جامعة ميسان

كلية التربية الأساسية

قسم ـ العلوم العامة

فرع – الفيزياء

تطبيقات الليزر في الاتصالات البصرية

بحث مقدم الى مجلس كلية التربية الاساسية - جامعة ميسان – قسم علوم العلوم العامة - فرع الفيزياء وهو جزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس

اعداد :

مريم علي سعيد

مريم حميد موسى

كوثر ناظم غازي

الاشراف:

م.م ضحى شاكرحسن النوري

1447هـ

2026 م

بسم الله الرحمن الرحيم
﴿يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ﴾
سورة المجادلة (الآية 11)
@ieman_quran

الاهداء

إلى من اهتدت البرية بنورهم رسول الله واله الطيبين الطاهرين ...

إلى بلدي العزيز العراق الجريح ...

إلى أستاذي المشرف عرفانا بالجميل ..

إلى من قضى الله لهما بالإحسان وجعله فرضا .. الوالدين .. الكريمين ..

إلى من أرى فيهم صورة المستقبل الأجمل .

أخوتي الأعزاء ...

إلى كل من مد يد العون ...

أهدي هذا الجهد المتواضع ...

الشكر والعرفان

الحمد لله الأول قبل الإنشاء والأحياء والآخر بعد فناء الأشياء العليم الذي لا ينسى من ذكره ولا ينقص من شكره ولا تخيب من دعاه ولا يقطع رجاء من رجاء والصلاة والسلام على اشرف الخلق والمرسلين أبي القاسم محمد وآله الطيبين الطاهرين أما بعد ... فاني يسعدني أن أتقدم بالشكر الجزيل الى مشرفتي العزيزة (**م.م ضحى شاكر حسن)** و باقتراح موضوع البحث ووقوفها معي لإكمال وإخراج البحث بشكله الحالي كما يطيب لي ويسعدني أن أتقدم بوافر الشكر والتقدير والاعتزاز لكافة تدريسي جامعة ميسان كليه التربية الأساسية كما أتقدم بخالص شكري وامتناني إلى كل من مدلي يد المساعدة في إخراج هذا البحث على أكمل وجه وانا أختم بحثي بعون الله..

فهرست الأشكال

ت	المضوع	رقم الصفحة
.1	شكل (1-1) الوحدات الأساسية المكونة لجهاز الليز	9
.2	شكل (1-2) مخطط للوحدات الأساسية المكونة لجهاز الليز	10
.3	شكل (1-3) يوضح لأنماط الثلاثة الأساسية لتفاعل النظام الذري مع الاشعاع الكهرومغناطيسي	13
.4	شكل (1-4) توضح مقارنة بين ضوء الليزر والضوء العادي	16
.5	شكل(2- 1يوضح مخطط دائرة التوصيل البصري بواسطة الليزر.	20
.6	شكل(2-2) يوضح مكونات نظام الاتصالات البصرية بشكل عام.	20
.7	شكل(2-3) مخطط عن مناطف الطيف الكهرومغناطيسي.	22
.8	شكل (2-4) مخطط شبكة LAN يوضح استخدام ليزر أشباه الموصلات بين الخوادم والأجهزة الطرفي	25
.9	شكل(2-5) توضح بنية أشباه الموصلات	26
.10	شكل (2-6) يوضح ليزر أشباه الموصلات أو ليزر ديود	27
.11	شكل (2-7) يوضح بنية ليزر DFBواتجاه الانبعاث الأفقي	31
.12	وصف الشكل(3-1) يوضح إرسال حزمة ليزر بين مبنيين عبر الهواء دون استخدام الألياف البصرية	39
.13	شكل (3-2) يوضح نقل البيانات بين قمر صناعي ومحطة أرضية باستخدام حزم ليزر دقيقة	40
.14	شكل (3-3) مخطط يوضح دمج تقنيات الفوتونيات المتكاملة (Integrated Photonics) مع الدوائر الإلكترونية لتقليل استهلاك الطاقة وزيادة الأداء.	41

المحتويات

ت	المضوع	رقم الصفحة
.1	الاهداء	أ
.2	الشكر والعرفان	ب
.3	فهرست الاشكال	ت
.4	المحتويات	ث – ج
.5	ملخص	ح
.6	المقدمة	2 – 1
7	اهداف البحث	2
.8	الفصل الأول _ الأساس النظري لليزر ومبادئ عمله	16 – 4
9	تمهيد	4
10	الطبيعة الجسيمية و الموجية للضوء	4
11	مفهوم الليزر	5
12	خصائص الاساسية لليزر	8-6
.13	مكونات جهاز الليزر	10 –8
.14	الية عمل الليزر و توليد الاشعاع	12 – 11
.15	تصنيف أنواع الليزر	14 – 13
.16	مقارنة ضوء الليزر مع الضوء الاعتيادي	16 – 15

.17	الفصل الثاني _ الية عمل الليزر في نقل البيانات	35 - 17
.18	اهمية استخدام الليزر في الاتصالات	18
.19	آلية عمل الليزر في منظومة الارسال	22 – 19
.20	خصائص الليزر في منظومات الإرسال	24 – 23
.21	أنواع الليزر المستخدمة في الاتصالات وتطبيقاته العملية	32 – 25
.22	مقارنة ومميزات الليزر المستخدم في الاتصالات	35 – 33
.23	الفصل الثالث _ انوع تطبيقات الاتصالات البصرية و التحديات القائمة	43- 36
.24	نبذة عن استخدام الليزر في الاتصالات	37
.25	أنواع تطبيقات الليزر في الاتصالات	37
.26	التطبيقات العملية في شبكات الاتصالات	37
.27	التطبيقات الحديثة والمستقبلية لليزر في الاتصالات	38
.28	الليزر في شبكات الاتصالات فائقة السرعة	38
.29	الاتصالات الضوئية الحرة (Free Space Optical Communication)	39
.30	الليزر في الاتصالات الفضائية والأقمار الصناعية	40
.31	دور الليزر في شبكات الجيل الخامس والسادس	41
32	الايجابيات و السلبيات لاستخدام الليزر في الاتصالات	42
33	التحديات التي تواجه استخدام الليزر في الاتصالات	43
.34	الخاتمة	44
.35	المصادر	49– 45

الخلاصة

يهدف هذا البحث إلى دراسة تطبيقات الليزر في مجال الاتصالات الحديثة، وبيان الدور المحوري الذي تؤديه التقنيات الليزرية في تطوير أنظمة نقل البيانات عالية السرعة. ويستند البحث إلى تحليل الأساس الفيزيائي لعمل الليزر وخصائصه المميزة، مثل التماسك العالي، وأحادية اللون، والاتجاهية الشديدة، والشدة المرتفعة، والتي جعلته المصدر الضوئي الأمثل في أنظمة الاتصالات الضوئية.

تناول البحث في فصله الأول الإطار النظري لليزر ومبادئ عمله، إضافة إلى عرض الدراسات السابقة ذات الصلة بالموضوع. أما الفصل الثاني فقد ركّزعلى دور الليزر في عملية نقل البيانات وعلى أنواع الليزر المستخدمة في الاتصالات، مثل ليزر أشباه الموصلات، وليزر التغذية الراجعة الموزعة(DFB) ، وليزر التجويف العمودي الباعث من السطح(VCSEL) ، مع بيان خصائص كل نوع ومجالات استخدامه في شبكات الاتصالات قصيرة وطويلة المدى. في حين ناقش الفصل الثالث التحديات التقنية التي تواجه الاتصالات الليزرية، مثل التوهين والتشتت والضوضاء، إضافة إلى استعراض أهم النتائج والتوصيات المستقبلية.

وقد توصل البحث إلى أن الليزر يمثل العنصر الأساسي في أنظمة الاتصالات المعاصرة، لا سيما في شبكات الألياف البصرية ومراكز البيانات والاتصالات بعيدة المدى، حيث أسهم في تحقيق سرعات نقل عالية، وتقليل الفقد في الإشارة، ورفع كفاءة وأمان الشبكات. كما أظهرت الدراسة أن التطورات المستمرة في تقنيات الليزر ستسهم مستقبلًا في دعم شبكات الجيل القادم وتلبية الزيادة المتسارعة في حجم البيانات عالميًا كل ما كتب عن الليزر والاتصالات جزء بسيط.

الكلمات المفتاحية :الليزر، الاتصالات الضوئية، الألياف البصرية، DFB، VCSEL، نقل البيانات.

المقدمة

يعتمد مبدأ عمل الليزر على ظاهرة الانبعاث المحفَّز التي تنبأ بها العالم ألبرت أينشتاين، حيث يتم إنتاج ضوء مترابط وعالي الشدة وذي اتجاهية عالية، وهي خصائص جعلت الليزر مصدرًا مثاليًا لنقل الإشارات الضوئية عبر مسافات طويلة بكفاءة كبيرة [1].

شهدت أنظمة الاتصالات تطورًا ملحوظًا عبر العقود الماضية، بدءًا من الاتصالات السلكية التقليدية التي تعتمد على الإشارات الكهربائية، مرورًا بالاتصالات اللاسلكية، وصولًا إلى الاتصالات الضوئية الحديثة التي تعتمد على الألياف البصرية [2]. وقد مثّل إدخال الليزر في هذا المجال نقلة نوعية، إذ أصبح بالإمكان إرسال كميات هائلة من البيانات بسرعات عالية جدًا وبفقدان قليل للإشارة مقارنة بالأنظمة التقليدية . وتعتمد شبكات الإنترنت الحديثة، وشبكات الهاتف، ومراكز البيانات العالمية بشكل أساسي على تقنيات الاتصالات الضوئية القائمة على مصادر ليزر دقيقة ومستقرة [3].

يُعد الليزر من أهم الابتكارات العلمية في القرن العشرين على يد العالم (Theodore Maiman) اذ أسهم بشكل جوهري في إحداث نقلة نوعية في أنظمة الاتصالات الحديثة، خاصة الاتصالات الضوئية المعتمدة على الألياف البصرية. فقد أتاح استخدام مصادر ليزرية مستقرة وذات عرض طيفي ضيق مثل ليزر التغذية الراجعة الموزعة (DFB) وليزر التجويف العمودي الباعث من السطح (VCSEL) إمكانية نقل البيانات بسرعات عالية جدًا ولمسافات طويلة مع تقليل الفقد والتشويش.

تعتمد أنظمة الاتصالات الليزرية على خصائص فريدة للضوء الليزري، من أهمها أحادية اللون، والتماسك العالي، والاتجاهية الشديدة، مما يجعلها مثالية للإرسال عبر الألياف البصرية أو عبر الفضاء الحر. وقد شكّل دمج الليزر مع تكنولوجيا الألياف البصرية الأساس لتطور شبكات الإنترنت العالمية، وأنظمة الاتصالات الهاتفية، والبث التلفزيوني الرقمي، إضافة إلى شبكات الجيل الخامس والسادس[4].

كما أدت التطورات في ليزرات أشباه الموصلات إلى تقليل الحجم والكلفة وزيادة الكفاءة، الأمر الذي جعل تقنيات الاتصالات الضوئية في متناول الاستخدامات التجارية والصناعية. وتؤكد هذه الدراسة أن الليزر لم يعد مجرد أداة علمية، بل أصبح عنصرًا محوريًا في البنية التحتية للاتصالات المعاصرة، مع توقع استمرار دوره الحيوي في دعم تقنيات المستقبل مثل الحوسبة الضوئية والاتصالات الكمية[5].

يشهد العالم في العصر الحديث ثورة معلوماتية هائلة، حيث أصبحت الاتصالات السريعة والموثوقة ضرورة أساسية في مختلف مجالات الحياة، من التعليم والصحة إلى الاقتصاد والدفاع. ويُعد الليزر حجر

الأساس في هذه الثورة، إذ يوفر مصدرًا ضوئيًا عالي الكفاءة يمكن استخدامه في نقل المعلومات بسرعة الضوء تقريبًا عبر وسائط مختلفة.

منذ اختراع أول ليزر عملي على يد Theodore Maiman عام 1960، بدأ الاهتمام يتزايد باستخدامه في المجالات التطبيقية، خاصة بعد تطوير الألياف البصرية منخفضة الفقد في سبعينيات القرن الماضي. وقد ساهمت شركات مثل Bell Labs في تطوير تقنيات الاتصالات الضوئية التي تعتمد على ليزرات أشباه الموصلات[6].

تعتمد الاتصالات الليزرية على تحويل الإشارة الكهربائية (صوت أو بيانات) إلى إشارة ضوئية باستخدام مصدر ليزري، ثم إرسالها عبر ليف بصري، حيث يتم استقبالها وتحويلها مرة أخرى إلى إشارة كهربائية. وتتميز هذه التقنية بسعات نقل عالية جدًا مقارنة بالأنظمة التقليدية المعتمدة على الأسلاك النحاسية أو الموجات الراديوية.

ثانيا : أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى:

1. **توضيح الأساس الفيزيائي لليزر** وبيان كيفية عمله في شبكات الاتصالات .
2. **التعرف على خصائص الليزر** التي تجعل منه مناسبًا للاستخدام في أنظمة الاتصالات الضوئية .
3. **استعراض أنواع الليزر** المستخدمة عمليًا مثل DFB ، VCSEL، وأشباه الموصلات، مع تحليل مزايا وعيوب كل نوع .
4. **عرض أهم التطبيقات العملية** في شبكات الألياف الضوئية ومراكز البيانات .
5. **مناقشة التحديات التقنية** التي تواجه استخدام الليزر، مثل فقد الإشارة، التكلفة، والتوافق مع البنية التحتية الحالية .

الفصل الاول

الاساس النظري لليزر ومبادئ عمله

1.1 تمهيد

بعد الليزر من أهم الابتكارات العلمية التي غيرت مسار العديد من المجالات التقنية، ولا سيما مجال الاتصالات الحديثة. ويعتمد الليزر في عمله على أسس فيزيائية ترتبط بميكانيك الكم وطبيعة تفاعل الضوء مع المادة. وقد بدأ الإطار النظري لهذه التقنية عندما قدم العالم البرت اينشتاين تفسيره الظاهرة الانبعاث المستحث عام 1917، حيث أوضح أن الذرات يمكن أن تثار ثم تعود إلى حالتها المستقرة مطلقة فوتونات متطابقة في الطور والتردد والاتجاه [7]. وقد شكل هذا المفهوم الأساس العلمي لتطوير اجهزة الليزر لاحقاً.

