جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة بابل

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء

الألياف البصرية وفوائدها في الاتصالات

بحث مقدم إلى

مجلس قسم الفيزياء كلية التربية للعلوم الصرفة كجزء متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في الفيزياء

من قبل الطالب

(منتظر جليل عبد الحسن)

بإشراف الأستاذ الدكتور

(علي عبيس محسن)

2023 م

1444 هـ

بسم الله الرحمن الرحيم

(وَلِيَعْلَمَ الَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ أَنَّهُ الْحَقُّ مِنْ رَبِّكَ فَيُؤْمِنُوا بِهِ فَتُخْبِتَ لَهُ قُلُوبُهُمْ ۗ وَإِنَّ اللَّهَ لَهَادِ الَّذِينَ آمَنُوا إِلَىٰ صِرَاطٍ مُسْتَقِيمٍ)

سورة الحج آية 54

الإهداء

بحمد الله نطوي سهر الليالي وتعب الأيام وخلاصة مشوارنا بين دفتي هذا العمل المتواضع

إلى منارة العلم إلى من بلغ الرسالة وادى الأمانة ونصح الأمة الى نبي الرحمة ونور العالمين .....سيدنا محمد (ص)

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار إلى من علمني العطاء بدون انتظار إلى من احمل إسمه بكل افتخار .....والدي العزيز رحمه الله

إلى معنى الحب والحنان والتفاني إلى بسمة الحياة إلى من كان دعائها سر نجاحي إلى من في الوجود..... أمي الغالية

إلى من يعطوني التفائل والأمل إلى من بهم افتخر إلى من بوجودهم اكتسب قوة ومحبة لا حدود لها.....عائلتي الكريمة

كلمة شكر وتقدير

لابد لنا ونحن نخطو خطواتنا الاخيرة في الحياة الدراسية الجامعية من وقفة نعود الى اعوام قضيناها في رحاب جامعة بابل مع اساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين بذلك جهودا كبيرة في بناء جيل الغد لتبعث الأمة من جديد وقبل ان نمضي نتقدم بأسمى آيات الشكر والأمتنان والتقدير والمحبة الى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة الى الذين مهدوا لنا طريق العلم والمعرفة

الى جميع أساتذتنا الأفاضل .....

المحتويات

ت	الموضوع	رقم الصفحة
1	الاية القرآنية	أ
2	الاهداء	ب
3	الشكر و التقدير	ج
4	المحتويات	د
5	قائمة الاشكال	هـ
6	الخلاصة	و
7	الفصل الاول : المقدمة : نظرة تاريخية	2
8	الليف البصري ومراحل تطوره	4
9	الالياف البصرية و ثورة الاتصالات	6
10	كابل الاليف البصرية وعمله	7
11	الفصل الثاني : مكونات الليف البصري	8
12	انواع الالياف البصرية	9
13	مميزات الالياف البصرية	11
14	كيفية انتقال الضوء في الالياف البصرية	14
15	استخدام الالياف البصرية في الاتصالات	16
16	الفصل الثالث : مكونات انظام	19
17	تطبيقات الالياف البصرية	21
18	كيف يصنع الليف البصري	23
19	طريقة التشويش	26
20	المصادر	30

قائمة الاشكال

ت	عنوان الشكل	الصفحة
1	شكل 1 حزمة من الالياف البصرية	2
2	شكل 2 مكونات الليف البصري	8
3	شكل3 اتساع النبض الناتج من انتشار الضوء	10
4	شكل 4 انتقال الضوء في الليف البصري	15
5	شكل5 احدى طرق صنع الليف الزجاجي	23
6	شكل 6 طريقة صنع الليف البصري	24
7	شكل 7 اختبار الليف البصري	25

الخلاصة

مما لا شك فيه ان تقنية استخدام الألياف البصرية تعتبر أحد أهم المراحل التي شهدتها ثورة الاتصالات في هذا القرن. حيث تمكنت هذه التقنية وبما تتمتع به من ميزات من تلافي عيوب ومشاكل نظم الاتصالات السابقة . لكنه وبالرغم من الميزات المتعددة التي تتمتع بها انظمة الاتصالات الحديثة والتي اعتمدت في الأساس على استخدام التقنية الضوئية عبر الألياف البصرية, الا أن النظام السابق مازال يعمل حتي هذا اليوم ليس في الدول الفقيرة والنامية فحسب بل حتى في الدول المتطورة, وذلك لأن كلا النظامين مكملين لبعضهما البعض حيث انه من غير المجدي اقتصاديا استخدام الألياف البصرية من المقسم الرئيسي وحتى المستخدم أو استخدامه في شبكات ذات سعة محدودة وبسيطة. لقد أثبتت العديد من الدراسات المكتوبة وكذلك التطبيقات العملية ان استخدام تقنية الألياف البصرية يوفر جودة عالية وخيار أمثل من الناحية الفنية والاقتصادية. يكفي ان نقول ان الالياف البصرية تمتلك مزايا عديدة كقلة الفقد وخفة الوزن ولكن الميزالهامة هي سعة نطاقها العالية جداً والتي تصل الى آلاف البلايين من البتات لكل ثانية مما جعلها تحتل مكاناً متميزاً في مجال الاتصالات حيث استخدمت بدلا عن الاسلاك النحاسية في العديد من التطبيقات كالربط بين المقاسم الهاتفية والخطوط بعيدة المدى وعبر البحار. إن الثورة الهائلة في مجال الاتصالات و المعلومات و التي تتمثل في الاستخدام غير المحدود للانترنت فرض واقعًاً جديداً لا يمكن تحقيقه بدون شبكات اتصال ذات سعة نقل معلومات هائلة جداً و التي لا يمكن تطبيقها إلا باستخدام الألياف البصرية. رغم إن استخدام هذه التقنية الضوئية لنقل

المعلومات عبر المسافات الطويلة استحوذ على معظم الاهتمام إلا أنها ايضا تستخدم لنقل المعلومات عبر المسافات القصيرة حيث تصل بين الكمبيوتر الرئيسي و الكمبيوترات الجانبية أو الطابعة. بعيدا عن مجال الاتصالات ظهرت هناك استخدامات أخرى عديدة و مهمة لهذه الألياف فمثلا نتيجة لمرونتها و دقتها دخلت في صناعة الكاميرات الرقمية المتعددة المستخدمة في التصوير الطبي مثل التصوير الشعبي و المناظير. وكل يوم يمر تظهر فيه تطويرات جديدة في مجال هندسة الاتصالات وذلك لما يتمتع به هذا المجال من اهمية قصوى ومؤثرة في حياتنا اليومية.

الفصل الاول

المقدمة

1-1 الألياف البصرية (Optical Fibers) : نظرة تاريخية

فرع من علم الفيزياء يرتكز على ظاهرة انتقال الضوء عبر ألياف شفافة من الزجاج أو البلاستيك. وتستطيع هذه الألياف البصرية، أن تحمل الضوء عبر مسافات تتراوح بين سنتيمترات قليلة وأكثر من 160كم. ومثل هذه الألياف يُمْكن أن تعمل بشكل فردي أو في شكل حزَم، وبعض الألياف الفردية يبلغ طول قطرها أقل من 0,004ملم.

الألياف البصرية لها لُبٌ من الزجاج أو اللدائن، ولها درجة عالية من الشفافية ومحاطة بغطاء يسمى الغلاف.

ويصل الضوء الصادر من جهاز الليزر، أو من مصباح كهربائي، أو من بعض المصادر الضوئية الأخرى إلى إحدى نهايتي الليف البصري. وعندما ينتقل عبر اللُب، يحبسه الغلاف في الداخل. ويقوم الغلاف بعملية ثني أو عكس ـ إلى الداخل ـ لأشعة الضوء المصطدمة بسطحها الداخلي.

وعند النهاية الأخرى لليف يستَقْبل الضَوء كشافٌ مثل نبيطة حساسة للضوء أو العين البشرية.

