على ألياف وحيدة النمط ($Single Mode$)، والثانية عبر تطوير مرسلات ومستقبلات يمكنها التعامل مع ضوء طول موجته $1.3\text{[}\mu\text{m]}$ ، وقد أدى هذا التغير إلى خفض التخميد إلى 4[dB/km] .

وفي عام 1982 بدأ الجيل الثالث بالظهور عندما طور العلماء تقانات تصنيع أدت إلى زيادة نقاء زجاج السيلكا. وهكذا عزز العلماء بشكل أكبر شفافية الألياف ضمن مجال الأطوال الموجية من $1.2\text{[}\mu\text{m]}$ إلى $1.6\text{[}\mu\text{m]}$ وللاستفادة من هذا المجال تم تصنيع منبع ضوء ليزري أحادي اللون $Monochromatic$ وبشكل خاص فإن الثنائيات الليزرية تستطيع إصدار ضوء طول موجته $1.55\text{[}\mu\text{m]}$ وهو طول الموجة الضوئية التي يكون عندها زجاج الليف قليل الفقد. وقد أدت هذه التحسينات إلى زيادة سعة النقل بشكل كبير.

مع بداية عام 1984 ظهر الجيل الرابع للنظم الاتصالات البصرية ويتكون هذا الجيل من نظم مبتكرة تقوم بتعديل تردد الضوء أو طوره بدلاً من شدته. تم لاحقاً تطوير نظم الاتصالات البصرية بحيث أصبح بالإمكان نقل أكثر من 1[Gbit/s] عبر ليف بصري لمسافات تزيد عن 100[km] .

1 - 7 تطبيقات الاتصالات بالألياف البصرية

إن الحجم الصغير والسعة الكبيرة لحمل المعلومات بالألياف البصرية يجعلها جذابة بوضعها بدائل للكابلات النحاسية التقليدية ذات أزواج الأسلاك المجدولة في الأنظمة الهاتفية. في واحد من أوائل الأنظمة المركبة كانت خطوط ربط رئيسية ليفية قد وصلت بين مكاتب الهاتف في *Chicago* كانت تبعد عن بعضها مسافة $1[km]$ و $2.4[km]$. إن العمل بالمعدل T_3 قد أتاح لكل واحد من الأربع والعشرين ليفاً في الكابل أن يحمل 672 رسالة صوتية.

لقد تأكدت فاعلية خطوط ربط متواصلة (بدون محطات تكرار) بطول أكثر من $100[km]$ وقد سمح هذا بإنشاء خطوط اتصالات رئيسية بين المدن. ويمكن بفضل المكررات أن نرسل رسائل بألياف يبلغ طولها عدة آلاف كيلومتر. تمكن المسافات الطويلة بين المكررات من تصميم وصلات تحت الماء تجتاز المحيط الأطلسي. تبلغ المسافة بين نيويورك ولندن $6500[km]$ وتتطلب حوالي 200 مكرراً تفصلها عن بعضها مسافات من $30[km]$ إلى $35[km]$. ويمكن استعمال المعدل $T_4 (274[Mbps])$ حيث يرسل كل ليف 4000 مكالمات.

تشير عبارة المدينة المسلكة إلى تجمع سكاني يكون لكل منزل فيه نفاذ إلكتروني إلى عدد كبير من الخدمات المعلوماتية. وعندما تكون التوسيلات بصرية يصبح المصطلح المدينة المليئة أكثر دقة. تم تأسيس مثل هذا التجمع في اليابان وفق البرنامج *Higashi- (Hi-OVIS)* *Ikoma Optical Visual Information System* وكذلك تعني *Highly Hi-OVIS Interactive Optical Visual Information System*

يتألف النظام من مركز عام ومركز فرعي ومطاريق منزلية متصلة بوساطة خطوط إرسال بصرية. وتوصل الخطوط تجهيزات الفيديو والحواسيب. لكل طرف منزلي جهاز تلفزيون وآلة تصوير وميكروفون ولوحة أزرار، ويتم الحصول على اتصالات تفاعلية بالاتجاهين. وصلت

المطارييف مبحثاً إلى 158 منزل خاص. وقد وسعت تجمعات سكنية أخرى في أرجاء العالم مجال المدينة المليفة وأغراضها.

إن الاتصالات البصرية تتوافق مع خطوط السكك المكهربة بينما ليست كذلك الأنظمة السلكية، وذلك بسبب عدم تأثير الليف بالتداخل الكهرومغناطيسي (EMI) حتى إن الألياف يمكن أن تمر خلال مناطق توليد القدرة الكهربائية أو خلال محطاتها الفرعية من غير أن تتأثر. يمكن أن تعلق الكابلات البصرية مباشرة بأبراج خطوط القدرة أو الأعمدة إذا كانت الفراضات أو الأحمال تسمح بذلك. بوضع غالباً ناقل أرضي للحماية من الصواعق فوق مجموعة خطوط نقل القدرة ذات الجهد العالي وهذا مكان مناسب من أجل احتواء الليف، إن التطبيقات التي هي بالأصل فيديوية تشمل البث التلفزيوني والكابل التلفزيوني (CATV) والمراقبة والإشراف عن بعد. تستعمل صناعة البث التلفزيوني الإرسال الليفي في الوصلات القصيرة. يتنافس إرسال الفيديو بالألياف البصرية بنجاح مع الكابل المحوري في أنظمة الإشراف والمراقبة عن بعد. تظهر في هذه التطبيقات أهمية طرح ال EMI والحساسية الضعيفة لضرر الصواعق.

وكأمثلة محدودة : مراقبة محطات توليد القدرة ونقاط التحكم الحرجة على طول سكة حديدية، وساحات وقوف السيارات، والحدود الخارجية لمنشآت عسكرية. تناسب على وجه الخصوص الأنظمة الليفية من أجل إرسال معطيات رقمية كالتي تولدها الحواسيب حيث يمكن أن يستخدم الليف في تنفيذ التوصيلات الداخلية بين وحدة المعالجة المركزية (CPU) والتجهيزات الطرفية وبين ال CPU والذاكرة وبين وحدات المعالجة المركزية نفسها.

إن الإرسال بالألياف البصرية لمعطيات التحكم مفيد في المناطق حيث توجد الجهود العالية. ويوجد مثل هذا المحيط عند إجراء تجارب الصهر المستحث بالليزر. إن المعالجات الصغيرة التي تتحكم بنتائج الإطلاق الليزري وبالمكبرات الليزرية توصل بواسطة الألياف من أجل حذف التداخل الذي تخلقه الجهود الكبيرة على النواقل المعدنية.

تكثر التطبيقات العسكرية بالألياف البصرية، وتتضمن وصلات الاتصالات والتحكم والقيادة على السفن والطائرات ووصلات المعطيات من أجل المحطات الأرضية وخطوط الإرسال واتصالات مراكز القيادة العسكرية.

إن خواص الليف المهمة هي الوزن الخفيف والحجم الصغير وطرح الـ EMI وعدم إشعاع الإشارة، وعلى الطائرات والسفن تظهر الفوائد المهمة لتناقص مصادقات حدوث الصدمات والناار والشرارة. تتراوح الاتصالات التكتيكية بدءاً من وصلات قصيرة المدى (التي توصل الملاحي الحقلية) وحتى وصلات المسافات الطويلة (خطوط بطول $60[km]$).

يوجد تطبيق حديث وهو الصاروخ ذو التوجيه الليفي. يجري فيه إرخاء الليف أثناء طيران الصاروخ ترسل الحساسات التي هي على الصاروخ معلومات فيديو خلال الليف إلى عربة متحكم أرضية. وتحول ثانية الأوامر من العربة إلى الصاروخ عبر الليف.



الفصل الثاني

محددات الليف البصري

Optical Fiber Parameters

2 - 1 مقدمة

يعدّ الليف الضوئي العنصر الأساسي في أنظمة الاتصالات بالألياف الضوئية، ويمثل هذا الليف خط النقل الأساسي للأمواج الضوئية التي تنقل من المرسل إلى المستقبل. يصنع الليف الضوئي *Optic Fiber* بشكل أساسي من ثاني أكسيد السيلكون (SiO_2) ويتكون من طبقتين أساسيتين الأولى ويطلق عليها اسم القلب *Core* وطبقة أخرى محيطة بالقلب تدعى الغلاف *Cladding*. تنتشر الأشعة في الفراغ بسرعة $C = 3 \times 10^8 [m/s]$ ، وتنتشر الأشعة في أي وسط آخر بسرعة أقل وتعطى بالعلاقة:

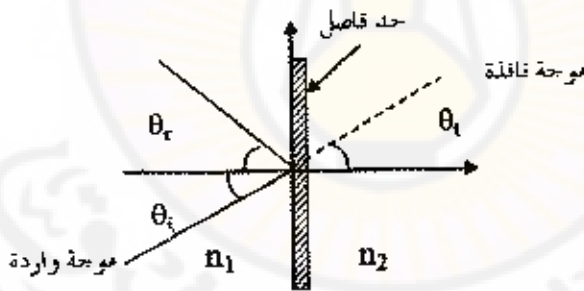
$$v = C/n \quad (1-2)$$

يدعى العامل n دليل الانكسار للوسط. من أجل الهواء والغازات تكون سرعة الشعاع قريبة جداً من C وتكون $n = 1$ ، وعدد الترددات البصرية يكون دليل الانكسار 1.33 أما الزجاج فله عدة تراكيب ولكل واحدة منها سرعة شعاع مختلفة قليلاً. ويعدّ عامل الانكسار قيمة 1.5 رقماً ممثلاً لأنواع الزجاج المستعمل في الألياف. ويعطى الجدول (1-2) قائمة لأدلة الانكسار للعديد من المواد.

المادة (Material)	Index of Refraction
الهواء Air	1.0
ثاني أكسيد الكربون Carbon dioxide	1.0
كحول الإيثيل Ethyl Alcohol	1.36
الماء Water	1.33
سيليكات منصهرة Fused silica	1.46
الزجاج Glass	~ 1.5
السيليكون Silicon	3.5
الجرمانيوم Germanium	4

الجدول (1-2)

تنتشر الأشعة وفق مسار مستقيم ما لم تنكسر نتيجة تغير ما في الوسط. عند المستوى الفاصل بين وسطين ينعكس الشعاع بزوايا تساوي زاوية الورود كما في الشكل (1-2).



الشكل (1-2)

لاحظ أن الزوايا تقاس بالنسبة إلى العمود على المستوي الفاصل (أي الاتجاه المتعامد مع السطح)، وهذا هو الاصطلاح المتفق عليه في العمل البصري. من الشكل (1-2) يمكن أن نكتب $\theta_r = \theta_i$ حيث θ_r زاوية الورود و θ_i زاوية الانعكاس.

عندما تجتاز أي قدرة حداً فاصلاً يعطى اتجاه الشعاع النافذ بقانون *Snells* كما يلي:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2-2)$$

حيث θ_i هي زاوية النفاذ و n_1, n_2 هما دليل الانكسار لمنطقتي الورد والنفاذ على

التوالي.

يعتمد في الليف الضوئي الزجاج مادة أسامية المقلب، وتكون قرينة الانكسار في القلب هي n_1 ، بينما في الغلاف يصلح من الزجاج المضاد إليه بعض الشوائب وقرينة انكسار n_2 .

مثال 2 - 1

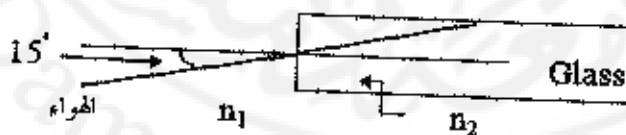
يعبر شعاع ضوئي من الهواء $n_1=1$ إلى الزجاج $n_2=1.5$ أوجد زوايا النفاذ عندما يكون الشعاع الوارد عمودياً على السطح الفاصل وعندما $\theta_i=15^\circ$.

الحل:

عندما تكون زاوية الورد صفرًا يكون عندئذ $\sin \theta_r=0$ وبحسب قانون *Snell* ينتج $\sin \theta_i=0$ وأخيراً $\theta_i=0$ فلا ينحرف الشعاع وعندما تكون $\theta_i=15^\circ$ يكون:

$$\sin \theta_r = (1/1.5) \sin 15 = 0.17 \Rightarrow \theta_r = 9.94^\circ$$

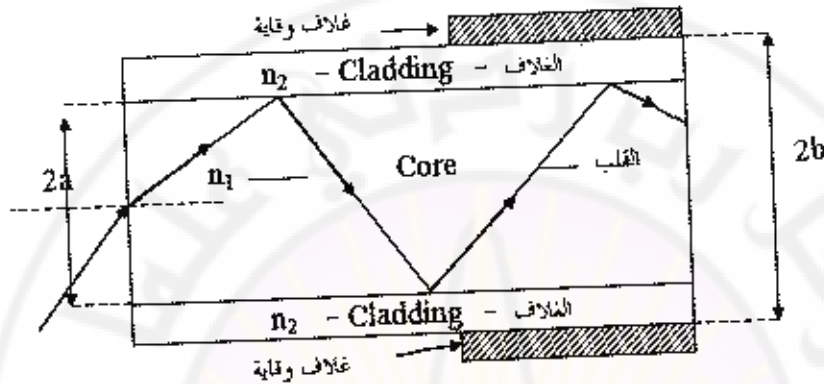
وكما هو متوقع يتجه الشعاع نحو العمود كما هو موضح بالشكل (2-2)



الشكل (2-2)

2 - 2 البنية النموذجية للليف البصري

يتكون الليف البصري من مادتين أساسيتين هما مادة القلب ومادة الغلاف، ويحيط بهما غلاف وقاية (حماية) *Protective Jacket* الشكل (3-2).



الشكل (3-2)

1- القلب أو النواة (*core*): وهو القسم الذي ينتشر خلاله الضوء المرسل، ويصنع عادة من مادة عازلة شفافة (زجاج أو بلاستيك) ذات معامل انكسار n_1 ، ويرمز لقطر القلب بـ $2a$.

2- الغلاف (*cladding*): وهو الوسط المحيط بالقلب، ويصنع من مادة عازلة شفافة كالزجاج أو البلاستيك، ولها معامل انكسار n_2 ، ويرمز لقطر الغلاف بـ $2b$.

الشرط اللازم والكافي لكي تنتشر الأمواج الضوئية في مادة القلب من المرسل وإلى المستقبل هو أن يتحقق الشرط التالي:

$$n_1 > n_2 \quad (3-2)$$

ولكي تنتشر الأمواج الداخلة إلى قلب الليف مباشرة يجب أن تكون ذات زاوية ورود أقل أو تساوي الزاوية الحرجة θ_c . يتراوح قطر القلب بين $(5 - 150[\mu m])$ أما قطر الغلاف فيتراوح بين $(100 - 300[\mu m])$ وذلك حسب النوع الليف الزجاجي.

3- غلاف الوقاية (الحماية): وظيفته حماية القلب من الاهتزازات الميكانيكية وإعطاء الليف قوة ميكانيكية إضافية على سبيل المثال حددت اللجنة الدولية CCITT عام 1980 هذه الأبعاد لأحد أنواع الألياف الزجاجية:

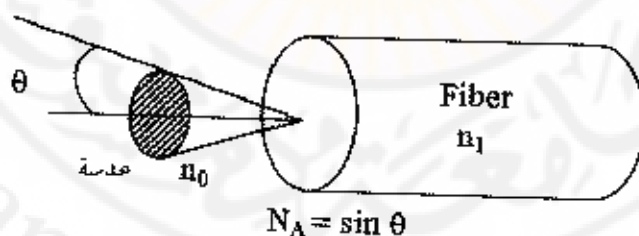
$$2a = 50[\mu m] \pm (6\%)$$

$$2b = 125[\mu m] \pm (2.4\%)$$

2 - 3 فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture

يتمتع النظام البصري بميزة مهمة وهي قابليته لتجميع الضوء الوارد ضمن مدى كبير من الزوايا.

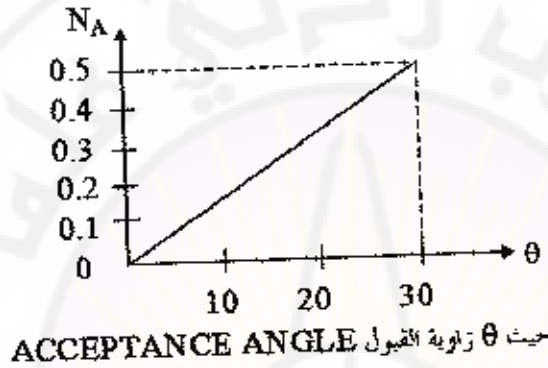
تحدد فتحة النفوذ العددية (الفتحة العددية) كما يلي: $N_A = n_0 \sin \theta$.
حيث n_0 هو دليل الانكسار للمادة بين العدسة والليف الضوئي، θ هي زاوية القبول العظمى.



الشكل (2-4)

إن الأشعة الضوئية التي ترد بزوايا تقع خارج هذا المخروط لن تنتشر في الليف بل ستستخدم بسرعة. تقاس الفتحة العددية عادة بوجود الهواء أمام الليف فتكون $n_0=1$ وتكون $N_A = \sin \theta$.

يظهر الشكل (5-2) رسماً بيانياً لهذه المعادلة:



الشكل (5-2)

تشير قيمة صغيرة من N_A إلى زاوية قبول صغيرة وبسبب هذا يكون الاقتران مع ليف ضوئي ذي N_A منخفضة أكثر صعوبة (يكون التراصف الميكانيكي أكثر حساسية) وأقل كفاءة (تكون بعض الأشعة خارج زاوية القبول) من الاقتران مع ليف ضوئي ذي N_A عالية. يمكن أن تستعمل العدسات لتخفيض امتداد الحزمة ولتحسين كفاءة الارتباط نتيجة لذلك.

إن الألياف الضوئية المخصصة للاتصالات للمسافات الطويلة تكون قيمة الفتحة العددية عادة تمتد من 0.1 إلى 0.3، أما الألياف من أجل المسافات الأقصر تكون قيم الفتحة العددية أعلى بقليل (قيمة نموذجية من 0.4 إلى 0.5).

يبين الجدول (2-2) قيم الفتحة العددية لبعض أنواع الألياف الضوئية (متعددة الأنموذج) *Multi Mode* والمصنعة من الزجاج أو البلاستيك.

Construction	n_1	n_2	N_A	θ
All-Glass	1.48	1.46	0.24	13.9°
PCS	1.46	1.4	0.41	24.2°
All-Plastic	1.49	1.41	0.48	29°

الجدول (2-2)

تُعرَّف الفتحة العددية بأنها مقدرة الليف على استيعاب معظم الحزمة الضوئية الواردة من المنبع الضوئي. وتعد الفتحة العددية من المواصفات الأساسية المهمة للألياف البصرية وذلك لأنها تربط بين المنبع الضوئي والليف البصري بالعلاقة:

$$N_A = \sin \theta_{in(max)} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (4-2)$$

$$\sin^{-1} N_A = \theta_{in(max)}$$

حيث $\theta_{in(max)}$: هي أكبر زاوية يصنعها الشعاع مع محور القلب بحيث ينتشر الضوء خلاله نتيجة الانعكاسات الداخلية. ونجد أن الأشعة التي تدخل إلى الليف بزوايا أكبر من $\theta_{in(max)}$ سوف تتابع طريقها إلى الغلاف وتضيع فيه. وتسمى كما سبق $\theta_{in(max)}$ زاوية القبول *ACCEPTANCE ANGLE* أو نصف زاوية مخروط القبول *ACCEPTANCE CONE*.

لذلك يمكن أن نصف وفقاً لذلك الأمواج الصادرة عن المنابع الضوئية إلى ثلاثة أنواع رئيسية من الأمواج:

1- الأمواج المفيدة: وهي أمواج تنتشر في قلب الليف الضوئي وهي الأمواج الحاملة للمعلومات.

2- أمواج الغلاف: وهي الأشعة التي تنتشر في غلاف الليف الزجاجي وذلك لأنها ترد خارج مخروط القبول، وتعدّ بمنزلة الخسائر.

3- الأمواج الهاربة: وهي الأمواج التي تنتشر في الوسط المحيط بالليف الزجاجي أيضاً ولا تحقق $\theta_{in(max)}$ (زاوية القبول)، وتعدّ أيضاً بمنزلة الخسائر.

ملاحظة:

لكي يتم توجيه كامل الأشعة في قلب الليف الزجاجي يجب أن تكون زاوية الانكسار θ مساوية للزاوية الحرجة أو أكبر منها بقليل وتعطى الزاوية الحرجة لليف عندئذ بالعلاقة:

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1 \quad (5-2)$$

ويطلق على هذه الانعكاسات التي تحققها المعادلة السابقة بالانعكاسات الزاوية الحرجة أو *Critical - Angle Reflection*. يبين الجدول (3-2) مقدار الزاوية الحرجة لبعض الأنواع من الألياف.

حد الفصل	n_1	n_2	θ_c
Glass - air	1.5	1	41.8°
Plastic - Plastic	1.49	1.39	68.9°
Glass - Plastic	1.46	1.4	73.5°
Glass - Glass	1.48	1.46	80.6°

الجدول (3-2)

2 - 4 أدلة انكسار الضوء في الليف البصري (معاملات انكسار الضوء)

لكي تنتشر جميع الأشعة الواردة من المنبع الضوئي إلى قلب الليف الزجاجي بشكل أعظمي يجب أن تتحقق علاقة مهمة وهي $n_2 < n_1$ أي أن معامل انكسار الضوء في القلب أكبر قليلاً من معامل انكسار الضوء في الغلاف. يتحقق ذلك بإضافة بعض الشوائب إلى مادة الزجاج التي يصنع منها الغلاف أثناء المعالجة التكنولوجية. بحيث نحصل في النهاية على ليف زجاجي له معاملان للانكسار: واحد للقلب n_1 والآخر للغلاف n_2 .

واستناداً إلى قيم n_1 و n_2 يمكن أن نعرف حاصل الفرق النسبي لمعاملات الانكسار بالعلاقة التالية:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (6-2)$$

وبإجراء التقريب المناسب نحصل على:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (7-2)$$

وتعطي Δ أحياناً بالنسبة المئوية أي:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\%$$

إن قيمة Δ دائماً وأبداً هي قيمة نسبية أصغر من الواحد، وذلك لأن $n_1 > n_2$ دائماً. استناداً إلى قيم $n_1 - n_2$ وشكل تغيرها يمكن أن نصنف الألياف الضوئية وفقاً لذلك إلى:

- 1- ألياف زجاجية ذات دليل درجي *Step - Index*.
- 2- ألياف زجاجية ذات دليل انكسار متدرج *Graded - Index*.

2 - 5 التخماد Attunation

إن تخماد الإشارة الضوئية (الطاقة الضوئية) المنتشرة في الليف الزجاجي هو عامل مهم في تصميم أي نظام اتصالات. إذ تتطلب جميع المستقبلات أن تكون قدرة الدخل فيها فوق سوية دنيا. وبعد الديسبل (dB) مقياساً مناسباً لسويات القدرة النسبية في الاتصالات الضوئية. إذا كانت القدرة عند نقطة ما في نظام تساوي P_1 وات وعند نقطة أخرى أبعد في الوصلة كانت P_2 وات، تمثل عندئذ النسبة P_2/P_1 جزءاً من القدرة المرسلة بين النقطتين، وبكلمات أخرى P_2/P_1 تحدد كفاءة الإرسال بين نقطتين كما مر معنا سابقاً.

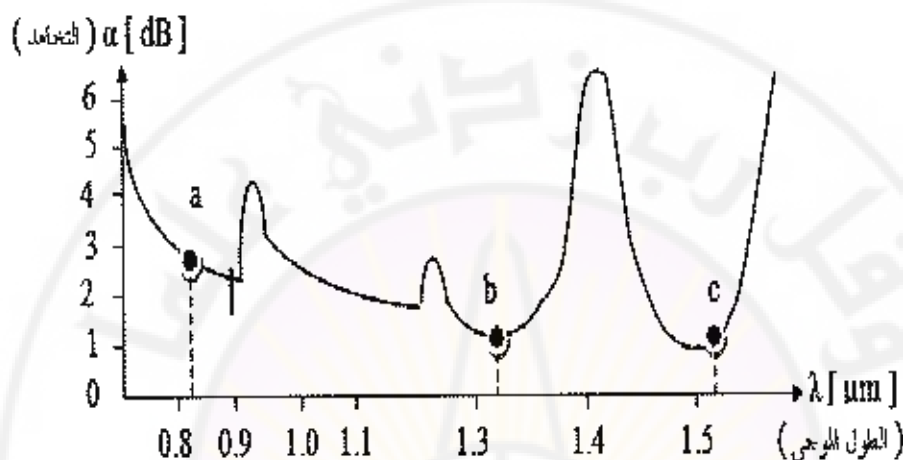
ويعبر عن هذه النسبة بالديسبل ويعطى معامل التخماد بالعلاقة:

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} [dB] \quad (8-2)$$

بما أن $P_1 > P_2$ دائماً في خطوط النقل عندئذ تكون نتيجة α سلبية، وهذه هي الحالة التي يكون فيها للنظام فيها خسارات (مفاقد) في الطاقة. نحتاج أن نعد أنفسنا معنيين فقط بخسارات الليف في مجال من أطوال موجة من حوالي $0.8[\mu m]$ إلى $1.6[\mu m]$. وهذا هو المدى الذي تكون ضمنه الاتصالات الليفية أكثر عملية. تعود أسباب هذا إلى إمكانية بناء ألياف ضعيفة الخسارة ومنابع وكواشف ضوئية فعالة في هذا المدى. كما ذكر سابقاً تصنع الألياف من المواد البلاستيكية والزجاجية. تتضمن متطلبات المادة الخسارة الضعيفة وإمكانية تشكيلها إلى ألياف شعرية طويلة. إضافة إلى ذلك يجب أن تكون المادة قابلة لتغيرات حلقية بحيث يمكن الحصول على دليل انكسار واحد للنواة وآخر للكساء. فيما يخص الليف ذو دليل الانكسار المتدرج يجب أن يكون التغير المتواصل في دليل الانكسار ممكناً. يمكن أن تصنع الألياف ذات الدليل الدرجي من البلاستيك أو الزجاج. وتكون الألياف ذات الدليل المتدرج عادة

من الزجاج. تملك الألياف الزجاجية عموماً أقل من الألياف البلاستيكية لذلك تفضل من أجل الاتصالات لمسافات الطويلة.

يبين الشكل (6-2) منحنى التخميد للألياف الضوئية استناداً إلى الطول الموجي:



الشكل (6-2)

بالرجوع إلى الشكل المبين أعلاه نجد أن معامل التخميد α يبلغ قيمة دنيا في ثلاث مناطق (a, b, c) لذلك يتم استخدام إحدى المناطق الثلاث في تصميم أي نظام اتصالات ضوئي لذلك يطلق عليها بمناطق الإرسال الثلاث في الاتصالات البصرية.

6 - 2 النمادج في الألياف البصرية Modes In Fiber

تعّد الألياف البصرية وسط انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية وأن الأمواج الكهرومغناطيسية مؤلفة من نماذج (أنماط) مختلفة مثل TE , TM , EH ... الخ.

إن المحدد المهم والأساسي للألياف الزجاجية يسمى تردد المقياس المعياري ويعطى

بالعلاقة:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} N_A \quad (9-2)$$

أو بالصيغة:

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

علماً أنه: a - نصف قطر قلب الليف الزجاجي.

λ - طول موجة الضوء في وسط الانتشار.

N_A - الفتحة العددية.

T_M, T_E - النموذج الكهربائي والمغناطيسي العرضي على التوالي.

H_E, E_H - نماذج هجينة يحتوي كل منها مركبات الحقلين الكهربائي

والمغناطيسي، وتلك ملحق محور الليف. وعندما تكون $V > 10$ يُقَرَّب عدد الأساليب

(النماذج) المتضمنة لجميع الاستطاعات بالعلاقة التالية:

$$N = V^2 / 2 \quad (10-2)$$

مثال 2 - 2

احسب عدد الأساليب للليف ذي قطر نواة $50[\mu m]$ افترض أن $n_1 = 1.48$ وأن

$n_2 = 1.46$ وعند الطول الموجي $\lambda = 0.82[\mu m]$.

الحل:

يعطى تردد المقياس المعياري بالعلاقة التالية بالنسبة للألياف SI:

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

بالتعويض نجد أن:

$$V = \frac{2\pi(25)}{0.82} \sqrt{1.48^2 - 1.46^2}$$

أما عدد النماذج فيحسب وفقاً للعلاقة:

$$N = 0.5V^2$$

$$N = 0.5 \times 46.45^2 = 1078$$

يبدو واضحاً من هذا المثال بأنه حتى الليف الصغير نسبياً يمكن أن يتحمل عدداً كبيراً من الأساليب (النماذج).

وحيث إن التردد المقيس المعياري يتناسب مع الفرق بين دليلي الانكسار لكل من النواة والكساء، فإن المحافظة على هذا الفرق صغيراً يقلل عدد أساليب الانتشار.

يمكن تصنيف الألياف الضوئية من حيث عدد النماذج وفقاً لقيمة التردد المقيس المعياري كما سنرى لاحقاً إلى:

1- ألياف ضوئية متعددة الأنموذج *Multi Mode*.

2- ألياف ضوئية وحيدة الأنموذج *Single Mode*.

2 - 7 تصنيف الألياف البصرية

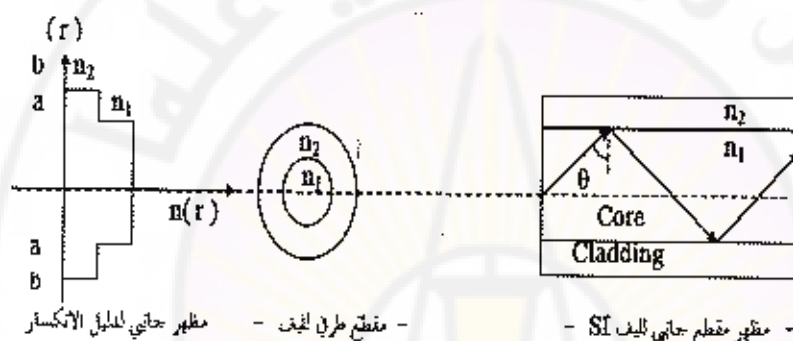
يوجد العديد من التصنيفات للألياف وذلك وفقاً للمعاملات التالية:

- 1- وفقاً لشكل دليل الانكسار في الليف الضوئي.
- 2- وفقاً لعدد النماذج المنتشرة في قلب الليف الضوئي.
- 3- وفقاً لقيمة الفقد أو الضياع في واحدة الطول للليف الضوئي.

توجد تصليفات أقل أهمية، وذلك على سبيل المثال قيمة الفتحة العددية، معدل المعلومات، مسافة النقل، نوع التطبيق.

2- 7- 1 الليف ذو الدليل الدرجي (SI) Step-Index Fiber

يتألف هذا الليف من قلب مركزي ذات دليل انكسار n_1 يحيط به غلاف ذات دليل انكسار n_2 كما هو مبين في الشكل (7-2).



الشكل (7-2)

يتطلب التوجيه الكامل للأشعة في قلب الليف SI، وحتى يتحقق ذلك يجب أن تكون زاوية الانكسار θ مساوية للزاوية الحرجة θ_c وتعطى الزاوية الحرجة للليف بالعلاقة التالية:

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1$$

أيضاً يعطى تغير دليل الانكسار الجزئي Δ (النسبي) الذي هو محددة لقيمة مهمة

بالعلاقة:

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

تبلغ قيمة Δ النموذجية للألياف من نوع SI بحدود 0.01.

إن للألياف ذات الدليل الدرجي ثلاثة أشكال شائعة: نواة زجاجية مكسوة بزجاج ذي دليل انكسار أصغر بقليل، ونواة من زجاج سيليكات مكسوة ببيلاستيك، ونواة بلاستيكية مكسوة ببيلاستيك آخر.

عموماً فإن درجة دليل الانكسار تكون أصغر للألياف التي تتكون كلياً من الزجاج، وتكون أكبر بقليل للألياف المكونة من السيليكا والمكسوة بالبيلاستيك (PCS)، وتكون أكبر من أجل البنى المكونة كلياً من البيلاستيك.

يعود هذا المدى المحدود من أدلة الانكسار المتوافرة لأنواع الزجاج، وإلى المدى الأعلى بقليل لأنواع البيلاستيك.

إن خسارة التخميد للألياف المكونة كلياً من الزجاج هي على العموم أقل من الخسارة في الألياف (PCS) أو في الألياف المكونة كلياً من البيلاستيك. تتوفر ألياف مكونة كلياً من الزجاج ذات خسارات تبلغ بحدود بضعة dB/km ، أو أقل وتبلغ خسارات ألياف (PCS) بحدود $8[dB/km]$ ، وتصل خسارات الألياف المكونة كلياً من البيلاستيك إلى بضعة مئات من الـ dB/km .

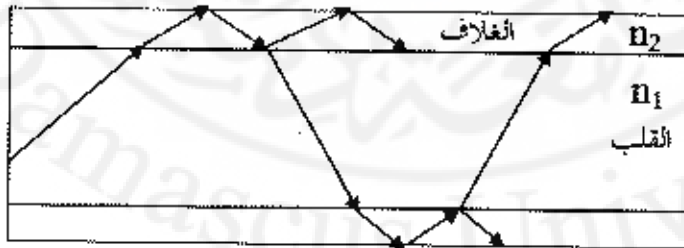
إن الألياف المكونة كلياً من الزجاج أقل خسارة وأصغر انبساط نبضة ظاهري. بسبب هذه الخصائص تفيد هذه الألياف من أجل معدلات عالية نوعاً ما من المعلومات أو من أجل مسافات طويلة إلى حد ما. إن قيمة N_A المنخفضة للألياف الزجاجية تنتج خسارات كبيرة عند الاقتران مع المنبع الضوئي وتعوض خسارة الإرسال المنخفضة هذه المشكلة جزئياً. إن الأقطار النموذجية للنوى تبلغ $(50[\mu m], 100[\mu m], 200[\mu m])$. تستخدم ألياف (PCS) ذات

الخسارة الأكبر لوصلات أقصر. تؤدي فتحات نفوذها العددية الأكبر إلى زيادة كفاءة الاقتران بالمنبع، إلا أن هذه الميزة تؤدي إلى فقد في الليف الطويل بسبب الامتصاص المتزايد.

تستعمل ألياف (PCS) عندما تكون أطوال المسارات أقل من بضعة مئات من الأمتار وأن أقطار النوى من فئة $200[\mu m]$ تكون نموذجية لهذه الألياف. يُحسن قطر النواة الكبير كفاءة الاقتران بالمنبع.

تستعمل الألياف المكونة كلياً من البلاستيك للمسافات القصيرة جداً فقط وذلك بسبب خسائر الانتشار العالية فيها. وتكون أطوال مساراتها عادة أقل من بضعة عشرات من الأمتار. إن أقطار نوى بمرتبة $1[mm]$ تكون نموذجية.

إن نظرة إلى البنية ذات الدليل الدرجي تشير إلى أنه يمكن أيضاً التقاط الضوء بالانعكاس الداخلي الكلي عند حد الفصل الخارجي للغلاف. إذا كانت المادة التي تحيط بالغلاف ذات دليل انكسار أصغر من دليل انكسار الغلاف نفسه. يبين الشكل (2-8) مسارات الشعاع الممكنة. تكون زاوية الشعاع عند السطح المبني للقلب أقل من الزاوية الحرجة وهكذا يتم إرسال بعض الضوء إلى الغلاف. يصطدم هذا الضوء بالسطح الخارجي للغلاف بزاوية أكبر من الزاوية الحرجة لذلك الحد الفاصل، وينعكس كلياً عائداً نحو محور الليف الضوئي. إن الضوء الذي يمثل هذا الشعاع أن يغادر الليف أبداً وسيوجه بواسطة هذا الليف.



الشكل (2-8)

مثال 2 - 3

لدينا ليف زجاجي محاط بالهواء له المواصفات المبينة في الجدول (2-2). احسب الزاوية الحرجة عند الحد الفاصل بين القلب والغلاف الهوائي.

الحل:

باستعمال معادلة الزاوية الحرجة مرة ثانية نجد أن:

$$\theta_c = \sin^{-1}(1/1.46) = 43^\circ$$

يجب أن يقارن هذا بأسلوب النواة حيث:

$$\theta_c = \sin^{-1}(1.46/1.48) = 80.6^\circ$$

مع العلم أن θ_c هي زاوية الشعاع اعتباراً من العمود على حد الفصل، ويمكن أن نرى كيف تنتشر أشعة الغلاف بميل أكبر من أشعة القلب بالنسبة لمحور الليف.

2 - 7 - 2 الليف ذو الدليل المتدرج (GRIN) Graded-Index Fiber

يملك الليف ذو الدليل المتدرج (GRIN) مادة قلب ذات دليل انكسار يتغير تبعاً للبعد عن محور الليف.

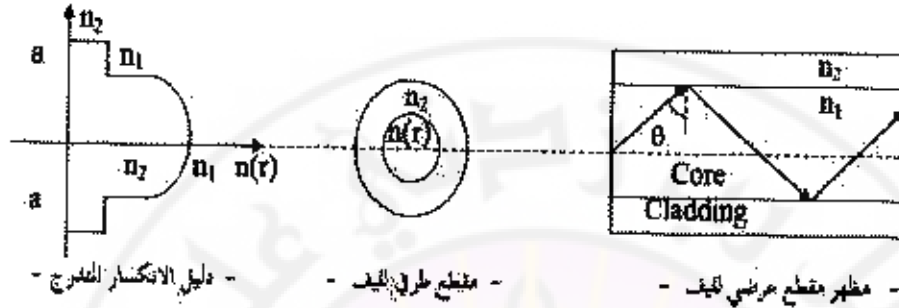
تعرف (GRIN) بأنها الألياف التي تصل فيها الأشعة الضوئية ذات المسارات المختلفة في اللحظة نفسها دون أي تأخير زمني.

يوصف تغير دليل الانكسار بما يلي:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2(r/a)^2 \Delta} : r \leq a \quad (11-2)$$

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2 : r > a \quad (12-2)$$

إن هذه البنية *GRIN* تختلف تماماً عن بنية *SI* كما هو مبين بالشكل (9-2):



الشكل (9-2)

حيث : n_1 دليل الانكسار على طول الليف.

n_2 دليل الانكسار للغلاف.

a نصف قطر القلب.

θ ثابت الشكل الذي تغير المظهر الجانبي لدليل الانكسار.

Δ حاصل الفرق النسبي لأدلة الانكسار وتعطى بـ:

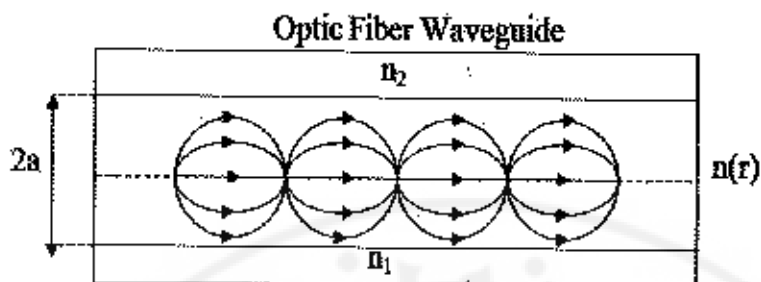
$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

ومن أجل الحالة العادية حيث n_1 أكبر من n_2 نحصل على النتيجة التقريبية التالية

كما مررت معنا سابقاً:

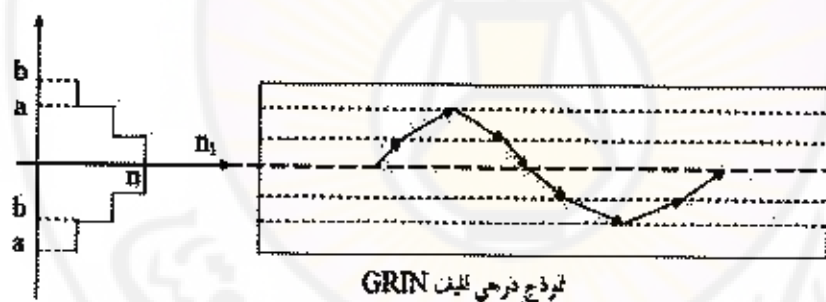
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

تنتشر الأشعة الضوئية في الليف بطريقة التذبذب المبينة في الشكل (10-2).



الشكل (10-2)

يسبب دليل الانكسار المتغير أن تتوجه الأشعة من جديد ويستمرار نحو محور الليف،
وتؤدي التغيرات الخاصة في المعادلتين (11-2)، (12-2) إلى إعادة توجيه الأشعة دورياً،
ويمكننا أن نوضح هذا التمثيل الجديد بتمثيل التغير المتواصل في دليل الانكسار بسلسلة من
التغيرات الدرجية الصغيرة كما يوضح الشكل (11-2):



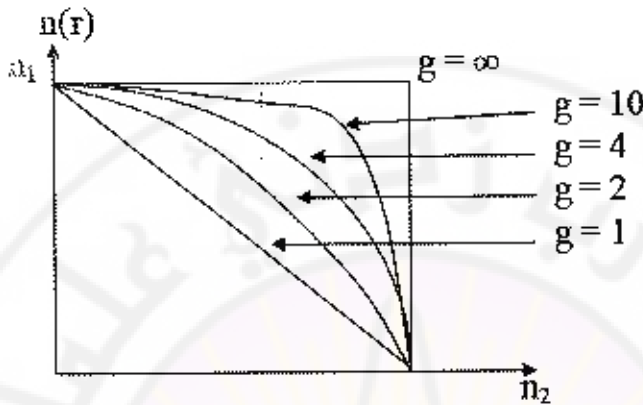
نموذج درجي لليف GRIN

الشكل (11-2)

يمكن أن نصنع هذا النموذج بالدقة التي نرغبها وذلك بزيادة عدد الدرجات.

إن العديد من ألياف GRIN تشبه هذا النموذج الدرجي، وذلك لأن نواها قد صنعت
على شكل طبقات.

يتبع انحناء الأشعة عند كل درجة صغيرة قانون *Snells* يأخذ ثابت الشكل g قيمة مختلفة، وذلك ضمن المجال $[1, \infty)$ وذلك كما هو مبين بالشكل (2-12).



الشكل (2-12)

عندما تكون $g = 2$ في المعادلة (2-11) يصبح دليل انكسار القلب ما يلي:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2(r/a)^2 \Delta}$$

من أجل $\Delta \ll 1$ كما هو الحال عادة يمثل هذا التغير عادة على نحو ملائم بما

يلي:

من أجل $r \leq a$:

$$n(r) = n_1 [1 - 2(r/a)^2 \Delta]$$

ومن أجل $r > a$ تكون:

$$n_2 = n_1 (1 - \Delta)$$

يدعى توزيع دليل الانكسار هذا المظهر الجانبي ذي القطع المكافئ، وتكون فتحة النفوذ العددية من أجل المظهر الجانبي ذي القطع المكافئ كما يلي:

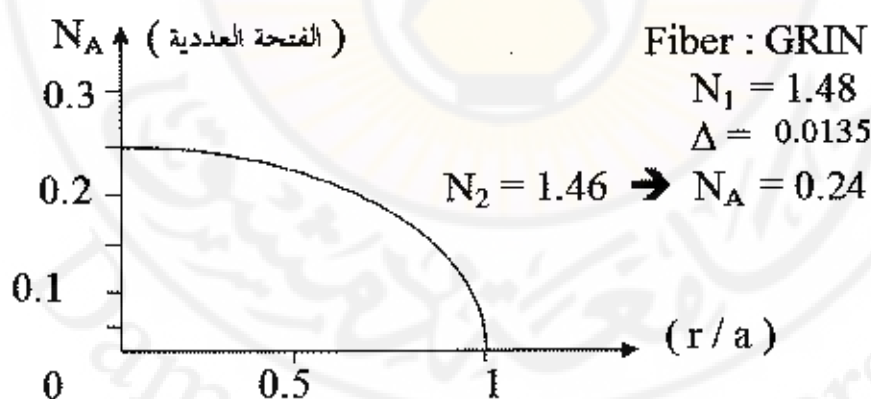
$$N_A = n_1 (2\Delta)^{1/2} \sqrt{1 - (r/a)^2}$$

من أجل $n_1 = 1.48$ و $\Delta = 0.0135$ تعطي هذه النتائج القيم التالية $n_2 = 1.46$ و $N_A = 0.24$ في المحور. وهي القيم ذاتها من أجل الليف ذي الدليل الدرجي.

إن قيمة N_A المحورية لليف ذي قطع مكافئ هي $N_A = n_1 \sqrt{2\Delta}$.

تكون فتحة النفوذ العددية لـ SI: $N_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ عندما $g = \infty$ فينتج أن $n(r) = n_1$ ضمن القلب ويبقى دليل الانكسار عند n_2 في الغلاف. وهذا هو ليف من نوع Step-Index.

يبين الشكل (13-2) تغير N_A مع النسبة r/a ذي دليل انكسار قطع مكافئ $\Delta = 0.0135$ و $n_1 = 1.48$.



الشكل (13-2)

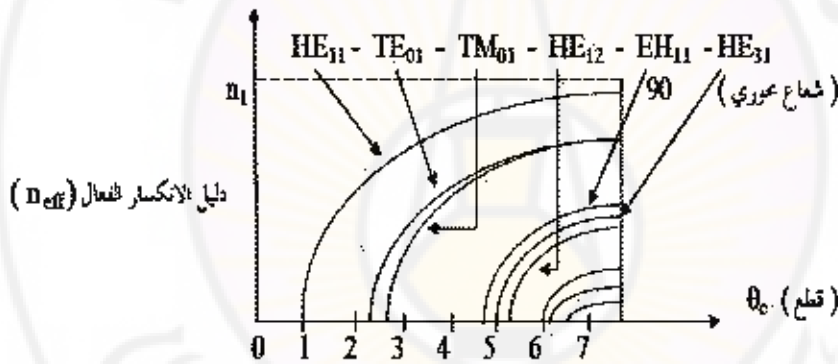
2 - 7 - 3 نماذج في الألياف ذات الدليل الدرجي *Modes In Step-Index Fibers*

يتم تحديد عدد النماذج المنتشرة في قلب الليف الزجاجي من نوع *SI* استناداً إلى V ، وهو التردد المقبس المعياري والذي يعطى بالعلاقة التالية:

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

حيث a هو نصف قطر القلب و λ طول موجة الضوء.

باستعمال V يمكن رسم مخطط واحد يطبق على مجموعة من القيم (λ, a, n_1, n_2) بدلالة دليل الانكسار الفعال n_{eff} كما في الشكل (2-14):



الشكل (2-14)

يبين المخطط وجود عدة نماذج (*Modes*).

إن الأساليب (*النماذج*) TE, TM هي أساليب مغناطيسية عرضية وكهربائية عرضية.

إن الأساليب HE, EH هي أساليب هجينة يحتوي كل منها على مركبات الحقلين الكهربائي والمغناطيسي وتشكل منحى محور الليف.

عدد قيمة ثابتة من V يمكن أن تنتشر عدة أساليب، ولكل واحد منها دليل انكسار مختلف ويؤدي هذا الشرط إلى التشوه الظاهري.

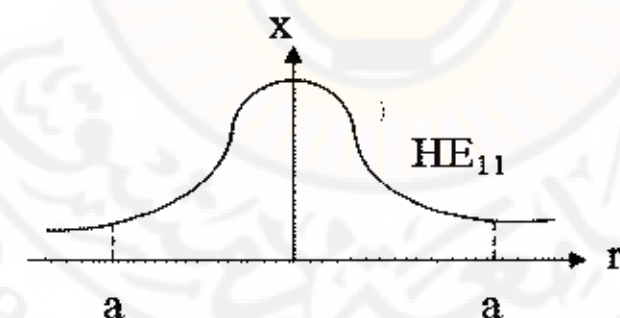
وكما هو الحال في الدليل الموجي الطبقي تقطع (Cut-off) الأساليب عندما تنتشر أشعتها عند الزاوية الحرجة. إن الأشعة البعيدة عن القطع تنتشر تقريباً مباشرة في الليف و بقرب 90° .

وعدد قسم كبيرة من V ستنتشر عدة أساليب أخرى. تطابق قيمة كبيرة من V نصف قطر نواة كبير لمبياً.

وعندما تكون $V > 10$ يقرب عدد الأساليب (المتضمنة لجميع الاستقطابات) كما مر معنا سابقاً بالعلاقة التالية:

$$N = 0.5V^2$$

إن الأسلوب ذا المرتبة الأدنى للليف SI هو الأسلوب HE_{11} ، وإن نمط حقله العرضي ذو شكل غاوسي تقريباً. وإن النمط متناظر دائرياً كما في الشكل (2-15):



النمط HE_{11} ذي المرتبة الأدنى في ليف من نوع SI

الشكل (2-15)

وكما في دليل الموجة الطبقى يوجد حقل سريع الزوال مضطرب خارج النواة ولجميع الأساليب. وكلما كان الأسلوب أقرب إلى القطع كان اختراق الموجة في الغلاف أعظم. بعيداً عن حالة القطع تملأ موجة منتشر بكاملها تقريباً في النواة. يسمى الليف الزجاجي وحيد النمذج (الأسلوب) إذا قطعت جميع الأساليب ما عدا الأسلوب H_{E11} .

يحدث هذا إذا كانت $V < 2.405$ أي وفقاً للعلاقة التالية:

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{2.405}{2\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{2.405}{2\pi N_A} \quad (13-2)$$

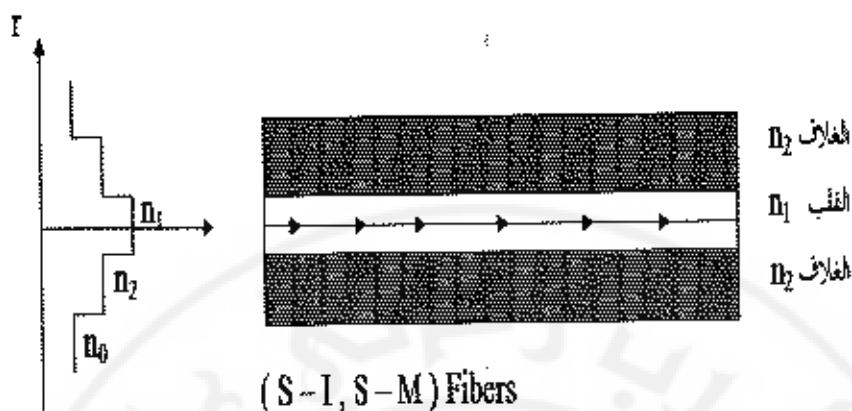
كشرط للانتشار وحيد النمذج *Single - Mode*.

مثال 2 - 4

ما أنصاف الأقطار العظمى المسموح لها لليف مكون كائناً من الزجاج إذا كان للدليل الموجي أن يتحمل أسلوباً وحيداً $0.82[\mu m]$ وأن $n_1 = 1.48$ و $n_2 = 1.46$.

الحل:

وفقاً للمعادلة (13-2) نجد أن $a = 1.3[\mu m]$. ونستنتج أن الألياف وحيدة الأسلوب ستكون صغيرة جداً، ويجعل n_2 أقرب إلى n_1 وبالعامل عند أطوال موجية أطول يمكن عندها أن يزداد قطر القلب. إن الألياف وحيدة النمذج *Single - Mode* العملية ذات أقطار قلب تتراوح بين $4[\mu m]$ و $12[\mu m]$. يبين الشكل (16-2) هذا النوع من الألياف والذي يسمى *Step Index - Single Mode*.



الشكل (2-16)

إن قطر الغلاف لهذا النوع من الألياف يكون عملياً بحدود $125[\mu m]$.

مثال 2 - 5

المطلوب تحديد طول موجة القطع للليف بصري قطره $5[\mu m]$ مع العلم أن معامل الانكسار للقلب هو $n_1=1.5$ و $n_2=1.48$.

الحل:

لدينا:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} N_A$$

$$N_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1.50^2 - 1.48^2} = 0.224$$

$$\lambda_c = \frac{2\pi \times 2.5}{2.405} \times 0.224 = 1.59[\mu m]$$

وهذا الطول الموجي يقع تقريباً في منطقة الإرسال الثالثة.

2 - 7 - 4 نماذج في الألياف البصرية ذات الدليل المتدرج (GRIN)

يوصف الليف الضوئي ذو الدليل المتدرج بالعلاقة (2-11) وعندما $g = 2$ أي أن المظهر الجانبي ذو قطع مكافئ.

يعطى دليل الانكسار الفعال للأسلوب (النموذج) الموصوف بالأعداد الصحيحة p و q بالعلاقة:

$$n_{eff} = \frac{\beta \cdot p \cdot q}{K_0} = n_1 - (p + q + 1) \frac{\sqrt{2\Delta}}{K_0 a} \quad (14-2)$$

حيث : β عامل الانتشار الطولي
 K_0 عامل الانتشار في الفراغ الحر .

في النموذج الأدنى يكون $p = q = 0$ تتزايد الأعداد الصحيحة p, q بشكل منفصل لكل أسلوب جديد.

بدلالة التردد المقيس المعياري يقرب العدد الكلي للأساليب في ليف (GRIN) متعدد الأساليب $N = V^2/4$ من أجل قيم كبيرة من V ، وهذا هو نصف عدد النماذج في الليف SI.

على سبيل المثال من أجل نواة (قلب) $2a = 50[\mu m]$ و $n_1 = 1.48$ و $n_2 = 1.46$ سيكون عدد النماذج 539 عند $0.82[\mu m]$ وسيكون للأسلوب ذي المرتبة الأدنى حقل كهربائي يعطى بالعلاقة التالية:

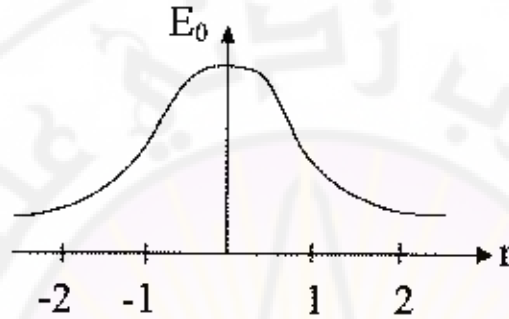
$$E_{00} = E_0 \cdot e^{\alpha^2 r^2 / 2} \sin(\omega t - \beta_{00} Z) \quad (15-2)$$

حيث:

$$\alpha = (K_0 n_1 / \beta)^{1/2} (2\Delta)^{1/4}$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \text{ و}$$

إن النمط المرسوم في الشكل (17-2) متناظر دائرياً وذو شكل غاوصي



الشكل (17-2)

نلاحظ في هذا الشكل نمطاً عرضياً للنموذج ذي المربعة الأدنى في ليف *GRIN* ذي مظهر جانبي على شكل قطع مكافئ.

إن جميع الأدلة الموجبة العازلة لها أدلة انكسار فعالة مقيدة بالعلاقة التالية:

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

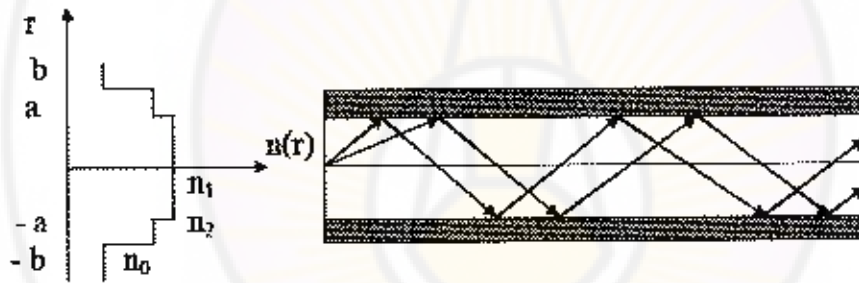
يحدث قطع أي نموذج عندما يساوي دليل الانكسار n_2 ، ويمكن أن نحدد من هذه المعلومات العلاقة بين حجم القلب وطول الموجة وأدلة الانكسار عند القطع. وإذا فعلنا هذا للنموذج $(1, 0)$ أي $(p = 1, q = 0)$ فإننا نجد شرط الانتشار وحيد النموذج. نحقق هذا بأن نضع $n_{eff} = n_2$ و $p=1$ و $q=0$ في المعادلة (14-2) علماً بأن $K_0 = 2\pi/\lambda$. وبإجراء الحل من أجل القيمة a/λ ينتج شرط الأسلوب الوحيد وهو:

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{1.4}{\pi \sqrt{n_1(n_1 - n_2)}} \quad (16-2)$$

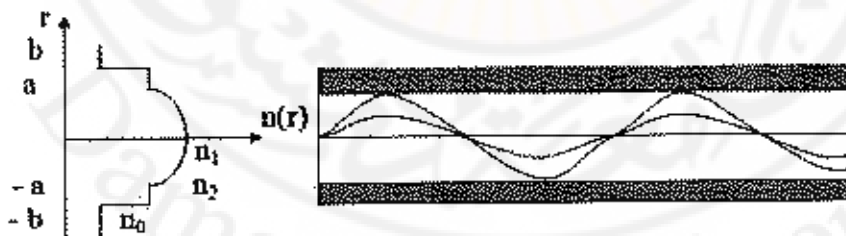
إن تحليلاً أكثر دقة يغير العامل 1.4 إلى العدد 1.2 ومرة ثانية إذا جعلنا n_1 قريبة إلى n_2 وبالعامل عند أطوال موجة أطول، سيسمح هذا بحجم قلب أكبر لأجل ليف وحيد الأنموذج.

بالمقارنة بين المعادلتين (13-2) و(16-2) نجد أن القيمة العظمى لـ a/λ من أجل انتشار وحيد الأنموذج هي أكبر بـ 1.6 مرة لألياف قطع مكافئ مما هي عليه لألياف SI .

يبين الشكل (18-2) أليافاً ضوئية متعددة الأنموذج ذات شكل قرينة انكسار درجي وشكل قرينة انكسار مندرج.



- ليف ضوئي متعدد النماذج ذو قرينة انكسار درجي -



- ليف ضوئي متعدد النماذج ذو قرينة انكسار مندرج -

الشكل (18-2)

مثال 2 - 6

لدينا ليف زجاجي نوع *GRIN* ذو مظهر جانبي بشكل قطع مكافئ فيه $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ والمطلوب: احسب التغير الجزئي لدليل الانكسار، وأكبر حجم نواة من أجل انتشار وحيد النموذج، ومن ثم احسب قيمة n_{eff} للأسلوب المنتشر باستخدام حجم النواة المحسوب علماً بأن طول الموجة المستخدم يساوي $0.82[\mu m]$.

الحل:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1.48 - 1.46}{1.48} = 0.0135$$

ويتطبيق المعادلة (2-16) نجد أن:

$$\frac{a}{\lambda} < \frac{1.4}{\pi \sqrt{n_1(n_1 - n_2)}} = 2.6$$

$$a = 2.6 \times \lambda = 2.6 \times 0.82 = 2.1[\mu m]$$

نضع $p = q = 0$ و $K_0 = 2\pi / \lambda$ في المعادلة (2-14) فلحصل على ما يلي من أجل النموذج $(0,0)$:

$$n_{eff} = n_1 - \frac{\sqrt{2\Delta}}{2\pi(a/\lambda)} = 1.47$$

استناداً إلى كل ما سبق يمكن أن نصنف الألياف الضوئية إلى العديد من الأنواع وذلك وفقاً لشكل عامل الانعكاس ووفقاً لعدد النماذج المنتشرة إلى ما يلي:

1- ليف ضوئي أحادي النموذج ذو شكل قربة انكسار درجة - *Single Mode Step-Index Fiber* أو *SM-SI*.

2- ليف ضوئي متعدد الأنموذج ذو شكل قرينة انكسار درجية - *Multi Mode Step Index Fiber* أو *MM-SI*.

3- ليف ضوئي متعدد الأنموذج ذو شكل قرينة انكسار مندرجة بشكل قطع مكافئ *Multi Mode Graded-Index Fiber* أو *MM-GI*.

4- ليف ضوئي وحيد الأنموذج ذو شكل قرينة انكسار مندرجة بشكل قطع مكافئ وهذا النوع قابل في التطبيقات نظراً إلى عدم وجود الحاجة إلى التدرج في شكل قرينة الانكسار *Single Mode Graded-Index Fiber* أو *SM-GI*.

2 - 7 - 5 التأخير الزمني في الألياف متعددة الأنموذج ذات شكل قرينة الانكسار الدرجي

تنتشر النماذج في الليف الضوئي نوع (*MM - SI*) بطرق متعددة كما في الشكل (2-18). واحد من هذه النماذج أو الأشعة ينتشر في قلب الليف الضوئي وفق محور الليف I وهو أقصر هذه الطرق، وبقيّة الأشعة تنعكس وتتكسر بزوايا مختلفة في القلب حيث تقع ضمن الزاوية الحرجة $\theta_c = \theta_{max}$ كما هو مبين سابقاً عند نهاية الليف الضوئي تصل هذه الأشعة بشكل متتابع بعد تأخير زمني يمكن حسابه وفقاً للعلاقة التالية:

$$t = \frac{L \cdot n_1}{C \cdot n_2} (n_1 - n_2) = \frac{L \cdot n_1 \cdot \Delta}{C} \quad (17-2)$$

حيث:

t مقدار التأخير الزمني.

C سرعة انتشار الضوء.

L طول الليف الضوئي.

Δ حامل الفرق النسبي لمعاملات انكسار الضوء حيث: $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$.

بالنسبة إلى قيم معيارية عندما $n_1 = 1.5$ و $\Delta = 1\%$ نحصل عندئذ على تأخير زمني

$$\text{قدره } t / L = 50[\text{ns/km}]$$

استناداً إلى التأخير الزمني t هذا تم التوجه إلى تصنيع الألياف الضوئية المندرجة

بقرينة الانكسار (GRIN).

2 - 7 - 6 تصنيف الألياف البصرية وفقاً لمعامل التخماد α

يحدّ عامل التخماد α من العوامل المهمة لتحديد نوعية الألياف، حيث إن هذا العامل يحدد نوع التطبيق الذي يستخدم فيه الليف الضوئي. استناداً إلى ذلك يمكن تصنيف الألياف الضوئية من وجهة نظر هذا المحدد إلى ثلاثة أنواع أساسية:

1- ألياف زجاجية منخفضة التخماد وهي تستخدم في الاتصالات البعيدة المدى حيث إن

مربّبة التخماد بحدود بضعة dB/km وعرض حزمة إرسال $B \geq 1000[\text{MHz}]$

وتصنع هذه الألياف بشكل كامل من الزجاج.

2- ألياف زجاجية متوسطة التخماد وهي تستخدم في الشبكات المحلية ومعدل التخماد

$\alpha \geq 6[\text{dB/km}]$ ، ويعرض حزمة تتجاوز $500[\text{MHz}]$ حيث تصنع من السيليكا

والبلاستيك للقلب والغلاف على التوالي.

3- ألياف زجاجية عالية التخماد والتي تستخدم للأغراض الخاصة حيث عرض حزمة

الإرسال لا يتجاوز $200[\text{MHz}]$ وتصنع من البلاستيك لكل من القلب والغلاف.

يبين الجدول التالي (2-4) بعض مواصفات الليف الزجاجي من قبل الـ CCITT

عام 1980 عند الطول الموجي $0.8 - 0.9[\mu\text{m}]$.

خواص الألياف الضوئية	القيمة العددية
$\alpha \leq 10 [dB/km]$	$B \geq 200 [MHz]$
$\alpha \leq 6 [dB/km]$	$B \geq 500 [MHz]$
$\alpha \leq 3 [dB/km]$	$B \geq 1000 [MHz]$
N_A	$0.15 - 0.24 \pm 0.02$
معامل الانكسار	قطع مكافئ
$a - b$	$50 \mu m \pm 6\%, 125 \mu m \pm 24\%$

الجدول (4-2)

2 - 8 التشتت وتشوه النبضة ومعدل المعلومات *Distortion, Puls*

Distortion, and Information Rate

اعتمدنا في دراستنا السابقة أن المصادر الضوئية المستخدمة في الأنظمة اللييفية ثبت ضوءاً بطول موجة وحيد (أي تردد وحيد)، وهذا يخالف الواقع، فالمصادر الحقيقية تنتج إشعاعاً ضمن مدى من أطوال الموجة، وهذا المدى هو عرض خط المنبع أو العرض الطيفي. وكلما كان عرض الخط أصغر كان المنبع أكثر تماسكاً. يثبت المنبع المتماسك بشكل كامل ضوءاً بطول موجة وحيد، وهكذا يكون أحادي اللون تماماً. يبين الجدول (5-2) عرض الخط $\Delta\lambda$ الطيفي لبعض المصادر المستخدمة في الاتصالات الضوئية.

عرض الخط	المنبع
$20 - 100 \text{ nm}$	ثنائي باعث للضوء <i>LED</i>
$1 - 5 \text{ nm}$	ثنائي ليزري <i>LD</i>
0.1 nm	ليزر <i>Nd : YAG</i>
0.002 nm	ليزر <i>HeNe</i>

الجدول (5-2)

يعطى التحويل بين العرض بأطوال الموجة $\Delta\lambda$ وبين عرض الحزمة بالتردد كما يلي:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (18-2)$$

حيث:

f التردد المركزي.

λ طول الموجة المركزي.

Δf مدى الترددات المشعة.

$\Delta\lambda$ عرض الخط لطول الموجة.