2.1 الطبيعة الموجية والجسيمية للضوء

لفهم آلية عمل الليزر لا بد من التطرق إلى الطبيعة المزدوجة للضوء، إذ يظهر الضوء خصائص موجية وأخرى جسيمية في أن واحد. فقد بينت تجارب التداخل والحيود الطبيعة الموجية للضوء، بينما فسر التأثير الكهروضوئي طبيعته الجسيمية، حيث يتكون الضوء من جسيمات تسمى الفوتونات [8]. ومعادلة رقم (1) لثابت بلانك توضح علاقة الطاقة و التردد طرديا .حيث تكمن أهمية هذه العلاقة في تفسير انتقال الإلكترونات بين مستويات الطاقة داخل الذرة، وهي العملية الأساسية في توليد أشعة الليزر [9].

حيث ان $E = h.f$ .....(1)

$E =$ الفوتون طاقة

$h =$ ثابت بلانك

$f =$ التردد

2.1مفهوم الليزر

يُعد الليزر من أهم التقنيات الحديثة التي أحدثت ثورة كبيرة في مجالات العلم والتكنولوجيا، وهو اختصار لعبارة Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation أي "تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المحفَّز للإشعاع". يعتمد مبدأ الليزر على أساس فيزيائي دقيق يرتبط بتفاعل الضوء مع الذرات أو الجزيئات، حيث يتم إنتاج حزمة ضوئية شديدة التركيز، أحادية اللون، ومتناسقة في الطور والاتجاه.

يقوم مبدأ عمل الليزر على إثارة الذرات داخل وسط فعال (قد يكون غازاً أو صلباً أو سائلاً) باستخدام مصدر طاقة خارجي مثل التيار الكهربائي أو الضوء. عندما تمتص هذه الذرات الطاقة، تنتقل إلكتروناتها إلى مستويات طاقة أعلى، وهي حالة غير مستقرة. وعند عودة الإلكترونات إلى مستوياتها الأصلية، تُطلق طاقة على شكل فوتونات (جسيمات ضوئية). في حالة "الانبعاث المحفَّز"، يقوم فوتون واحد بتحفيز ذرة مثارة لإطلاق فوتون آخر مطابق له تماماً في الطاقة والاتجاه والطور، مما يؤدي إلى تضخيم الضوء بشكل كبير.[10]

تُحصر هذه الفوتونات داخل تجويف بصري يحتوي على مرآتين متقابلتين، إحداهما عاكسة بالكامل والأخرى شبه عاكسة، حيث تنعكس الفوتونات ذهاباً وإياباً داخل التجويف، مما يزيد من تضخيمها وتنظيمها. وعندما تخرج من المرآة شبه العاكسة، تتشكل حزمة الليزر التي تتميز بخصائص فريدة، أهمها: الشدة العالية، والترابط (coherence)، وأحادية اللون (monochromaticity)، والتوازي الشديد (directionality).

تتعدد أنواع الليزر بحسب الوسط الفعال المستخدم، مثل ليزر الهيليوم-نيون، وليزر ثاني أكسيد الكربون، وليزر الحالة الصلبة مثل الياقوت. ولكل نوع استخداماته الخاصة. فقد دخل الليزر في مجالات متعددة مثل الطب (في الجراحة الدقيقة وعمليات العيون)، والصناعة (في القطع واللحام)، والاتصالات (في نقل البيانات عبر الألياف الضوئية)، والبحث العلمي، وحتى في الاستخدامات العسكرية.

تكمن أهمية الليزر في دقته العالية وقدرته على التحكم بالطاقة الضوئية بشكل غير مسبوق، مما يجعله أداة لا غنى عنها في العديد من التطبيقات الحديثة. كما أن التطور المستمر في تكنولوجيا الليزر أدى إلى تحسين كفاءته وتقليل تكلفته، مما ساهم في انتشاره الواسع في الحياة اليومية.

ويتميز الليزر بخصائص معينة مما جعلته مختلفا عن مصادر الضوء الاخرى و مهما في عدة من التطبيقات وكما موضح كالاتي:

3.1 الخصائص الأساسية لليزر:

1. أحادية اللون (Monochromaticity)

تتميز أشعة الليزر بأنها تنبعث بطول موجي واحد محدد بدقة عالية جدًا (تردد واحد).

- الأهمية في الاتصالات: في أنظمة الألياف الضوئية، تمنع هذه الخاصية ما يعرف بـ "التشتت اللوني" (Chromatic Dispersion). فلو كان الضوء يحتوي على أطوال موجية متعددة، ستسير كل موجة بسرعة مختلفة داخل الليف الضوئي، مما يؤدي إلى تداخل النبضات وضياع البيانات. أحادية اللون تضمن وصول الإشارة نقية لمسافات طويلة.

2. الاتجاهية العالية (High Directionality)

على عكس مصادر الضوء التقليدية التي تنتشر في جميع الاتجاهات، ينبعث الليزر في حزمة ضيقة جدًا وذات انفراج زاوية ضئيل للغاية.

- الأهمية في الاتصالات: تركيز الطاقة: تسمح هذه الخاصية بتوجيه كامل طاقة الإشارة نحو مستقبل دقيق (مثل طرف سلك ليف ضوئي قطره ميكرونات).
- الاتصالات الفضائية: تمكننا من إرسال بيانات بين الأقمار الصناعية أو من الأرض إلى القمر بحد أدنى من ضياع الإشارة في الفضاء.

3. الترابط (Coherence)

من أهم الخصائص الفيزيائية التي تميز ضوء الليزر عن الضوء العادي، وهو يعبر عن مدى انتظام العلاقة بين أطوار الموجات الضوئية الصادرة من المصدر. بمعنى آخر، الترابط يحدد مدى قدرة الموجات الضوئية على الحفاظ على نفس النمط الموجي والعلاقة الطورية بينها، سواء عبر الزمن أو عبر الفضاء، وهذا ما يمنح الليزر دقته العالية وقابليته للاستخدام في التطبيقات المتقدمة.

ينقسم الترابط إلى نوعين رئيسيين: الترابط الزمني والترابط المكاني. يشير الترابط الزمني إلى مدى ثبات الطور الموجي مع مرور الزمن عند نقطة معينة في الفضاء. فإذا كانت الموجة الضوئية تحافظ على فرق

طور ثابت خلال فترة زمنية طويلة نسبياً، فإنها تُعد ذات ترابط زمني عالٍ. هذا النوع من الترابط يرتبط بشكل مباشر بنقاء التردد أو أحادية اللون، حيث أن الضوء ذو التردد الواحد تقريباً يمتلك ترابطاً زمنياً أكبر، مما يسمح له بالانتشار لمسافات طويلة دون أن يفقد انتظامه. ولهذا السبب تُستخدم أشعة الليزر في الاتصالات البصرية لمسافات بعيدة، لأنها تحافظ على استقرار الإشارة.

أما الترابط المكاني، فيعني مدى تماثل الطور بين نقاط مختلفة على المقطع العرضي للحزمة الضوئية. عندما يكون الضوء مترابطاً مكانياً، فإن جميع أجزاء الحزمة تكون في نفس الطور تقريباً، مما يؤدي إلى توازي الحزمة وعدم تشتتها أثناء الانتشار. هذه الخاصية هي التي تجعل شعاع الليزر ضيقاً وموجهاً بدقة عالية، على عكس الضوء العادي الذي ينتشر في جميع الاتجاهات. كما أن الترابط المكاني يلعب دوراً أساسياً في التطبيقات التي تتطلب تركيز الطاقة في نقطة صغيرة جداً، مثل الجراحة الدقيقة أو القطع بالليزر.

- تتجلى أهمية الترابط بشكل واضح في مجال الاتصالات الضوئية الحديثة، حيث يسمح باستخدام تقنيات متقدمة تُعرف بـ "التعديل المعقد" مثل QAM (Quadrature Amplitude Modulation) وPSK (Phase Shift Keying). هذه التقنيات لا تعتمد فقط على شدة الضوء (Intensity)، بل تستفيد أيضاً من خاصية الطور (Phase) لنقل المعلومات. وبما أن ضوء الليزر يتميز بترابط عالٍ، فإنه يمكن التحكم بطور الموجة بدقة كبيرة، مما يتيح إرسال كميات ضخمة من البيانات في وقت قصير جداً. على سبيل المثال، يمكن ترميز البيانات في تغيّرات دقيقة في الطور، وبالتالي زيادة عدد الرموز الممكن إرسالها ضمن نفس الحزمة الترددية، وهذا يؤدي إلى مضاعفة كفاءة نقل المعلومات بشكل كبير. [11]

4. الكثافة العالية والسطوع (High Intensity)

ينتج الليزر كمية هائلة من الطاقة المركزة في مساحة صغيرة جدًا.

- الأهمية في الاتصالات: تضمن هذه الشدة العالية إمكانية نقل الإشارة لمسافات شاسعة (تصل لمئات الكيلومترات في الكابلات البحرية) قبل الحاجة إلى استخدام أجهزة تقوية (Repeaters). كما أنها ترفع من "نسبة الإشارة إلى الضوضاء" (SNR)، مما يقلل من الأخطاء في البيانات المستلمة.

5-**السرعة الفائقة في التبديل (High Modulation Rate)**

يمكن تشغيل وإطفاء الليزر (أو تعديل شدته) بمعدلات تصل إلى مليارات المرات في الثانية (Gigahertz).

- الأهمية في الاتصالات: هذه الخاصية هي المسؤولة مباشرة عن "عرض النطاق الترددي" (Bandwidth) العالي. وبما أن تردد الضوء أعلى بآلاف المرات من تردد موجات الراديو أو الميكروويف، فإن قناة اتصال ليزرية واحدة يمكنها حمل كمية بيانات تعادل ما تحمله آلاف القنوات الراديوية مجتمعة.

3.1 مكونات جهاز الليزر

لكي يتولد شعاع الليزر، لابد من توفر ثلاثة عناصر رئيسية كما وضح كالاتي:

1. **الوسط النشط (Active Medium):** وهو المادة التي تتولد فيها حزمة الليزر قد تكون صلبة كالياقوت، غازية كغاز ثاني أكسيد الكربون، أو سائلة .حيث يحتوي على ذرات أو جزيئات يمكن إثارتها لتوليد الفوتونات. [12].
2. **مصدر الطاقة (Pump Source) :** هو الوسيلة التي تمد الذرات بالطاقة لنقلها إلى مستويات طاقة أعلى (مثل الوميض الضوئي أو التفريغ الكهربائي).اي يوفر الطاقة لاثارة الوسط النشط كهربائيا او ضوئيا.
3. **التجويف البصري (Optical Resonator)** : يتكون من مرآتين متقابلتين، إحداهما عاكسة تماماً والأخرى عاكسة جزئياً و على جانبي الوسط النشط ، وظيفتها حجز الفوتونات لإعادة توجيها وتدويرها لتضخيم الشعاع. و يكون تركيب المرنان في الليزر هو جزء أساسي يُستخدم لتضخيم الضوء وتحويله إلى شعاع ليزر قوي ومنظم. يمكن تعريفه بأنه تجويف بصري يتكوّن عادةً من مرآتين متقابلتين، توضع بينهما المادة الفعالة التي تُنتج الضوء. تكون إحدى المرآتين عاكسة بشكل كامل، بينما تكون الأخرى شبه عاكسة بحيث تسمح بخروج جزء من الضوء إلى الخارج.

تبدأ عملية عمل المرنان عندما يتم تزويد الوسط الفعال بالطاقة، مما يؤدي إلى إثارة الإلكترونات داخل الذرات. وعند عودة هذه الإلكترونات إلى مستويات طاقة أقل، فإنها تُطلق فوتونات (جسيمات ضوئية). هذه الفوتونات تتحرك داخل التجويف بين المرآتين، حيث تنعكس ذهابًا وإيابًا مرات عديدة. أثناء هذه

الحركة، تقوم الفوتونات بتحفيز ذرات أخرى لإطلاق فوتونات جديدة مماثلة لها، في عملية تُعرف بالانبعاث المحفَّز.

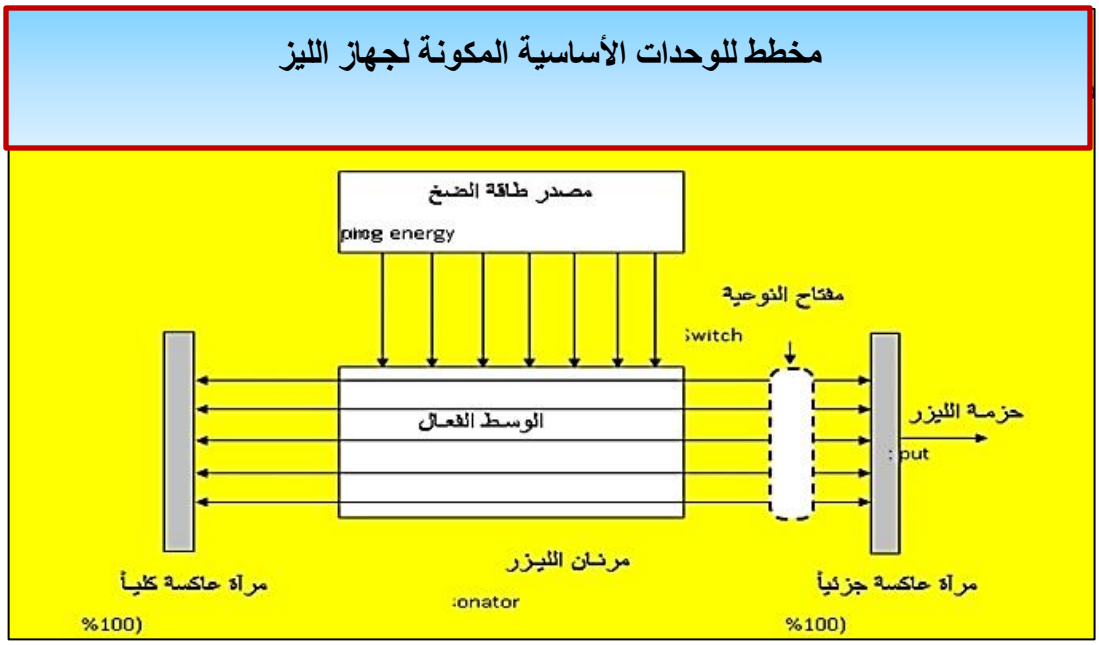
مع تكرار هذه العملية، يزداد عدد الفوتونات بشكل كبير، أي يحدث تضخيم للضوء داخل المرنان. وبسبب الانعكاس المستمر بين المرآتين، يصبح الضوء أكثر انتظامًا وترابطًا. في النهاية، يسمح الجزء شبه العاكس من إحدى المرآتين بخروج جزء من هذا الضوء المضخم إلى الخارج على شكل شعاع ليزر قوي وموجَّه.