الشكل (1) حزمة من الالياف البصري

لقد استخدم الضوء للاتصال منذ أن خلق الله الأرض ومن عليها فبدونه لا يمكن أن نرى من حولنا وقد استخدمت الاشارات والمرايا العاكسة والمصابيح لنقل المعلومات ولكن مقدار المعلومات المنقولة محدودة ويمكن للأخرين الاطلاع عليها علاوة على التأثير السلبي للظروف البيئية. إن أول محاولة فعلية مدونه لاستخدام الاشارات كان عام 1791 من قبل كالود شابي في فرنسا ، إذا استخدم مجموعة من الابراج تحتوي على عدة أذرع لنقل معلومات مسافة 200 كيلو متر يستغرق ارسال المعلومة الواحدة حوالي 15 دقيقة . في عام 1854م أجرى جون تايندل تجربة بسيطة بين أن الضوء يمكن ثنية إذا وجد الوسط الملائم وفي عام 1880م قام الكسندر جراهام بل بنقل الصوت عبر حزمة ضوئية وقد أجريت محاولات عديدة لاستخدام الاتصالات البصرية خلال هذا القرن ولكنها لم تلق النجاح لعدم توفر المنابع المناسبة علاوة على الاضطرابات الجوية كالمطر والثلج والغبار والضباب مما حد من امكانية استخدامها . أدي اكتشاف الليزر عام 1960من قبل ثيودور ميمان الى تجدد الاهتمام بالاتصالات البصرية وفي عام 1966م اقترح آل من تشارس كاو وجورج هوكام تصنيع الياف زجاجية قليلة الفقد وفي عام 1970م تم تصنيع الياف بصرية مصنعة من مادة السليكا وبفقد 20ديسيبل لكل كيلو متر بدلا من 1000 ديسيبل لكل كيلومتر قبل ذلك الوقت . وفي غضون عشر سنوات ، تم تصنيع الياف بفقد يصل الى 20,. ديسيبل لكل كيلومتر عند الطول الموجي 1550 نانومتر .

2-1 الليف البصري ومراحل تطوره.

منذ أكثر من 25 عاما بدأ استخدام و تطبيق الالياف البصرية كخطوط اتصال مما مهد لحصول ثورة في عالم الاتصالات من حيث الكم الهائل للمعلومات و التي أصبح بالإمكان نقلها عبر هذه الخطوط لمسافات طويلة و بنوعية عالية الجودة . لقد كانت فكرة استخدام الضوء كوسيله للاتصال قديمة جداً عندما (Photo phone) وذلك من أجل إرسال الصوت عبر الضوء. بعد ذلك بدأت محاولات إرسال الضوء عبر الفراغ المحيط بنا منذ اختراع و تصنيع الليزر في العام 1958 و التي كانت تتطلب عدم وجود عوائق ومدى رؤيا مستقيم. في العام 1970 كانت البدايات الفعلية لمحاولة إرسال الضوء عبر ألياف زجاجية ذات معدل توهين أقل من 20 B/km وفى نطاق معامل التجارب ، بعد ذلك توالت الأبحاث لتطوير إنتاج ألياف بصرية من الزجاج النقي و بمعدلات توهين أقل حيث تمكنت في أواسط السبعينيات من القرن الماضي شركة Corning Inc من تصنيع كيبلات بصرية وطرحها في الأسواق التجارية.

لقد جاء تطوير وتصنيع الألياف البصرية على مراحل ، حيث كانت في المرحلة الأولى تعمل علي الطول الموجي 850 nm و التي سميت النافذة الأولى First (Window) بمعدل توهين لغاية 3 dB/Km و الذي كان إنجاز عظيمًا في وقته . انتقلت الشركات المصنعة إلي النافذة التالية (Second Window) حيث تم تصنيع ألياف بصرية تعمل على الطول الموجي 1300nm بمعدل توهين إلى حوالي 0.5 dB/Km. في نهاية العام 1977 قامت شركة (NTT) بالانتقال إلي النافذة الثالثة Third Window وذلك باستخدام الطول الموجي 1550 nm حيث أمكن الحصول على ألياف

زجاجية بمعدل توهين حوالي 0.2 Db/Km و الذي يعتبر نظريا أقل حد ممكن لقيمة الفقد في الليف زجاجية . في السنوات الحالية جميع الأطوال الموجية السابقة الذكر تصنع و تعمل في معظم دول العالم إن لم يكن جميعها. لقد بدأ التطبيق و الاستخدام الفعلي لأنظمة الاتصالات البصرية في بداية السبعينيات من القرن الماضي و ذلك من قبل القوات المسلحة الأمريكية حيث تم تركيب كيبل بصري لنقل المكالمات الهاتفية تبعه مشروع القوات الجوية (Airborne Light Optical Fiber Technology) في العام 1976 توالت بعد ذلك الاستخدامات التجارية حيث قامت شركتا AT&Tو GTE في العام 1977 بإنشاء و تركيب أنظمة اتصالات بصرية في كل من شيكاغو و بوسطن.

بعد ذلك قامت شركة (Bell) في العام 1980 بانتشار و تركيب نظام اتصال بصري بطول 611 ميل وذلك في شمال الولايات المتحدة الأمريكية . لقد كان تصنيع الالياف أحادية النمط في بداية الثمانينات من القرن الماضي بمثابة نقلة نوعية في الاتصالات بعيدة المدى حيث كانت و ما زالت تعمل على الطول الموجي 1300 nm أو 1550 nm أصبحت بدون منافس من حيث مسافة و سعة الارسال لقد توالت الأبحاث و الابتكارات في مجال زيادة سعة الارسال للف البصري و الوصول إلى مسافات إرسال خيالية ، حيث تم تطوير تقنية تجميع القنوات باستخدام التقسيم الطول موجي (WDM) كذلك طريقة ما يسمى (Sol tons Transmission) حيث قامت شركة (Bell Labs) في العام 1990 بتجربة إرسال 2.5 Gbit/s لمسافة 7500 Km مستخدمة المكبرات الضوئية من نوع (EDFA) بدون الحاجة لمحطات التقوية و إعادة البث (Regenerators) . بعد ذلك

و في العام 1998 كانت هنالك تجربة إرسال 100 قناة اتصال عبر ليف بصري واحد لمسافة 400 Km(كل قناة علي سرعة 10 Gbit/s) حيث استخدمت تقنية WDMالمضغوطة و التي أصبحت تعرف Dense Wavelength – Division Multiplexing)) أو اختصارَاَ . (DWDM)

3-1 الألياف البصرية (Optical Fibers) وثورة الاتصالات.

انتقلت اتصالات الألياف البصرية (Optical Fibers) من أنظمة بسيطة لإصال الضوء الى اماكن يصعب الوصول اليها الى أنظمة تؤثر على حياتنا كالتي أحدثتها والحاسبات . تمتلك الألياف البصرية مزايا عديدة – (Wavelength Division Mull) telexing (WDM)) .

تمكن الباحثون من تطعيم الألياف الزجاجية بمادة الاربيوم (Er.) مما أعطى دفعة قوية لاستخدام أنظمة الالياف البصرية عند الطول الموجي 1550 نانومتر أدي ذلك التطعيم للحصول على مضخمات ذات كسب مرتفع اطلق عليها مضخمات الليف المطعم بالأربيوم (Erbium Doped) (Fiber Amplifiers) (EDFA’s) والتي وجدت استخداما واسعًاً في خطوط النقل ولم يقتصر استخدام الألياف المطعمة بمادة الاربيوم على المضخات فحسب بل تعداها لتشمل استخدام الليزر والمفاتيح وكثير من النبائط غير الخطية . آما أن مضخمات (EDFA’s) قد مهدت الطريق لأنظمة اتصالات سريعة وبروز أنظمة نقل تعتمد على استخدام نبضات طبيعية (Sol tons) والتي تمكنها من قطع مسافات طويلة دون تشوه.

أدت هذه التطورات السريعة الى شيوع استخدام أنظمة الاتصالات الليفية البصرية في كافة مجالات الاتصالات بدءاً من الوصلات للمستخدم حتى الاتصالات بعيدة المدى سواء في اليابسة أو عبر البحار. والألياف البصرية هي ألياف مصنوعة من الزجاج النقي طويلة ورفيعة لا يتعدى سمكها سمك الشعرة يجمع العديد من هذه الألياف في حزم داخل الكيبلات البصرية وتستخدم في نقل الإشارات الضوئية لمسافات بعيدة جداً.

