فيزياء الليزر وتطبيقاته

منشورات جامعة البعث
كليـــــة العلـــــوم

فيزياء الليزر وتطبيقاته

الدكتور
مالك أحمد يونس
مدرس في قسم الفيزياء

لطلاب السنة الرابعة فيزياء

مديرية الكتب والمطبوعات
٢٠٠٧ - ٢٠٠٨

- لجنة التقييم العلمي

الدكتور زكريا ظلام

الدكتور حسن المقدم

الدكتور تيسير قرقماز

- المدقق اللغوي

الدكتور غسان مرتضى

كلية الآداب والعلوم الإنسانية – جامعة البعث

الفهرس

الموضوع	الصفحة

الفصل الرابع : المجاوبة الضوئية أو المرنان

الفصل الخامس : خصائص أشعة الليزر

الفصل السادس : أنواع الليزرات

الفصل السابع : تطبيقات الليزر

الفصل الثامن : أمان الليزر

مُقَدِّمَة

أحدثَ اكتشاف الليزر في الستينات من القرن الماضي ثورة علمية وتقانية كبيرة لم يعرف لها مثيل من قبل . ودخل منذ ظهوره في كثير من مجالات الحياة المختلفـة ، ومالبثت أن اجتاحت تطبيقاته حقل العلوم الأساسية كالفيزياء والكيمياء والقياسـات العلمية ذات الدقة العالية ، كما غزا الليزر حقل الطب والصناعة والزراعة والاتصالات والبيئة ......وغيرها. ومازال الليزر يغزو كل يوم ميداناً جديداً من ميادين الحيـاة المختلفة ، حتى إنه اعتبر أحد أهم الإنجازات العلمية في القرن العشرين .

ومنذ بداية اكتشافه ماتزال البحوث تتسابق لتطويره ، ولإيجاد مجالات جديدة لتطبيقه، حيث إن قوة شعاعه ودقة اتجاهيته تجعلان منه مصدراً مثالياً للضوء والطاقة يتفوق على جميع المصادر التقليدية المعروفة سابقاً .

ولقد أصبح الليزر بمتناول كل من يرغب الاستفادة منه كالباحـث العلمـي والمهندس والطبيب والصناعي وفي مختلف التقانات بدءاً من الميكروبيولوجيا وانتـهاءً بصناعة الآلات الضخمة والسفن والطائرات. ومع هذا الانتشار الواسـع لليـزرات وشيوع استعمالها ظهرت مبالغات كبيرة في الحديث عن تطبيقاته لدرجة اعتبرت فيها أشعة الليزر كأنها أشعةٌ سحريةٌ .

لذلك كان لزاماً علينا أن نطلع الطالب على ماهية هذا الموضوع المثير بـشكل علمي واضح ومبسط ، ولقد اتبعنا منهجاً علمياً في شرح طريقـة عمـل الليـزر ، وخصائص أشعته ، وأنواعه المختلفة ، وبعض مجالات استخدامه وتطبيقاتـه لطـلاب السنة الرابعة فيزياء في كلية العلوم ، على أمل أن يجد الطالب في هذا الكتاب ما يشبع فضوله من خلال إعطاء فكرة عامة عن فيزياء الليزر، وبما يـساعده علـى التوجـه والاستفادة من المراجع العلمية المختصة ، إذا أراد ذلك لتطوير معلوماته .ولابد مـن لفت الانتباه إلى أننا اعتمدنا في شرحنا على النظرية الكلاسيكية ، التي تعتمد علـى

معادلات النسبة حيث يتم وصف حقل الإشعاع بواسطة عدد الفوتونات واحتمال الانتقالات، بينما توصف المنظومة الذرية بواسطة عدد الإلكترونات في المستويات الإلكترونية المختلفة ، ومن ذلك يمكن استنتاج شرط العتبة ، شدة الأشعة الليزرية وكذلك ديناميكية العمليات التي تؤدي إلى فعل الليزرة.

يحتوي الكتاب على ثمانية فصول ، يبحث الفصل الأول الخصائص الفيزيائية للإشعاع ، وقد شرحنا فيه بشكل مختصر التآثر بين الذرة وحقل إشعاع والعمليات المرافقة كالإمتصاص والإصدار العفوي والإصدار القسري .

ويتضمن الفصل الثاني الخصائص العامة للخطوط الطيفية وما يتعلّق بتعريضها وأنواع هذا التعريض .

و نبحث في الفصل الثالث شروط توليد أشعة الليزر ، كانعكاس إسكان سويات الطاقة وشرط العتبة ودراسة معادلات النسبة وإيجاد حلولها ، وأيضاً طاقة خرج الليزر.