تكمن أهمية المرنان في أنه يحدد خصائص شعاع الليزر، مثل شدته واتجاهه وطوله الموجي. كما أنه يساعد في الحصول على ضوء مستقر وعالي الجودة، وهو أمر ضروري في تطبيقات الاتصالات، حيث يتم استخدام الليزر لنقل البيانات بسرعات عالية جدًا عبر الألياف الضوئية.

بشكل عام، يمكن القول إن جهاز المرنان هو العنصر الذي يجعل الضوء داخل الليزر يتكرر ويتضخم وينتظم، مما يؤدي في النهاية إلى إنتاج شعاع ليزر فعال يمكن استخدامه في مختلف تطبيقات الاتصالات الحديثة.[13]شكل(1-1)و(1-2). يوضح التركيب الاساس لجهاز الليزر كما تم تفصيله بثلاث عناصر رئيسية.

الوحدات الأساسية المكونة لجهاز الليز

شكل(1-1) الوحدات الأساسية المكونة لجهاز الليز. [14].



شكل (1-2) مخطط للوحدات الأساسية المكونة لجهاز الليز [15]

ـ وهناك عدة انواع لمرنان الليزر :

أنواع المرنان (Laser Resonator) – بشكل مختصر

- المرنان الخطي (Linear Resonator):مرآتان متقابلتان، الضوء يتحرك ذهابًا وإيابًا بينهما (الأكثر شيوعًا).
- المرنان الحلقي (Ring Resonator):الضوء يدور في مسار دائري أو حلقي، يُستخدم لتقليل التداخل.
- المرنان ذو المرايا المستوية (Plane Mirrors):مرايا مسطحة، تصميم بسيط لكن أقل استقرارًا.
- المرنان ذو المرايا المنحنية (Curved Mirrors):يستخدم مرايا مقعّرة لزيادة تركيز الضوء واستقراره.
- المرنان المستقر (Stable Resonator):يحافظ على بقاء الضوء داخل التجويف لفترة طويلة.
- المرنان غير المستقر (Unstable Resonator):يسمح بخروج الضوء بسرعة، يُستخدم في الليزرات عالية القدرة.

4.1 الية عمل الليزر و توليد ألاشعاع

تعتبر آلية عمل الليزر عملية فيزيائية دقيقة تعتمد على التفاعل بين الإشعاع الكهرومغناطيسي والمادة على المستوى الذري. فيما يلي شرح تفصيلي وموسع لآلية العمل وكيفية تولد الإشعاع:[16].

- مراحل تولد الإشعاع (الآلية الفيزيائية) .تعتمد عملية تولد الليزر على أربع خطوات فيزيائية متسلسلة: [17].

1. **الامتصاص (Absorption):**

عند تسليط طاقة خارجية (الضخ) على الوسط الفعال، تقوم الإلكترونات في الذرات بامتصاص هذه الطاقة والانتقال من مستوى الطاقة الأرضي (E_1) إلى مستويات طاقة أعلى وأكثر استثارة (E_2). وبما ان النظم الممثلة بذرات، أيونات او جزيئات تمتلك مستويات طاقة محددة، فان الموجه الكهرومغناطيسية ذات الطاقة المساوية لمقدار فرق الطاقة بين مستويين محددين خاصين بنظام ذري معين سوف تتفاعل معه، إذ تنتقل ذراته او جزيئاته من مستوى الطاقة الأوطأ E1 الى المستوى الطاقة الأعلى E2 تسمى هذه العملية الامتصاص شكل (3-أ).

- **التوزيع المعكوس (Population Inversion):**

في الحالة الطبيعية، يكون عدد الذرات في المستوى الأرضي أكثر من المستويات العليا. لكي يعمل الليزر، يجب عكس هذه الحالة بحيث يصبح عدد الذرات المستثارة في المستويات العليا أكبر من عددها في المستوى الأدنى. هذه الحالة تسمى "التوزيع المعكوس" وهي شرط أساسي لعمل الليزر.

2. الانبعاث التلقائي (Spontaneous Emission):

بما أن الذرات في حالة الاستثارة تكون غير مستقرة، فإنها تميل للعودة إلى مستواها الطبيعي. عندما يهبط الإلكترون تلقائياً، يطلق فوتوناً (طاقة ضوئية). هذا الفوتون يكون عشوائي الاتجاه والطور. وبما أن مكوث الذرات في المستوى الطاقوي المهيج E2 لن يطول كثيراً فإنها ستهبط تلقائياً دون مؤثر وبشكل عشوائي محررة طاقة على شكل فوتون طاقته مساوية لفرق الطاقة بين المستويين وتدعى هذه العملية الانبعاث العشوائي شكل (3-ب) [18].

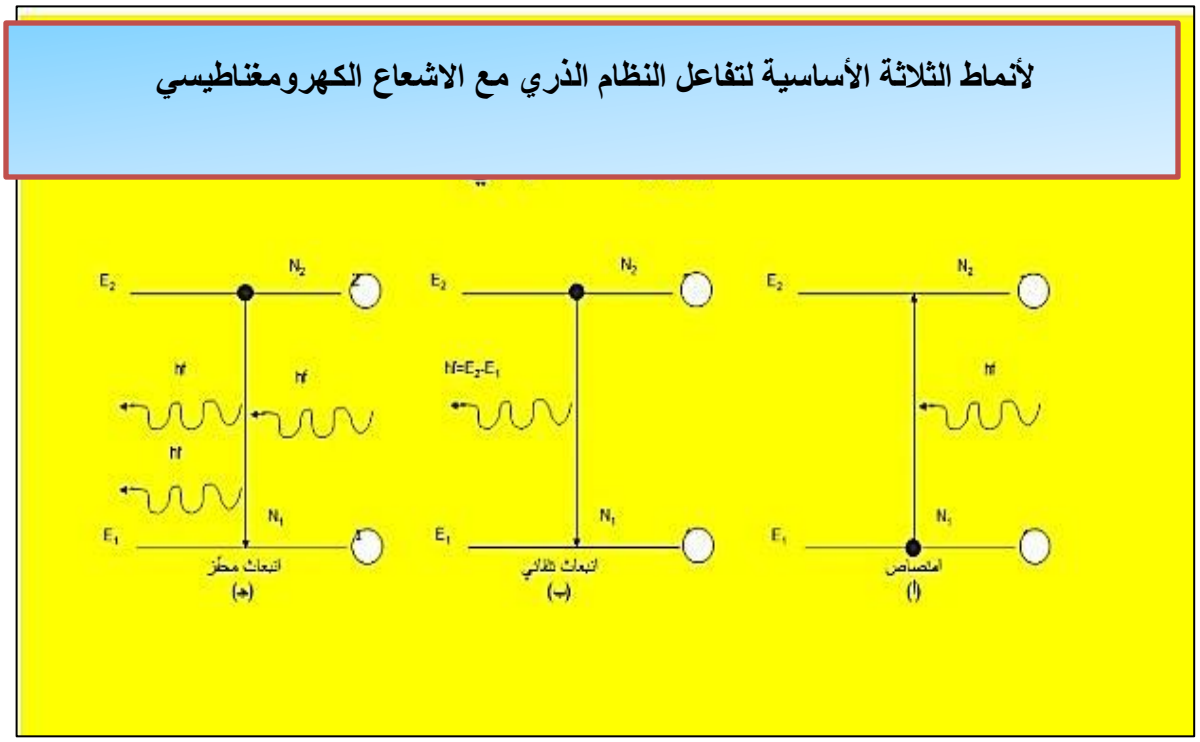
3. الانبعاث المحفز (Stimulated Emission) :

لقد أشار أينشتاين عام 1914 الى ان عمليتي الامتصاص والانبعاث العشوائي ليستا الوحيدتين المعبّرتين عن تفاعل النظام الذري مع الاشعاع الكهرومغناطيسي، بل أثبت ان الانبعاث المحفز شكل (3-جـ) موجود وضروري لموازنة الانتقالات باتجاه الأعلى والأسفل، ويقصد به تحفيز الذرة على الانتقال من المستويات المتهيجة الا مستويات أخرى بفوتون له طاقة مساوية لفرق الطاقة بين المستويين مما يؤدي الى انبعاث فوتون ثان له التردد والطور نفس.حيث عندما تعود الإلكترونات إلى مستوى طاقة أقل، تطلق فوتونات (ضوء).إذا مر فوتون بنفس الطاقة، فإنه يحفّز الإلكترون لإطلاق فوتون آخر مطابق له تمامًا (نفس الطول الموجي، الطور، والاتجاه).هذا يؤدي إلى تضخيم الضوء.وهنا تكمن جوهر الليزر؛ فإذا مر فوتون (له طاقة محددة) بالقرب من ذرة مستثارة "قبل" أن تهبط تلقائياً، فإنه يحفزها على الهبوط فوراً. والنتيجة هي انبعاث فوتون جديد مطابق تماماً للفوتون الأصلي في:

- التردد :(اللون).
- الاتجاه.
- الطور (متزامن معه تماماً).

4. التضخيم وخروج الشعاع:

تبدأ الفوتونات الناتجة عن الانبعاث المحفز بالارتداد بين المرآتين داخل المجوف الرنيني. وفي كل مرة تمر فيها الفوتونات عبر الوسط الفعال، تحفز مزيداً من الذرات على إطلاق فوتونات مطابقة، مما يؤدي إلى تضخم هائل في عدد الفوتونات (كرة ثلج ضوئية).عندما تصل شدة الضوء إلى حد معين، تخرج حزمة ضيقة جداً وعالية الطاقة من خلال المرآة شبه المنفذة، وهي ما نسميه "شعاع الليزر".



شكل(1-3) يوضح لأنماط الثلاثة الأساسية لتفاعل النظام الذري مع الاشعاع الكهرومغناطيسي[19].

5.1 تصنيف انوع الليزر:

1. ليزر الحالة الصلبة (Solid-State Lasers):

- يعتمد هذا النوع على مادة صلبة شفافة (بلورة أو زجاج) مطعمة بأيونات معدنية هي التي تولد الليزر.
- ليزر الياقوت (Ruby Laser): أول ليزر تم اختراعه، يستخدم بلورة الياقوت المطعمة بالكروم، وينتج ضوءاً أحمر مرئياً بطول موجي 694.3 نانومتر.
- ليزر النديميوم-ياج (Nd:YAG): من أكثر الأنواع شيوعاً، يستخدم بلورة " Yttrium Aluminum Garnet" المطعمة بالنديميوم. ينتج أشعة تحت حمراء (1064 نانومتر)، ويستخدم بكثافة في الجراحة والصناعة.
- ليزر التيتانيوم-سافاير (Ti:Sapphire): يتميز بقدرته العالية على الضبط (Tunable) وتوليد نبضات قصيرة جداً.

2. الليزر الغازي (Gas Lasers):

يتكون الوسط الفعال هنا من غاز أو خليط من الغازات داخل أنبوب تفريغ كهربائي.

- ليزر الهيليوم-نيون (He-Ne): ينتج شعاعاً أحمر مستمراً وضعيف القدرة، ويستخدم غالباً في المختبرات وأجهزة المسح الضوئي.
- ليزر ثاني أكسيد الكربون (CO_2): ليزر قوي جداً يعمل في نطاق الأشعة تحت الحمراء البعيدة (10.6 ميكرومتر). يستخدم بشكل أساسي في قطع المعادن، اللحام، والجراحات الدقيقة.
- ليزر الأرجون (Argon Laser): ينتج أشعة باللونين الأزرق والأخضر، ويستخدم في علاج شبكية العين والعروض الضوئية.[20].

3. ليزر أشباه الموصلات (Semiconductor / Diode Lasers):

يُعرف بـ "الليزر الديود"، وهو الأصغر حجماً والأكثر انتشاراً في حياتنا اليومية.

الآلية: يعتمد على انتقال الإلكترونات بين طبقات شبه موصلة (مثل زرنيخيد الغاليوم).

التطبيقات: قارئات الباركود، طابعات الليزر، أجهزة التحكم عن بعد، وأنظمة الألياف الضوئية للاتصالات.

4. الليزر السائل (Liquid / Dye Lasers)

يستخدم صبغات عضوية معقدة مذابة في سائل (مثل الكحول أو الماء).

الميزة الكبرى: هو ليزر "قابل للضبط" (Tunable)، أي يمكن تغيير طوله الموجي بدقة عالية عبر مدى واسع من الألوان، مما يجعله مثالياً لأبحاث الفيزياء والكيمياء التحليلية.

5. ليزر الإكسيمر (Excimer Lasers)

يعتمد على جزيئات غازية غير مستقرة (مثل "فلوريد الأرجون" أو "كلوريد الزينون") التي لا توجد إلا في حالة الاستثارة.

الخصائص: ينتج أشعة في النطاق فوق البنفسجي (UV).

التطبيقات: يستخدم بشكل أساسي في جراحات العين (الليزك - LASIK) لتعديل القرنية دون توليد حرارة قد تضر الأنسجة المحيطة.