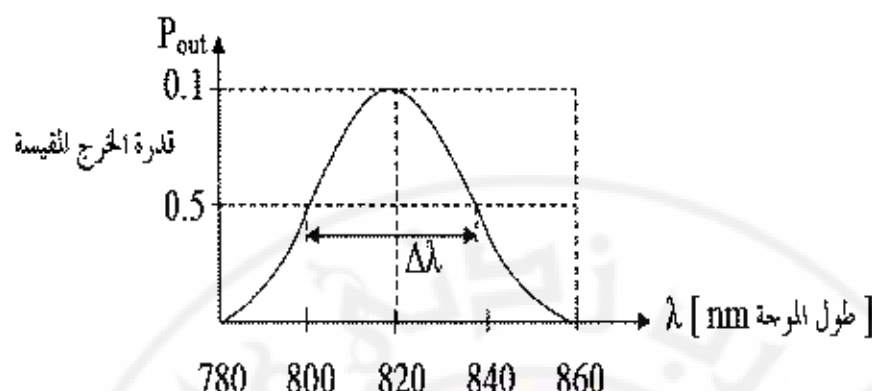
إن هذا التحويل هو بكل بساطة التعبير الرياضي حيث عرض البث الجزئي هو ذاته سواء حُصِبَ على أساس توزيع طول الموجة أو توزيع ترددي. يبين الشكل (2-19) رسم بياني لتوزيع طول الموجة لقدرة مُشعَّة بواسطة ثنائي LED .

يسمى محتوى الإشارة من طول الموجة أو التردد بطيف الإشارة. طول الموجة المركزية لهذا الثنائي $(0.82[\mu m])$ or $820[nm]$ ويؤخذ عادة عرض الخط بما يساوي العرض عند نقطتي نصف القدرة وهكذا في هذا المثال تكون:

$$\Delta\lambda = 30[nm] \text{ أو } \Delta\lambda = (805 - 835[nm])$$

ويكون عرض الحزمة الكسري:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{30}{820} = 0.037 = 3.7\%$$



الشكل (19-2) طيف الثنائي الباعث للضوء LED

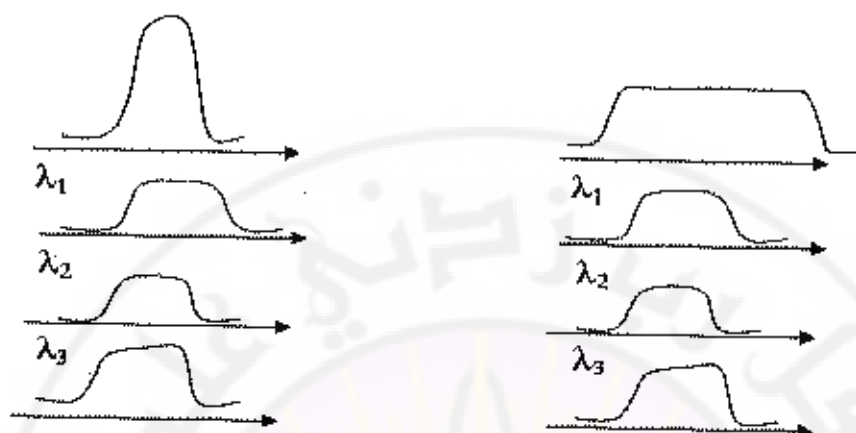
تعدّ ثنائيات الليزر بموجب الجدول (5-2) أكثر تماسكاً من ثنائيات الـ LED حتى أن ليزريات أنصاف النواقل نوع *Nd YAG* وهي اختصار العبارة التالية: (Neodymium Yttrium Aluminum – Garnet Laser) تكون أفضل.

وعلى أي حال إن الحجم الصغير ومتطلبات القدرة المنخفضة لمصابيح LED وLD يجعلها الأفضل من الناحية العملية من أجل الأنظمة اللييفية. إن العرض الطبيعي للمنبع يحد من سعة المعلومات لنظام ليفي، وإنه يمكن إهمال عدم التماسك إذا كانت سعة التحديد أكبر مما هو مطلوب.

2 - 9 تشتيت المادة وتشوه النبضة

يعرّف التشتيت بأنه تغير السرعة مع تغير طول الموجة. عندما يكون التغير ناتجاً عن خواص المادة تدعى النتيجة تشتيت المادة وبالنسبة للألياف وأطلة الموجة الأخرى يمكن أن يحدث التشتيت بواسطة البنى نفسها. يبين الشكل (20-2) انبساط النبضة الذي يسببه الانتشار

خلال وسط مشتت، تحتوي النبضة كاملة أطوال موجة $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ وكل واحدة منها تنتشر بسرعة مختلفة.



الشكل (20-2)

يمكن إنقاص التشوه الذي يسببه تشتيت المادة (أو تشتيت دليل الموجة) باستعمال منابع ذات حزم أضيق أي باستعمال منابع أكثر تماسكاً. وبهذا الشأن يتميز ثنائي الليزر عن ثنائي الـ *LED*.

عندما نجمع بين تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة يؤخذ بعين الاعتبار إشارة البساط النبضة.

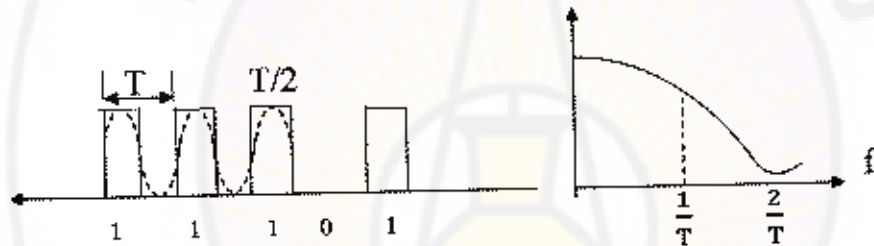
عند $1.3[\mu m]$ يكون تشتيت المادة صفرًا للسيليكا النقية، ويختفي انبساط النبضة الناتج عن تشتيت المادة عند طول الموجة هذا. إن الزجاج المستخدم في الاتصالات البصرية والتي أساسها السيليكا ذات تشتيت مادة معدوم (صفر) عند طول موجة يقرب $1.3[\mu m]$ وأكبر.

إن إضافة الشوائب (التطعيم) يمكن أن يغير طول الموجة ذات التشعيت الصفري بحوالي $0.1[\mu m]$.

2 - 10 معدل المعلومات Information Rate

يحدد النبضات النبضة سعة المعلومات لأي نظام إرسال وإن الانبساط يعتمد بشكل رئيسي على تشعيت المادة.

يمكن تطبيق المعادلات التي تربط النبضات النبضة ΔT على كل من الوصلات الرقمية والوصلات التماثلية وعلاقتها بمعدل المعلومات. لنعبر إشارة عودة إلى الصفر رقمية (RZ) كما يبينها الشكل (21-2).



الشكل (21-2)

الزمن يحدد لكل خانة (bit) موقع زمني T ويكون معدل المعطيات:

$$R = \frac{1}{T} [bps]$$

تشغل النبضات في هذه الصيغة نصف الفترة الزمنية وتكون مدة النبضة $T/2$. ترسل إشارة RZ بشكل مناسب بوساطة نظام ذي عرض نطاق $1/T[Hz]$ ، وذلك لأن معظم قدرة هذه

الإشارة تقع تحت هذا التردد. للاستخراج الصحيح للعلاقة سنستخدم التردد $3[dB]$ الكهربائي من أجل عرض نطاق النظام:

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

حيث $f_{3dB} = 0.35/\Delta\tau$ هو التردد عند $3[dB]$ وهو قيمة معيارية، إذا معدل المعطيات خلال الطول L يعطى بالعلاقة:

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

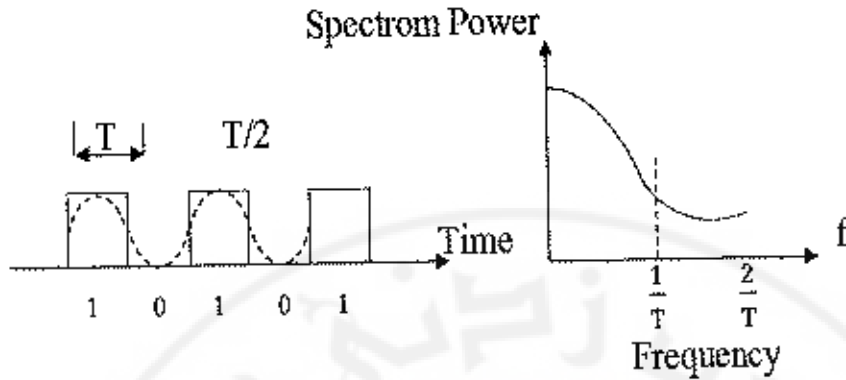
يمكننا أيضاً أن نحصل على هذه النتيجة الأخيرة بافتراض التبسيط نبضي مسموح مساوي 70 % من مدة النبضة، حيث إن مدة لبضة RZ هو نصف دور التكرار فإن هذا الشرط يعطى:

$$\Delta\tau = 0.7 \times T/2 = 0.35T$$

أي أن:

$$R = 1/T = 0.35/\Delta\tau$$

أما في حالة إشارة NRZ فإن الزمن المخصص لكل خانة هو T وإن معدل المعطيات هو $1/T$ كما هو موضح في الشكل (2-22):



الشكل (2-22)

إن عرض النطاق المطلوب للإرسال هو $1/2T$ وهو مساوٍ نصف ما هو مطلوب في نظام RZ . يعود ذلك بسبب أن نبضات NRZ أطول بمرتين من نبضات RZ وأن عرض نطاق النبضة يتناسب عكسياً مع مدة النبضة. إن معدل المعطيات الأعظمي المسموح هو:

$$R = 1/T = 2f$$

حيث f هو عرض النطاق القديم.

باستعمال عرض النطاق الكهربائي $3[db]$ ينتج:

$$R_{NRZ} = \frac{1}{T} = f_{3db}(electrical) = \frac{0.7}{\Delta\tau}$$

أو هي بعلاقة أخرى:

$$R_{NRZ} \times L = \frac{0.7}{\Lambda(\tau/L)}$$

إن البساط النبضة المسموح به هو 70 % من مدة النبضة من أجل قطار نبضي

$.NRZ$

يبين الجدول (6-2) أمثلة عن سعة المعلومات (محددة بتشتيت المادة في السيليكا).

كهربيائي		بصري					المصدر
$R_{RZ} \times L$	$f_{3dB} \times L$	$R_{NRZ} \times L$	$f_{3dB} \times L$	$\Delta(\tau / L)$	$\Delta\lambda$	λ	
$Gbps \times km$	$Gbps \times km$	$GHz \times km$		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

الجدول (6-2)

مثال 2 - 7

ما حدود التردد والمعديات من أجل وصلة $10[km]$ من أجل المصادر LED و LD والمذكورة في الجدول (6-2).

الحل:

نقوم بقسمة حاصل جداء كل من (التردد $\times$ الطول) و (المعدل $\times$ الطول) على القيمة 10 أي على القيمة $10[km]$.

1- من أجل ثنائي LED عند $0.82[\mu m]$:

$$f_{3dB} = 23[MHz] \rightarrow R_{NRZ} = 32[Mbps]$$

$$f_{3dB}(electrical) = 16[MHz] \rightarrow R_{RZ} = 16[Mbps]$$

2- من أجل ثنائي LED عند $1.5[\mu m]$:

$$f_{3dB} = 67[MHz] \rightarrow R_{NRZ} = 94[Mbps]$$

$$f_{3dB}(electrical) = 16[MHz] \rightarrow R_{RZ} = 47[Mbps]$$

3- من أجل ثنائي LD عند $0.82[\mu m]$:

$$f_{3dB} = 455[MHz] \rightarrow R_{NRZ} = 637[Mbps]$$

$$f_{3dB}(\text{electrical}) = 320[\text{MHz}] \rightarrow R_{RZ} = 320[\text{Mbps}]$$

4- من أجل ثنائي LD عند $1.5[\mu\text{m}]$:

$$f_{3dB} = 3.3[\text{GHz}] \rightarrow R_{NRZ} = 4.7[\text{Gbps}]$$

$$f_{3dB}(\text{electrical}) = 2.33[\text{GHz}] \rightarrow R_{RZ} = 2.33[\text{Gbps}]$$

تشير القيم السابقة إلى تفوق ثنائيات الليزر LD على الثنائيات الباعثة للضوء من أجل معدل معطيات أعلى. إن الأنظمة التي تستعمل ثنائيات ليزر في منطقة طول الموجة الطويلة تكون أكثر تعقيداً وكلفة من أنظمة LED في مجال طول الموجة الأقصر $(0.8[\mu\text{m}]-0.9[\mu\text{m}])$ ولذلك يكون استعمالها فقط حيث يحتاج الأمر تحقيق أداء أعلى.

الفصل الثالث

نظرية انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية في الألياف البصرية

Electromagnetic Waves Theory in Fiber Optics

3-1 مقدمة

إن معرفة المعلومات الخاصة بانتشار الأمواج الكهرومغناطيسية في الألياف الضوئية تعتمد بشكل أساسي على حلول معادلات ماكسويل في وسط متجانس وبصورة خطية، حيث تعتمد هذه المعادلات على المقدار الشعاعي للحقل الكهربائي $\vec{E}$ ، ومقدار الإزاحة لهذا الحقل $\vec{D}$ ، وكذلك على المقدار الشعاعي للحقل المغناطيسي $\vec{H}$ ، وكثافة الفيض المغناطيسي $\vec{B}$.

تعطى معادلات ماكسويل المعتمدة في الألياف الضوئية بالصيغة التالية:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= -\partial \vec{B} / \partial t \\ \nabla \cdot \vec{H} &= \partial \vec{D} / \partial t \\ \nabla \cdot \vec{D} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}\quad (1-3)$$

حيث يرتبط الشعاعان الكهربائيان ببعضهما بالصيغة:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$$

مع العلم أن ثابت العازلية ϵ للمادة (الزجاج) وأن:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

حيث: ϵ_r ثابت العازلية النسبية للزجاج.

وكذلك الأمر بالنسبة إلى الشعاعين المغناطيسيين حيث يرتبطان ببعضهما بالصيغة:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

حيث: μ ثابت النفوذية المغناطيسية للمادة وله الصيغة:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

بشكل عام نعد μ و ϵ لهما قيم ثابتة، ويمكن أن تنتشر الأمواج الكهربائية والمغناطيسية عندها وفقاً للشكل التالي:

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (2-3)$$

حيث:

Ψ : القيمة المتدفقة للموجة المغناطيسية أو الكهربائية.

v : سرعة انتشار الضوء في وسط الإرسال حيث تعطى هذه السرعة بالعلاقة التالية:

$$v = (\epsilon \cdot \mu)^{-1/2} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad (3-3)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

عندما $\epsilon_r = 1, \mu_r = 1$ وبالتالي $C = v$ وهذا محقق عند منطقة الإتصال بين المنيع والليف، وأيضاً بين الليف والليف الثاني فقط.

3 - 2 الموجة المسطحة TEM

إن الحل الرياضي للمعادلة (2-3) له الصيغة التالية:

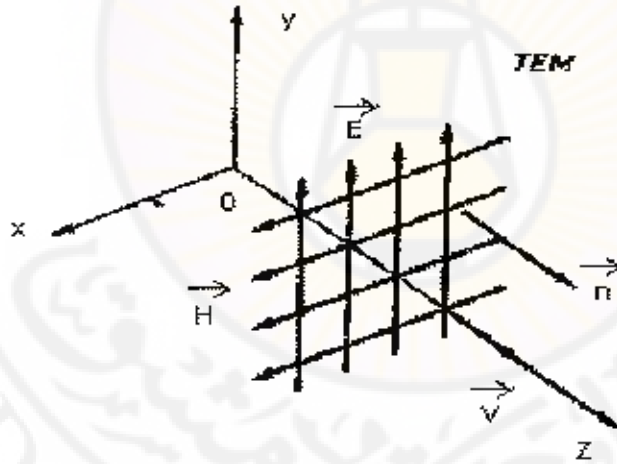
$$\Psi = f\left(t - \frac{1}{v} \vec{n} \cdot \vec{r}\right) \quad (4-3)$$

حيث:

$\vec{n}$ شعاع واحد يشير إلى اتجاه الانتشار .

$\vec{r}$ شعاع المسافة المتعلق بالنقطة المراد حساب قيم الأمواج الكهربائية والمغناطيسية فيها .

يبين الشكل (1-3) شكل الموجة المسطحة TEM المنتشرة في قلب الليف الضوئي والمكونة من $(\vec{H}, \vec{E})$ مع افتراض أن الوسط له ϵ_r ثابت وأن $\vec{n} \times \vec{r}$ يساوي قيمة ثابتة.



الشكل (1-3)

إن الافتراض المبين أعلاه $(\vec{n} \times \vec{r} = \text{ثابت})$ يشير إلى زاوية فرق طور ثابتة أيضاً على طول الليف.

يمكن إعادة كتابة المعادلة (3-4) بالصيغة الجيبية وفقاً لما يلي:

$$g = A \cos\left(\omega t - \frac{\omega}{v} \vec{r} \cdot \vec{F}\right)$$

مع العلم أن:

ω - التردد الزاوي.

A - المطال.

لتبسيط الحل نعتبر أن شعاعاً ثابت الانتشار يعطى بالعلاقة التالية:

$$\vec{k} = \frac{\omega}{v} \vec{n} \quad (3-5)$$

وأن ثابت الانتشار يعطى كقيمة ثابتة بدلالة الطول الموجي كما هو معروف لدينا:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$$

إذا تكتب الموجة الجيبية وفقاً لشعاع ثابت الانتشار بالصيغة:

$$g = A \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

في معظم الأوساط إن سرعة الانتشار v تتعلق بالتردد، لذلك عندما يكون لدينا العديد من الترددات فإن الأمواج مستنتشر بسرعات مختلفة ما يؤدي إلى تشويه الإشارة أو تشتت الإشارة، مما يؤثر في معدل الإرسال كما مر معنا في الفصل التالي.

نفترض أنه لدينا تابع $f(t)$ يتعلق بمدى تغير توزيع الحقل الكهربائي $\vec{E}$ والحقل المغناطيسي $\vec{H}$ ، وهذا التابع له علاقة بالتردد واستناداً إلى تحليل فورييه، يمكن الحصول على المسطحة (العرضانية) المنتشرة في الاتجاه Z بالصيغة التالية:

$$f(z,t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(w) e^{i\theta(w)} \cdot e^{i(wt - kz)} dw \quad (6-3)$$

وهذه المعادلة ليست الحل النهائي للمعادلة (4-3).

إن الحل النهائي للشعاع الكهربائي $\vec{E}$ والمغناطيسي $\vec{H}$ مع افتراض أن ε ليس له علاقة بـ z ، ويمكن أن يكتب بدلالة الإحداثيات الاسطوانية (وهذا هو شكل الليف) (r, φ, z) يمكن أن يحسب وفقاً للمعادلات التالية:

$$\vec{E} = \vec{E}_0(r, \varphi) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (7-3)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(r, \varphi) \exp[j(\omega t - \beta z)]$$

حيث $\beta = \omega/v$ هي سرعة الانتشار.

استناداً إلى معادلات ماكسويل نحصل على المعادلات الموجية:

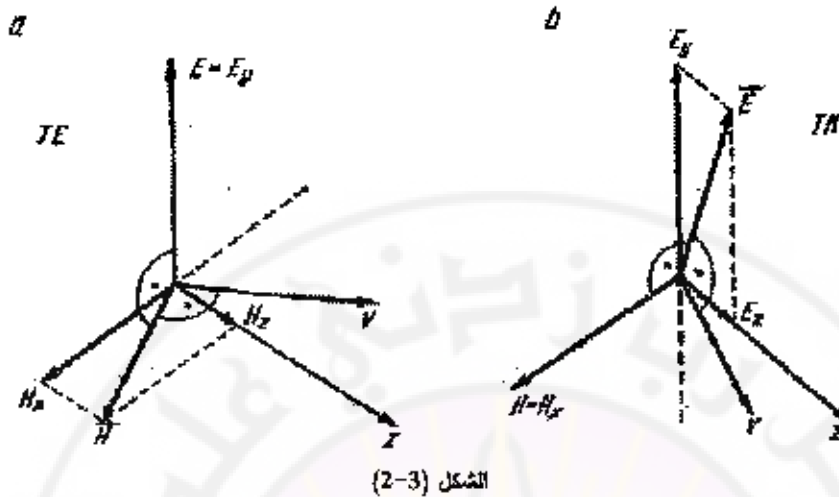
$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{dE_z}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + x^2 E_z = 0$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{dH_z}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} + x^2 H_z = 0$$

حيث إن: $x^2 = k^2 - \beta^2$ وبوضع $E_z = 0, H_z = 0$ على التوالي فإننا نحصل

على الأمواج أو الأنماط العرضية الكهربائية TE والمغناطيسية TM على التوالي كما هي

مبينة بالشكل (2-3)



صوماً إن حل معادلات ماكسويل لجميع الأنماط تتمثل بتوليد جميع أنواع الأنماط في
الليف.

3 - 3 النماذج الكهرومغناطيسية في الألياف البصرية ذات شكل قرينة الانكسار الدرجي

لنبحث أولاً الانتشار في الألياف الضوئية ذات الثابت $\epsilon_1 = \text{const}$ للقلب الأكبر من
الثابت $\epsilon_2 = \text{const}$ للغلاف. من أجل معرفة عدد النماذج المسطحة E_z للحقل الكهربائي
نفترض أن لها الصيغة التالية:

$$E_z = A \cdot f(r) \cdot e^{i\theta} \cdot e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (8-3)$$

حيث إن الحد $e^{i(\omega t - \beta z)}$ يشير إلى مدى ارتباط الحقل الكهربائي بالزمن وبالمسافة
على المحور Z . كما أن الثابت β يجب أن يكون ثابتاً موجياً دائماً.

بالصيغة التفاضلية نعبر عن الانتشار بالعلاقة:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} + (x^2 - \frac{v^2}{r^2})F = 0 \quad (9-3)$$

حيث إن هذه المعادلة من المراتبة الثانية ونميز هنا حالتين مختلفتين:

- الأولى القلب (core) وتحكمها صيغة ببسل $J_v(xr)$.
- الثانية للغلاف (cladding) وتحكمها صيغة هانكسل $k_v(jxr)$.

من أجل القلب يجب أن يكون $r=0$ أما للغلاف فإنه $r \rightarrow \infty$.

استناداً لذلك فإن الحقل الكهربائي والمغناطيسي المنتشر في قلب الليف الضوئي يكتب وفقاً للمعادلات الآتية:

$$E_z = A J_v(xr) e^{iv\phi}$$

$$H_z = B J_v(xr) e^{iv\phi}$$

$$E_r = -\frac{j}{x^2} [\beta x A \frac{dJ_v(xr)}{d(xr)} + j\omega\mu_0 \frac{v}{r} B J_v(xr)] e^{iv\phi}$$

$$E_\phi = -\frac{j}{x^2} [j\beta \frac{v}{r} A J_v(xr) - x\omega\mu_0 B \frac{dJ_v(xr)}{d(xr)}] e^{iv\phi}$$

$$H_r = -\frac{j}{x^2} [-j\omega\epsilon_1 \frac{v}{r} A J_v(xr) + x\beta B \frac{dJ_v(xr)}{d(xr)}] e^{iv\phi}$$

$$H_\phi = -\frac{j}{x^2} [-j\omega\epsilon_1 \frac{v}{r} A \sin^1 \theta \frac{dJ_v(xr)}{dxr} + j\beta \frac{v}{r} B J_v(xr)] e^{iv\phi}$$

مع العلم أن:

$$x^2 = k_1^2 - \beta^2$$

$$k_1^2 = w^2 \varepsilon_1 \mu_0$$

$$A, B - \text{Stale}$$

أما في الغلاف وبعد اعتبار $x = j\gamma r$ فإن مركبات الحقول لها الصيغ:

$$E_z = C K_v(j\gamma r) e^{i\gamma z}$$

$$H_z = D K_v(j\gamma r) e^{i\gamma z}$$

$$E_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left[\beta \gamma C \frac{dK_v(j\gamma r)}{d(j\gamma r)} + w \mu_0 \frac{\gamma}{r} D K_v(j\gamma r) \right] e^{i\gamma z}$$

$$E_\varphi = -\frac{1}{\gamma^2} \left[\beta \frac{\gamma}{r} C K_v(j\gamma r) - \gamma w \mu_0 D \frac{dK_v(j\gamma r)}{d(j\gamma r)} \right] e^{i\gamma z}$$

$$H_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left[-w \varepsilon_2 \frac{\gamma}{r} C K_v(j\gamma r) + \gamma \beta D \frac{dK_v(j\gamma r)}{d(j\gamma r)} \right] e^{i\gamma z}$$

$$H_\varphi = -\frac{1}{\gamma^2} \left[\gamma w \varepsilon_2 C \frac{dK_v(j\gamma r)}{d(j\gamma r)} + \beta \frac{\gamma}{r} D K_v(j\gamma r) \right] e^{i\gamma z}$$

حيث:

$$\gamma^2 = \beta^2 - K_2^2$$

$$K_2^2 = w^2 \varepsilon_2 \mu_0$$

حيث: A, B, C, D ثوابت تتعلق بالشروط الحدية، أما في المنطقة الحدية الفاصلة بين

القلب والغلاف تتساوى قيم الحقول السابقة، ومنه نستطيع تحديد قيم الثوابت الأربعة A, B, C, D :

$$E_z(CORE) = E_z(cladding)$$

$$E_\varphi(CORE) = E_\varphi(cladding)$$

$$H_z(CORE) = H_z(cladding)$$

$$H_\varphi(CORE) = H_\varphi(cladding)$$

إن جملة المعادلات السابقة وتطبيق الشروط الحدية لحصل عندئذ على النماذج (mode) المنتشرة في النيف الضوئي ذي قرينة الانكسار الدرجي.

كحالات خاصة يمكن معرفة النماذج العرضية $T_M - T_E$ بوضع $v=0$ أي:

$$T_M(H_z=0), T_E(E_z=0)$$

وذلك لأن تابع ببسل له خاصية التذبذب.

في الحالة العامة عندما $v \neq 0$ فإننا نحصل على النماذج الهجينة (HYBRID) $HE_{\nu\mu}, EH_{\nu\mu}$ وأيضاً عندما يكون محققاً $H_z \neq 0, E_z \neq 0$ حيث μ هو الجذر التربيعي لتابع ببسل لقيم محددة لـ v .

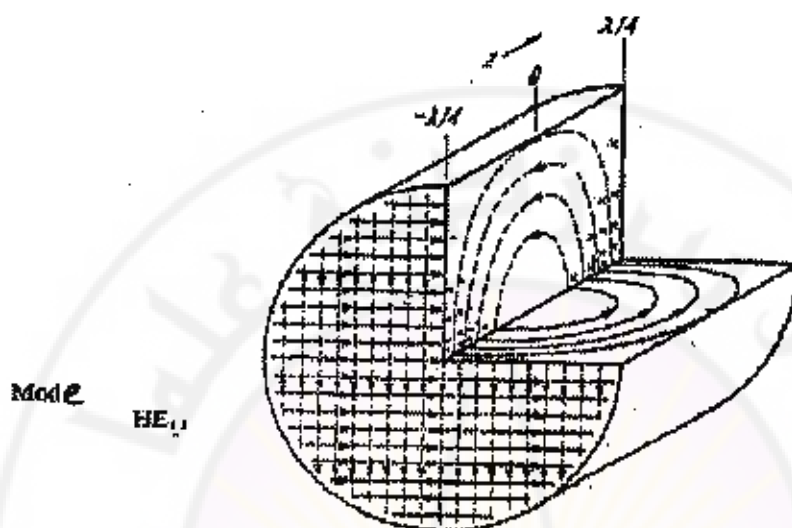
إن المحدد المهم لكل النماذج هو ما يسمى تردد القطع والذي يتم تحديده عند قيمة صفرية لذات الانتشار في الغلاف $\gamma = 0$ حيث يعطى هذا التردد بالعلاقة:

$$f_c = \frac{x_c}{2\pi\sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)\mu_0}}$$

ويرمز له أحياناً بالرمز V وهو التردد المقيس المعياري.

عندما $x_c = 0$ ينتشر فقط نموذج واحد هو HE_{11} الشكل (3-3)، وذلك عندما $v=1$ ، وهذا النموذج الوحيد والذي له تردد مقيس معياري صفري $f_c = v=0$.

وينتشر هذا النموذج في جميع أنواع الألياف الضوئية، ويطلق عليها على اللب الذي ينتشر فيه النموذج HE_{11} اسم اللب الضوئي وحيد الأنموذج *single-mode*.



الشكل (3-3)

التردد المقيس المعياري في اللب الضوئي وحيد الأنموذج يتراوح ضمن مجال:

$$0 < V < \frac{2.405}{2\pi a \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2) \mu_0}}$$

وكما مر معنا سابقاً إن عدد النماذج عندها يساوي $N = 0.5V^2$ ، ويعتمد هذا العدد على التردد المعياري الذي يمكن إعادة كتابته بالشكل:

$$V = a \sqrt{K_1^2 - K_2^2}$$

أما قرائن الانكسار فتحسب وفقاً لذلك:

$$n_1 = \sqrt{\epsilon_1 / \epsilon_0}; n_2 = \sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_0}$$

ومله نجد:

$$V = Ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi.a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

حيث:

K - ثابت الانتشار في الوسط.

λ - الطول الموجي في الوسط.

عند قيمة عظمى لـ V (القيمة حوالي 50) سينتشر العديد من النماذج في القلب أولها الأنموذج HE_{11} و بعد ذلك سنلشأ النماذج العرضانية TM_{01} , TE_{01} الشكل (3-4)، ومن ثم النماذج الهجينة HE_{21} التي لها تقريباً ترددات قطع متماثل.

يجب أن نضيف أن ثابت الانتشار للموجة المسطحة β في وسط له قرينة انكسار ثابتة n يساوي:

$$\beta = nk = \frac{2\pi.n}{\lambda}$$

بشكل عام لكل نموذج، وإن ثابت الانتشار محدود بالمجال التالي:

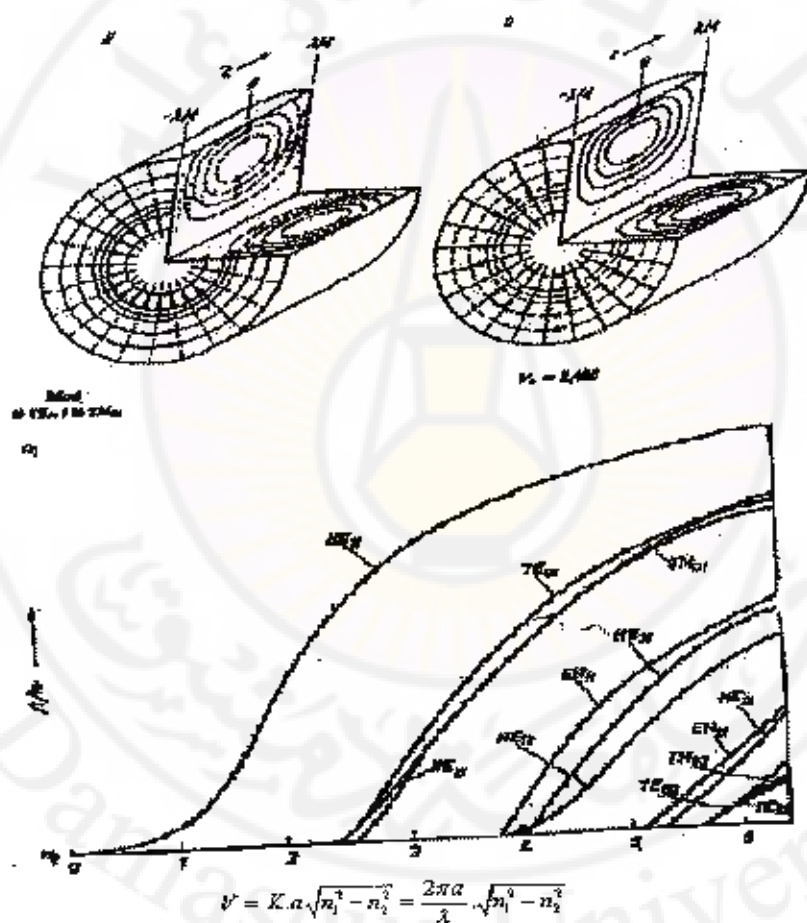
$$n_2K < \beta < n_1K$$

في الجدول (3-1) معطاء القيم $x_c.a$ لتردد القطع عند $\epsilon_1/\epsilon_2 = 1.1$.

حيث النماذج $HE_{1\mu}$ لا تخضع لهذه الحالة. النماذج ذات المرتبة الأعلى لها تردد قطع أعلى.

ν	1	2	3	Mode
0	2.405	5.52	8.654	T_E, T_M
1	0.000	3.832	7.016	HE
2	3.832	7.016	10.173	EH
2	2.445	5.538	8.665	HE
2	5.138	8.417	11.620	EH

الجدول (1-3)

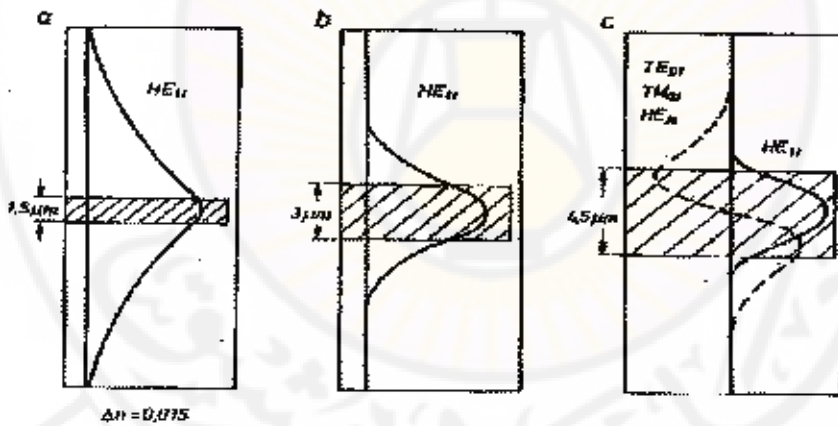


الشكل (4-3)

3 - 4 نماذج الحقول الكهرومغناطيسية في بنية الألياف البصرية

إن توزيع النماذج في قلب الليف الضوئي يؤثر في كمية الطاقة التي تنتشر في هذا القلب، أما باقي الطاقة لهذه النماذج فسوف تتابع مسيرها في مادة الغلاف. إن كمية الطاقة هذه تعتمد بشكل أساسي على ظروف العمل وعلى المواصفات الداخلية (محددات الليف). من هذه المواصفات أولاً الطول الموجي و منه التردد، وثانياً قرأتان الانكسار، ومن ثم ثالثاً قطر القلب والغلاف. جميعها تؤثر في توزيع هذه النماذج.

عندما تكون $V < 2.4$ سوف ينتشر نموذج واحد فقط وهو HE_{11} mod LP_{01} في ليف ضوئي له المحددات ($h_1 \approx 1.5; \Delta = 1\%; \lambda = 1[\mu m]$) وقطر القلب يجب أن لا يتجاوز $3.6[\mu m]$ للألياف وحيدة الأنموذج. يبين الشكل (3-5) توزيع الطاقة في قلب الليف وفي الغلاف أيضاً للنماذج الأربعة عند قطر القلب $a = 1.5 \mu m, b = 3 \mu m, c = 4.5 \mu m$.



الشكل (3-5)

يمكن أن نلاحظ من الشكل السابق أن 70% من الطاقة الإجمالية للنموذج الوحيد HE_{11} سوف تنتشر في قلب الليف الضوئي وحيد الأنموذج.

إن اختيار قطر مقداره $3.6[\mu m]$ يعني أن النموذج الأعلى LP_{11} (T_{M01} , T_{E01}) أو HE_{21} سوف تتجاوز القلب إلى الغلاف، ويبقى في القلب فقط الأنموذج LP_{01} أو HE_{11} .

عندما نرفع قيمة التردد المقيس المعياري V إلى قيمة 2.4 عندها معظم الطاقة منتشرة في القلب. (حوالي 84%) من الطاقة الإجمالية.

مع ازدياد قيمة قطر القلب سوف تؤدي إلى زيادة عدد النماذج المنتشرة على سبيل المثال: عند قطر $100[\mu m]$ يمكن أن ينتشر عدد جيد من النماذج (حوالي 1000 أنموذج) تتركز في قلب الليف الضوئي.

استناداً إلى ما سبق نلاحظ الدور الضروري والذي يؤديه غلاف الليف الضوئي.

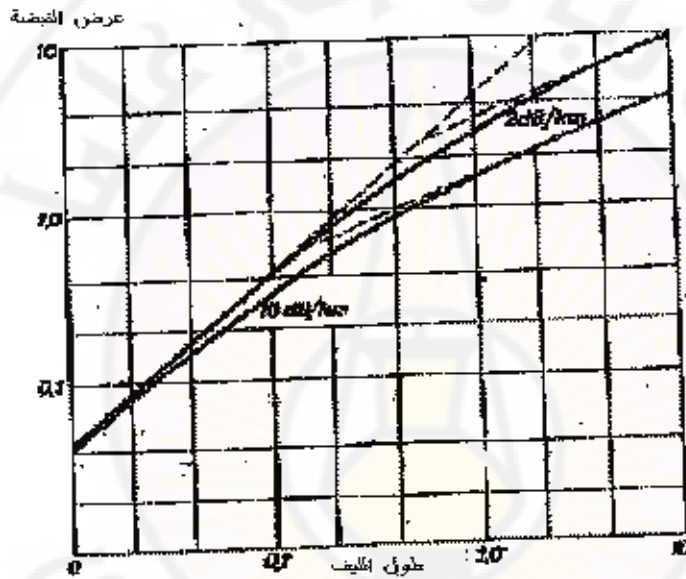
3 - 5 اقتران النماذج في الألياف البصرية

نمت لغاية الآن اعتبارات مثالية في تصنيع الليف الضوئي حيث إن شكل البنية الهندسية لليف سوف يؤثر في انتشار النماذج، وإن تغير قرينة الانكسار أيضاً سوف تؤدي إلى تغير في التردد المعياري، ومنه إلى تغير في عدد النماذج وهكذا لجميع المحددات.

من الضروري معرفة جميع هذه الأسباب مجتمعة حتى نلاحظ كيف تتم عملية انتشار النماذج المختلفة. إن طول الليف الضوئي يؤثر أيضاً في عملية انتشار النماذج المنتشرة لأنه من الضروري وصل هذه الألياف مع بعضها عند انتهاء مكبرات الليف الضوئي. الآن كيف نتصرف النماذج عند إجراء عملية الوصل هذه؟.

أنشاء عملية الوصل أو الاقتران بين الألياف سوف يكون هنالك تأثيران الأول إيجابي والتأثير الثاني سلبي.

التأثيرات الإيجابية تتمثل في تقليل الزمن الوسطي الناتج عن تأخير النماذج إلى نهاية الليف لأنها تسلك طرقاً فيزيائية مختلفة. وهذا يؤثر إيجاباً في تقليل ظاهرة التشتت بين النماذج. وهذا مخصص في الليف الضوئي متعدد النماذج *Multimode* أما في الليف وحيد الأنموذج فإن هذه الظاهرة غير موجودة، أي لا يوجد تأخير زمني لأنه ينتشر نموذج وحيد HE_{11} في قلب الليف الضوئي. يبين الشكل (6-3) العلاقة بين طول الليف الضوئي وعرض النبضة المرسل.



الشكل (6-3)

أما التأثيرات السلبية فتتمثل في أنه عند وصل الألياف الضوئية مع بعضها سوف يتواجد ربما وسط ثالث يؤثر ذلك على ارتفاع الضياع *losses* أثناء عملية التوصيل وربما فقد بعض النماذج المنتشرة.



الفصل الرابع

الضياعات في الألياف البصرية

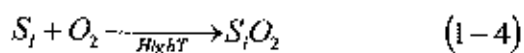
Losses in Fiber Optics

4 - 1 مقدمة

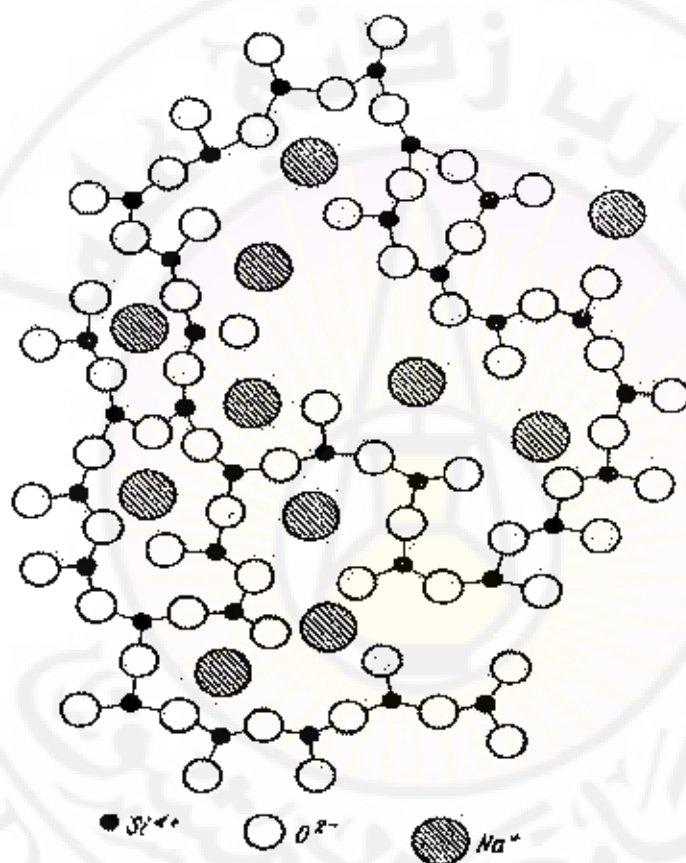
إن معظم العلاقات والأفكار السابقة اعتمدت على أن الليف الضوئي هو عنصر مثالي لانتشار الأمواج الكهرومغناطيسية. لكن للأسف إن الألياف الضوئية تبدي ضياعات أثناء انتشار الموجة ويعود سبب نشوء تلك الضياعات إلى سببين رئيسيين: الأول يعود إلى البنية المادية المصنع منها الليف الضوئي، والسبب الثاني يعود إلى نوع التكنولوجيا التي يتم فيها تصنيع الليف الضوئي. إن المادة المصنع منها الليف يجب أن تحقق العديد من المواصفات منها العمل بعناية عالية تجاه التأثيرات الميكانيكية، والحرارية، والكيميائية، والإشعاعية. بشكل عام فإن المواد التي يصنع منها الليف الضوئي يجب أن يكون الضياع أو التخماد فيها منخفضاً جداً. وأن يكون معدل التبعثر لهذه المواد منخفضاً أيضاً، وأن يتم تصنيع ليف ضوئي ذي معاملات انكسار محددة لكل من القلب والغلاف. إن المادة الأساسية للألياف الضوئية هي الزجاج غير العضوي وأحياناً يتخذ الزجاج بشكل جزئي أو بشكل كامل.

4 - 2 بنية الزجاج وخصائصه

يعدّ الزجاج غير العضوي هو البنية الأساسية المستخدمة في تصنيع الليف الضوئي، حيث ينشأ من اندماج ذرات السيلكون Si^{+4} مع ذرات الأوكسجين O^{-2} وفقاً للمعادلة الكيميائية التالية التي تتطلب درجة حرارة عالية:



يبين الشكل (1-4) البنية الكريستالية للزجاج متضمنة بعض المواد أو الذرات Na^+ على سبيل المثال.

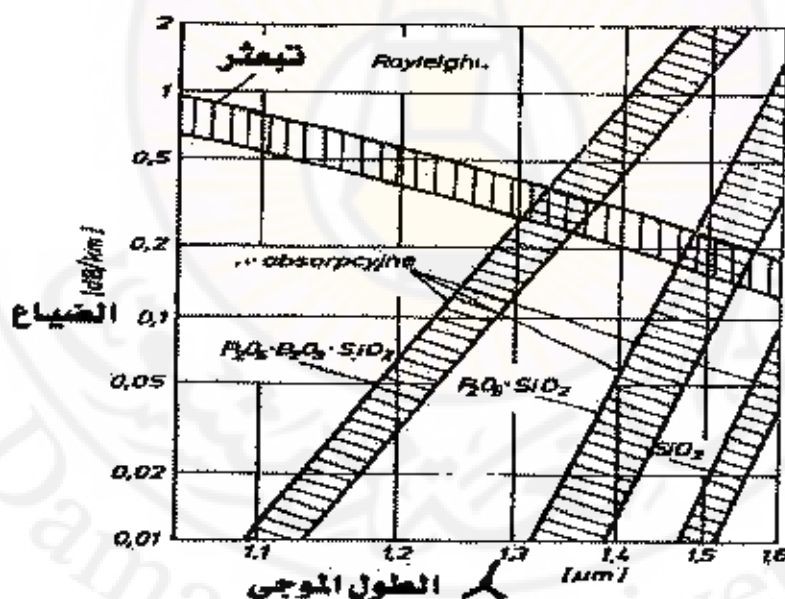


الشكل (1-4)

يقسم الزجاج غير العضوي إلى عدة مجموعات يصنع منها اللب الضوئي والمجموعة الرئيسية هي مجموعة الأوكسيدات $SiO_2, B_2O_3, GeO_2, P_2O_5$ ، والمجموعة الثانية هي

مجموعة الفلوريدات ZrF_4, BaF_2, LaF_3 ، والمجموعة الثالثة والتي تستخدم في الأطوال الموجية الأعلى هي مجموعة الهالوجينات على سبيل المثال $AgCl, AgBr, HCl$.

إن الخصائص العامة الضوئية للزجاج غير العضوي والمكون من الأوكسيدات معروفة منذ زمن بعيد وخاصة للأطوال الموجية للضوء الواقعة تحت الحمراء، مع الأخذ بعين الاعتبار امتصاص الجزيئات للفوتونات. إن امتصاص الجزيئات تتبع لنوع المادة فمثلاً للكوارتز SiO_2 فإن قيمة هذا الامتصاص تبلغ أدنى قيمة من بين مواد الأوكسيدات المعروفة، وخصوصاً عند الأطوال الموجية العالية. يبين الشكل (2-4) علاقة الضياع بالطول الموجي للزجاج الصافي SiO_2 وبعض المواد الأخرى المشابهة فمثلاً الزجاج المشاب ب P_2O_5 ، أو المشاب ب P_2O_5, B_2O_3 ، علماً بأن الضياع ناتج عن سببين أساسيين هما: 1- ضياع التبعثر (رايلي) 2- ضياع الامتصاص.



الشكل (2-4)

استناداً إلى ما سبق نجد أن الزجاج هو الوسط الأمثل لنقل الضوء بأقل قيمة ممكنة للفقء ضمن المجال $(0.8[\mu m], 1.6[\mu m])$. يبين الجدول (4-1) دليل قرنية الانكسار لبعض الأوكسيدات ومنها الزجاج.

Material	دليل قرنية الانكسار
SiO_2	1,4585
B_2O_3	1,423
GeO_2	1,608
PbO	≈ 2.15
Tl_2O	≈ 2.9

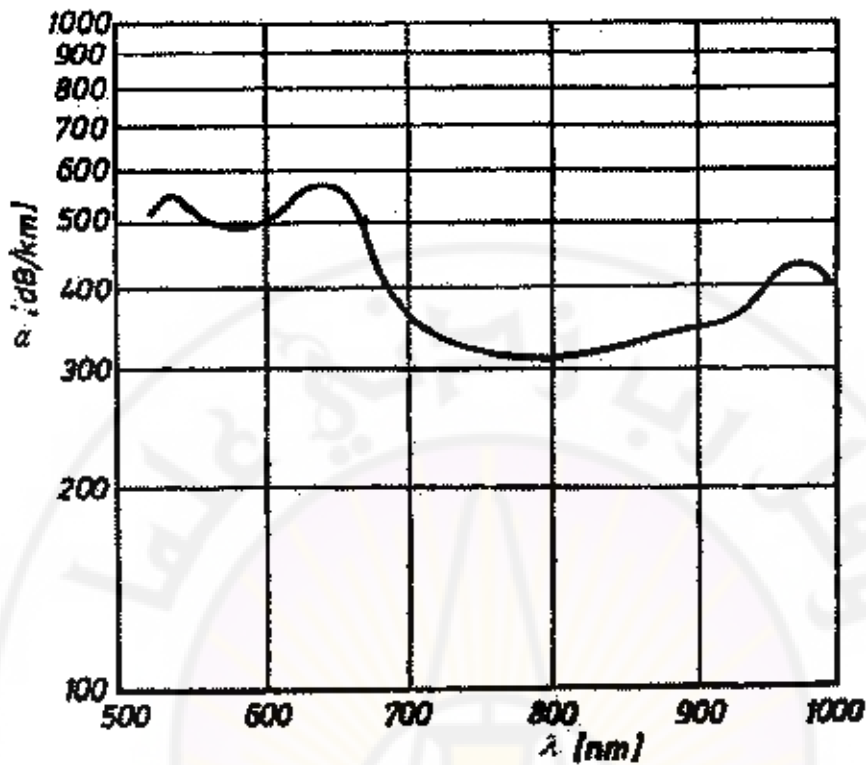
الجدول (4-1)

إن الضياع أيضاً يتأثر بوجود بعض المركبات المعقدة مثل الأيون OH أو CO (شاردة الهيدروكسيل، أحادي أكسيد الكربون) وخصوصاً في بعض الأطوال الموجية كما سنرى لاحقاً.

4 - 3 أنواع الضياعات في الألياف البصرية

إن التأثير الرئيسي على إرسال الطاقة الضوئية في الألياف هو الفقء الذي تسببه هذه الألياف. حيث يبلغ التخماد في الألياف الضوئية المصنعة من البلاستيك عدة مئات من الديسبل خلال الكيلومتر.

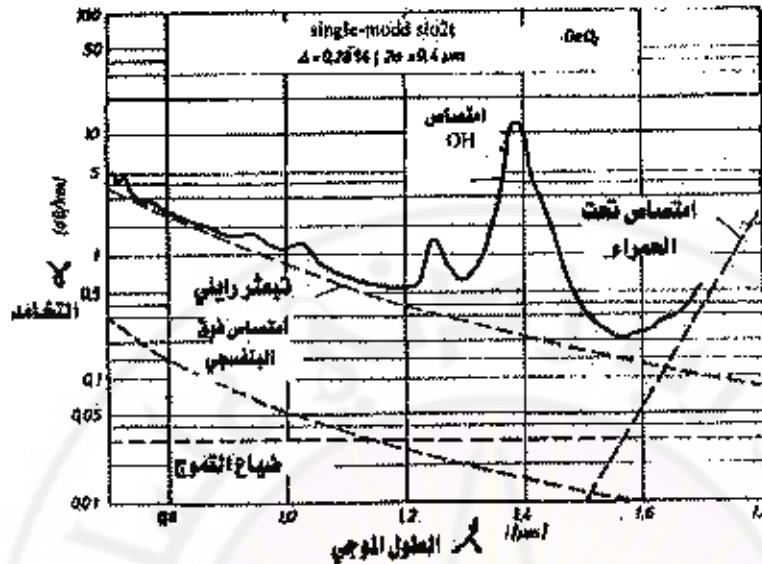
حيث تصنف هذه الألياف عالية التخماد. ويبين الشكل (4-3) العلاقة بين التخماد وطول الموجة.



الشكل (4-3)

بعد تعرف مصادر الضياعات المختلفة تم الحصول على تكنولوجيا تعطينا تخامد α منخفض جداً نسبياً ($1 \div 2 [dB/km]$)، وذلك بتسخين عملية تصنيع الليف.

يبين الشكل (4-4) ملحنى التخماد مع الطول الموجي والمصادر المختلفة لهذا التخماد للليف ضوئي وحيد النموذج ممزوج مع مادة GeO_2 ، ولهذا الليف المحددات التالية $\Delta = 0.28\%$; $2a = 9.4 [\mu m]$ وذلك في كافة مناطق الإرسال الثلاثة: $0.85 \mu m, 1.33 \mu m, 1.55 \mu m$.



الشكل (4-4)

يمكن تصنيف الخسائر (الضياع) الحاصلة في الألياف الزجاجية كتأثيرات امتصاصية *Absorption* وتأثيرية (تبعثر) *Scattering* وهندسية *Geometric*.

4 - 3 - 1 الامتصاص *Absorption*

وحتى أكثر أنواع الزجاج نقاءً سيتمص بشدة ضمن مناطق معينة من أطوال الموجات وهذا ما يسمى بالامتصاص الضمني، وهو صفة طبيعية للزجاج ذاته.

إن الامتصاص الضمني قوي جداً في الجزء من الطيف الكهرومغناطيسي فوق البنفسجي ذات الطول الموجة القصيرة. تحدث ذروات امتصاص ضمني أيضاً في مجال تحت الحمراء. تقع الذروات بين $7[\mu m]$ و $12[\mu m]$ لمركبات زجاج نموذجية بعيداً عن المنطقة ذات الاهتمام. مما يمنع في الحقيقة استعمال ألياف السيليكا بعيداً جداً عن طول الموجة هذا. نستنتج

أن الخسارات الضمنية تكون غير مهمة في منطقة عريضة حيث يمكن أن تعمل الأنظمة اللبيفية. إلا أن هذه الخسارات تمنع تسيير الشوائب المعدنية المصدر الرئيسي للضياح في أي ليف صلي. يوجد نوعان من الشوائب وهما: الشوائب المعدنية - وأيونات OH .

إن الشوائب المعدنية مثل $Cr, Mn, Ni, Co, V, Cu, Fe$ تتمتع بقوة امتصاص في المنطقة المعنية، ويجب ألا يتجاوز سوياتها بضعة أجزاء لكل بليون من أجل الحصول على مسارات دون $20[dB/km]$. وقد تم الحصول على مثل هذا النقاء في الألياف ذات السيليكا العالية، وقد كانت الخسارة في الواقع فيها ضعيفة.

من وجهة نظر عملية إن الشائبة الأكثر أهمية هي أيون الهيدروكسيد OH . إن آلية الخسارة لأيون OH هي الاهتزاز المتراخي تماماً مثل امتصاص رابطة SiO تهتز ذرات الهيدروجين والأكسجين بسبب الحركة الحرارية حيث إن ذروة الامتصاص تحدث عند $2.73[\mu m]$ (خارج المجال) حيث إن توافقيات هذا الامتصاص تقع ضمن مجالات الألياف الضوئية عند $(0.95[\mu m], 1.23[\mu m], 1.37[\mu m])$ عندما تكون أيونات OH محتضنة في اللب الزجاجي. من أجل تحقيق نتائج إيجابية يجب أن تكون شوائب OH أقل من بضعة أجزاء لكل مليون. تحتوي الألياف الجافة سويات OH منخفضة بشكل خاص بينما تحتوي الألياف الرطبة سويات OH أعلى بقليل.

تسهم العيوب الذرية أيضاً في امتصاص اللب. كمثال على ذلك: إن التيتانيوم Ti^{4+} المستعمل في إشابة الزجاج لا يمتص. فأنشاء تشكيل الألياف الشعرية يحدث انخفاض لبعض ذرات Ti^{4+} إلى حالة Ti^{3+} وفي هذه الحالة يتصف التيتانيوم بالامتصاص الشديد. يمكن إنقاص عملية التخفيض هذه إلى الحد الأدنى بتقنيات تصنيع مناسبة.

إن إشعاع الزجاج بواسطة أشعة X وأشعة γ والنيوترونات والإلكترونات يخلق أيضاً عيوباً ذرية امتصاصية. إن الألياف ذات درجة السيليكا العالية وذات النقاء العالي تكون أكثر

مقاومة لامتناهات شائبة إشعاعية من الألياف البلاستيكية أو من الزجاج الأقل نقاء. إن ألياف PCS تكون أيضاً إلى حد ما مقاومة للإشعاع.

4 - 3 - 2 التبعثر

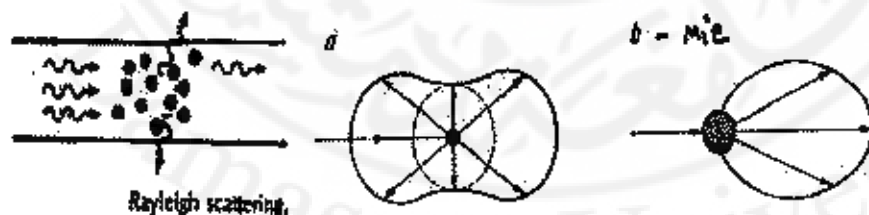
تصنف ضياعات التبعثر بأنها الفئة الثانية من الضياعات المادية في الألياف. تتحرك الجزيئات عشوائياً في الزجاج في الحالة المنصهرة أثناء التصنيع، وتقدم الحرارة المطبقة الطاقة من أجل هذه الحركة. وعندما يبرد السائل تتوقف الحركة. وعند الوصول إلى الحالة الصلبة تثبت المواقع الجزيئية العشوائية داخل الزجاج فينتج عن هذا تغيرات موضعية في الكثافة، وبالتالي تغيرات موضعية لعامل الانكسار خلال الزجاج. تمثل هذه التغيرات جسيمات نائفة صغيرة مطمورة في مادة متجانسة أصلاً. إن أحجام هذه الجسيمات أصغر بكثير من أطوال الموجة البصرية.

عندما تمر حزمة ضوئية خلال بنية كهذه تنتثر (تتبعثر) بعض من طاقتها بفعل هذه الجسيمات كما يبينه الشكل (4-5)، ويعرف هذا النوع من الخسارة بالتشتت رايلي (Rayleigh) ويعطى بالعلاقة:

$$\alpha_R = K / \lambda^4 \quad (2-4)$$

حيث: K ثابت التناسب ويتعلق بنوع المادة.

$$\alpha_R = \frac{k}{\lambda^4}$$



الشكل (4-5)

حيث تزداد أهمية α_R تبعاً لتناقص طول الموجة ويبدو واضحاً أن التبعثر يحد بشكل قوي من استعمال الألياف عند أطوال الموجة القصيرة. تقدم هذه النتيجة حافزاً للعمل عند طول موجة يزيد عن $0.8[\mu m]$.

إن الثابت K له قيم مختلفة لمواد مختلفة. فعلى سبيل المثال للزجاج الصافي النقي يمكن أن تحسب الضياع الناتجة عن التبعثر بـ dB/Km بالعلاقة التالية:

$$\alpha_R = 1.7(0.85/\lambda)^4 \quad (3-4)$$

حيث λ تعطى بـ μm .

على سبيل المثال في مناطق الإرسال الأولى والثانية والثالثة إن الفقد يساوي:

$$\alpha_R = 1.96[dB/km]; \lambda = 0.82[\mu m]$$

$$\alpha_R = 0.31[dB/km]; \lambda = 1.3[\mu m]$$

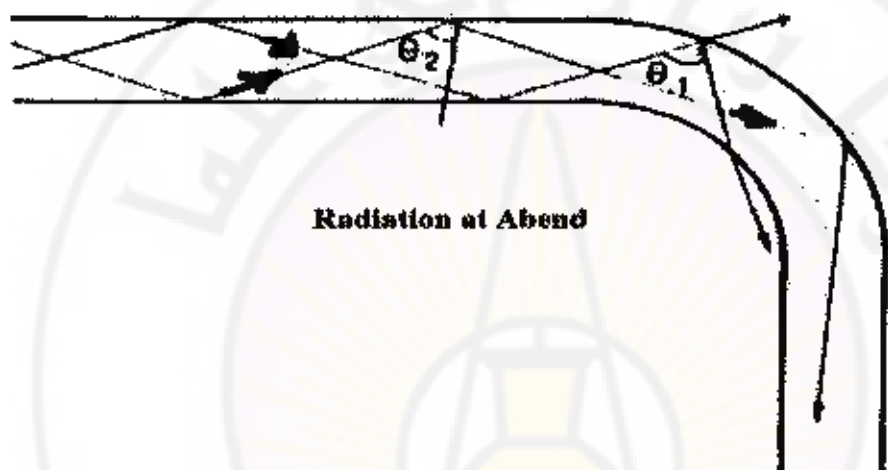
$$\alpha_R = 0.15[dB/km]; \lambda = 1.55[\mu m]$$

إذا كانت بنية الليف مصنوعة من مواد غير متجانسة عندئذ سوف يحصل تبعثر آخر وهو تبعثر *Mie*، ويتعلق أيضاً بالطول الموجي، ويحصل عدم التجانس هذا إذا كان المعالج التكنولوجي الذي يصنع الألياف غير نظيف ما يؤدي ذلك إلى وجود شوائب غير محسوبة. هذا يمكن التغلب عليه بانتخاب جو مناسب لإنتاج الألياف الزجاجية. إن خسارات الانتشار تعتبر حد أدنى لا يمكن تونه تصنيع الليف من زجاج محدد.

4 - 3 - 3 التأثيرات الهندسية Geometric Effects

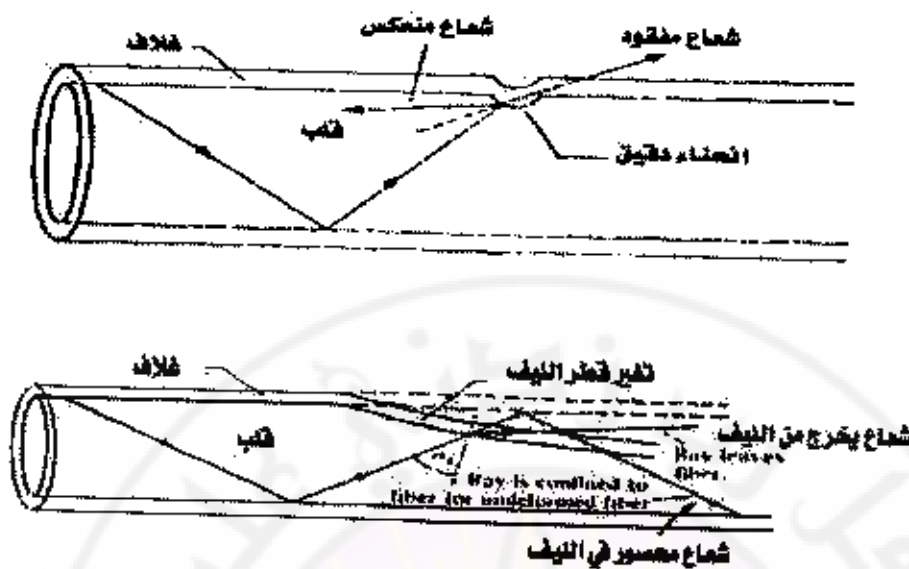
إن انحناء الليف يسبب تخامداً. هناك نوعان من الانحناءات منها يرى بالعين المجردة ومنها وما هو مجهري. يشير النوع الأول (النوع المنظور) إلى الانحناءات ذات المقياس الكبير

مثل تلك التي تحدث عن قصد عند لف الليف على ملفات أو عند سحبه حول زاوية. يمكن ثني الألياف بأنصاف أقطار تقوسات صغيرة حتى $10[cm]$ وبخسارة مهمة. ولا يحدث انكسار عادة ما لم يصل نصف قطر الانحناء إلى أقل من 150 مرة قطر الليف مثلاً إذا كان القطر $125[\mu m]$ يكون نصف قطر الانحناء قبل أن يحدث الانكسار هو $1.9[cm]$. ويبين هذا مرونة الألياف الزجاجية. يبين الشكل (4-6) الفقد نتيجة الانحناءات الكبيرة.



الشكل (4-6)

يحدث الانحناء المجهرى غالباً عندما يلف الليف ضمن كابل واقٍ. تؤدي الجهود الناشئة عند الكابل إلى تشوهات محدّية صغيرة (انحناءات ميكروية تظهر عشوائياً على طول الليف. وهذه الانحناءات الميكروية تفرق الضوء بين الأساليب الموجهة المختلفة للليف مما يؤدي إلى أن بعضاً من الضوء يخرج من الليف، ويسبب هذا التأثير تزايد خسارة الليف بعد صلبة تصديعه في كابل كما كانت عليه قبل تغليفه. كما أن تغير قطر الليف يؤثر في التخميد أي يسهم هذا التغير في ارتفاع قيمة الفقد كما هو مبين في الشكل (4-7).



الشكل (4-7)

إن الانحناءات الميكروية تسبب ضياعاً (*Microbending losses*) ذا قيمة معتبرة إذا وضعت الألياف على أرضية غير مستوية تماماً، وأي إجهاد خارجي على هذه الألياف سوف يؤدي إلى نمو عامل الفقد. يبين الشكل (4-8) هذا النوع من المفاويز.



الشكل (4-8)

تعطى قيمة التخامد الناتجة عن تأثير الانحناء الميكروي (*Microbending losses*) وفقاً للعلاقة التالية:

$$\alpha_m = K a^4 b^{-6} \Delta^{-3} \quad (4-4)$$

حيث:

K : ثابت غير متعلقة بمحددات الليف الضوئي.

a, b : نصف قطر القلب والغلاف.

Δ : حاصل الفرق النسبي لمعاملات الانكسار.