وخصصنا الفصل الرابع لدراسة المجاوبة الضوئية "المرنان" والاهتزازات الخاصة به، الإنماط ، وكفاءته والمصفوفة المميزة له وشرط استقرار الليزر وكذلك الأشكال المختلفة للمرنان وخصائصه التقنية .

و يتضمن الفصل الخامس شرح خصائص أشعة الليزر كالترابط الزماني والمكاني وانفراج وشدة شعاع الليزر وسطوعيته .

و يحتوي الفصل السادس على عرضٍ لأنواع الليزرات المختلفة وخصائصها ، وقد أوردنا على كل نوع أمثلة من مجموعة من الليزرات الأكثر استخداماً ، بالإضافة إلى مجموعة من الليزرات ذات التطبيقات الخاصة .

و يتضمن الفصل السابع شرحاً لعددٍ من التطبيقات لأشعة الليزر في مجالات مختلفة، على الرغم من أنه لايمكن في كتاب تعليمي شرح كافة التطبيقات ودراستها ، ولكن كان الهدف هو إعطاء فكرة عن أهم هذه التطبيقات.

خصص الفصل الثامن لشرح أمان الليزر بغية توضيح الأضرار المباشرة وغير المباشرة

التي يمكن التعريض لها أثناء العمل مع أجهزة الليزر أو أشعة الليزر، وكـذلك شـرح إجراءات الأمان العامة والمخبرية اللازم التقيد بها .

ونحن نأمل على كل حال أن يقدم هذا الكتاب فائدة مزدوجة فيكون له أثـره العلمي في الطالب في فهم فيزياء الليزر وزيادة محصلته العلمية من ناحية، ويـثير مـن ناحية أخرى فضوله لمتابعة دراسته في المستقبل والاستفادة من هذا الحقل الواسـع في مجال البحث العلمي .

علماً أن المقرر يغطي ثلاث ساعات نظرية .

وأتقدم أخيراً بالشكر لكل من ساهم في إنجاز هذا الكتاب وإعداده .

حمص في / /

المؤلف

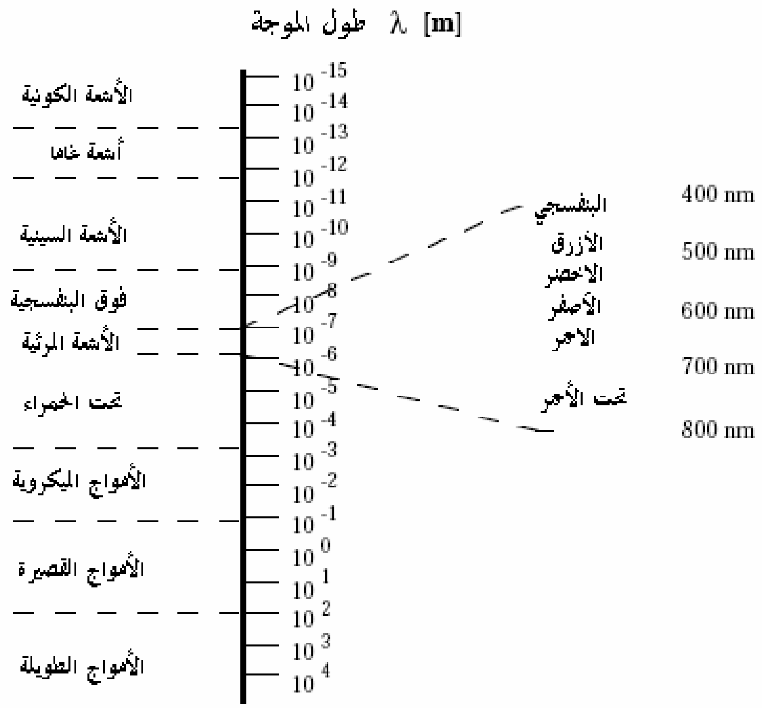
د. مالك يونس

الفصل الأول
الخصائص الفيزيائية للإشعاع

١-١- مقدمة:

اعتقد العلماء حتى منتصف القرن التاسع عشر أن الظواهر الضوئية والكهرطيسية منفصلة بعضها عن بعض ، فعلى العكس من فرضية نيوتن التي تعتبر الضوء جسيمات ، فقد تميزت فرضيات أخرى تعتبر الضوء أمواجاً تنتشر في الفضاء وتم على أساسها تفسير ظواهر الانعراج والتداخل . فانتشار الضوء يتم مثل انتشار الأمواج الميكانيكية، ولكن في وسط شفاف غير واضح فيزيائياً في ذلك الوقت. ولكن الخطوة الحاسمة لحل هذه الاشكالات جاءت عندما نجح العالم ماكسويل ***(Maxwell)*** في عام **١٨٧١** بوضع المعادلات الأساسية في الإلكتروديناميك، والتي شرحت أن الضوء عبارة عن أمواج كهرطيسية . وإذا أخذنا بعين الاعتبار بعد ذلك البرهان التجريبي لمعادلات ماكسويل من قبل العالم هرتز ***(Herz)*** في عام **١٨٨٨** ونظرية أينشتاين حول تكميم الضوء في عام **١٩٠٥** ومن ثم نموذج بور ***(Bohr)*** الذري يتضح أن الضوء يمكن اعتباره أمواجاً كهرطيسية ، وذلك على الرغم من أن النظرية الكوانتية من خلال الخصائص موجة-جسيم للضوء أدت إلى تعقيد هذا الفهم البسيط والواضح لماهية الضوء.

تتولّد الأمواج الكهرطيسية ذات التردد ***(ν)*** عند اهتزاز ثنائي قطب ***(Dipol)*** بنفس التردد، وطيف الأشعة الناتجة يمتد من ترددات الأمواج الراديوية ***(١٠⁴ Hz)*** مروراً بترددات المجال المرئي والإشعاعات النووية وهكذا حتى مجال ترددات الأشعة الكونية ***(١٠²² Hz)*** كما هو مبين بالشكل **(١-١)**.



الشكل(١-١) أطوال أمواج الطيف الكهرطيسي

ومن حيث المبدأ إذا تجاوزنا آلية توليد الأمواج الكهرطيسية التي تشمل كامـل المجال الطيفي فإن خصائص هذه الأمواج تختلف من مجال الأمواج الراديوية أي أطوال موجية من مرتبة المتر أو السنتيمتر عنه في مجال الترددات المرئية ذات الأطوال الموجيـة الأقصر.

لذلك لابد من توضيح هذا الاختلاف الذي يمكن من خلاله فهم التطورات التي تحققت من تقدم فيزياء الليزر أو مايسمى الإلكترونيات الكوانتية.

لنعتبر أولاً أن توليد الأمواج الكهرطيسية يتم في المجال الماكروسكوبي، أي توليد أمواج من مرتبة كيلومتر أو متر ، يجب الانتباه هنا إلى أن مجال ماكرسكوبي تعني هنا أن الهوائيات أو المشعات التي تولد هذه الأمواج الماكروسكوبية تمتلك ايـضاً أبعـاداً

ماكروسكوبية. إن توليد مثل هذه الأمواج يمكن أن يحدث في دارة اهتزاز كهربائيـة تحتوي على مكثفة سعتها C ووشيعة عامل تحريضها الذاتي L ، حيث تتحـدد قيمـة الترددات المتولدة عن هذه الدارة من خلال قيمة سعة المكثفة وعامل التحريض الذاتي للوشيعة.

كما أنه يمكن أيضا توليد أمواج أقصر في مجال السنتيمتر ضمن أنابيب الانفراغ أو في الصمامات من خلال تيار الإلكترونات الناتجة عن تطبيق جهد والـتي تـؤدي بدورها إلى توليد اهتزازات ذات تردد معين والتي يمكن وصفها أحيانـاً كـاهتزازات جيبية. وبالاعتماد على معادلات ماكسويل يمكن اعتبـار عمليـة توليـد الأمـواج الكهرطيسية على أنها ناتجة عن اهتزازات لثنائيات أقطاب.

إذاً هذه الطريقة لتوليد الأمواج الكهرطيسية من خلال تيـار إلكترونـات في دارات اهتزاز كهربائية مثلاً يمكن تطبيقها لتوليد أطوال موجية تمتد حتى مجال الأمواج الميليمترية.

أما إذا أردنا توليد أطوال موجية أقصر من ذلك فإننـا نحتـاج إلى مولـدات اهتزازات ذات أبعاد صغيرة جداً ، وهذا غير قابل للتحقيق عمليـاً كمـا في الحالـة السابقة، لأن توليد أمواج ذات أطوال موجية قصيرة يتم في مجالات ميكروسكوبية مثل ثنائيات أقطاب ذرية مهتزة. فكما نعلم أن الذرة - حسب فرضية بور- تتألف مـن نواة ذات شحنة كهربائية موجبة يحيط بها عدد من الإلكترونات الـسالبة الـشحنة والموزعة على مدارات محددة تماماً . وهذه المدارات معقدة جداً لذلك لسهولة الدراسة فقط يمكن تمثيلها بدوائر متحدة المركز. وبما أن كتلة الإلكترونات صغيرة جداً بالمقارنة مع كتلة النواة لذلك يمكن اعتبار كتلة الذرة مجتمعة في نواتها تقريباً. تكون الـذرة في الحالة الطبيعية مستقرة ونقول إنها في الحالة الأساسية ويمكن أن تنتقل إلى الحالة المثارة (المحرضة) إذا أعطيت طاقة ويمكن تقديم هذه الطاقة اما بواسطة صدمها بإلكترون ذات سرعة عالية حيث يعطي الإلكترون قسماً من طاقته الحركية لأحد إلكترونات الذرة في