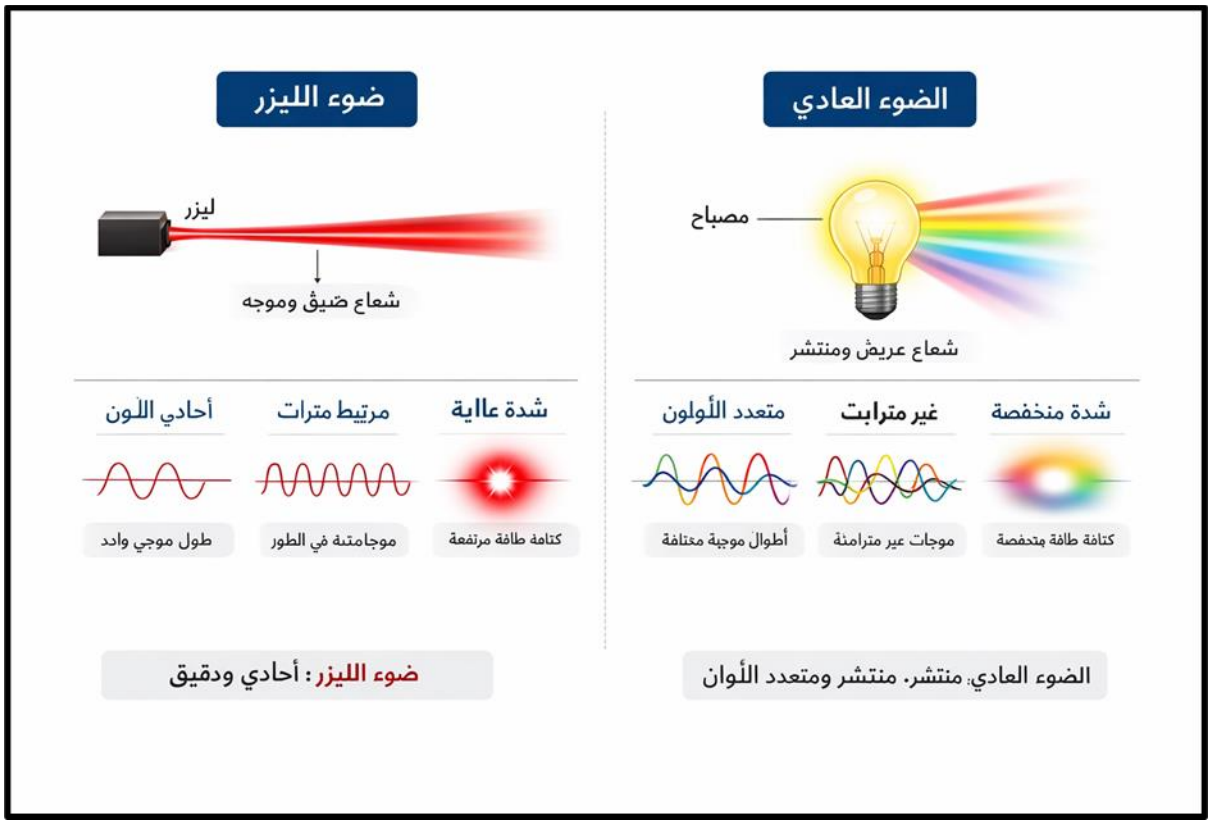
6.1 مقارنة ضوء الليزر مع الضوء الاعتيادي:

يختلف ضوء الليزر عن الضوء العادي في عدة خصائص أساسية تجعله مميزًا في التطبيقات العلمية والتقنية. وكما موضح في جدول(1-1) و شكل (1-4).

جدول(1-1):خصائص الضوء الليزر مقارنة بالضوء الاعتيادي.

الصفة	ضوء الليزر	الضوء العادي
1- الترابط (Coherence)	يتميز بترابط عالي جدًا، أي أن موجاته تسير بنفس الطور وبشكل منتظم سواء زمانيًا أو مكانيًا.	حيث تكون موجاته عشوائية وغير متناسقة.
2- احادي اللون (Monochromaticity)	يكون بلون واحد (طول موجي واحد)، مما يجعله نقيًا جدًا	يتكون من مجموعة واسعة من الأطوال الموجية، مثل ضوء الشمس الذي يحتوي على ألوان الطيف كافة.
3- الاتجاهية (Directionality)	ينتشر في اتجاه محدد جدًا وبزاوية صغيرة للغاية، لذلك يمكنه الوصول لمسافات طويلة دون تشتت كبير	ينتشر في جميع الاتجاهات ويكون أكثر تشتتًا.
4- الشدة (Intensity)	يتمتع بشدة عالية وتركيز كبير للطاقة في حزمة ضيقة	الشدة أقل لأن طاقته موزعة في جميع الاتجاهات

أخيرًا من حيث الاستخدامات، فإن ضوء الليزر يُستخدم في مجالات دقيقة مثل الطب (الجراحة)، والاتصالات، والصناعة، بينما يُستخدم الضوء العادي في الإضاءة اليومية والرؤية العامة.



شكل (1-4) توضح مقارنة بين ضوء الليزر والضوء العادي[21].

الفصل الثاني

آلية عمل الليزر في نقل البيانات

1.2اهمية استخدام الليزرفي الاتصالات:

الليزر في الاتصالات يُعد من أهم التقنيات الحديثة التي أحدثت ثورة كبيرة في عالم نقل المعلومات، حيث يعتمد على استخدام الضوء لنقل البيانات بدلاً من الإشارات الكهربائية التقليدية. كلمة "ليزر" هي اختصار لعبارة تعني تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المحفَّز للإشعاع، وهو نوع من الضوء يتميز بخصائص فريدة تجعله مناسبًا جدًا للاتصالات، مثل كونه أحادي اللون، مترابط الموجات، وموجَّه في اتجاه محدد دون تشتت كبير.

تقوم فكرة استخدام الليزر في الاتصالات على تحويل المعلومات، مثل الصوت أو الصور أو البيانات الرقمية، إلى إشارات كهربائية، ثم تُستخدم هذه الإشارات للتحكم في شعاع الليزر. يقوم الليزر بإرسال هذه المعلومات على شكل نبضات ضوئية تمثل النظام الثنائي (0 و1)، حيث تنتقل هذه النبضات عبر وسيط ناقل مثل الألياف الضوئية أو حتى عبر الهواء في بعض التطبيقات. وعند وصول الإشارة إلى المستقبل، يتم تحويل النبضات الضوئية مرة أخرى إلى إشارات كهربائية ثم إلى معلومات مفهومة.

يُستخدم الليزر بشكل واسع في أنظمة الألياف الضوئية، وهي من أهم تطبيقاته، حيث تُستعمل لنقل البيانات لمسافات طويلة جدًا بسرعات عالية للغاية، مثل شبكات الإنترنت العالمية وخطوط الاتصالات الهاتفية. تعتمد الألياف الضوئية على مبدأ فيزيائي يُعرف بالانعكاس الكلي الداخلي، والذي يسمح للضوء بالانتقال داخل الألياف دون أن يفقد جزءًا كبيرًا من طاقته. وهذا ما يجعل الليزر وسيلة فعالة لنقل كميات هائلة من البيانات بسرعة تقارب سرعة الضوء.

كما يُستخدم الليزر أيضًا في الاتصالات الفضائية، مثل التواصل بين الأقمار الصناعية أو بين الأرض والمركبات الفضائية، حيث يوفر سرعة عالية ودقة كبيرة مع تقليل التداخل مقارنة بموجات الراديو التقليدية. وهناك أيضًا الاتصالات الضوئية اللاسلكية التي تعتمد على إرسال أشعة الليزر عبر الهواء، وتُستخدم في بعض الحالات الخاصة التي يصعب فيها استخدام الكابلات. [22]

من أهم مميزات استخدام الليزر في الاتصالات أنه يوفر سرعة نقل بيانات عالية جدًا وسعة كبيرة لنقل المعلومات، بالإضافة إلى انخفاض نسبة الفقد في الإشارة وقلة التأثر بالتشويش الكهرومغناطيسي. ومع ذلك، توجد بعض العيوب، مثل ارتفاع التكلفة والحاجة إلى دقة عالية في التوجيه، خاصة في الاتصالات عبر الهواء، كما يمكن أن تتأثر الإشارة بالعوامل الجوية مثل الضباب والمطر.

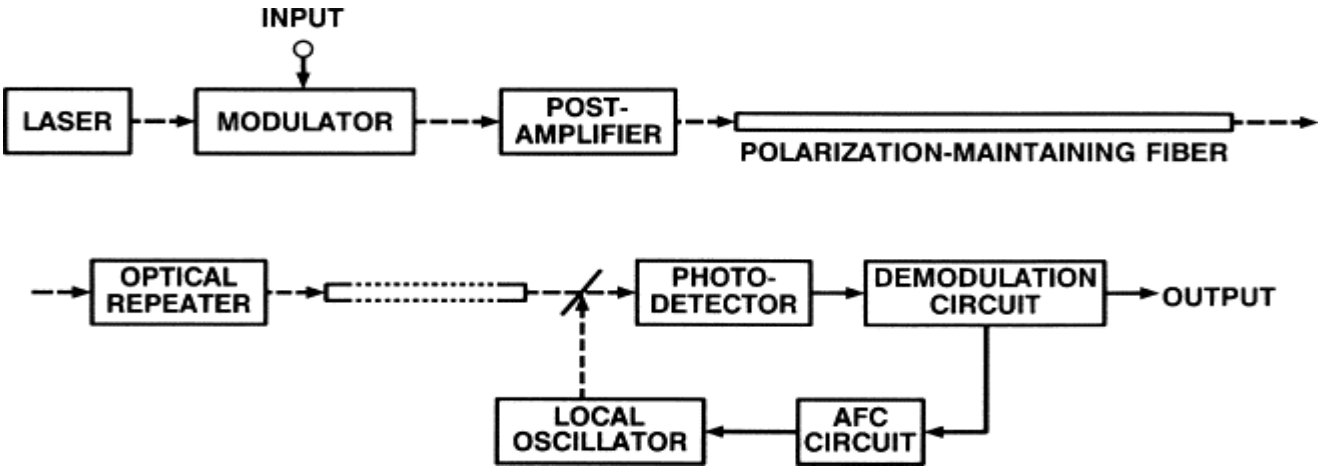
الليزر يُعتبر أفضل من موجات الراديو في كثير من تطبيقات الاتصالات بسبب خصائصه الفيزيائية المميزة، والتي تمنحه أداءً أعلى في نقل البيانات. الفرق الأساسي بينهما هو أن الليزر يعتمد على الضوء، بينما تعتمد موجات الراديو على الإشعاع الكهرومغناطيسي ذي التردد المنخفض.

أول سبب يجعل الليزر أفضل هو السرعة وسعة نقل البيانات. الليزر يعمل بترددات عالية جدًا، وهذا يعني أنه قادر على حمل كمية ضخمة من المعلومات في وقت قصير مقارنةً بموجات الراديو، لذلك يُستخدم في الإنترنت عالي السرعة والألياف الضوئية.

ثانيًا، الليزر يتميز بأنه موجَّه بشكل دقيق جدًا، حيث ينتقل في خط مستقيم تقريبًا دون انتشار كبير. هذا يجعله مناسبًا لإرسال البيانات بين نقطتين محددتين بكفاءة عالية، بينما موجات الراديو تنتشر في جميع الاتجاهات، مما يؤدي إلى فقدان جزء من الطاقة [23]

2.2آلية عمل الليزر في منظومة الارسال:

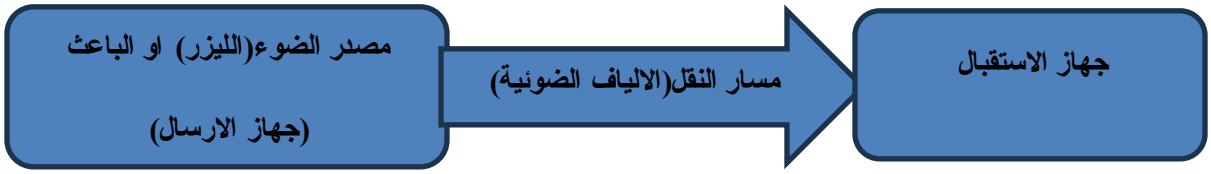
تعد منظومة الإرسال بالليزر (Optical Transmission System) العمود الفقري لشبكات الاتصالات الحديثة،شكل(2-1)و(2-2). حيث يتكون النظام بشكل عام من مصدر الضوئي المستخدم ,وسط لنقل البيانات و مستقبل لها .حيث يتم تحويل البيانات الرقمية إلى نبضات ضوئية تنتقل عبر الألياف الضوئية او المسار الحر للمسافات شاسعة وبسرعات هائلة.وهناك عدة انواع من الليزرات تستخدم في الاتصالات .ومثال على ذلك ليزرات اشباه الموصلات وذلك بسبب حجمها الصغير, كفائتها العالية وقدرتها على التعديل المباشر.حيث طورت انظمة الاتصالات لتوفر نطاق ترددي كبير مقارنة بلأنظمة التقليدية .وهذة الانظمة الحديثة تستخدم تقنية التعديل الشدة,لترميز المعلومات على شعاع ضوئي.ثم يحسب الكاشف عدد الفوتونات الساقطة خلال فترة زمنية معينة لاستعادة الاشارة المعدلة.ويضاف مذبذب مع جهاز الاستقبال.لزيادة حساسية الاشارة المكتشفة بمقدار عشرة الاضعاف.حيث كما موضح في شكل(1-2).جهاز ارسال مكون من ليزر شبة موصل ,معدل خارجي,مضخم يضخم الاشارة المعدلة قبل ارسالها الى قناة الارسال.وفي جانب جهاز الاستقبال يوجد كاشف ضوئي يعمل على يكشف الاشارة المرسلة بلاضافة الى مذبذب محلي.حيث تقوم دائرة ازالة التضمين بأزالة التضمين الاشارة من الكاشف الضوئي لأنتاج الاشارة المستقبلة المطلوبة[24].



شكل(2-1):يوضح مخطط دائرة التوصيل البصري بواسطة الليزر.

1.2.2المكونات الأساسية لمنظومة الإرسال:

- مصدر البيانات إشارات كهربائية رقمية (0) و (1).
- المشفر المعدل (Modulator): الجهاز الذي يطبع البيانات على شعاع الليزر
- منبع الليزر (Laser Source): غالباً ما يكون صمام ثنائي ليزري (Laser Diode).
- وسط النقل كابل الألياف الضوئية (Fiber Optic Cable).



شكل(2-2-):يوضح مكونات نظام الاتصالات البصرية بشكل عام.