4-1 كابل الالياف البصرية وطريقة عمله

كابل الألياف الضوئية، والمعروف أيضًا باسم كابل الألياف البصرية ، Fiber Optic Cable، ، تحتوي على واحد أو أكثر من الألياف التي تحمل الضوء تعرف باسم "الألياف الضوئية". تكون مكونات هذه الألياف مغلفة بشكل منفرد لكل ليف (جزء) بطبقة بلاستيكية ومحفوظة داخل انبوب واقي مناسب للبيئة التي سوف يستخدم فيها الكابل. انواع مختلفة من الكابل يمكن استخدامها لأغراض متنوعة، على سبيل المثال؛ الاتصال عن بعد طويل المدى، أو لتزويد شبكة نقل بيانات فائقة السرعة بين اجزاء مختلفة من مبنى/عدة مباني. يعمل بشكل مشابه لعمل الكيبل النحاسي ذي الأربع أزواج من حيث الفكرة، فالكيبل النحاسي يعمل بإشارة كهربائية ووجود إشارة كهربائية يعني 1 وعدم وجود إشارة كهربائية يعني 0، وكيبل اليف الضوئي يعمل بإشارة ضوئية، فوجود ضوء يعني 1 وعدم وجود إشارة ضوئية يعني 0.

الفصل الثاني

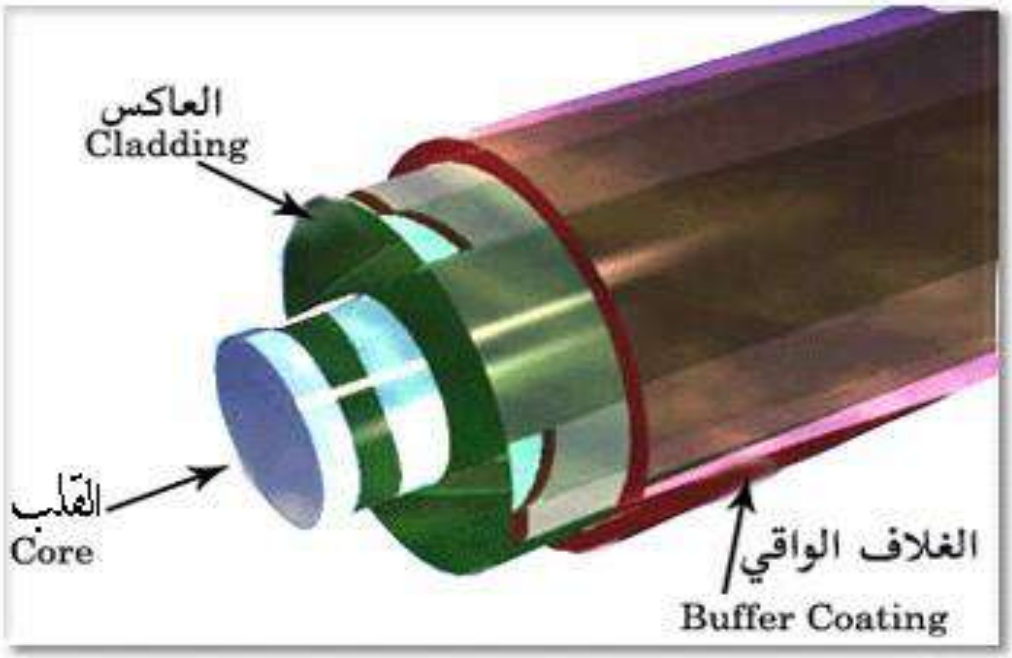
2-1 مكونات الليف البصري.

يتكون الليف البصري من ثلاثة أجزاء رئيسية وهي كالأتي :-

1- القلب (Core) وهو عبارة عن زجاج رفيع ينتقل فيه الضوء.

2- العاكس (Cladding): مادة تحيط باللب الزجاجي وتعمل على عكس الضوء مرة أخرى إلى مركز الليف البصري.

3- الغطاء الواقي (Buffer Coating): غلاف بلاستيكي يحمي الليف البصري من الرطوبة أو ويحميه من الضرر و الكسر.



الشكل (2) مكونات اليف البصري.

2-2 انواع الالياف البصرية :

تصنف الألياف البصرية الى ثلاثة أنواع تبعًاً لأنماطها وتركيبها وهي آما يلي :-

ألياف متعددة النمط وبمعامل انكسار عتبي (Multimode Step Index Fibers) يتألف الليف البصري من جزئيين أساسيين هما لب الليف والذي يشغل مركز الليف يحيط به كساء يضاف لذلك طبقة واقية تسمى الغلاف . يصنع هذا النوع من الألياف البصرية من عناصر مختلفة من الزجاج ومركباته أو من السليكا.

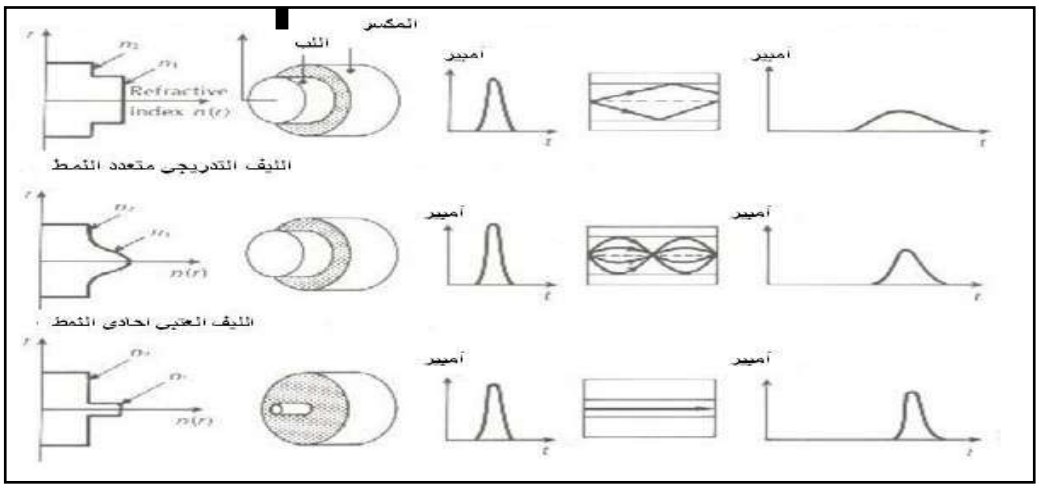
1 - ألياف متعددة النمط وبمعامل انكسار متدرج : Multimode Graded Index

معامل انكسار هذه الألياف متدرج إذ تبلغ أعلى قيمة له في مركز الليف وتقل قيمة معامل الانكسار بصفة تدريجية كلما اتجهنا نحو الكساء حيث تكون قيمة معامل الانكسار ثابتة ويصنع هذا النوع من الألياف من عدد من العناصر الزجاجي أو السليكا المطعمة. .إن أداء الألياف متعددة النمط ومتدرجة معامل الانكسار يتفوق على أداء الألياف متعددة النمط ذات معامل الانكسار العتبي نظرًاً لتدرج معامل الانكسار وقلة التوهين فيها غير أن قطر اللب في الألياف متعددة النمط ومتدرجة معامل الانكسار أقل من قطر اللب في الألياف متعددة النمط ذات معامل الانكسار العتبي وتستخدم للمسافات المتوسطة وعرض نطاق متوسط

2 - ألياف أحادية النمط - Single Mode Fibres.

قد يكون معامل انكسار الليف متعدد النمط متدرج أو عتبي ولكن معظم الألياف أحادية النمط الموجودة حالياً ذات معامل الموجودة حاليًاً ذات معامل انكسار عتبي. تتميز الألياف أحادية النمط بنوعيتها الممتازة كما أن عرض النطاق فيها كبير وتستعمل للمسافات الطويلة

وتصنع من مادة السليكا المطعمة . ولو أن قطر اللب صغير جداً إلا أن قطر الكساء يبلغ أضعاف قطر اللب وذلك للتقليل من نسبة الفقد من الموجات المضمحلة (evanescent) التي تمتد داخل الكساء ومع الأشكال توضح اتساع النبض الناتج عن انتشار الضوء في كل من الليف احادي النمط ومتعدد النمط.