المدارات الخارجية فينتقل إلى مدار أعلى ويصبح في حالة غير مستقرة، وعندما يعـود إلى الحالة الأساسية فإنه يعطي الطاقة التي اكتسبها علـى شـكل إشـعاع ضـوئي (فوتونات)، يمكن حساب تردد هذا الإشعاع من خلال الفرق بين طاقة السوية المثارة وطاقة السوية الأساسية التي يتم بينهما انتقال الإلكترون من العلاقة:

$$E_2 - E_1 = h \cdot \upsilon$$

حيث: E_1 طاقة السوية الأساسية.

E_2 طاقة السوية المثارة.

$h = ٦،٦,١٠^{-٣٤} J/S$ ثابت بلانك.

υ تردد الإشعاع الصادر.

وهذا مايحدث في مصابيح الإنارة (النيون) حيث يصطدم إلكتـرون مـسرع بواسطة تطبيق حقل كهربائي بالذرات الموجودة داخل الأنبوب فيـؤدي إلى إثارتهـا للسويات الأعلى. كما يمكن نقل الـذرات إلى الـسويات المثـارة ***(excited state)*** بإعطائها الطاقة على شكل إشعاع ضوئي (فوتونات) فتمتصها الذرات وتنتقـل إلى تلك السويات .

لكن بشكل عام لايمكن التنبؤ باللحظة الزمنية التي تبدأ فيها الذرة المثارة بإصدار الإشعاع نتيجة عودتها إلى السوية الأساسية لأن هذا الإصدار يتم بـشكل عفـوي. وعندما يكون لدينا عدد كبير من الذرات المثارة نحصل في هذه الحالة علـى سلـسلة متعاقبة من الأمواج الكهرطيسية مختلفة الأطوال وتكون الأطوار الابتدائية لهذه الأمواج ذات توزع إحصائي عشوائي. هذه الطريقة لفهم ظاهرة الاءشعاع التقليديـة تـصلح بشكل عام للأمواج الكهرطيسية المتولدة عن ثنائيات أقطاب ذرية . ولكن يجب الأخذ بعين الاءعتبار أنّ هناك اختلافاً أساسياً بين المهتزات الميكانيكيـة (الماكروسـكوبية) والذرات (الميكروسكوبية) وهو أنه ليست جميع الحالات المثارة مـسموحة بالنـسبة للذرة أي لايمكن للإلكترون أن ينتقل من سوية إلى أخرى بشكل مستمر وإنما علـى

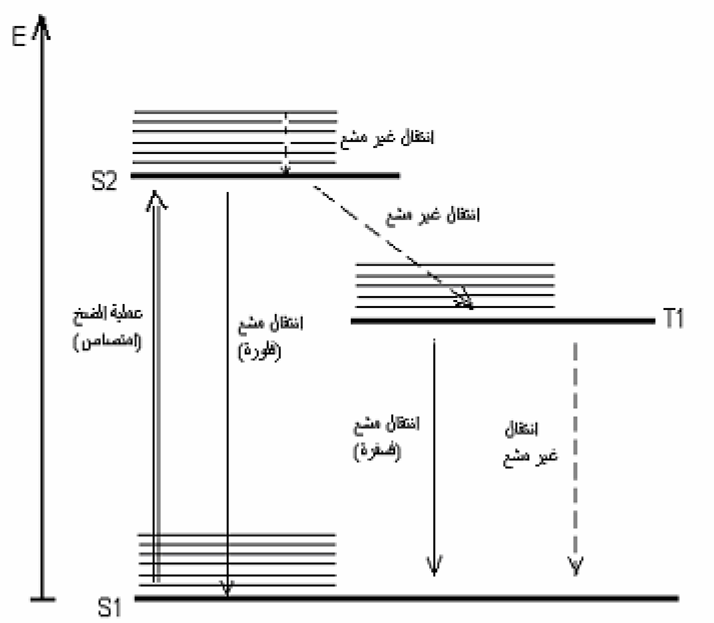
شكل قفزات متقطعة ومكممة. كما أنه بالإضافة إلى الإصدار العفوي للذرات المثارة يلعب الإصدار القسري دوراً حاسماً في فهم مبادئ الإشعاع والذي شرحه أينـشتاين لأول مرة عام **١٩١٧** والذي يمثّل ضرورة أساسية لفهم سلوك الذرات الموجـودة في حقل إشعاع وبالتالي الدخول إلى فيزياء الليزر.