بالنسبة إلى القيم المعيارية وفقاً لتوصيات CCITT، إن قطر القلب $50[\mu m]$ ، وأن قطر الغلاف $125[\mu m]$ ، عندئذٍ العلاقة السابقة تعطى بالصيغة التالية:

$$\alpha_m = A (1.2 / \Delta)^3 \quad (5-4)$$

حيث: يعطى α_m بـ dB/km و A بـ dB/km و Δ بالنسبة المئوية.

إذا وضع الليف الزجاجي في أنبوب بلاستيكي للحماية أو في مجارٍ بلاستيكية، فإن قيمة الثابت A تتراوح ضمن المجال $[0.1-0.5]$ عندئذٍ فإن α_m يبلغ جزء من dB/km . أما عندما توضع الألياف في مجارٍ غير طبيعية تتعرض لضغط ثانٍ إلى انحناءات تؤثر في الليف، فإن الفقد يبلغ يحدود dB/km في الألياف الضوئية المتعددة النماذج. إن ضياع الانحناء يتبع أيضاً إلى عدد النماذج ونوعها.

الفصل الخامس

إنشاء الألياف البصرية و كوابلها

Construction of Optic Fiber and Cables

5 - 1 مقدمة

تصنع الألياف الضوئية قليلة الضياع $\alpha < 5[dB]$ الآن بشكل روتيني باستخدام مواد عالية النقاوة، وتقنيات سحب ألياف متطورة، لصنع ألياف بصرية جيدة يجب أن تحقق شروطاً أساسية عديدة في آن واحد. وهذه الشروط تتعلق بداية في بنية الزجاج وخواصه الفيزيائية، حيث تتعرض لتقانات القياس المختلفة لوصف خصائص المقطع العرضي (*Index profile*) والتبريد والضياعات.

يعدّ الأوكسجين والسيليكون المكونين الأساسيين في تركيبة الزجاج الكريستالي بالإضافة إلى القليل من المواد الأخرى كالشوارد المعدنية التي تحل محل السيليكون في البنية رباعية السطوح السيليكونية. إن التركيب الدقيق للزجاج يمكن أن يتغير بشكل كبير، لكنه يجب أن يحتوي غالباً على الأوكسجين، السيليكون والبورون، والصوديوم، والألمنيوم. إن الذرات المكونة للشبكة مرتبة بالجدول (5-1). هناك أوكسيدات أخرى تدعى المعدلات الشبكية *Network Modifiers* التي تقوم بتغيير الخواص الأساسية للزجاج أو تبديلها مثل عامل الانكسار، ومعامل الامتصاص، ونقطة الانصهار.

المكون الشبكي <i>Network former</i>	المعدل الشبكي <i>Network modifier</i>
SiO_2	K_2O
B_2O_3	MgO
Al_2O_3	
Na_2O_3	PbO

الجدول (1-5)

إن الرابطة الأقوى بالزجاج هي رابطة أوكسجين - سيليكون في رباعيات السطوح السيليكونية، كما أن فقدان التماسق في هذه البنية يسمح لقوة الرابطة بالتغيير من رباعي سطوح لآخر. وبالتالي فإن بعض ذرات الأوكسجين المرتبطة بذرة سيليكون واحدة فقط يجب أن تلتقط روابط إضافية مع ذرات أخرى موجودة. على سبيل المثال تؤدي إضافة الصوديوم لكسر شبكة السيليكون - أوكسجين لتشكيل زجاج سليكات الصوديوم، وبالنسبة تصبح البنية أقل ارتباطاً ودرجة انصهارها أخفض.

ومن جهة أخرى فإن الشوارد المعدنية تستطيع أن تنتشر خلال الزجاج، وتتوزع بشكل عشوائي بين فراغات الشبكة، وهناك أنواع أخرى من الزجاج على سبيل المثال عندما تكون شبكة مكونة من B_2O_3 - Na_2O_3 ، وهكذا فإن هذه المواد تستخدم كثيراً في المنتجات الصناعية، ولكنها غير ملائمة للألياف الضوئية بسبب خصائصها الضوئية.

إن الخاصية المميزة لكل أنواع الزجاج هي أنها تخضع لتناقص مستمر باللزوجة عندما تسخن. ولذلك يثخن الزجاج تدريجياً بدلاً من المرور بمرحلة إنصهار مفاجئة كما هو الحال بالكريستال. وهذه بالطبع خاصية مزيدة للجوامد عديمة الشكل (غير المتبلورة).

إذا ضغط الزجاج فإن أحد أشكال التكيف المفضل تجري في القرب المباشر للجهد المحرض، وينتج تباين خواص موضعي. لذلك فإن عامل الإنكسار ومعامل التمدد الحراري

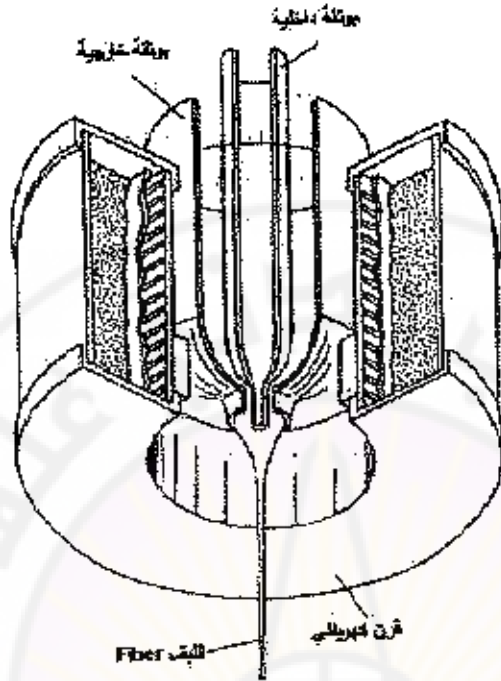
يمكن أن يتغير أيضاً حسب الانكسار بين القلب والغلاف، و بتغير تركيز المعدلات بشبكة السيليكات تستطيع الحصول على Δ المطلوبة على طول الخط.

وهذا يتم عادة بأوكسجين إضافيين. على سبيل المثال فإن مجموعة سيليكات الصوديوم الكالسيوم هي إحدى هذه الأنظمة. إن نظاماً مثيراً آخر هو مجموعة سيليكات (البورصوديوم). لأنه لا يملك الحرية فقط ليعمل العامل *Index* مع إبقاء عامل التمدد ثابتاً، ولكنه يملك أيضاً نقطة تليين منخفضة نسبياً، وهذا الأمر مهم لتصنيع الألياف، على أي حال يجب أن يكون هناك عناية فائقة في اختيار المكونات لهذا النظام.

من أجل اختلاف كبير لعامل الانكسار نستخدم نظام مجموعة سيليكات الرصاص، ولكن على أي حال وجد أن الضياعات في ألياف سيليكات الرصاص أكبر كثيراً من تلك الموجودة في أنواع أخرى من زجاج السيليكات، هناك بالطبع الكثير من المركبات المحتملة لتكوين الزجاج والمجموعات المذكورة سابقاً، يمكن تشكيلها باستخدام تقنية الصهر التقليدية لمساحيق الأكاسيد، يمكن أن يصنع بهذه الطريقة كميات كبيرة بكلفة قليلة نسبياً، ولكن من أجل زجاج عالي النقاء وقليل الضياع فإن إعداد المواد يجب أن يتم بطريقة الصهر. إن التقنية الأكثر نجاحاً هي تراكيب البخار الكيميائي أو الترسيب البخاري الكيميائي - *(CVD - Chemical Vapour Deposition)*.

5-2 طريقة البوتقة المزدوجة *Double Crucible Method*

هناك تقانات عديدة لتصنيع الألياف البصرية منها طريقة البوتقة المزدوجة، حيث يمكن أن تسحب الألياف البصرية مباشرة من مصهور سابق الأكاسيد في البوتقة. يبين الشكل (5-1) عملية تصنيع الليف بالبوتقة المزدوجة.



الشكل (1-5)

يوضع زجاج القلب المنصهر في الوعاء الداخلي ويوضع زجاج الغلاف في الوعاء الخارجي، يخرج الزجاجات سوياً عند قاعدة الحاوية الخارجية، لتتشكل نواة مكسوة بالزجاج، ويسحب هذا المزيج المنصهر ليشكل ليفاً.

يبدو من النظرة الأولى أن تقنية البوتقة المزدوجة تنتج الألياف ذات الدليل النرجي (SI) فقط، إلا أن هذا ليس صحيحاً حيث يمكن إنتاج الألياف المتدرجة (GRIN)، وذلك بالسماح لكل من زجاج القلب والغلاف بالانتشار البيني بعد انفصالهما معاً.

يسبب هذا الانتشار تغيراً تدريجياً لدليل الانكسار بين ذلك الخاص بزجاج القلب وزجاج الغلاف، ويمكن ببعض من الحرص إضافة الزجاج باستمرار إلى البوتقة مما يمكن من الحصول على أطوال كبيرة من الليف المتصل.

5 - 3 إنتاج المكون الأولي *Preform*

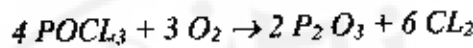
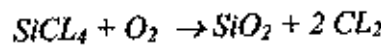
إن إنتاج ألياف ضوئية ذات ضياعات منخفضة يمر عبر مرحلتين الأولى: المنتج من مكونات أولية زجاجية عالية النقاء. والثانية: سحب الألياف من هذه المكونات الأولية.

تتألف المكونات الأولية من قضبان زجاجية بالمقطع العرضي المطلوب، ولقد طُورت تقنيات عديدة لصنع المكونات الأولية، والأكثر أهمية منها تلك التي تقوم بتأمين نشوء سريع لطبقات سلبية من الزجاج بدرجة نقاء عالية، لا تزال الصعوبة موجودة لصنع مكون أولي متجانس بأطوال كبيرة و مقاطع متدرجة *Graded - Index profile* مرغوبة.

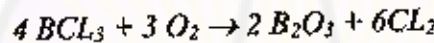
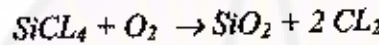
أول تقنية بسيطة استخدمت من قبل كورنينغ لأعمال الزجاج لإنتاج أول ألياف لاقطة لنظر قليلة الضياع (20 dB/km) سميت بالعملية السخامية (*soot process*). تتضمن درجة مزيج من SiCl_4 و O_2 بإضافات من أبخرة إما TiCl_4 أو GeCl_4 لإنتاج سخام من مواد معجون إما Ti أو Ge مع SiO_2 مترسبة على زجاج SiO_2 . وطالما أن عامل الانكسار لهذه المواد المعجونة أعلى من تلك المكونة من السيليكات النقية فقد استخدمت تقانة الترسيب هذه لصنع المواد المكونة الأولية لسحب الألياف البصرية، تتضمن العملية حقن مناسب من مادة SiO_2 مترسبة على أنبوب سيليكات نقي. تتشكل طبقة من السخام على السطح الداخلي للأنبوب. بعد تكديس سماكة كافية يسخن الأنبوب، وينهار مكون أولي تكديس سماكة كافية، يسخن الأنبوب وينهار ليشكل مكوناً أولياً قضيبين، يملك قلباً له عامل انكسار أعلى وخلافاً بعامل انكسار أخفض منه.

بعد هذه التجربة المبكرة من قبل كورنينغ لأعمال الزجاج طُرات تعديلات وتطويرات كثيرة باستخدام مجموعة متنوعة من المعاجين المشكلة للسخام على السطح الخارجي لعمود دوار قابل للنزاع و هكذا. لقد ظهر من استخدام العملية السخامية إن المكون الأولي يمكن أن يصنع على حالات ترسيب عالية السرعة بدرجة نقاء عالية، يمكن استخدام هذه الطريقة لإنتاج ألياف

متدرجة بمقاطع متحكم بها بشكل جيد. يمكن الاعتماد على المعادلات التالية لإنتاج المكون الأولي لمادة القلب:



أما لمادة الغلاف والتي تتطلب قرينة انكسار أقل من القلب فيمكن أن نحصل عليه وفقاً للمعادلات التالية:



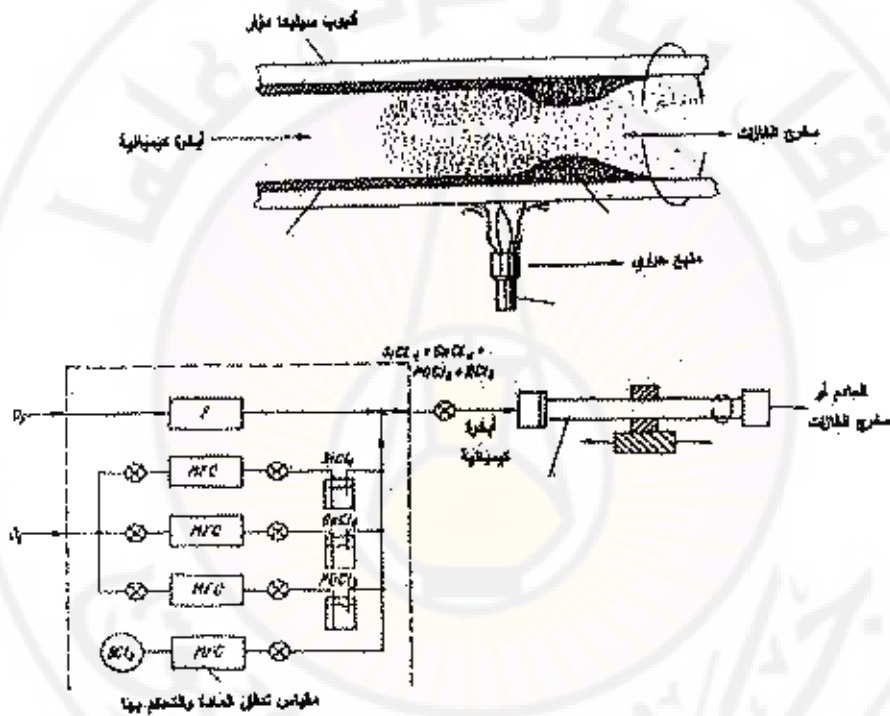
لتحقيق المعادلات السابقة يجب أن تؤمن درجة حرارة للمفاعلات التكنولوجية ضمن المجال: $T = [1300 + 1600^\circ\text{C}]$.

5 - 4 السيليكا المطعمة (المشابة) بالتراكم *Doped Depositel silica*

تتضمن عمليات التصنيع الأوسع استعمالاً تكوين تشكيلة ليفية مسبقة بوساطة تراكم بخاري لمكونات زجاجية، وتدعى هذه العملية بالسيليكا المطعمة بالتراكم (DDS) أو تراكم البخار الكيميائي (CVD) أو تأكسد الطور (VPO). تستعمل السيليكا كأساس وتضاف كميات صغيرة من الشوائب مثل (P_2O_5 , B_2O_3 , GeO_2) من أجل إنتاج تغيرات طفيفة في دليل الانكسار المطلوب، وسيكون للتشكيلة الاسطوانية الناتجة التغير المرغوب في دليل الانكسار إلا أن مساحة مقطعه تبلغ عدة مرات مساحة الليف النهائي.

5 - 4 - 1 تراكم البخار الكيميائي الداخلي (ICVD) Internal Chemical Vapour Deposition

يبين الشكل (2-5) عملية التراكم الداخلي وله تسميات مختلفة منها تراكم البخار الكيميائي الداخلي (CVD الداخلي)، وتراكم البخار الكيميائي المعدل (MCVD) والتراكم البخاري الداخلي (IVD).



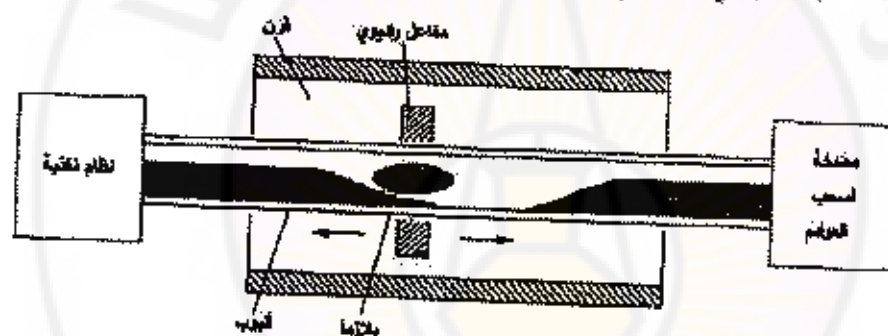
الشكل (2-5)

يتم في هذه العملية تراكم الأبخرة الكيميائية على داخل أنبوب زجاجي نوار حيث يتحرك على طول الأنبوب منبع حراري يصهر المادة المتراكمة فتشكل غشاء زجاجياً شفافاً، وتتراكم طبقة فوق طبقة بمرور المنبع الحراري على طول الأنبوب بشكل متكرر، وتتراكم عادة من 30 إلى 100 طبقة.

وبتغيير تركيز مادة الاشابة يمكن أن يتغير دليل الانكسار من طبقة إلى طبقة مكوناً ايضاً ذات شكل معامل الانكسار متدرج. يمكن بواسطة هذه التقنية الحصول على تحكم دقيق جداً بمعامل الانكسار.

يتم التراكم قبل أن يغلق الأنبوب ومن ثم يتحول الأنبوب حرارياً إلى تشكيلة أولية قبل سحبه كلفاً. تبلغ أبعاد تشكيل نموذجي $1[m]$ طولاً و $2[cm]$ قطراً. يمكن سحب الألياف متواصلة بطول عدة كيلومترات من تشكيلات بهذا الحجم.

يمكن الحصول على معدل تصنيع أكبر باتتباع طريقة *MCVD* المعزز بالبلازما (*PCVD*) المبين في الشكل (3-5).



الشكل (3-5)

إن البلازما وهي منطقة غازات متأينة مسخنة كهربائياً تزيد معدلات التفاعل الكيميائي داخل الأنبوب فيجري التراكم بسرعة أكبر من سرعة طريقة *MCVD* السابقة.

يتحرك ملف التسخين *RF* والمشمع على طول الأنبوب مع منبع حراري كل منهما مستقل عن الآخر. تبلغ درجة حرارة المفاعل حوالي $1200^{\circ}C$. تستخدم طريقة *PCVD* لإنتاج الألياف ضوئية أحادية النموذج، والألياف ضوئية متعددة الأنموذج المستخدمة لأغراض

الاتصالات، وإن مواصفات هذه الألياف على غاية من الأهمية، وخصوصاً انخفاض معامل التخمّد.

5 - 4 - 2 تراكم البخار الخارجي (OVD) Outside Vapour Deposition

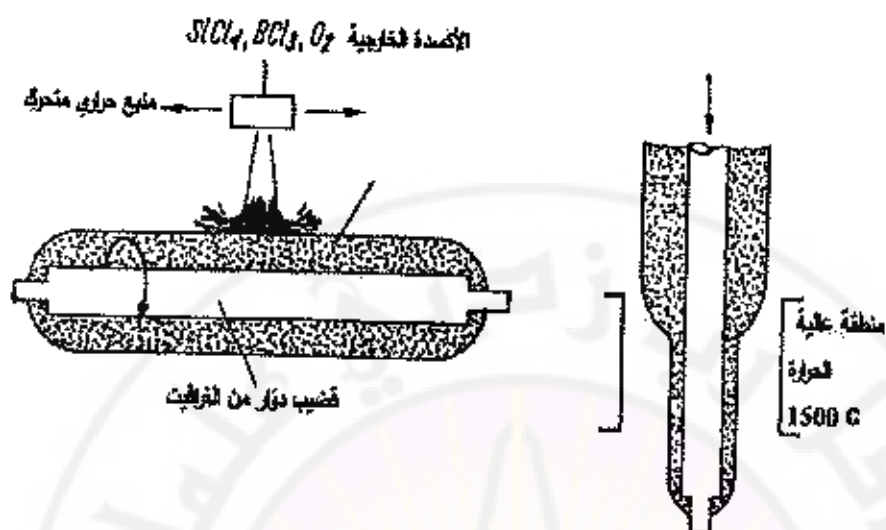
يطلق على هذه الطريقة في إنتاج المكون الأولي للليف اسم تراكم البخار الكيميائي الخارجي (CVD الخارجي) أو تأكسد الطور البخاري الخارجي (OVPO) أو تراكم البخار الخارجي (OVD) وربما تسميات أخرى أيضاً.

1- تعتمد هذه الطريقة على الأكسدة الخارجية، وذلك لإنتاج تراكم بخار كيميائي خارجي، وبعد ذلك تمرر على مصدر أو منبع حراري فتتراكم جسيمات الزجاج على قالب دوار، وتشكل التراكبات طبقة مسحوق على القالب، وبعد إتمام التراكم تتكثف المادة، ويزال القالب، ويعالج الأنبوب الناتج حرارياً، وذلك بالتسخين حتى درجة حرارة عالية بما فيه الكفاية من أجل تليينه إلى أن ينتج منه تشكيلة أولية صلبة.

يبين الشكل (4-5) طريقة OVD لإنتاج تشكيلة (preform) مناسبة للألياف. تبلغ عدد الطبقات المتشكلة حوالي 1000 طبقة للتحكم بنوعية قرينة الانكسار.

2- من أجل تقليل أيونات OH يعتمد إلى تحرير غاز الكلور إلى قلب المفاعل وذلك لتشكل $O_2 + HCL$ حيث يتم التخلص منهما على شكل غازات.

3- إن الألياف التي نحصل عليها في هذه الطريقة هي ألياف متعددة الأنموذج ذات تخمّد حوالي $0.9[dB/km]$ وعرض حزمة حتى $1[GHz/km]$ ويمكن أيضاً إنتاج ألياف ضوئية وحيدة الأنموذج بمعامل تخمّد حوالي $0.4[dB/km]$. إن القيم السابقة مخصصة لطول موجة $1.3[\mu m]$.



الشكل (4-5)

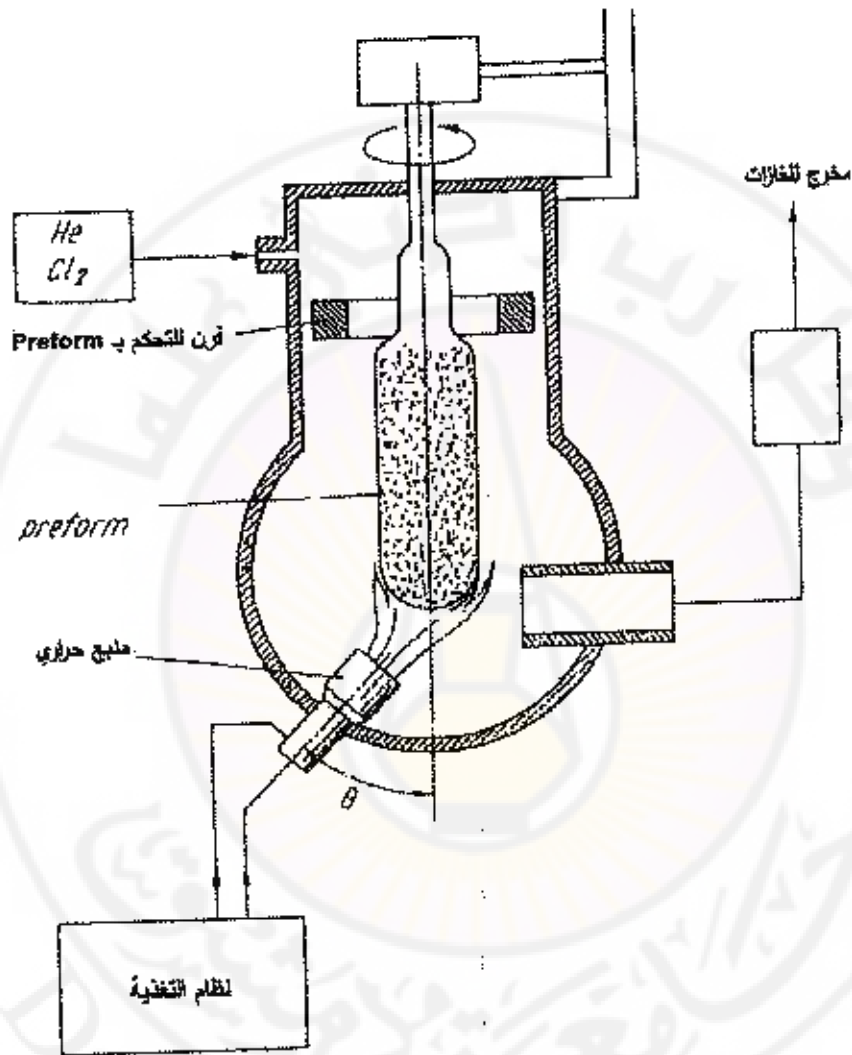
3-4-5 التراكم المحوري البخاري (VAD) Vapour Axial Deposition

يبين الشكل (5-5) طريقة إنتاج تشكيلة المركب الأولي لليف (VAD)، وتسمى بطريقة التراكم المحوري البخاري (VAD)، وأحياناً تعرف بتراكم البخار المحوري (AVD).

يحدث التراكم في هذه الحالة على نهاية القالب الدوار الذي يُسحب أثناء تزايد التشكيلة الأولية. يمكن إنشاء تشكيلة نواة طويلة جداً بهذه الطريقة يمكن تراكم الغلاف على القلب بواسطة المعالجة الحرارية الناتجة عن المنيع الحراري. وبالمقابل يمكن إنشاء ليف مكسو وذلك بإدخال تشكيلة النواة داخل أنبوب زجاجي ذي دليل انكسار أصغر، ومن ثم سحب الليف من الأنبوب، وهذا ما يعرف بتشكيلة (قشيب ضمن أنبوب).

تنتج طريقة VAD كلاً من ألياف SI وألياف GRIN. تنتج ألياف GRIN عندما تتغير كثافة الجسيمات المتراكمة بسبب تدرجات درجة الحرارة في المستوى المتعامد مع محور النواة.

إن درجة حرارة المفاعل يمكن أن تصل حتى 1500°C في هذه الطريقة.



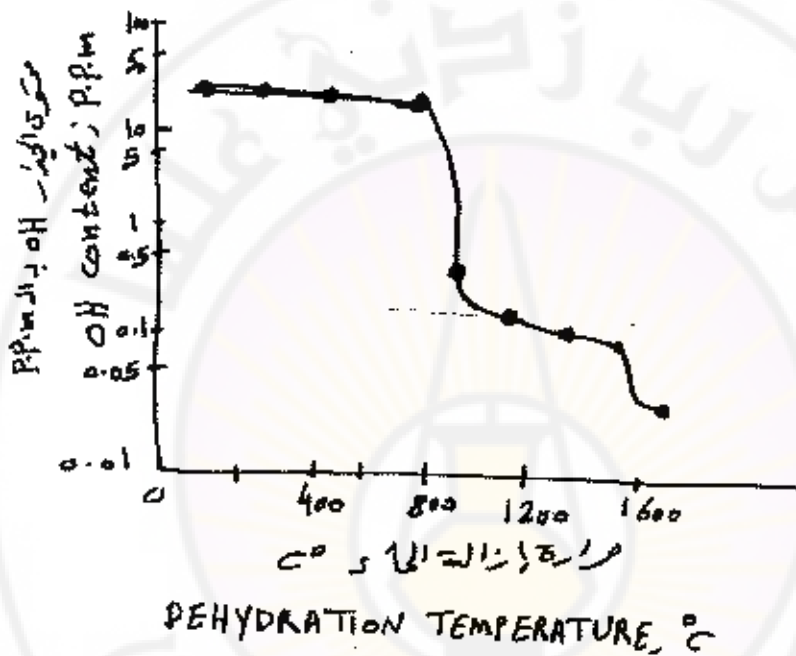
الشكل (5-5)

إن مدخل غازات $\text{He} - \text{Cl}_2$ يمكن أن يسهم بشكل فعال التقليل ما أمكن من أيونات OH اتصل إلى حوالي $(0.05[\text{ppm}])$. إن التشكيلة التي لحصل عليها في هذه الطريقة يمكن أن لحصل من خلالها على أوف ضوئي بطول تقريباً $200[\text{km}]$.

في الحياة العملية نستخدم تشكيلة (preform) تؤمن ليفاً طوله حوالي 20[km].

يبين الشكل (5-6) علاقة الأيون OH بدرجة حرارة إزالة الماء ويوجد الغاز المناسب

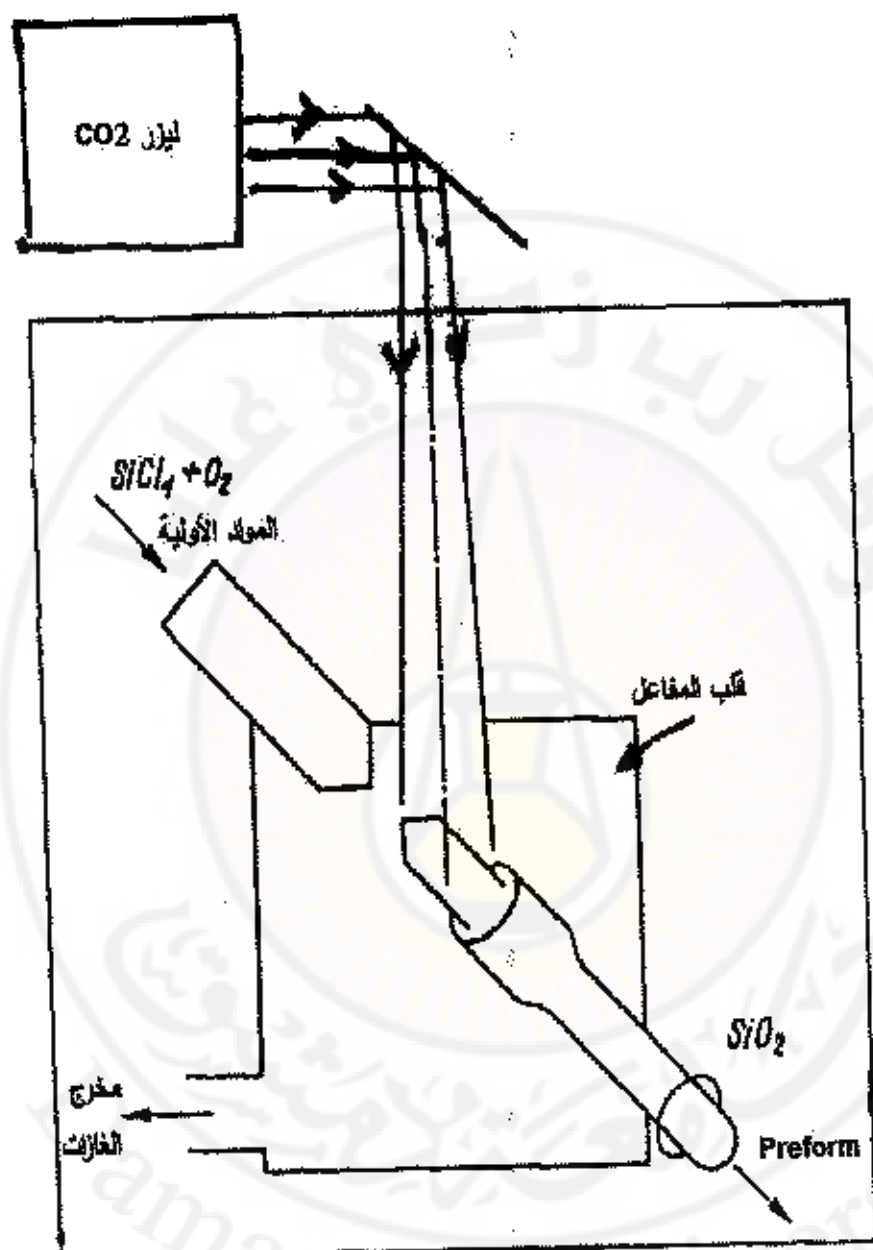
(CL₂ - He).



الشكل (5-6)

توجد طريقة أخرى لإنتاج Preform باستخدام ليزر CO₂ المغذي باستطاعة 200[W]، وإن درجة الحرارة الداخلية للمفاعل يمكن أن تصل إلى 1700°C، والتي من خلالها نحصل على البخار الذي له SiO₂، ومن ثم الحصول على الزجاج. نحصل بهذه الطريقة على تشكيلة بقطر 10[mm] وطول 50[mm] خلال 2.5 ساعة. أيضاً هذه الطريقة تعطينا أليافاً ضوئية بمعدل OH لا يزيد عن (3[ppm]).

يبين الشكل (5-7) طريقة إنتاج Preform بالاعتماد على ليزر CO₂.



الشكل (5-7)

5 - 5 سحب الليف *Fiber Drawing*

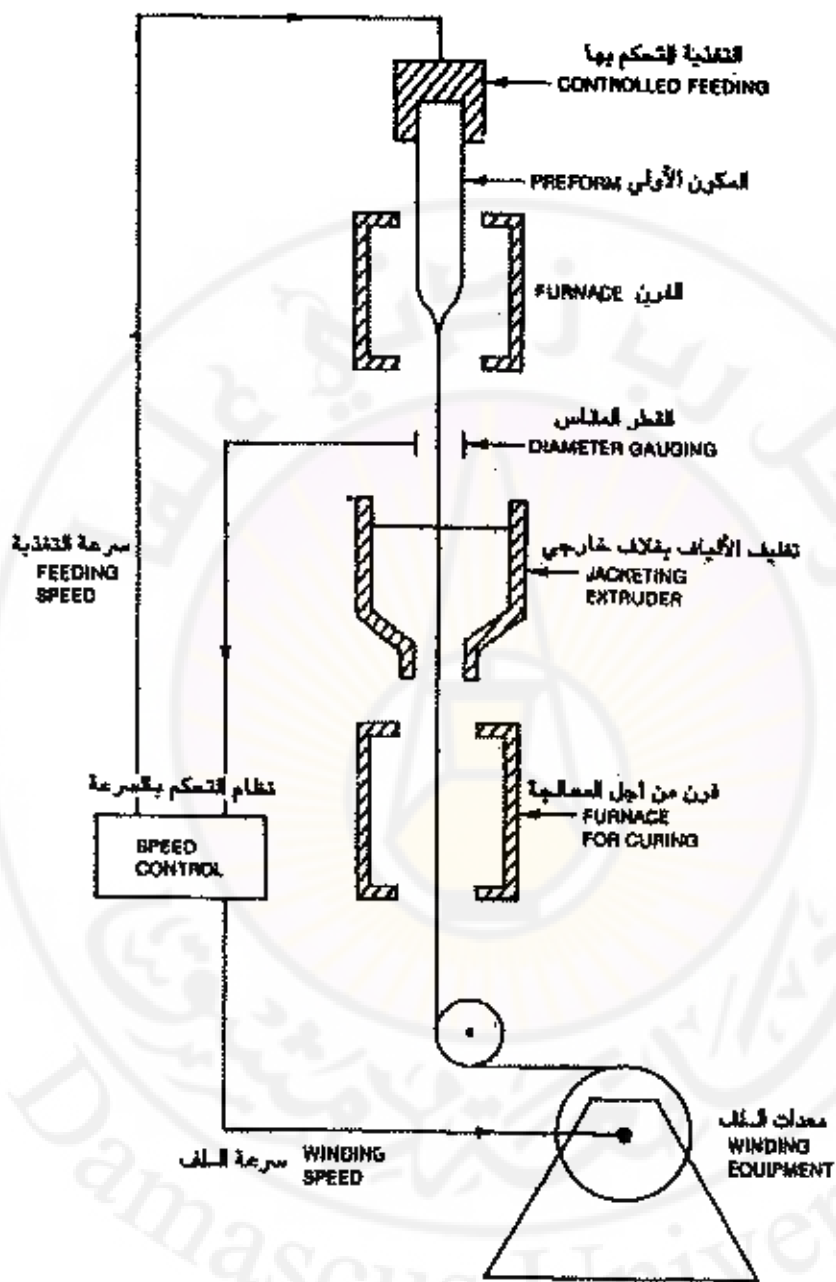
يتم سحب التشكيلات الأولية إلى ألياف بواسطة نظام متكامل لسحب الليف واقفه على معدات اللف (*WINDING EQUIPMENT*).

1- توصل التشكلة إلى تغذية دقيقة تحركها إلى داخل الفرن بسرعة مناسبة تصمم طريقة السحب بحيث تنتج أليافاً ذات تغيرات صغيرة في أقطارها بقدر الإمكان. يقلل هذا من تخامد الليف إلى الحد الأدنى ويحسن قوته.

2- تظهر أيضاً الحاجة إلى التحكم الدقيق بالقطر لكي تصبح الألياف متوافقة مع الموصلات الدقيقة المصممة من أجل خسارة توصيل قليلة. تتم خلال عملية السحب بشكل دائم مراقبة القطر بجهاز قياس دقيق مثل ميكرومتر ليزري. كما هو مبين في الشكل (5-8).

3- يطبق غلاف على الليف مباشرة بعد أن يكون قد تم سحبه وقياسه، إن الغلاف هو حاجز ضروري لحماية الليف من الرطوبة والتآكل. ومن مواد التغليف المناسبة نذكر الكينار (*Kynar*) والأيبوكسي (*Epoxy*).

4- لأسباب اقتصادية يفضل أن يكون معدل السحب مرتفعاً وبعد معدل $1[m/s]$ سريعاً نوعاً ما، ويمكن إجراء السحب بسرعات أكبر وذلك باستعمال آلات سحب متخصصة.



الشكل (8-5) جهاز سحب الألياف البصرية

يمكن تصنيع ألألياف PCS بسحب تشكيلة أولية من سيليكات نفية بالطريقة الميينة بالشكل السابق. إن قسم التغليف المييين بالشكل يحتوي على مادة الإكساء البلاستيكية وهي عادة RTV لمسيلكون. ويفيد الكساء أيضاً كحاجز وقاية.

5 - 6 كابلات الألياف البصرية Optic Fiber Cables

يمكن تصنيع العديد من كابلات الألياف البصرية وفقاً لنوع التطبيق المستخدم، فعلى سبيل المثال إن الكابل المستخدم للأغراض المخبرية له متطلبات بسيطة في الحماية حيث يستخدم الليف المحمي بغلاف واقٍ رقيق. بينما يحتاج الليف المستخدم عبر البحار حماية كبيرة خلال النقل والتركيب والتشغيل. وقد اتبعت تصميمات متنوعة للكابلات لكي تفي بمتطلبات تطبيقات الليف المختلفة.

يجب أن تحسن عملية تصنيع الكابلات الخواص الميكانيكية للليف من غير أن تسبب أي ضرر لخصائصه البصرية. فقد تسبب عملية تصنيع الكابل انحناءات ميكروية في الليف مما يزيد في تخامده. يمكن أيضاً أن تحدث الانحناءات الميكروية عندما يتعرض الكابل لإجهاد نتيجة حركة من أي نوع (مثلاً عندما يلف الكابل على البكرة). تصمم الكابلات بطريقة بحيث إنها تقلل إلى الحد الأدنى الانحناءات خلال الإنشاء وتحد من حدوثها فيما بعد.

فيما يلي أنواع الدعم والحماية المطلوبة:

1- قوة الشد *Tensile Strength*: يطلب تحقيق قوة شد عالية عندما يتم تركيب الكابل

بسحبه ضمن مجرى. يجب أن تتحمل عناصر الشد وزن الكابل عندما يعلق في مجرى شاقولي، وعندما يعلق بين أعمدة، وعندما يركب تحت المحيط. يجب أن تتحمل الكابلات المشدودة بين عامودين الإجهادات التي تسببها محولات الجليد والرياح.

2- مقاومة التحطيم *Cruch Resistanc*: تتعرض الكابلات غالباً لقوى جانبية كبيرة يمكن أن تحطم لولاً زجاجياً. يجب أن تحافظ الألياف في الكابلات على سلامتها من بعد أن تكون قد تعرضت لمرور سيارات كبيرة عليها.

3- الحماية من الانحناءات المفرطة *Protection From Excess Bending*: تسبب الانحناءات الحادة مشكلتين خسارة إشعاعية عند الانحناء والانقطاع الممكن في الليف. إن الكابل الجيد يجب أن يكون صلباً بما فيه الكفاية لمنع الانحناء الزائد ويجب أن يكون مرناً بما فيه الكفاية من أجل سهولة التداول والتركيب.

4- الحماية من التآكل *Abrasion Protechion*: إن الألياف الزجاجية تتلف بشدة إذا تعرضت للتآكل. يمكن للميوب الصغيرة التي تسببها التآكلات أن تنتشر خلال الزجاج وتزيد الخسارات بشكل كبير.

5- عزل الاهتزاز *Vibration Isolation*: ميزيد الاهتزاز خسارات الليف. تصمم الكابلات بحيث إنها تحمض الليف وتخدم الحركات المفرطة.

6- الحماية الكيميائية من الرطوبة *Moisture And Chemical Protection*: تؤدي الرطوبة والكيماويات إلى تنفي نوعية الألياف الزجاجية بعد تعرضها لهذه المؤثرات لفترة طويلة. تحفظ بعض الكابلات الليف من التماس مع هذه المؤثرات.

لقد طورت عدة أشكال بنوية عامة لإنتاج كابلات مناسبة منها:

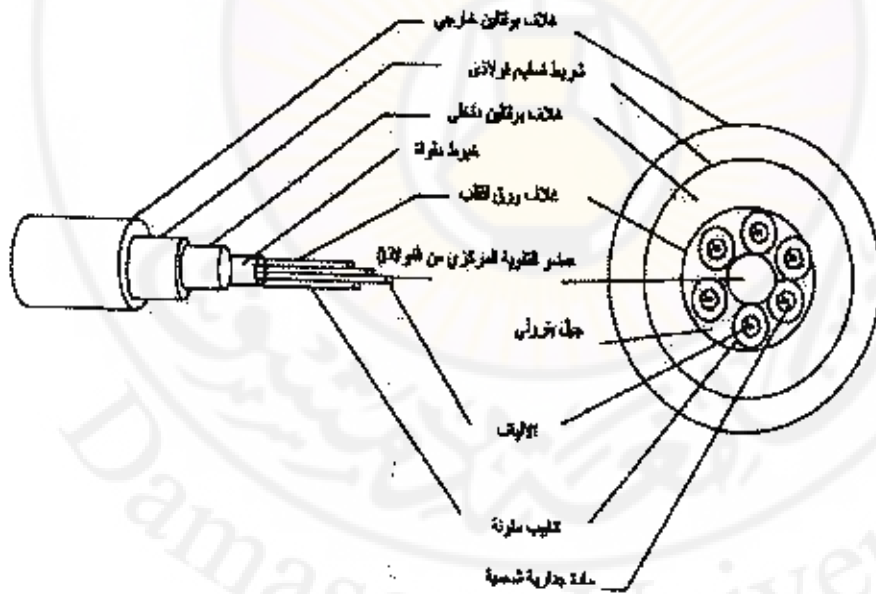
- 1- الكابلات وحيدة الليف والكابلات متعددة الألياف.
- 2- الألياف المحزومة المتراصة والألياف غير المحزومة.
- 3- أعضاء تقوية (دعم) مركزية وأعضاء دعم خارجية.
- 4- أعضاء دعم عازلة وأعضاء دعم معدنية.

5- بنى ذات أشكال هندسية دائرية وأشكال هندسية شريطية.

كما أنه يوجد تصنيف آخر للكوابل وذلك حسب الاستخدام وطرق التمديد:

- 1- كوابل داخلية: تستخدم من أجل بناء الشبكات الداخلية وضمن الأبنية، ويكون الكبل ذا بنية بسيطة ويقطر أقل من 1 سم.
- 2- الكوابل متعددة الألياف ذات الاستخدام الخارجي: حيث يمكن أن يكون مطموراً أو ضمن قساطل بلاستيكية، ويصل عدد الألياف إلى 36 ليفاً أو 96 ليفاً، ويمكن أن يكون أكثر من 144 ليفاً.
- 3- الكوابل المعلقة أو الهوائية.
- 4- الكوابل البحرية.

يبين الشكل (5-9) كابل ألياف ضوئية (مطمور) مزدوج الغلاف مسلح بشريط فولاذي.



الشكل (5-9) كابل ألياف ضوئية مطمور

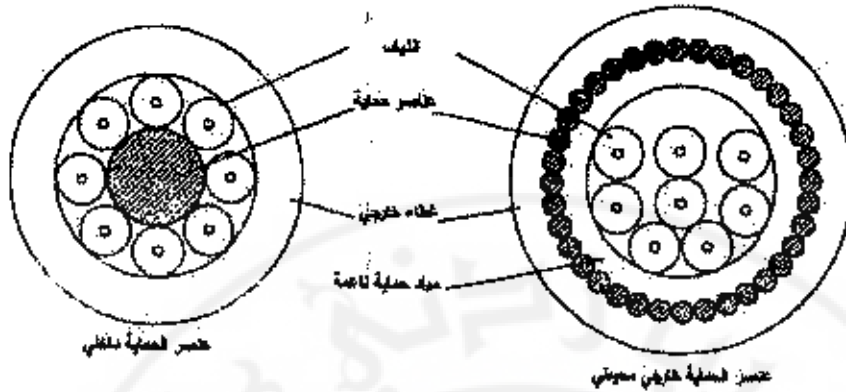
5 - 6 - 1 مجالات استخدام الكوابل البصرية

تستخدم كابلات الألياف الضوئية في العديد من المجالات منها :

- 1- شبكات الاتصال بعيدة المدى بين الدول وعبر البحار.
- 2- شبكات الربط بين المراكز الهاتفية بين المدن.
- 3- شبكات الربط بين المقاسم المحلية.
- 4- ربط المشتركين في الشبكات الرقمية المتكاملة *ISDN*.
- 5- شبكات اتصال السكك الحديدية.
- 6- شبكات التلفزيون والراديو.
- 7- شبكات الاستوديوهات والكاميرات التلفزيونية.
- 8- الشبكات الصناعية (في المعامل والمصانع).
- 9- شبكات الحواسيب.
- 10- التطبيقات العسكرية (وصلات التحكم والقيادة على السفن والطائرات وكذلك اتصالات مراكز القيادة وغرف العمليات، وفي الصواريخ الموجهة).

5 - 6 - 2 بنية كوابل الألياف البصرية المغمورة تحت الأرض لأغراض الاتصالات

- 1 - يبين الشكل (5-10) بنيتين نموذجيتين لكوابل الألياف الضوئية المغمورة تحت الأرض الأولى فيها عنصر الدعم الميكانيكي داخلي (a)، والثانية يكون عنصر الدعم الميكانيكي خارجي على محيط الألياف الضوئية.



الشكل (5-10)

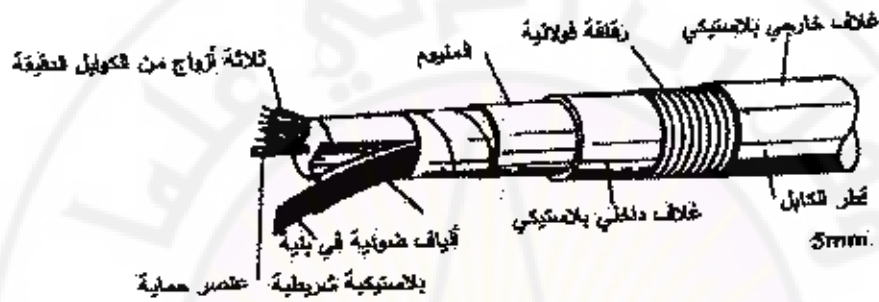
2 - من أجل هدف تكبير تحمل الكابل للظروف المحيطة فإنه عادة يتم تصنيع الكوابل بطريقة أخرى أي بإضافة عناصر دعم ميكانيكية إضافية والألياف الضوئية متوضعة ضمن مجارٍ محيطية.

3 - وأيضاً لزيادة عدد الألياف الضوئية في الكابل الواحد فإنه يتم توزيع الألياف على شكل مصفوفة أبعادها متساوية ($N \times N$)، وذلك لتصنيع كابل شريطي يمكن أن يصل فيه عدد الألياف إلى 144 ليناً أي أن أبعاد المصفوفة هي (12×12) ليناً كما هو مبين بالشكل (5-11).

المواد الداعمة المستخدمة في تصنيع كوابل الألياف الضوئية متعددة منها: PVC بأقطار مختلفة، كلفار، بوليبيثيلين، غلاف ألومنيوم مموج، غلاف شريطي ميلار (millar)، داعم فولاذي، غلاف حراري،...

تضاف عادة أعضاء التقوية إلى الكابلات الليفية لتساعد في تحمل عملية السحب وتحمل إجهادات القص والانحناء. إن الأسلاك الفولاذية والألياف النسيجية هي المواد الأكثر

شيوعاً لهذا الغرض. إن الفولاذ قوي إلا أنه أثقل من الألياف النسيجية ويستعمل الفولاذ في بعض الكابلات التجارية. إن الليف النسيجي *Kelvar* هو بوليمر قوي جداً، وأحد مواد الدعم الأكثر استعمالاً. إن النسبة الفعالة لقوته إلى وزنه هي تقريباً أربعة أضعاف تلك الخاصة بالفولاذ. ويستعمل بشكل شائع كألياف تقفل وتجدل حول الليف المبطن المدعوم، ويمكن أن يجدل أيضاً حول الأنبوب في النوع ذي الليف غير المقيد.



كابل ضوئي ذو 6 ألياف مع ثلاثة أزواج أخرى من الكوابل



كابل ضوئي (144 ليفاً)

كابل ضوئي الألياف متوضعة في حفر محيطية

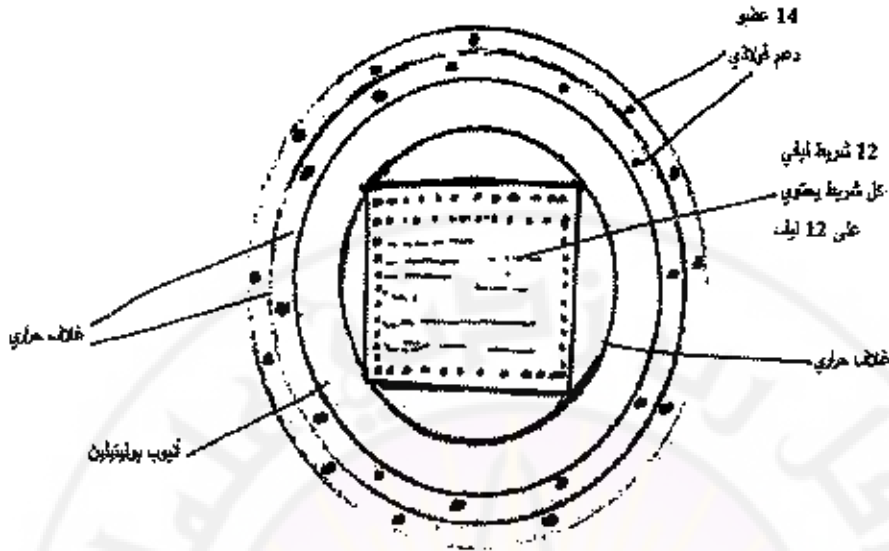


الشكل (5-11)

إن الكابل المبين بالشكل الأخير ذا البنية الشريطية مخصص للأنظمة الهاتفية حيث يحتاج الأمر إلى إرسال عدد كبير من الألياف على طول مسارات مشتركة بين المقاسم الداخلية.

يتضمن كل شريط رفيع عدداً يصل حتى 12 ليفاً (وفي أحد الأنواع تحجز الألياف إفرادياً ضمن غلاف من البوليمر، ومن ثم توضع في صف مسطح وتثبت في مكانها بوضعها بشكل شرائح بين طبقة سفلية وطبقة علوية من شريط لاصق) وتميز الألياف بألوانها من أجل التعرف عليها، يصل عدد الأشرطة حتى 12 شريطاً ينتج تركيبة مربعة تحتوي على 144 ليفاً. يبلغ القطر الخارجي 12[mm] يبني الشريط من 12 ليفاً محمياً بين شريطين لاصقين من البوليستر.

يطمر في غلاف البولي إيثيلين المحيطي 28 عضو تقوية فولاذي خارجي فيستغل هذا الكابل القوي بفعالية كبيرة الحيز الذي يشغله حيث يحتوي على 144 ليفاً ضمن قطر يبلغ 12[mm] كما هو مبين بالشكل (5-12).

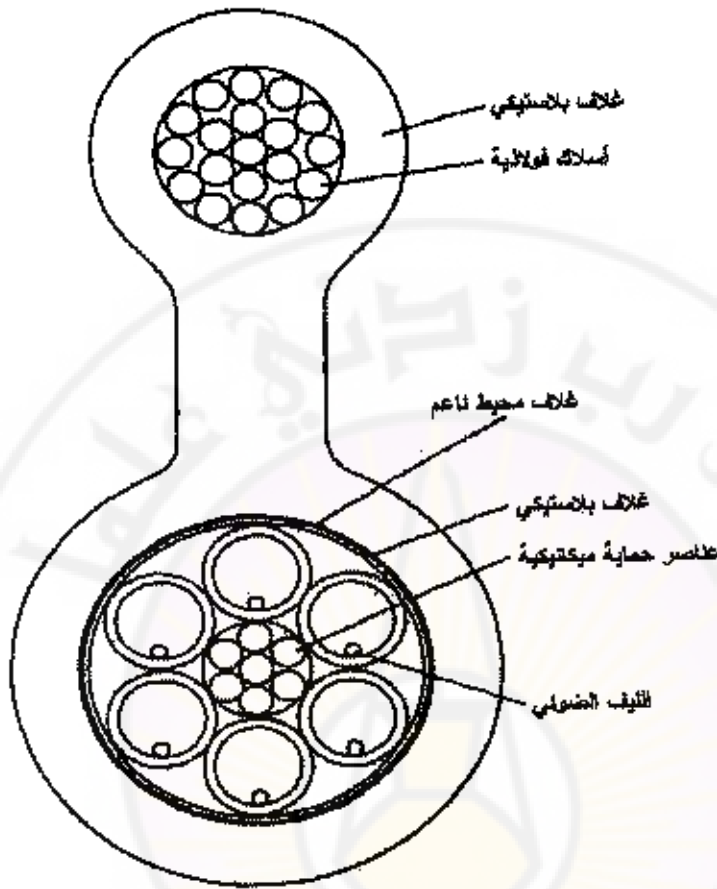


الشكل (5-12)

5 - 6 - 3 بنية كوابل الألياف البصرية الهوائية (المغطاة)

يبين الشكل (5-13) بنية كابل ضوئي هوائي يستخدم فيه [6] ألياف ضوئية حرة الحركة، ومحمية بالعديد من الطبقات منها أسلاك الفولاذ وغلاف بلاستيكي خارجي بالإضافة إلى عناصر حماية داخلية أخرى مثل الـ *Kelvar*.

إن هذه الكوابل معرضة لعدد من العوامل الخارجية التي تؤثر في انسياب الضوء في قلب الليف الضوئي، منها الرياح القوية، وتعرضها للعابثين، ودرجات الحرارة المختلفة بين $+70^{\circ}\text{C}$ و -30°C ، والحاجة الماسة لتثبيتها بشكل مستقيم كل $1/3[\text{km}]$.



الشكل (5-13)

5 - 6 - 4 الكابلات المغمورة Undersea Cables

تعاونت كثير من الدول والشركات على تنفيذ كابلات بحرية تمتد في قاع البحار لها بنية محكمة الحماية كما هو في الكابلات المغمورة في الأرض، بالإضافة إلى الحماية المضاعفة من الرطوبة والتآكل الكيميائي، والحماية المؤكدة بأسلاك فولاذية ضد بعض الظواهر البحرية، وخصوصاً أسماك القرش. تم بموجب هذه الكابلات ربط عدة دول مع بعضها بواسطة الكابلات البصرية ولعل أولها كان TAT8 الذي يربط USA مع أوروبا تلاه خطوط أخرى كان

آخرها TAT-12/13 بطول يبلغ 5913 كيلومتر ويسعة قدرها حوالي 300000 قناة هاتفية بمعدل $64[kbit/s]$ لكل قناة. ونبين في الفقرة التالية بعض المشاريع الرائدة لاستخدام كوابل الألياف الضوئية.

5 - 7 المشاريع الرائدة لاستخدام كوابل الألياف البصرية

سوف نستعرض بشكل سريع بعض مشاريع نظم الاتصالات التي تستخدم كوابل الألياف الضوئية، ومنها مشروع TAT-12/13، ومشروع SEA-WE-ME-2، ومشروع FLAG.

5 - 7 - 1 مشروع الاتصالات عبر المحيط الأطلسي *Telecommunications project TAT - 12 / 13 Through ATLANTIC*

إن هذا المشروع هو من تنفيذ شركة Alcatel، ويتألف من كابلين ضوئيين كل منهما مؤلف من زوجين من الألياف الضوئية، وهو مزود بمضخمات ضوئية.

يهدف المشروع الأول TAT - 12/13 إلى ربط بريطانيا مع كل من فرنسا والولايات المتحدة، أما المشروع الثاني فيربط فرنسا مع الولايات المتحدة.

تم وضع المضخمات الضوئية ضمن مسافات $45[km]$ عبر الأطلسي ولكل $75[km]$ في المسافة الفاصلة بين بريطانيا وفرنسا.

يكون الإرسال بمعدل $5[Gbit/s]$ عبر كل زوج من الألياف الضوئية وبالتالي تكون السعة الإجمالية لنظام TAT-12/13 حوالي 300000 قناة هاتفية بمعدل $64[kbit/s]$ لكل قناة.

5 - 7 - 2 مشروع الربط بين جنوب شرق آسيا مع الشرق الأوسط و أوروبا الغربية
(SEA-ME-WE-2) South-East Asian, Middle East, Western Europ 2

وضع هذا المشروع في الخدمة في تشرين الأول عام 1994، ويستخدم كوابل ألياف ضوئية يبلغ طولها $18190[km]$ تمتد بين سنغافورة وماليزيا إلى فرنسا، كما ويمكن ربطها مع كوابل الألياف الموجودة عبر المحيط الأطلسي لتصل حلقة ربط دولية لتبادل المعلومات بأحجام كبيرة.

يتألف المشروع SEA - ME - WE.2 من 137 مكرراً، وكذلك وحدات تفريغ بحرية و 32 طرفية كل منها بسعة $565[mb/s]$.

تبلغ سعة هذا المشروع 16000 قناة هاتفية بمعدل $64[kbit/s]$ لكل قناة، كما أنه بإمكان هذا النظام نقل 60000 مكالمات هاتفية بنفس الوقت.

تم تصنيع معدات هذا النظام من قبل الشركات التالية: ALCATEL (فرنسا)، STC (انكلترا)، AT&T (الولايات المتحدة).

توجد النقاط الأرضية لهذا المشروع في كل من سنغافورة، جاكرتا، كولومبو، بومباي، جيبوتي، جدة، السويس، الاسكندرية، باليرمو، تونس، الجزائر، مارسيليا، قبرص، تركيا (استانبول).

حيث تم طمر الكابل الضوئي تحت قاع البحر بعمق $1[km]$ في الأماكن التي تشهد حركة سفن كبيرة عبر البحر الأحمر وخليج السويس. ومع ذلك يمكن تحويل الاتصالات إلى نظم أخرى كالأقمار الصناعية، أو كوابل بحرية أخرى خلال مدة لا تتجاوز الساعتين.

5 - 7 - 3 مشروع وصلة كابل الليف البصري حول العالم (FLAG) Fiber Optic Cable Link Around the Globel

يستخدم هذا المشروع أطول مسافة من الكوابل الضوئية حتى الآن، حيث يربط بين أوروبا والشرق الأوسط والشرق الأقصى مروراً بالبحر المتوسط والمحيط الهندي. يبلغ طول الكابل الضوئي في مشروع FLAG حوالي $27300[km]$ بسعة إجمالية تبلغ 12000 قناة هاتفية بمعدل $64[kb/s]$ وذلك باستخدام زوجين من الألياف الضوئية يعمل كل منها بمعدل $5[Gbit/s]$ ، وعدد النقاط الأرضية له 11 نقطة، حيث بإمكان هذا الكابل تقديم الخدمات الهاتفية بنظام SDH (Synchronous Digital Hierarchy)، ونظام تبادل المعطيات، وإرسال الصور والنصوص بعرض مجال كبير ونظام المؤتمرات المرئية، وكذلك نقل الصور للأغراض الطبية وشبكات Metroplian Area Networks (MAN) على المستوى الدولي.

في الوقت الحالي إن طول كوابل الألياف البصرية يتعدى مليون كيلومتر خاصة إذا ما علمنا أن معدل الزيادة السنوية في عدد الهواتف تصل إلى 40 مليون خط حتى عام 2020 ليصل المجموع الكلي للهواتف إلى 1000 مليون خط. ولولا الإمكانية الهائلة للألياف لتففيذ هذه السعة لما أمكن انجاز ذلك. في الصين وحدها يبلغ طول شبكة الصين البصرية حوالي 173000 كيلو متر.

5 - 7 - 4 مشروع وصلة كابل الليف البصري في سورية Fiber Optic Cable Link in Syria

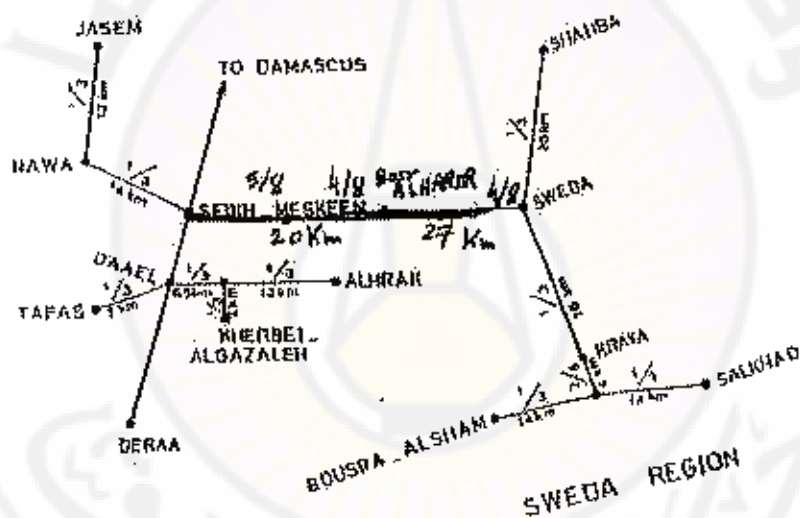
لمواكبة التطور الحاصل في إنشاء نظام عالمي متكامل للاتصالات الضوئية، قامت المؤسسة العامة للاتصالات السلكية واللاسلكية في سورية بتصميم نظام وصل كوابل الألياف الضوئية الذي يمتد في كافة المحافظات السورية، حيث يحتوي الكابل الرئيسي على ثمانية ألياف ضوئية ويربط مدينة حلب بحمص عبر مدينة حماة والمستغل منها فقط ثلاث ألياف، بينما الكابل

الرئيسي الذي يربط حمص بدمشق فهو يحتوي على 16 ليفاً ضوئياً والمستغل منها فقط 7 ألياف. وهكذا تبقى المحافظات حيث بلغ طول الكابلات الممتدة في سورية حوالي $5000[km]$.

يبين الشكل التالي المخطط التفصيلي للمشروع في بعض المحافظات والمخطط الرئيسي لسورية بشكل كامل. مع الملاحظة أنه لم يستخدم إلا مكرر واحد فقط في مدينة سراقب.

B: SPUR ROUTES

DARAA' REGION



[illegible]



الفصل السادس

وصلات الألياف البصرية و الموزعات

Fiber Optics Connectors and Couplers

تعدّ الوصلات والموزعات الضوئية من العناصر المهمة في الاتصالات الضوئية حيث تعدّ عناصر مرافقة للليف الضوئي، ومن هنا فإن التطرق إلى مبدأ عمل هذه العناصر مهم جداً كونها ضرورية، والأهم من ذلك أنها تسبب ضياعات عالية في الطاقة إذا لم يحسن تصميمها وتوصيلها.

6 - 1 وصلات الألياف البصرية Fiber Optics Connectors

إن الألياف الزجاجية لا يمكن تصنيعها بأطوال لا نهائية، لذلك يجب إجراء التوصيل الدائم أو المؤقت لهذه الألياف بعضها مع بعض من أجل وصلات تزيد بضعة كيلومترات. تكون التوصيلات في الأنظمة المعدنية بسيطة عادة، يمكن وصل هذه الأسلاك وصلاً دائماً باللحام بسهولة تامة. إن الضياعات في وصلة اللحام هذه تكون صغيرة للغاية لدرجة أنها توضع عادة في الحسبان في تصميم النظام. ويمكن أيضاً أن يتم التوصيل ما بين الأسلاك المعدنية بوصلات قابلة للفك وذات وثوقية، وتكون اقتصادية، ومن غير ضياع يذكر. هذه الميزات في وصلات الأسلاك المعدنية ربما لا تجدها تماماً في مثيلاتها الليلية، وإن المشكلات الناتجة عن وصل الألياف مع بعضها حد من انتشار الاتصالات الضوئية في بادئ الأمر، وذلك لقلة الوصلات المقترحة، إلا أن الأمر تغير في الثمانينات فكانت هناك وصلات مقترحة، ربما ذات ميزات مقبولة خاصة من ناحية الضياعات.