2.2.2-آلية التعديل (تحميل البيانات):

يتم يتحول ضوء الليزر المستمر إلى معلومة بطريقتين:

أ- التعديل المباشر (Direct Modulation):

يتم التحكم في تيار التغذية الخاص بالليزر نفسه.عند وجود نبضة كهربائية (1)، يضيء الليزر.عند عدم وجودها (0)، ينطفئ الليزر.ولكن يسبب تشتتاً في الإشارة (Chirp) عند السرعات العالية جداً.

ب- التعديل الخارجي (External Modulation):

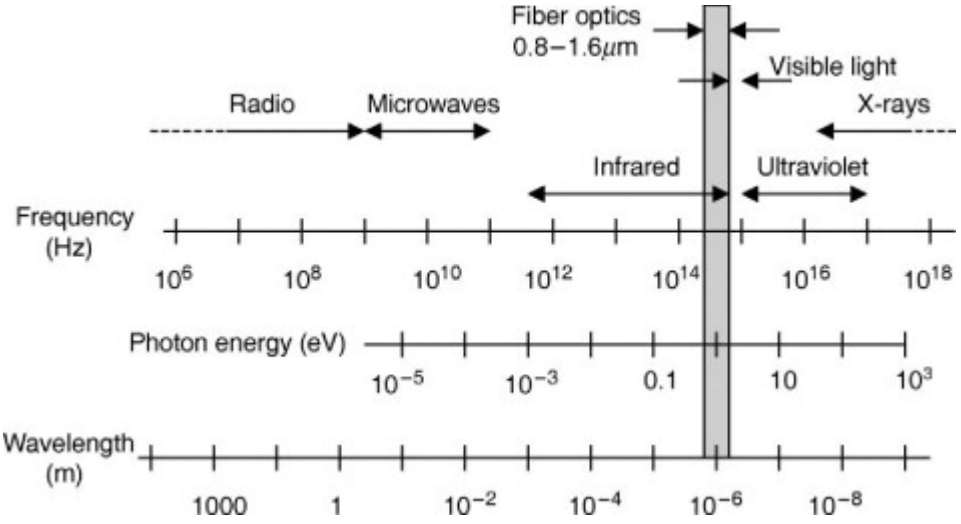
يبقى الليزر يعمل بشكل مستمر وبقوة ثابتة، ويمر الشعاع عبر قطعة إلكترونية إضافية مثل(Modulator Mach-Zehnder).يقوم المعدل الخارجي بـ "قص" أو "تمرير" الضوء بناءً على البيانات الرقمية. هذه الطريقة هي المستخدمة في الأنظمة المتطورة لأنها تحافظ على استقرار الطول الموجي لليزر.

3.2.2 رحلة الإشارة من الإرسال إلى الوسط:

تصل الإشارة الكهربائية من المعالج.يقوم التعريف (Driver) بتحويل الفولتية إلى تيار مناسب لتشغيل الليزر.يولد الليزر نبضات ضوئية فائقة السرعة.تمر النبضات عبر عازل ضوئي (Isolator) لمنع انعكاس الضوء رجوعاً إلى الليزر لحمايته من التلف) تدخل النبضات إلى الألياف الضوئية لتبدأ رحلتها.

معلومة تقنية في الأنظمة الحديثة (DWDM)، يتم إرسال عشرات من أشعة الليزر بألوان (أطوال موجية مختلفة طفيفاً عبر ليف ضوئي واحد، مما يضاعف سعة النقل لآلاف الميغابت في الثانية.

كما موضح في مخطط شكل(2-3).يوضح مناطق الطيف الكهرومغناطيسي للاشارات الكهربائية و البصرية في نظام الاتصالات.



شكل(2-3):مخطط عن مناطف الطيف الكهرومغناطيسي.

3.2خصائص الليزر في منظومات الإرسال:

يتم اختيار الليزر للارسال بناءً على معايير معينة والتي جعلته سببا للاختيار في هذا التطبيسق ويتم تلخيصها حسب جدول (1-2):

جدول(2-1):دور خصائص الليزر في عملية نقل البيانات.

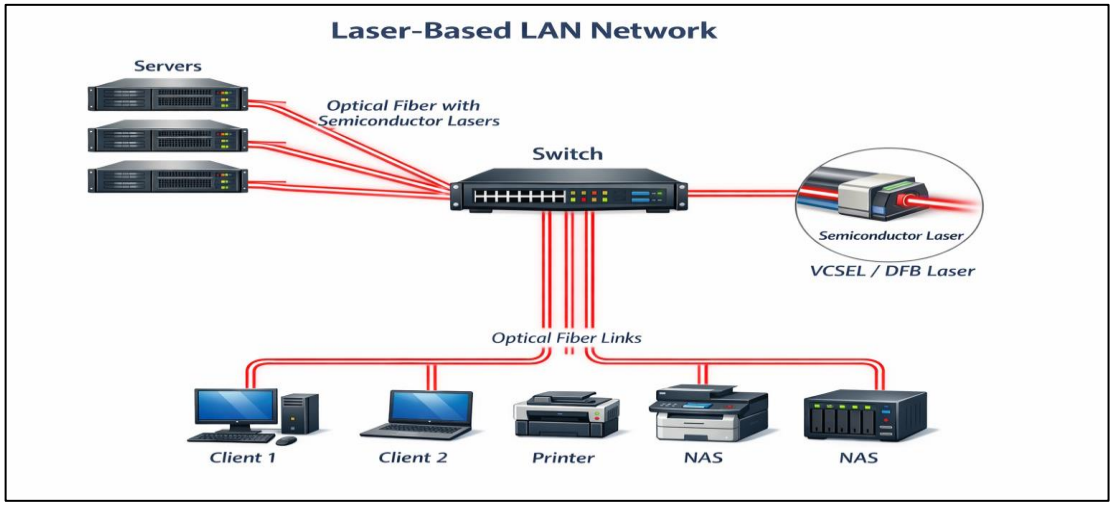
صفة الليزر	دورها في عملية النقل
اولا:أحادية اللون (Monochromaticity)	يصدر الليزر ضوءاً بطول موجي محدد جداً مثل 1550 نانومتر، مما يقلل من تشتت الإشارة داخل الألياف. تكتسب هذه الخاصية أهمية خاصة في الاتصالات الضوئية، حيث تسمح باستخدام تقنية تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي (WDM)، التي تعتمد على إرسال عدة إشارات ضوئية بأطوال موجية مختلفة داخل الليف البصري نفسه دون حدوث تداخل بينها، مما يزيد من سعة القناة الواحدة عدة أضعاف[25] .حيث تسمح بنقل إشارات متعددة عبر نفس الليف البصري باستخدام تقنيات تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي (WDM).
ثانيا: التوجيه العالي (Directionality)	شعاع الليزر ضيق جداً، مما يسهل حقنه داخل نواة الألياف. تؤدي هذه الخاصية إلى تقليل الفقد عند إدخال الضوء إلى الألياف البصرية، كما ترفع من كفاءة نقل الإشارة لمسافات طويلة، مما يقلل الحاجة إلى مكررات الإشارة (Repeaters) في شبكات الاتصالات[26] .
ثالثا:الترابط (Coherence)	موجات الضوء تكون متزامنة تماماً، مما يسمح بنقل البيانات لمسافات طويلة دون تداخل كبير . [27]. يسمح هذا الترابط العالي بإجراء عمليات التضمين الدقيق للإشارة الضوئية، ويجعل الليزر مناسبًا لأنظمة الاتصالات ذات السعات العالية جدًا، خاصة في الأنظمة المتقدمة التي تعتمد على التضمين الطوري أو التضمين المتعدد المستويات[28] يضمن جودة الإشارة وسرعات نقل عالية دون تشويش.[29]
رابعاً: الشدة العالية (High Intensity)	في الاتصالات الضوئية، تساهم هذه الخاصية في تحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء (Signal-to-Noise Ratio – SNR)، مما يسمح بإرسال البيانات لمسافات أطول مع تقليل احتمالية فقدان المعلومات أو تشويهها[30].

خامساً: عرض الطيف الضيق (Narrow Spectral Width	هذه الخاصية ضرورية بشكل خاص في شبكات النقل بعيدة المدى، حيث يمكن أن يؤدي التشتت إلى تداخل النبضات الضوئية عند المسافات الكبيرة.[31]]
سادسا:لقابلية العالية للتضمين (High Modulation (Capability	يمكن تعديل شدة خرج الليزر بسرعة عالية جدًا، خصوصًا في حالة ليزر أشباه الموصلات المستخدم في الاتصالات الرقمية. وتصل سرعات التضمين إلى عدة جيجابت في الثانية، بل إلى مئات الجيجابت في الأنظمة الحديثة [13]. تجعل هذه القابلية الليزر المصدر المثالي لنقل البيانات الرقمية، سواء في شبكات LAN قصيرة المدى أو في شبكات النقل الضوئية طويلة المدى. حيث تدعم إرسال بيانات بسرعات تصل إلى عدة جيجابت/ثانية أو أكثر، مناسب للشبكات الحديثة.
سابعاً: الاستقرار الطيفي والحراري	تتأثر خصائص الليزر بدرجة الحرارة والتيار الكهربائي، حيث قد يؤدي تغير الحرارة إلى انحراف الطول الموجي أو تغير القدرة الخارجة. لذلك يتم في أنظمة الاتصالات استخدام دوائر تحكم حراري دقيقة لضمان استقرار الأداء والحفاظ على جودة الإشارة [32] يقلل فقد الإشارة والتشويش، خصوصًا في الشبكات طويلة المدى.حيث يُعد الاستقرار الحراري شرطًا أساسيًا في أنظمة WDM، لأن أي انحراف في الطول الموجي قد يؤدي إلى تداخل القنوات الضوئية.

3.2أنواع الليزر المستخدمة في الاتصالات وتطبيقاته العملية

1.3.2ليزر أشباه الموصلات (Semiconductor Laser)

ليزر أشباه الموصلات هو نوع من الليزر الذي يعتمد على **مواد أشباه الموصلات** لإنتاج الضوء، بدلاً من الغازات أو البلورات. يتميز بصغر حجمه وكفاءته العالية في التحويل الكهربائي للضوء، ما يجعله أساسياً في التطبيقات الحديثة مثل :الاتصالات البصرية، أجهزة القراءة والكتابة في الأقراص، والطباعة الليزرية [33].

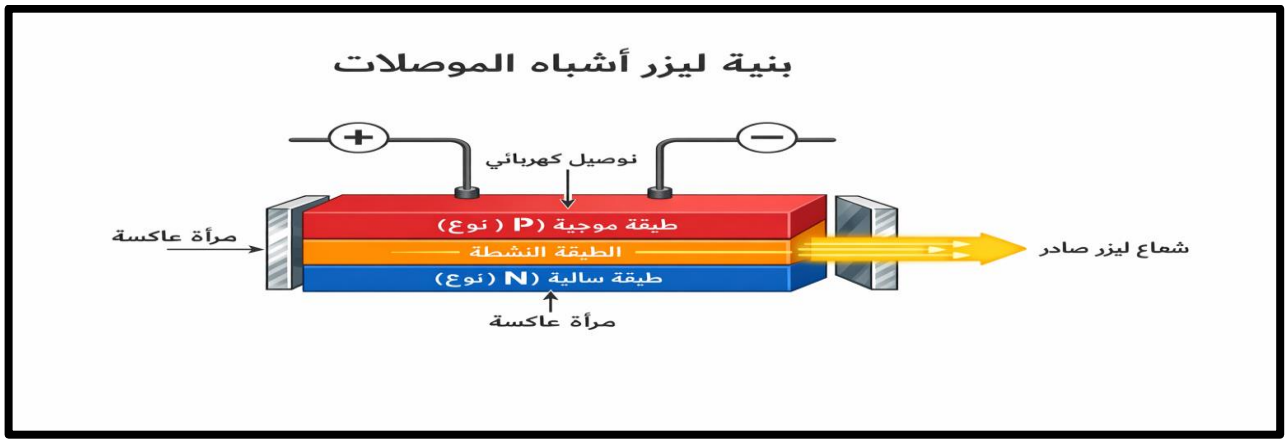


شكل (2-4): مخطط شبكة LAN يوضح استخدام ليزر أشباه الموصلات بين الخوادم والأجهزة الطرفية. [34].

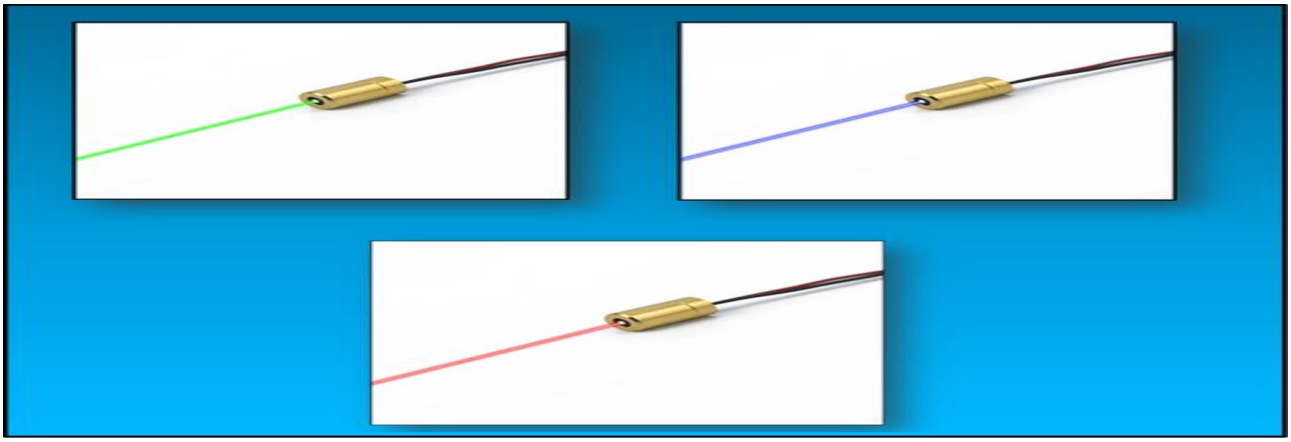
ـ بنية ليزر أشباه الموصلات

ـ الطبقات الأساسية

1. الطبقة الموجبة **:(P-type)** تحتوي على فائض من الثقوب.
2. الطبقة السالبة **:(N-type)** تحتوي على فائض من الإلكترونات.
3. الطبقة النشطة **:(Active Layer)** تقع بين الطبقتين، وهي المكان الذي يحدث فيه الإشعاع المحفّز.
4. المرآتين العاكستين: تعملان على تشكيل التجويف البصري الذي يسمح بتضخيم الضوء. عادة تكون الأسطح الأمامية والخلفية للشفرة مصقولة لتوفير الانعكاس الجزئي.
5. التغذية الكهربائية : يُمرر تيار كهربائي مباشر عبر الطبقات لتحفيز الإلكترونات على الانتقال بين المستويات الطاقية.**[35]** .كما موضح في شكل(2-6).