شكل (3) اتساع النبض الناتج عن انتشار الضوء

3-2 مميزات الألياف البصرية :

للألياف البصرية مزايا عديدة جعلتها تتفوق على النظم الأخرى المستخدمة في مجال الاتصالات ومن هذه المميزات أن عرض نطاقها عالي جدًاً, قطرها صغير و وزنها خفيف , لا يوجد تداخل بينها مهما قربت المسافة بينهما, لا تتأثر بالحث أو التداخل الكهرومغناطيسي, انخفاض في سعر تكلفة المكالمات, أكثر أمانًاً و سلامة, حياتها طويلة, تتحمل درجات حرارة عالية ولا تتأثر بالمواد :

1- إن عرض النطاق المرتفع جدا يعني إمكانية نقل معلومات عالية جدا بواسطة ليفه بصرية واحدة. وقد تكون هذه المعلومات صور تلفزيونية أو مكالمات هاتفية أو معلومات للحواسيب أو مزيج منها. وقد تم تشغيل خطوط نقل معلومات بمعدل 10 جيجابت لكل ثانية مثل (SEA-ME-WE3,FLAG) وألا بحاث مستمرة في أنحاء العالم للحصول على أنظمة تعمل بمعدل معلومات أعلى ولمسافة أطول وقد أجريت تجارب لنقل 2,64 تيرابت لكل ثانية بنظام صية لمسافة 120كم مستخدمين الياف أحادية النمط . من الناحية النظرية فإن عرض نطاق ليفه بصرية واحدة في حدود 10 جيجاهرتز ، فلو فرضنا أن المسافة بين المكررات تبلغ 100كم وبإمكاننا أن نضع مجموعة منها ضمن كابل واحد. وهذا بالطبع يعني منبعا لا ينضب من وسائل نقل المعلومات ويتناسب عرض النطاق تناسب طرديًاً مع أعلى معدل لنقل المعلومات أو سعة نقل (Information Carrying Capacity).

المعلومات .

2- قطرها صغير ووزنها خفيف ، يبلغ سمك الليفة البصرية سمك الشعرة :

وعلى الرغم من أن هناك طبقات واقية توضع فوقها إلا انها لاتزال أقل حجما ووزنا من الاسلاك الهاتفية أو المحورية ومثالاً على ذلك أن ليف بصري بقطر يبلغ 125 مايكرومتر ضمن كابل يبلغ قطرة 6 ملم يمكن له أن يحل محل كابل هاتفي قطرة 8سم. ويحتوي على 900 زوج من الخطوط السلكية النحاسية وهذا يعني أن الحجم قد أنخفض بنسبة تزيد عن 01 : 1 وكمثال آخر على صغر حجم الكابلات البصرية فإن كابلات محورية بطول 032 متر وقطر 46 سم وتزن 7 طن كانت تستخدم في نظام رادار متقدم على ظهر أحد السفن تم استبدالها بكابلات بصرية تزن 18 كغم وقطرها 2,5سم. مما سبق يتضح لنا إمكانية إضافة كابلات بصرية في نفس مسارات الكابلات النحاسية والمحورية في شتى المجالات .

3- نلاحظ أحيانا عند إجراء محادثة هاتفية سماع أصوات محادثات هاتفية أخرى وهو ما يطلق علية باللغط (CROSSTALK) وهذا النوع من التداخل لا يحدث عند استخدام الألياف البصرية مهما قربت المسافة بينهما.

4 - تتمتع الألياف البصرية لكونها مصنعة من مواد عازلة (dielectrics) بعدم تأثرها بالحث الكهرومغناطيسي الصادر من مصادر الكهرومغناطيسية الصناعية كالمحركات والمولدات وأجهزة الكهربائية المختلفة أو الطبيعية كالبرق وتلك الخاصية تغنينا عن وضع مواد عازلة لحمايتها من الحث والتداخل.

5 - تصنع معظم الألياف البصرية في وقتنا الحاضر من مادة السليكا والموجودة بكثرة في الرمل والتي يقل سعرها كثيرا عن معدن النحاس الذي بدأ بنفذ في أماكن كثيرة من العالم

ونظرًاً للميزات التي ذكرناها في البنود 2.3 فإن ثمن نقل المعلومات بأنواعها المختلفة سيقل عن الانظمة المختلفة الاخرى.

6- نظرًاً لأن الضوء هو الوسط الناقل للمعلومات في الألياف البصرية ولا يولد هذا الضوء أى مجال مغناطيسي خارج الكابل فإن من الصعوبة إمكانية التجسس ومعرفة المعلومات التي يحويها الكابل البصري كما أنه من الصعوبة معرفة وجود الكابل البصري بسبب المادة المصنع منها ولا يوجد جزء معدني إلافي بعض الحالات حيث تتم اضافة كابل فولاذي لتقوية الكابل البصري ، أوتسليح معدني لحماية الكابل من القوارض والأحمال الخارجية .

7 - يتوقع أن يكون عمر الألياف البصرية في حدود 25 عامًاً مقارنة بخمس عشر عامًاً للنظم الأخرى حيث أن المكونات الأساسية للألياف هي الزجاج والذي لا يصدأ على عكس النظم الأخرى والتي تحوي على معادن تتعرض للصدأ

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

9 -وضعت المكررات (Repeaters)على مسافة 100 كم بين مكرر وآخر وهذا يقلل من عدد المكررات وبالتالي من صيانة النظم كما يزيد من الاعتماد على النظام لقلة الأجهزة المستخدمة بينما المسافة بين المكررات في النظام الهاتفي المستخدم حالياً تتراوح بين 4 الى 6 كم.

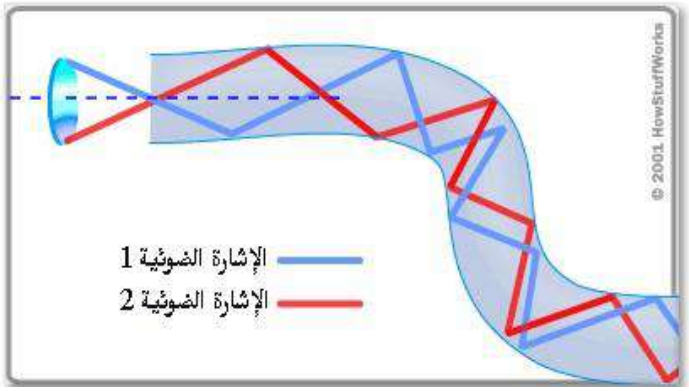
2-4 كيفية انتقال الضوء في الألياف البصرية.

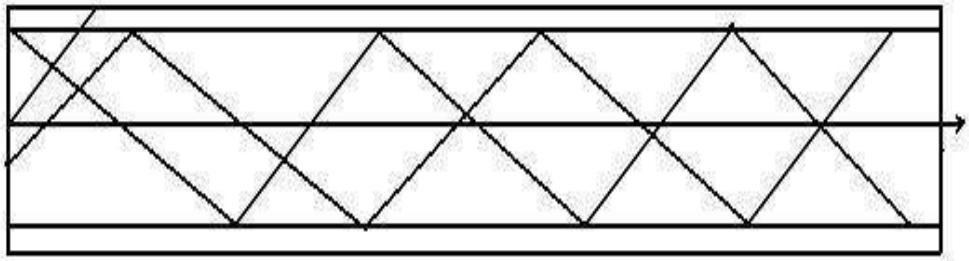
تنتقل الإشارات الضوئية في الكيبلات البصرية خلال الليف الزجاجي الرفيع ((Core وذلك عن طريق الانعكاسات المتتالية للضوء والتي يحدثها العاكس ((Claddingالمحيط بالقلب الزجاجي والذي يعمل كمرآة عاكسه للضوء . ولأن العاكس لا يمتص الضوء الساقط عليه بل يقوم بعكسه إلى داخل رحلته فإن الضوء ينتقل لمسافات بعيدة دون أن يفقد أو يتضاءل .ولكن في بعض الأحيان يحدث وأن تضعف الإشارات الضوئية نتيجة لوجود الشوائب في مادة الزجاج الليفي ، وبشكل عام يمكن القول أن كفاءة الليف البصري ومدى انتقال الإشارات الضوئية فيه لمسافات طويلة دون أن تفقد أو تضعف تعتمد على عاملين:

1- درجة نقاء مادة الزجاج المصنوع منها الليف البصري (Core).

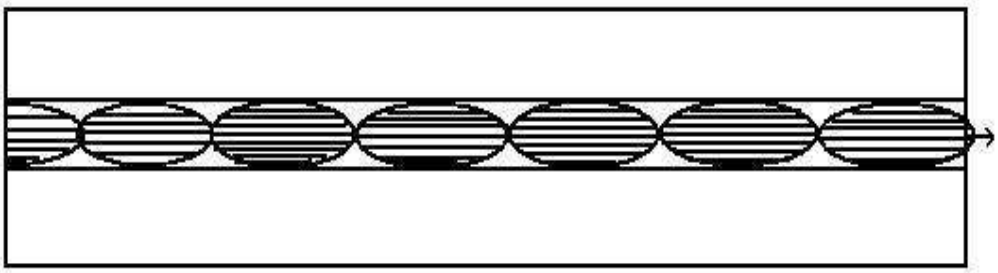
2- الطول الموجي للضوء المستخدم ،فمثلاً في الأطوال الموجية (850 nm) تكون نسبة الضعف في الإشارات الضوئية المرسلة حوالي(من 60% إلى 75% لكل كيلومتر).وفي الأطوال الموجية(nm1.300) تتراوح النسبة من 50% إلى 60% لكل كيلومتر.