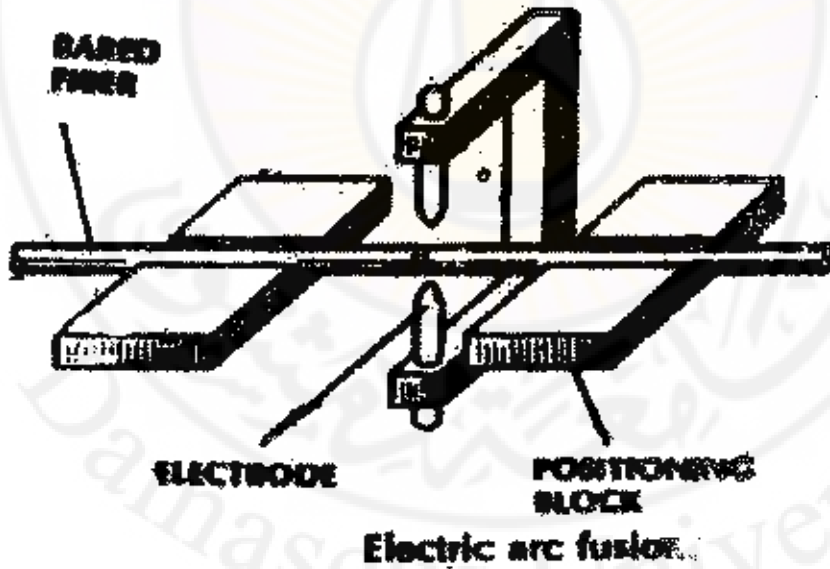
تقسم وصلات الألياف الزجاجية إلى نوعين أساسيين، وصلات دائمة، ووصلات قابلة

الفك.

في كثير من الأحيان تكون الحاجة في أنظمة الاتصالات إلى وصلات دائمة ثابتة مع الزمن، ويمكن تحقيق هذه الوصلات: إما بالصهر، أو باستخدام مادة لاصقة، أو بالضغط الميكانيكي، أو بالإنثين معاً.

التوصيل الدائم بالصهر *Fusion Splicing*

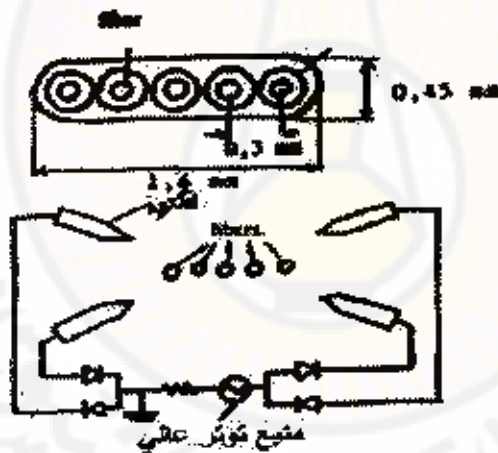
يمكن الحصول على وصلات الانصهار الدائمة بتجهيز الليفين المراد وصلهما بطريقة الخدش والقطع، وتنعيم أطراف الألياف، واستخدام آلة اللحام التي تعتمد على القوس الكهربائي الذي يولّد درجة حرارة إنصهار الليفين المراد وصلهما، الشكل (1-6). ويمكن فحص التراصف بالنظر بواسطة مجهر أو بعض تجهيزات التكبير الأخرى. تبلغ قيمة الضياعات الناتجة عن هذه الوصلات أقل من $0.25[dB]$ ، ويمكن ببعض الحرص الحصول على ضياع أقل من $0.1[dB]$.



الشكل (1-6)

والاقتراحات حتى ذلك الوقت قليلة، لكن الوصلات المقترحة، وعلى سبيل المثال، آلات الصهر التي تحتوي على أكثر من قوس كهربائية، تستخدم لوصل عدد من الألياف بعدد الأكواس الكهربائية المستخدمة في الآلة.

وتتميز هذه الوصلات بضياعات أعلى قليلاً من الوصلات أحادية الليف، وتصل أحياناً إلى $1[dB]$ على كل وصلة الشكل (3-6) أما الوصلات الدائمة الشريطية لوصل الألياف الشريطية إذ توضع الألياف العارية في أخاديد دقيقة بوساطة حفر رقائق السيليكون الشكل (2-6). يتم تثبيت هذه البنية بشكل دائم وتلمع الأطراف ويصنع شريط ليفي ثان بالطريقة ذاتها. يتم الحصول على الوصلة الدائمة ذاتها، وذلك بوضع الرقائق بعضها فوق بعض، كما هي مبينة بالشكل، ويتم تثبيت الوصلة الدائمة كاملة بوساطة أطواق معدنية.



الشكل (3-6)

6 - 1 - 2 الوصلات القابلة للفك Connectors

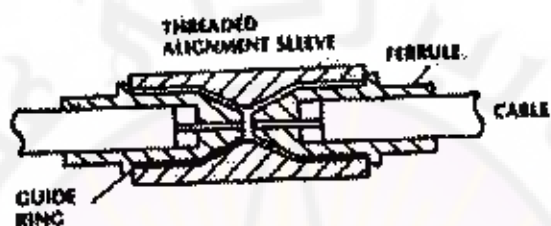
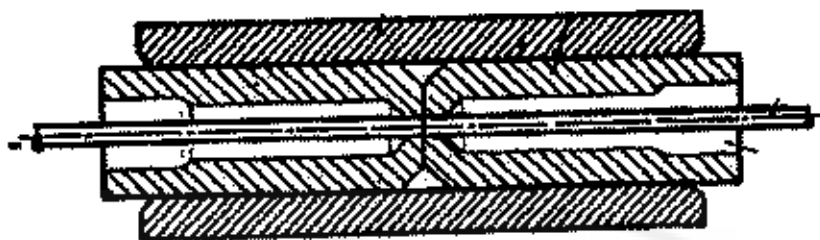
إن الوصلات الدائمة هي وصلات ثابتة لا تسمح بالدخول إلى الشبكة، لذلك لا بد من الحاجة إلى وصلات متغيرة مع الزمن، وذلك كلما دعت الحاجة إلى ذلك. لكن من أجل وصل

فقال قد جعلت الوصلات عالية الجودة، صعبة التصميم ومكلفة الإنشاء. لذلك لا بد من مجموعة شروط يحققها هذا النوع من الوصلات:

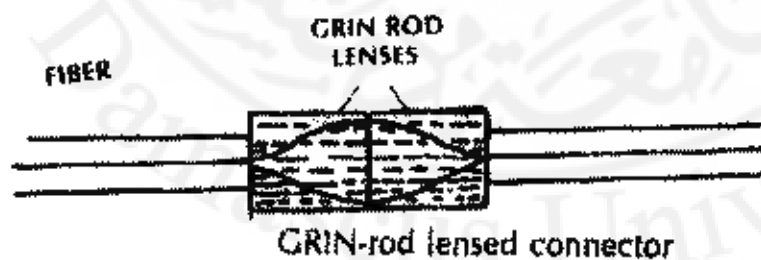
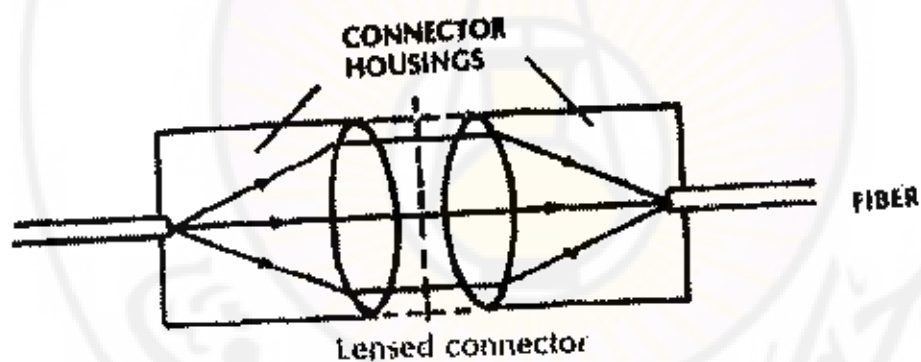
- (1) الضياع القليل في الطاقة بحيث لا يتجاوز في أسوأ الأحوال $3[dB]$.
 - (2) التكرارية: أي من المفترض أن نحصل على نتائج مقارنة بعضها من بعض بتغير ظروف التوصيل.
 - (3) الحياة الطويلة: أي يجب أن تحافظ على النتائج نفسها تقريباً بمرور الزمن، مهما كانت عدد التوصيلات عالية.
 - (4) تبدي قوة عالية تجاه الإجهادات الميكانيكية التي قد تتعرض لها الوصلات.
 - (5) التلائم مع الوسط المحيط: أي تتحمل التغيرات الحرارية والرطوبة والمؤثرات الكيميائية والضغط العالية والإهتزازات.
 - (6) سهولة الاستعمال: أي تركيب الوصلة وفكها يجب أن يكون سهلاً.
 - (7) قليلة التكلفة الاقتصادية.
- إن الوصلات القابلة للفك التي لها المزايا السابقة عالية جداً، أما الوصلات الرخيصة فهي بلاستيكية عادة لا تفي بالغرض تماماً.

لتتراوح ضياعات الوصلة النموذجية من $0.5[dB]$ إلى $3[dB]$. تصمم معظم الوصلات لنتج وصلة تلامسية على سوية واحدة، وذلك بوضع طرفي الليفين أقرب ما يمكن بعضهما من بعض الشكل (4-6).

ويستعاض في بعض الأحيان بالوصلات العدسية التي هي بديل للوسيلة السابقة، نظراً إلى سهولة التركيب، ولأنها قليلة الضياع الشكل (5-6).

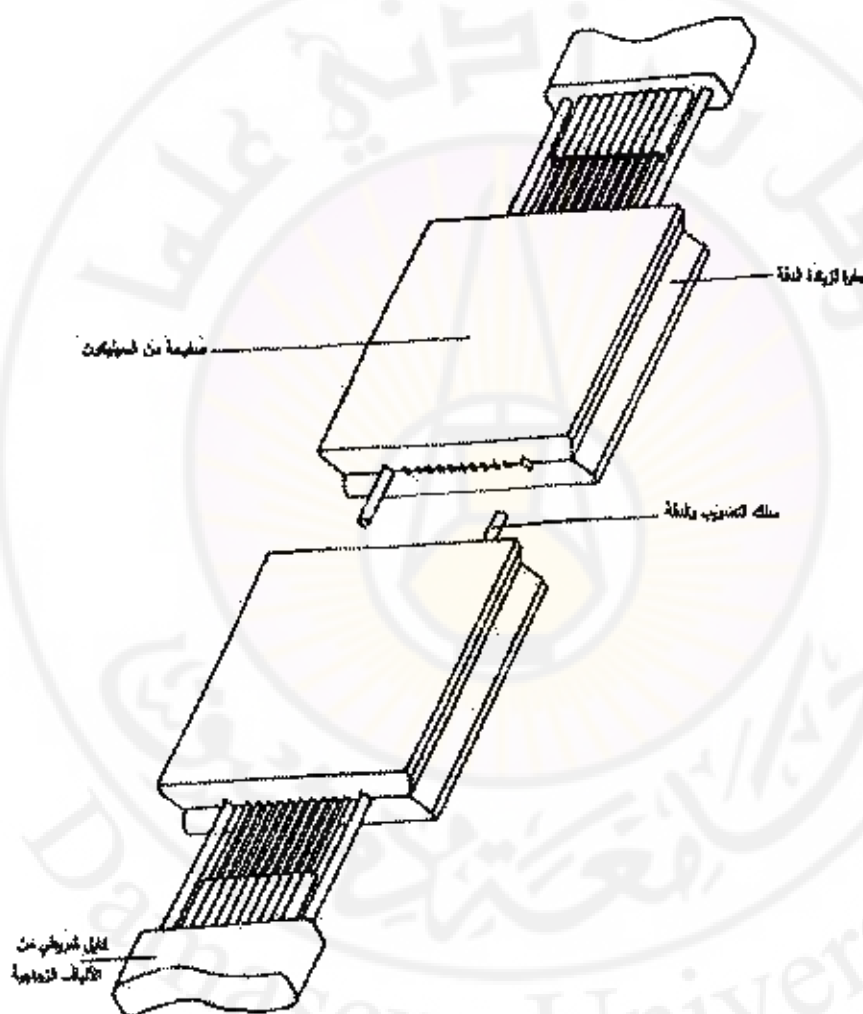


الشكل (4-6)



الشكل (5-6)

الوصلتان المقترحتان السابقتان هما وصلات أحادية اللب ذات مواصفات مقبولة وتفي بالغرض المطلوب، لكن أحياناً نحتاج إلى وصلات لتربط بين الكوابل الضوئية المولفة من أكثر من ليفين عندئذ يزداد الأمر صعوبة في عملية تصميم الوصلة لتحافظ على الشروط سابقة الذكر للوصلات المثالية. هناك عدة اقتراحات لهذا الغرض من بينها الوصلة المبينة بالشكل (6-6).



الشكل (6-6) Multi-Channel Connector

6 - 2 ضياعات الطاقة في وصلات الاتصالات البصرية

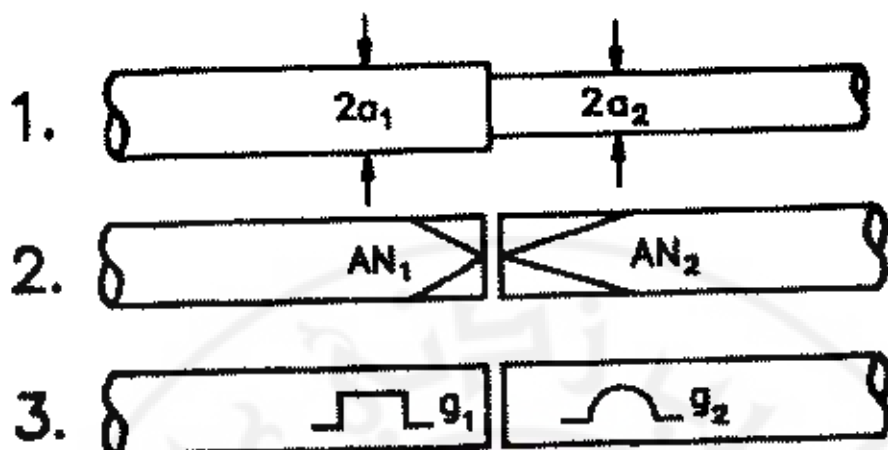
إن تصميم وصلات الألياف الزجاجية (الثابتة وغير الثابتة) يعتمد على توصيل الألياف بعضها مع بعض بحيث تكون ضياعات الطاقة في منطقة الاتصال أقل ما يمكن. واحد من العوامل الرئيسية للحصول على ضياعات متدنية هو تجهيز سطوح الاتصال الشاقولية التي يجري عليها عملية الاتصال بحيث تكون زاوية الميلان تقريباً صفراً، وهذه السطوح تتمتع بالمعان، ويتحقق ذلك باستخدام مبدأ الحف باستخدام أجهزة خاصة بذلك. إن هذه المعالجة ربما تأخذ وقتاً طويلاً، ومكلفة نوعاً ما، بالإضافة إلى صعوبة في استخدام هذه الأجهزة في أماكن عمل هذه الكوابل (عد توصيل الكوابل في الحفر)، يستخدم حينها على الغالب عملية قطع الليف باستخدام أداة ميكانيكية خاصة (قطاعة) مخصصة كذلك مع جهاز تلمسكوب لمراقبة نهاية الليف.

إن تأثير حالة السطح الشاقولي لليف هي نوعية التوصيل من الصعب تقديرها نظرياً لذلك في التحليل التالي نفترض بأن السطوح مثالية ولا يوجد فيها ميلان. بالإضافة لذلك نفترض بأنه عند عملية التوصيل لا يوجد عناصر أخرى غريبة (نرات غبار على سبيل المثال) ما بين مناطق الاتصال. غالباً يمكن تقسيم الأسباب المؤدية للضياعات في الطاقة الضوئية إلى:

- 1- ضياعات داخلية.
- 2- ضياعات خارجية.
- 3- ضياعات الانعكاس أو ضياعات *Fresnel*

6 - 2 - 1 الضياعات الداخلية

الضياعات الداخلية مرتبطة ارتباطاً كلياً بعدم تطابق المحددات الضوئية والهندسية للألياف الموصولة مثل قطر القلب، والفتحة العديدية، وشكل معامل انكسار الضوء كما هو مبين في الشكل (6-7).



الشكل (7-6) أنواع الضغوط الداخلية:

- 1- اختلاف قطر قلب الليف.
- 2- اختلاف في الفتحات العددية.
- 3- عدم مطابقة شكل معامل انكسار الضوء.

(1) اختلاف في قطر القلب

إن اختلاف قطر قلب الليفين الموصولين سيمسبب ارتفاعاً في قيمة التخميد بمقدار:

$$\alpha = -10 \log_{10} \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 : a_2 < a_1 \quad (1-6)$$

وذلك للألياف الزجاجية متعددة النماذج (M-M).

أما بالنسبة إلى الألياف أحادية النموذج (S-M) فيكون عامل التخميد:

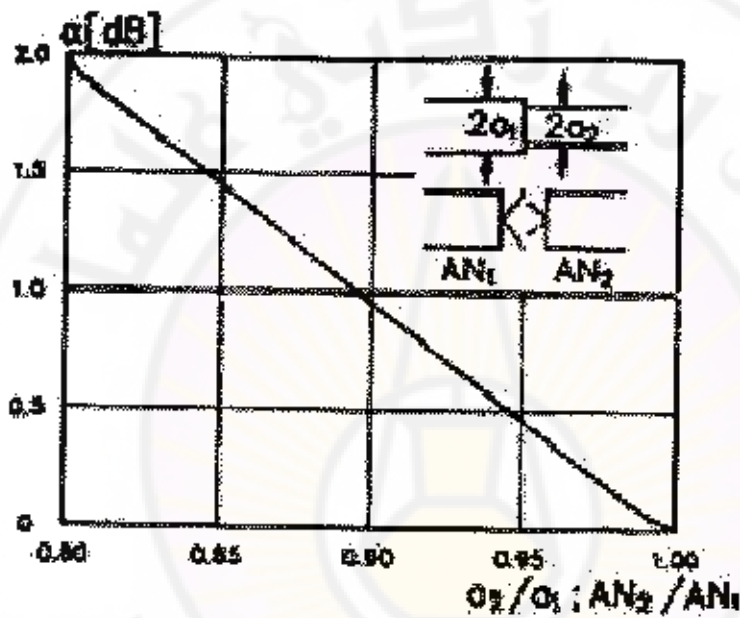
$$\alpha = -20 \log_{10} \left(\frac{2a_1 a_2}{a_1^2 + a_2^2} \right) \quad (2-6)$$

إن القيمة المسموح بها لقطر الألياف الزجاجية متعددة الأنماط تبلغ (CCITT1980)

$$.2a = 50[\mu m] \pm 3[\mu m]$$

إن القيمة العظمى للضياع d المقابلة للقيمة العظمى للاختلاف $\alpha = 1.04[dB]$ هي

$$.d = 6[\mu m] \text{ الشكل (8-6).}$$



الشكل (8-6)

(2) اختلاف الفتحة العنودية

إن اختلاف الفتحات العنودية في حالة الألياف الزجاجية متعدد اللقط (النموذج) يسبب

ازدياداً في قيمة التخميد بمقدار:

$$\alpha = -20 \log_{10}(N_{A1}/N_{A2}) \quad : N_{A2} > N_{A1} \quad (3-6)$$

$$\alpha = 0 \quad : N_{A1} > N_{A2} \quad (4-6)$$

حيث:

- N_{A1} الفتحة العددية للليف الزجاجي المرسل.
- N_{A2} الفتحة العددية للليف الزجاجي المستقبل.

إن القيمة المسموحة حسب CCITT في أسوأ الأحوال هي $NA = 0.2 \pm 0.02$ وتكون قيمة التخماد المقابلة لتلك القيمة $\alpha = 1.74[dB]$ الشكل (6-8).

(3) اختلاف في شكل معاملات انكسار الضوء

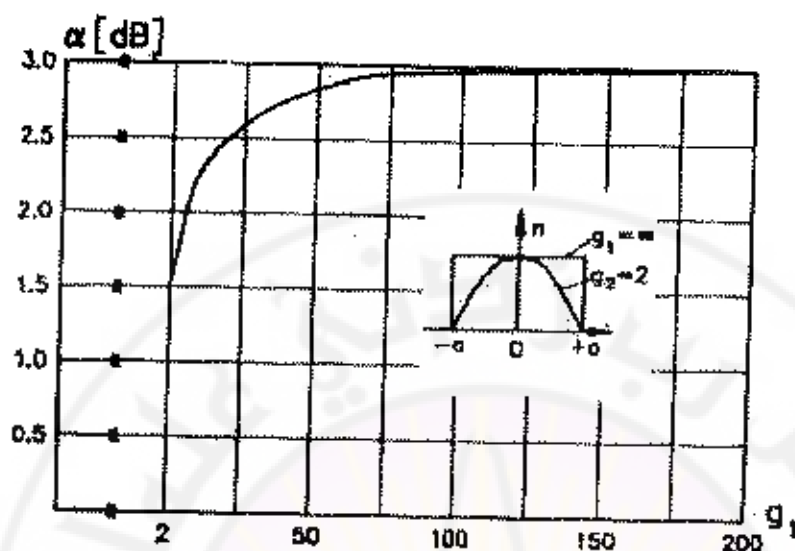
عند توصيل الألياف التي لها شكل معامل انكسار للضوء مختلف فإنه يلجم عن ذلك ازدياد في قيمة تخامد الوصلة بمقدار:

$$\alpha = -10 \log_{10} \left[\frac{g_2 \left(\frac{g_1 + 2}{g_1} \right)}{g_1 \left(\frac{g_2 + 2}{g_2} \right)} \right] \quad (5-6)$$

حيث g هي معامل الشكل.

إن القيمة المسموحة لـ g والتي يمكن أن تبلغها حسب CCITT هي $g = 2 \pm 0.2$ وتكون قيمة التخماد المسموحة $\alpha = 0.44[dB]$.

لدى توصيل ليف زجاجي متدرج مع ليف زجاجي له معامل انكسار الضوء بشكل قفزة، ولهما الفتحة العددية نفسها، وقطر الغلاف نفسه، فإن قيمة التخماد الناتجة عن هذا السبب هي $\alpha = 3[dB]$ الشكل (6-9).



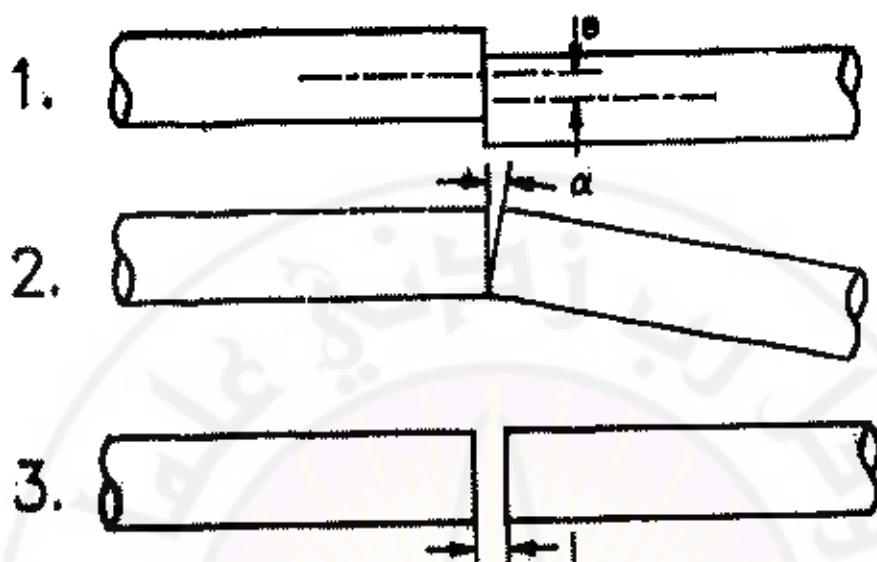
الشكل (6-9)

2 - 2 - 6 الضياعات الخارجية

إن السبب الرئيسي لهذا النوع من الضياع هو عدم الدقة في تصميم الوصلة وتنفيذها، هذا يعني أنه يوجد عدم مطابقة في محاور الألياف الزجاجية لدى توصيلها.

إن الأخطاء الرئيسية الناتجة عن عدم مطابقة الألياف بعضها مع بعض يمكن أن نجعلها فيما يلي الشكل (6-10):

1. الانحراف الشاقولي (إزاحة) لمحاور الألياف.
2. الانحراف الزاوي لمحور الليف.
3. الانزياح الأفقي أي وجود فجوة (ثغرة) بين الألياف.



الشكل (10-6)

أولاً - الانحراف الشاقولي (انزياحاً) لمحاور الألياف بمقدار e

إن انزياح محور الألياف الزجاجية شاقولياً بمقدار e سببب ازدياداً في قيمة الضياع وفقاً لما يلي:

• الألياف الزجاجية متعددة الأنماط المتدرجة:

$$\alpha = -10 \log \left(1 - \frac{3e}{8\pi a} \right) \quad (6-6)$$

حيث إن:

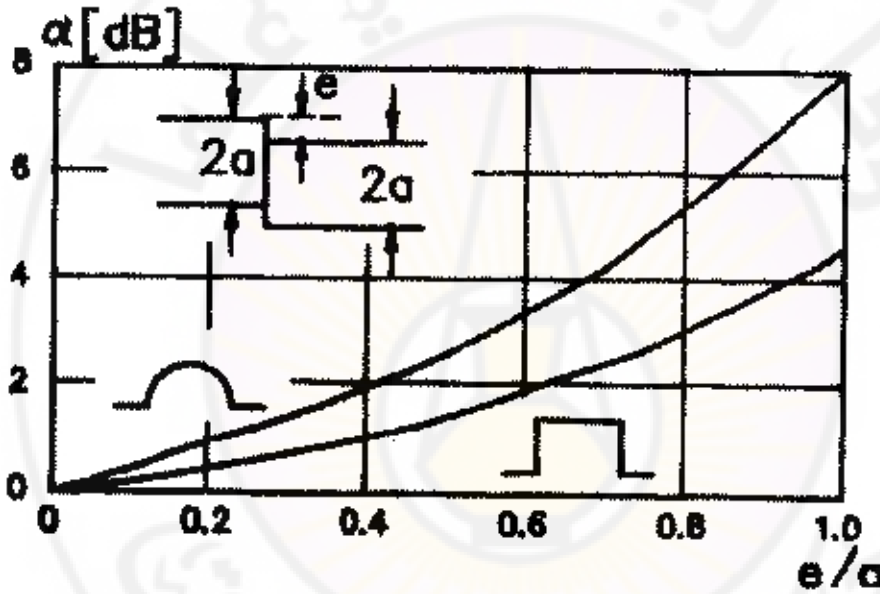
- a نصف قطر الليف الزجاجي لمادة القلب

- e مقدار الانزياح

• للألياف الزجاجية متعددة النماذج (الأنماط) اللبضية:

$$\alpha = -10 \log \left[\frac{2}{\pi} \arccos \cos \left(\frac{e}{2a} \right) - \left[\frac{e}{\pi a} \left(4 - \left(\frac{e}{a} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{1}{12} \left(2 + \left(\frac{e}{a} \right)^2 \right) \right] \right] \right] \quad (7-6)$$

ملحنيات هذه العلاقة موضحة بالشكل (11-6)



الشكل (11-6)

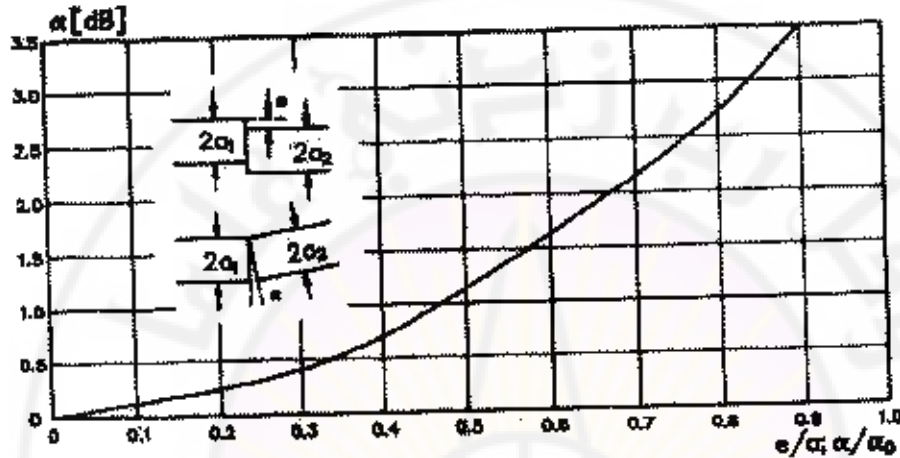
من المهم أن نشير واستناداً إلى المنحنيات في الشكل (11-6) إلى أن وصلات الألياف الزجاجية ذات النوع المتدرج تكون أكثر حساسية بالانزياح الشاقولي.

وللعلاقة المبسطة للألياف الزجاجية وحيدة النمط (S-M) الشكل التالي:

$$\alpha = -10 \log \left[\exp \left(- \frac{e}{w} \right)^2 \right] \quad (8-6)$$

حيث W هي حجم البقعة الضوئية. من أجل ألياف SI تعمل قرب تردد المقيس V (Normalized) بقيمة 2.405 (وهو شرط القطع وحيد الأسلوب)، ويبلغ حجم البقعة حوالي 1.1 مرة ونصف قطر النواة.

يمكن توضيح العلاقات السابقة بمنحن بياني وذلك كما هو مبين بالشكل (12-6)



الشكل (12-6)

ثانياً - الميلان الزاوي للألياف الموصولة

إن المنحنيات المبينة بالشكل (13-6) توضح تأثير الانحراف (الميلان) الزاوي على الضياعات في وصلات الألياف الزجاجية المتعددة النماذج المقترحة والنبضي. إن العلاقات التي تحدد قيمة هذه الضياعات يمكن كتابتها بالشكل التالي :

➤ الليف الزجاجي المتدرج $M-M-G-I$

$$\alpha = -10 \log \left(1 - \frac{16 \sin \alpha/2}{3\pi \sin \theta_c} \right) \quad (9-6)$$

$$\theta_c = \arcsin(AN)$$

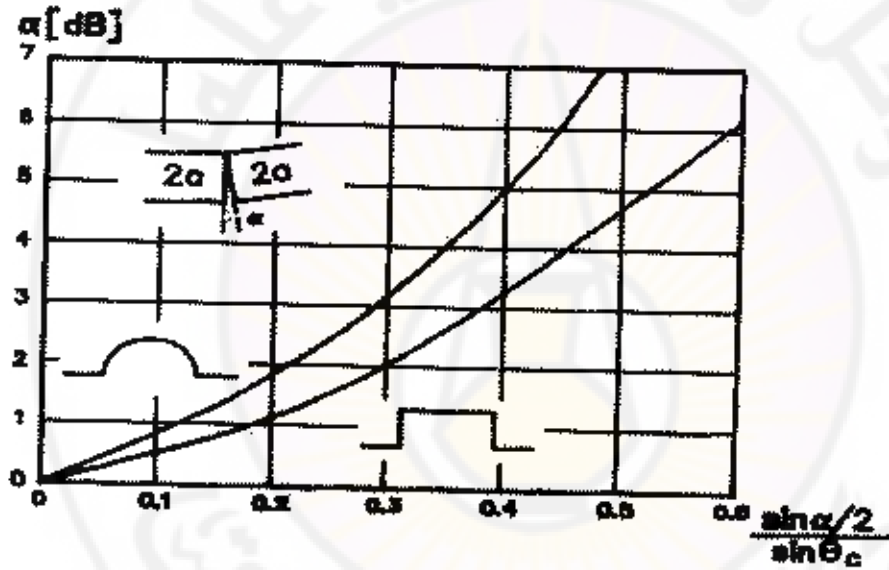
حيث: θ_c هي الزاوية الحرجة.

➤ اما الألياف الزجاجية (M-M) النبضية

$$\alpha = -10 \log \left\{ \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left[\frac{\sin \alpha/2}{\sin \theta_c} \right] - \left[\frac{\sin^4 \alpha/2}{\sin^4 \theta_c} \right] + \frac{5}{3} \left[\frac{\sin^2 \theta_c}{\sin^2 \alpha/2} - 1 \right]^{3/2} + \left[\frac{\sin^2 \theta_c}{\sin^2 \alpha/2} - 1 \right]^{6/2} \right] \right\} \quad (10-6)$$

في وصلات الألياف الزجاجية وحيدة النموذج لا يتعلق الضياع فقط بالميلان الزاوي

بل يتعلق أيضاً بالطول الموجي للضوء الشكل (13-6)



الشكل (13-6)

إن قيمة الضياع للألياف الزجاجية الوحيدة النموذج المبسطة هي:

$$\alpha = -10 \log \left\{ \exp \left[- \left(\pi n_2 w \theta / \lambda \right)^2 \right] \right\} \quad (11-6)$$

حيث: تعطى θ بالراديان، وهي زاوية الميلان و w هو حجم البقعة الضوئية و n_2

هو دليل الكسار الغلاف.

ثالثاً - وجود ثغرة فراغية بين سطوح اتصال الألياف

تكون الضياعات محددة بالعلاقة :

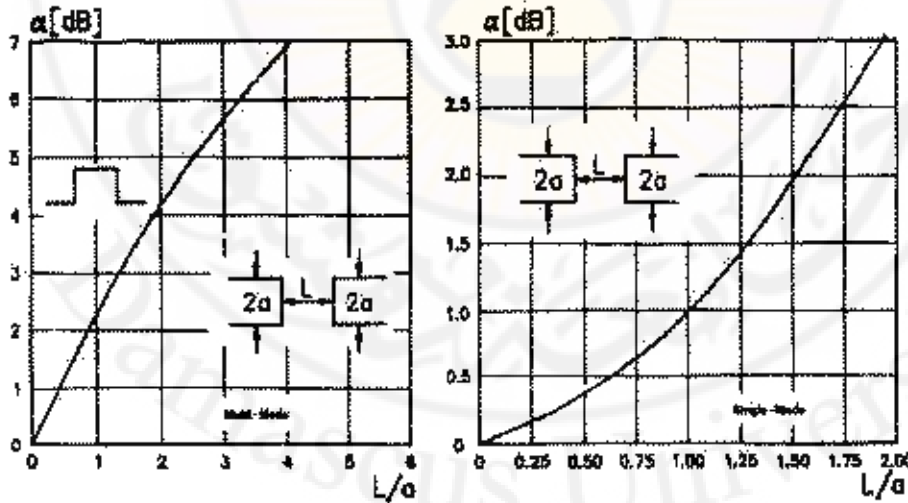
$$\alpha = -10 \log \left[1 - \frac{1}{2} \frac{L}{a} \operatorname{tg} \theta_c \right] \quad (12-6)$$

حيث L عرض الفجوة الفراغية بين الألياف الزجاجية متعددة النماذج.

$$\alpha = -10 \log \left[\frac{1}{1 + \left(\lambda L / 2 \pi N_s a^2 \right)^2} \right] \quad (13-6)$$

حيث λ طول الموجة في الألياف الزجاجية وحيدة النموذج، و N_s معامل الانكسار للمادة بين الليفين.

ويوضح الشكل (14-6) المنحنيات البيانية لهذه العلاقات.



الشكل (14-6)

6 - 2 - 3 ضياعات الانعكاس (أو ضياعات فريسنيل)

إن تأثير ظاهرة الانعكاس *Fresnel* في تخامد الوصلة هو تأثير بسيط بمقارنته بباقي المؤثرات السابقة، وإن قيمة هذا التخماد تبلغ:

$$\alpha = -10 \log_{10} \left[1 - \left(\frac{n_1 - N_s}{n_1 + N_s} \right)^2 \right] \quad (14-6)$$

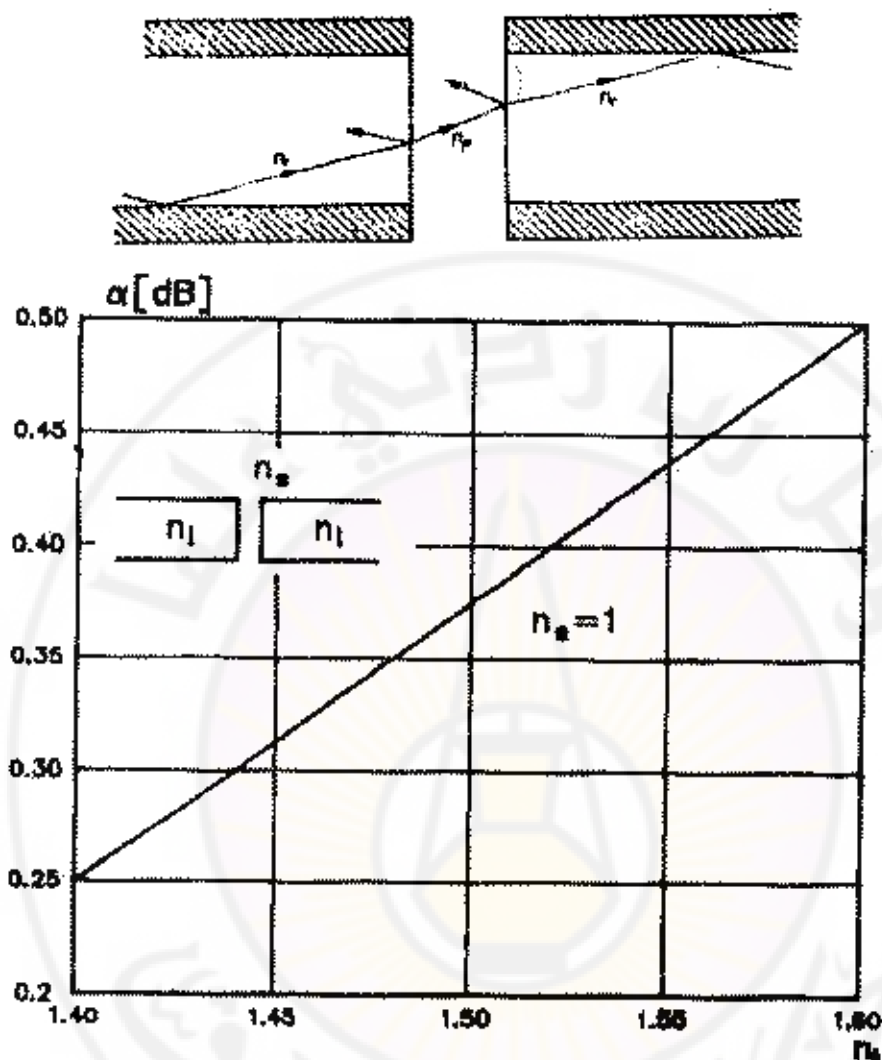
حيث: N_s ، n_1 هما معاملات انكسار الضوء للأوساط الناقلة للضوء.

عند عدم تطبيق زيت الأمريسيني (*Ewmrision Oil*) بين الألياف الموصولة $\{n_1=1.5, N_s=1\}$ فإن قيمة التخماد المقابلة أو الناتجة عن ذلك هي $\alpha = 0.36[dB]$ وتتناقص قيمة التخماد إلى الصفر عند استخدام زيت خاص له معامل انكسار $n_1=1.473$ (أو معجونة *Epoxied*)

ضياعات فريسنيل يمكن أن نحسبها على الضياعات الخارجية وعلى الضياعات الداخلية بالوقت نفسه نظراً إلى ورود قيمة معامل انكسار الضوء (الليف) في العلاقة السابقة، وورود وسط ثالث بين الألياف الزجاجية.

يبين الشكل (6-15) شكل العلاقة التي تربط التخماد α بدلالة n_1 وذلك عند

$$N_s=1$$

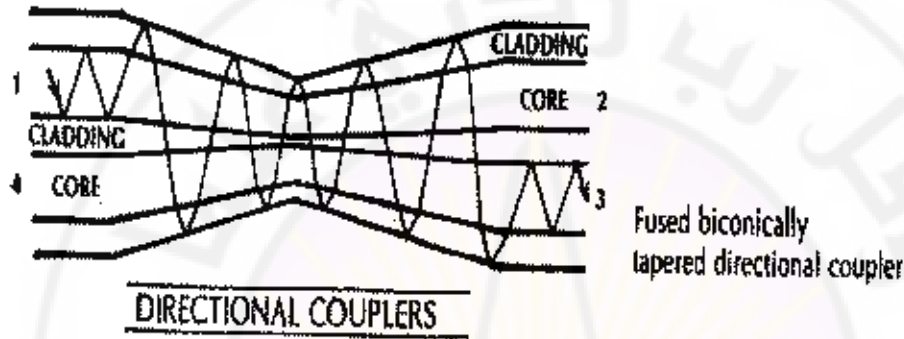


الشكل (6-15)

6 - 3 الموزعات الضوئية Couplers

تعد الموزعات الضوئية العنصر الثاني المهم بعد الوصلات الضوئية، وذلك لتوزيع الضوء إلى عدة اتجاهات بنسب متساوية أو مختلفة.

حيث تعتمد البنية الأساسية لهذه الموزعات على الألياف الزجاجية نفسها. إن التركيب بسيط جداً حيث يجدل ليفان من نوع واحد سواء أكان متعدد الأنماط أم أحادي النمط حول بعضهما، ويخضعان لحالة شد الشكل (6-16) بتسخين الوصلة فينصهر الليفان ويلصهر غلافهما حيث يتشكل لدينا موزعة ضوئية بأربع أرجل، أي دخل واحد، وثلاثة اتجاهات للخروج، تسمى هذه الموزعة بالموزعات المنصهرة.



الشكل (6-16)

وتوجد أنواع أخرى للموزعات الضوئية منها الميكانيكية (التي تعتمد على مبدأ الحف) ومتعددة الأطراف أي أكثر من أربع أرجل وهكذا.

تعد الموزعات الضوئية من العناصر الأساسية لشبكات التوزيع في أنظمة الاتصالات الضوئية.

من أجل وصف خصائص الموزعة سنفترض أن القدرة P_1 وإاردة على الرجل (1) للموزعة ستقسم هذه القدرة (الحاملة للمعلومات) بين الاتجاهين 2,3 وفقاً لنسبة التوزيع المرغوبة الشكل (6-17) وفي الحالة المثالية يجب عدم رجوع أي قدرة في الاتجاه 4.

يمكن تحديد خواص الموزعات الضوئية وفق ما يلي:

1- خسارة التدفق *Throughput Loss*

$$L_{THP} = -10 \log_{10} (P_2 / P_1) [dB] \quad (15-6)$$

وهي تعيين خسارة الإرسال بين بوابة الدخل والبوابة المفضلة (P_2).

2- خسارة نقطة التفرع *Tap Loss*

$$L_{TAP} = -10 \log_{10} (P_3 / P_1) [dB] \quad (16-6)$$

3- الاتجاهية *Directionality*

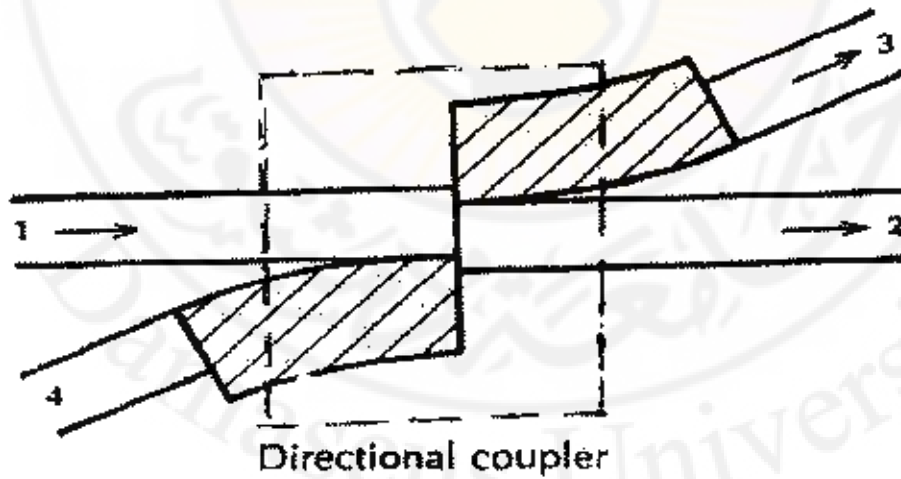
$$L_D = -10 \log_{10} (P_4 / P_1) [dB] \quad (17-6)$$

وهي تعيين الخسارة بين بوابة الدخل والبوابة التي نرغب بعزلها (البوابة 4).

4- الخسارة الزائدة *Excess Loss*

$$L_E = -10 \log_{10} ((P_2 + P_3) / P_1) [dB] \quad (18-6)$$

وهي تعيين الخسارة أو القدرة المفقودة ضمن الموزعة، وتتضمن الإشعاع والانتشار والامتصاص والاقتران مع البوابة المعزولة.



الشكل (17-6)

في حال الموزعة (القارن) المثالية لن تصل أية قدرة إلى البوابة 4 ($L_D = \infty$) وبالإضافة إلى ذلك لن تفقد أية قدرة، وهكذا تكون القدرة الصادرة من البوابتين 2 و 3 مساوية قدرة الدخل أي $P_1 = P_2 + P_3$ ما يجعل الخسارة الزائدة تساوي صفراً. للموزعات ذات الاتجاهية الجيدة خسائر زائدة أقل من ديسبل واحد واتجاهية أكبر من $40[dB]$.

إن نسبة الانشطار (P_2 / P_3) هي نسبة القدرتين عند بوابتي الخرج. توصف الموزعات غالباً بخسارة نقطة تفرعها. مثلاً تشير موزعة $10[dB]$ إلى موزعة ذي خسارة نقطة تفرع مقدارها $10[dB]$. يعرض الجدول (1-6) التالي قائمة بقيم خسارة التدفق وخسارة نقطة التفرع ونسبة الانشطار لعدة موزعات مثالية.

وصف الموزعة (الخسائر)	$L_{TAP} [dB]$	$L_{THP} [dB]$	نسبة الانشطار
3[dB]	3	3	1 : 1
6[dB]	6	1.25	3 : 1
10[dB]	10	0.46	9 : 1
12[dB]	12	0.28	15 : 1

الجدول (1-6) خواص موزعة اتجاهية مثالية بأربعة بوابات

ومن أجل موزعة بلا خسارة أي ($P_2 = P_1 - P_3$) يمكن كتابة خسارة التدفق بالصيغة التالية:

$$L_{THP} = -10 \log_{10} (1 - 10^{(-L_{TAP}/10)}) \quad (19-6)$$

تعطي هذه النتيجة العلاقة بين خسارة نقطة التفرع وخسارة التدفق. ونوضح في المثال التالي كيف تغير الخسارة الزائدة خسارتي نقطة التفرع والتدفق.

مثال 6 - 1

لموزعة صوتية خسارة زائدة مقدارها $1[dB]$ ونسبة انشطار $I: I$. كم من قدرة الدخل يصل إلى طرفي الخرج.

الحل:

باستعمال $P_2 = P_3$ و $L_E = 1[dB]$ في المعادلة

$$L_E = -10 \log_{10} ((P_2 + P_3) / P_1)$$

ينتج أن:

$$P_2 / P_1 = P_3 / P_1 = 0.397$$

وهذا يطابق خسارة تدفق مقدارها $4[dB]$ وخسارة نقطة تفرع مقدارها $4[dB]$.

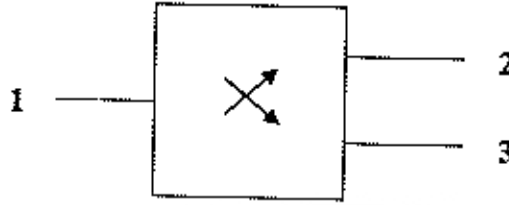
إن هذه الخسائر تتجاوز خسائر قارن مثالي له نسبة الانشطار ذاتها $3[dB]$ حسب الجدول السابق بمقدار $1[dB]$ وهي الخسارة الزائدة ذاتها.

إن الخسائر تزداد بكل بساطة بمقدار الخسارة الزائدة.

6 - 4 المفاتيح Switches

تبدل المفاتيح البصرية الليفية وجهة الإشارات البصرية وتفيد في شبكات التوزيع وتجهيزات القياس والتجارب وفي غير ذلك. نذكر على سبيل المثال منها المفتاح ذو الموضعين، ومفتاح التحويل (By Pass) يوضح هذان المثالان بعضاً من الصفات العامة للمفاتيح الليفية.

يبين الشكل (6-18) مفتاحاً ذو وضعين. يمكن للدخل عند البوابة 1 أن ينتقل إلى أي من البوابتين 2 أو 3.



الشكل (6-18) مفتاح ذو وضعين

من أجل التعريفات التالية نفترض أن المفتاح في وضع الاقتران إلى البوابة 2، تكون خسارة الدخل *Insertion Loss* بالنسبة كما يلي:

$$L_{TL} = -10 \log_{10} (P_2 / P_1) [dB] \quad (20-6)$$

حيث: P_1 هي القدرة الواصلة إلى البوابة 1 و P_2 هي القدرة المنبثقة من البوابة 2.

تعتمد خسارة الإدخال على تراكب الليف تماماً كخسارة الموصل البسيط. يمكن الحصول على خسائر أقل من $1.5 [dB]$ بمفاتيح ميكانيكية جيدة.

إن اللفظ *Crosstalk* هو مقياس لجودة عزل البوابة غير المقترنة ويعطى بالعلاقة:

$$L_{CT} = -10 \log_{10} (P_3 / P_2) [dB] \quad (21-6)$$

حيث: P_3 هي القدرة المنبثقة من البوابة 3.

ويعتمد اللفظ على التصميم الخاص للمفتاح، وتعد القيم من $40 [dB]$ إلى $60 [dB]$ قيمة نموذجية. إضافة إلى خسارة الإدخال المنخفضة فإن للمفتاح الجيد نفس خسارة الإدخال لجميع وضعياته.

إن التكرارية المعيارية (وهي تحقيق خسارة الإدخال ذاتها في كل مرة يعاد فيها المفتاح إلى نفس الوضع) يمكن أن تكون أكثر أهمية من قيمة خسارة الإدخال ذاتها. إن المفتاح الجديد سينتج من جديد خسارة الإدخال ذاتها بفارق يبلغ حوالي $0.1[dB]$.

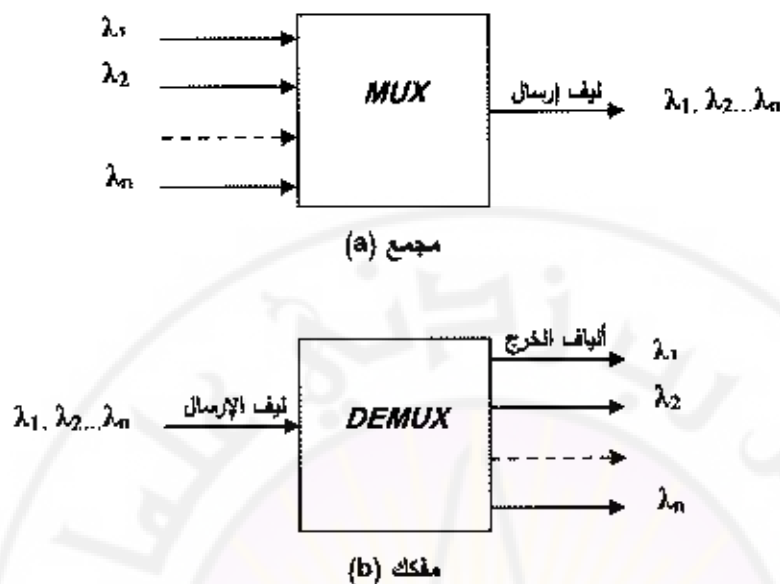
إن سرعة النقل (وهي السرعة التي ينتقل فيها المفتاح من أحد الوضعين إلى الوضع الآخر) هي عامل حاسم في بعض التطبيقات.

6 - 5 تجميع التقسيم حسب طول الموجة *Wavelength-Division Multiplexing (WDM)*

تنتشر الحزم الضوئية ذات أطوال الموجة المختلفة من غير تداخل فيما بينها وهكذا يمكن أن ترسل معاً في وقت واحد وفي ليف واحد عدة أقدية معلومات (لكل منها طول موجة حاملة مختلف).

إن هذا النظام ويسمى تجميع التقسيم حسب طول الموجة *WDM* يزيد سعة الليف لحمل المعلومات. لقد تم سابقاً استعراض حدود السعة العائدة إلى تشتيت المادة، وتشتيت دليل الموجة، والتشوه الظاهري، وتطبيق هذه الحدود على المعلومات المحمولة على أي طول موجة. إن تزايد عدد الحوامل يزيد السعة بشكل طردي.

يقرن مجمع بصري الضوء من منابع مستقلة إلى ليف الإرسال كما هو مبين في الشكل (6-19)، وعند محطة الاستقبال يعمل مفكك *De-Multiplexer* بصري على فصل الحوامل المختلفة قبل أن يتم الكشف الضوئي للإشارات الفردية. وعموماً يكون للمجتمعات والمفككات ألياف عند بوابات دخلها وخرجها. ومن الممكن أيضاً استبدال ألياف الدخل في المجمع بمرآة بصرية متكاملة مباشرة في الجهاز. وبالمثل يمكن لمكاشيف ضوئية أن تحل محل ألياف الخرج في المفكك. وغالباً يمكن للجهاز ذاته أن يعمل لمجمع ومفكك.



الشكل (6-19) مخطط لمجمع بصري (a) ومفكك بصري (b)

إن خسارة الإدخال ومقدار اللغظ هما الصفتان المهمتان للمجمعات والمفككات فخسارة الإدخال هي مقدار تخامد الموجة المنتشرة من بوابة الدخل إلى بوابة الخرج المرغوبة. مثلاً بالإشارة إلى الشكل (6-19-a) تكون خسارة الإدخال للقناة 1 هي الجزء من قدرة الدخل عند طول الموجة λ_1 الذي يفقد حتى يصل ليف الإرسال. يكون المجمع/المفكك متماثلاً عندما تكون خسارة الإدخال ذاتها تقريباً لكل قناة. وإن اللغظ *Crosstalk* هو قدرة الموجة مقيسة عند أية بوابة غير مقصودة. مثلاً بالإشارة إلى الشكل (6-19-b) يكون اللغظ هو الجزء من قدرة الدخل عند طول الموجة λ_1 الذي يصل إلى ليف الخرج المخصص لطول الموجة λ_2 . يكون اللغظ مشكلة رئيسية عند المستقبل حيث يمكن أن يؤدي اختلاط قناتين أو أكثر إلى تداخل خطير مع الإشارة المرغوبة.

الفصل السابع

مصادر الضوء

Light Sources

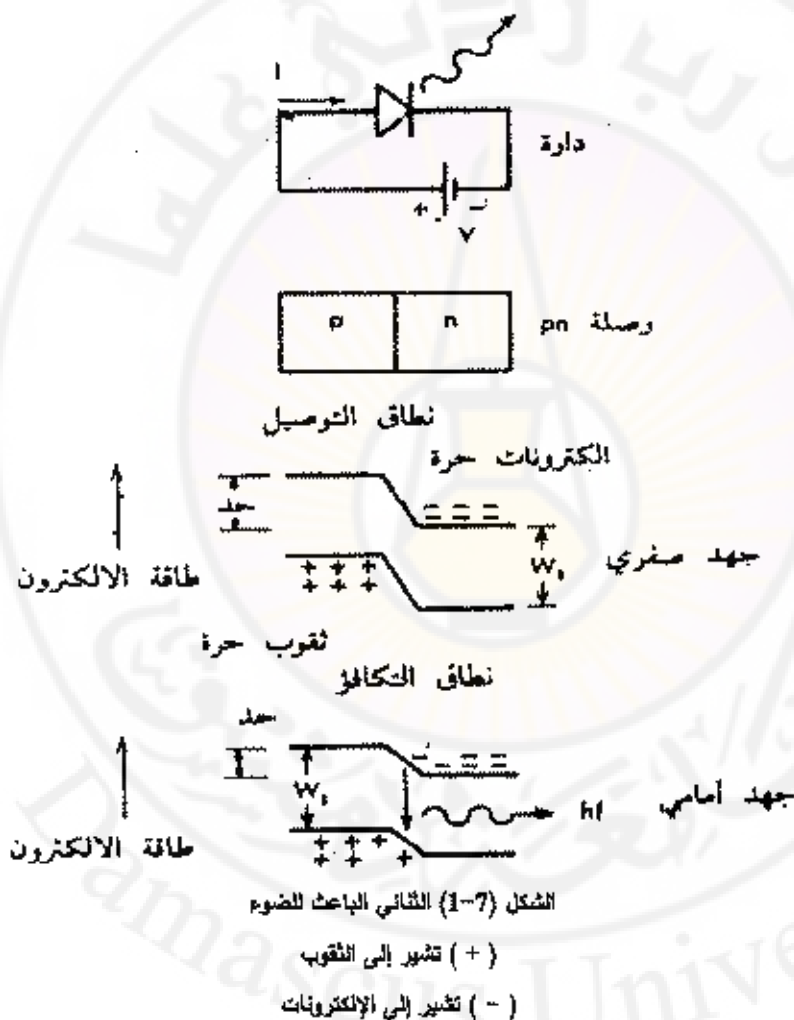
تولد المصادر الحزم الضوئية التي يتم اقترانها بالليف الضوئي، حيث تعبر هذه الحزم الضوئية عن المعلومات التي تم إرسالها بنظام تعديل مناسب وخصوصاً المطالي، حيث تتناسب شدة الضوء مع معدل الجهد أو التيار الكهربائي المطبق على المصدر الضوئي، حيث تقوم المصادر الضوئية بوظيفة تحويل الإشارة الكهربائية إلى حزمة ضوئية مع تقديم الاستطاعة الكافية للتغلب على التخميد الذي يحدث للإشارة الضوئية لتتسل إلى طرف الاستقبال بمستوى استطاعة أعلى من حساسية المستقبل.

تعدّ الثنائيات الباعثة للضوء *LED* Light - Emitting Diodes، والثنائيات الليزرية *LD* Laser Diodes الأكثر شيوعاً. فأحجامها الصغيرة تتوافق مع الأقطار الصغيرة للألياف، وتتوافق كذلك بنيتها المتينة ومتطلبات الطاقة البسيطة لها مع الألكترونيات الحديثة. وفي معظم الأنظمة تحمل المعلومات على الحزمة بواسطة تعديل تيار دخل المصدر. يتم اختيار المصدر الضوئي وفقاً لنظام الاتصالات المراد إنشاؤه أي حسب معدل الإرسال والمسافة المراد تغطيتها وكذلك نوع الليف الضوئي المستخدم.

وفيما يلي نستعرض أهم أنواع المصادر الضوئية المستخدمة في الاتصالات الضوئية.

7 - 1 الثنائيات الباعثة للضوء (LED) Light - Emitting Diodes

إن الثنائي الباعث للضوء هو وصلة $P-N$ من مادة نصف ناقلة تبعث ضوءاً عندما تستقطب أمامياً، أي يطبق جهد الحياز أمامي على طرفيها فإن تياراً كهربائياً سيمر عبرها ويرافق هذا المرور تحرير كمات (Quantum) من الطاقة الكهرومغناطيسية على شكل فوتونات مضبوطة. يبين الشكل (1-7) الوصلة ورمز الدارة ونطاقات الطاقة المرتبطة بالثنائي.



كما هو معلوم لدينا سابقاً أن المادة تتكون من ثلاثة نطاقات الأول نطاق التوصيل (حزمة التوصيل)، والثاني نطاق التكافؤ، والثالث الفجوة الطاقية، عندما يكون لدينا مادة نصف ناقلة نوع P فإنها تملك عدداً من الثقوب الحرة، وكذلك عندما يكون لدينا مادة من نوع N فإنها تملك عدداً من الشحنات السالبة (e^-) بوصل P مع N ، فإنه يحدث خلل في البنية الذرية وخصوصاً عند تطبيق جهد انحياز أمامي. يؤدي الجهد الأمامي إلى تناقص الحاجز فيرفع الطاقة الكامنة للجانب N ، وينقص الطاقة الكامنة للجانب P . تملك الآن كل من الإلكترونات الحرة والثقوب الحرة الطاقة الكافية لكي تتحرك في منطقة الاتصال عندما يتقابل الكترون حر مع ثقب حر يمكن للإلكترون أن يقع في نطاق التكافؤ، ويتحد ثلثية مع الثقب. تتحول الطاقة المفقودة في هذا العبور إلى طاقة ضوئية على شكل فوتونات. وأبسط التعبير نقول إن الإشعاع من LED يتسبب من إعادة تجميع ثقوب وإلكترونات كانت قد حُفَّت في الوصلة بواسطة جهد الانحياز أمامي. ترتبط طاقة الفوتون بالتردد بالعلاقة:

$$W = h \cdot f$$

حيث:

$$h : \text{هو ثابت بلانك ويساوي } 6.626 \times 10^{-34} [J \cdot s]$$

$$W : \text{طاقة الفوتون [بالجول] حيث } 1[e.v] = 1.6 \times 10^{-19} [J]$$

f : التردد.

ويكون طول الموجة المشعة حينئذ كما يلي :

$$\lambda = h \cdot c / w_g [m]$$

حيث :

c : سرعة انتشار الضوء في الفراغ.

w_g : طاقة الثغرة الطاقية بالجول.

إذا قدرنا طاقة الفوتون بالإلكترون فولت وطول الموجة بالميكرومتر، فإن المعادلة السابقة تأخذ الصيغة التالية:

$$\lambda = 1.24 / w_g \quad [\mu m]$$

تملك المواد المختلفة والمبانيك طاقات نطاق ثغرة مختلفة.

يبين الجدول (1-7) المواد الباعثة الشائعة وأطوال موجة العمل والطاقات التقريبية لنطاق الفوتون (Energy Gap).

طاقة نطاق الفوتون [eV]	مدى طول الموجة [μm]	المسادة
1.4	0.9	Ga As
1.4 - 1.55	0.8 - 0.9	Al Ga As
0.95 - 1.24	1.3 - 1.0	In Ga As
0.73 - 1.35	0.9 - 1.7	In Ga As P

الجدول (1-7)

ملاحظة:

لم يرد ذكر السليكون وذلك لأن تقويه وألكتروناته لا تتحد من جديد مباشرة مما يجعله بائياً غير فعال.

يمكن اختيار طول موجة العمل من أجل العناصر *In Ga As* وذلك بتغيير نسب الذرات المكونة. إن هذا يغير نطاق الفوتون وكذلك طول موجة الانبعاث.

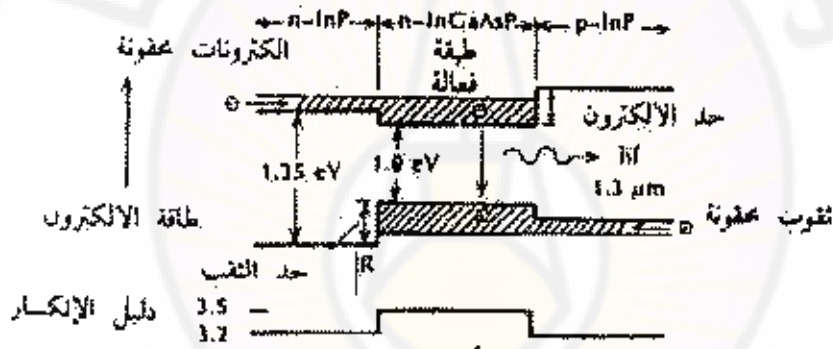
يبين الشكل (1-7) حالة وصلة متجانسة لا يحجز إشعاعه المنبعث بشكل جيد جداً. فتتشمع الفوتونات من حواف الوصلة ومن سطحه المستوي الواسع. وهذا يجعل الاقتران مع الليف الصغير غير فعال بشكل جيد.

يمكن تمييز سببين لهذا السلوك:

أولاً - توجد حاملات الشحنة فوق منطقة واسعة فتسبب حدوث إعادة الاتحاد والانبعثات فوق مساحة كبيرة.

ثانياً - ويعد أن تولد الفوتونات تتفرق فوق مسارات غير محددة.

إن هذه المشاكل قد حلت بواسطة *LED* ذي الوصلة غير المتجانسة (المتغايرة) *Heterojunction LED* المبينة في الشكل (2-7).



الشكل (2-7)

ثنائي باعث ووصلة غير متجانسة

تمثل المناطق المباشرة سويات الطاقة

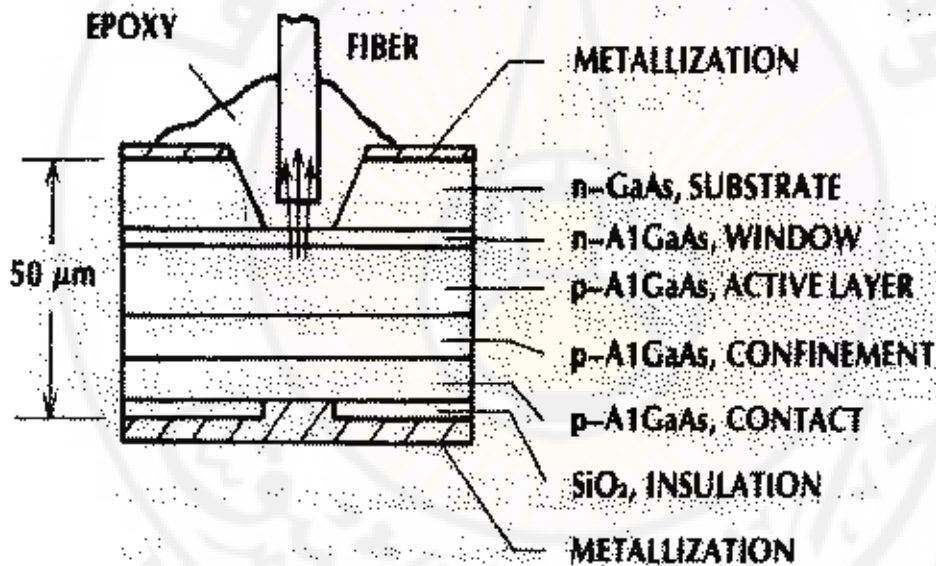
إن الوصلة غير المتجانسة هي وصلة مشكّلة في أنصاف نواقل غير متشابهة. إن لكل من المادتين طاقتين نطاق ثغرة مختلفتين ودليلي انكسار مختلفين. يخلق التغير في طاقات نطاق الثغرة حواجز كمون لكل من الثقوب والإلكترونات. تستطيع الشحنات الحرة فقط أن تتقابل وتتحد في الطبقة الفعالة المحدودة والطبقية. وحيث إن المنطقة الفعالة تتمتع بدليل انكسار أعلى من أدلة الانكسار للمواد على أي من الجانبين. تحفظ انعكاسات الزاوية الحرجة للفوتونات في

المنطقة الفعالة فتخلق مساحة صغيرة ذات شدة عالية. يحسن الانبعاث المحصور كفاءة الاقتران وخصوصاً من أجل الألياف الصغيرة.