شكل(2-5) توضح بنية أشباه الموصلات [36]



شكل (2-6) يوضح ليزر أشباه الموصلات(أو ليزر ديود) هو جهاز يسبب تذبذب الليزر عن طريق تدفق تيار كهربائي إلى أشباه الموصلات مباشرة بالألياف البصرية لنقل البيانات الرقمية. المصدر: Coldren & Corzine, 2012 [37]

2.3.2ليزرالتجويف العمودي(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

ليزر التجويف العمودي أو VCSEL هو نوع متقدم من الليزر شبه الموصلات، يختلف عن الليزر التقليدي بأن انبعاث الضوء يكون عموديًا على سطح الرقاقة بدلاً من حافة الشريحة .[33] .هذا التصميم يسمح بحجم صغير جدًا للجهاز، كفاءة تبريد عالية، وسهولة تكامل مع الدوائر الإلكترونية.

- **مبدأ العمل**:

يتم وضع وسط نشط شبه موصل بين مرآتين عاكستين(Distributed Bragg Reflectors – DBR) لتكوين تجويف بصري قصير.عند تطبيق جهد كهربائي، تتحرك الإلكترونات في الوسط المنشط، فتنتج فوتونات عبر الانبعاث المحفّز.الفوتونات تتكاثر داخل التجويف، وتخرج عموديًا على سطح الرقاقة على شكل شعاع ضيق ومترابط [39][]38 .

- **الخصائص التقنية للـ VCSEL**

1. **حجم صغير جدًا :**يسمح بالتكامل في الأجهزة الصغيرة والمعدات المدمجة.
2. **سرعة استجابة عالية :**تصل إلى عدة غيغاهرتز، ما يجعلها مناسبة لنقل البيانات عالية السرعة.
3. **كفاءة طاقة عالية :**خاصة عند التشغيل المتقطع أو في الشبكات المحلية قصيرة المدى.
4. **انبعاث أحادي اللون ومتسق :**يقلل فقد الإشارة والتداخل بين القنوات.
5. **سهولة التكامل مع الألياف البصرية :**مثالي لشبكات LAN و Data Centers [40][41].

- **مزايا استخدام VCSEL في الاتصالات**

كفاءة عالية :يقلل من استهلاك الطاقة مقارنة بليزر حافة الشريحة التقليدي.

تصميم مرن :يمكن تركيب عدة VCSELs على رقاقة واحدة لتكوين مصفوفة (VCSEL Array) لتقليل التكلفة وزيادة سعة النقل.

قابلية التوسع :مناسب لتطبيقات مراكز البيانات والشبكات الحديثة التي تتطلب معدلات نقل بيانات كبيرة [42][43].

- **تطبيقات VCSEL**

1. **مراكز بيانات Google و :Facebook**تستخدم VCSELs لنقل البيانات بين الخوادم بسرعة عالية جدًا ضمن الشبكات الداخلية.
2. **شبكات LAN في المستشفيات والمختبرات :**لتبادل بيانات الفحوصات الطبية والصور الطبية بسرعة فائقة مع تقليل فقد الإشارة.
3. **المصانع الذكية :Industry 4.0** تعتمد على VCSEL في نقل البيانات بين الأجهزة وأجهزة التحكم بسرعة منخفضة الفقد ودقة عالية.

- **3.3.2ليزر التغذية الراجعة الموزعة**(DFB – Distributed Feedback Laser)

يُعد ليزر التغذية الراجعة الموزعة (DFB) أحد أهم أنواع ليزرات أشباه الموصلات المستخدمة في أنظمة الاتصالات الضوئية الحديثة، إذ يتميز بانبعاث أحادي النمط الطولي واستقرار عالٍ في الطول الموجي، مما يجعله مناسبًا لأنظمة النقل ذات السعات العالية والمسافات الطويلة. وقد أسهم التطور في فيزياء الليزر وبصريات أشباه الموصلات في ظهور هذا النوع المتقدم من الليزرات[44] .

- **المفهوم العام**

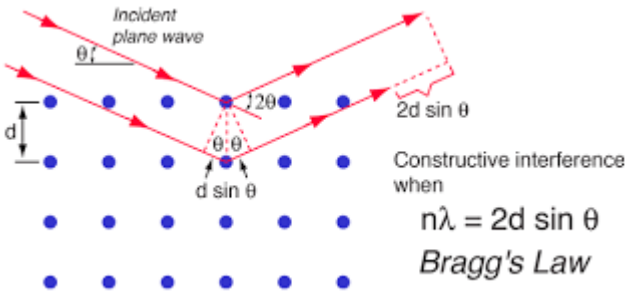
ليزر DFB هو نوع متطور من **Distributed Feedback Laser**يعتمد على وجود شبكة حيودية دورية (Bragg Grating) مدمجة داخل الوسط المنشط نفسه، على عكس الليزر التقليدي الذي يعتمد على مرآتين عند طرفي التجويف البصري.

تعمل هذه الشبكة الدورية على توفير تغذية راجعة بصرية موزعة على طول التجويف بالكامل، وليس فقط عند الأطراف، مما يؤدي إلى اختيار طول موجي محدد بدقة عالية ومنع الأنماط الطيفية غير المرغوبة [45].

- **الأساس النظري لعمل ليزرDFB**

يعتمد ليزر DFB على مبدأ الانبعاث المحفَّز الذي وضع أساسه النظري أينشتاين في تفسيره للتفاعل بين المادة والإشعاع [46]، حيث يؤدي ضخ التيار الكهربائي إلى إثارة الإلكترونات في المنطقة الفعالة، وعند عودتها إلى مستوى طاقة أدنى ينبعث فوتون متطابق في الطور والاتجاه والطول الموجي.

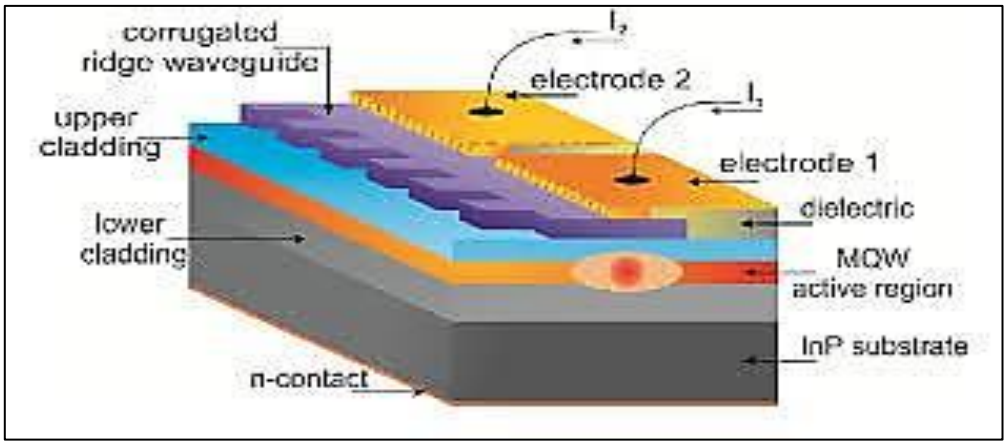
في الليزرات التقليدية من نوع **Fabry–Pérot laser** يتم تحقيق التغذية الراجعة بواسطة انعكاس الضوء بين مرآتين عند طرفي التجويف البصري. أما في ليزر DFB فتتحقق التغذية الراجعة عبر شبكة حيودية دورية مدمجة داخل الوسط المنشط نفسه، وهو ما يُعرف بآلية براج (Bragg Reflection) [47]. حيث هذه العلاقة تؤدي إلى انتقاء طول موجي واحد تقريبًا، مما يحقق انبعاثًا أحادي النمط بعرض طيفي ضيق جدًا [48].



- **التركيب البنيوي لليزرDFB**

يُصنَّف **Distributed Feedback Laser**ضمن ليزرات أشباه الموصلات ذات البنية الطبقية، ويتكون من:

1. **الركيزة(Substrate)** :غالبًا من فوسفيد الإنديوم (InP) في تطبيقات الاتصالات عند nm.1550
2. **طبقات الحجز:(Claddin Layers)** ذات معامل انكسار أقل لضمان حصر الفوتونات داخل المنطقة الفعالة.
3. **الوسط المنشط(Active Region) :**يتكون من طبقات آبار كمومية (Quantum Wells) يتم فيها توليد الفوتونات عبر إعادة اتحاد الإلكترونات والفجوات.
4. **شبكة براج الدورية(Bragg Grating)** :محفورة بدقة نانومترية داخل أو فوق الوسط المنشط، وتمثل العنصر الحاسم في تحديد الطول الموجي.
5. **الأقطاب الكهربائية**:لتأمين الضخ الكهربائي المستمر.ويكون اتجاه الانبعاث في هذا النوع **أفقيًا** على طول الشريحة شبه الموصلة، مما يسمح بربط مباشر وفعال مع الألياف البصرية أحادية النمط.



شكل (2-7) يوضح بنية ليزر DFB واتجاه الانبعاث الأفقي[49]

- **الخصائص الطيفية والمقارنة مع الأنواع الأخرى :يتميز ليزر DFB بالخصائص التالية**:

- انبعاث أحادي النمط الطولي
- عرض خط طيفي ضيق جدًا(Narrow Linewidth)
- نسبة عالية بين الإشارة والضوضاء
- استقرار في الطول الموجي عند تغيرات التيار

بالمقارنة مع ليزرFabry–Pérot ، فإن الأخير يُظهر عدة أنماط طولية، مما يؤدي إلى توسع طيفي أكبر وتشتت أعلى عند النقل لمسافات بعيدة [50] .

- **أهمية ليزر DFB في أنظمة الاتصالات:**

في أنظمة الاتصالات الليفية الحديثة، وخاصة أنظمة تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي(WDM و(DWDM، يجب أن يكون لكل قناة طول موجي محدد بدقة لتجنب التداخل بين القنوات.

لهذا السبب يُعد ليزر DFB الخيار الأمثل، إذ يمكن ضبطه للعمل عند أطوال موجية قياسية مثل:

- 1310 nm
- 1550 nm

وهي أطوال تقع ضمن نافذتي الشفافية الدنيا والتشتت الأدنى في الألياف البصرية [51]

كما أن ضيق عرضه الطيفي يقلل من ظاهرة التشتت اللوني(Chromatic Dispersion) ، مما يسمح بنقل البيانات بسرعات عالية قد تتجاوز 10–100 جيجابت/ثانية لمسافات طويلة دون الحاجة إلى تضخيم متكرر.

4.2 مقارنة ومميزات الليزر المستخدم في الاتصالات:

تلعب مصادر الضوء الليزري دورًا محوريًا في شبكات الاتصالات البصرية الحديثة. فهي تحدد سرعة نقل البيانات، مدى الإرسال، جودة الإشارة، واستقرارها على المدى الطويل. من أهم أنواع الليزر المستخدمة في الاتصالات:

- **ليزر أشباه الموصلات**(Semiconductor Laser)
- **ليزر التجويف العمودي**(VCSEL – Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)
- **ليزر التغذية الراجعة الموزعة**(DFB – Distributed Feedback Laser)

-1- ليزر أشباه الموصلات(Semiconductor Laser)

- الخصائص التقنية:

يُنتج ضوءًا أحادي اللون تقريبًا.

اتجاهية عالية، أي انبعاث ضوء مركز في حزمة ضيقة.

قابلية عالية للتضمين والتعديل السريع.

- **مزايا في الاتصالات**:

صغير الحجم وسهل التركيب في الأجهزة الطرفية.

تكلفة منخفضة مقارنة بالأنواع الأخرى.

مثالي للوصلات القصيرة والمتوسطة المدى.

الاستخدام الشائع :شبكاتLAN ، أجهزة الكمبيوتر، وصلات ضوئية قصيرة المدى.

- **2- ليزر التجويف العمودي**(VCSEL)
- **الخصائص التقنية**:

ينبعث الضوء عموديًا على سطح الرقاقة، مما يسهل تركيب مصفوفات الليزر.

عرض طيفي ضيق جدًا، مما يقلل من التداخل بين الإشارات.

كفاءة كهربائية عالية وتبديد حراري منخفض [52]

- **مزايا في الاتصالات**:

قابلية تصنيع كبيرة، يمكن وضع عدة وحدات VCSEL في مصفوفة واحدة.

معدل نقل بيانات مرتفع يصل إلى عدة جيجابت/ثانية.

مناسب للاستخدام في شبكات مركز البيانات ومراكز الاتصالات الضوئية الداخلية.

- **الاستخدام الشائع :الاتصالات قصيرة ومتوسطة المدى، الشبكات الداخلية لمراكز البيانات**.

3- ليزر التغذية الراجعة الموزعة(DFB)

- **الخصائص التقنية**:

أحادية اللون جدًا مع استقرار طول موجي ممتاز.

عرض طيفي ضيق جدًا، يقلل التشتت اللوني في الألياف البصرية.

أداء مستقر على المدى الطويل.

- **مزايا في الاتصالات**:**:** مثالي للوصلات الطويلة نظرًا لاستقراره العالي..مقاوم للتشويش وفقدان الإشارة..يدعم النقل بسرعات عالية جدًا لمسافات طويلة**.**

الاستخدام الشائع :شبكاتWAN ، الألياف البصرية لمسافات طويلة، الإنترنت عالي السرعة، اتصالات بين المدن.

- **هذه المقارنة تبين أن اختيار الليزر المناسب يعتمد على متطلبات الشبكة، مثل المسافة، سرعة النقل، والاستقرار المطلوب للإشارة.وكما موضح في جدول(2-2).**

جدول(2-2) :مقارنة بين الأنواع الليزر المستخدم في الأتصالات.