وهناك أنواعا من الألياف البصرية ذات الكفاءة العالية والتي تعد نسبة الضعف في إشاراتها الضوئية صغيرة جدا لا تزيد عن 10% لكل كيلومتر للضوء ذو الطول الموجي (1.300 nm

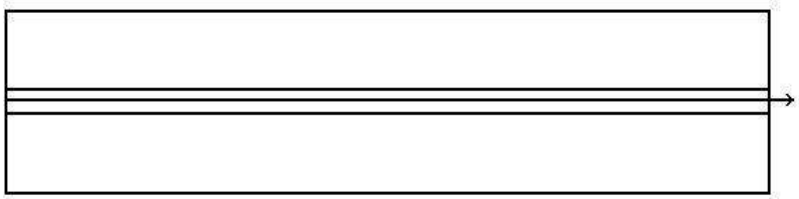




A النقل متعدد الحالة المتدرج



B النقل متعدد الحالة الفجائي



C وحيد الحالة

الأشكال(4، A,B,C) توضح انتقال الضوء في اليف البصري.

5-2 استخدام الألياف البصرية في الاتصالات.

تتكون وحدة الاتصالات بالألياف البصرية من الآتي : -

1- الألياف البصرية (Optical Fibers) تعمل هذه الألياف على توصيل ونقل المعلومات كإشارات ضوئية ولمسافات طويلة.

2- مجدد أو معزز الإشارات الضوئية (Optical Regenerator) .

وهذا ضروري لتعزيز الإشارات وتقويتها حتى لا تضعف وتتلاشى خلال رحلتها الطويلة عبر الكيبلات البصرية . كما ذكر سابقًاً أن هناك بعضًاً من الإشارات الضوئية التي تفقد أو تضعف خاصة عندما تسير لمسافات طويلة كالذي يحدث في الكيبلات الممتدة تحت سطح البحر والتي تستخدم في أغراض الاتصالات بين السفن والغواصات، وبالتالي تعالج هذه الكيبلات البصرية بمعززات لهذه الإشارات تمتد على طول الكيبل وتعمل على تقوية الإشارات الضوئية .تتكون هذه المعززات من ألياف بصرية مغلفة بمادة خاصة، وعندما تسقط الإشارات الضوئية الضعيفة على جزيئات المادة فإنها تستثار لتعطي إشارات ضوئية قوية لها نفس خصائص الإشارات الضوئية الساقطة،أي أن الغلاف يعمل عمل الليزر(تضخيم الضوء الساقط) وهكذا تستمر عملية انتقال الضوء لمسافات طويلة دون أن تفقد.

3 - جهاز الإرسال - Transmitter.

فيه تدار الأجهزة لتعطي سلسلة من الومضات الضوئية المتعاقبة التي تولد الشفرات أو الإشارات الضوئية المرسلة .

4- جهاز الاستقبال - Receiver.

تستخدم في هذه المستقبلات خلايا ضوئية (Photocell)أو الثنائيات الضوئية (Photodiode)التي تتعرف وتكشف الإشارات الضوئية المرسلة وتحل شفرتها إلى إشارات كهربية تدير الأجهزة المختلفة كالتلفزيون و الكومبيوتر و الهاتف و غيرها .

6-2 النظام الليفي البصري (Optical Fibers System)

تمثل الألياف البصرية العنصر الأساسي في أنظمة الاتصالات الليفية البصرية وهي مكونة من مواد عازلة زجاجية أو بلاستيكية لها شكل اسطواني يسمى اللب محاطاً بطبقة أخرى تسمى الكساء. تستخدم الألياف البصرية كقنوات اتصال لنقل الضوء المحمل بالمعلومات من مكان إلى آخر. عند دخول الضوء بزاوية معينة تحدث العلاقات داخل الليف عندما تتقابل مع الكساء ويتطلب ذلك أن يكون معامل انكسار اللب أكبر من معامل انكسار الكساء. بأخذ مقطع ليف بصري نرى انعكاس الضوء داخل الليف والذي يمكن تفسيره بنظرية الإشعاع وقانون سنل (Snell's Law) عند زاوية سقوط معينة تسمى الزاوية الحرجة ، نجد إن زاوية الإشعاع المنكسر تبلغ 90 درجة بالنسبة للخط العمودي أوموازية للحد الفاصل بين اللب والكساء وعندما تزداد زاوية السقوط عن حد معين ينعكس الإشعاع داخل اللب وهو ما يسمى بالانعكاس الداخلي الكلي (Total Internal Reflection) .

الفصل الثالث

1-3 مكونات النظام - System Components

عند تصميم وصلة ليفية بصرية لابد من اعتبار ثلاثة عناصر رئيسية وهي التوهين, التشتيت و فتحة النفوذ العددية. ويتطلب ذلك عمل موازنة متعادلة لاختيار المكونات المختلفة للنظام الليفي البصري ، لوبدأنا من جهة الارسال فعلينا اختيار منبع ضوئي يبعث الضوء بطول موجي مناسب وعرض طيفي قليل وقدرة بصرية كافية لهذا الغرض ، ثم استخدام نوعين من المنابع وهما الأول الثنائيات الباعثة للضوء والثاني الثنائيات الليزر(Laser Diodes) .

يتطلب اقتران الضوء من المنبع الى الليف وجود مواءمة جيدة بينهما كي تنقل أكبرقدر من القدرة البصرية الى الليف لذا لابد من العناية في اختيار المقرن المناسب الذي يعطي اقل فقد ممكن . نظرًاً لأن الالياف تنتج بأطوال محددة فلابد من ربط بعضها ببعض للحصول على الطول المطلوب وقد يؤدي ذلك الى حصول بعض الفقد في القدرة المنقولة و لهذا الفقد ثلاثة أسباب ، وهي

- عدم التراصف الزاوي.
- تباعد الاطراف.
- نعومة الاسطح وتوازيها.

وقد يحصل الفقد أيضا عند ربط الياف تختلف في اقطارها وفتحات نفوذها العددية . عند المستقبل يجب اختيارالكواشف التي تعمل بنفس الطول الموجي للمنبع ولها استجابية وكفاءة و كمية جيدتين ، زمن استجابة مناسب والحد الأدنى من القدرة القابلة للكشف . الكواشف المستخدمة في هذه الانظمة عادة هي ثنائي (PIN)وثنائي ضوئي جرفي APD .

1 - التوهين Attenuation.

يعتبر التوهين أحد العناصر الأساسية في تقويم أنظمة الاتصالات حيث تتعرض الموجات الحاملة للوهن عند انتشارها في قناة الاتصال نتيجة عوامل عديدة

2- التشتيت Dispersion.

التشتيت هو انبساط أو اتساع النبضة عند مرورها في قناة الاتصال وفي نظم الألياف البصرية ينقسم التشتيت الى نوعين:

1-وهما التشتيت النمطي (Intermeddle dispersion) والذي يتم نتيجة سلوك الاشارات المرسلة مساوات مختلفة عند انتشارها داخل الليف مما يؤدي الى عدم وصولها في وقت واحد.

2- التشتيت الباطني وينقسم هذا التشتيت الى نوعين.

a-تشتيت المادة - material dispersion

b-تشتيت الدليل الموجي (waveguide dispersion) يحصل هذا النوع من التشتيت في جميع أنواع الألياف البصرية وينتج من عرض خط المنبع البصري حيث أن المنابع البصرية لا تبث الضوء بطول موجي واحد بل بحزمة من الأطوال الموجية وحيث أن معامل انكسار الزجاج المستخدم في الألياف يتغير مع الطول الموجي

3-فتحة النفوذ التعددية- Numerical Aperture يتطلب اقتران الضوء في اللب البصري وقوع شعاع ضمن زاوية معينة تدعى زاوية القبول ويعبر عن قدرة تجميع الضوء يجيب (Sine)زاوية القبول.