يمكن قرن القدرة إلى الليف من السطح المستوي لطبقة باعثة أو من حوافها.

7 - 1 - 1 LED السطحية Etched well surface Emitting ثنائيات

تعد ثنائيات LED السطحية الأكثر فعالية من بين ثنائيات LED، وتسمى بثنائيات (Burrus) أي تركيبة الحفرة المبيدة في الشكل (3-7).



الشكل (3 - 7)

يبيت الثنائي $AlGaAs$ المبيد عادة عند $0.82[\mu m]$ حيث يكون تخامد الألياف الضوئية ضعيفاً. يمكن تحقيق اقتران فعال نسبياً بالألياف صغيرة تصل حتى $50[\mu m]$ بسبب مساحة الانبعاث المحدودة. إن معظم الإشعاع المبعث سيعتمد على الأقل نواة الليف. إلا أنه لن تجمع القدرة كلياً بواسطة الليف بسبب الفتحة العددية N_A المحدودة.

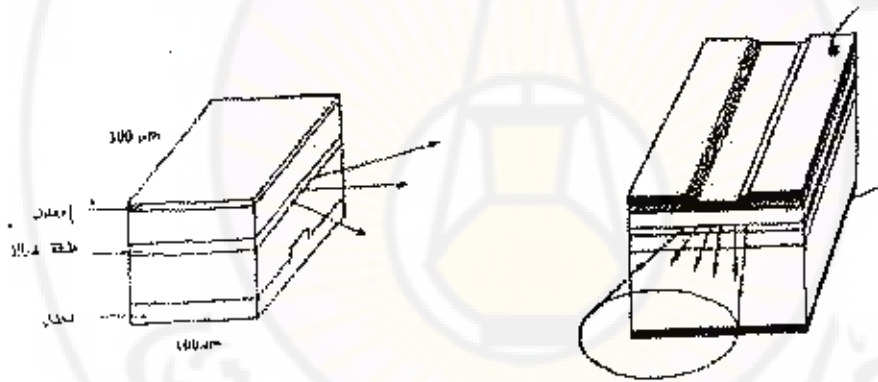
7 - 1 - 2 ثنائيات LED ذات حواف باعثة *Edge Emitting Diode*

يشع هذا الثنائي الضوء ضمن مخروط أصغر مما يقدمه ثنائي *Burris*.

تكون المساحة الباعثة مستطيلة الشكل وليست دائرية، وتبلغ ثخانة المنطقة الباعثة بضعة ميكرونات ويبلغ عرضها بضعة عشرات الميكرونات.

يحد التماس المعدني حوامل الشحنة في الاتجاه الجانبي، وتحتصر الوصلات غير المتجانسة هذه الحوامل في الاتجاه الشاقولي،

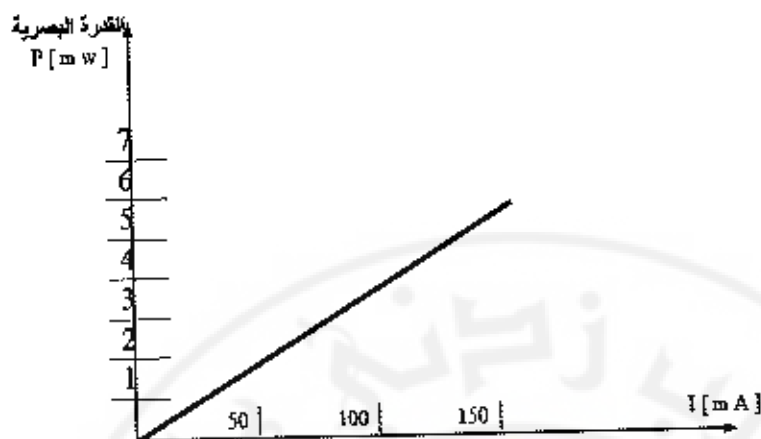
توجه الوصلات غير المتجانسة باتجاه الطرف الباعث لثنائي LED فتمنع التسرب خلال السطح المستوي.



الشكل (7 - 4)

7 - 1 - 3 خواص العمل للثنائي الباعث للضوء *LED Operating Characteristic*

تناسب القدرة البصرية التي يولدها LED خطياً مع التيار الأمامي. يبين الشكل (7-5) منحنياً نموذجياً لثنائي LED حيث تعتمد القدرة البصرية (mW) على التيار $I [mA]$ المغذي للثنائي.



الشكل (5 - 7)

يحد الانتشار في الألياف معدل المعلومات ويحد المنبع سعة النظام، إن المحدد الرئيسي للتعديل عالي التردد هو زمن حياة الحامل (τ)، وهو الزمن الوسطي المطلوب من أجل أن تتحد الشحنات المحقونة. ويجب أن يتغير تيار التعديل ببطء بالمقارنة مع τ . تعطى استجابة الـ LED المحدودة بزمن الحامل لإشارات كهربائية ذات تردد زاوي w بالعلاقة التالية:

$$P_{SP} = \alpha I_{SP} / (1 + w)^2$$

حيث:

P_{SP} : هي قدرة الذروة للإشارة.

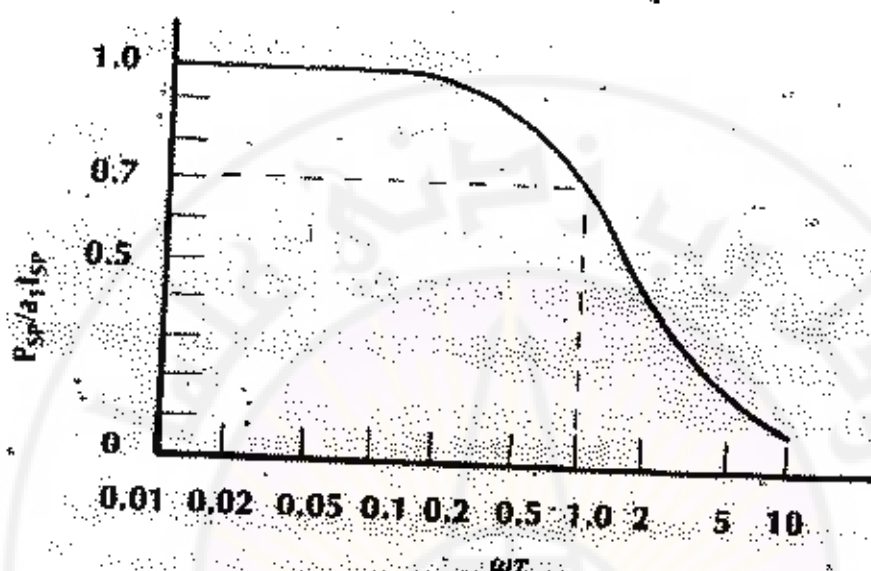
I_{SP} : تيار الذروة للإشارة.

$\alpha = \Delta P / \Delta I$: ميل المنحنى.

τ : زمن حياة الحامل.

$w = 2\pi f$: التردد الزاوي للإرسال.

يبين الشكل (6-7) رسماً بيانياً للعلاقة السابقة حيث عند تردد زاوي مقداره $\omega = 1/\tau$ تنخفض القدرة المتناوبة بقيمة العامل 0.707.



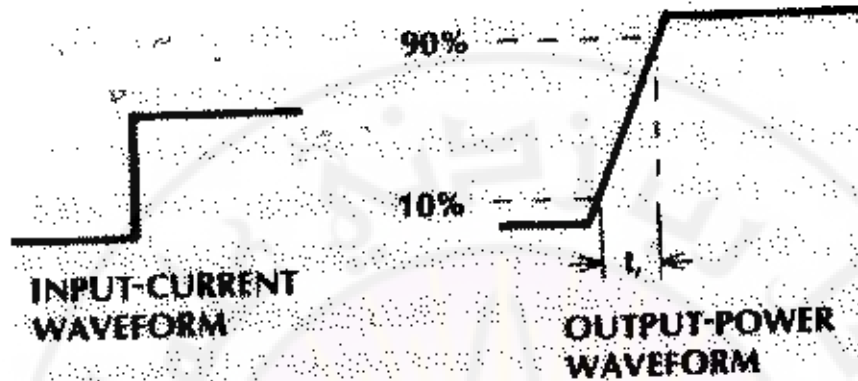
الشكل (6-7)

وعند طرف المستقبل يتناسب التيار الذي يولده الكاشف مع القدرة البصرية، لذلك عندما تنخفض القدرة البصرية بالمقدار 0.707 سيخفض التيار في الكاشف بهذا المقدار وستنخفض القدرة الكهربائية عند المستقبل بنسبة $(0.707)^2 = 0.5$ أي بمقدار $3[dB]$. لهذا السبب ندعو $1/\tau$ عرض نطاق التعديل $3[dB]$ للعنصر LED أو عرض نطاقه الكهربائية $3[dB]$. وفي وحدات الهرتز يكون عرض النطاق $3[dB]$ هو:

$$f_{3-dB} = 1 / 2 \pi \tau$$

لقد تم تحقيق عروض نطاقية تزيد عن $300[MHz]$ بواسطة ثنائيات LED السطحية، إلا أن الـ LED التجارية المتوفرة هي ذات عروض نطاق أصغر. تتراوح القيم النموذجية لعروض النطاق من $1[MHz]$ إلى $100[MHz]$.

يعزف زمن الصعود t_r لمليح أنه الزمن الذي يستغرقه المخرج لكي تتغير من 10% إلى 90% من قيمته النهائية عندما يكون الدخل قفزة تيار وهذا ما يوضحه الشكل (7-7).



الشكل (7 - 7) زمن الصعود لمليح بصري

يرتبط زمن الصعود مع عرض النطاق الكهربي 3dB بالعلاقة التالية:

$$f_{3\text{-dB}} = 0.35 / t_r$$

تتراوح أزمان الصعود لـ LED نموذجية من بضعة نانو ثانية وحتى 250 نانو ثانية.

يؤثر الطيف البصري مباشرة في تثبيت المادة، ونشيت دليل الموجة.

يتزايد انبساط النبضة العائد لهندس السببين خطياً مع عرض طيف المليح. تملك أجهزة

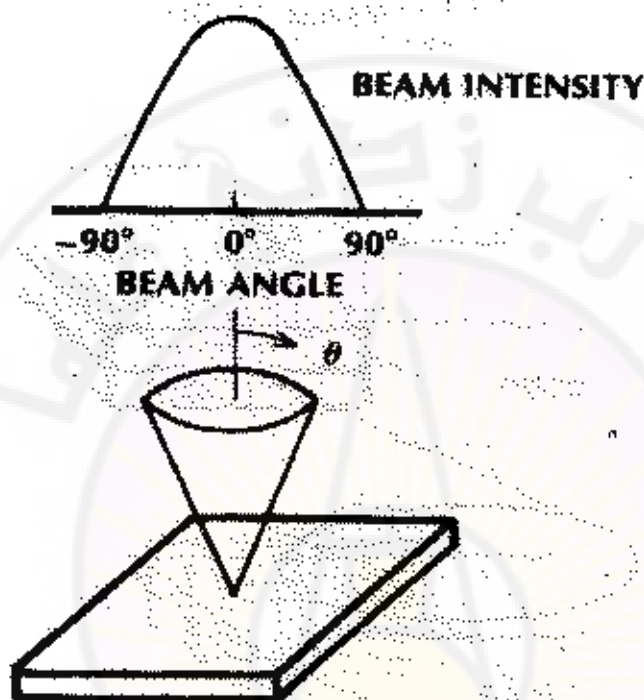
الـ LED التي تعمل في المدى من $0.8[\mu\text{m}]$ إلى $0.9[\mu\text{m}]$ على العموم عرضاً بين

$20[\text{nm}]$ و $50[\text{nm}]$ ، وكذلك تملك أجهزة الـ LED التي تثبت في مناطق الموجات الأطول

عرضاً من $50[\text{nm}]$ إلى $100[\text{nm}]$.

تعتمد كفاءة الاقتران بشكل قوي على نمط الاشعاع لباعث ما.

تشع الثنائيات LED السطحية بموجب ما يسمى نمط لامبرتياني الشكل (7-8).
تتناقص القدرة كنسبة $\cos \theta$ حيث θ هي الزاوية بين اتجاه الرؤية والعمود على السطح.

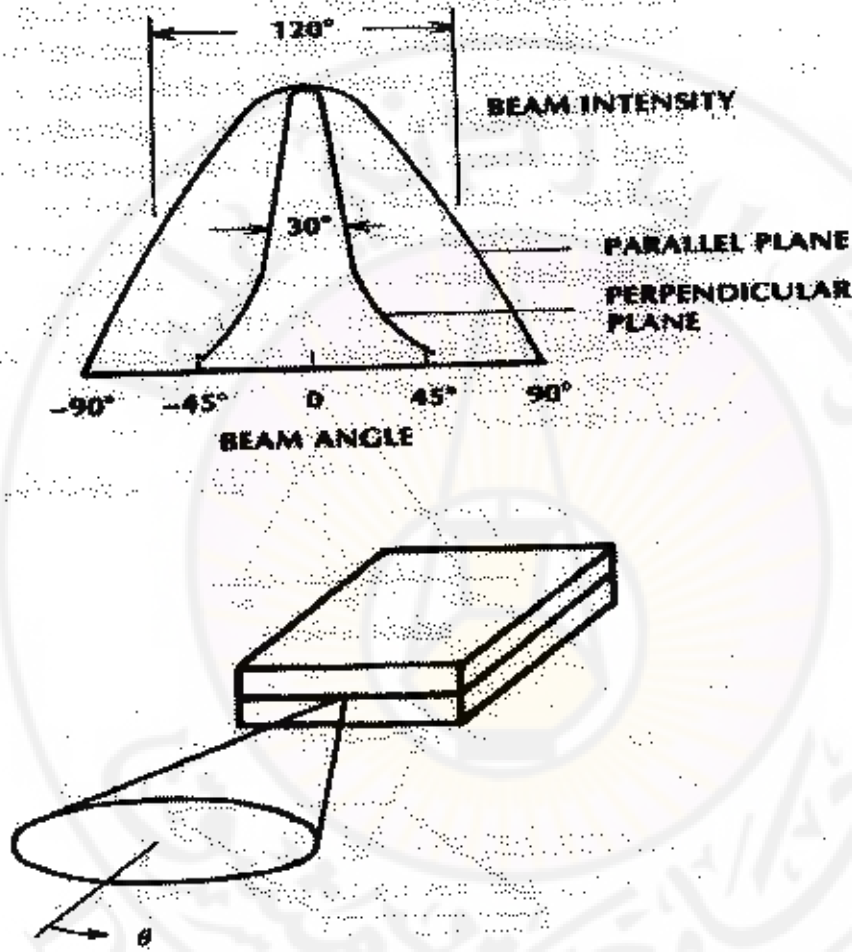


الشكل (7 - 8) الإشعاع اللامبرتياني من LED سطحي

إن الأشعة الواردة إلى ليف من خارج زاوية ميوله سوف لن تفرق معه وحيث إن زاوية القبول للليف ذي $N_A = 0.24$ تبلغ فقط حوالي 14° (زاوية مخروط كلية 28°)، فسوف ترفض كمية كبيرة من القدرة المولدة بواسطة باعث سطحي.

أما الثنائيات LED الحافية فإنها تركز إشعاعها إلى حد ما أكثر من الأجهزة السطحية فتقدم كفاءة اقتران أفضل. ويبين الشكل (7-9) نمطاً تمثيلاً لهذه الحالة. تكون الحزمة لامبرتيانية في المستوى الموازي إلى الوصلة إلا أنها تتباعد بشكل أبطأ في المستوى المتعامد مع

الوصلة، ولزيادة قدرة الخرج المفيدة حتى القيمة العظمى يمكن أن نضع عاكساً عند نهاية الثاني المواجه للباحة الباعثة.



الشكل (7 - 9) إشعاع غير متناظر من LED باعث حالي

إن الثنائيات الباعثة للضوء مناسبة جداً وتكون طويلاً إذا عملت ضمن الحدود الموصوفة من درجة الحرارة والجهد والتيار والقدرة المحدودة من قبل الجهة المصنعة.

تتناقص قدرة خرج الـ *LED* بمرور الزمن. وإن عمر الـ *LED* هو الزمن اللازم حتى تنقص القدرة لنصف قيمتها الأولية. تعد مدة حياة من فئة 10^5 ساعة (11 سنة) أو أكثر مألوفة من أجل الـ *LEDs* جيدة، ويمكن أن يسمح بدرجات حرارة بين 30°C و 85°C خلال العمل لبعض الثنائيات مع أنه تناقص قدرة الخرج بارتفاع درجة حرارة الوصلة.

يمكن تركيب الثنائي الباعث لضوء *LED* على هيكل معياري، يغطي الهيكل بقبة معدنية ذات قمة من الزجاج السافري يمكن أن يمر الضوء من خلالها. يمكن أن تتوسع الحزمة بسرعة، نلاحظ أنه بالإضافة إلى الخسارة في الأشعة خارج حدود زاوية القبول تضيق بعض الأشعة من الليف كلياً. يمكن إضافة عدسة خارجية إلى النظام من أجل إنقاص زوايا الإشعاع إلا أن العدسة سوف لن تنقص من قطر الحزمة. لذلك تستخدم بنية أخرى حيث توضع عدسة صغيرة جداً (عدسة ميكروية) مباشرة على الباعث، في هذه الحالة لا تتوسع الحزمة كثيراً قبل توازيها. إن هذه البنية فعالة من أجل أقطار نواة ليف صغيرة حتى $50[\mu\text{m}]$ وفتحات نفوذ معدنية أكبر من 0.1.

7 - 2 ثنائيات الليزر *Laser Diodes*

تتكون كلمة الليزر من الأحرف الأولى للعبارة *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* وتعني تكبير الضوء بالإصدار المحثوث للإشعاع.

يقصد بالوسط الليزري الوسط الفعال الذي تحدث فيه تفاعلات عمومية (كوانتية) ينتج عنها توليد الطاقة الضوئية، وتتم عملية الليزر على ثلاث خطوات:

- 1 - امتصاص الفوتونات *Photons Absorption*.
- 2 - الإصدار أو الانبعاث العفوي *Spontaneous Emission*.
- 3 - الإصدار المحثوث أو المحفز *Stimulated Emission*.

هناك أنواع مختلفة من المواد التي يمكن أن تولد أشعة الليزر وهذه المواد تتضمن المواد الغازية والسائلة والصلبة. ولكن الليزر المستخدم في معظم الأحيان في الاتصالات بالألياف البصرية هو الليزر المصنوع من مواد نصف ناقلة.

إن الليزر الغازي وهو مبدئياً ليزر هليوم - نيون الذي يبيت عند اللون الأحمر، يستعمل من أجل اختبار الألياف والأجهزة البصرية الأخرى. في اختبار بسيط نقترن حزمة ليزر He-Ne إلى ليف عارٍ من أجل كشف أي قطع أو تشقق في الليف. فإذا لم ينفذ أي ضوء من الليف فإنه يوجد قطع بالتأكيد.

أما الليزر الغازية تستخدم أيضاً في الاتصالات الضوئية وخاصة ليزر غاز CO_2 المستخدم أثناء تصنيع الليف الضوئي.

إن ليزر YAG : Nd (Neodymium-yttrium-Aluminum-Garnet) هو عنصر بالحالة الصلبة وإن موجته المتولدة ذات الطول $1.06[\mu m]$ تقع في منطقة ذات تخامد ليف أقل من المنطقة ذات المدى من $0.8[\mu m]$ إلى $0.9[\mu m]$ المستعملة بشكل شائع. بالإضافة إلى أن عرض طيفه يقع حول $0.1[nm]$ وهو أضيق بكثير من عرض النطاق لثنائي الليزر LD. هناك سببان لا يشجعان على استعمال Nd:YAG في النظم الليفية وهما: أولاً إن تعقيد الجهاز وكلفته أكثر بعدة مرات مما لثنائي LED. وثانياً يجري التعديل عادة خارجياً بعد أن يكون قد تم توليد الضوء.

يتمتع ثنائي الليزر والمصنع من أنصاف النواقل بالمقارنة مع LED بمزايا عديدة مما يجعله أكثر استخداماً. ومن أهم هذه المزايا:

1. تكون شدة إشعاع الليزر عالية ومركزة ضمن حزمة ضيقة جداً لذلك فمن السهل ربط ضوئها مع الليف.

2. تكون استطاعة خرج ثنائي الليزر أكبر من استطاعة خرج LED فهي تصل إلى نحو $5[mW]$ بالنسبة إلى ثنائي الليزر و $0.5[mW]$ لثنائي LED وهذا يسمح باستخدام ثنائي الليزر في نظم المسافات البعيدة.

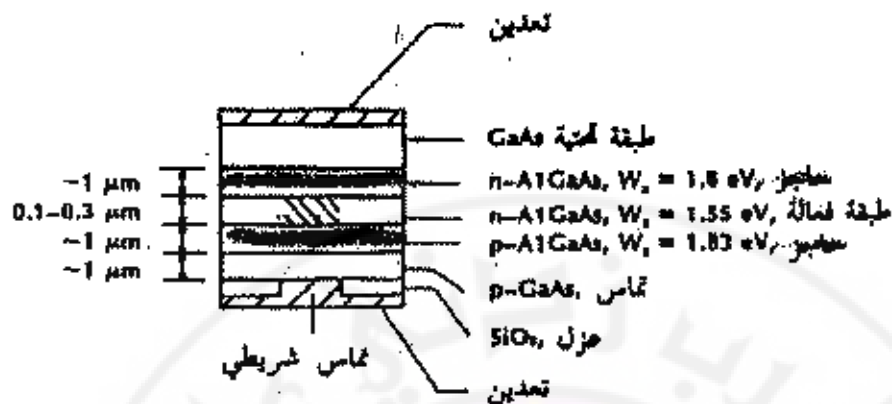
3. يعطي ثنائي الليزر ضوءاً أحادي اللون، أي له عرض طيفي ضيق جداً وينتج عنه تردد جيد، ولذلك يستخدم غالباً مع الألياف وحيدة الأنموذج.

4. تكون الحزم الضوئية الناتجة عن الليزر متوازية أي يكاد يكون التشتت معدوماً.

5. تستخدم ثنائيات الليزر لسرعات نقل عالية حيث يصل معدل النقل إلى $1[Gbit/s]$.

6. تمتاز ثنائيات الليزر بسرعات استجابة عالية (أقل من $1[ns]$) إلا أن لثنائيات الليزر بعض المساوئ، وهي أنها أعلى من ثنائيات LED وعمرها العملي أقل من عمر ثنائيات LED كما أنها أكثر تأثراً بالحرارة من ثنائيات LED.

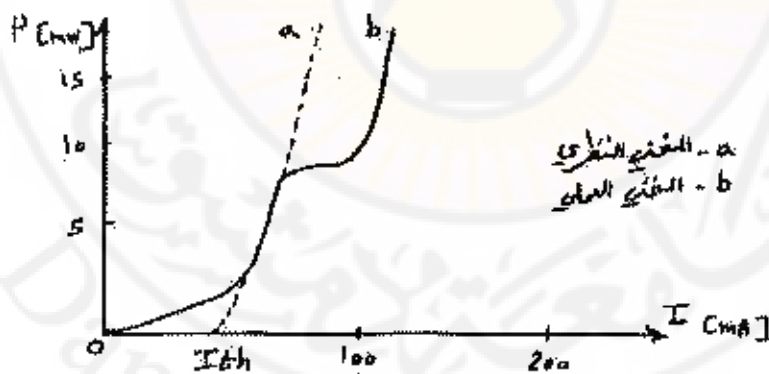
تتمتع ثنائيات الليزر والثنائيات الباعثة للضوء بتركيب مشابه يبين الشكل (7-10) بنية ثنائي ليزر $AlGaAs$ ، حيث تكون ثنائيات الليزر دائماً ذات باعقات حافية، أي أنها ليست مثل ثنائيات الـ LED، وعندما تستقطب في الاتجاه الأمامي تحقن شحنات في الطبقة الفعالة حيث تحدث حالة الاتحاد فتسبب الانبعاث التلقائي للفوتونات. يتم الوصول إلى تيار العتبة عندما يكون الربح كبيراً بما فيه الكفاية لكي يعوض خسارات الثنائي وعند هذه النقطة يحدث تنبذب الليزر.



الشكل (10-7) ثنائي ليزر $AlGaAs$ ذو تماس شريطي

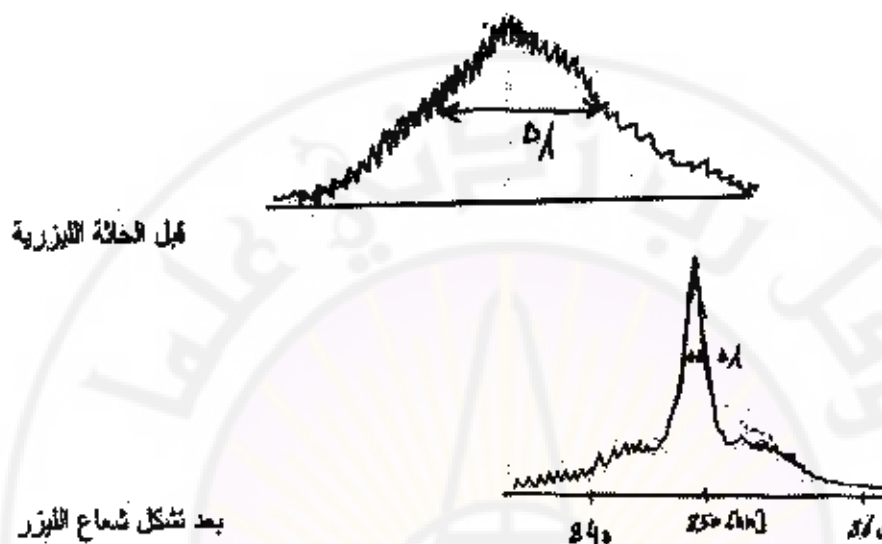
عندما يكون التيار المطبق على ثنائي الليزر أقل من قيمة معينة (تيار العتبة) I_{th} فإن ثنائي الليزر يعمل كثنائي LED ويعطي طيفاً واسعاً نسبياً، وعندما تزداد قيمة التيار فوق تيار العتبة I_{th} يبدأ الفعل الليزري فنحصل على ضوء ضيق الطيف.

يبين الشكل (11-7) علاقة استطاعة الخرج كتابع للتيار الأمامي.



الشكل (11-7)

ويبين الشكل (12-7) شكل الحزمة الضوئية المتولدة من ثنائي الليزر قبل الحادثة الليزرية وبعدها.

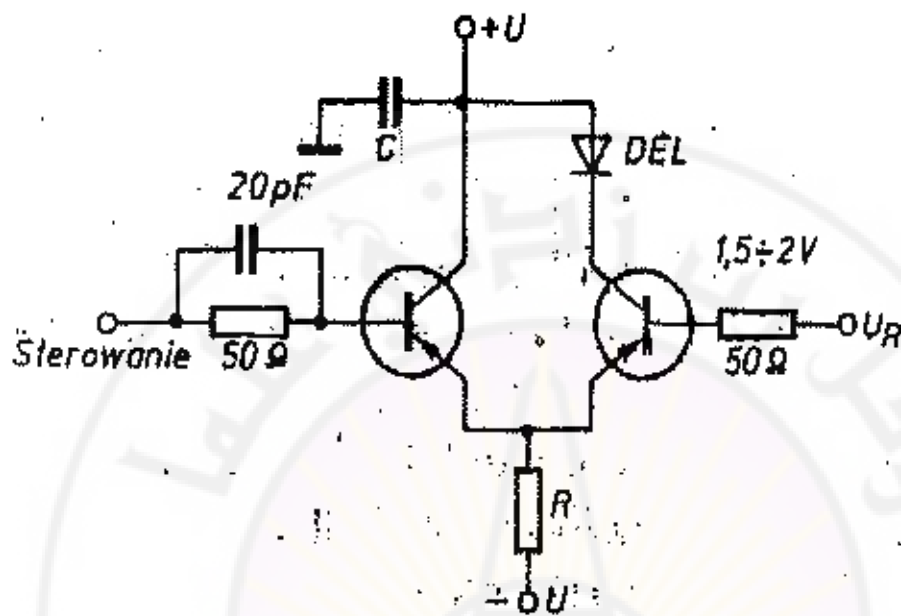


الشكل (12-7)

بعد تذبذب الليزر تبدأ مرحلة تسريع الفوتونات بين وجهي المادة نصف الناظلة والثنائي تمثّلان مرآتين إحداها عاكسة كلياً والثانية عاكسة بشكل جزئي.

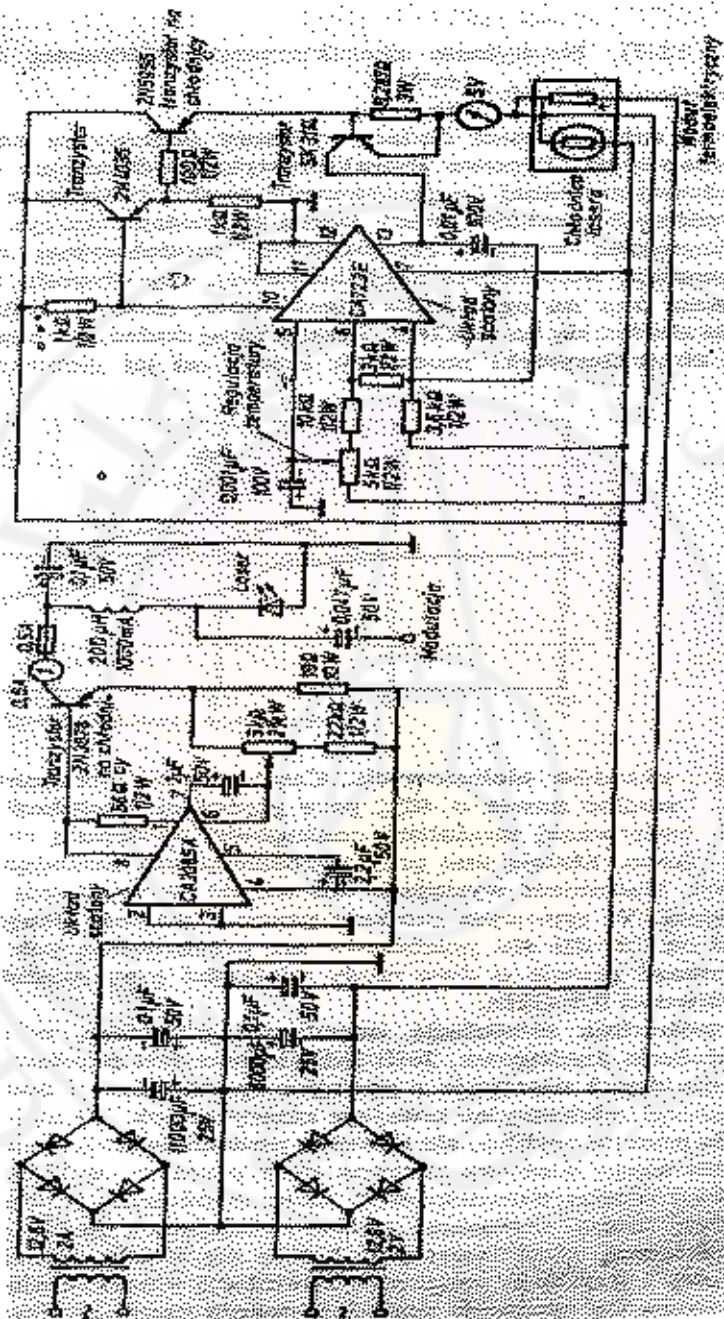
عندما تسرع الفوتونات إلى مستوى عالٍ (مستوى العتبة) عندها يبدأ الثنائي النصف الناقل بإطلاق أشعة الليزر.

أن الشكل (13-7) يبين كيف يتم توصيل الثنائي LED في دارة الكترونية لتحويل الإشارة الكهربائية إلى ضوء مع العلم أن قيم R, C تتعلق بقيمة جهد التغذية $\pm V$ المطبق على المضخم التفاضلي.



الشكل (7-13)

كما أن الشكل (7-14) يبين نظاماً إلكترونياً يولد أشعة الليزر من ثنائي LD ويستخدم في الاتصالات الضوئية.





الفصل الثامن

الكواشف البصرية

Optical Photo Detectors

8 - 1 مقدمة عامة

إن الوظيفة الأساسية للكاشف الضوئي أو البصري هي تحويل الإشارة الضوئية القادمة من الهدف إلى إشارة كهربائية (تيار كهربائي تحديداً) حيث تتناسب قيمة هذا التيار الناتج مع شدة الضوء الواسل.

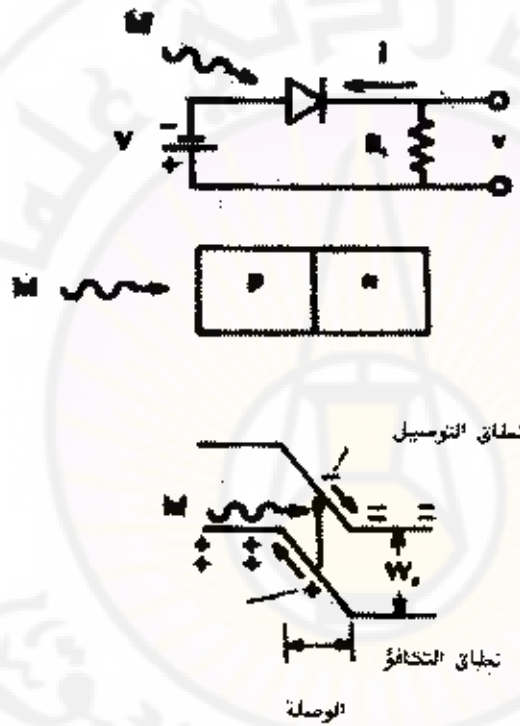
سوف نقدم شرحاً مفصلاً لأنواع الكواشف الضوئية المستخدمة في أنظمة الاتصالات البصرية حيث سيكون تركيزنا على الثنائي الكاشف *Photodiode*.

توجد مجموعة متطلبات عامة للكاشف الضوئي، وذلك من أجل الحصول على أداء عالٍ، هناك العديد من الشروط والمتطلبات الواجب توافرها في الكاشف الضوئي:

- حساسية عالية (*High Sensitivity*) على الطول الموجي العامل.
- كفاءة كمية عالية (*High Quantum Efficiency*) استجابة عالية للإشارة المستقبلة.
- زمن استجابة قصير (*Short Response Time*) للحصول على عرض نطاق مناسب.
- مستوى ضجيج بأقل ما يمكن.
- حجم صغير (*Small Size*) ليتناسب مع مقاسات الهدف.
- تكلفة قليلة (*Low Cost*).

تعتمد الكواشف الضوئية على أنصاف النواقل، حيث يمكن أن يتشكل كاشف ضوئي نصف ناقل من وصلة $P-N$ منحازة عكسياً، وهذه الثنائيات مبدؤها يقوم بتحويل الضوء إلى الكهرباء، وذلك عكس المنابع الضوئية تماماً.

يبين الشكل (1-8) وصلة $P-N$ منحازة عكسياً كأساس للكاشف الضوئي.



الشكل (1-8)

إن الثنائيات ذات الوصلة نصف الناقلة صغيرة الحجم وخفيفة وحساسة وسريعة، ويمكن أن تعمل بجهد انحياز عكسي من فئة بضعة فولتات، وهي مثالية تقريباً من أجل الأنظمة الليقية.

الكفاءة الكمية Quantum Efficiency

تعرف الكفاءة (المردود) الكمية (η) للثنائي الضوئي بأنها عدد الإلكترونات الخارجة منه نسبة إلى عدد الفوتونات الساقطة عليه. حيث تتغير قيمتها بتغير الطول الموجي ودرجة الحرارة وتكون ما بين الصفر والواحد (عادة حوالي 0.7) أو تعطى كنسب مئوية.

الاستجابة Responsivity

عند الحديث عن أداء الثنائي الضوئي وعمله عادة باستخدام الاستجابة (R_{es}) التي تعرف على أنها النسبة بين التيار الضوئي ($Photocurrent$) الخارج من الثنائي (I_p) والقدرة الضوئية ($Optical Power$) الداخلة عليه (P_o) ووحدتها $[A/W]$.

$$R_{es} = \frac{I_p}{P_o} [A/W] \quad (1-8)$$

ويمكننا حساب التيار الضوئي الخارج من الثنائي حسب العلاقة التالية:

$$I_p = \frac{\eta \cdot P_o \cdot e}{h \cdot f} \quad (2-8)$$

حيث:

e - شحنة الإلكترون وتساوي $1.602 \times 10^{-19} [C]$.

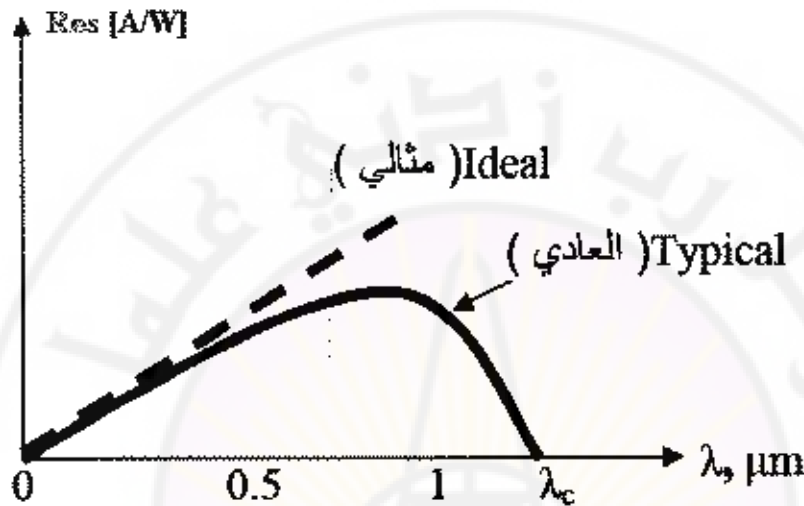
f - التردد $[Hz]$.

η - المردود.

عندئذ وبالاستناد إلى ما سبق يمكن حساب الاستجابة R_{es} وفق ما يلي:

$$R_{es} = \frac{\eta \cdot e}{h \cdot f} = \frac{\eta \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

تعتمد R_{es} على نوع المادة التي يصنع منها الثنائي الضوئي، وعلى الطول الموجي λ كما هو مبين بالشكل (2-8).



الشكل (2-8)

عادة ما تكون قيمة R_{es} أقل من $I[A/W]$ للثنائي الضوئي من نوع $P-I-N$. لو فرضنا أن قيمة القدرة الضوئية الساقطة على ثنائي ضوئي ذي استجابة $0.8[A/W]$ تساوي $100[\mu W]$ فإن التيار الضوئي الخارج من الثنائي يساوي:

$$I_p = R.P_o = 0.8 \times 100[\mu W] = 80[\mu A]$$

مثال 8 - 1

إذا علمت أن عدداً من الفوتونات يساوي 3×10^{11} على الطول الموجي $850[nm]$ قد سقطت على ثنائي ضوئي، حيث تولد عنها عدد من الإلكترونات يساوي 1.2×10^{11} والمطلوب: إيجاد الكفاءة الكمية والاستجابة للثنائي.

الحل:

الكفاءة الكمية تساوي عدد الإلكترونات مقسوماً على عدد الفوتونات:

$$\eta = \frac{1.2 \times 10^{11}}{3 \times 10^{11}} = 0.4 \Rightarrow \eta\% = 40\%$$

تعطى الاستجابة بالعلاقة:

$$R_{av} = \frac{\eta \cdot e \cdot \lambda}{n \cdot c}$$

$$R_{av} = \frac{0.4 \times 1.602 \times 10^{-19} \times 0.85 \times 10^{-6}}{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 0.274 [A/W]$$

مثال 8 - 2

لدينا كاشف ضوئي كفاءته الكمية تساوي 65% تسقط عليه فوتونات عبر فجوة طاقة تساوي 1.5×10^{-19} أوجد:

(1) على أي طول موجي يعمل الثاني.

(2) ما هي قيمة القدرة الضوئية اللازمة للحصول على تيار ضوئي بقيمة $2.5 [\mu m]$ وذلك حسب المعطيات السابقة في المثال (8-2).

الحل:

1- يمكن حساب الطول الموجي بالاعتماد على علاقة طاقة الفجوة:

$$E_g = h \cdot f = h \cdot c / \lambda \Rightarrow \lambda = h \cdot c / E_g \Rightarrow \lambda = 1.24 / E_g$$

وبالتعويض نجد أن:

$$\lambda = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.5 \times 10^{-19}} = 1.32 [\mu m] = 1320 [nm]$$

2- من علاقة R_{es} نكتب:

$$R_{es} = \frac{\eta \cdot e}{n \cdot f} = \frac{0.65 \times 1.602 \times 10^{-19}}{1.5 \times 10^{-19}} = 0.694 [A/W]$$

ولدينا:

$$R_{es} = \frac{I_p}{P_o}$$

$$P_o = \frac{I_p}{R_{es}} = \frac{2.5 \times 10^{-6}}{0.694} = 3.6 [\mu W]$$

زمن الاستجابة Response Time

يعبر زمن الاستجابة عن الزمن اللازم للثنائي الضوئي حتى يستقبل الفترة البصرية الواصلة له، ويحولها إلى تيار كهربائي، وفي بعض الأحيان يسمى *Rise Time* أي زمن الصعود ويرمز له بـ t_r وهناك أيضاً زمن الهبوط *Fall Time* ويرمز له t_f . تعتمد قيمة زمن الاستجابة على تركيب وتصميم الثنائي وعلى نوع المادة المصنوع منها الثنائي، وجهد الانحياز، القيمة المعيارية لزمن الاستجابة أقل من $0.1 [ns]$. ترتبط قيمة عرض النطاق BW بزمن الصعود من خلال المعادلة التالية:

$$BW = 0.35 / t_r \quad (3-8)$$

من ناحية أخرى فإن المقاومة R وسعة المكثف C لها تأثير في تحديد قيمة عرض النطاق حيث يصبح:

$$BW = 1/2\pi RC_d \quad (4-8)$$

حيث: C_d - هي سعة الثنائي المنحاز عكسياً.

جهد الانحياز:

كما شرحنا سابقاً يجب أن يكون الانحياز عكسياً، وذلك لضمان عمل الثنائي الضوئي. تعتمد قيمة الجهد على نوع الثنائي، وتؤثر في تشغيله وأدائه، وحيث تتراوح من $5[V]$ وتصل إلى أكثر من $200[V]$ للثنائي من نوع APD .

8 - 2 - أنواع الكواشف البصرية *Photo Detector Types*

هناك الكثير من الأنواع للكواشف الضوئية والتي تصنع من أنصاف النواقل:

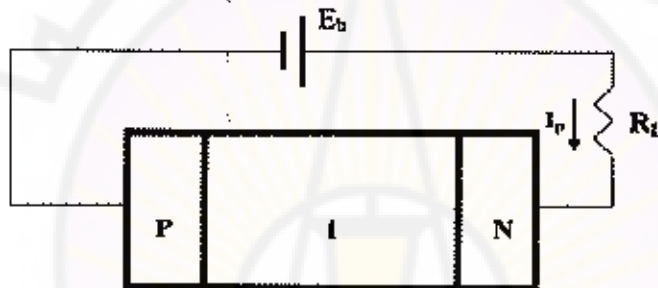
- (1) ثنائي ضوئي من نوع PN (PN photodiode).
- (2) ثنائي ضوئي من نوع $P-I-N$ ($P-I-N$ Photo diode).
- (3) ثنائي ضوئي جرفي (APD) $Avalanche$ photodiode.
- (4) الترانزستورات الضوئية $Photo$ transistor.

8 - 2 - 1 ثنائي من نوع PN

يعد هذا النوع الأبسط والأقل تكلفة من جميع أنواع الكواشف الضوئية، وهو عبارة عن وصلة $P-N$ موصلة بجهد انحياز عكسي الشكل (8-1) مما يضمن توليد أزواج من الشحنات الكهربائية نتيجة سقوط الفوتونات وامتصاصها من قبل الثنائي، تعد المواصفات العملية لهذا النوع من الكواشف متواضعة جداً ولا تصلح للاستخدام في أنظمة الاتصالات البصرية. لكنها تستعمل بشكل واسع في الإلكترونيات المنزلية.

8 - 2 - 2 ثنائي بصري من نوع $P-I-N$

إن الثنائيات الضوئية PIN هي الكواشف الضوئية الأكثر شيوعاً في الأنظمة الليغية. يعد الثنائي الضوئي PIN نموذجاً مطوراً للثنائي من نوع PN . يتضمن الثنائي PIN طبقة ناقلة ضمنية عريضة بين المنطقتين $N-P$ تكاد تكون نقية ($INTRINSIC$) ومن هنا جاءت التسمية (I). تسمح هذه المنطقة العريضة بامتصاص عدد أكبر من الفوتونات وبالتالي الحصول على كفاءة، واستجابة، وسرعة أعلى مقارنة مع الثنائي من نوع PN دون الحاجة لزيادة جهد الانحياز. ويبين الشكل (3-8) بنية الكاشف PIN مع الدارة اللازمة للانحياز.



الشكل (3-8)

لا تحتوي الطبقة الضمنية على شحنات حرة، وهكذا تكون مقاومتها عالية ويظهر عليها معظم جهد الثنائي فتكون القوى الكهربائية بداخلها قوية. وحيث إن الطبقة الضمنية عريضة جداً لذلك يوجد احتمال قوي لأن تمتص فيها الفوتونات الواردة وليس في المنطقتين P و N الرقيقتين، إن هذا يحسن الكفاءة والسرعة بالمقارنة مع الثنائي الضوئي PN .

من أجل أن تنتج زوج (إلكترون - ثقب) يجب على الفوتون الوارد أن يملك طاقة لكي يرفع إلكترونات عبر شدة النطاق، ويتحقق ذلك إذا تحقق العلاقة التالية:

$$hf \geq W_g$$

ويقود إلى طول موجة قطع *CUT OF WAVE LENGTH* تساوي:

$$\lambda_c = 1.24 / W_g$$

حيث:

λ تقدر بالميكرومتر.

W_g هي طاقة ثغرة النطاق وتقدر بالإلكترون فولت.

هناك بعض القيم العملية لثنائيات *P-I-N*:

- جهد التحيز من 5V إلى 20V.
- زمن الاستجابة من 5[ps] إلى بضعة ns.
- الاستجابة حوالي 0.7[A/W] عند الطول الموجي 850[nm].

المواد

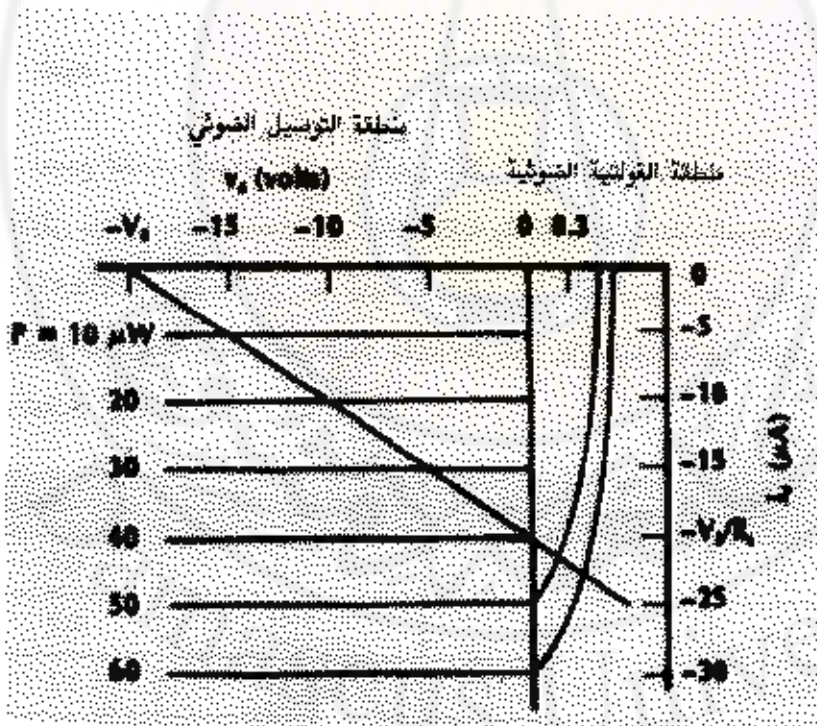
يصنع الكاشف الضوئي البصريّ اللففي بشكل أساسي من السيليكون (Si) وذلك في النافذة الأولى حيث لا يمكن استخدامه في النافذة الثانية والثالثة، تبدي ثنائيات الجرمانيوم (Ge) وثنائيات InGaAs ضجيجاً أكبر مما يبديه السيليكون إلا أنها تستجيب في النافذة الثانية والثالثة، يبين الجدول التالي خصائص المواد Si, Ge, InGaAs المستخدمة في ثنائيات PIN النصف الناقلية:

المادة	مدى طول الموجة [μm]	استجابة التردد [μm]	الاستجابة Res
Si	1-0.3	0.8	0.5
Ge	0.5-1.8	1.55	0.7
InGaAs	1.0-1.7	1.55	1.1

الجدول (1-8)

خواص تيار الجهد

يبين الشكل (4-8) منحنيات خواص التيار - الجهد لثنائي سيليكوني يملك استجابة مقداره $0.5[A/W]$. عندما يستقطب الثنائي عكسياً نقول أنه يعمل بأسلوب التوصيل الضوئي، ففي هذا الأسلوب يتناسب تيار الخرج مع القدرة البصرية. عندما لا يوجد استقطاب عكسي تنتج القدرة البصرية الواردة جهداً أمامياً كما يبدو في الشكل. هذا هو الأسلوب الكهرضوئي الذي هو أساس الخلايا الشمسية التي تنتج جهوداً كهربائية عندما تتعرض للإشعاع البصري. تعمل الكواشف المستخدمة في الاتصالات اللقمية بأسلوب التوصيل الضوئي، وحتى عندما لا توجد قدرة بصرية يتدفق تيار عكسي صغير خلال ثنائي مستقطب عكسياً، ويدعى تيار الظلام المشار إليه بـ I_D .



الشكل (4-8)

ينشأ تيار الظلام عند التوليد الحراري لحوامل المشحنة الحرة في الثنائي، ويتدفق في جميع الثنائيات حيث يسمى اصطلاحاً تيار التسريب العكسي.

تملك الكواشف السيلكونية عموماً أصغر تيارات ظلام وتملك ثنائيات الـ $InGaAs$ تيارات ظلام أكبر إلى حد ما، وتملك ثنائيات الجرمانيوم أكبر تيارات ظلام حوالي $700[nA]$.

3 ~ 2 ~ 8 الثنائي البصري الجرفي (APD) *Avalanche Photodiode*

إن الثنائي الضوئي الجرفي (APD) هو كاشف ذو وصلة نصف ناقلة يتمنع بريح داخلي واستجابة تزيد عن استجابة أجهزة الـ PN و PIN ، وهذا مما يزيد من حساسيته (Sensitivity) بشكل كبير.

يتزايد الريح تبعاً لجهد الاستقطاب العكسي V_B وفقاً للعلاقة التالية:

$$M = \frac{1}{1 - (V_B / V_{BR})^n} \quad (5-8)$$

حيث:

- V_{BR} هو جهد الانهيار العكسي
- n هي محدد (Parameter) تحدد تجريبياً وذات قيمة أقل من الواحد، تتراوح جهود الانهيار بين $20[V]$ و $500[V]$.

يعطى التيار المتولد بواسطة APD ذي ربح M بالمعادلة التالية:

$$I = \frac{M\eta eP}{hf} = \frac{M\eta e\lambda P}{hc} \quad (6-8)$$

حيث: η هي كفاءة الكم.

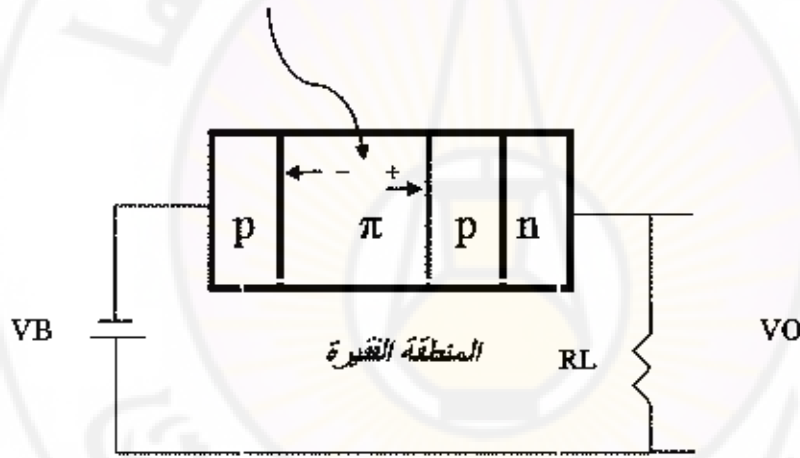
وتعطى الاستجابة كما يلي:

$$R_{\text{ex}} = \frac{M\eta e}{hf} = \frac{M\eta e\lambda}{hc} \quad (7-8)$$

وتتراوح الاستجابة الجرفية بين $20[A/W]$ و $80[A/W]$.

إن الثنائيات الضوئية الجرفية لها عادة أشكال مختلفة عن الثنائيات $P-I-N$. إن المواد المستعملة هي ذاتها وكذلك الأطوال الموجية.

يبين الشكل (5-8) أحد أشكال الـ APD .



الشكل (5-8)

إن الطبقتين N^+, P^+ هما منطقتان لهما تركيز عال بالإشابة، ومقاومة منخفضة، وتملكان هبوط جهد منخفضاً جداً، أما المنطقة π فهي ضعيفة التطعيم وهي منطقة ضمنية تقريباً. إن معظم الفوتونات تمتص في هذه المنطقة منتجة أزواج (إلكترون - ثقب). إن هبوط الجهد يكون بشكل رئيسي عبر الوصلة $P-N^+$ حيث تؤدي القوى الكهربائية الكبيرة إلى حدوث تضاعف جرفي.

إن الثنائيات الضوئية الجرفية المحددة بزمان العبور متوفرة بأزمان صعود صغيرة تبلغ بضعة أعشار النانوثانية، لقد تم الوصول إلى أزمان صعود أقل من $100[ps]$ باستعمال كل من السيلكون والجرمانيوم.

إن ربح الثنائي الضوئي الجرفي يعتمد على درجة الحرارة ويتناقص عموماً بارتفاع درجة الحرارة.

إن العلاقة الرئيسية التي عرضت في هذا الفصل كانت العلاقة بين القدرة الضوئية الواردة والتيار الكهربائي المتولد في الكاشف الضوئي. يمكن تلخيص هذه العلاقة بالمعادلة التالية: $i = pP$ حيث تتراوح الاستجابة p بين $0.5[A/W]$ و $0.7[A/W]$ لثنائيات PIN وتزداد بعوامل تصل حتى بضع مئات للكواشف الجرفية.

إن الكاشف في نظام اتصالات ليفي يمكن أن يكون إما ثنائياً ضوئياً PIN أو جرفياً. إن ثنائي PIN أرخص وأقل حساسية لدرجة الحرارة، ويتطلب جهد استقطاب عكسياً أقل مما يتطلبه ثنائي الـ APD . إن سرعتي الجهازين متقاربة، ولذلك يفضل ثنائي الـ PIN في أغلب الأنظمة. تظهر الحاجة إلى APD عندما يُحد النظام بالخسارة كما يحدث في وصلات المسافات الطويلة. نفترض أن مستقبل APD يمكن أن يكشف بوضوح إشارة ذات قدرة أضعف بمقدار $9[db]$ من الإشارة التي يمكن أن يكشفها ثنائي PIN . إذا كانت خسارة الليف $3[db/km]$ فيمكن لوصلة الـ APD أن تكون أطول من وصلة الـ PIN بمقدار $3[km]$. وبالمثل إذا احتاج الأمر وجود مكبرات لدعم سويات القدرة الضوئية يمكن عندئذ أن تزيد المسافات بين هذه المكبرات بمقدار $3[km]$ إذا استعمل كاشف APD في هذه الحالة. وعلى أية حال قد نحتاج معلومات أكثر في بعض التطبيقات مثلاً من أجل تحديد فيما إذا كان APD مطلوباً نحتاج أن نعرف كل خسارات النظام وليس فقط تخامد الليف. وأن نعرف كم هي القدرة المتوفرة عند المستقبل بينما بقية الخسارات الأخرى تنتج عن اقتران المنبع والتوسيل الدائم

والوصلات وأي تجزئة للقدرة من أجل توزيع الإشارة. وإضافة إلى ذلك نحتاج أن نحدد آثار الضجيج. ويبين الجدول (2-8) خصائص الثنائيات الضوئية المختلفة حسب اختلاف المادة المصنوع منها الثنائي.

المعلمة	الرمز	الوحدة	النوع	المادة	Material
parameter	Symbol	Unit	Type	Material	
الطول الموجي	λ	nm		Si	0.4 - 1.1
الاستجابة	R	A/W	P-I-N	Ge	0.8 - 0.87
الكفاءة الكمية	η	%	P-I-N	Si	75 - 90
التكبير الجبري	M	-	APD	Si	-
التيار المظلم	I_d	nA	P-I-N	Ge	50 - 500
			APD	Si	0.1 - 1
عرض النطاق	BW	GHz	P-I-N	Ge	0 - 0.0015
			APD	Si	1.5
معدل البتات	BR	Gbit/s	P-I-N	Ge	-
			APD	Si	-
جهد الانحياز	V	V	P-I-N	Ge	6 - 10
			APD	Si	200 - 250

الجدول (2-8)

8 - 2 - 4 الترانزستورات البصرية Phototransistors

يمكننا اعتبار الترانزستور الضوئي بأنه ترانزستور يتم التحكم بتياره عن طريق الضوء الساقط عليه من الليف. تصنع الترانزستورات الضوئية على شكل دوائر متكاملة ICs صغيرة الحجم، وذلك لتقليل مستوى الضجيج ولرفع الحساسية، حيث تستخدم عندما تكون قدرة الضوء منخفضة وتصنع هذه الترانزستورات وفقاً لتقنية BJT أو FET.

8 - 3 الضجيج والكشف *Noise and Detection*

تسبب مجموعة من الظواهر المختلفة تدني الإشارات أثناء تقدمها خلال وصلة اتصالات ليفية، مما يستدعي استخدام مكبرات لكي ترفع الإشارة دائماً إلى السوية المطلوبة. يرافق تكبير الإشارة دائماً الضجيج، حيث يسهم المكبر ذاته بضجيج إضافي ولهذا السبب لا يستطيع التكبير أن يحسن نسبة الإشارة إلى الضجيج. وعندها تتناقص قدرة الإشارة المستقبلية لتقارب قدرة الضجيج وتتناقص قابلية تمييزها أكثر فأكثر. لذا فإن التخاذل يحد في النهاية من طول نظام الإرسال الليفى.

هناك سببان رئيسيان لتدني جودة الإشارة وهما: الضجيج الحراري وضجيج الطلقات. ينشأ الضجيج الحراري *Thermal Noise* (ويدعى أيضاً ضجيج حونسون وضجيج نايكويست) داخل مقاومة حمل R_L الكواشف الضوئية.

يمكن تمثيل الضجيج الحراري بمنبع تيار يولد تياراً متوسطاً مربعه هو:

$$\overline{i_{NT}^2} = \frac{4KT\Delta f}{R_L}$$

حيث:

- K هو ثابت بولتزمان.
- T هي درجة الحرارة المطلقة $^{\circ}K$.
- Δf هو عرض المجال للمستقبل.

إن الطبيعة المتقطعة للكهرباء تسبب اضطراب إشارة يدعى ضجيج الطلقات. وفي الكواشف الضوئية سواء أكانت أنابيب باعثة للنوء أم أجهزة الوصلة نصف الناقلة تولد الإشارات الضوئية حوامل شحنة متقطعة، ويقدم على حامل نبضة وحيدة إلى التيار الكلي.

يمكن تمثيل ضجيج الطلقات بدارة مكافئة تتألف من منبع وحيد للتيار، تبلغ قيمة متوسط مربع تيار ضجيج الطلقات ما يلي:

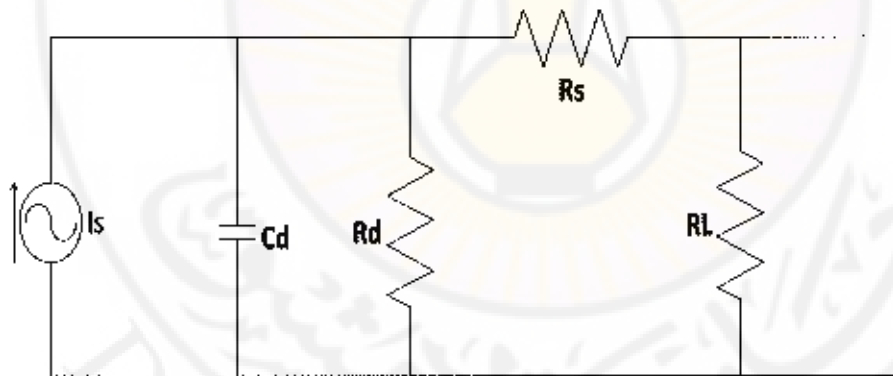
$$\overline{i_{NS}^2} = 2eI\Delta f$$

حيث:

- e هو مقدار شحنة الالكترون.
- I هو متوسط تيار الكاشف.
- Δf هو عرض مجال المستقبل.

8 - 3 - 1 نسبة الإشارة إلى الضجيج *Signal to Noise Ratio*

يبين الشكل (6-8) الدارة المكافئة لثنائي ضوئي ذي وصلة، مع فرض أن سعة الثنائي C_d وزمن العبور لا يحددان الإشارة.



الشكل (6-8) دارة مكافئة لثنائي ضوئي

ويمكن صندئذ إلغاء C_d من الدارة المكافئة للضجيج، أما تأثيرها عليه فإنه يدخل في حساب عرض مجال المستقبل Δf .

إن للثنائيات نصف الدافلة مقاومة تسلسلية R_S صغيرة (بضعة أومات) نتيجة التوصيل في معظم منطقتي P و N وهذه المقاومة ستهمل، وبالمثل يكون للثنائي مقاومة R_d على التوازي مع منبع التيار المكافئ له، وهذه هي مقاومة الوصلة الفقيرة. وحيث إن R_d تكون عادة أكبر بكثير من مقاومة الحمل R_L فيمكن تجاهلها.

استناداً إلى ما سبق يمكن حساب نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR في حالات مختلفة منها:

1- قدرة بصرية ثابتة.

2- قدرة بصرية متغيرة جيئياً.

إذا افترضنا أن متوسط تيار الإشارة $(\eta e P / hf)$ أكبر بكثير من تيار الظلام، يمكن عندئذ إسقاط تأثير تيار الظلام I_D . تحدث هذه الحالة إذا كان تيار الظلام صغيراً وكانت القدرة البصرية ليست صغيرة جداً. وإذا افترضنا أن قدرة ضجيج الطلقات تتجاوز قدرة الضجيج الحراري كثيراً لذلك يمكن تجاهل الحل $P_{NT} = 4KT \Delta f$ (الضجيج الحراري)، وتختصر نسبته إلى الضجيج حينئذ إلى ما يلي:

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P}{2h f \Delta f}$$

في هذه الحالة تكون الـ SNR محددة بضجيج الطلقات، (وتدعى أيضاً محددة بالكَم Quantum Limited)، وهذه أفضل نتيجة يمكن الحصول عليها.

ولسوء الحظ ليس لدينا دائماً قدرة محدودة. عندما تكون القدرة صغيرة يغلب الضجيج الحراري عادةً على ضجيج الطلقات. تكون عندئذ نسبة الإشارة إلى الضجيج:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{R_L (\eta e P / hf)^2}{4KT \Delta f} \quad (8-8)$$

وهذه هي النتيجة المحددة بالضجيج الحراري. وهي عادة أصغر بكثير من SNR المحددة بالكم. لاحظ أن الـ SNR لهذه الحالة يمكن أن تتحسن بزيادة مقاومة الحمل. نرى أيضاً من المعادلة أن الـ SNR تتزايد مع توليد مربع القدرة البصرية الواردة. ونستنتج بأن تغيرات صغيرة نسبياً في كفاءة النظام تنتج تغيرات كبيرة في نوعية الإشارة المستقبلة في الأنظمة المحددة بالضجيج الحراري.