ومع تطور فيزياء الليزر استطاع العلماء توسيع المجال الطيفي الذي يتم فيه توليد الأمواج الكهرطيسية من ثنائيات الأقطاب الذرية والحصول على ترددات كبيرة تزيـد عن $(10^{15} Hz)$.

إن كل الأجسام التي تنزاح عن وضع توازنها لسبب ما من الأسباب تحاول بـشتى الطرق العودة إلى الوضع الطبيعي لها ، وهو حالة التوازن ، وهذا ينطبق أيـضاً علـى الذرات المثارة حيث إن الذرة المثارة لاتبقى فترة طويلة في هذه الحالة بل سوف تعود إلى الحالة الأساسية مصدرة الطاقة التي اكتسبتها بإحدى الطريقتين الآتيتين:

- **انتقالات غير مشعة** : حيث تتحول الطاقة إلى شكل حراري وتعطى إلى الوسط الخارجي ، وهناك عمليات أخرى مثل التحول الـداخلي ***(internal conversion)*** وهي عمليات غير مترافقة بأية إصدارات ضوئية وتتم هذه الانتقـالات ضـمن السوية الواحدة (مثل الانتقالات بين السويات الاهتزازية أو الدورانية) بالإضافة إلى الانتقالات التي تحدث بين السويات ذات التعددية المختلفة مثل الانتقالات بين السويات الأحادية S والسويات الثلاثية T وهذا النوع من الانتقالات لايترافـق بإصدار أشعة ضوئية ، وجميع هذه الانتقالات موضحة بالشكل **(١- ٢)** والـذي يـدعى مخطـط- جابلونـسكي للانتقـالات بـين الـسويات الإلكترونيـة ***(Jablonski-Diagram)*** .
- **انتقالات مشعة** : حيث تصدر الذرة المثارة الطاقة التي اكتسبتها علـى شـكل اشعاع ضوئي (فوتونات) تظهر على شكل قطار من الأمـواج الكهرطيـسية . وهناك عدد كبير من المواد التي يرافق انتقال ذراتها من الحالة المثـارة إلى الحالـة

الأساسية إصدار ضوء يقع في مجال الطيف المرئي أو في جواره. ففي حالة الياقوت مثلاً يوافق الانتقال من $E_٢$ إلى $E_١$ إصدار الضوء الأحمر الذي يبلغ طول موجته A^o ٦٩٤٣ ، أما الانتقال من $E_٣$ إلى $E_١$ فيوافق الضوء اليزرق المائل إلى الخضرة وهو غير واضح تماماً لأنه يوجد بجوار السوية $E_٣$ عدد من سويات الطاقة توافق الضوء اليزرق المخضر. وكذلك تصدر ذرة النيون عدة أنواع من الإشعاع أطوال أمواجها : μm ٣،٣٩ (في مجال تحت الأحمر)، $١،١٥٣\mu m$ (أيضاًفي مجال تحـت الأحمر) وكذلك A^o ٦٣٢٨ في مجال الأحمر. إن آلية الإصدار هذه مـستخدمة في ليزر الياقوت والليزرات الغازية مثل (ليزر الهليوم-نيون) أو (ليـزر الأرغـون) وهذا ماسنراه لاحقاً .



الشكل(١-٢) مخطط **جابلونسكي للانتقالات** بين **السويات الإلكترونية**

إنه لمن الصعب عملياً أن تتوافق سويات الطاقة الإلكترونية مع آلية الإصـدار الآنفة الذكر بحيث تكون متقاربة فيما بينها لتعطي أمواج كهرطيسية في مجال الأشعة

تحت الحمراء البعيدة . لذلك استخدم العلماء الانتقالات التي تحدث بـين المـدارات الاهتزازية والدوارنية والانسحابية في الجزيئات. حيث يمكن للجزيئات أن تجمع طاقة حركية انسحابية وطاقة حركية دورانية أيضاً، كما يمكن لـذرات الجزيئـة أن تهتـز بالنسبة لبعضها البعض فتمتلك الجزيئة بذلك طاقة حركية اهتزازية . هذا مع العلم أن مجموع هذه الطاقات لايمكن أن يتحول الابشكل مكمم، كما أن الفرق بين سويات الطاقات (الاهتزازية ، الانسحابية ، الدورانية) يكون صغيراً جداً ويوافق إشـعاعات كهرطيسية تقع في مجال أطوال الأشعة تحت الحمراء . وكمثال على ذلك نذكر غـاز ثاني أكسيد الكربون $CO_٢$ الذي تتألف جزيئاته من ذرة أكسجين وذرتين من الكربون ، ويوافق الفرق بين سويتي طاقة اهتزازية إصدار أمواج كهرطيسية ذات طول موجـة $١٠\mu m$. ان آلية الإصدار هذه مستخدمة في الليزر الغازي المسمى ليزر ثاني أكـسيد الكربون **$CO_٢$-Laser** .