2-3 تطبيقات الألياف البصرية - Optical Fiber Applications .

تعرفنا في الأقسام السابقة على فوائد الألياف البصرية ومكونات النظام الليفي البصري ، مما لا شك فيه أن كثيرا من الحقول في المجالات المدنية والعسكرية بدأت تستفيد من هذه الفوائد ومن الصعب جداً التعرف على كل المجالات الممكن استخدام الألياف البصرية فيها وسنقوم في هذا القسم بالتعرف على بعض الاستخدامات العامة.

1-الاتصالات الهاتفية - Telephone Communications .

لعبت الأسلاك المجدولة والكابلات المحورية دوراً كبيراً في السنوات الماضية في مجال الاتصالات الهاتفية وبصفة خاصة بين البدالات ، وحيث أن أحد الصفات الهامة هي سعة الألياف البصرية ، فقد بدأت كثير من الشركات بالتفكير في بناء خطوط هاتفية جديدة وإحلال بعض الخطوط القديمة سواء كانت أسلاك مجدولة أو كابلات محورية وأول خط تجاري يستخدم الألياف البصرية في الولايات المتحدة بدأ تشغليه في 22 ابريل7791 م وقد استخدم الارسال الرقمي في هذا الخط ، كما أن المكررات كانت على مسافة 6.3 كيلومتر واستخدمت الثنائيات الباعثة للضوء (Light Emitting Diodes) في أجهزة الارسال وثنائيات الضوء الجرفية (avalanche photodiodes)في أجهزة الاستقبال وكانت سعة هذا الخط 24 مكالمة آنية وقد استخدم تشكيل الرمز النبضي

2- الاتصالات التلفزيونية - TV communications.

بدأ أول استخدام الألياف البصرية بربط الكاميرات التلفزيونية بسيارات النقل التلفزيوني وفي الدوائر المغلقة ثم استخدمت في إيصال الخدمات التلفزيونية للمنازل وقد استخدمت لنقل قناة

واحدة فقط وتستخدم الآن لنقل عشرات القنوات التلفزيونية والفيديو ضمن الكابل التلفزيوني (Cable television) وتراهن إحدى الشركات الأمريكية على انفاق 116 بليون دولار لتركيب خطوط كابلات تلفزيونية تصل للمنازل مما يعطي المشترين نطاقا واسعًاً للتطبيقات المختلف

3 -نقل الطاقة

يمكن استخدام الألياف الضوئية لنقل الطاقة باستخدام خلية كهروضوئية لتحويل الضوء إلى كهرباء.في حين أن هذه الطريقة لنقل الطاقة ليست فعالة مثل الطرق التقليدية، لكنها مفيدة بشكل خاص في الحالات التي يكون فيها من المستحسن عدم وجود موصل معدني كما هو الحال في حالة استخدامه بالقرب من أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي، والتي تنتج مجالات مغناطيسية قوية. ومن الأمثلة الأخرى تشغيل الإلكترونيات في عناصر الهوائيات عالية الطاقة وأجهزة القياس المستخدمة في معدات الإرسال ذات الجهد العالي.

استخدامات أخرى

1- في المجال الطبي، إجراء العمليات الجراحية الدقيقة ويمكن رؤية أجزاء الجسم الداخلية مثل (تنظير المعدة)

2- في مجال الاتصالات. وهو المجال الأوسع الذي يضم عشرات من التطبيقات مثل تطبيقات الاتصالات والتلفزيونات وغيرها.

3- في مجال الهندسة الوراثية، حيث يمكن تفكيك الشفرة الوراثية ومنع الأمراض الوراثية كالسكري ومتلازمة داون وفقر الدم....

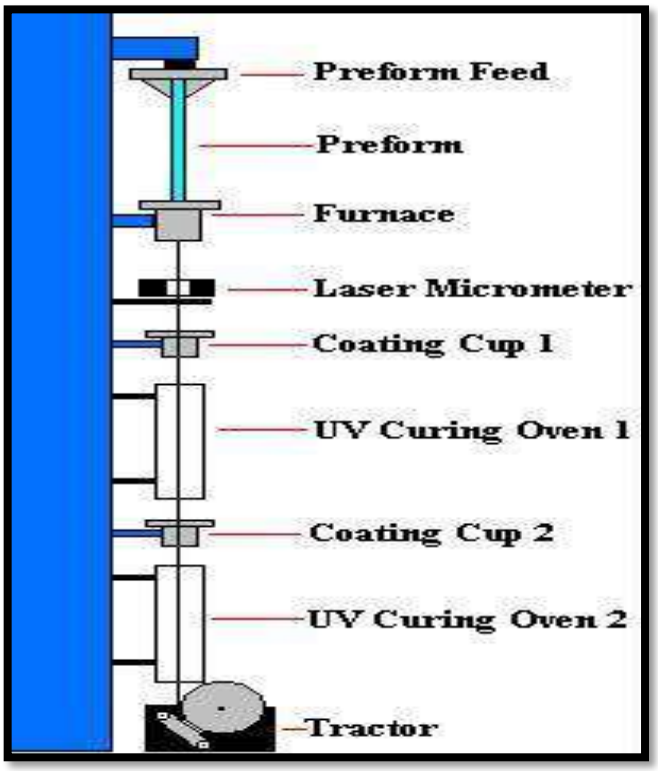
4- في المجال العسكري، حيث انه من الصعب التجسس عليها وسحب الإشارة....

5- كما انها توجد في فراء الدب لان فرو الدب لا يوفر له عزلا حراريا فقط وانما شعيرات الفراء تعمل كمجموعة هآئلة من الالياف الضوئية التي تعكس الأشعة فوق البنفسجية .

6- في مجال التدريس، اجراء العمليات الحسابية

3-3 : كيف تصنع الالياف البصرية

الشكل(5) يوضح أحدى طرق صنع اليف الزجاجي.

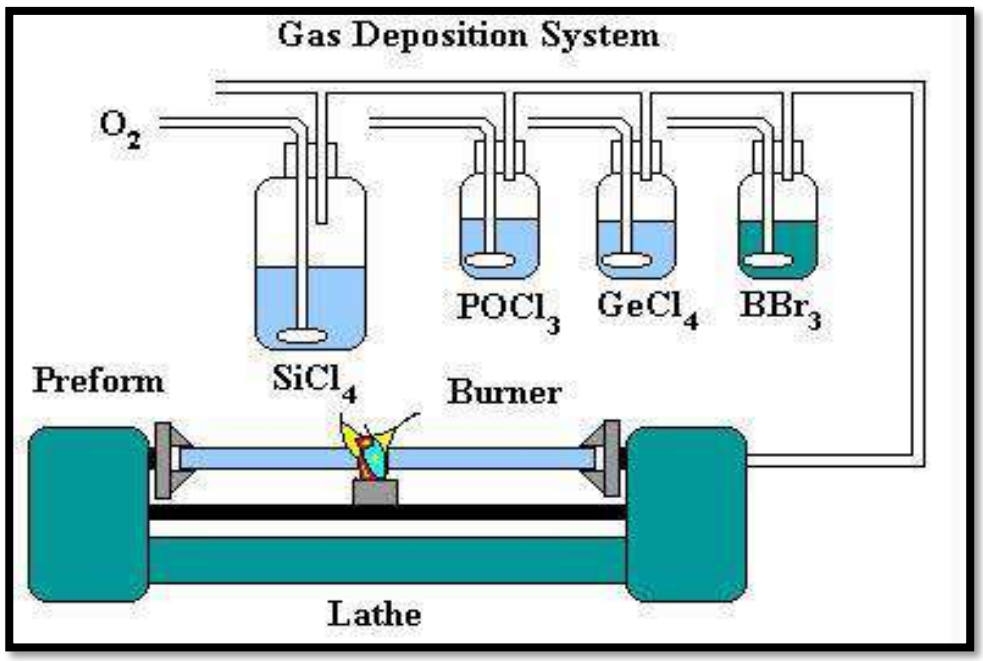


كما سبق و ذكرنا تصنع الألياف الضوئية من زجاج على درجة عالية من النقاء حيث وصفت إحدى الشركات ذلك بان قالت لو كان هناك محيط من الألياف الضوئية يصل للعديد من الأميال و نظرت من على سطحه للقاع يجب أن تراه بوضوح. وتتم صناعة الألياف الضوئية على النحو التالي:

- عمل اسطوانة زجاجية غير مشكلة .
- سحب الألياف الضوئية من هذه الاسطوانة الزجاجية .
- اختبار الألياف الضوئية .