مثال 8 - 3

افترض أن لدينا نظاماً يتألف من LED بيت مقدار $10[mW]$ عند $0.85[\mu m]$ ومن كابل ليفي ذي خسارة $20[db]$ ، ومن كاشف ضوئي PIN ذي استجابة $0.5[A/W]$. تيار الظلام للكاشف $2[nA]$ ، ومقاومة الحمل $50[\Omega]$ ، وعرض نطاق المستقبل $10[MHz]$ ، ودرجة حرارته $300^{\circ}K$ ($27^{\circ}C$). تتضمن خسارات النظام بالإضافة إلى تخامد الليف نقص قدرة مقداره $14[db]$ بسبب اقتران المنبع وخسارة مقدارها $10[db]$ بسبب الموصلات والوصلات المختلفة. احسب القدرة المستقبلة وتيار الإشارة المكشوفة وقدرتها وفترة ضجيج الطلقات وفترة الضجيج الحراري ونسبة الإشارة إلى الضجيج.

الحل:

$$\text{تبلغ نسبة خسارة النظام الكلية } 14 + 20 + 10 = 44[db]$$

$$\text{وتنتج كفاءة إرسال مقدارها } 10^{-4.4} = 4 \times 10^{-5}$$

وتكون القدرة البصرية الواصلة إلى المستقبل حينئذٍ ما يلي:

$$P_R = 4 \times 10^{-5} (10) = 4 \times 10^{-4}[mW] = 0.4[\mu W]$$

يمكن حساب التيار الضوئي إذ إن الاستجابة معطاة ومنه:

$$i_S = \rho \cdot P_R = 0.5 (0.4) = 0.2[\mu A] = 200[nA]$$

ويكون تيار الضلّام $\{2[nA]\}$ صغيراً بالمقارنة مع تيار الإشارة وهكذا يمكن

تجاهله في هذا المثال. وتكون قدرة الإشارة الكهربائية ما يلي:

$$\overline{P_{ES}} = i_s^2 R_L = (0.2 \times 10^{-6})^2 50 = 2 \times 10^{-12} [W]$$

وتكون قدرة ضجيج الطلقات ما يلي:

$$\overline{P_{NS}} = 2e i_s \Delta f R_L = 2(1.6 \times 10^{-19}) (0.2 \times 10^{-6}) (10^7) (50)$$

$$\overline{P_{NS}} = 3.2 \times 10^{-17} [W]$$

وتكون قدرة الضجيج الحراري ما يلي:

$$\overline{P_{NT}} = 4(1.38 \times 10^{-23}) (300) (10^7) = 1.66 \times 10^{-13} [W]$$

إن الضجيج الحراري في هذا النظام أكبر من ضجيج الطلقات بأربعة أمثال تقريباً.

وتطبق النتيجة المحددة بالضجيج الحراري. يمكن حساب الـ SNR من المعادلة التالية مباشرة:

$$\frac{S}{N} = \frac{\overline{P_{ES}}}{\overline{P_{NT}}} = \frac{2 \times 10^{-12}}{1.66 \times 10^{-13}} = 12$$

وإذا عوّنا عن الـ SNR بالنسبيل تصبح $10 \log_{10} = 10.8 [dB]$. ومن أجل

المقارنة يمكن أن نحسب الـ SNR المحددة بالكم:

$$\frac{S}{N} = \frac{0.2 \times 10^{-6}}{2(1.6 \times 10^{-19})(10^7)} = 62500$$

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{dB} = 48 [dB]$$

مثال 8 - 4

في المثال السابق ألقص خسارات النظام بمقدار $6 [dB]$ (ربما باستعمال ليف أفضل

أو بالترانز منبع محسّن). واحسب قيمة SNR الجديدة.

الحل:

إن خطوات الحل هي كذلك المتبعة في المثال السابق ولهذا سنعطي النتائج باختصار كبير. يطابق التحسن $6[dB]$ زيادة في مقدار القدرة البصرية المستقبلية بعامل مقداره 4. نترزاد قدرة التيار الضوئي للإشارة وقدرة ضجيج الطلقات بذات المقدار وهكذا تكون: $i_s = 0.8[\mu A]$ و $\overline{P_{NS}} = 12.8 \times 10^{-17}[W]$. وتزيد الإشارة المندفقة في المقاومة R_L بمقدار 16 مرة إلى $\overline{P_{ES}} = 32 \times 10^{-17}[W]$. وتبقى قدرة الضجيج الحراري دون تغير عند $\overline{P_{NT}} = 1.66 \times 10^{-17}[W]$ وهي لا تزال أكبر بكثير من قدرة ضجيج الطلقات. وتكون عددنذ: $S/N = \overline{P_{ES}} / \overline{P_{NT}} = 192$ أي أكبر بمقدار 16 مرة من الـ S/R الخاصة بالنظام ذي الخسارة الأكبر. وتساوي الـ S/N بالديسيبل 22.8. إن مقارنة مع المثال السابق تبين أن زيادة في القدرة البصرية بمقدار $6[dB]$ تنتج تحسناً في الـ SNR مقداره $12[dB]$.

يوضح المثال السابق نتيجة عامة لأنظمة محددة بالضجيج الحراري. إذا تزايدت القدرة البصرية بمقدار $\Delta P[dB]$ ستزيد نسبة الإشارة إلى الضجيج بمقدار ضعفي ذلك المقدار $(2\Delta P[dB])$.

يوضح المثالان السابقان أيضاً نوع الحسابات التي يقوم بها مصمم النظام عند تحديد ما إذا كانت القدرة المتوفرة كافية للتطبيق المرغوب. سنبين في الفقرة التالية معدلات الخطأ الرقمية المطابقة إلى نسب الإشارة إلى الضجيج المحسوبة.

نستطيع أن نعدل معادلات الـ SNR بسهولة لكي تشمل كواشف ضوئية بربيع داخلي. إذا كان M هو الربيع فإن تيار الإشارة يترزاد بهذا المقدار. وتترزاد قدرة الإشارة حينئذ بالمقدار M^2 . ويكبر تيار ضجيج الطلقات أيضاً بالمقدار M . لذلك تترزاد قيمة متوسط مربعه بالمقدار M^2 كما يحدث لقدرة ضجيج الطلقات الناتجة. إن تيار الضجيج الحراري لا يكبر لأنه لا يتولد داخل الكاشف الضوئي. وبهذه التعديلات تصبح SNR كما يلي:

$$\frac{S}{N} = \frac{(M\eta e P / hf)^2 R_L}{M^2 \cdot 2 \cdot e R_L \Delta f (I_D + \eta e P / hf) + 4kT \Delta f}$$

حيث: I_D هو تيار الظلام.

إذا كان الريح كبيراً بقدر كافٍ يمكن لضجيج الطلقات أن يتجاوز الضجيج الحراري بقدر كبير حتى من أجل سويات قدرة منخفضة قليلاً. في هذه الحالة (ويافترض أن تيار الظلام يمكن إهماله) نجد:

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P}{2 h f \Delta f}$$

وهي النتيجة المثالية المحددة بالكم التي حصلنا عليها سابقاً.

مثال 8 - 5

يبدل الكاشف PIN في المثال الأول من هذه الفقرة بكاشف ذي استجابة أكبر بمقدار 160 مرة ($M = 160$). وتبقى جميع الشروط الأخرى دون تغيير وهكذا تكون القدرة البصرية الواردة على الكاشف مساوية لـ $0.4 [\mu W]$. احسب الـ SNR .

الحل:

تتزايد قدرة ضجيج الطلقات من $3.2 \times 10^{-17} [W]$ إلى:

$$\overline{P_{NS}} = (160)^2 \cdot (3.2 \times 10^{-17}) = 8.19 \times 10^{-13} [W]$$

وتبقى قدرة الضجيج الحراري عند: $\overline{P_{NT}} = 1.66 \times 10^{-13} [W]$. ويكون ضجيج

الطلقات الآن أكبر من الضجيج الحراري بحوالي خمس مرات. ويكون النظام محدداً بضجيج

الطلقات تقريباً. تتزايد قدرة الإشارة بمقدار M^2 عن القيمة الحاصلة بدون تكبير. وهكذا تكون:

$$\overline{P_{ES}} = (160)^2 (2 \times 10^{-12}) = 5.12 \times 10^{-8} [W]$$

وإذا شملنا الضجيج الحراري تصبح الـ SNR ما يلي:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{ES}}{P_{NS} + P_{NT}} = \frac{5.12 \times 10^{-18}}{8.19 \times 10^{-13} + 1.66 \times 10^{-13}} = 52000$$

أو $47.2[dB]$ ، وبإهمال الضجيج الحراري نحصل على النتيجة المحددة بالكَم وهي $S/N=62500$ أو $48[dB]$. ويبدو التحسن عن النظام المحدد بالضجيج الحراري $(S/N=10.8[dB])$ واضحاً. في هذا المثال يكون النظام ضمن $I[dB]$ من الحد الكمي المثالي.

يبين هذا المثال حقيقتين:

تنتج العملية المحددة بالكَم إشارات أفضل من إشارات الأنظمة المحددة بالضجيج الحراري وإن لعملية المثالية المحددة بالكَم يمكن بلوغها باستعمال كواشف ضوئية عالية الريح.

وبشكل أساسي يزيد ربح الكاشف الضوئي حساسية المستقبل. وتسمح الحساسية المحسنة بكشف الإشارات ضعيفة السوية كتلك التي توجد عند نهايات المسارات الليقية الطويلة. إن أطوال المسارات الطويلة تكون مفيدة بشكل خاص عندما نستعمل مكررات لأنه يمكن زيادة المسافات الفاصلة بين المكررات. إن هذا ينقص عدد المكررات المطلوبة حتى الحد الأدنى ويسمح بمرونة في تحديد موقعها الفيزيائي.

8 - 3 - 2 الضجيج الفائض للثنائي البصري الجرفي *Avalanche Photodiode Excess Noise*

$$\frac{S}{N} = \frac{(M \eta e P / hf)^2 R_L}{M^2 \cdot 2 e R_L \Delta f (I_D + \eta e P / hf) + 4 k T \Delta f}$$

رغم أن المعادلة تصلح

بشكل تقريبي للمضاعفات الضوئية فإنه يجب تعديلها من أجل الثنائيات الضوئية الجرفية *APD*. إن قدرة ضجيج الطلقات في الـ *APD* تتزايد وفق M^2 وليس بحسب M حيث n تقع بين 2 و 3. تتزايد قدرة ضجيج الطلقات (بالنسبة إلى قدرة الإشارة) بعامل الضجيج الفائض $M^2/M^2 = M^{n-2}$ في كاشف ضوئي جرفي *APD*. وتصيح:

$$\frac{S}{N} = \frac{(M \eta e P / hf)^2 R_L}{M^n \cdot 2e R_L \Delta f (I_D + \eta e P / hf) + 4kT \Delta f}$$

وكما شاهدنا سابقاً تؤدي زيادة الريح عن الواحد إلى تحسين الـ SNR بجعل الضجيج الحراري أقل أهمية عند مستويات القدرة المنخفضة. وعلى أي حال إذا كان الريح كبيراً لدرجة أن ضجيج الطلقات يغلب نحصل على ما يلي (بافتراض أننا تجاهلنا تيار الظلام):

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{M^{n-1}} \frac{\eta P}{2hf \Delta f} = \frac{\text{SNR محدد بالكلم}}{\text{عامل الضجيج لقفوض}} \quad (9-8)$$

تبين هذه المعادلة كيف أن الـ SNR المحددة بالكلم تتناقص بعامل الضجيج الفائض. ومن الواضح أنه عندما تصبح M كبيرة جداً تتدنى نوعية الإشارة. نستنتج أنه يوجد قيمة مثالية لـ M (في مكان ما بين 1 و ∞) حيث تنتج قيمة SNR عظمى. ولحسن الحظ يمكن تعبير ربح الـ APD بتغيير جهد الانحياز العكسي.

8 - 3 - 3 القدرة المكافئة للضجيج (NEP) Noise Equivalent Power

إن القدرة المكافئة للضجيج وهي مقياس بديل لحساسية المستقبل تتعلق بكمية القدرة البصرية الناتجة في نسبة إشارة إلى ضجيج مقدارها الواحد. ومن أجل التوضيح السهل لتعريفها وتحديدتها اعتبر كاشفاً نوع PIN محدداً حرارياً ويجعل $S/N=1$ وإيجاد الحل لأجل القدرة ينتج:

$$P_{min} = (hf / \eta e) \sqrt{(4kT \Delta f / R_L)} \quad (10-8)$$

وهذه هي القدرة الدنيا التي يمكن كشفها إذا أخذنا $S/N=1$ كمعيار للكشف. إن القدرة المكافئة للضجيج هي القدرة الدنيا التي يمكن كشفها مقبسة بتقسيمها على الجذر التربيعي لعرض مجال النظام. وفي الحالة المحددة حرارياً يكون:

$$NEP = P_{\min} / \sqrt{\Delta f} = (hf / \eta e) \sqrt{(4k.T / R_L)}$$

وتقدر وحدات الـ NEP بـ $W/Hz^{1/2}$.

يمكن حساب الـ NEP بطريقة مشابهة من أجل كواشف ذات ربح ومن أجل حالات لا يمكن فيها إهمال تيار الظلام. ولأجل هذا دع $S/N=1$. وفي اعتبارنا أن القدرة الدنيا ستكون منخفضة جداً بحيث تكون $I_D \gg \eta e P / hf$ فتكون النتيجة:

$$NEP = (hf / M \eta e) \sqrt{(M^n 2e I_D + 4k.T / R_L)} \quad (11-8)$$

التي يمكن وضعها على الشكل التالي:

$$NEP = \frac{\sqrt{i_{NSD}^2 + i_{NT}^2}}{\sqrt{\rho \Delta f}} \quad (12-8)$$

حيث:

- $\rho = M \eta e / hf$ استجابة الكاشف.
- i_{NSD}^2 ضجيج الطلقات المكثف العائد لتيار الظلام لوحده.
- i_{NT}^2 الضجيج الحراري.

من المعادلة الأخيرة نرى أن الـ NEP تساوي جذر متوسط التربيع RMS لتيار الضجيج مقسوماً على الجذر التربيعي للاستجابة ولعرض المجال.

إن الضجيج الحراري يغلب في حال مقاومات أحمال صغيرة ورياح كاشف صغير. تظهر الحاجة للمقاومة الصغيرة من أجل تحقيق عرض مجال كبير مطلوب لأنظمة التردد العالي بالرغم من أنها تنتج جهد خرج صغير. وهكذا من أجل عمل عالي التردد يمكننا أن نتوقع أن

يتطلب الضجيج الحراري على قيمة الـ NEP وسيكون تيار الظلام غير مهم. وأنه يمكن استعمال ثنائي ضعيف نسبياً (تيار ظلام عالي). ومن جهة أخرى في حال مقاومة كبيرة و/أو ربح كبير يمكن أن يتجاوز ضجيج تيار الظلام الضجيج الحراري. في هذه الحالة يجز أن نختار ثنائياً جيداً (ثنائياً بتيار ظلام صغير) من أجل الحصول على أعظم حساسية للمستقبل.

مثال 8 - 6

ثنائي PIN استجابية قدرها $0.5[A/W]$ عند $0.85[\mu m]$ وتيار ظلام قدره $2[nA]$. احسب الـ NEP كنابع لمقاومة الحمل عند درجة حرارة $300^{\circ}K$. كم تبلغ القدرة الدنيا القابلة للكشف إذا كانت $R_L=100[\Omega]$ وكان عرض المجال $1[MHz]$ ؟

الحل:

يبلغ التيار الفعال RMS للضجيج الحراري ما يلي:

$$\overline{i_{NT}^2} = \sqrt{\frac{4(1.38 \times 10^{-23})(300)\Delta f}{R_L}} \Rightarrow$$

$$\overline{i_{NT}^2} = 1.29 \times 10^{-10} \sqrt{\Delta f / R_L}$$

ويكون التيار الفعال لضجيج المطلق ما يلي:

$$\sqrt{\overline{i_{NSD}^2}} = \sqrt{2eI_D \Delta f} = \sqrt{2(1.6 \times 10^{-19})(2 \times 10^{-9})\Delta f} \Rightarrow$$

$$\sqrt{\overline{i_{NSD}^2}} = 2.53 \times 10^{-14} \sqrt{\Delta f}$$

وبتوحيد هذه النتائج باستجابية مقدارها 0.5 ينتج:

$$NEP = \sqrt{2.56 \times 10^{-27} + 6.62 \times 10^{-20} / R_L}$$

ويهمل الحد الأول العائد لتيار الضلال بالمقارنة مع الحد الثاني (الذي يتولد حرارياً) إلى أن تتجاوز مقاومة الحمل $10^6 \Omega$.

8 - 4 معدلات الخطأ Error Rates

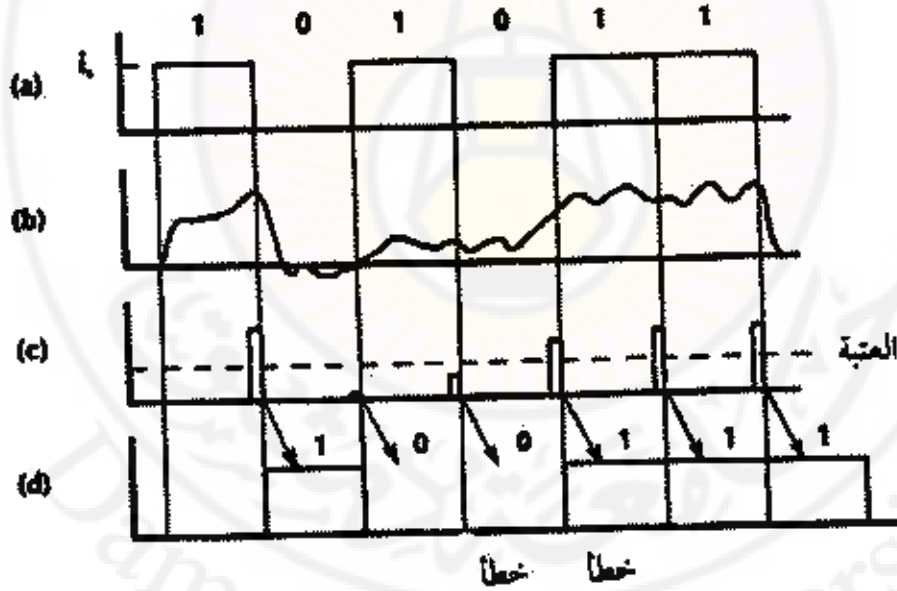
إن شكل الموجة المرسل في الأنظمة التماثلية مهم جداً، وحتى إن مقادير صغيرة من الضجيج تحط من شكل الموجة إلى حد ما، يجب أن يحدد مصمم النظام ما هو مقدار الضجيج المقبول ويضع الـ SNR كبيرة بما فيه الكفاية لكي يضمن إعادة إنتاج الإشارة بالأمانة المطلوبة. ومن جهة أخرى فإننا لا نحتاج أن نحافظ على شكل النبضة الرقمية بدقة، إذ أن المستقبلات الرقمية تحتاج فقط إلى وجود (أو غياب) النبضات خلال فترات معينة، منصف في هذه الفقرة كيف أن الضجيج يدخل أخطاء إلى هذا التحديد.

إن معدل خطأ البتة (BER) الذي هو العدد الجزئي لأخطاء الكشف هو مقياس لجودة النظام الرقمي. فإذا اكتشف خطأ واحد من كل 100 فترار يكون الـ BER مساوياً 0.01. يعني هذا أن فرصة حدوث خطأ خلال فترة أي بتة واحدة يساوي فقط الـ BER . وهكذا إذا كانت $BER = 0.01$ فإن احتمال الخطأ P_e هو 0.01 فالمبارتان: معدل خطأ البتة واحتمال الخطأ قابلتان للتبادل فيما بينهما.

لا يزال وضع تفسير آخر لمعدل الخطأ ممكناً، مع أنه لا يمكننا تقسيم بتة مستقلة أو خطأ مستقل فإن P_e لا تزال تُرى على أنها عدد الأخطاء لكل بتة. من أجل معدل معطيات مقداره R bps فإن عدد الأخطاء بالثانية يساوي $R.P_e$ (حاصل جداء البتات بالثانية بالأخطاء لكل بتة). إذا كانت $P_e = 0.01$ و $R = 1 [Mbps]$ فإنه يوجد 10000 خطأ بالثانية، وقد لا يكون هذا مسموحاً به، إن تغيير P_e إلى 10^{-9} يخفض الأخطاء إلى 0.001 خطأ بالثانية، أو خطأ واحد في كل 1000 ثانية (16.7 دقيقة). إن معدل خطأ مقداره 10^{-9} ملائم لأجل تطبيقات عديدة.

Thermal Noise-Limited Error 1 - 4 - 8
Rate

يوضح الشكل (7-8) كيف أن الضجيج الحراري ينتج أخطاء كشف. يبين الجزء (a) من الشكل التيار المستقبل المثالي (بدون ضجيج)، ويبين الجزء (b) التيار الفعلي مبنياً تأثير الضجيج والترشيح المضاعفين. تؤخذ عينات من هذا التيار قرب نهاية كل فترة بثّة (حيث يبدو أن النبضات في الغالب تصل اتساعاتها العظمى)، وتظهر النتيجة كما في (c). وعند هذه النقطة يقارن اتساع كل عينة بقيمة مرجعية (أو بقيمة عتبة). يقع تيار العتبة في مكان ما بين الصفر والتيار المثالي المتوقع عندما يصل رقم (1) (وهو I_t في الشكل). وإذا تجاوزت العينة العتبة تعالج لاحقاً كـ (1). وإذا كانت العينة أصغر من العتبة فإنها تعامل كـ (0). يبين الجزء (d) من الشكل نموذج المعطيات الناتج.



الشكل (7-8) أخطاء الكشف

(a) تيار مستقبّل مثالي (b) تيار فطّي (c) عينات التيار (d) نموذج المعطيات الناتجة

لننظر بدقة أكثر إلى أسباب التشوه في سلسلة النبضات المتشوهة في الشكل (7-8) -
 (b). عندما يرد (0) لا ينتج متفيل مثالي أي تيار. وفي الحقيقة ينتج الضجيج الحراري وضجيج
 المطلقات لتيار الظلام تيارات عشوائية. يمكن أن يكون تيار الضجيج في المتوسط صغيراً وقد
 يكون كبيراً لدرجة كافية أثناء فترات بعض النبضات ليتجاوز العتبة فيحدث خطأ في هذه الحالة.
 وعندما يصل الـ (1) يكون التيار المثالي ثابتاً (انظر سوية i_s في الشكل (7-8)). وفي
 المستقبل الفعلي يمكن أن يجمع الضجيج إلى التيار المرغوب، ويسبب تخالفهما في الطور يؤدي
 ذلك إلى انخفاض التيار الكلي بعيداً دون سوية العتبة فيحدث خطأ من جديد. يبين الشكل
 أخطاء في كشف كل من الأصفار والواحدات. ومن الواضح أن العتبة لا يمكن أن تكون قريبة
 من الصفر، وقد يزيد هذا عدد الأخطاء عند كشف الأصفار. ولا يمكن أيضاً أن تكون قريبة جداً
 من السوية المثالية i_s حيث ستحدث أخطاء أكثر في كشف الواحدات. وكما يمكن توقعه تكون
 سوية العتبة التي تنتج أقل أخطاء هي نصف التيار المثالي المستقبل عندما يصل (1)، (نضع
 تيار العتبة مساوياً إلى $0.5 i_s$). وهذه هي العتبة المثالية إذا كان الواحدات والأصفار متساويين.
 وهذا هو الحال على الأرجح لمعظم الرسائل. وإذا تغيرت القدرة المستقبلية (مثلاً بسبب تقادم
 المنبع الضوئي) فيجب تحديد العتبة من جديد.

من المفيد أن نوجز أن القرار (0 أو 1) في النظام المحدود بالضجيج الحراري يتخذ
 بمقارنة اتساع تيار الإشارة بسوية عتبة محددة مسبقاً.

وباستعمال عتبة مقدارها $0.5 i_s$ ينتج احتمال خطأ مقداره:

$$p_e = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} [0.354 \sqrt{S/N}] \quad (13-8)$$

حيث: erf هو تابع الخطأ (وهو كمية معروفة جداً ومجدولة).

يبين الجدول (3-8) قيم تابع الخطأ من أجل متحولات تقع بين صفر و 3. أما من أجل متحول أكبر من 3 فإنه يرد في الجدول معادلة تعطي قيمة تقريبية.

x	erf x	x	erf x
0.00	0.00000	1.05	0.86244
0.05	0.05637	1.10	0.88021
0.10	0.11246	1.15	0.89612
0.15	0.16800	1.20	0.91031
0.20	0.22270	1.25	0.92290
0.25	0.27633	1.30	0.93401
0.30	0.32863	1.35	0.94376
0.35	0.37938	1.40	0.95229
0.40	0.42839	1.45	0.95970
0.45	0.47548	1.50	0.96611
0.50	0.52050	1.55	0.97162
0.55	0.56332	1.60	0.97635
0.60	0.60386	1.65	0.98038
0.65	0.64203	1.70	0.98379
0.70	0.67780	1.75	0.98667
0.75	0.71116	1.80	0.98909
0.80	0.74210	1.85	0.99111
0.85	0.77067	1.90	0.99279
0.90	0.79691	1.95	0.99418
0.95	0.82089	2.00	0.99532
1.00	0.84270	2.50	0.99959
		3.00	0.99998

الشكل (3-8) تابع الخطأ

مثال 8 - 7

تستعمل وصلة NRZ $1[Mbps]$ مقاومة حمل مقدارها 100Ω عند $300^{\circ}K$. يبلغ طول الموجة $0.82[\mu m]$ ومعدل الخطأ المرغوب 10^{-4} ، وكفاءة الكم للكاشف PIN تساوي الواحد. احسب القدرة البصرية الواردة على الكاشف الضوئي والتيار الضوئي وعدد الفوتونات الواردة لكل بتة.

الحل:

نجد من الشكل (8-8) أن معدل خطأ مقداره 10^{-4} يتطلب $S/N = 17.5[dB]$ أي: $S/N = 56.2$. ويحل المعادلة من أجل القدرة الواردة ينتج أن:

$$P = (hf / \eta e) \sqrt{(4KT \Delta f / R_L)} \sqrt{(S/N)}$$

إن التردد البصري هو $f = c/\lambda = 3.66 \times 10^{14} [Hz]$ وزمن دوام النبضة هو: $\tau = 10^{-6} [s]$. سنضع عرض مجال المستقبل بتحفظ عدد: $\Delta f = 1/\tau = 10^6 [Hz]$. لكتب حينئذ:

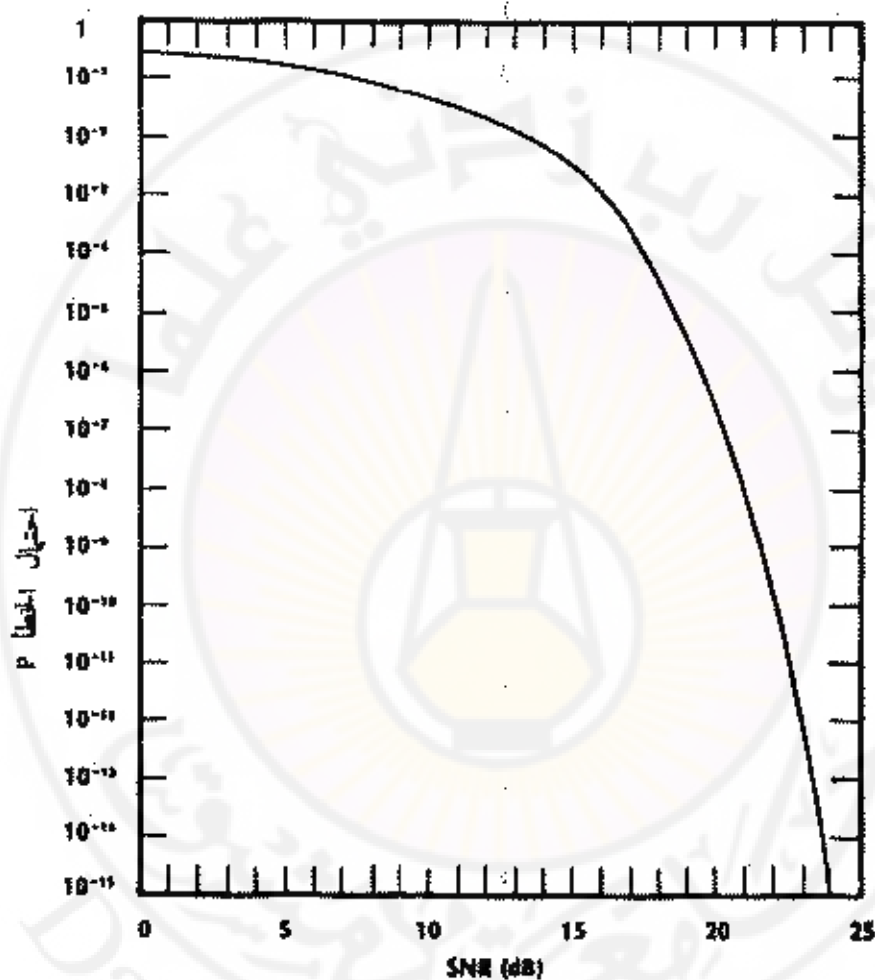
$$P = \frac{6.63 \times 10^{-34} (3.66 \times 10^{14})}{1.6 \times 10^{-19}} \sqrt{\frac{4(1.38 \times 10^{-23})(300)10^2}{100}} \times \sqrt{56.2}$$

$$P = 1.46 \times 10^{-7} [W] = 146 [nW]$$

وهذه هي القدرة البصرية الواردة المطلوبة من أجل $BER = 10^{-4}$. إن التيار المكشوف هو: $i = \eta e P / hf = 96.4 [nA]$. وعدد الفوتونات الواردة بالثانية هو P/hf . وهكذا يكون عدد الفوتونات الواردة في فترة البتة τ هو: $n_p = (P/hf)\tau$. وفي هذا المثال يكون:

$$n_p = \frac{-146 \times 10^{-9} (10^{-6})}{6.63 \times 10^{-34} (3.66 \times 10^{14})} = 6 \times 10^5 [photons/bit]$$

يتطلب الأمر عدداً كبيراً من الفوتونات لتحقيق معدل خطأ مقداره 10^{-4} في نظام محدد بالضجيج الحراري.



الشكل (8-8) احتمال الخطأ للنظمة المحدودة بالضجيج الحراري



الفصل التاسع

تصميم أنظمة الاتصالات البصرية

Fiber Optic System Design

سنناقش في هذا الفصل مقدمة عن موضوع تصميم أنظمة الاتصالات باستخدام الألياف البصرية حيث إن هذا الموضوع واسع وكثير التشعب، لكن وبناء على المعلومات السابقة التي درسناها حول المكونات الأساسية للنظام سنقدم وبشكل مختصر ومبسط كيفية تصميم خط بصري لتشكيل نظام اتصال .

إن أهم مرحلة في عملية التصميم هو اختيار المكونات .

9 - 1 اختيار المكونات *Component Selection*

هناك العديد من العوامل التي يجب أخذها بعين الاعتبار عند تصميم أنظمة الاتصالات، ففي حالة النظام التماثلي يجب معرفة عرض المجال *Bandwidth*، ومعدل التشويه *Distortion* بالنسبة للإشارة للضجيج المطلوبة *Signal to Noise Ratio*. أما في حالة النظام الرقمي فيجب معرفة سرعة الإرسال بالبتات في الثانية الواحدة *Bit Rate per Second* ومعدل خطأ البتات *Bit Rate Error* المسموح به.

في حالة نظام الاتصالات البصري يجب مراعاة الأمور التالية:

- نوع الإرسال: تماثلي أو رقمي.
- قيمة القدرة المطلوبة.
- المسافة الكلية بين المرسل والمستقبل.

- سرعة البث أو عرض المجال المطلوب.
- تخامد الخط.
- نوع الكبل.
- نوع الليف.
- الوصلات البصرية.
- اللحام.
- المنبع والكاشف الضوئي.

9 - 1 - 1 Light Source المنبع الضوئي

هناك نوعان رئيسيان من المنابع الضوئية التي تستخدم في جهاز الإرسال في أنظمة الاتصالات البصرية: الثنائي الباعث للضوء (LED) والثنائي الليزري (LD). في الحالتين يجب معرفة الأمور التالية:

- تيار التشغيل الأمامي (I_F) والجهد المصاحب (V_F).
- الطول الموجي المنبعث (λ).
- عرض الطيف (σ_λ).
- قدرة الخرج (P_{out}).
- زمن الصعود (t_r) والهبوط (t_f).

الثنائي الليزدي LD

الإيجابيات:

- قدرة خرج عالية.
- عرض طيف صغير جداً.
- قيمة صغيرة لتشتت المادة.
- زمن استجابة قليل مما يجعلها سريعة جداً.

السلبيات:

- تتطلب جهد انحياز أعلى.
- تكلفة عالية.

الثنائي الباعث للضوء LED

الإيجابيات:

- تكلفة قليلة.
- جهد انحياز أقل.
- البساطة في التصنيع.
- اعتمادية (وثوقية) أعلى.

- قلة التأثير بدرجة الحرارة.
- بساطة الدوائر الالكترونية اللازمة للتشغيل.
- العلاقة الخطية بين القدرة والتيار.

9 - 1 - 2 الليف البصري *Optical Fiber*

يعدّ الليف البصري المكوّن الأساسي للنظام وعند اختياره يجب مراعاة الأمور التالية:

- عرض المجال.
 - التخامد بالديسبل لكل كيلو متر $[dB/km]$.
 - التطبيق اللازم.
 - الطول الموجي العامل.
 - فتحة النفاذ العددية.
 - قوة الشد.
 - نصف قطر الانحناء المسموح به.
 - التشبّث النمطي (الداخلي).
- هنالك نوعان رئيسيان من الألياف: أحادي النمط ومتعدد النمط، وكلاهما يمكن أن يكون من النوع العنقي أو التدريجي وبمقاسات معينة ومعتمدة.

الليف أحادي النمط *Single Mode*

الإيجابيات

- يتميز الليف الأحادي بأن لديه أكبر عرض مجال ممكن مما يتيح إرسال المعلومات بأقصى سرعة ممكنة.
- يتوفر على الطول الموجي $1300[nm]$ و $1550[nm]$.
- يوفر إمكانية إنشاء خطوط اتصال بعيدة المدى وبأقصى مسافة بين محطات التقوية وإعادة البث.

السلبيات

- صعوبة التعامل مع الليف أحادي النمط وخاصة في موضع اللحام (*Splicing*) وتركيب الوصلات (*Termination*).
- الحاجة إلى مصادر ضوئية ذات مواصفات عالية من حيث العرض الخطي الذي يجب أن يكون صغيراً جداً (الأنسب هو الليزر أحادي النمط).
- التكلفة العالية نسبياً.

الليف متعدد النمط *Multi Mode*

الإيجابيات

- تكلفة أقل.
- تعدّ مناسبة وقياسية للشبكات المحلية (*LAN Networks*).

- لا تحتاج إلى أجهزة ضوئية (مصادر وكواشف) غالية الثمن.

- السهولة في الربط والتوصيل.

- السهولة في موازنة إجراءات التوصيلات مما يقلل الفقد.

تبقى الألياف متعددة النمط بمواصفات أقل كفاءة من أحادية النمط، ولذلك لا تستخدم في أنظمة الاتصالات بعيدة المدى وذات السرعة الفائقة.

9 - 1 - 3 الكبل البصري *Fiber Optic Cable*

كما أشرنا سابقاً، تصنع الألياف البصرية وترتّب داخل الكبل، ويختلف عددها حسب سعة الكبل. عند اختيار الكبل يراعى الأمور التالية:

- نوع الكبل ويعتمد ذلك على نوع التطبيق .

- عدد الألياف .

- نصف قطر الانحناء المسموح به.

- عناصر التقوية والحماية .

- وزن الكبل بالكيلو جرام لكل كيلو متر (kg/km) .

9 - 1 - 4 الكاشف البصري *Optical Photodetector*

كما أشرنا في الفصل الثاني هنالك أكثر من نوع من الكواشف الضوئية، لكن أكثرها استخداماً في أنظمة الاتصالات البصرية نوعان: الثنائي من نوع *P-I-N* والثنائي الجرفي من نوع *APD*. في كل الحالات تجب معرفة ومراعاة الأمور التالية:

• حساسية جهاز الاستقبال (*Receiver Sensitivity*).

• سرعة إرسال البيانات (البتات).

• جهد الانحياز العكسي بالفولت.

• زمن الصعود والهبوط.

يتميز الثنائي من نوع *P-I-N* بسرعه العاليه وانخفاض مستوى الضجيج له، لكن حساسيته أقل من النوع *APD*. يتميز الثنائي *APD* بحساسيته العاليه وذلك بسبب التكبير الداخلي لكنه ذو سرعة عمل أقل ومستوى ضجيج عالي.

9 - 2 ميزانية الخط البصري *Optical Link Budget*

تعد عملية إيجاد ميزانية الخط البصري أو ما يسمى ميزانية القدرة *Power Budget* من أهم مراحل التصميم وتعرف بأنها جدولة جميع أنواع الفقد (كذلك التكبير من وجد) على امتداد خط الاتصال البصري. هنالك مجموعة مسببات للفقد منها الليف نفسه، والوصلات، واللحام، والمخمدات، ومعدات *WDM* الخ.

كذلك تتضمن الميزانية القدرة الخارجة من المصدر، وحساسية المستقبل، وقيمة القدرة الواصلة لمستقبل. ولتوضيح طريقة عرض ميزانية القدرة لخط الاتصال، نقدم المثال التالي:

أ- فقد الليف البصري على الطول الموجي $1300[nm]$ وطول $15.5[km]$ بمعدل فقد

$$0.35[dB/km] \quad 5.4[dB]$$

ب- فقد اللحام:

نقطتي لحام بمعدل $0.1[dB]$ لكل نقطة لحام $0.2[dB]$

ت- فقد التوصيل:

وصلتين بمعدل $0.5[dB]$ للوصلة الواحدة $1.0[dB]$

ث- أنواع أخرى من الفقد $0.0[dB]$

ج- احتياطي التصميم $2.0[dB]$

ح- إجمالي فقد الخط $8.6[dB]$

خ- متوسط قيمة القدرة الخارجة من المرسل $-10[dBm]$

د- القدرة على مدخل المستقبل (د - خ) $-18.6[dBm]$

ذ- المدى الحركي للمستقبل $-10[dBm]$ to $-25[dBm]$

ر- حساسية المستقبل على معدل خطأ 10^{-9} $-25[dBm]$

ز- الاحتياطي المتبقي (د - ر) $6.4[dB]$

لغرض الفائدة نقدم نفس المثال باللغة الانكليزية :

a- Optical fiber loss at $1300[nm]$: $15.5[km]$ length at $0.35[dB/km]$.

b- Splice loss: 2 splices at $0.1[dB/splice]$ $0.5dB$

c- Connection loss: 2 connections at $0.5[dB/connection]$ $1.0[dB]$

d- Other component loss $0.0[dB]$

e- Design margin $2.0[dB]$

f- Total link loss	8.6[dB]
g- Transmitter average output power	-10[dBm]
h- Receiver input power:	-15.6[dBm]
(g-f)	-18.6[dBm]
i- Receiver dynamic range	-10 to -25[dBm]
j- Receiver sensitivity at BER 10^{-9}	-25[dBm]
k- Remaining margin (h-j)	6.4[dB]

9 - 3 إجراءات التصميم Design Procedure

قبل البدء بعملية التصميم يجب تجميع وتحضير البيانات حول جميع المكونات اللازمة للتصميم. هنالك عاملان أساسيان يجب أخذهما بعين الاعتبار: الأول وهو الفقد الإجمالي للخط والذي تحدده ميزانية القدرة للخط، والثاني وهو القيمة القصوى لعرض المجال التي تحدد السرعة القصوى لإرسال البيانات في النظام الرقمي.

طريقة التصميم

1- الحصول على المعلومات التالية من بيانات الجهات الصانعة (انظر الجدول (9-1)):

- قطر الليف.
- معامل التخميد للليف.
- فتحة النفوذ العددية للليف.

- عرض المجال لليف (MHz/km) على الطول الموجي العامل.

- الطول الأقصى لليف.

- الفقد الأقصى للأجهزة المستخدمة.

إذا لم تعط قيمة الفقد للأجهزة في المواصفات يمكننا حسابها كالآتي :

القيمة الوسطى للفقد = القيمة المتوسطة للقدرة الخارجة من المرسل مطروحاً منها

حساسية المستقبل

2- من مخطط التركيبات، يتم إيجاد:

- الطول الكلي للكبل.

- عدد نقاط اللحام اللازمة للفقد في كل نقطة.

- عدد الوصلات المطلوبة والفقد في كل وصلة.

- احتياطي التصميم.

- الفقد الناتج عن أي مكونات أخرى في النظام.

3- إكمال ميزانية القدرة حسب المثال السابق.

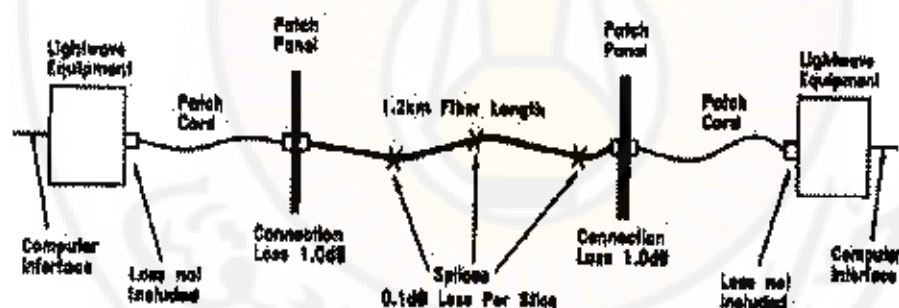
4- الاحتياطي الباقي يجب أن يكون أكبر من صفر لضمان الحصول على تصميم مناسب.

الترتيب Number	نوع الليف Fiber Type [μm]	توهين الليف Fiber Attenuation [dB/km]	قيمة العتبة الحدية Fiber NA	عرض النطاق التردد Fiber Bandwidth [MHz $\times$ km]	القيمة القصوى للخسارة Maximum Loss [dB] at 850 nm	الحد الأقصى للطول Maximum Length [km]
1	50 / 125	3.0	0.2	50	2.0	0.6
2	50 / 125	2.7	0.2	50	2.0	0.7
3	62.5 / 125	3.5	0.29	50	5.0	1.4
4	62.5 / 125	3.0	0.29	50	5.0	1.6
5	100 / 140	5.0	0.29	50	9.5	1.5
6	100 / 140	4.0	0.29	50	9.5	1.8

جدول (1-9) بيانات ومعطيات لبعض أنواع الألياف البصرية

مثال 9 - 1

يلزم تصميم خط اتصال بصري لربط جهازي حاسب انظر (الشكل 1-9) تفصلهما مسافة $1.2[\text{km}]$ ، علماً بأنه يلزم ثلاث نقاط لحام لربط وتوصيل الكبل.



الشكل (1-9)

الحل:

- 1- من الجدول (1-9) نقوم باختيار الليف (62.5/125) أو (100/140) وذلك لأن المسافة المطلوبة $1.2[\text{km}]$ لا تتحقق إلا بهذين النوعين. سوف نقوم باختيار الأول منهما (رقم 4 من الجدول).

2- من مخطط التركيبات نحصل على:

- الطول الكلي للخط $1.2[km]$.
- عدد الوصلات اللازم 2.
- عدد نقاط اللحام اللازم 3.
- الفقد الناتج عن مكونات أخرى: لا يوجد.

3- ميزانية القدرة:

- فقد الليف على الطول الموجي $850[nm]$:
 $1.2[km]$ بمعدل $3[dB/km]$ $3.6[dB]$
- فقد اللحام: 3 نقاط بمعدل $0.1[dB]$ لكل نقطة $0.3[dB]$
- فقد التوصيل: وصلتين بمعدل $1[dB]$ لكل وصلة $2.0[dB]$
- الفقد بسبب المكونات الأخرى $0.0[dB]$
- احتياطي التصميم $2.0[dB]$
- الفقد الإجمالي للخط $7.9[dB]$

4- بالرجوع للجدول (9-1) نجد أن المجموع الإجمالي للفقد يفوق الحد $(5[dB])$ المسموح به لليف الذي تم اختياره، وبالتالي سوف يكون الاحتياطي الباقي سالباً أي - $2.9[dB]$ وهذا لا يجوز. لذلك يجب اختيار ليف آخر.

سوف نختار الليف رقم 6، وبعد إعادة الخطوات السابقة نجد أن الفقد الإجمالي يساوي $9.1[dB]$ وهذا الرقم أقل من المسموح به، وبالتالي سيكون الفرق موجباً، وهذا اختيار سليم.

ملاحظة:

في كل حالات الاختيار يجب أن يحقق الليف شرط الطول المطلوب.

مثال 9 - 2

لديك نظام اتصالات بصري بالمعطيات التالية:

- قطر قلب الليف $80[\mu m]$ (d).
 - معامل التخماد $5[dB/km]$ (α).
 - القدرة الداخلة $-16[dBm]$ (P_{in}).
 - حساسية المستقبل $-30[dBm]$ (P_r).
 - فقد الوصلة $1.5[dB]$ (A_c) (يلزم وصلتين).
 - احتياطي التسميم $5[dB]$ (M).
- (أ) أوجد طول الخط بالكيلو مترات.
- (ب) ارسم تغير القدرة بالاعتماد على الطول.

الحل:

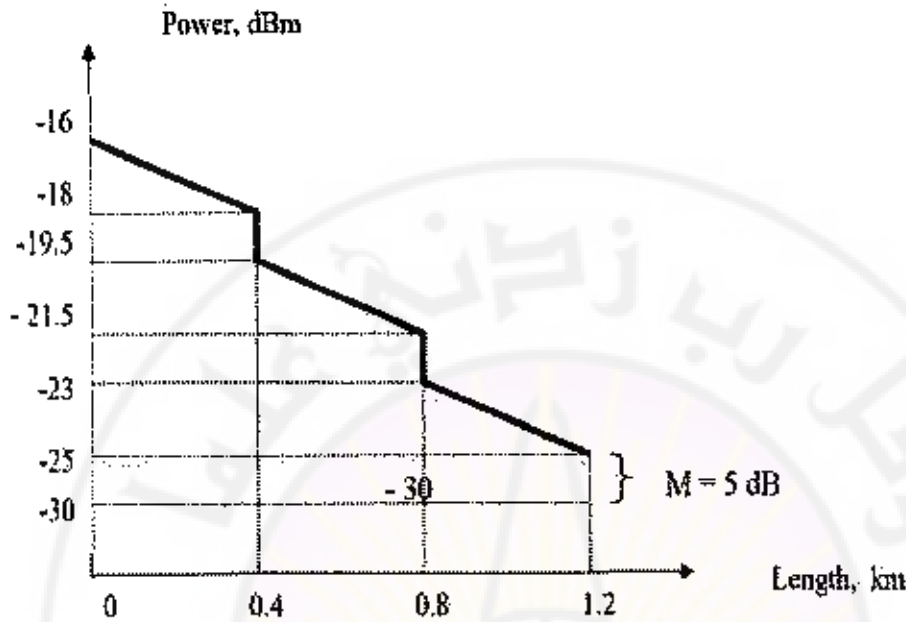
لإيجاد طول الخط نستخدم العلاقة التالية :

$$M = P_{in} - \alpha \cdot L - 2A_c - P_r$$

$$5[dB] = -16[dBm] - \alpha L - 2 \times 1.5 - (-30[dBm])$$

$$\alpha L = 6[dB] \implies L = 6[dB] / 5[dB/km] = 1.2[km]$$

تتغير قيمة القدرة ابتداءً من بداية الخط وحتى نهايته حسب الشكل أدناه :



9 - 4 المكونات الخاملة Passive Components

يمكننا تقسيم مكونات أنظمة الاتصالات البصرية إلى مجموعتين أساسيتين: الأولى المكونات الخاملة أو السلبية (*Passive Components*) وهي المكونات التي لا تحتاج إلى قدرة كهربائية لتشغيلها، حيث تستخدم بشكل واسع في شبكات اتصالات الألياف البصرية. والثانية المكونات الفعالة (*Active Components*) وهي المكونات التي تحتاج قدرة كهربائية لتشغيلها وأصبحت ضرورية للتطبيق في أنظمة الاتصالات البصرية ذات المواصفات العالية. درسنا لغاية الآن مجموعة من المكونات التي تعد أساسية في أي نظام اتصالات بصري منها الألياف، والوصلات، والمضخمات، وأدوات اللحام، غير أن هنالك مكونات أخرى نلجأها أدناه:

مكونات تجميع القنوات بالتقسيم الطول الموجي *WDM Components*

هناك مكونات أخرى غير المجمعات تستخدم في تقوية تجميع القنوات بالتقسيم الطول الموجي والتي تعرف بـ (Wavelength Division Multiplexing) ويرمز لها اختصاراً (WDM) أهمها:

- مضاعف الإرسال *Multiplexer*

يقوم بتجميع قنوات الاتصال على أطوال موجات مختلفة، ومن ثم إرسالها عبر ليف واحد مما يساعد في استغلال عرض النطاق الترددي للليف بأفضل ما يمكن.

- مزيل مضاعف الإرسال *Demultiplexer*

يقوم بتوزيع أطوال الموجات القادمة من الليف إلى ألياف فرعية حسب العنوان لكل منها، وبذلك يقوم بعكس عمل مضاعف الإرسال.

- الموجّه *Router*

يقوم الموجّه بتوجيه طول موجي معين حامل للمعلومات عبر ليف بصري معين بينما يقوم بتوجيه بقية الأطوال الموجية عبر الألياف الأخرى.

- مضاعف الإرسال من نوع *Add / Drop Multiplexer*

يتميز هذا المضاعف بأن له إمكانية إضافة أو إزال قناة اتصال (Channel) أو حزمة من البتات (Bit Stream) فرعية بسرعة معينة في مواقع ونقاط محددة.

- المرشحات *Filters*

تقوم بالسماح بإرسال طول موجي معين أو منعه ويقوم بالانعكاس مع بقية الأطوال الموجية وعادة ما يستخدم في جهة الاستقبال، ويقوم بوظيفة مزيل مضاعف الإرسال.

- المخمدات *Attenuators*

تقوم بتخفيض مستوى القدرة للضوء الواصل إلى المستقبل حتى لا يحصل له حمل زائد (*Overload*)، وذلك بناء على معطيات ومواصفات المستقبل. عادة ما يقوم مبدأ عمل المخمدات على امتصاص الجزء الزائد من الضوء بنسبة معينة يحددها المصنّع.

- العوازل البصرية *Optical Isolators*

وهي عبارة عن معدات تسمح للضوء بالانتشار في اتجاه واحد وتمنعه في الاتجاه المعاكس. تؤدي العوازل البصرية دوراً مهماً في أنظمة الاتصالات البصرية التي تستخدم الليزر، وذلك لمنع الضوء المنعكس من الوصول لليزر الذي يمكن أن يتسبب في خلل عمل الليزر.

9 - 5 المكونات الفعالة *Active Components*

يستخدم العديد من المكونات الفعالة في أنظمة الاتصالات البصرية لحديقة نذكر

أهمها:

- التعديل وأجهزة التعديل *Modulation and Modulators*

كما هو معروف فإن عملية التعديل تعدّ أساسية في أي نظام اتصال، وفي أنظمة الاتصالات البصرية لا بد من طريقة سهلة وفعالة لتعديل الضوء وذلك لجعله يحمل المعلومات

المواد إرسالها. في حالات سرعات الإرسال المتوسطة يعتبر التعديل المباشر (*Direct Modulation*) الأنسب للتطبيق وذلك عن طريق تغيير تيار الحقن *Injection Current* الداخل عليه سواء في حالة الليزر أو الثنائي الباعث للضوء (*LED*) وعلى سرعات البث والإرسال العالية جداً (حوالي $1[Gbit/s]$) يصبح التعديل المباشر غير مناسب للأسباب التالية:

- محدودية القدرة الخارجة (*Limited output Power*)
- محدودية سرعة التعديل (*Limited Modulation Speed*)
- محدودية العلاقة بين القدرة في حالة الصفر واحد (*On - Off Ratio*)
- التأثيرات الخطية (*Nonlinear Effects*)
- الإزاحة الترددية (*Frequency Chirp*)

في هذه الحالة ونتيجة للأسباب السابقة الذكر يجب استخدام جهاز تعديل منفصل عن المصدر الضوئي حيث تسمى هذه الطريقة بالتعديل الخارجي *External Modulation* , أكثر الأنواع انتشاراً هو جهاز التعديل الكهروضوئي *Elector-Optical Modulator*.

- المفاتيح البصرية *Optical Switches*

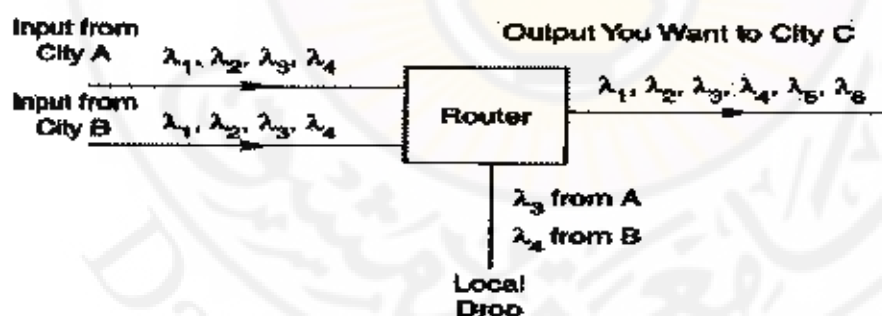
تقوم المفاتيح البصرية أو ما يسمى أدوات التبديل بتوجيه وإعادة توجيه الإشارات البصرية، حيث تلزم لغاية التكيّف مع الأوضاع المتغيرة للنظام. في الواقع العملي يتم تنفيذ وتصنيع المفاتيح بشكل الكتروني للسهولة وقلة التكاليف، لكن وفي نفس الوقت يتم تطوير المفاتيح البصرية التي تعمل على سرعات إرسال عالية جداً. تتمثل وظائف المفاتيح البصرية في الأمور التالية:

- استعادة مسار الإرسال وتغييره (*Route Restoration*) في حالات أعطال الكبل.

- تغيير هيكلية الشبكة (Changing Configuration).
- التبديل الديناميكي للكتل الكبيرة من الحركة *Dynamically Switching Large blocks of Traffic*.
- إدارة أطوال الموجات في أنظمة WDM *Wavelength Management in WDM systems*.
- إن أهم ما يميز المفاتيح الكهربائية هو عدد المدخلات (Inputs) والمخارج (Outputs).

- محولات الطول الموجي Wavelength Converters

وهي عبارة عن معدات خاصة تقوم بتحويل بعض أطوال الموجات العاملة إلى أطوال موجات أخرى محددة مسبقاً (انظر الشكل 9-3) حيث تم تصميمها لأنظمة الاتصالات البصرية ذات تجميع القنوات، بتقسيم الطول الموجي (WDM System).



الشكل (9-3) مبدأ تحويل الطول الموجي

هناك مكونات أخرى مساعدة مثل الجلّ الخاص (Index Matching Gel) والبكرات التي عليها الليف (Fiber Roles).

أسئلة وتمارين

تمرين 1:

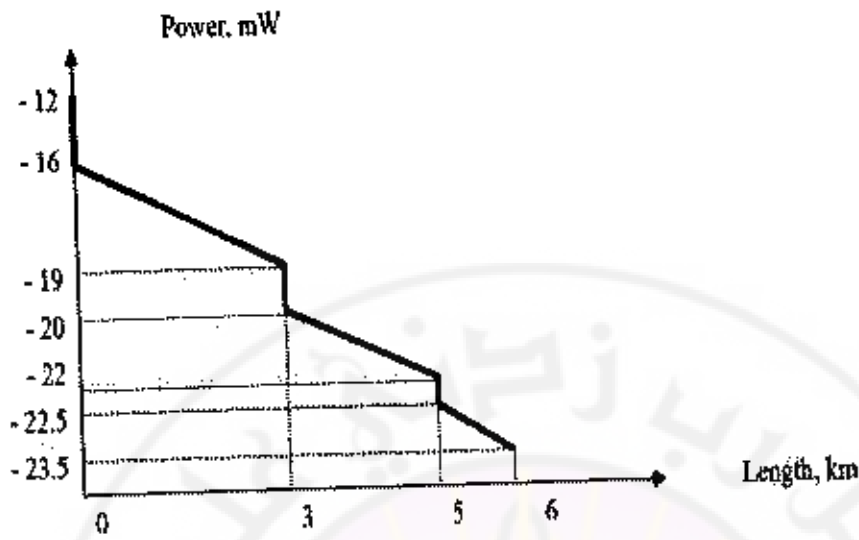
لديك نظام اتصالات بصري بالمواصفات والمعطيات التالية :

- قطر لب الليف $62[\mu m]$.
 - معامل التخميد لليف $1[dB/km]$.
 - القدرة الداخلة على الليف $-10[dBm]$.
 - حساسية المستقبل $-40[dBm]$.
 - طول الكبل على البكرة $5[km]$.
 - طول الخط الإجمالي $22[km]$.
 - فقد اللحام $1[dB]$ لكل نقطة لحام.
- ارسم تغير مستوى القدرة مع تغير الطول.

تمرين 2 :

بالرجوع إلى الشكل المرسوم أدناه الذي يمثل توزيع مستوى القدرة لليف معين بالاعتماد على الطول أوجد:

- (أ) الفقد الكلي للخط.
- (ب) معامل التخميد لليف.
- (ت) فقد إيصال الضوئ من المصدر لليف.



تمرين 3

لديك نظام اتصالات بصري بالمعطيات التالية:

- سرعة إرسال البتات 155 [Mbit/s] .
- نصف قطر لب الليف $25 \text{ [\mu m]}$.
- معامل التخميد 0.7 [dB/km] .
- القدرة الداخلة على الليف 0 [dBm] .
- احتياطي التصميم 5 [dB] .
- طول الليف 6 [km] .
- عدد نقاط اللحام 3 بفقد يساوي 0.5 [dB] لكل نقطة.

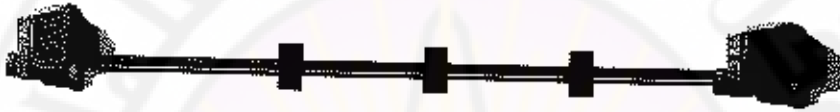
أوجد:

حساسية المستقبل.

- (ب) الفقد الإجمالي للخط.
(ت) ارسم تغير مستوى القدرة مع تغير الطول.

تمرين 4

قم بتصميم خط اتصال بصري لربط جهازي حاسب على مسافة $1[km]$ وسرعة إرسال $34[Mbit]$ حيث يتوفر لديك أربع بكرات من الليف البصري بطول $250[m]$ للبكرة الواحدة، علماً بأن فقد الوصلة الواحدة $0.5[db]$ (يمكنك الرجوع للجدول 9-1).



تمرين 5

لو فرضنا أنه تم استبدال الليف في التمرين السابق (تمرين 4) بأخر طوله $1[km]$ قم بتصميم الخط في هذه الحالة.



الفصل العاشر

القياسات والفحوصات في أنظمة الاتصالات البصرية

Fiber-Optic Measurements and Testing

تعدّ القياسات والفحوصات من العمليات الأساسية والمهمة في نظم الاتصالات بشكل عام، حيث تبدأ الفحوصات للليف البصري في مرحلة التصنيع للتأكد من جميع الشروط اللازمة لتصنيع الليف بشكل صحيح. هنالك مجموعة من القياسات التي يجب إجراؤها للليف منها، معامل التخميد (α)، التشقّيت، عرض النطاق (BW)، فتحة النفوذ العددية (NA)، قطر مجال النمط (MFD)، طول موجة قطع (λ_c)، قوة التحمل ... الخ.

سوف نقوم بتقسيم القياسات إلى قسمين: القياسات باستخدام جهاز قياس القدرة، والقياسات باستخدام جهاز *OTDR*.

Power Meter Measurements 10 - 1 القياسات باستخدام جهاز القدرة

تعدّ قياسات القدرة من القياسات المهمة والضرورية في أنظمة الاتصالات البصرية حيث يعتبر جهاز القدرة أساسياً لإجرائها ومن هنا جاءت التسمية. إن الهدف الرئيس لهذه القياسات هو قياس القدرة في مختلف نقاط النظام والفقد للخط والمكونات الأخرى الداخلة في تشغيل النظام. لإجراء هذه القياسات يلزمنا استخدام الأجهزة والمعدات التالية:

Optical Power Meter جهاز قياس القدرة

- يجب أن يتمتع بالمميزات التالية:
- أن يعمل على الطول الموجي المناسب

- أن يتناسب مع الألياف أحادية أو متعددة النمط
- أن تكون قرامته بوحدة الديسبل (dB & dBm)
- أن يتمتع بدقة عالية (± 0.1 dB)
- أن يكون ذا مخارج تتناسب مع الوصلات المستخدمة

المنبع الضوئي *Light Source*

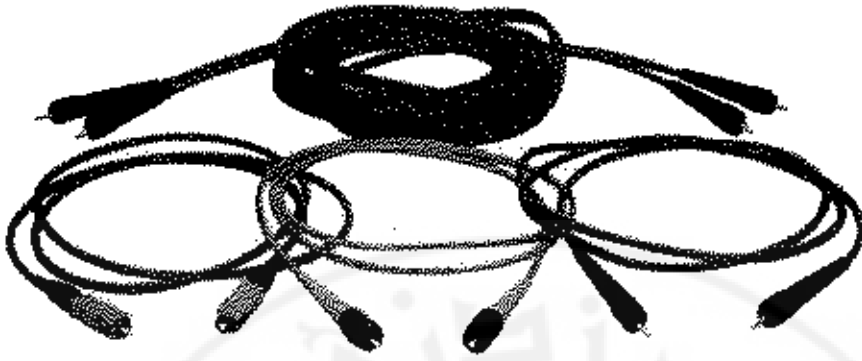
يفضل استخدام الليزر كمنبع ضوئي ويجب أن يتمتع بالمميزات التالية:

- أن يكون ذا استقرارية عالية
- أن يعمل على الطول الموجي المناسب
- أن يتناسب مع الألياف أحادية أو متعددة النمط
- أن يكون ذا مخارج تتناسب مع الوصلات المستخدمة
- أن يكون ذا قدرة خرج عالية نسبياً

وصلات القياس *Test Patch Cords*

من الضروري وجود وصلات القياس لربط الأجهزة مع الليف التي هي عبارة عن ألياف بصرية من مختلف الأنواع (الشكل 10 - 1)، وذلك حسب نوع الليف المراد التوصيل له. يجب توافر الشروط التالية عند اختيار واستخدام تلك الوصلات:

- يلزم وصلتين على الأقل بطول يتراوح من متر إلى خمسة أمتار.
- أن تكون من نوعية عالية الجودة ذات فقد معدوم ومثبتة من الجهة الصانعة.
- أن تتناسب نهاياتها الطرفية مع الوصلات المستخدمة.
- أن تكون بنفس مواصفات ومقاسات الليف المراد وصلها معه.



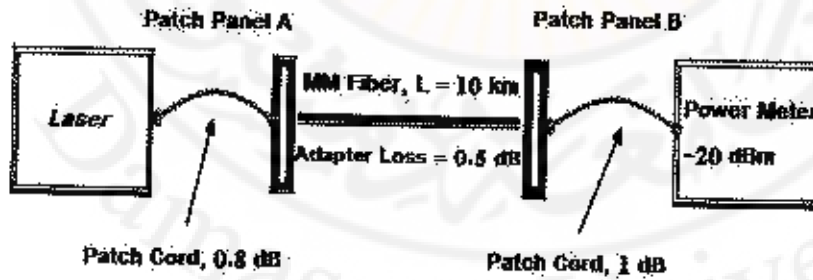
الشكل (10 - 1) وصلات القياس

وصلة المحول *Adaptor*

تتطلب وصلة المحول كأداة توليف بين وصلة القياس والليف حيث يلزم اشتتان من نوعية جيدة ومتناسبة مع أشكال ومقاسات الوصلات المستخدمة

أدوات ومعدات التنظيف *Cleaning Kit*

من الضروري القيام بتنظيف الوصلات والنهايات الطرفية للليف قبل القيام بعملية القياس، وذلك باستخدام محاليل وأدوات خاصة. وكمثال على ربط الأجهزة السالفة الذكر وتوصيلها، نقدم المثال التالي (الشكل 10-2).