كما أن هناك نوعاً آخر من سويات الطاقة المكممة المستخدمة في الليزر يدخل في تركيبه مواد صلبة من أنصاف النواقل كالجرمـانيوم و السيليـسيوم أو زرنـيخ الغاليوم. في مثل هذه المواد يخضع الإلكترون بالإضافة إلى تأثير نواة الذرة التي ينتمـي اليها إلى تأثير نوى الذرات الأخرى فتنشأ ظاهرة الارتباط . لذا فإنه يستعاض عـن مفهوم سوية الطاقة في حالة الذرة المعزولة بمفهوم عصابة الطاقة في حالة الجسم الصلب وذلك بسبب وجود عدد كبير من الذرات المتقاربة جداً في طاقاتها . وبما أن المدارات القريبة من النواة تكون ممتلئة بالإلكترونات في الذرة المعزولة فإنه يوافق هذه المدارات عصابة طاقة ممتلئة أيضاً في حالة الجسم الصلب بحيث لايمكن لأي إلكترون خـارجي الدخول اليها . إن أول عصابة طاقة هامة بالنسبة إلينا هي المسماة عصابة التكافؤ، أي التي توافق إلكترونات التكافؤ وهذه العصابة تكون عادة مشبعة بالإلكترونات إلا أنـه يمكن لإلكتروناتها أن تخرج منها بسهولة نسبية بحسب طبيعة الجسم الصلب. وتلـي عصابة التكافؤ عصابة تكون خالية أو غير ممتلئة تدعى عـصابة الناقليـة، وهاتـان

العصابتان تكونان مفصولتين بعصابة ممنوعة حسب طبيعة الجسم الصلب. فإذا كان الجسم الصلب عازلاً يكون عرض العصابة الممنوعة بحدود *(٧ eV)*، وفي حالة نصف الناقل لايختلف مخطط عصابات الطاقة عنه في العازل بشيء سوى أن عرض العصابة الممنوعة هو أصغر وهي بحدود *(٠،٧٥ eV)*. وفي درجة الصفر المطلق *(-٢٧٣ C°)* تكون عصابة الناقلية خالية تماماً من الإلكترونات ، ويكون نصف الناقل في هذه الحالة عازلاً، وعند درجة حرارة الغرفة تكون الطاقة الحركية للإلكترونات أكبر بكثير منها عند الصفر المطلق ولهذا فإن بعض الإلكترونات تكتسب طاقة حرارية من الوسط المحيط أكبر من *(٠،٧٥ eV)* وتصبح بذلك قادرة على اجتياز العصابة الممنوعة ، وتنتقل من عصابة التكافؤ إلى عصابة الناقلية، وهكذا فإنه عند درجة حرارة الغرفة يكون نصف الناقل ناقلاً رديئاً. أما إذا كان الجسم الصلب ناقلاً فلا يوجد في مخطط عصابات طاقته عصابة ممنوعة إنما تتقاطع عصابة التكافؤ مع عصابة الناقلية ولهذا فإنه في درجات الحرارة العادية تحتوي عصابة الناقلية على إلكترونات تأتي اليها من عصابة التكافؤ.

إن عملية إصدار الفوتونات في الليزر الذي يعتمد في صناعته على مواد أنصاف ناقلة تكون شبيهة تماماً بعملية اصدار الفوتونات في الذرة المعزولة ، فالإلكترونات عندما تنتقل من سوية طاقة عليا إلى سوية أدنى تصدر إشعاعاً ضوئياً. لكن لايمكن للإلكترون أن ينزل من سوية أعلى إلى سوية أدنى إلا إذا كان هناك مكانٌ شاغر . فهذه المشكلة غير موجودة في حالة الذرة المعزولة لأن الإلكترون الذي كان في السوية الأساسية ثم انتقل إلى سوية أعلى ترك مكانه شاغراً وبإمكانه أن يعود ليشغل هذا المكان من جديد. أما في حالة أنصاف النواقل فقد اعتمد العلماء لحل هذه المشكلة على وجود نوعين من أنصاف النواقل :