النوع	تكلفة	الاتجاهية	معدل النقل	الاستقرار	العرض الطيفي	الاستخدام
ليزر أشباه الموصلات	منخفض	عالي	متوسط	متوسط	متوسط	شبكات قصيرة ومتوسطة
VCSEL	متوسط	عالي جدًا	مرتفع	جيد	ضيق	مراكز البيانات، LAN
DFB	مرتفع	عالي جدًا	مرتفع جدًا	ممتاز	ضيق جدًا	شبكات طويلة المدى، WAN

التكيف مع احتياجات الشبكة:

ليزر DFB للمسافات الطويلة، VCSEL للشبكات الداخلية، ليزر أشباه الموصلات للوصلات قصيرة المدى [53] .

الفصل الثالث

انوع تطبيقات الاتصالات البصرية و التحديات القائمة

1.3نبذة عن استخدام الليزر في الاتصالات:

يُعد الليزر من أهم الابتكارات التكنولوجية التي ساهمت في تطوير أنظمة الاتصالات الحديثة، حيث يعتمد على إرسال البيانات عبر حزم ضوئية عالية الكثافة والتركيز. وقد أدى هذا الأسلوب إلى تحسين كبير في سرعة نقل المعلومات ودقتها، مما جعله عنصرًا أساسيًا في البنية التحتية لشبكات الاتصالات العالمية. ومع التطور المستمر في هذا المجال، أصبح الليزر يُستخدم في العديد من التطبيقات الحيوية، سواء على الأرض أو ف ي الفضاء.[54]

2.3أنواع تطبيقات الليزر في الاتصالات:

تتعدد تطبيقات الليزر في مجال الاتصالات بشكل كبير، ويأتي في مقدمتها استخدامه في الألياف الضوئية، والتي تُعد العمود الفقري لشبكات الإنترنت الحديثة، حيث يتم نقل البيانات عبر مسافات طويلة بكفاءة وسرعة عالية. كما يُستخدم الليزر في الاتصالات الفضائية، خاصة بين الأقمار الصناعية، مما يسهم في تحسين سرعة الاتصال وتقليل زمن التأخير.ومن التطبيقات الأخرى الاتصالات الضوئية في الفضاء الحر، والتي تعتمد على إرسال البيانات عبر الهواء باستخدام أشعة الليزر، وتُستخدم في ربط المباني أو في المناطق التي يصعب فيها مد الكابلات. كذلك، يُستخدم الليزر في المجالات العسكرية نظرًا لدرجة الأمان العالية التي يوفرها، إضافة إلى بعض الاستخدامات المحدودة في الاتصالات تحت الماء باستخدام أطوال موجية معينة.[55]

3.3 التطبيقات العملية في شبكات الاتصالات:

1. شبكات LAN قصيرة المدى
2. تستخدم في نقل البيانات بين الخوادم والأجهزة الطرفية داخل المباني بسرعة فائقة [56].
3. يتيح نقل إشارات رقمية عالية الجودة ضمن مراكز البيانات دون فقد كبير.
4. شبكات الوصول المحلي (LAN Access Networks):
5. يسهّل تكامل الألياف البصرية داخل المباني والمجمعات الكبيرة [57] .
6. يدعم أنظمة النقل الداخلي للشركات والمستشفيات والمراكز التعليمية.
7. التطبيقات الصناعية والطبية:

8. يستخدم في أجهزة القياس والمراقبة الدقيقة.

9. بعض الأجهزة الطبية تعتمد على VCSEL لمراقبة وتحليل الإشارات الضوئية بدقة عالية]58

4.3 التطبيقات الحديثة والمستقبلية لليزر في الاتصالات:

أدى التطور المستمر في تقنيات الليزر إلى إحداث ثورة حقيقية في مجال الاتصالات، حيث لم يعد استخدامه مقتصراً على أنظمة الألياف البصرية التقليدية، بل امتد ليشمل تطبيقات متقدمة في الاتصالات الفضائية، والشبكات اللاسلكية الضوئية، وتقنيات نقل البيانات فائقة السرعة. ومع تزايد الطلب العالمي على سرعات إنترنت أعلى وسعات نقل أكبر، أصبح تطوير تقنيات الليزر ضرورة حتمية لمواكبة التحول الرقمي العالمي [59].

5.3 الليزر في شبكات الاتصالات فائقة السرعة:

مع ظهور الحوسبة السحابية، والذكاء الاصطناعي، والبث الرقمي عالي الدقة، ازدادت الحاجة إلى أنظمة نقل بيانات بسرعات هائلة. وقد ساهم تطوير ليزرات ذات أطوال موجية مستقرة وعرض طيفي ضيق في تحقيق سرعات نقل تصل إلى عدة تيرابت في الثانية باستخدام تقنية تقسيم الطول الموجي الكثيف (DWDM)، التي تسمح بإرسال عدة إشارات ضوئية عبر نفس الليف البصري بأطوال موجية مختلفة

كما أدت التحسينات في ليزر أشباه الموصلات إلى رفع كفاءة التعديل وتقليل الضوضاء، مما ساعد في تحسين جودة الإشارة وزيادة مدى الإرسال [60].

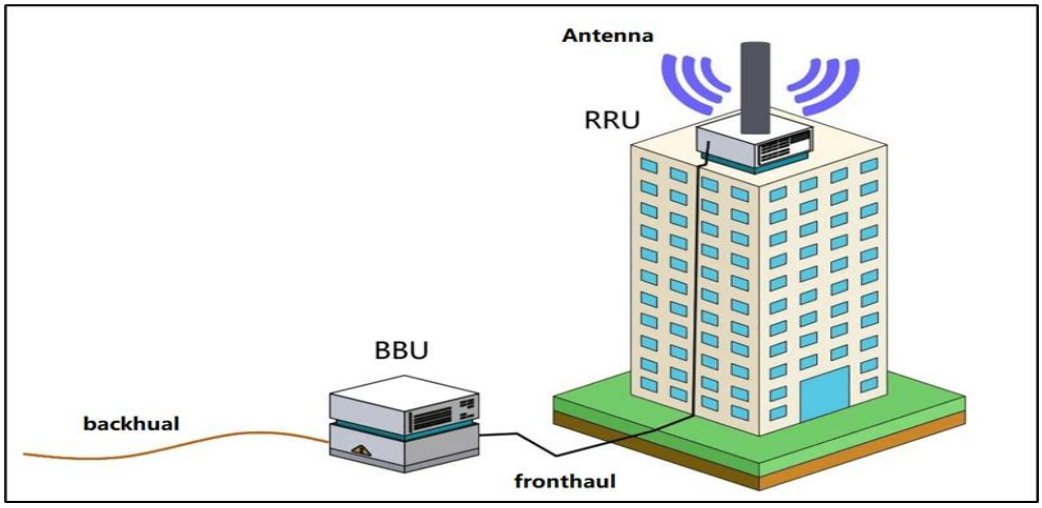
6.3 الاتصالات الضوئية الحرة (Free Space Optical Communication):

تُعد الاتصالات الضوئية الحرة من التطبيقات الحديثة لليزر، حيث يتم إرسال الإشارات الضوئية عبر الهواء أو الفضاء بدلاً من الألياف البصرية. وتعتمد هذه التقنية على حزم ليزر موجهة بدقة عالية بين نقطتين دون الحاجة إلى كابلات.

وتُستخدم هذه التقنية في:

- ربط المباني في المدن.
- توفير الإنترنت في المناطق النائية.
- الاتصالات العسكرية.

ومن أهم مزاياها سرعة النشر وقلة التكلفة مقارنة بمد كابلات أرضية، إلا أنها تتأثر بالعوامل الجوية مثل الضباب والأمطار [50].

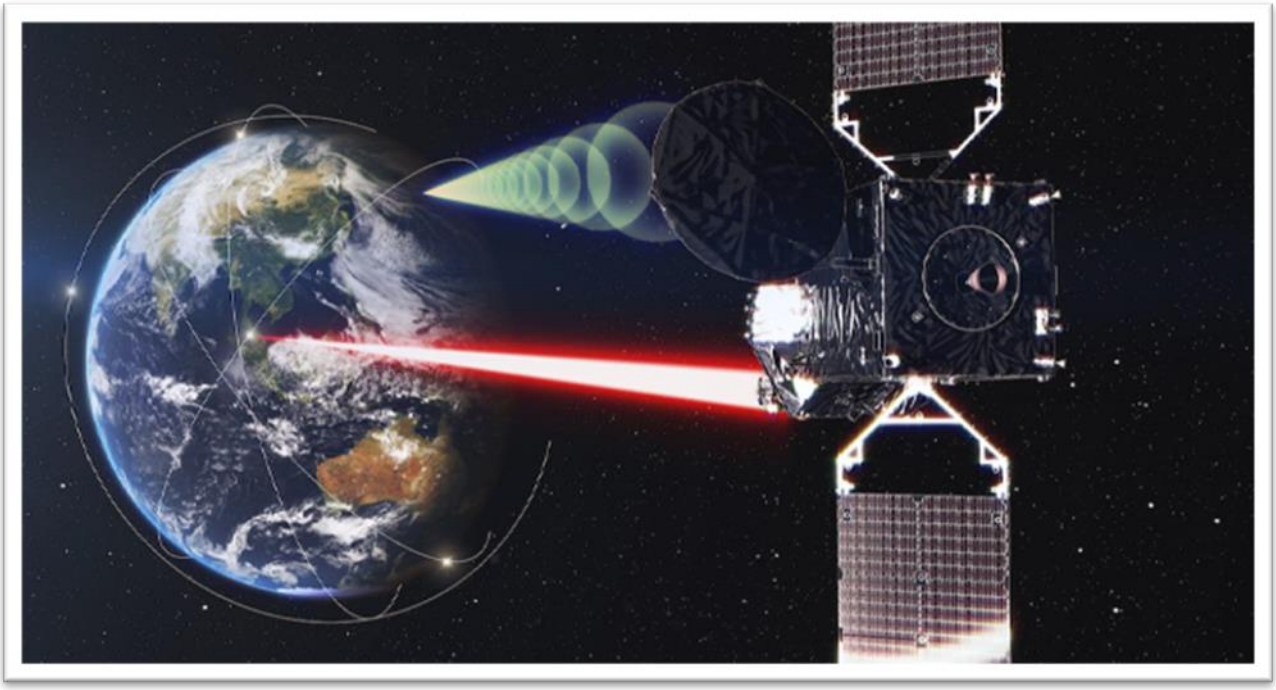


وصف الشكل(3-1): يوضح إرسال حزمة ليزر بين مبنيين عبر الهواء دون استخدام الألياف البصرية.[61].

7.3 الليزر في الاتصالات الفضائية والأقمار الصناعية:

أصبحت الاتصالات الفضائية تعتمد بشكل متزايد على الليزر بدلاً من الموجات الراديوية التقليدية، نظراً لقدرة الليزر على نقل بيانات أكثر بكثير باستخدام حزم ضيقة جداً تقلل من التداخل.

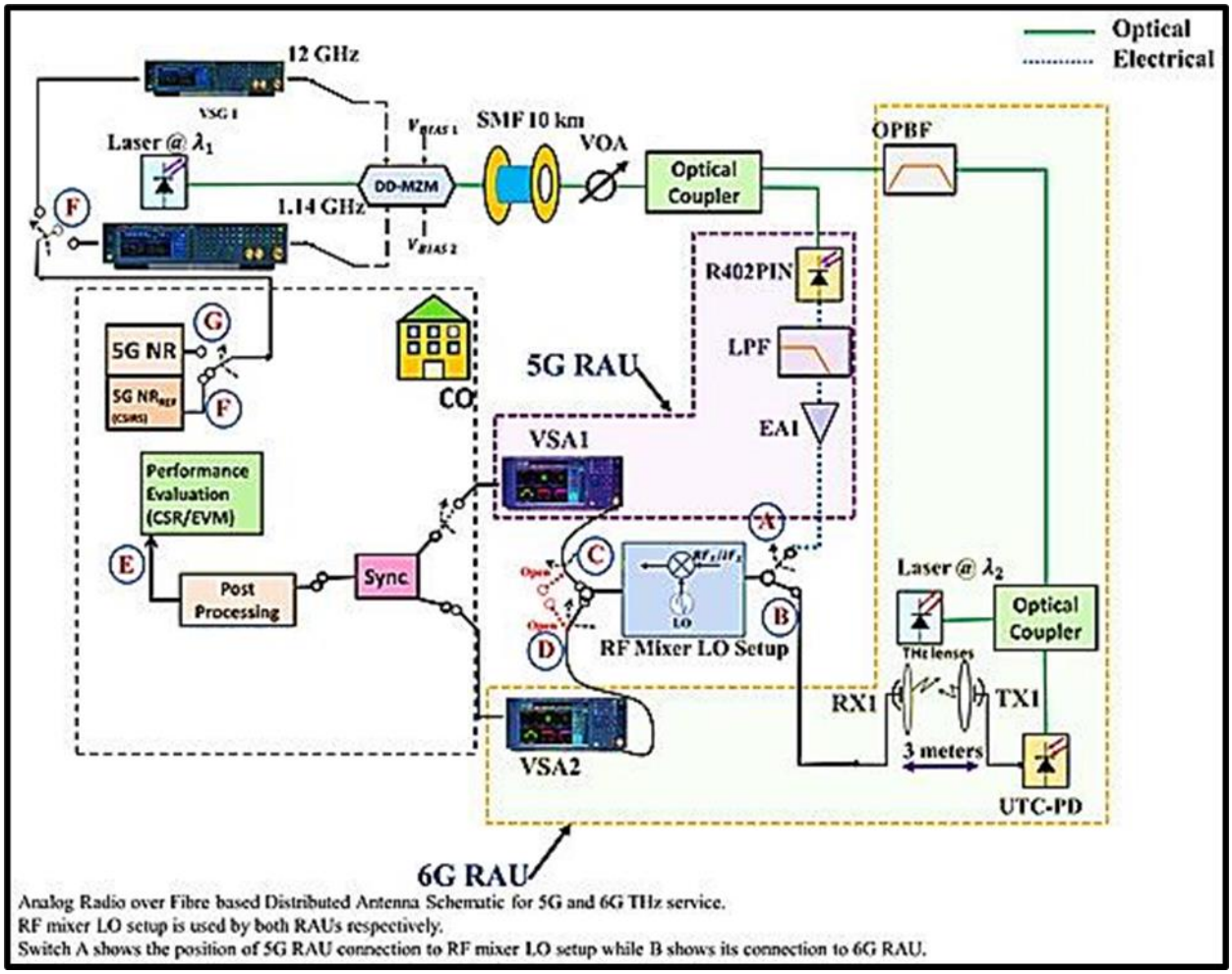
وقد بدأت وكالات الفضاء العالمية مثل NASA في تطوير أنظمة اتصالات ليزرية لربط الأقمار الصناعية بالمحطات الأرضية، مما يسمح بنقل صور وبيانات علمية بسرعات عالية جداً. كما تسعى شركات الاتصالات الفضائية إلى استخدام الليزر في شبكات الأقمار الصناعية منخفضة المدار لتحسين جودة الإنترنت العالمي [62].