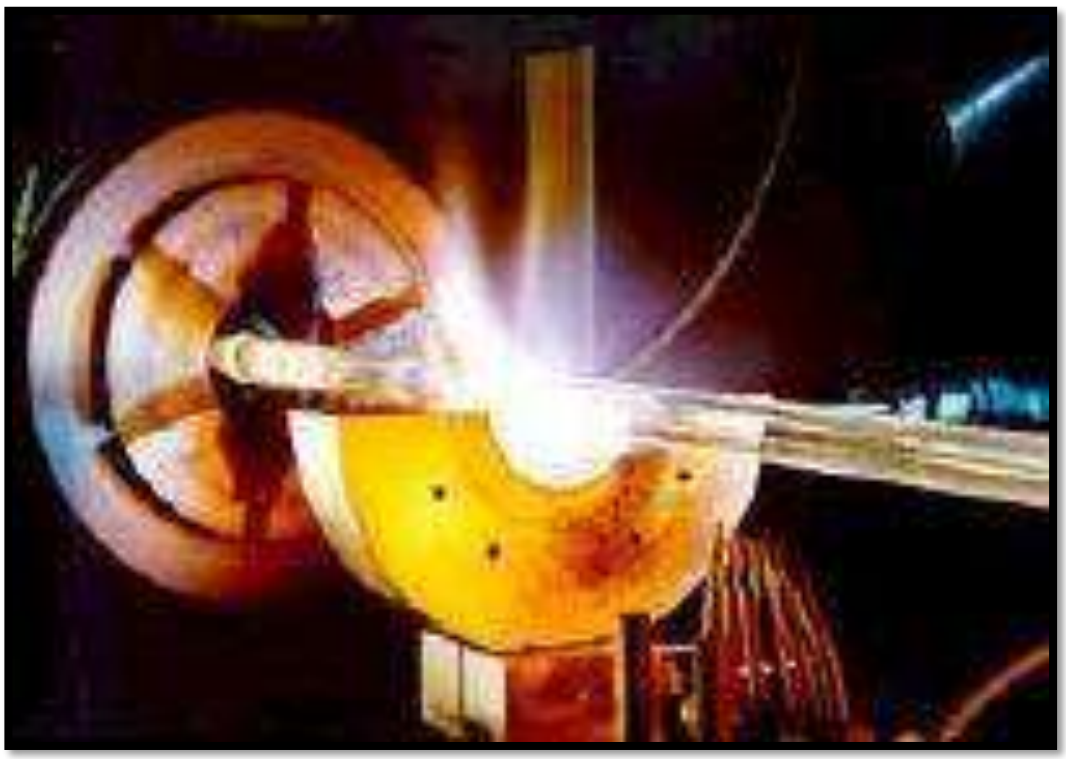
- الزجاج المستخدم في عمل الاسطوانة الغير مشكلة يصنع من خلال عملية تسمى (modified chemical vapour deposition) حيث يمرر الأكسجين على محلول من كلوريد السليكون و كلوريد الجرمانيوم كيماويات أخرى ثم تمرر الأبخرة المتصاعدة داخل أنبوب من الكوارتز موضوع في مخرطة خاصة

- تفاعل السليكون و الجرمانيوم مع الأكسجين لتكوين أكسيد السليكون و أكسيد الجرمانيوم ترسب أكسيد السليكون و أكسيد الجرمانيوم على جدار الأنبوب من الداخل و يندمجان معا لتكوين الزجاج الخام المطلوب حيث يمكن التحكم بدرجة نقاء و صفات الزجاج المتكون من خلال التحكم بالخليط .



الشكل (6) يوضح طريقة صنع اليف البصري

الآن يتم سحب الألياف من هذه اسطوانة الخام الغير مشكلة بوضعها في أداة السحب حيث ينزل الزجاج الخام في فرن كاربوني درجة حرارته 200,2-900,1 درجة سليزية فتبدأ المقدمة في الذوبان حتى ينزل الذائب بتأثير الجاذبية و بمجرد سقوطه يبرد مكونا الجديلة الضوئية. هذه الجديلة تعالج بتغليف متتابع أثناء سحبها بواسطة جرار مع قياس مستمر لنصف القطر باستخدام مايكرومتر ليزري. تسحب الألياف من القالب الخام بمعدل 20m/s.



.

شكل (7) اختبار الليف البصري

يتم بعد ذلك اختبار الألياف من ناحية: معامل الانكسار، الشكل الهندسي و خصوصا نصف القطر، تحملها للشد، تشتت الإشارات الضوئية خلالها، سعة حمل المعلومات، تحملها لدرجات الحرارة و إمكانية توصيل الضوء تحت الماء.

4-3 طريقة التشويش :

التشويش في الياف الضوئية يعرف ايضا بانه الخسارة في اثناء عملية النقل، هو تقليل من كثافة شعاع الضوئي (الإشارة) التي تنتقل خلال الوسط الناقل.معامل التشويش في الياف الضوئية يقاس بوحدة (الديسبال/كم) خلال الوسط بسبب الجودة العالية نسبيا لشفافية وسائل الإرسال الضوئية الحديثة. .الوسط المادي هو بالعادة الياف من زجاج السيليكا التي تحتجز الشعاع الضوئي داخلها التشويش عامل مهم يحدد عملية نقل الاشارات الرقمية لمسافات طويلة .لذلك، معظم الابحاث تدور حول تقليل التشويش ورفع تضخيم الإشارة الضوئية.اظهرت الابحاث التجريبية ان التشويش في الياف الضوئية سببه هوالتشتت والامتصاص . SMF-28 يمكن تصنيع ليف ضوئي احادي النمط قليل الخسارة.اليف الضوئي كورينج الذي يعتبر المرجع لطول الموجي الاتصالات، نسبة الخسارة فيه 0.17ديسبل/كم خلال 1550 نانومتر.[18] على سبيل المثال عند استخدام 8 كم من اليف الضوئي ينقل 75% من الضوء خلال مسافة 1550 نانومتر.وقد لوحظ انه لو كانت مياه المحيط نقية كالياف الضوئية، لتمكنا من رؤية طول الطريق إلى أسفل حتى من خندق ماريانا في المحيط الهادئ، وعمق 36,000 قدم.

1- تشتت الضوء

انتشار الضوء خلال اليف الضوئي يعتمد على مجموع الانعكاس الداخلي لشعاع الضوئي .السطوح الخشنة والغير منتظمة، حتى على مستوى جزئي، يمكن ان تسبب بانعكاس الاشعة باتجاهات عشوائية .وهذا ما نسميه الانتشار المنعكس أو التشتت، ويمكن تميزه بمجموعة واسعة من زوايا الانعكاس . تشتت الضوء يعتمد على الطول الموجي لشعاع الضوء المنتثر، لذلك، تنشأ حدود للمناطق المكانية للرؤية، تبعا لتردد الموجة الضوئية الحادة والبعد المادي (أو النطاق المكاني) لمركز الانتثار الذي يكون عادة في شكل سمات هيكلية صغيرة محددة. وبما أن الضوء المرئي له طول موجي لترتيب ميكرومتر واحد (مليون من المتر) فإن مراكز الانتثار لها أبعاد على مقياس مكاني مماثل. التشويش ينتج من تشتت الضوء في السطح الخارجي والاسطح الداخلية . في المواد البلورية كالمعادن والسيراميك بالإضافة إلى المسام، معظم الأسطح الداخلية أو الاسطح الخارجية على شكل حدود التي تفصل مناطق صغيرة من النظام البلوري. وقد تبين مؤخرا أنه عندما ينخفض حجم مركز الانتشار (أو حدود) إلى ما دون حجم الطول الموجي

للضوء المنتشر، فإن الانتثار لم يعد يحدث إلى حد كبير. وقد أدت هذه الظاهرة إلى إنتاج مواد خزفية شفافة. ايضا، فإن تشتت الضوء في الألياف الضوئية هو بسبب عدم انتظام الجزيئات (التقلبات التركيبية) في الهيكل الزجاجي. في الواقع، واحدة من المدارس الناشئة من الفكر هو أن الزجاج هو ببساطة الحد من حالة الصلبة الكريستالات. وفي هذا الإطار، تصبح "المجالات" التي تظهر درجات مختلفة من النظام القصير المدى اللبنات الأساسية لكل من المعادن والسبائك، فضلا عن النظارات والسيراميك. موزعة بين وداخل هذه المجالات هي العيوب الهيكلية الصغيرة التي توفر المواقع الأكثر مثالية لانتثار الضوء. وتعتبر هذه الظاهرة نفسها واحدة من العوامل التي تحد من شفافية الأشعة تحت الحمراء. التشتت يمكن أيضا أن يكون ناتج عن عمليات ضوئية غير الخطية في الألياف.