- أنصاف نواقل من النوع *(n)* :

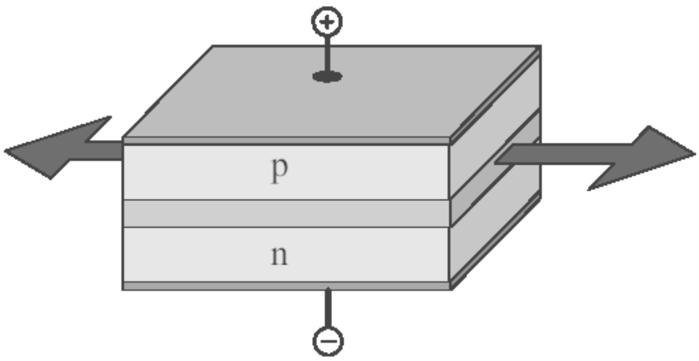
للحصول على هذا النوع من أنصاف النواقل يمزج الجرمانيوم الرباعي التكافؤ مع الزرنيخ الخماسي التكافؤ فتتشارك ذرة الزرنيخ بأربعة إلكترونات مع ذرة

الجرمانيوم ويبقى إلكترون واحد يمكن أن يتحرر من نواته عند اكتسابه من الوسـط المحيط طاقة صغيرة جداً *(٠،٠١ eV)* وتنتج لدينا إلكترونات حرة.

- **أنصاف نواقل من النوع** *(p)* :

ينتج هذا النوع من أنصاف النواقل عند إضافة عناصر ثلاثية التكافؤ (غاليوم ، انديوم) إلى الجرمانيوم فتقوم إلكترونات ذرة الغاليوم مثلاً بشغل ثلاثة روابط فقط من ذرة الجرمانيوم وبالتالي فانه يبقى أماكن شاغرة في عصابة التكافؤ تسمى (الثقوب) . ولصناعة متصلٍ ثنائي نقوم بوصل نصف ناقل من النوع *(n)* مع نصف ناقل من النوع *(p)* . وعند تطبيق فرق في الكمون على المتصل الثنائي ومرور تيار كهربـائي يجعـل إلكترونات الموجودة في نصف الناقل *(n)* تنتقل إلى الثقوب الموجودة في نصف الناقل *(p)* مما يؤدي إلى حدوث انتقال مشع في منطقة الاتصال.

كما هو موضح بالشكل **(١-٣)** .



الشكل (١-٣) متصل من النوع ***p-n***

إذاً نلاحظ أنه هناك عدة أنواع من سويات الطاقة التي يمكن للإلكترونات الانتقـال فيما بينها وإصدار طاقة على شكل موجة كهرطيسية .

١-٢- التأثير المتبادل بين حقل الإشعاع والذرات :

ليكن لدينا ذرة نفترض أنها تمثل ثنائي قطب كهربائي يهتز بشكل غير متخامد وهذه الذرة تخضع لتأثير حقل كهربائي خارجي تعطى قوة تأثيره بالعلاقة :

$$F = e.E.\cos(\omega t + \varphi) \qquad (١-١)$$

حيث : E : شدة الحقل الكهربائي .

e : شحنة الإلكترون .

ω : التردد الزاوي لاهتزاز الحقل .

φ : فرق الطور .

بنتيجة تأثير الحقل الخارجي سوف تنزاح الشحنة المهتزة (الإلكترون في هذه الحالـة) عن وضع التوازن بالقدار x وتعطى معادلة الحركة بالشكل :

$$\frac{d^2X}{dt^2} + \frac{k}{m}.X = \frac{e}{m}.E.\cos(\omega t + \varphi) \qquad (١-٢)$$

وإذا فرضنا أن : $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ والذي يمثّل التردد الزاوي لثنائي القطب فان المعادلـة السابقة تأخذ الشكل :

$$\frac{d^2X}{dt^2} + \omega_0^2.X = \frac{e}{m}.E.\cos(\omega t + \varphi) \qquad (١-٣)$$

حيث k : ثابت قوة الارجاع .

m : كتلة الإلكترون المهتز.