شكل (3-2): يوضح نقل البيانات بين قمر صناعي ومحطة أرضية باستخدام حزم ليزر دقيقة [63].

8.3 دور الليزر في شبكات الجيل الخامس والسادس:

تعتمد شبكات الجيل الخامس (G5) بشكل كبير على الألياف البصرية في البنية التحتية الخلفية (Backhaul)، حيث تُستخدم مصادر الليزر لنقل البيانات بين الأبراج ومراكز التحكم. ومع التوجه نحو شبكات الجيل السادس (G6)، يُتوقع أن يزداد الاعتماد على تقنيات الاتصالات الضوئية عالية الكفاءة لتلبية متطلبات السرعات الفائقة وزمن الاستجابة المنخفض جداً.



شكل (3-3): مخطط يوضح دمج تقنيات الفوتونيات المتكاملة (Integrated Photonics) مع الدوائر الإلكترونية لتقليل استهلاك الطاقة وزيادة الأداء .

8.3 الايجابيات و السلبيات لاستخدام الليزر في الاتصالات:

1.8.3إ يجابيات استخدام الليزر في الاتصالات:

تتميز الاتصالات المعتمدة على الليزر بعدد كبير من المزايا التي تجعلها متفوقة على الأنظمة التقليدية. من أبرز هذه المزايا السرعة العالية في نقل البيانات، حيث يمكن لليزر نقل كميات ضخمة من المعلومات خلال زمن قصير جدًا، وهو ما يلبي متطلبات العصر الرقمي. كما يتميز بعرض نطاق ترددي واسع، يسمح بنقل عدد كبير من الإشارات في وقت واحد دون تداخل يُذكر.إضافة إلى ذلك، فإن الليزر أقل تأثرًا بالتداخل الكهرومغناطيسي مقارنة بالموجات الراديوية، مما يزيد من استقرار الإشارة وجودتها. كما يوفر مستوى عالٍ من الأمان، نظرًا لأن شعاعه يكون ضيقًا وموجهًا بدقة، مما يصعب عملية اعتراضه. علاوة على ذلك، فإن بعض أنظمة الليزر تتميز بكفاءة عالية في استهلاك الطاقة، مما يجعلها خيارًا اقتصاديًا على المدى البعيد.[64]

2.8.3 سلبيات استخدام الليزر في الاتصالات:

على الرغم من المزايا العديدة، إلا أن استخدام الليزر في الاتصالات يواجه بعض السلبيات التي تحد من انتشاره. من أهم هذه السلبيات تأثر الإشارة بالظروف الجوية مثل الضباب والأمطار والغبار، حيث يمكن أن يؤدي ذلك إلى تشتت الشعاع وضعف الإشارة. كما أن هذه التقنية تتطلب دقة عالية في توجيه الشعاع بين المرسل والمستقبل، وأي انحراف بسيط قد يؤدي إلى فقدان الاتصال إضافة إلى ذلك، فإن تكلفة إنشاء وصيانة أنظمة الاتصالات بالليزر تُعد مرتفعة مقارنة بالأنظمة التقليدية، مما يجعل اعتمادها محدودًا في بعض المناطق. كما أن استخدامها في بعض البيئات قد يكون غير عملي بسبب القيود الفيزيائية المرتبطة بانتشار الضوء. [65]

9.3التحديات التي تواجه استخدام الليزر في الاتصالات:

تواجه تقنية الاتصالات بالليزر مجموعة من التحديات التي تعيق انتشارها بشكل واسع. من أبرز هذه التحديات التحديات البيئية، حيث تؤثر العوامل الجوية بشكل مباشر على كفاءة الإشارة. كما توجد تحديات تقنية تتعلق بضرورة تطوير أنظمة توجيه دقيقة ومستقرة لضمان استمرارية الاتصال. ومن الناحية الاقتصادية، تمثل التكلفة العالية للبنية التحتية عائقًا أمام اعتماد هذه التقنية، خاصة في الدول النامية. كذلك، فإن التوسع في استخدام هذه الأنظمة يتطلب توفر بيئة تقنية متقدمة، وهو ما قد لا يكون متاحًا في جميع المناطق. كما تظل مسألة تحقيق التوازن بين الأداء والتكلفة من أبرز التحديات التي يعمل الباحثون على حلها.[66]

الخاتمة:

في ختام هذا البحث، يتضح أن تقنية الليزر تمثل أحد أهم الإنجازات العلمية التي أسهمت بصورة مباشرة في تطوير أنظمة الاتصالات الحديثة. فمنذ أن وضع العالم ألبرت أينشتاين الأساس النظري لظاهرة الانبعاث المستحث، وصولاً إلى تصنيع أول جهاز ليزر عملي على يد ثيودور مايمان، بدأت مرحلة جديدة من التقدم التكنولوجي الذي انعكس بوضوح على مختلف مجالات الحياة، وكان قطاع الاتصالات من أبرزها.

وقد بيّن البحث أن الخصائص الفيزيائية المميزة لأشعة الليزر، مثل التماسك العالي، وأحادية الطول الموجي، والاتجاهية الشديدة، جعلته الخيار الأمثل في أنظمة الاتصالات الضوئية، خاصة في تقنيات الألياف البصرية. كما اتضح أن استخدام الليزر أسهم في زيادة سرعات نقل البيانات، وتقليل الفقد في الإشارة، ورفع كفاءة الشبكات مقارنة بالوسائل التقليدية.

كما تناول البحث التطبيقات الحديثة والمستقبلية لليزر، مثل الاتصالات الضوئية الحرة، والاتصالات الفضائية، وشبكات الجيل الخامس والسادس، مما يدل على أن هذه التقنية ما تزال في حالة تطور مستمر، وأنها ستظل ركيزة أساسية في دعم البنية التحتية الرقمية العالمية.

وعلى الرغم من التحديات التقنية المرتبطة بالتشتت والتأثيرات غير الخطية واستهلاك الطاقة، فإن التقدم العلمي في مجالات الفوتونيات المتكاملة والمواد المتقدمة يشير إلى مستقبل واعد لتقنيات الليزر في الاتصالات.

وبناءً على ما سبق، يمكن الاستنتاج أن الليزر ليس مجرد أداة تقنية، بل هو عنصر أساسي في بناء مجتمع المعلومات الحديث، وأن الاستثمار في تطويره يمثل خطوة ضرورية لمواكبة متطلبات العصر الرقمي وتسريع مسيرة التطور التكنولوجي

المصادر

اولا: المصادر العربية

1. أحمد، رائد محمود. (2018). تطبيقات الليزر في التصنيع. وقائع المجمع العربي للعلوم والتكنولوجيا، 78.
2. أينشتاين، أ. (1921). على نظرية الكم للإشعاع. مجلة الجمعية البصرية الأمريكية، 45.
3. بوخطة، ربيعة، & حريز، نور الهدى. (د.ت.). دراسة طيفية لعنصر الإيتربيوم في بعض أنواع الزجاج (رسالة دكتوراه غير منشورة). جامعة قاصدي مرباح، ورقلة.
4. الحكيم، س. ع. (2020). الابتكارات في أبحاث الليزر. مجلة الابتكار العربي، 45.
5. الخزرجي، حسين علاء. (2019). الليزر: من النظرية إلى التطبيقات. مجلة الفيزياء العربية، 23.
6. زحاف، صالح، زرفاوي، & يعقوب. (2009). دراسة الليزر وتطبيقاته (رسالة دكتوراه غير منشورة). جامعة غير مذكورة.
7. عبد المجيد، ح.، وآخرون. (2017). التطورات الحديثة في تكنولوجيا الليزر. المجلة العربية للعلوم، 112.
8. مجاهد محسن، س. ع.، & زبير علي، س. م. (2021). المسح والتحليل التكنولوجي لليزر وتطبيقاته الدفاعية. تكنولوجيا الدفاع، 17(2)، 583–592.

ثانيًا: المصادر الأجنبية:

9. Agrawal, G. P. (2012). Fiber-optic communication systems (4th ed.). John Wiley & Sons.
10. Agrawal, G. P. (2010). Applications of nonlinear fiber optics. Academic Press.
11. Coldren, L. A., Corzine, S. W., & Mashanovitch, M. L. (2012). Diode lasers and photonic integrated circuits. WIley.

12. Csele, M. (2004). Fundamentals of light sources and lasers. Wiley.

13. Meschede, D. (2008). Optics, light and lasers. Wiley-VCH.

14. Daggett, C., et al. (2020). Laser safety: The need for protocols. Cutis, 106(2), 87–92.

15. Duarte, F. J. (1990). Dye laser principles. Academic Press.

16. Freeman, R. L. (2002). Fiber-optic systems for telecommunications. Wiley.

17. Goodman, J. W. (2005). Introduction to Fourier optics (3rd ed.). Roberts & Company.

18. Kaminow, I. P., Li, T., & Willner, A. E. (2013). Optical fiber telecommunications. Academic Press.

19. Keiser, G. (2010). Optical fiber communications (4th ed.). McGraw-Hill.

20. Marcuse, D. (1991). Theory of dielectric optical waveguides. Academic Press.

21. Maiman, T. H. (1960). Stimulated optical radiation in ruby. Nature, 187, 493–494.

22. Milonni, P. W., & Eberly, J. H. (2010). Lasers. Wiley.

23. Nilsson, J. (2013). High-power fiber lasers: A review. IEEE Journal.

24. G. Keiser & Robert D. Guenther.(.2005) "PTICAL COMMUNICATION SYSTEMS Historical Development". Encyclopedia of Modern Optics, Elsevier. Pages 387-394,ISBN 9780123693952.

25. Chen, G., & Li, S. (2011). Optical wireless communication systems. IEEE Communications Magazine.

26. Gisin, N., & Thew, R. (2007). Quantum communication. Nature Photonics, 1(3), 165–171.

27. Okamoto, K. (2006). Fundamentals of optical waveguides. Academic Press.

28. Ellis, A. D. (2016). Capacity limits in optical communications. IEEE Photonics Journal.

29. Ramaswami, R., & Sivarajan, K. N. (2009). Optical networks. Morgan Kaufmann.

30. Goldsmith, A. (2005). Wireless communications. Cambridge University Press.

31. Hemmati, H. (2006). Deep space optical communications. Wiley.

32. Ip, E., & Kahn, J. M. (2008). Digital equalization in optical systems. Journal of Lightwave Technology.

33. Palais, J. C. (2005). Fiber optic communications. Pearson.

34. Pereira-Pardo, L., & Korenberg, C. (2018). Erbium laser In heritage conservation. Journal of Cultural Heritage, 31.

35. Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2007). Fundamentals of photonics. Wiley

36. Senior, J. M. (2009). Optical fiber communications. Pearson.

37. Shin, Y. C., et al. (2020). Laser applications In manufacturing. Journal of Manufacturing Science.

38. Herd, R. M., et al. (1997). Basic laser principles. Dermatologic Clinics, 15(3), 355–372.

39. Kaminow, I. P., Li, T., & Willner, A. E. (2013). Optical fiber telecommunications. Academic Press.

40. Sroka, R., et al. (2015). Medical laser application. Journal of Biomedical Optics.

41. Svelto, O. (2010). Principles of lasers (5th ed.). Springer.

42. Ghatak, A., & Thyagarajan, K. (1998). Introduction to fiber optics. Cambridge.

43. Hecht, J. (2015). Understanding fiber optics. Pearson.

44. Kashyap, R. (2009). Fiber Bragg gratings. Academic Press.

45. Kazovsky, L. G. (1996). Optical fiber communication systems. Artech House.

46. Liu, X. (2011). Advanced optical communication systems. Springer.

47. Agrawal, G. P. (2001). Applications in optical communications. Academic Press.

48. Desurvire, E. (1994). Erbium-doped fiber amplifiers. Wiley.

49. Kikuchi, K. (2016). Fundamentals of coherent optical fiber communications. Journal of Lightwave Technology.

50. Essiambre, R. J. (2010). Capacity limits of optical fiber networks. Nature Photonics.

51. Winzer, P. J. (2018). Fiber-optic transmission systems. IEEE.

52. Proakis, J. G. (2001). Digital communications (4th ed.). McGraw-Hill.

53. Uysal, M., Li, J., & Yu, M. (2016). Visible light communication systems. IEEE Communications Surveys.

54. Kaminow, I. P. (2010). Optical networking advances. Academic Press.

55. Koonen, T. (2011). Fiber to the home technologies. IEEE Proceedings.

56. Tucker, R. S. (2010). Green optical communications. IEEE Journal.

57. Yariv, A. (1991). Optical electronics in modern communications. Oxford.

58. Yariv, A., & Yeh, P. (2007). Photonics. Oxford University Press.

59. Winzer, P. J. (2018). Fiber-optic transmission systems. IEEE.

60. Ip, E. (2008). Coherent detection in optical communications. Optics Express.

61. Andrews, L. C., & Phillips, R. L. (2005). Laser beam propagation through random media. SPIE Press.

62. Armstrong, J. (2009). OFDM for optical communications. Journal of Lightwave Technology, 27(3), 189–204.

63. Barry, J. R. (1994). Wireless infrared communications. Springer.

64. Kim, I. I., & Korevaar, E. (2001). Free-space optical communication systems. IEEE.

65. Li, G., & Yu, J. (2011). Optical communication systems evolution. IEEE Journal.

66. Majumdar, A. K. (2015). Free-space laser communications. Springer