الشكل (10 - 2) توصيل الأجهزة القياس فقد الخط

بناءً على القراءات الموجودة يمكننا حساب فقد الخط (الليف) للكيلومتر الواحد على النحو التالي:

$$\text{Total Link Loss} = \text{Laser Output} - \text{Power Meter Reading}$$

$$= -5[\text{dBm}] - (-20[\text{dBm}]) = 15[\text{dB}]$$

$$\text{Fiber Loss} = \text{Total Link Loss} - \text{Patch Cord Loss} - \text{Adapter Loss}$$

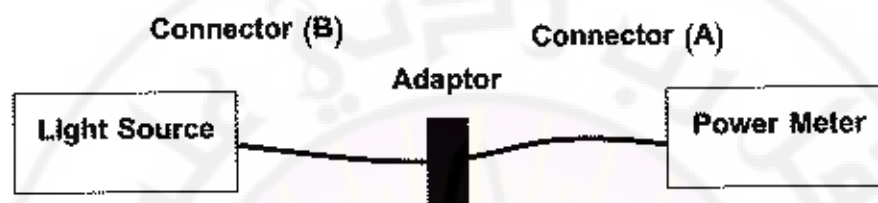
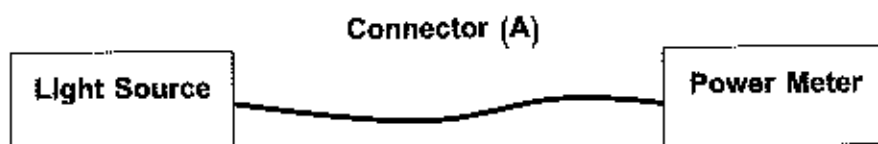
$$= 15[\text{dB}] - 0.8[\text{dB}] - 1[\text{dB}] - 0.5[\text{dB}] - 0.5[\text{dB}] = 12.2[\text{dB}]$$

$$\text{Fiber Loss per km} = 12.2[\text{dB}] / 10[\text{km}] = 1.22[\text{dB/km}]$$

10 - 2 فقد وصلات القياس Patch Cord Losses

قبل البدء بعملية القياس يجب التأكد من معرفة فقد وصلات القياس، حيث إنه في حالة عدم توفر ذلك يجب القيام بقياس الفقد وفقاً للطريقة التالية (الشكل 10-3):

- 1- تنظيف جميع الوصلات (Connectors) المستخدمة.
- 2- تشغيل جهاز قياس القدرة والمنبع الضوئي مع مراعاة شروط السلامة عند التعامل مع الليزر.
- 3- تثبيت جهاز قياس القدرة على وضعية تدرج dBm، ومن ثم توصيل وصلة القياس الأولى (A) للحصول على قراءة مرجعية (Reference Reading) التي سنرمز لها $P_{ref} \text{ (dBm)}$. بعد ذلك يعاد جهاز قياس القدرة إلى تدرج dB مع تصفير الشاشة وحفظ هذه الوضعية.
- 4- توصيل وصلة القياس الثانية (B) بين المنبع الضوئي والوصلة الأولى (A).
- 5- تسجيل قراءة جهاز قياس القدرة بوحدة الديسبل التي سنرمز لها $L \text{ (dB)}$ والتي ستكون فقد الوصلة (B).



الشكل (10 - 3) طريقة قياس فقد وصلات القياس

6- في حالة كون جهاز قياس القدرة لا يحتوي على تدريج dB يمكننا إيجاد الفقد للوصلة (B) حسب العلاقة التالية:

$$L_{(dB)} = P_{ref}(dBm) - P_{meter}(dB) \quad (1-10)$$

حيث ترمز $P_{meter}(dB)$ إلى قراءة جهاز قياس القدرة في الخطوة الخامسة بوحدة dBm . لقياس فقد الوصلة (A) نقوم بعكس الترتيب ابتداء من الخطوة الثالثة.

10 - 3 قياس فقد خط الليف البصري Fiber Optic Link Loss Measurement

بعد هذا الفحص من أهم القياسات التي يتم إجراؤها في أنظمة الاتصالات البصرية حيث يجب القيام به لجميع الألياف الموجودة داخل الكيبل حيث يلزم شخصان للقيام بذلك على أن يكون بينهما وسيلة اتصال للتسيق وإتمام عملية القياس. تتلخص خطوات هذا الفحص على الشكل التالي:

- 1- تنظيف جميع الوصلات (*Connectors*) المستخدمة.
- 2- تشغيل جهاز قياس القدرة والمنبع الضوئي مع مراعاة شروط السلامة عند التعامل مع الليزر.
- 3- تحديد الليف أو الألياف المراد فحصها والقيام بفحص جميع الأجهزة العاملة على الخط المعني قبل البدء بفحصه.
- 4- يجب تثبيت قراءة مرجعية أولية قبل البدء بعملية القياس، وذلك للأخذ بعين الاعتبار فقد وصلات القياس حيث يتم توصيل الوصلتين *A* و *B* كما في الشكل (10 - 2) فرع ب، بعدها يجب أخذ قراءة جهاز القدرة واعتبارها قراءة مرجعية ($P_{ref}(dBm)$).
- 5- توصيل المنبع الضوئي وجهاز قياس القدرة إلى الليف المراد فحصه، وذلك عن طريق وصلات القياس من الطرفين.
- 6- تشغيل المنبع الضوئي، ومن ثم أخذ قراءة جهاز قياس القدرة في الطرف الآخر وتسجيلها P_{meter} . يقوم الجهاز بحساب قيمة الفقد وإظهارها بوحدة الديسبل (dB). أما إذا كان الجهاز بدون تدرج الديسبل، فإنه يمكننا حساب فقد الخط كالآتي:

$$L (dB) = P_{ref}(dBm) - P_{meter}(dB)$$

- 7- إعادة الخطوات السابقة لفحص بقية الألياف الموجودة داخل الكيبل.

10 - 4 قياس فقد الانعكاس البصري *Optical Return Loss Measurement*

كما أشرنا سابقاً فإن جزءاً من الضوء المنتشر عبر الليف ينعكس باتجاه أجهزة الإرسال والذي سوف يتسبب في عدم استقرار عمل الليزر تحديداً، لذلك يجب قياس الضوء المنعكس (P_{ref}) (*Reflected Power*) للتأكد من عدم تجاوز القيمة المسموح بها (حسب مواصفات وخصائص الليزر). لحساب الفقد المراقب الذي يعرف بفقد الانعكاس البصري الذي يرمز له (*ORL*) نستخدم العلاقة التالية:

$$ORL = 10 \log (P_{ref} - P_{inc}) [dB] \quad (2-10)$$

حيث ترمز P_{inc} إلى قدرة الضوء الساقط (Incident Power) (الداخل) على الليف.

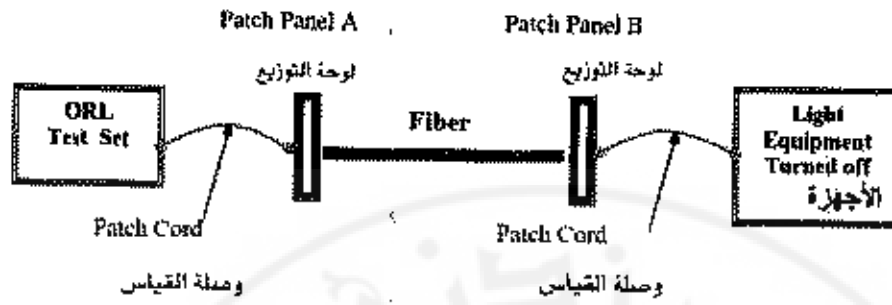
عادة ما يحصل انعكاس الضوء في مواقع الوصلات (Connectors)، أجهزة تجميع القنوات باستخدام الطول الموجي (WDM devices)، نهاية الخط، كذلك يتسبب الليف نفسه في حصول الانعكاس نتيجة حصول تثار رالي والذي أشرنا إليه في الفصل الخامس (Rayleigh Scattering).

لقياس فقد الانعكاس البصري يستخدم جهاز خاص يسمى (Optical Return Loss Test Set) والذي يعرف اختصاراً (ORL Test Set)، أو باستخدام جهاز (OTDR) والذي سندرسه لاحقاً.

عادة ما تعطى قيم فقد الانعكاس البصري بوحدة الديسبل، وتكون ذات قيمة سالبة حيث تصل إلى أقل من (-50[db]). لتوضيح هذا الرقم فإن نسبة واحد من مئة ألف فقط من الضوء تنعكس والباقي يتابع مساره عبر الليف.

طريقة القياس باستخدام ORL Test Set

- 1- تنظيف جميع الوصلات (Connectors) المستخدمة.
- 2- تشغيل جهاز (ORL Test Set) بعد الإطلاع على كتالوج التشغيل.
- 3- تحديد الليف البصري المراد فحصه.
- 4- توصيل جهاز (ORL Test Set) إلى الليف المعني بعد فصله عن العمل (الشكل 10-4).
- 5- تسجيل قراءة الجهاز التي عادة ما تكون بالديسبل.



الشكل (10 - 4) طريقة قياس فقد الانعكاس البصري باستخدام ORL

10 - 5 القياسات باستخدام جهاز OTDR OTDR Measurements

يستخدم جهاز OTDR في أنظمة الاتصالات البصرية بشكل واسع جداً والذي هو اختصار للجملة الإنجليزية *Optical Time Domain Reflectometer* حيث يتضح من الاسم بأن فكرة عمله تعتمد على إرسال الضوء عبر الكابلات حتى نهايته، ومن ثم ارتداده إلى الجهاز، والذي بدوره يقوم بحساب الزمن للحصول على المسافة من خلال العلاقة المشهورة التي تربط السرعة مع المسافة والزمن، وبالتالي فهو شبيه بمبدأ عمله مع نظام الرادار (الشكل 10-5).

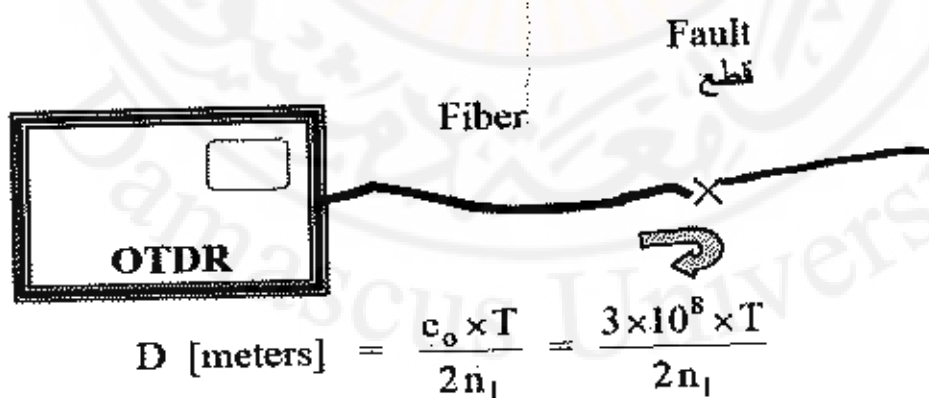


الشكل (10 - 5) جهاز OTDR

يستخدم جهاز OTDR للحصول على تمثيل بياني (على شاشة الجهاز) لانتشار الضوء عبر الليف وما يصاحبه من تخامد وفقد مع تحديد مواقع ذلك، وتحديد موقع القطع إن حصل للكيل أو الليف البصري. من التمثيل البياني الليف المسمى تتبع الليف (Fiber Trace) والذي يظهر على شاشة الجهاز يمكننا إيجاد المعلومات والقيم التالية:

- تخامد الليف (Fiber Attenuation).
- فقد الليف (Fiber Loss).
- فقد اللحام (Splice Loss).
- الانعكاسية (Reflectance).
- قدرة الضوء المنعكس (Optical Power of the Reflected Light).
- قدرة الانعكاس البصري (ORL).
- موقع قطع الليف (Fiber Fault Location).

في حالة حصول قطع في الليف يقوم الجهاز بإرسال ضوء عبر الليف حيث ينعكس عند موقع القطع، ويرجع إلى الجهاز الذي بدوره يقوم بتحديد الزمن الذي استغرقه الضوء ذهاباً وإياباً (T) عن طريق عداد زمني (Counter) لحساب المسافة (D) بالأمتار التي وقع عندها القطع وفقاً للعلاقة البسيطة التالية:



حيث ترمز T إلى الزمن بالثواني الذي استغرقه الضوء ذهاباً وإياباً (الذلك قسمنا على 2)، n_1 ترمز إلى معامل الانكسار لقلب الليف و C_0 ترمز إلى سرعة الضوء في الفراغ.

ملاحظة:

للتذكير فإن سرعة الضوء عبر الليف تساوي سرعته في الفراغ مقسوماً على معامل الانكسار لليف وتحديداً لقلب الليف حيث إن الانتشار يتم عبره.

10 - 5 - 1 المعدات المستخدمة *Test Equipment*

OTDR -1

- أن يعمل على الطول الموجي المناسب.
- أن يتناسب مع الألياف أحادية أو متعددة النمط.
- أن يكون ذا مجال ديناميكي (*Dynamic Range*) واسع.
- أن يكون ذا مخارج تتناسب مع الوصلات المستخدمة.
- أن يكون مزوداً ببرامج (*Software*) للتمكن من تخزين ومعالجة النتائج.

2- وصلات القياس *Test Patch Cords*

- واحدة أو أكثر بطول حسب اللازم.
- ذات مخارج تتناسب مع الوصلات المستخدمة.
- ذات مقاس ولوع يتناسب مع مقاس الليف المراد فحصه ونوعه.

كذلك يمكننا استخدام وصلة مصنعية جاهزة (*Pigtail*) حيث يتم وصلها لليف عن طريق اللحام.

3- محاليل وأدوات التنظيف (Cleaning Solutions, Swabs, Compressed Air,...)

تتزم هذه المواد لتنظيف الوصلات (Connectors) ووصلات المحول (Adapters) والنهايات الطرفية للليف (Fiber Ends) قبل البدء بعملية الفحص والقياس.

4- محول تهيئة (Fiber Adapter)

5- جل خاص للمواصفة (Index Matching Gel) يستخدم مع محول التهيئة لإلغاء الفراغ الداخلي بين الليف ووصلة القياس مما يقلل من انعكاس فرسنتل.

6- أداة لصقل نهاية الليف (Cleaver).

7- أداة تعرية للليف والكابل (Cable and Fiber Stripper).

8- ليف ميت أو غير عامل (Dead Zone Fiber) وذلك إذا لزم استخدامه بناء على مواصفات ومتطلبات جهاز OTDR.

قبل البدء باستخدام جهاز OTDR يجب معرفة مداه وحسابه (Range) بالكيلومترات المسافة التي يمكن أن يغطيها بنجاح وسنوضحه وفقاً للمثال التالي:

مثال 10 - 1

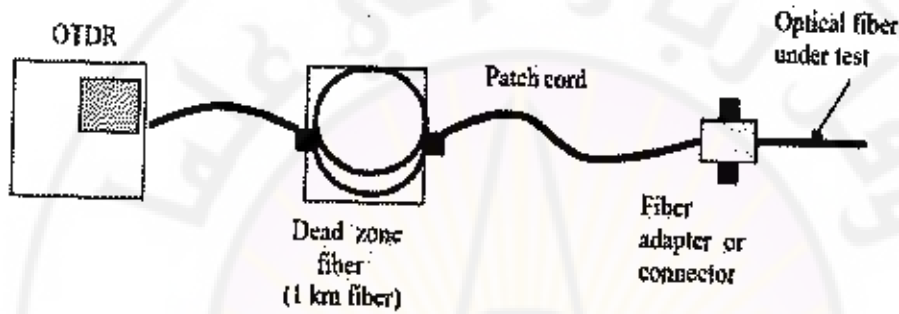
لدينا جهاز OTDR يعمل على الطول الموجي $1550[nm]$ وله مدى ديناميكي (Dynamic Rang) بمقدار $25[db]$. أوجد مدى عمل الجهاز بالكيلومترات علماً بأن الليف المراد فحصه ذو معامل تخامد يساوي $\alpha = 0.25[db/km]$ (متضمناً الفقد الناتج عن اللحام).

الحل:

يمكننا إيجاد المدى (*Range*) بالكيلومترات للجهاز وحسب المعطيات سابقة الذكر

وفقاً للعلاقة التالية:

$$\begin{aligned} \text{Range [km]} &= D_{\text{OTDR}} [\text{dB}] / \alpha [\text{dB/km}] = 25 [\text{dB}] / 0.25 [\text{dB/km}] \\ &= 100[\text{km}], \text{ for } \lambda = 155[\text{nm}] \end{aligned}$$



الشكل (6-10) طريقة ربط وتوصيل جهاز OTDR

تعني هذه النتيجة أن جهاز OTDR ذا المواصفات المبينة أعلاه يمكن استخدامه لفحص ليف بصري بطول يصل إلى $100[\text{km}]$. أما إذا كان طول الخط المراد فحصه أكثر من $100[\text{km}]$ ، فيجب البحث عن جهاز آخر يغطي المسافة المطلوبة.

ملاحظة:

يلزم عمل هذه الحسابات لكل الأطوال الموجية العاملة في النظام.

2 - 5 - 10 طريقة الفحص باستخدام OTDR Test Method

يمكننا تلخيص طريقة وخطوات الفحص باستخدام جهاز OTDR على النحو التالي، وذلك بعد إجراء الربط والتوصيل المناسب (الشكل 6-10):

- 1- إذا لم يكن الليف المراد فحصه مربوطاً في نهايته بوصلة (Connector) فيجب القيام بالخطوات اللازمة لربطها (Connectorization) وذلك بتعريه الكيبل بطول حوالي مترين ومن ثم إزالة الطبقات التي تغلف الليف (الغلاف الواقي Buffer بطول حوالي 5[cm] والغلاف الأولي Coating بطول حوالي 2[cm]) للوصول إلى الليف الفعلي (القلب والمحيط).
- 2- توصيل جهاز OTDR إلى الليف المراد فحصه وذلك من خلال وصلة القياس (Patch Cord) أو الوصلة المصنعية الجاهزة (Pigtail) وبوساطة وصلة المحول (Adapter). يجب إضافة الليف الميت (Dead Zone Fiber) في حالة الحاجة له (الشكل 10-6).
- 3- تأكد من أن المنبع الضوئي ليس موصولاً مع الطرف الآخر للليف المراد فحصه.
- 4- القيام بتشغيل جهاز OTDR.
- 5- إدخال القيم والمعطيات المناسبة لجهاز OTDR (برمجة الجهاز) مثل الطول الموجي، نوع الليف، معامل الانكسار للقلب، عرض النبضة،... الخ.
- 6- البدء بإجراء الفحص (OTDR Test) والانتظار لغاية الحصول على رسم واضح على شاشة الجهاز (Fiber Trace) يمثل انتقال الإشارة عبر الليف بالكامل (الشكل 10-7).



الشكل (10 - 7) رسم توضيحي لانتقال الإشارة عبر الليف

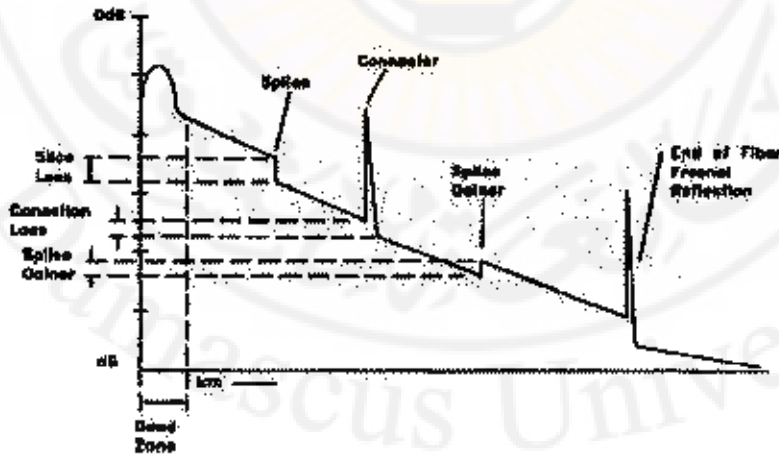
- 7- التحكم بوضع الرسم على الشاشة (*Resolution*) للحصول على تمثيل للليف بأكمله.
- 8- القيام بقياس الفقد للوصلات (*Connectors*)، نقاط اللحام (*Splices*)، وللليف البصري بأكمله (*Overall Fiber*).
- 9- القيام بقياس الفقد الكلي للليف (*Total end-to-end Loss in dB*) والتخامد للكيلومتر الواحد (*Fiber Attenuation in dB/km*).
- 10- حفظ النتائج بما فيها الرسم الكامل على الجهاز أو على قرص الحاسب. كذلك بالإمكان طباعة الرسم والنتائج على الطابعة.
- 11- إعادة الخطوات (من 1 إلى 10) لأطوال الموجات العاملة الأخرى وللالياف المتبقية.

ملاحظة:

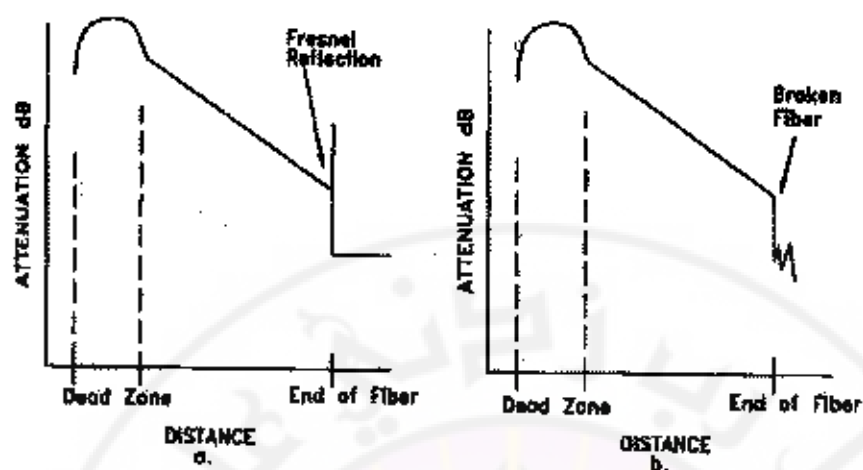
في حالة حصول قطع للليف فإن خطأ عمودياً على طول الشاشة سوف يظهر في مكان حصول القطع وبعده يتوقف الرسم على الشاشة.

لقدّم بعض الأمثلة على نتائج الفحص والتي تظهر على الشاشة باستخدام جهاز

.OTDR



الشكل (8-10)



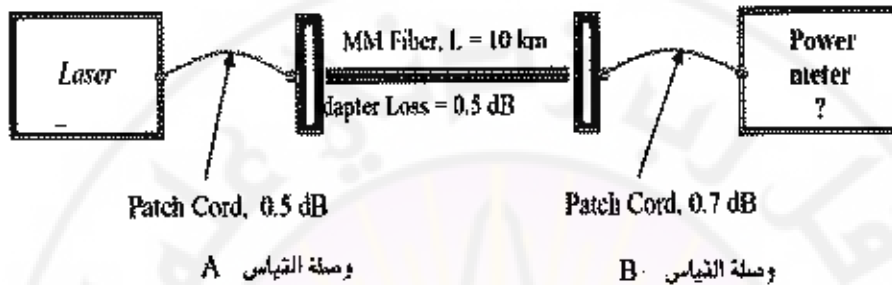
الشكل (9-10)



أسئلة وتمارين

تمرين 1:

لديك نظام قياس باستخدام جهاز قياس القدرة حسب الشكل المرسوم أدناه:



أوجد قياس جهاز قياس القدرة إذا علمت أن معامل التخميد للليف يساوي $1.5 [dB/km]$.

تمرين 2:

إذا علمت أن قراءة جهاز القدرة في السؤال السابق $-20 [dBm]$ وأنه يمكننا إهمال قيمة الفقد لوصلات القياس وبقية المعطيات كما هي. أوجد قيمة القدرة الخارجة من الليزر.

تمرين 3:

لديك وصلتا قياس من نفس النوع: الأولى (A) بطول متر واحد والثانية (B) بطول مترين. إذا علمت أن قراءة جهاز القدرة بعد توصيل (B) هي $-8 [dBm]$ وكانت القراءة بعد توصيل الوصلة (A) $-7.5 [dBm]$. أوجد فقد الوصلة (A).

تمرين 4:

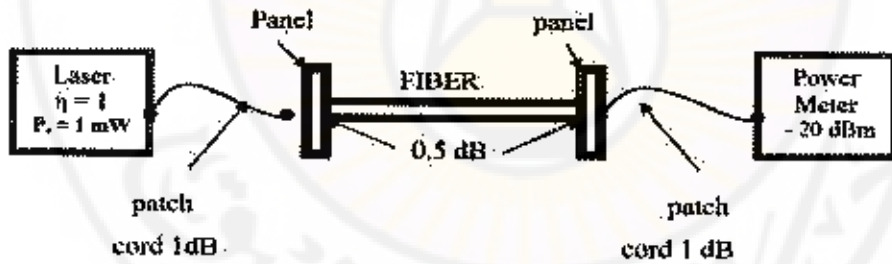
باستخدام جهاز (ORL Test Set) تم قياس الضوء المنعكس من نهاية الليف وكانت القيمة تساوي $10[\mu W]$. أوجد قيمة الفقد الناتج عن هذا الضوء المنعكس إذا علمت أن الضوء الداخل للليف $1[mW]$.

تمرين 5:

هناك قطع في ليف بصري متعدد النمط من النوع العتبي ذي معامل انكسار للقلب يساوي 1.5، بعد استخدام جهاز OTDR لتحديد موقع القطع تبين أن قراءة العداد الزمني للجهاز تساوي $20[ns]$. احسب المسافة بالأمطار التي وقع عندها القطع.

تمرين 6:

أوجد الفقد الكلي للليف البصري المبين على الرسم أدناه.

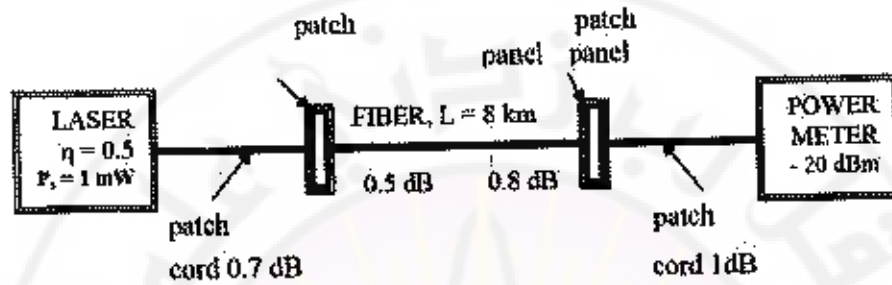


تمرين 7:

أوجد المدى المسموح به بالكيلومترات لجهاز OTDR يعمل على الطول الموجي $1300[nm]$ وله مدى ديناميكي بمقدار $30[dB]$ علماً بأن الليف المراد فحصه ذو معامل تخامد يساوي $1.5[dB/km]$.

تمرين 8:

بناء على القراءات المبينة أدناه، أوجد معدل التخماد الكيلومتر الواحد للليف المستخدم إذا علمت أنه يحوي 4 نقاط لحام وأن فقد كل نقطة يساوي 0.3 dB .





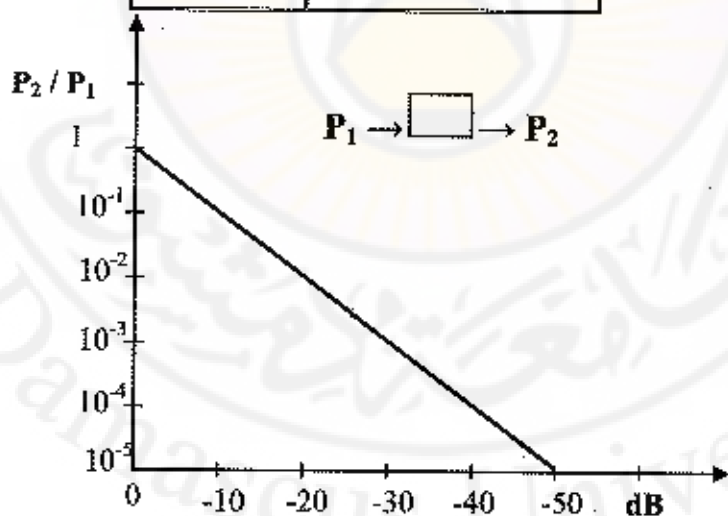
Solutions Manual for Fiber Optic Communications

- 1) Compute and plot the fraction of power transmitted as a function of the transmission line loss in decibels. Do this on log paper for a loss range of 0 – 50 [dB]?

Solution:

$$dB = 10 \log_{10} (P_2/P_1)$$

Loss [dB]	Fractional $[P_2/P_1]$
0	1
-1	0.8
-3	0.5
-6	0.25
-10	0.1
-20	0.01
-30	0.001
-40	0.0001
-50	0.00001



- 2) One milliwatt of optical power enters a fiber. Compute and plot the output power as a function of fiber loss for losses in the range 0 – 50 [dB]?

Solution:

$$dB = 10 \log_{10} (P_2/P_1)$$

$$dB/10 = \log_{10} (P_2/P_1)$$

$$P_2/P_1 = 10^{dB/10}$$

$$P_2 = P_1 \times 10^{dB/10} = 0.001 \times 10^{dB/10}$$

- 3) Two 1[Km] fibers are spliced together. Each fiber has a 5[dB] loss and the splice adds 1[dB] of loss if the power entering is 2[mW] then how much power is delivered to the end of this combined line?

Solution:

$$P_1 = 2 \text{ [mW]}$$

$$P_2 = P_1 10^{dB/10} = 2 \times 10^{-3} \times 10^{-11/10} = 0.159 \text{ [mW]}$$

- 4) A receiver requires 10[nW] as input power. If all system losses add up to 50 [dB] then how much power is required from the source?

Solution:

$$P_2 = P_1 \times 10^{dB/10} = 10 \times 10^{-9}$$

$$P_1 = P_2 \times 10^{-dB/10} = 10 \times 10^{-9} \times 10^{-(-50)/10}$$

$$P_1 = 10 \times 10^{-9} \times 10^5 = 10^6 \times 10^{-9} = 10^{-3} \text{ [W]} = 1 \text{ [mW]}$$

- 5) How much does 1 mile of RG19/U coaxial cable weigh in pounds?

Solution:

From the text, we find that RG-19/U weighs 1110[kg/km]

$$\begin{aligned} 1 \text{ mile of cable} &\times 1110 \text{ [Kg/Km]} \times 1.609 \text{ [Km/mile]} \times 2.2 \text{ [lbs/Kg]} \\ &= 3929 \text{ [lbs]} \end{aligned}$$

- 6) RG19/U is used at 100[MHz] with an input power of 10[mW] the receiver sensitivity is 1[μW]. Compute the maximum length of the communications link. Repeat the computation for the case in which a fiber with a loss of 5[dB/Km] replaces the coaxial cable. The fiber system's input power and receiver sensitivity are the same as those of the coaxial cable system.

Solution:

From the text, we find that RG-19/U has an attenuation of 22.6[dB/Km] at 100[MHz].

Using RG-19/U, the allowed loss is:

$$Loss = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} = 10 \log_{10} \frac{10^{-6}}{10^{-2}} = -40 [dB]$$

Maximum coaxial cable length = $40 / 22.6 = 1.8 [Km]$

Using a fiber with loss, the maximum length of fiber is:

Length = $40/5 = 8 \text{ km}$

-
- 7) The telephone transmission rate at the T3 level is 44.7[Mb/s] each telephone message occupies 64.000[b/s]. How many Simultaneous messages could be sent along this system? In the actual system only 672 message channels are used the additional pulses are used for other functions such as synchronization?

Solution:

$$44.7 \times 10^6 [\text{bps}] \times 1 \text{ message} / 64.000 [\text{bps}] = 698 \text{ messages}$$

-
- 8) Estimate how many light pulses can be transmitted per second by a manually operated blinker-light system. What do you conclude about the information capacity of this manual system and how it compares with the capacity of modern fiber optic telephone links?

Solution:

With manually operated blinker lights, I would guess about 2 or 3 bps.

- 9) A fiber telephone cable contains 144 fibers each capable of carrying 672 voice messages a conducting telephone cable contains 900 copper twisted pairs and each pair can carry 24 messages Compare the capacities of the fiber and conducting cables how many of the conducting cables are required to equal the capacity of the fiber cable? Repeat the calculations if each fiber operates at the DS-4 signaling rate?

Solution:

Conducting Cable

$$900 \text{ [pairs/cable]} \times 24 \text{ [messages/pair]} = 21.600 \text{ messages}$$

Fiber

$$144 \text{ [fibers/cable]} \times 672 \text{ [messages/fiber]} = 96.768 \text{ messages}$$

$$96.768 \text{ [fibers cable]} / 21.600 \text{ [copper cable]} = 4.48$$

About 4.5 copper cables are needed to carry the same amount information as the single fiber cable

At the Ds-4 rate, each fiber carries 4032 messages. The comparative message rates are then: $144 \times 4032 / 21600 = 26.88$ or about a factor of 27.

-
- 10) The 144 - fiber telephone cable has a 12.7 mm diameter A 900 - pair copper cable has about a 70-mm diameter computer the ratio of cross - sectional area of these two types of transmission lines ?

Solution:

$$A_{\text{fiber}} = \pi \left(\frac{D_{\text{fiber}}}{2} \right)^2 = \pi (12.7 / 2)^2 = 126.67 [\text{mm}^2]$$

$$A_{\text{copper}} = \pi \left(\frac{D_{\text{copper}}}{2} \right)^2 = \pi (70 / 2)^2 = 3848.48 [\text{mm}^2]$$

$$A_{\text{copper}} / A_{\text{fiber}} = 30$$

- 11) Make a table with following frequencies in the first column: 10, 60, 10^3 , 2×10^4 , 10^6 , 10^9 , 10^{10} , and 10^{14} [Hz]. In the second column write the corresponding wavelengths in meters. In the third column write the name of the corresponding region of the electromagnetic spectrum?

Solution:

Frequency [Hz]	Wavelength [m] $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / f$	Region of EM Spectrum
10	3×10^7	Power
60	5×10^6	Power
10^3	3×10^5	Radio
2×10^4	1.5×10^4	Radio
10^6	3×10^2	Radio
10^9	0.3	Radio
10^{10}	0.03	Microwave
10^{14}	3×10^{-6}	Infrared

- 12) Computer the frequencies at the edges of the visible spectrum. Also computer the bandwidth of the visible spectrum (That is the difference between the highest and lowest visible frequencies)?

Solution:

Visible wavelengths range from $0.4[\mu\text{m}]$ to $0.7[\mu\text{m}]$

$$\text{When } \lambda = 0.4[\mu\text{m}], f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 [\text{m/s}]}{0.4 \times 10^{-6} [\text{m/s}]} = 7.5 \times 10^{14} [\text{Hz}]$$

$$\text{When } \lambda = 0.7[\mu\text{m}], f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 [\text{m/s}]}{0.7 \times 10^{-6} [\text{m/s}]} = 4.3 \times 10^{14} [\text{Hz}]$$

$$\text{Bandwidth} = \Delta f = (7.5 - 4.3) \times 10^{14} = 3.2 \times 10^{14} [\text{Hz}]$$

- 13) Compute the energy of a photon at 0.6, 0.82 and 1.3[μm]. Which has more energy a visible or an infrared photon?

Solution:

$$W = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.625 \times 10^{-34} [J.S]) (3 \times 10^8 [m/s])}{\lambda}$$

$\lambda [\mu\text{m}]$	$W [J]$
0.6	3.3×10^{-19}
0.82	2.4×10^{-19}
1.3	1.5×10^{-19}

A Visible photon has more energy than infrared photon.

- 14) There are 10^{10} photon per second incident on a photo-detector at wavelength 0.8[μm]. Compute the power incident on the detector if this detector converts light to current at a rate of 0.65[mA/mW] .what current is produced?

Solution:

$$P = W/t = hfN = hNc/\lambda, \text{ where } N = \text{number of photons/sec}$$

$$P = 6.625 \times 10^{-34} \times 10^{10} \times 3 \times 10^8 / 0.8 \times 10^{-6} = 2.5 \times 10^{-9} [W]$$

$$I = 2.5 \times 10^{-9} [W] (0.65 [A/W]) = 1.6 [nA]$$

- 15) How many photons are arriving per second at a receiver if the power is 1[nW] at wavelength 1.3 [μm]?

Solution:

$$N = \frac{P\lambda}{hc} = \frac{(1 \times 10^{-9} [W]) (1.3 \times 10^{-6} [m])}{(6.625 \times 10^{-34} [J.S]) (3 \times 10^8 [m/s])}$$

$$N = 6.5 \times 10^9 [\text{photons/s}]$$

- 16) Assume that digital system can be operated at a data rate that has a value equal to 1% of the carrier frequency. Compute the allowed bit rates by using carriers having the frequencies 10[KHz], 1[MHz], 100[MHz] and 10[GHz] and one having the wavelength 1.0[μm]. This problem emphasizes how the system capacity can increase with increasing carrier frequency (one of the principal advantages of optical transmission over radio frequencies)?

Solution:

Carrier	Bit Rate [bps]
10 [KHz]	10^2
1 [MHz]	10^4
100 [MHz]	10^6
10 [GHz]	10^8
1 [μm]	3×10^{12}

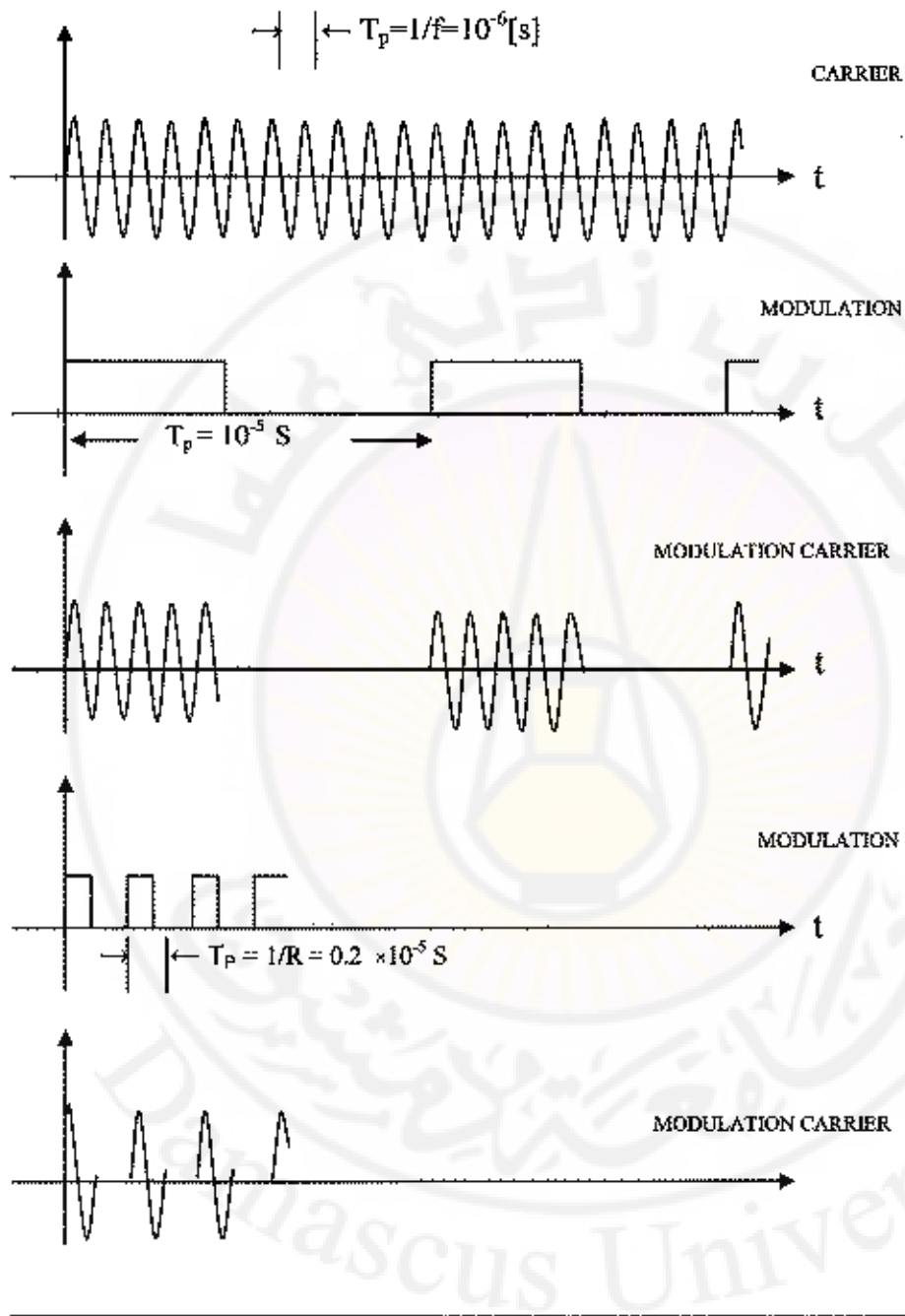
For the $\lambda = 1[\mu\text{m}]$ carrier

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 [\text{m/s}]}{1 \times 10^{-6} [\text{m}]} \Rightarrow$$

$$f = 3 \times 10^{14} [\text{Hz}]$$

- 17) Draw 30 cycles of a sinusoid oscillating at $10^6[\text{Hz}]$. Draw this sinusoid if it is modulated by a square wave whose repetition rate is 10^5 pulses per second [pps]. Repeat for the repetition rate 5×10^5 [pps]. What problems occur as the repetition rate approaches the carrier frequency?

Solution:



- 18) How many voice channels can be modulated onto a carrier at wavelength $1.06[\mu\text{m}]$? Assume a system bandwidth equal to 1 % of the carrier frequency?

Solution:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 [\text{m/s}]}{1.06 \times 10^{-6} [\text{m}]} = 2.83 \times 10^{14} [\text{Hz}],$$

$$BW = 0.01 f = 2.83 \times 10^{12} [\text{Hz}]$$

Assume $\Delta f = 4000 [\text{Hz}]$ for one voice channel. Then

$$2.83 \times 10^{12} [\text{Hz}] \times 1 [\text{channel}] / 4000 [\text{Hz}] = 7 \times 10^8 [\text{channels}]$$

-
- 19) Suggest a fiber optic application other than one already mentioned in the text Draw the System block diagram List the characteristics and requirements of your system for example give the information bandwidth or data rate length of line and so on?

Solution:

Open ended solution.

- 20) Assume that there is a phone in every home on earth if these were to transmit simultaneously over one transmission line by using frequency-division multiplexing what is the minimum bandwidth required? Could a single optical beam carry this multiplexed signal? (Assume that 10 billion homes need to transmit)?

Solution:

Assume there are 10 billion (10^{10}) homes each having one 4000 Hz channel, then:

$10^{10} [\text{homes}] \times 4000 [\text{Hz/home}] = 4 \times 10^{13} [\text{Hz}]$ is the required bandwidth. Using an optical beam of frequency

$$f = 3 \times 10^{14} [\text{Hz}]$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{4 \times 10^{13}}{3 \times 10^{14}} = 0.133$$

The bandwidth 13.3 % of the carrier frequency this might be possible

- 21) In problem 20 assume instead digital modulation time-division multiplexing and 64,000[b/s] for each voice message. What data rate is required to transmit the multiplexing signal? Could a single optical beam carry this signal?

Solution:

$$10^{10} \text{ messages} \left(\frac{6.4 \times 10^4 [\text{bps}]}{\text{message}} \right) = 6.4 \times 10^{14} [\text{bps}]$$

A single optical carrier at $f \approx 3 \times 10^{14} [\text{Hz}]$ could not be turned on and off this fast.

- 22) The power incident on a detector of light is 100[nW].

(a) Determine the number of photons per second incident on the doctor if the wavelength is 800[nm].

(b) Repeat the calculation if the wavelength is 1550[nm].

(c) Which wavelength requires the most photons to produce the 100[nW] of power?

Solution:

$$P = 100 [\text{nW}] = 100 \times 10^{-9} [\text{W}] \quad \text{Let } N = \text{number of photons}$$

$$W = Nhf = Pt$$

$$N/t = P/hf = (P/hc)\lambda$$

(a) At 800[nm]

$$N/t = \frac{10^{-7}(0.8 \times 10^{-6})}{6.63 \times 10^{-34}(3 \times 10^8)} = 4 \times 10^{11} [\text{photons/s}]$$

(b) At 1550[μm]

$$N/t = 4 \times 10^{11}(1.55/8) = 7.8 \times 10^{11} [\text{photons/s}]$$

(c) The longer wavelength requires more photons because the energy per photons is smaller at the longer wavelength.

- 23) To operate properly a fiber optic receiver requires 34[dBm] power the system losses total 31[dB] from the light source to the receiver how much power does the light source emit (in mW)?

Solution:

$$P_R = -34 [\text{dBm}]$$

$$P_T = \text{Transmitted power in [dBm]}$$

$$L = -31 [\text{dB}], \text{ system losses}$$

$$P_R = P_T + L$$

$$-34 = P_T - 31$$

$$P_T = -34 + 31 = -3 [\text{dBm}] = 0.5 [\text{mW}]$$

- 24) Repeat the preceding problem with everything the same except that the input signal voltage is now $0.1 \cos \omega t \text{ V}$

Solution:

Multimode spread:

$$n_1 = 1.465, n_2 = 1.46$$

$$\Delta(\tau/L) = \frac{n_1(n_1 - n_2)}{cn_2} = \frac{1.465(1.465 - 1.46)}{3 \times 10^8 \times 1.46}$$

$$\Delta(\tau/L) = 1.672 \times 10^{-11} [\text{s/m}]$$

$$\Delta(\tau/L) = 16.72 [\text{ns/m}]$$

$$f_{3-dB} \times L = \frac{0.5}{\Delta(\tau/L)} = \frac{0.5}{16.72 \times 10^{-9}} = 29.9 \times 10^6 [\text{Hz} \times \text{Km}]$$

$$f_{3-dB} \times L = 29.9 [\text{MHz} \times \text{Km}]$$

$$R_{RZ} \times L = \frac{0.35}{\Delta(\tau/L)} = 2.93 [\text{Mb/s} \times \text{Km}]$$

$$R_{NRZ} \times L = \frac{0.7}{\Delta(\tau/L)} = 41.86 [\text{Mb/s} \times \text{Km}]$$

Consider material dispersion at 1550[nm] if the source spectral width is 50[nm]

$$M \approx 20 [\text{ps}/(\text{nm} \times \text{Km})]$$

$$\text{Then: } \Delta(\tau/L) = M\Delta\lambda = 50 \times 20 = 1000 [\text{ps}/\text{Km}] = 1 [\text{ns}/\text{Km}]$$

This is 16 times less than the multimode spread. Modal spreading is dominant.

- 25) Compute the multimode pulse spread per unit length in a symmetric-slab waveguide if $n_1 = 1.465$, $n_2 = 1.46$. If this is the only pulse-spreading mechanism (or, at least, the dominant one), compute the pulse spread per unit length, the 3-dB optic bandwidth-length product, and the rate-length products for both RZ and NRZ codes. Under these conditions, which is dominant at 1550[nm], modal pulse spreading or material pulse spreading?**

Solution:

Waveguide dispersion:

$$M_g = 4 [\text{ps}/(\text{nm} \times \text{Km})]$$

$$\text{If } \Delta\lambda = 2 [\text{nm}]$$

$$\Delta(\tau/L) = 4 \times 2 = 8 [\text{ps}/\text{Km}]$$

$$\text{If } \Delta\lambda = 100 [\text{nm}]$$

$$\Delta(\tau/L) = 4 \times 100 = 400 [\text{ps}/\text{Km}] = 0.4 [\text{ns}/\text{Km}]$$

Both of these are well below the modal spread calculated in the preceding problem.

- 26) A symmetric-slab waveguide having $n_1 = 1.465$ has the numerical aperture 0.2. Compute the modal pulse spread per unit length. Compute the acceptance angle for this waveguide.

Solution:

Slab waveguide:

$$n_1 = 1.465, n_2 = 0.2$$

Modal spread:

$$\Delta(\tau/L) = \frac{(NA)^2}{2cn_1} = \frac{0.2^2}{2 \times 3 \times 10^8 \times 1.465} = 4.55 \times 10^{11} [s/m]$$

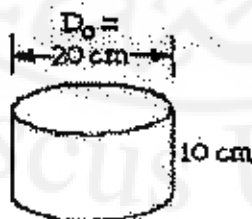
$$\Delta(\tau/L) = 4.55 [ns/Km]$$

$$NA = \sin \theta$$

$$0.2 = \sin \theta$$

$$\theta = 11.54^\circ$$

- 27) A silica fiber has an outer diameter of 125[μm]. What is the total volume of silica for a 1[km] length? This fiber is wound on a spool whose unloaded diameter is 20[cm]. The spool height is 10[cm]; Compute the diameter of the fully loaded spool.



Solution:

$$V = \pi(d/2)^2 L = \pi(125 \times 10^{-6} / 2)^2 10^3 = 1.227 \times 10^{-5} [m^3]$$

$$V = 12.227 [cm^3]$$

N = number of turns per layer

$$N = \frac{10 \times 10^{-2}}{125 \times 10^{-6}} = 800$$

The mean diameter at the first layer is

$$20[cm] + 125[\mu m] = D_1$$

$$D_1 = 200 + 0.125 = 200.125[mm], \text{ or about } 200[mm]$$

The length of each turn is then

$$L_{T1} = \pi D_1 = \pi \times 0.2 = 0.628[m]$$

The total length of layer one is then

$$L_1 = NL_{T1} = 800 \times 0.628 = 502.4[m]$$

The second layer will use length $L_1 > L_2$. Thus, the 1[Km] length will fit on two layers.

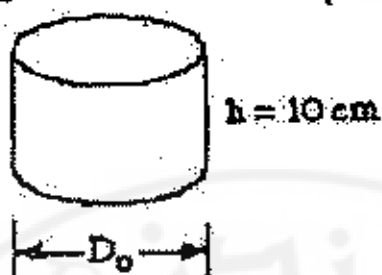
The outer diameter for two layers is the original spool diameter plus

$$4 \times 125[\mu m] = 500[\mu m] = 0.56[mm] = 0.05[cm]$$

$$D = 20 + 0.05 = 20.05[cm]$$

$$D = 0.2005[m]$$

- 28) Repeat the calculations of Problem 27 if the fiber is embed in a cable having an outer diameter of 1[mm].



Solution:

N = number of turns per layer

$$N = h / d$$

d = cable diameter = 1[mm]

$$N = 0.1 / 0.001 = 100 \text{ [turns/layer]}$$

$D_o = 20[\text{cm}]$ = spool diameter

There will be several layers. The mean diameter D_i of each layer and the length of cable in each layer are shown on the table.

Layer Number r	D_i Diameter [cm]	Circumference πD_i [cm]	Layer Length [m]	Total Length [m]
1	20.1	63.1	63.1	
2	20.3	63.8	63.8	
3	20.5	64.4	64.4	
4	20.7	65	65	
5	20.9	65.7	65.7	322
6	21.1	66.3	66.3	
7	21.3	66.9	66.9	
8	27.5	67.5	67.5	

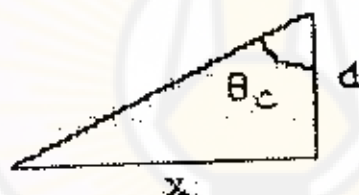
9	21.7	68.2	68.2	
10	21.9	68.8	68.8	659.3
11	22.1	69.4	69.4	
12	22.3	70	70	
13	22.3	70.7	70.7	
14	20.7	71.3	71.3	
15	22.9	71.9	71.9	1012.6

15 layers are required.

The outer diameter is thus: $D = 20 + 2(15)(0.1) = 20 + 3 = 23[cm]$

- 29) A fiber has $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.49$, and core diameter $50[\mu m]$. Consider the guided ray traveling at the steepest angle with respect to the fiber axis. How many reflections are there per meter for this ray?

Solution:



Steepest Angle = Critical Angle = θ_c

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) = \sin^{-1}(1.49/1.5) = 83.38^\circ$$

$$x = d \tan \theta_c = 50 \tan(83.38^\circ) = 430.85[\mu m / \text{reflection}]$$

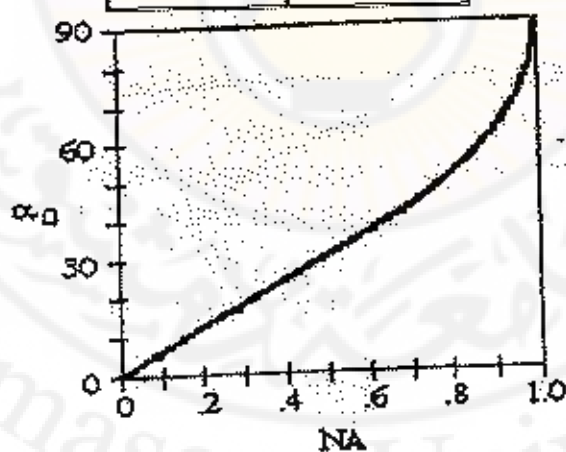
$$\text{For one meter, } R = (1/x)(10^6[\mu m / m]) = 2321[\text{reflection} / m]$$

- 30) Plot acceptance angle versus NA for the range $0 < NA < 1$. Let $n_0 = 1$.

Solution:

$$NA = n_0 \sin \alpha_0, n_0 = 1$$

NA	α_0
0.05	2.87
0.10	5.70
0.30	17.5
0.50	30.0
0.70	44.4
0.80	53.1
0.90	64.0
0.95	71.8
1.00	90.0



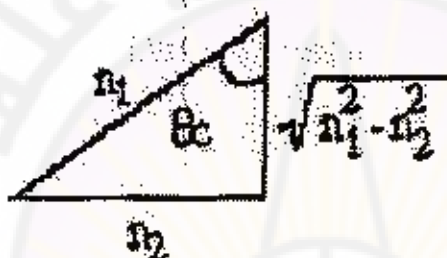
31) Prove that: $\cos \theta_c = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}$

Solution:

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1$$

$$\cos \theta_c \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} = \sqrt{1 - (n_2 / n_1)^2} = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}$$

Or from Figure,



$$\cos \theta_c = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}$$

32) For a GRIN fiber, let $n_1 = 1.5, \Delta = 0.01, \alpha = 2, a = 50[\mu m]$

- Plot $n(r)$ within the code to scale.
- Repeat on the same graph, changing α to 10.
- Repeat on the same graph with $\Delta = 0.001$ and $\alpha = 2$.

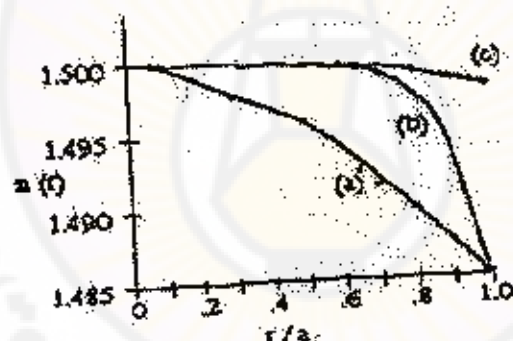
Solution:

a) $n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2(r/a)^\alpha \Delta} = 1.5 \sqrt{1 - 2(r/50)^2 (0.01)}$

b) $n(r) = 1.5 \sqrt{1 - 2(r/50)^{10} (0.01)}$

c) $n(r) = 1.5 \sqrt{1 - 2(r/50)^2 (0.001)}$

r/a	(a)	(b)	(c)
0	1.5	1.5	1.5
0.1	1.4998	1.5	1.4999
0.2	1.4994	1.5	1.4999
0.3	1.4986	1.5	1.4999
0.4	1.4976	1.5	1.4998
0.5	1.4962	1.5	1.4996
0.6	1.4946	1.4999	1.4995
0.7	1.4926	1.4996	1.4993
0.8	1.4904	1.4984	1.4990
0.9	1.4878	1.4948	1.4988
1	1.4849	1.4849	1.4985



- 33) Model a parabolic GRIN fiber by the same equivalent multiple-step approximation. Let $n_1=1.5$, $\Delta=0.01$. Divide the radius into 10 equal parts. Consider a ray crossing the fiber axis at 5° with respect to that axis (and inside the fiber). Sketch its progress through the fiber until it turns back and recrosses the fiber axis. (The angles can be magnified on your sketch.) At what value of r/a did the ray turn back?

Solution:

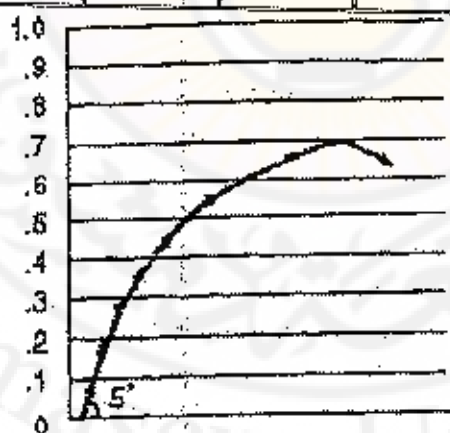
Parabolic Profile:

$$n(r) = n_1(1 - (r/a)^2 \Delta) = 1.5[1 - 0.01(r/a)^2]$$

$$n_2 = n_1(1 - \Delta) = 1.5(1 - 0.01) = 1.485$$

From Snell's law, $\theta_i = \sin^{-1}[(n_2/n_1)\sin \theta_i]$

r/a	$n(r)$	θ_i	θ_r
0	1.5	85°	85.088
0.1	1.4998	85.088	85.269
0.2	1.4994	85.269	85.654
0.3	1.4986	85.654	86.191
0.4	1.4976	86.191	87.106
0.5	1.4962	87.106	88.836
0.6	1.4946	88.836	
0.7	1.4926		



The refraction occurs just before, $r/a = 0.7$

- 34) For Problem 33, suppose that the initial ray angle is increased beyond 5° . What is the maximum angle before the ray is no longer totally reflected? Sketch the ray that travels at this maximum angle.

Solution:

$$NA = n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sqrt{2\Delta}, n_0 = 1$$

$$\theta_0 = \sin^{-1}(n_1 \sqrt{2\Delta}) = \sin^{-1}(1.5 \sqrt{2 \times 0.01}) = 12.247^\circ$$

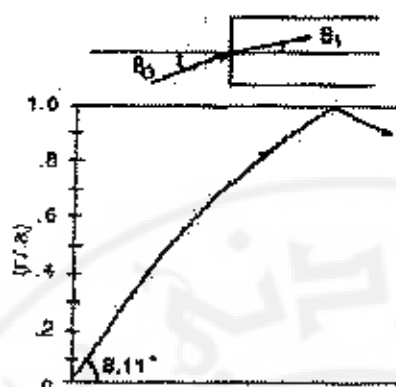
The internal angle is θ_1

$$n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_0 = \sin \theta_0 = NA,$$

$$\sin \theta_1 = 0.212/1.5, \theta_1 = 8.11^\circ$$

This is the maximum angle for total reflection.

r/a	$n(r)$	θ_i	θ_t
0	1.5	81.89°	81.94
0.1	1.4998	81.94	82.05
0.2	1.4994	82.05	82.27
0.3	1.4986	82.27	82.56
0.4	1.4976	82.56	82.99
0.5	1.4962	82.99	83.5
0.6	1.4946	83.5	84.22
0.7	1.4926	84.22	85.12
0.8	1.4904	85.12	86.48
0.9	1.4878	86.48	90
1.0	1.4849	90	



- 35) Consider a fiber whose core index is 1.5 and whose cladding index is 1.485. The core radius is $100[\mu\text{m}]$. At what bending radius does a ray traveling along the fiber axis strike the cladding at the critical angle in the bend?

Solution:

$$n_1 = 1.5, n_2 = 1.485, a = 100[\mu\text{m}], \theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) = 81.89^\circ$$

The sum of the angles in a triangle equals 180° , so $\cos \theta_c = x/r$, so

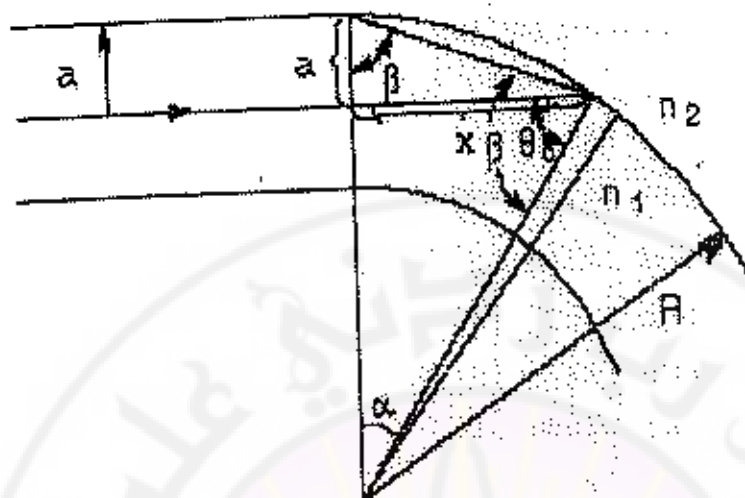
$$R = x / \cos \theta_c$$

$$\alpha + 2\beta = 180^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ - \theta_c = 8.11^\circ \text{ and } \beta = 85.945^\circ$$

$$\tan \beta = x/a, \text{ so } x = a \tan \beta = 100 \tan \beta = 1410.6[\mu\text{m}]$$

$R = 1.41 / \cos 81.89^\circ = 9.99[\text{mm}] \cong 1[\text{cm}]$. This shows that the fiber must be bent tightly before the axial ray no longer undergoes critical reflections.



- 36) Consider an SI fiber with $n_1=1.5$, $n_2=1.485$ at $0.82[\mu\text{m}]$. If the core radius is $50[\mu\text{m}]$, how many modes can propagate? Repeat if the wavelength is changed to $1.2[\mu\text{m}]$

Solution:

$$n_1=1.5, n_2=1.485$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{0.82} \sqrt{1.5^2 - 1.485^2} = 81$$

$$N = V^2 / 2 = 81^2 / 2 = 3286 \text{ modes}$$

$$\text{If } \lambda = 1.2[\mu\text{m}], V = 55.35, N = V^2 / 2 = 1531 \text{ modes.}$$

- 37) Prove that the maximum value of a/λ is 1.6 times larger for single-mode parabolic index fiber than for a single-mode SI fiber.

Solution:

Step-index single-mode condition:

$$\left(\frac{a}{\lambda}\right)_{SI} < \frac{2.405}{2\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

GRIN single-mode condition:

$$\left(\frac{a}{\lambda}\right)_{GRIN} < \frac{1.4}{\pi\sqrt{n_1(n_2 - n_1)}}$$

Then

$$\frac{\left(\frac{a}{\lambda}\right)_{GRIN}}{\left(\frac{a}{\lambda}\right)_{SI}} = \frac{2(1.4)\sqrt{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)}}{2.405\sqrt{n_1(n_1 - n_2)}}$$

Use n_1 close to n_2 , so that $n_1 + n_2 = 2n_1$

$$\frac{\left(\frac{a}{\lambda}\right)_{GRIN}}{\left(\frac{a}{\lambda}\right)_{SI}} = 1.164\sqrt{2} = 1.646$$

-
- 38) For a parabolic fiber, plot the transverse pattern for the (0,0), (1,0), and (2,0) modes. Let $a=25[\mu m]$, wavelength= $0.82[\mu m]$, $n_1=1.48$, and $n_2=1.46$. Put each plot on the same graph.

Solution:

$$E_{00} = E_0 e^{-\alpha^2 r^2/2}, E_{10} = E_1 x e^{-\alpha^2 r^2/2},$$

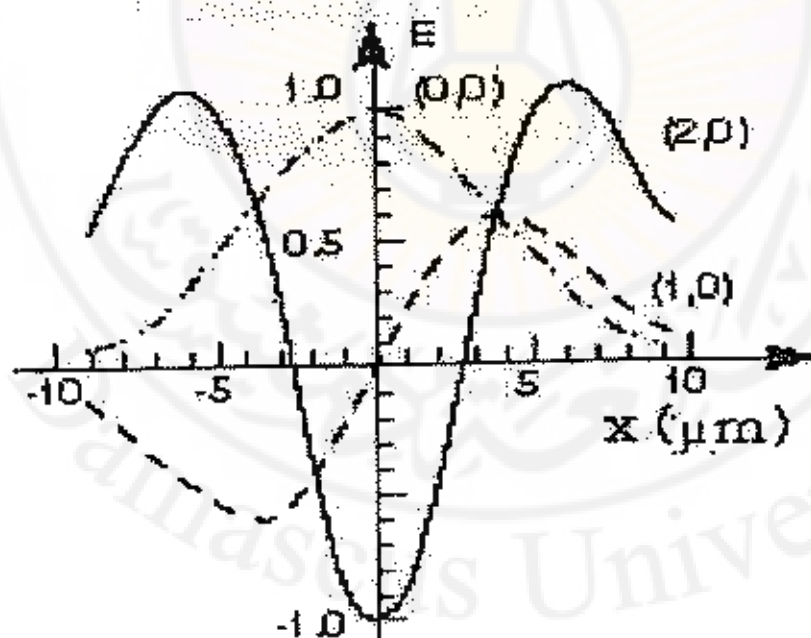
$$E_{20} = E_2 [2(\alpha x)^2 - 1] e^{-\alpha^2 r^2/2}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_0 n_1}{a}} (2\Delta)^{1/4}, n_1 = 1.48, \text{ so } \alpha = 2.73 \times 10^5 [m^{-1}]$$

Plot E versus x with $E_0 = E_1 = E_2 = 1$

$$E_{00} = E_0 e^{-\alpha^2 x^2 / 2}, E_{10} = E_1 x e^{-\alpha^2 x^2 / 2}, E_{20} = E_2 [2(\alpha x)^2 - 1] e^{-\alpha^2 x^2 / 2}$$

$x(\mu\text{m})$	E_{00}	E_{10}	E_{20}
0	1	0	-1
1	0.963	0.263	-0.819
2	0.715	0.586	0.244
3	0.715	0.586	0.244
4	0.5551	0.600	0.7633
5	0.394	0.538	1.074
6	0.261	0.428	1.140
7	0.161	0.308	1.015
8	0.092	0.201	0.786
9	0.049	0.120	0.543



- 39) For a parabolic fiber, compute the equation for the cutoff value of a/λ for the (5,5) mode. If all modes up to this one are allowed to propagate, how many allowed modes are there?