2-الأشعة فوق البنفسجية وتحت الحمراء

بالإضافة لتشتت الضوء، التشويش أو الخسارة في الموجة، أيضا بسبب امتصاص انتقائي لأطوال موجية محددة، بطريقة مماثلة لتلك المسؤولة عن ظهور اللون. المواد الأولية تشمل كلا من الإلكترونات والجزيئات على النحو التالي: على المستوى الإلكتروني، يعتمد ذلك على ما إذا كانت المدارات الإلكترونية متباعدة أو ("كمية") بحيث يمكنها امتصاص كمية من الضوء أو(الفوتون) لطول موجي معين أو تردد في الأشعة فوق البنفسجية أو نطاقات مرئية. هذا هو ما يثير اللون. على المستوى الذري أو الجزيئي، يعتمد ذلك على ترددات الذبذبات الذرية أو الجزيئية أو الروابط الكيميائية، ومدى قرب ذراتها أو جزيئاتها، وعما إذا كانت الذرات أو الجزيئات تظهر امدا طويل المدى ام لا. هذه العوامل سوف تحدد قدرة المواد التي تنقل اطوال موجية أطول في الأشعة تحت الحمراء، الأشعة تحت الحمراء البعيدة، والإذاعة وموجات الميكروويف. ويتطلب تصميم أي جهاز شفاف ضوئيا اختيار المواد استنادا إلى معرفة خصائصها وقيودها. خصائص امتصاص شعرية لوحظ في مناطق التردد المنخفض (منتصف الأشعة تحت الحمراء إلى نطاق الطول الموجي الأشعة تحت الحمراء البعيدة) تحديد الحد شفافية طويلة الطول الموجي من المواد. وهي نتيجة لتفاعل بين الاهتزازات التي يسببها حراريا من ذرات المكونة وجزيئات شعرية الصلبة والإشعاع موجة الضوء الحادث. وبالتالي، فإن جميع المواد تحدها مناطق الحد من امتصاص الناجمة عن الاهتزازات الذرية والجزيئية في الأشعة

تحت الحمراء البعيدة (> 10 ميكرون). . وهكذا، يحدث امتصاص متعدد الفونونات عندما يتفاعل اثنان أو أكثر من الفونونات في وقت واحد لإنتاج رابطة ثنائية القطب الكهربائية التي قد يتسبب فيها الإشعاع الحادث. ويمكن لهذه الروابط القطبية امتصاص الطاقة من الإشعاع الحادث، بحيث تصل إلى اقصى اقتران مع الإشعاع عندما يكون التردد مساويا للوضع الاهتزازي الأساسي للثنائي القطب الجزيئي في الأشعة تحت الحمراء . ويحدث الامتصاص الانتقائي لضوء الأشعة تحت الحمراء بواسطة مادة معينة لأن التردد المحدد للموجة الضوئية يطابق التردد (أو عدد صحيح من التردد) الذي تذبذب فيه جسيمات تلك المادة. وبما أن الذرات والجزيئات المختلفة لها ترددات طبيعية مختلفة من الاهتزازات، فإنها ستمتص بشكل انتقائي ترددات مختلفة (أو أجزاء من الطيف) لضوء الأشعة تحت الحمراء. يحدث انعكاس ونقل موجات الضوء لأن ترددات موجات الضوء لا تتطابق مع الترددات الرنانة الطبيعية من اهتزاز الكائنات. عندما يضرب ضوء الأشعة تحت الحمراء من هذه الترددات كائنا، فإن الطاقة إما تنعكس أو تنتقل. يحدث انعكاس ونقل موجات الضوء لأن ترددات موجات الضوء لا تتطابق مع الترددات الرنانة الطبيعية من اهتزاز الكائنات. عندما يضرب ضوء الأشعة تحت الحمراء من هذه الترددات كائنا، فإن الطاقة إما تنعكس أو تنتقل.

المصادر

المصادر

1-كتاب: اساسيات الاتصالات الكهربيه التماثلية والرقمية

2-كتاب: الموسوعة الالكترونية

3-كتاب:

Optical Fibre Communication Principles and practice_Second edition

4-كتاب خطوط النقل والالياف البصرية

5-بعض المعلومات المستاة من شروح الاساتذة_مادة الاتصالات الرقمية.

6-^مكتب تنسيق التعريب نسخة محفوظة 17 ديسمبر 2019 على موقع واي باك مشين.[وصلة مكسورة] .

" ^-7LDLP - Librairie Du Liban Publishers". www.ldlp-dictionary.com . مؤرشف من الأصل في 24 ديسمبر 2019. اطلع عليه بتاريخ 01 نوفمبر 2018.

8- Tbps over a Single Optical Fiber: Successful Demonstration of World's Largest Capacity – 145 digital high-definition movies transmitted in one second. NTT Press Release. September 29, 2006 نسخة محفوظة 21 سبتمبر . 2017 على موقع واي باك مشين.

-9Alfiad, M. S.; et al. (2008). "111 Gb/s POLMUX-RZ-DQPSK Transmission over 1140 km of SSMF with 10.7 Gb/s NRZ-OOK Neighbours" (PDF). Proceedings ECOC 2008 صفحات .Mo.4.E.2 مؤرشف . dx) في 4 ديسمبر 2013.PDFمن الأصل (

-10Yao, S. (2003) "Polarization in Fiber Systems: Squeezing Out More Bandwidth نسخة محفوظة "July 11, 2011 ,.على موقع واي باك مشين ,The Photonics Handbook, Laurin Publishing, p. 1) "نسخة مؤرشفة" .PDF .( ) في 18 أكتوبر 2016. اطلع عليه بتاريخ 2 مايو 2017.PDFمؤرشف من الأصل (

-11Ciena, JANET Delivers Europe’s First 40 Gbps Wavelength Service 07/09/2007. Retrieved 29 Oct 2009 على موقع 2010 نوفمبر 22 نسخة محفوظة . واي باك مشين.

-12Hecht, Jeff (2011-04-29). "Ultrafast fibre optics set new speed record". New Scientist. 210 (2809): 24. Bibcode:2011NewSc.210R..24H. doi:10.1016/S0262-4079(11)60912-3 .2015 مؤرشف من الأصل في 10 يونيو . اطلع عليه بتاريخ 26 فبراير 2012

-13Bell Labs breaks optical transmission record, 100 Petabit per second kilometer barrier نسخة محفوظة October 9, 2009 .. على موقع واي باك مشين , Physorg. September 29, 2009

-14IEEE Spectrum: Electricity Over Glass. IEEE Spectrum. October 2005 نسخة محفوظة 12 يناير 2018 على موقع واي

-15 Photovoltaic feat advances power over optical fiber – Electronic Products نسخة محفوظة July 18, 2011 نسخة 2006/01/06 .. على موقع واي باك مشين , محفوظة 06 سبتمبر 2015 على موقع واي باك مشين

-16How Fiber Optics Work | HowStuffWorks 2010 نسخة محفوظة 06 يناير على موقع واي باك مشين.

-17Corning SMF-28 ULL optical fiber .2015 مؤرشف من الأصل في 8 مايو ". اطلع عليه بتاريخ April 9, 2014.

-18Williams, E. A. (ed.) (2007). National Association of Broadcasters Engineering Handbook (Tenth Edition). Taylor & Francis–1667 صفحات . 1685(Chapter 6.10 – Fiber–Optic Transmission Systems, Jim Jachetta). ISBN 978-0-240-80751-5.

-19Smith, R. G. (1972). "Optical Power Handling Capacity of Low Loss Optical Fibers as Determined by Stimulated Raman and Brillouin Scattering". Applied Optics. 11 (11): 2489–94. Bibcode:1972ApOpt..11.2489S. doi:10.1364/AO.11.002489. PMID 20119362.

-20Paschotta, Rüdiger. "Brillouin Scattering". Encyclopedia of Laser Physics and Technology. RP Photonics .2019 مؤرشف من الأصل في 6 أبريل .