Solution:

Compare your result with $N = V^2 / 4$

$$n_{\text{eff}} = n_1 - (p+q+1)\sqrt{2\Delta}/k_0 a = n_2 \text{ at cutoff.}$$

$$\text{Set } p=q=5, n_2 = n_1 - 11\sqrt{2\Delta}/(2\pi a/\lambda)$$

Substitute $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ and solve for a/λ

$$a/\lambda = \frac{2.48}{\sqrt{n_1(n_1 - n_2)}}$$

We have the following modes for all values of (p+q) equal to or less than 10.

p	q	Number of modes
0	0-10	11
1	0-9	10
2	0-8	9
3	0-7	8
4	0-6	7
5	0-5	6
6	0-4	5
7	0-3	4
8	0-2	3
9	0-1	2
10	0	1

Total = 66 modes

Including the two possible orthogonal polarization, we have a total of $2 \times 66 = 132$ modes.

Now, we have $N = V^2/4$ where $V = K_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ and a/λ from above, and use $n_1 + n_2 \approx 2n_1$. So we get:

$$N = (2\pi)^2 (2.48)^2 2n_1 / 4n_1 = 121.4 \text{ or } 121 \text{ Modes.}$$

40) Give a general equation for the cutoff value of (p,q) mode in the parabolic fiber.

Solution:

$$n_{eff} = n_1 - (p+q+1)\sqrt{2\Delta}/k_0\alpha = n_2 \text{ at cutoff.}$$

$$n_1 - n_2 = (p+q+1)\sqrt{2\Delta}/k_0\alpha \text{ Solve for } a/\lambda.$$

$$a/\lambda = (p+q+1)\left(\sqrt{2}/2\pi/\sqrt{n_1(n_1-n_2)}\right), \text{ cutoff condition for the (p, q) mode.}$$

41) For a single-mode and multimode GRIN fiber $n_1 = 1.48, n_2 = 1.46, \lambda = 0.82[\mu m], \Delta\lambda = 20[nm]$.

- Compute the 3-dB bandwidth-length product. Neglect waveguide dispersion.
- Repeat if line width = $1[nm]$.
- Repeat if wavelength = $1.5[\mu m]$, line width = $50[nm]$.
- Repeat if wavelength = $1.5[\mu m]$, line width = $[nm]$.

Solution:

$$n_1 = 1.48, n_2 = 1.46, \lambda = 0.82[\mu m], \Delta\lambda = 20[nm], \Delta = 0.0135.$$

M = material dispersion (from figure in text)

M_g = waveguide dispersion (assumed negligible)

$$\Delta(\tau/L)_{DS} = -(M + M_g)\Delta\lambda = (100 \text{ ps/nm} \times \text{km})(20 \text{ nm}) = 2200 [\text{ps/km}]$$

$$\theta_0 = \sin^{-1}(n_1 \sqrt{2\Delta}) = \sin^{-1}(1.5 \sqrt{2 \times 0.01}) = 12.247$$

$$\Delta(\tau/L)_{TOTAL} = \sqrt{[\Delta(\tau/L)_{DS}]^2 + [\Delta(\tau/L)_{MOD}]^2} = 202456 [\text{ns/km}]$$

Single mode:

$$f_{3dB} \times L = \frac{1}{2\Delta(\tau/L)_{DS}} = \frac{1}{2 \times 202 [\text{ns/km}]} = 0.227 [\text{GHz} \times \text{km}]$$

Multimode:

$$f_{3dB} \times L = \frac{1}{2\Delta(\tau/L)_{TOTAL}} = \frac{1}{2 \times 2.2456 [\text{ns/km}]} = 0.2227 [\text{GHz} \times \text{km}]$$

λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	M (ps/nm.km)	$\Delta(\tau/L)_{DS}$ (ns/km)	$\Delta(\tau/L)_{MOD}$ (ns/km)	$\Delta(\tau/L)_{TOTAL}$ (ns/km)	Single mode $f_{3dB}L$ (GHz/km)	Multimode $f_{3dB}L$ (GHz/km)
0.82	20	110	2.2	0.496	0.25	0.227	0.223
0.82	1	110	0.11	0.45	0.46	4.55	1.08
1.5	50	-15	0.75	0.45	0.87	0.667	0.574
1.5	1	-15	0.015	0.45	0.45	33.3	1.11

Note that the advantage of the single mode fiber except an LED is used at the short wavelength.

- 42) An Si fiber is single mode at $1.4[\mu\text{m}]$ but not at shorter wavelength; $n_1=1.465$ and $n_2=1.46$. Compute the core radius. Find the number of modes at $0.8, 0.85$ and $0.9[\mu\text{m}]$. (Hint: use the mode chart).

Solution:

$$n_1=1.465, n_2=1.46, a/\lambda = 2.405/[2\pi(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}] = 3.165$$

$$\text{If } \lambda=1.4[\mu\text{m}], a=4.43[\mu\text{m}]$$

Note that for any wavelength less than $\lambda=1.4[\mu\text{m}]$, a/λ will no longer satisfy the single-mode inequality

$$a/\lambda < \frac{2.405}{2\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0.7598 \frac{a}{\lambda}$$

Note: $V > 2.405$ for all $\lambda < 1.4[\mu\text{m}]$. The number of modes is found from the mode chart in the text.

λ	a/λ	V	NO. of modes (Both polarization)
0.8	5.5538	4.2208	$7 \times 2 = 14$
0.85	5.212	3.96	$6 \times 2 = 12$
0.9	4.922	3.73	$4 \times 2 = 8$

- 43) A multimode fiber has an equilibrium length of $0.5[\text{km}]$. In the linear region, its pulse spread per unit length is $30[\text{ns/km}]$. The spread is due primarily to modal distortion. Plot the 3dB electrical and 3dB optical bandwidth versus fiber length for 0 to $5[\text{km}]$. Also plot maximum RZ and NRZ data rates.

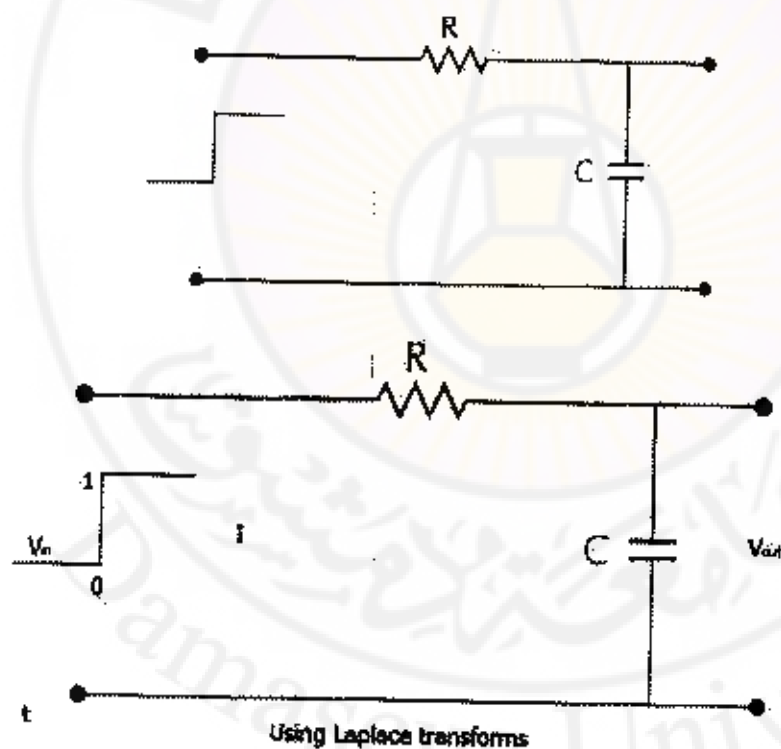
Solution:

$$L_s = 0.5[km], \Delta(\tau/L) = 30[ns/km], f_{3-dBopt} \approx 1/(2\Delta\tau)$$

For $L < 0.5[km]$, $\Delta\tau = L\Delta(\tau/L)$.

- 44) Consider a resistor in series with a capacitor (as in the figure below). Let the input be a step of 1[V]. Compute and plot the resulting capacitor voltage. Compute the 10 - 90% rise time of this voltage in terms of R and C .

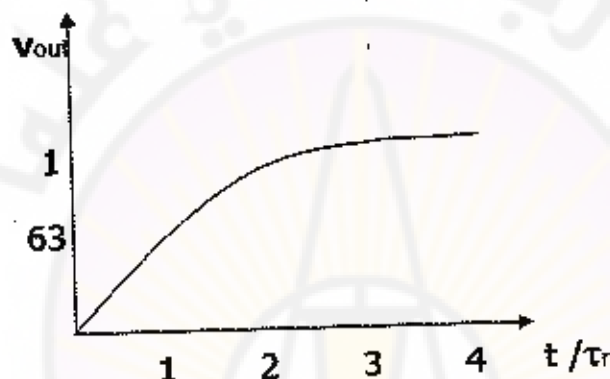
Solution:



$$I(S) = \frac{V_{in}(S)}{R + 1/sC} \quad V_{out} = \frac{V_{in}(S)}{sRC + 1} \quad V_{in} = 1/s$$

$$\text{So: } V_{out} = \frac{1/RC}{s\left(s + \frac{1}{RC}\right)} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{RC}}$$

$$V_{out}(t) = 1 - e^{-\frac{t}{RC}}$$



The 63 % rise time is $\tau_r = RC$

The Voltage reaches 10 % of its final value when

$$0.1 = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}}, t = 0.105\tau_r$$

The Voltage reaches 90 % of its final value when

$$0.9 = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}}, t = 2.30\tau_r$$

The 10 to 90 % rise time is then $\tau_r = (2.3 - 0.105)\tau_r = 2.19RC$.

- 45) For the circuit in Problem 44, let the input be $V_{in} = \cos \omega t$. Compute and plot the capacitor voltage versus ω . Show that the circuit's 3-dB bandwidth is $f_{3-dB} = 0.35/t_r$, where t_r is the 10 - 90% rise time.

Solution:

$$V_{in} = \cos \omega t$$

$$V_{out} = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \times \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$|V_{out}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau_r)^2}}$$

$$|V_{out}|_{\max} = 1 \text{ when } \omega = \frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{RC} \rightarrow |V_{out}| = |V_{out}|_{\max} / \sqrt{2}$$

Since the power is proportional to $|V_{out}|^2$ then $\omega = \frac{1}{RC}$ is the 3-dB bandwidth.

Thus, $f_{3-dB} = \frac{1}{2\pi RC}$ and from problem 44, $\tau_r = RC = \frac{t_r}{2.19}$ where t_r is

the 10 % to 90% rise time. Thus: $f_{3-dB} = \frac{0.35}{t_r}$.

- 46) Photo detected current flows through a resistor R . This current is proportional to the optical power. Prove that a change in optical power (expressed in decibels) is equal to half the change in electrical power (expressed in decibels).

Solution:

$i = aP_o$ and $P_o = R.i^2$ where
 i = electrical current.

P_o = optical power.

a = proportionality constant.

P_e = electrical power

Thus, $P_e = R(aP_o)^2 = a^2 RP_o^2$

Let P_{o1}, P_{o2} be two different optical power levels and P_{e1}, P_{e2} be the corresponding electrical power levels, then:

$$\frac{P_{e1}}{P_{e2}} = \frac{a^2 RP_{o1}^2}{a^2 RP_{o2}^2} = (P_{o1} / P_{o2})^2$$

In dB, $10 \log_{10}(P_{e1} / P_{e2}) = 20 \log_{10}(P_{o1} / P_{o2})$

$$10dB_{elec} = 20dB_{optical} \Rightarrow 2dB_{optical} = dB_{electrical}$$

-
- 47) Assume that the optical power from a LED varies with modulation frequency. Show that the 3dB-optic and detected electrical bandwidths are related by $f_{3dB(optical)} = 1.73 f_{3dB(electrical)}$.

Solution:

The 3 dB optical bandwidth occurs when $P_{sp} / \alpha I_{sp} = 1/2$ so

$$1/2 = 1 / \sqrt{1 + (w\tau)^2}, w = \sqrt{3} / \tau = 2\pi f_{3dB(electrical)}$$

$$\text{Thus, } \frac{f_{3dB(optical)}}{f_{3dB(electrical)}} = (3^{0.5} / 2\pi\tau) / (0.5\pi\tau) = 1.73$$

48) The relationship of optical power to current for an LED is given by $P = 0.02 i$. The maximum allowed power is $10[mW]$. The LED has a dc bias current and a $1[MHz]$ ac current applied.

(a) Sketch the power-current curve (that is, the diode's transfer characteristic).

(b) If the peak signal power is $2[mW]$ and the peak total power is $10[mW]$, compute the total peak current, the dc bias current, the average optical power, and the modulation index, (which is peak signal power)/(average power).

(c) Repeat if the modulation index is now 100% (and so the peak signal power is no longer $2[mW]$).

(d) Let the dc current be $50[mA]$ and the peak ac current be $75[mA]$. Plot the output power versus time for two cycles of the ac signal.

Solution:

(a)

$$P = 0.02i, f = 10^6 [Hz], i = I_{DC} + I_{SP} \sin w\tau$$

$$P = P_{DC} + P_{SP} \sin \tau$$

(b)

$$P_{DC} = P_{PEAK} - P_{SP} = 10 - 2 = 8[mW]$$

$$I_{DC} = P_{DC} / 0.02 = 400[mA], I_{SP} = P_{SP} / 0.02 = 100[mA]$$

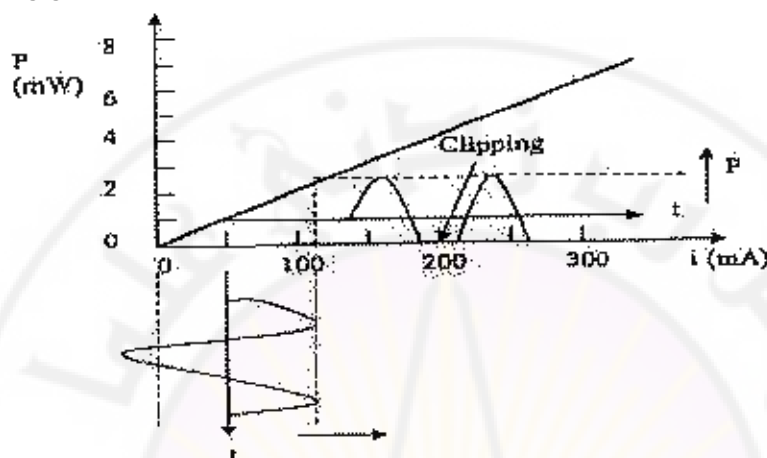
$$I_{PEAK} = 500[mA], m = P_{SP} / P_{DC} = 0.25 = 25\%$$

(c)

$$m = 1, P_{PEAK} = 10[mW], I_{DC} = 250[mA]$$

$$I_{SP} = 250[mA], P_{DC} = 5[mW], P_{SP} = 5[mW]$$

(d)



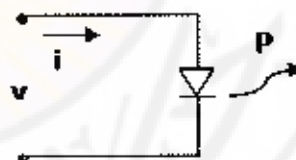
- 49) When an LED has 2[V] applied to its terminals, it draws 100[mA] and produces 2[mW] of optical power. What is the LED's conversion efficiency from electrical to optical power?

Solution:

$$P_{elec.} = vi = 2 \times 100 = 200[mW] = P_{in}$$

$$P_{opt} = 2[mW] = P_{out}$$

$$\eta = P_{out} / P_{in} = 2[mW] / 200[mW] = 0.01 \Rightarrow \eta = 1\%$$



- 50) An LED has a 3-dB electrical bandwidth (determined entirely by its carrier lifetime) of 100[MHz]. Compute the carrier lifetime. Plot the diode's normalized frequency response for 0 - 500 [MHz].

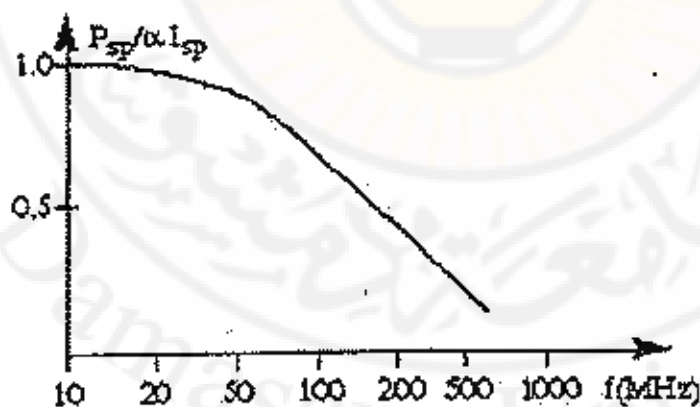
Solution:

$$F_{3dB} = 10^8 [\text{Hz}] \Rightarrow \tau = \frac{1}{2\pi f_{3dB}} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 10^6} = 1.59 [\text{ns}] \Rightarrow$$

$$\frac{P_{SP}}{\alpha I_{SP}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

$$\frac{P_{SP}}{\alpha I_{SP}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/10^8)^2}}$$

$f [\text{Hz}]$	$\frac{P_{SP}}{\alpha I_{SP}}$
1 M	0.999
100 M	0.707
200 M	0.447
300 M	0.316
400 M	0.242
500 M	0.196



51) Compute the band gap energy of GaAs in joules.

Solution:

$$\lambda = 1.24 / W_g$$

Which the Wavelength at GaAs is $0.9[\mu m]$. So:

$$W_g = 1.24 / 0.9 = 1.4[ev]$$

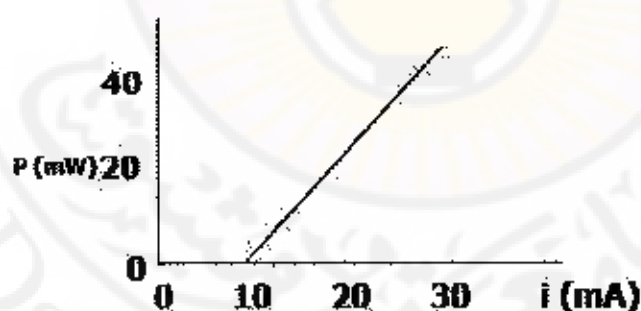
$$W_g = \frac{(1.6 \times 10^{-19})[J](1.4)[ev]}{1[ev]} = 1.24 \times 10^{-19}[Joules]$$

52) A laser diode has the threshold current $10[mA]$, and the slope of its optical power versus its input current is $2[mW/mA]$. The total diode current in mA is $i = 20 + \sin \omega t$.

(a) Write the equation of the output power and sketch it.

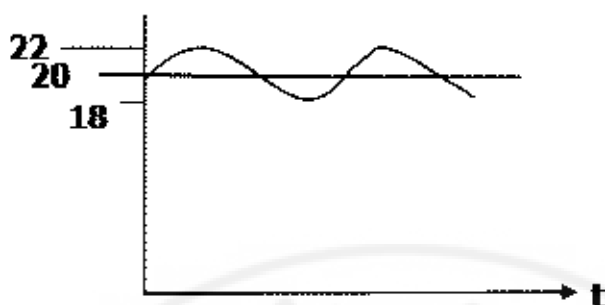
(b) Sketch the output-power waveform if the current is changed to $i = 10 + \sin \omega t$.

Solution:



$$i = 20 + \sin \omega t$$

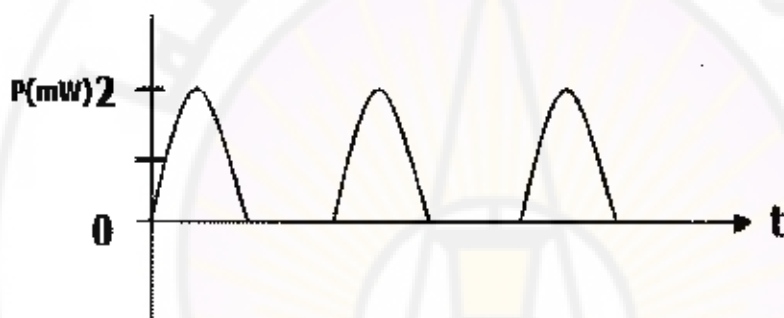
(a) $P = 20 + 2 \sin \omega t [mW]$



(b) $i = 10 + \sin \omega t$

$P = 2 \sin \omega t$ for the positive part of the sine wave cycle.

$P = 0$ when $\sin \omega t < 0$.



- 53) Compare the relative advantages and disadvantages of light-emitting diodes and laser diodes.

Solution:

LEDs	Laser Diodes
1) Cheap	1) Can be costly
2) -----	2) Couples more efficiently into fibers
3) -----	3) Fast, high data rates, large bandwidths
4) Economic for low – rate systems	4) -----

- 54) How much current is produced by a photo detector whose responsively is $0.5[A/W]$ if the incident optical power level is $-43[dBm]$?

Solution:

$$-43[dBm] = 10 \log_{10} P[mW], P = 5 \times 10^{-5} [mW]$$

$$i = \rho P = 0.5 \times 5 \times 10^{-5} = 2.5 \times 10^{-5} [mA]$$

- 55) Compute the rise time of a photo detector if its 3-dB bandwidth is 500 MHz

Solution:

$$t_r = 0.35 / f_{3dB} = 0.35 / 5 \times 10^8 = 7 \times 10^{-10} [s] = 700 [ps]$$

- 56) Calculate the cutoff wavelength and frequency of a vacuum photo detector whose photo- cathode has a work function equal to $2 \times 10^{-19} [J]$.

Solution:

$$\Phi = 2 \times 10^{-19} [J] \times \frac{1[eV]}{1.6 \times 10^{-19} [J]} = 1.25 [eV]$$

$$\lambda = 1.24 / \Phi = 0.99 [\mu m]$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{0.99 \times 10^{-6}} = 3.03 \times 10^{14} [Hz]$$

- 57) Rewrite Equation for the cutoff wavelength of a photo emissive photo detector so that it will be correct if the work function is given in joules and the wavelength in meters.

Solution:

$\lambda = 1.24 / \Phi$, where λ is in $[\mu m]$ and Φ is in $[eV]$.

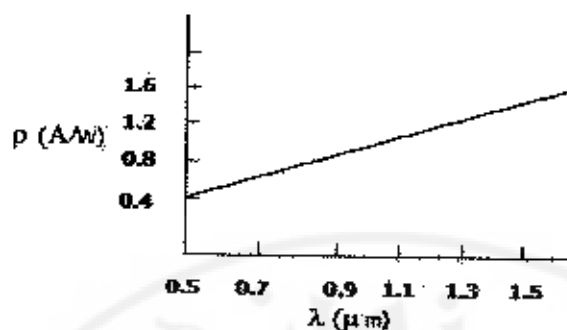
$$\lambda = \frac{1.24}{\Phi [Joules]} \times \frac{1.6 \times 10^{-19} [Joules]}{1 [eV]} \times \frac{1 \times 10^{-16} [m]}{[\mu m]} = \frac{1.98 \times 10^{-25}}{\Phi}$$

- 58) Compute and plot the responsivity of an ideal photo detector (i.e., one whose quantum efficiency is unity) for wavelengths between 0.5 and 1.7 $[\mu m]$. Why does responsivity increase with wavelength?

Solution:

$$\rho = \eta \frac{e\lambda}{hc} = \frac{1(1.6 \times 10^{-19})\lambda}{(6.63 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}$$

$\lambda [\mu m]$	$\rho [A/W]$
0.5	0.4
1.1	0.88
1.7	1.37



- 59) Find the output current of a photo detector whose quantum efficiency is 0.9. The wavelength is $1.3[\mu\text{m}]$, and the incident power level is $-37[\text{dBm}]$. Also, compute the resulting output voltage when the load resistance is $50[\Omega]$, $1000[\Omega]$, $1[\text{M}\Omega]$.

Solution:

$$\rho = \mu \frac{e\lambda}{hc} = \frac{(0.9)(1.6 \times 10^{-19})(1.3 \times 10^{-6})}{(6.63 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)} = 0.945 [\text{A/W}]$$

$$-37 = 10 \log_{10} P \Rightarrow P = 2 \times 10^{-4} [\text{mW}]$$

$$i = \rho P = 1.88 \times 10^{-4} [\text{mA}]$$

$$V = iR$$

$$R = 50[\Omega] \Rightarrow V = 9.4 [\mu\text{V}]$$

$$R = 1000[\Omega] \Rightarrow V = 188 [\mu\text{V}]$$

$$R = 10^6[\Omega] \Rightarrow V = 188 [\mu\text{V}]$$

- 60) Repeat Problem 59 if a photomultiplier having four dynodes (each having the gain 4) is used. The quantum efficiency of the cathode is 0.9.

Solution:

$$\text{Gain} = G = \delta^N = 4^4 = 256, \rho = G \times 0.945 = 242$$

$$i = G \times 0.188 = 256 \times 0.188 = 48 [\mu A]$$

$$V_{R=50} = 50 \times 48 = 2400 [\mu V]$$

$$V_{R=1000} = 48000 [\mu V]$$

$$V_{R=10} = 48 \times 10^6 [\mu V]$$

- 61) Rewrite Equation for the cutoff wavelength of a PIN photodiode so that it will be correct if the band gap energy is in joules and the wavelength is in meters.

Solution:

$$hf = W_g \Rightarrow W_g = hc / \lambda$$

$$\lambda = \frac{hc}{W_g} = \frac{(6.63 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}{W_g} = \frac{1.98 \times 10^{-25}}{W_g [J]} [m]$$

- 62) Compute the band gap energy in joules for

(a) Silicon

(b) Germanium.

Solution:

$$\text{Si: } W_g = 1.1[\text{eV}] \times \frac{1.6 \times 10^{-19}[\text{J}]}{1[\text{eV}]} = 1.76 \times 10^{-19}[\text{J}]$$

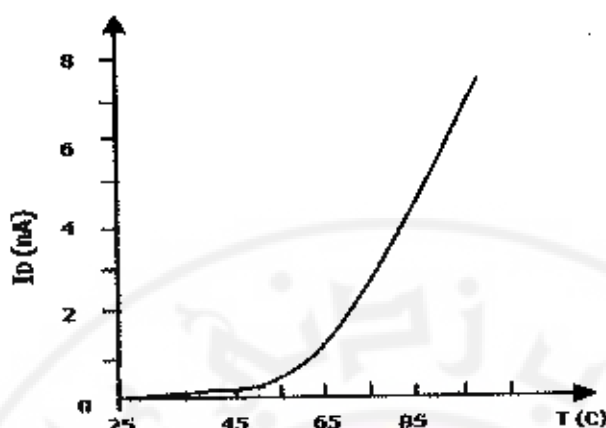
$$\text{Ge: } W_g = 0.67[\text{eV}] \times \frac{1.6 \times 10^{-19}[\text{J}]}{1[\text{eV}]} = 1.07 \times 10^{-19}[\text{J}]$$

-
- 63) Assume that the dark current of a PIN photodiode is $0.06[\text{nA}]$ at 25°C and doubles for every 10° increase. Compute and plot the dark current for temperatures from 25° to 95°C .

Solution:

$$I_D = 0.06[\text{nA}], T = 25^\circ[\text{C}]$$

$T[^\circ\text{C}]$	$I_D[\text{nA}]$
25	0.06
35	0.12
45	0.24
55	0.48
65	0.96
75	1.92
85	3.84
95	7.68



- 64) For the germanium PIN photodiode, how much optical power is required to produce a photocurrent equal to the detector's dark current?

Solution:

$$\rho = 0.7 [A/W], I_D = 200 [nA], i = \rho \cdot P = I_D, P = I_D / \rho = 286 [nW]$$

$$dBm = 10 \log_{10}(286 \times 10^{-6}) = -35.4 [dBm]$$

- 65) Consider a PIN detector circuit. The battery voltage is 10[V], the load resistance is 2[MΩ], the detector's responsivity is 0.25[A/W] and the dark current is 0.5[nA].

(a) Draw the diode's voltage-current characteristic in the photoconductive region for incident power levels ranging from 5 to 50 [μW] and differing by 5[μW].

(b) Draw the load line on the curve.

(c) Draw a curve of output voltage versus input optical power.

(d) At what value of the optical power does the detector saturate?

Solution:

(a)

$$i = 0.25P$$

$$P = 5[\mu\text{m}], i = 1.25[\mu\text{A}]$$

$$P = 50[\mu\text{W}], i = 12.5[\mu\text{A}]$$

(b)

$$\text{Load-line equation: } 10 + v_D + i_D(2 \times 10^6) = 0$$

$$\text{If } i_D = 0, \text{ then } v_D = -10[\text{V}]$$

$$\text{If } v_D = 0, \text{ then } i_D = \frac{-10}{2 \times 10^6} = -5[\mu\text{A}]$$

(c)

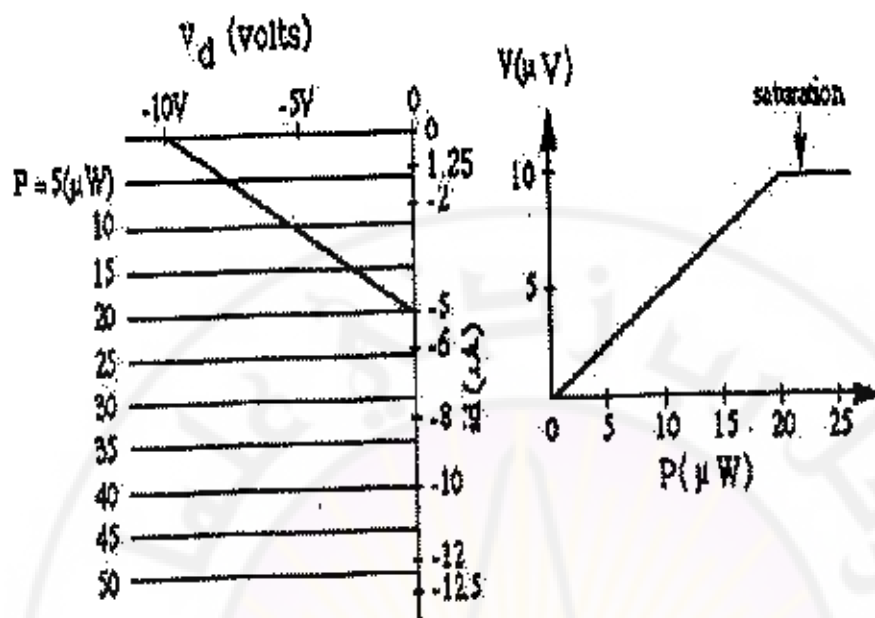
$$v = i_D R_L = \rho P R_L = 0.5 \times 10^6 P$$

(d)

Saturation occurs when

$$i_D = -5[\mu\text{A}] \text{ or } P = I_D / \rho = 20[\mu\text{W}]$$

$P[\mu\text{W}]$	$v[\text{V}]$
0	0
5	2.5
20	10
25	Saturated



- 66) Suppose that a PIN photodiode has a depletion width of $30[\mu m]$, a carrier velocity of $5 \cdot 10^4 [m/s]$, and a junction capacitance of $6[pF]$.

- Compute the transit-time-limited bandwidth.
- What is the largest load resistance that will not affect the bandwidth just calculated?
- What is the bandwidth if the load resistance is $10,000[\Omega]$?

Solution:

(a)

$$t_r = \frac{W_d}{v} = \frac{30 \times 10^{-6} [m]}{5 \times 10^4 [m/s]} = 6 \times 10^{-10} [s]$$

$$f_{3dB} \cong 0.35 / t_r = 583 [MHz]$$

(b)

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_L C_d}, \text{ Set } f_{3dB} = 4 \times (\text{transit time limit}),$$

$$R_L = \frac{1}{2\pi(6 \times 10^{-12})(4 \times 583 \times 10^6)} = 11.37[\Omega]$$

(c)

$$\text{If } R_L = 10^4[\Omega] \Rightarrow$$

$$F_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_L C_d} = 2.65 \times 10^6[\text{Hz}]$$

-
- 67) Compute the responsivity of a silicon APD operating at $0.82[\mu\text{m}]$ and having the quantum efficiency 0.8 if its gain is 100. How much optical power is needed by this detector to produce $20[\text{nA}]$?

Solution:

$$\rho = M \eta \frac{e\lambda}{hc} = \frac{100 \times 0.8 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.82 \times 10^{-6}}{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 53[A/W]$$

$$P = i / \rho = 20[\text{nA}] / 53[\text{nA/nW}] = 0.38[\text{nW}] \text{ or } \text{dBm} = -64.2[\text{dBm}]$$

- 68) Compute the responsivity of an In GaAs APD operating at $1.55[\mu\text{m}]$ and having the quantum efficiency 0.7 if its gain is 10. How much optical power is needed by this detector to produce $20[\text{nA}]$?

Solution:

$$\rho = M \eta \frac{e\lambda}{hc} = \frac{10 \times 0.7 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.55 \times 10^6}{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 8.7 [A/W]$$

$$P = i / \rho = 20 [nA] / 8.7 [nA/nW] = 0.23 [nW] \text{ or } dBm = -56 [dBm]$$

- 69) Compare the advantages and disadvantages of PIN photodiodes relative to avalanche photodiodes.

Solution:

PIN Photodiodes	APD
1) Cheap	1) Expensive
2)	2) Sensitive
3) Low voltage requirement	3) High voltages needed
4) Simple circuits	4) Complex circuits
5)	5) Temperature sensitive

- 70) Compare the relative advantages of fiber systems operating at 800, 1300, and 1550[nm].

Solution:

800 [nm]	1300 [nm]	1550 [nm]
1) Cheapest components	1) Moderate cost	1) Most costly
2) High fiber loss	2) Low fiber loss	2) Lowest fiber loss
3) High dispersion	3) Zero dispersion	3) Low dispersion

- 71) The PIN-diode receiver has a $1[k\Omega]$ resistor. The voltage across the resistor is $0.2[mV]$ when the incident optical power is $800[nW]$. What is the detector's responsivity?

Solution:

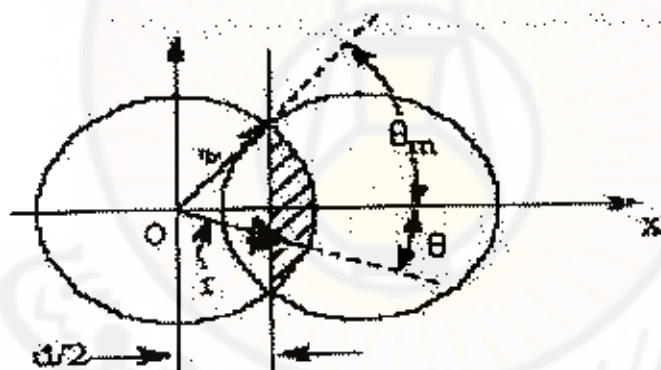
$$i = v/R = 0.2[mV]/10^3 = 0.2 \times 10^{-3}/10^3 = 0.2 \times 10^{-6}[A]$$

$$i = 0.2[\mu A], P = 800[nW] = 0.8[\mu W] \Rightarrow$$

$$\rho = i/P = 0.2/0.8 = 0.25[\mu A/\mu W]$$

- 72) Computing the area of overlap of two fiber cores. Perform the evaluation by integration.

Solution:



$$\cos \theta = \frac{d/2}{r}, \cos \theta_m = \frac{d/2}{a}, \theta_m = \cos^{-1} \frac{d/2}{a}$$

The area of overlap of the two fiber cores is:

$$A = 4 \int_0^{\theta_m} \int_{d/2 \cos \theta}^a r dr d\theta = 4 \int_0^{\theta_m} \left[\frac{r^2}{2} \right]_{d/2 \cos \theta}^a d\theta$$

$$A = 2 \int_0^{\theta_m} [a^2 - (d/2 \cos \theta)^2] d\theta$$

$$A = 2 \left(a^2 \theta_m - \frac{d^2}{4} \int_0^{\theta_m} \frac{d\theta}{\cos^2 \theta} \right)$$

From integral tables, we find: $\int d\theta / \cos^2 \theta = \tan \theta$

Using this, we obtain:

$$A = 2 \left[a^2 \theta_m - (d^2/4) \tan \theta_m \right]$$

$$A = 2 \left[a^2 \cos^{-1}(d/2a) - (ad/2) [1 - (d/2a)^2]^{1/2} \right]$$

The angle θ_m is in radians in this expression.

The coupling efficiency is the fractional overlap, which is:

$$\eta = A / \pi a^2$$

$$\eta = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) - \frac{d}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right]$$

73) Use Eq. (8.1) to confirm at least four points on Fig. 8.3.

Solution:

$$\left[\cos^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) - \frac{d}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right]$$

$$L = -10 \log_{10} \mu$$

$d/2a$	η	$L_{\text{(equation)}}$	$L_{\text{(figure)}}$
0	1	0	0
0.1	0.87	0.5904	0.59
0.2	0.75	1.2664	1.25
0.28	0.65	1.8829	1.88
0.35	0.56	2.4900	2.48

74) At what value of fractional lateral offset is the loss equal to 10[dB] for the multimode SI fiber?

Solution:

$$L = -10 \log_{10} \eta \Rightarrow 10 = -10 \log_{10} \eta \Rightarrow \eta = 0.1$$

$$\eta = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) - \frac{d}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right]$$

$$0.1 = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) - \frac{d}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right]$$

$$\text{Let } \cos^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) = t$$

Then, $\cos t = d/2a, 1 - (d/2a)^2 = 1 - \cos^2 t = \sin^2 t$, thus:

$$t - d/2a \sqrt{\sin^2 t} = 0.1(\pi/2) = 0.157$$

$$t - \cos t \sin t = 0.157$$

Now use the identity, $\sin 2t = 2 \sin t \cos t$, leaving:

$$t - \frac{\sin 2t}{2} = 0.157$$

Solve by iteration:

$$t = 0.634 [\text{radians}]$$

$$d/2a = \cos t = \cos 0.634 = 0.805$$

- 75) Repeat Problem 74 for a single-mode fiber. Assume that $V = 2.4$.**

Solution:

$$L = -10 \log_{10} \left[\exp \left(- \left(\frac{d}{w} \right)^2 \right) \right] = 10$$

Solve for d/w

$$d/w = d/1.1a = 1.5174, d/a = 1.67, d/2a = 0.835$$

- 76) A single-mode fiber contains a beam whose spot size is $5[\mu\text{m}]$ what lateral offset will produce $0.5[\text{dB}]$ of loss? Assume that $V = 2.4$.**

Solution:

$$V = 2.4 \text{ implies } w = 1.1a.$$

$$L = -10 \log_{10} \left[e^{-(d/w)^2} \right] = 0.5$$

$$d/w = 0.3393$$

$$d = (0.3393)(5) = 1.7[\mu\text{m}]$$

- 77) Compute the normalized intensity of the beam at the core-cladding interface of a SI single-mode fiber if $V = 2.4$. Assume that the propagating beam is Gaussian.

Solution:

$$I/I_0 = e^{-(2r^2/w^2)}, V = 2.4 \text{ so that } w = 1.1a \text{ then at } r = a:$$

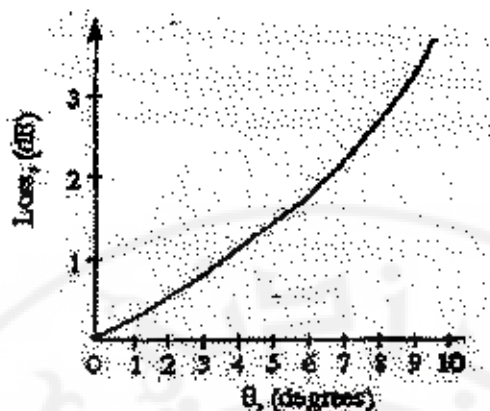
$$I/I_0 = e^{-2/1.1^2} = 0.19$$

- 78) Plot the loss (in dB) versus the angular misalignment for a multimode SI fiber if it's $NA = 0.1$ and air fills the groove formed by the fibers. The misalignment angle should range from 0° to 10° .

Solution:

$$L = -10 \log_{10} \left(1 - \frac{n_0 \theta}{\pi NA} \right) = -10 \log_{10} \left(1 - \frac{10\theta}{\pi} \right), \text{ where } \theta \text{ is in radians.}$$

θ (deg)	θ (rad)	L (dB)
0	0	0
1.0	0.017	0.248
2.0	0.035	0.512
3.0	0.052	0.792
5.0	0.087	1.413
7.0	0.122	2.139
9.0	0.157	3.010
10.0	0.175	3.522



- 79) Plot the loss (in dB) versus the misalignment angle for a single-mode fiber having $n_1=1.47$, $n_2=1.468$, and $V=2.4$. Vary the angle from 0° to 4° . Let the wavelength be $0.8[\mu\text{m}]$, but then repeat the problem for a $1.3[\mu\text{m}]$ wavelength.

Solution:

$$V = (2\pi a / \lambda)(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = 2.4, \text{ then:}$$

$$a = 4.983\lambda \text{ and } w = 1.1a$$

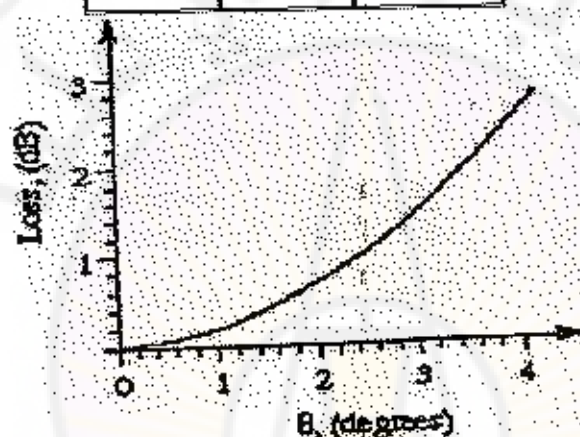
$$L = -10 \log_{10} \left\{ \exp \left[-(\pi n_2 w \theta / \lambda)^2 \right] \right\}$$

$$\text{For } \lambda = 0.8[\mu\text{m}] \rightarrow L = -10 \log_{10} \left\{ \exp \left[-(25.28\theta)^2 \right] \right\}$$

$$\text{For } \lambda = 1.3[\mu\text{m}] \rightarrow L = -10 \log_{10} \left\{ \exp \left[-(25.28\theta)^2 \right] \right\}$$

Since $w/\lambda = 1.1(4.983)$, the loss L is not wavelength dependent if V is the same at both wavelengths.

θ [deg]	θ [rad]	L [dB]
0	0	0
0.5	0.0087	0.2113
0.75	0.0131	0.4755
1.0	0.0175	0.8454
1.25	0.0218	1.3209
1.5	0.0262	1.9021
2.0	0.0349	3.3815
3.0	0.0524	7.6084
4.0	0.0698	13.5260

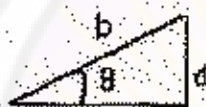
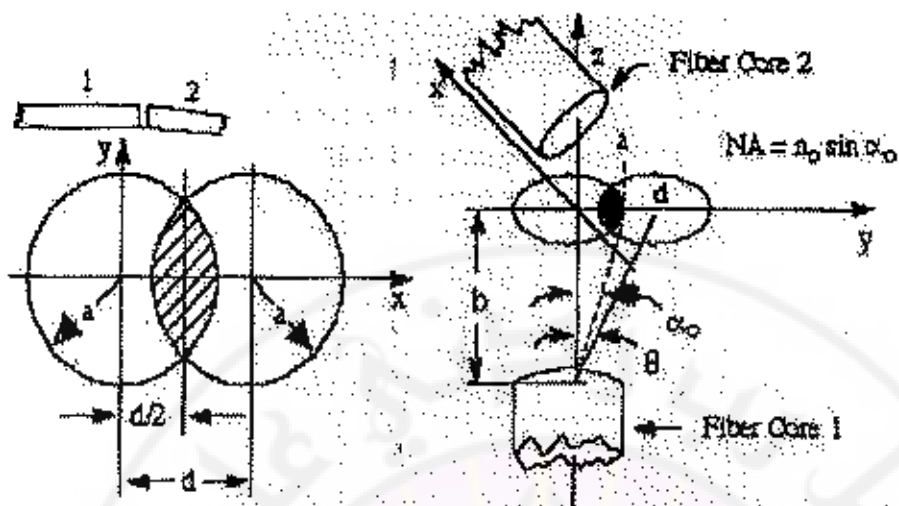


- 80) Derive Eq. $L = -10 \log_{10} \left(1 - \frac{n_0 \theta}{\pi NA} \right)$ for the loss caused by angular misalignment.

Solution:

Derive $L = -10 \log_{10} \left(1 - \frac{n_0 \theta}{\pi NA} \right)$

Where n_0 = index of refraction between the fiber ends, and θ is the angle of misalignment.



The hypotenuse of each of these triangles is approximately b since α_0 and θ are small.

$$a = b \sin \alpha_0,$$

$$d = b \sin \theta = b\theta$$

$$\eta = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) - \frac{d}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right]$$

$$\frac{d}{2a} = \frac{b \sin \theta}{2b \sin \alpha_0} \left(\frac{n_0}{n_0} \right) = \frac{n_0 \theta}{2NA}$$

Since this is small, $\sqrt{1 - (d/2a)^2} \approx 1$ then;

$$\eta = \frac{2}{\pi} \left(\cos^{-1}(0) - \frac{n_0 \theta}{2NA} \right) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{n_0 \theta}{2NA} \right) = 1 - \frac{n_0 \theta}{\pi NA} \text{ and}$$

$$L = -10 \log_{10} \left(1 - \frac{n_0 \theta}{\pi NA} \right)$$

- 81) Plot the spot size versus wavelength for a SI fiber whose single-mode cutoff wavelength is 1250[nm] and whose NA is 0.1. The wavelength range should be 1250 - 1600 [nm]. Also, compute and plot the lateral offset loss versus wavelength if the offset is 1[μm]

Solution:

$$w/a = 0.65 + 1.619V^{-3.2} + 2.879V^{-6}, V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA$$

$$\text{At cutoff: } a = \frac{2.405\lambda}{2\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

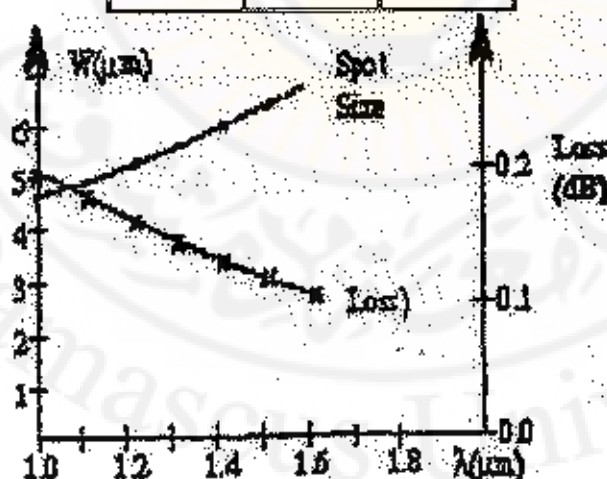
$$a = 2.405\lambda / (2\pi NA) = 4.785[\mu m]$$

$$V = (2\pi a / \lambda) NA = 3 / \lambda[\mu m]$$

Lateral offset loss

$$L = -10 \log_{10} e^{-(d/w)^2}$$

$\lambda [\mu m]$	$w [\mu m]$	$L [dB]$
1.0	4.62	0.203
1.2	5.12	0.166
1.4	5.74	0.133
1.6	6.46	0.104



- 82) Plot the loss (in dB) versus the end spacing for the single-mode fiber described in Problem 81. Let the wavelength be 0.8 and then 1.3 μm . Vary the spacing from 0 to 500 μm .

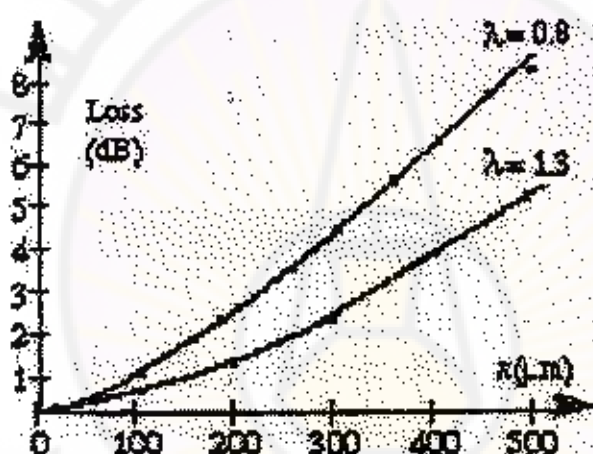
Solution:

$$L = -10 \log_{10} \left[\frac{4(4z^2 + 1)}{(4z^2 + 2)^2 + 4z^2} \right]$$

$$z = x\lambda / 2\pi m_2 w^2$$

$$\lambda = 0.8 [\mu\text{m}] \rightarrow z = 4510x$$

$$\lambda = 1.3 [\mu\text{m}] \rightarrow z = 2776x$$



مسائل عامة

1- يوصل ليفان طولهما $1[km]$ توصيلاً دائماً .خسارة كل ليف $5[db]$ وخسارة الوسيلة الدائمة $1[db]$ وإذا كانت القدرة الداخلة $2[mW]$ فكم تبلغ القدرة المستلمة في نهاية خط الإرسال المركب هذا؟

2- يتطلب مستقبل قدره دخل مقدارها $10[nW]$. فإذا كانت خسارات النظام تصل حتى $50[db]$ فكم تبلغ القدرة المطلوبة من المنيح؟

3- إذا كان معدل الإرسال الهاتفي عند السوية T_3 هو $44.7[Mbps]$. وكانت كل رسالة هاتفية تشغل $6400[bps]$. فكم عدد الرسائل التي يمكن إرسالها سوية على هذا النظام؟ في النظام الفعلي تستعمل 672 قناة رسالة بينما تستعمل النبهضات الإضافية لوظائف أخرى كالترزامن.

4- يرد 10^{10} فوتون بالثانية عند طول موجة $0.8[\mu m]$ على كاشف ضوئي. احسب القدرة الواردة على الكاشف. فإذا كان هذا الكاشف يحول الضوء إلى تيار بمعدل $0.65[\mu A/\mu W]$ فما هي شدة التيار الناتج.

5- افترض أنه يمكن انظام رقمي أن يعمل بمعدل معطيات يساوي 1% من التردد الحامل. احسب معدل البتات المسموح به باستعمال حوامل ذات ترددات $1[KHz]$ و $1[MHz]$ و $100[MHz]$ و $106[Hz]$ وطول موجة $1[\mu m]$.

6- كم عدد الألفية الصوتية التي يمكن تعديلها عند طول موجة $1.06[\mu m]$ ؟ افترض عرض نظام مساوي إلى 1% من تردد الحامل.

7- ارسم بياناً فتحة النفوذ العددية مقابل زاوية القبول من أجل المدى $0 \leq N_A \leq 0.7$ افترض أن دليل انكسار المادة المحيطة هو 1.

8- احسب من أجل السيليكا، انبساط النبضة لوحدة الطول إذا كان طول موجة المنبع: $\lambda = 0.85[\mu m]$ والعرض الطيفي $\Delta\lambda = 30[nm]$. كرر الحساب من أجل عرض طيفي مقداره $2[nm]$.

9- يبلغ القطر الخارجي للليف سيليكا $100[\mu m]$. ما هو الحجم الكلي لطول $1[km]$ من هذا الليف؟ يلف هذا الليف على بكره قطرها $20[cm]$ وارتفاعها $10[cm]$. احسب قطر البكرة بعد اللف.

10- في ليف ذي دليل درجي SI لدينا: $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 1.4$ وقطر التواء $50[\mu m]$ اعتبر أن الشعاع الموجّه يسير وفق الزاوية الأكثر انحداراً بالنسبة لمحور الليف. فكم عدد الانعكاسات من هذا الشعاع لكل متر؟

11- برهن أن:

$$\cos \theta_c = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}$$

12- في ليف متكرو (GRIN)، ليكن: $n_1 = 1.5$ و $A = 0.01$ و $g = 2$ و $a = 50[\mu m]$.

أ- ارسم بيانياً بمقياس رسم مناسب n_{core} ضمن القلب.

ب- كرر ما سبق على نفس الرسم بعد تغيير g إلى 10

13- اعتبر ليف SI ذا: $n_1 = 1.5$ و $n_2 = 1.485$ عند $\lambda = 0.82[\mu m]$ إذا كان نصف قطر النواة $50[\mu m]$ فكم عدد الأساليب التي يمكن أن تنتشر؟ كثر ما سبق إذا تغير طول الموجة إلى $1.2[\mu m]$.

14- برهن أن القيمة العظمى لـ a/λ بالنسبة للليف ذي دليل قطع مكافئ وحيد الأسلوب هي أكبر بـ 1.6 مرة مما للليف SI وحيد الأسلوب (النموذج).

15- عندما يطبق جهد مقداره $2[V]$ على طرفي ثنائي LED يمر تيار مقداره $100[ma]$ وينتج قدرة بصرية مقدارها $2[mW]$ فكم تبلغ كفاءة التحويل للـ LED من القدرة الكهربائية إلى القدرة البصرية.

16- احسب طاقة ثغرة النطاق لـ $GaAs$ بالجول.

17- ما هي شدة التيار الذي ينتجه كاشف ضوئي ذو استجابة مقدارها $0.5[A/W]$ إذا كانت سوية القدرة البصرية الواردة هي $-43[dBm]$ ؟

18- أوجد تيار خرج كاشف ضوئي ذي كفاءة η تساوي 0.9 وطول الموجة يساوي $1.3[\mu m]$ وسوية القدرة الواردة تساوي $-37[dBm]$ واحسب جهد الخرج الناتج أيضاً إذا كانت مقاومة الحمل $50[\Omega]$ و $100[\Omega]$ و $1[m\Omega]$.

19- احسب طاقة ثغرة النطاق بالجول من أجل:

أ- السيليكون

ب- الجرمانيوم

20- احسب استجابة APD نوع $InGaAs$ يعمل عند التردد $\lambda = 1.55[\mu m]$ وذو كفاءة كم تساوي 0.7 وريح يساوي 10. ما مقدار القدرة البصرية المطلوبة لهذا الكاشف لكي ينتج $20[nA]$ ؟

21- ارسم بيانياً الخسارة مقدرة بالديسبل مقابل عدم التراصيف الزاوي للليف SI وحيد الأسلوب إذا كانت فتحة نفوذه العددية $N_A = 0.1$ وكان الهواء يملأ الأخدود الذي يشكله الليفان وإن زاوية عدم التراصيف تتراوح بين 0° و 10° .

22- ارسم بيانياً الخسارة (الضياح) مقدرة بالديسبل مقابل عدم التراصيف الزاوي وحيد الخط ذي $n_1 = 1.47$ و $n_2 = 1.468$ و $v = 2.4$ غير الزاوية من 0° إلى 4° واجعل طول الموجة λ مساوياً إلى $0.8[\mu m]$ ومن ثم كرر المسألة من أجل $\lambda = 1.3[\mu m]$.

23- ارسم بيانياً الخسارة بالديسبل مقابل الفاصل بين طرفي الليف وحيد الأسلوب الموصوف في المسألة السابقة. دع طول الموجة يساوي $0.8[\mu m]$ و $1.3[\mu m]$ وغيّر الفاصل من $0[\mu m]$ إلى $500[\mu m]$.

ترجمة المصطلحات

والتعابير الواردة في الكتاب وفق المعنى التي وردت به

<i>Absolute Temperature</i>	درجة الحرارة المطلقة
<i>Absorption</i>	امتصاص
<i>Acceptance</i>	قبول
<i>Acceptance Angle</i>	زاوية القبول
<i>Acceptance Cone</i>	مخروط القبول
<i>Acoustic</i>	صوتي
<i>Alignment</i>	تراسف
<i>Alternating</i>	متناوب
<i>Alternating Current</i>	تيار متناوب
<i>Analog</i>	تمائلي
<i>Analog Modulation</i>	تعديل تمائلي
<i>Analog Signal</i>	إشارة تمائلية

<i>Angle</i>	زاوية
<i>Angular Dispersion</i>	التشتيت الزاوي
<i>Anode</i>	مصعد
<i>Aperture</i>	فتحة النفوذ
<i>Area</i>	مساحة
<i>Area Mismatch Loss</i>	خسارة عدم التوافق المساحي
<i>Array Connector</i>	موصل صفيفي
<i>Attenuation</i>	تخامد
<i>Audio</i>	سمعي
<i>Avalanche</i>	جرفي
<i>Average</i>	وسطي
<i>Average Time</i>	الزمن الوسطي
<i>Critical Angle</i>	زاوية حرجة
<i>Numerical Aperture</i>	فتحة النفوذ العددية
<i>Viewing Angle</i>	زاوية الرؤية

B

<i>Band</i>	مجال - نطاق
<i>Band Gap</i>	ثغرة المجال
<i>Band Width</i>	عرض النطاق
<i>Barrier</i>	حاجز
<i>Base Band</i>	النطاق الأساسي
<i>Beam</i>	حزمة
<i>Bias</i>	انحياز
<i>Bit</i>	خانة
<i>Block Diagram</i>	مخطط كتلي
C	
<i>Cable</i>	كابل
<i>Call</i>	نداء
<i>Capacity</i>	سعة
<i>Carrier</i>	حامل

<i>Carrier Life Time</i>	مدة حياة الحامل
<i>Cavity</i>	تجويف
<i>Cavity Resonance</i>	طنين التجويف
<i>Laser Cavity</i>	تجويف ليزري
<i>Channel</i>	قناة
<i>Information Channel</i>	قناة المعلومات
<i>Characteristics</i>	خواص
<i>Charge</i>	شحنة
<i>Chip</i>	رقاقة
<i>Cladding</i>	غلاف
<i>Code</i>	رمز
<i>Reflection Coefficient</i>	معامل الانعكاس
<i>Coherent</i>	متناسك
<i>Core</i>	قلب - نواة
<i>Coupler</i>	موزع - قارن

Cutoff قطع

Cycle دورة

D

Dark ظلام

Dark Current تيار الظلام

Data Rate معدل المعطيات

Delay تأخير

Depletion فقيرة

Detector كاشف

Light Detector كاشف ضوئي

Diffraction انعراج

Digit رقم

Digital System نظام رقمي

Dispersion تشتيت

Distortion تشوه

Material Dispersion

تشتيت المادة

E

<i>Edge</i>	حافة
<i>Edge Emitting Diode</i>	ثنائي باعث حافي
<i>Efficiency</i>	كفاءة
<i>Emission</i>	انبعاث
<i>Energy</i>	طاقة
<i>Energy Barrier</i>	حاجز الطاقة
<i>Gap Energy</i>	طاقة الفجوة
<i>Energy Level</i>	سوية الطاقة
<i>Equalizer</i>	دارة تسوية
<i>Equivalent</i>	مكافئ
<i>Error</i>	خطأ
<i>Error Rate</i>	معدل الخطأ
<i>Etched</i>	محفور

F

<i>Factor</i>	عامل
<i>Modulation Factor</i>	عامل التعديل
<i>Propagation Factor</i>	عامل الانتشار
<i>Feedback</i>	تغذية خلفية
<i>Ferrule</i>	طوق
<i>Fiber</i>	ليف
<i>Glass Fiber</i>	ليف زجاجي
<i>Fiber System</i>	نظام ليفي
<i>Fiber Optics</i>	بصريات الليف
<i>Fiber Link</i>	وصلة ليفية
<i>Filter</i>	مرشح
<i>Frame</i>	إطار
<i>Free</i>	حر
<i>Frequency</i>	تردد

Normalized Frequency التردد المقيس

Function تابع

Fundamental أساس

Fuzzy ضبابي

G

Gain ربح

Gap ثغرة المجال

Band Gap ثغرة النطاق

Graded متدرج

Graded Index (GRIN) الدليل المتدرج

GRIN Fiber الليف ذو الدليل المتدرج

Guide دليل

Wave Guide دليل موجة

H

Harmonic توافقية

Hybrid

هجين

I

Image

صورة

Impedance

ممانعة

Impurity

شائبة

Index

دليل

Refractive Index

دليل الانكسار

Information Channel

معلومات

Information Capacity

سعة المعلومات

Interference

تداخل

J

Jacket

غلاف واقٍ

Junction

وصلة

Junction Photodiode

ثنائي ضوئي ذو الوصلة

K

Keying

البراق

L

Lens

عدسة

Light

ضوء

Link

وصلة

Load

حمل

Loss

خسارة

Lousy Material

مادة فاقدة

M

Mechanism

آلية

Mode

أسلوب - نموج

Propagating Mode

أسلوب منتشر

Hybrid Mode

أسلوب هجين

Multiplexing

التجميع

Noise

N

Noise Figure

Normalized

Numerical

Numerical Aperture

Optics

Fiber Optics

Optic Fibers

Orbit

Output

Output Spectrum

meter

P

طيف الخرج

محددة

<i>Solid</i>	صلب
<i>Space</i>	فراغ
<i>Spectrum</i>	طيف
<i>Splice</i>	وصلة دائمة - غير مؤقتة
<i>Spot</i>	بقعة
<i>Spread</i>	انبساط
<i>Switch</i>	مفتاح
<i>Synchronize</i>	يزامن
<i>T</i>	
<i>Tone</i>	نغمة
<i>Transverse</i>	عرضي
<i>Transverse Mode</i>	نمط عرضي
<i>Tube</i>	أليوب - صمام
<i>U</i>	
<i>Uniform</i>	منتظم

Unipolar

وحيد القطبية

V

Vibration

اهتزاز

Video

فيديو

W

Wave

موجة

Wave Guide

دليل موجة

Wave Number

العدد الموجي



جدول الاختصارات

المصطلح المختصر

المصطلح المشتق منه

LED	<i>Light Emmitting Diode</i>
LD	<i>Laser Diode</i>
IR	<i>Infrared</i>
EMI	<i>Electro-Magnetic Interference</i>
S-M	<i>Single Mode</i>
M-M	<i>Multi Mode</i>
PCS	<i>Plastic Core Silica</i>
GRIN	<i>Graded-Index</i>
MM-GI	<i>Multi Mode Graded-Index Fiber</i>
SM-GI	<i>Single Mode Graded-Index Fiber</i>
NdYAG	<i>Neod Yminum Yttium Aluminum-Garent</i>
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
MCVD	<i>Modifid Chemical Vapour Deposition</i>
OVD	<i>Outside Vapour Deposition</i>
TAT	<i>Telecommunication Project Through Atlantic</i>

SEA-ME-WE-2	<i>South-East Asian, Middle East, Western Europ 2</i>
FLAG	<i>Fiber Optic Cable Link Around the Globle</i>
WDM	<i>Wave Length-Division Multiplexing</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MUX	<i>Multiplexer</i>
BW	<i>Band Width</i>
ORL	<i>Optical Return Loss Test</i>
NA	<i>Numerical Aperture</i>

المراجع الأجنبية

- 1- Joseph C.Palais "Fiber optic communication", 5th Edition, Pearson Prentice Hall, 2005
- 2- Forrest M.Mims III "Alexander Graham Bell and the Photophone: The Centennial of the Invention of Light - Wave Communications 1980."
- 3- George Shortley and Dubley Williams Elements of Physics, 5th Edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1971.
- 4- Felix P.Kapron, Fiber Optics Handbook. Frederick C. Allard, ed. NY: MEGraw -Hill, 1990.
- 5- Donald B.Keck."Optical Fiber Waveguides in Fundamentals of Optical Fiber Communications" 2nd Edition. Edited by Michael K. Barnoski NewYork: Academic Press, Inc., 1981.
- 6- Joseph T. Verdeyen .Laser Electronics. Englewood Cliffs, NJ Prentice -Hall, Inc., 1981.
- 7- John M Senior, Fiber Optic Communications, Prentice Hall, 2nd Edition, 1992.
- 8- Peter K. Kaiser, Fiber Optic Communications, Pearson, 4th Edition, 2008.
- 9- R.G Smith and S. D. Presanick "Receiver Design for Optical Fiber Communication Systems" Edited by H. Kressen. Berlin: Springer-Velag 1980.
- 10- Bob Chomycz: Fiber Optic Installer's Field Manual, McGraw-Hill, 2000.

- 11-Djafar K. Mynbaev, Lowell L. Scheimer: *Fiber Optic Communications Technology*, Prentice Hall, 2001.
- 12-Fraze J. H, Jain V.K: *Optical Communication Component and Systems*, Alpha Science, 2000.
- 13-Jeff Hachet: *Understanding Fiber Optics*, Prentice Hall, 1999.
- 14-Robbert J. Hoss: *Fiber Optic Communication Design Handbook*, Prentice Hall, 1990.
- 15-Adam Smolinski: *Optoelektronika Swiatlowodowa*, Wydawnictwa Komunikacji, Warszawa, 1985.

المراجع العربية

- 1- د. جورج صنيح * الاتصالات بالألياف البصرية * المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم 1992.
- 2- خطوط النقل والألياف البصرية، الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج - السعودية 1998.

(تمت بحمد الله)

المقومون العلميون

الدكتور المهندس	الدكتور المهندس	الدكتور المهندس
عادل خضور علي	حسان فلوح	حسان ريشة

المدقق اللغوي

الدكتور علي الكردي

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة

لمديرية الكتب والمطبوعات