إذا كانت المعادلة متجانسة فإن حلها بدون طرف ثان يكون من الشكل :

$$X_h = A.\sin(\omega_0.t + \varphi_0) \qquad (١-٤)$$

وفي حالة عدم التجانس يأخذ الحل بوجود طرف ثان الشكل:

$$X_p = B.\cos(\omega.t + \varphi) \qquad (١-٥)$$

نعوض العلاقة (**١-٥**) في العلاقة (**١-٣**) وبالإصلاح نجد أن :

$$-B\left(\omega^2-\omega_0^2\right)=\frac{e.E}{m} \qquad (١-٦)$$

ومنه نجد أن :

$$B=-\frac{e.E}{m}\left(\frac{1}{\omega^2-\omega_0^2}\right) \qquad (١-٧)$$

إذا فرضنا أن شروط البدء في اللحظة ٠ = t يكون لدينا الانزياح X_o الـذي يعطـى بالعلاقة :

$$X_0=A_0.\sin\left(\omega_0.t+\varphi_0\right) \qquad (١-٨)$$

فيكون حل المعادلة (**١-٣**) هو عبارة عن مجموع حلين :

$$X_{(t)}=X_h+X_p$$

أي أن :

$$X_{(t)}=A.\sin\left(\omega_0.t+\varphi_0\right)-\frac{e.E}{m}\left(\frac{1}{\omega^2-\omega_0^2}\right).\cos(\omega.t+\varphi) \qquad (١-٩)$$

عند تأثير قوة حقل كهربائي من الشكل : $e.E.\cos(\omega t+\varphi)$ فإنه يتم خـلال الفتـرة الزمنية dt انتقال طاقة مقدارها:

$$U.dt=e.E.\cos(\omega.t+\varphi).dX \qquad (١-١٠)$$

وبالتالي يمكن استنتاج الطاقة المتبادلة بين الحقل الخارجي والذرة في واحدة الزمن :

$$U=e.E.\cos(\omega.t+\varphi).\frac{dX}{dt} \qquad (١-١١)$$

نحسب قيمة : $\frac{dX}{dt}$ من العلاقة (**١-٩**) وبعد التعويض نحصل على :

$$U=e.E.\omega_0.A.\cos\left(\omega_0.t+\varphi_0\right).\cos(\omega.t+\varphi)$$
$$+\frac{e^2.E^2}{m}\cdot\frac{\omega}{\omega^2-\omega_0^2}\cdot\sin(\omega.t+\varphi).\cos(\omega.t+\varphi) \qquad (١-١٢)$$

إذا درسنا القيمة الوسطية لهذه العلاقة خلال دور تام بالنسبة للتردد الزاوي ω فـإن الحد الثاني سوف يساوي الصفر وعندما تكون الترددات قريبة جداً من تردد التجاوب

أي عندما $\omega >> |\omega - \omega_{\circ}|$ تصبح العلاقة بالشكل :

$$U = e.E.\omega_0.A \cdot \frac{\cos(\varphi_0 - \varphi)}{2} \qquad (١-١٣)$$

إذاً وفقاً لهذه العلاقة تكون الطاقة المتبادلة بين الحقل والذرة في واحدة الزمن إما موجبة أو سالبة:

- إذا كانت: $cos\ (\varphi_o - \varphi) > ٠$ في هذه الحالة تأخذ الذرة طاقة من الحقل الخارجي وهذا يوافق حالة الامتصاص .
- إذا كانت: $cos\ (\varphi_o - \varphi) < ٠$ في هذه الحالة تعطي الذرة طاقة إلى الحقل الخارجي وهذا يوافق حالة الإصدار .

وهذا الاستنتاج واضح من علاقة الطاقة مع فرق الطور فعندما تكـون الطاقـة موجبة تكتسب الحركة الاهتزازية للإلكترون ضمن الذرة تسارعاً نتيجة تأثير الحقـل الخارجي أي أن الإلكترون اكتسب طاقة من الحقل (حالة امتصاص) ، وفي الحالة التي تكون فيها الطاقة سالبة تتباطأ الحركة الاهتزازية للإلكترون ضمن الذرة نتيجة تـأثير الحقل الخارجي أي أن الإلكترون يعطي طاقة للحقل (حالة اصدار) .

نتيجة:

يحدث عند تأثير حقل كهربائي خارجي على ذرة ما يأتي : إما اكتساب طاقة من الحقل أو إعطاء طاقة للحقل وهذا يتعلق بفرق الطور بـين الحقـل الكهربـائي والحركة الاهتزازية للإلكترونات ضمن الذرة .

و يكون هذا التأثير واضحاً جداً في حالة الجزيئات حيث تتطلّب عملية تبادل الطاقـة مع الحقل الكهربائي الخارجي شرطاً إضافياً ينص على أن الجزيئة التي تمتص الأشـعة الكهرطيسية يجب أن يكون لها عزم ثنائي قطب كهربائي تتغير قيمته أو جهته نتيجـة لتأثير الأشعة الكهرطيسية على الجزيئة .

١-٣- معاملات أينشتاين :

لقد استخدم أينشتاين الحقيقة السابقة التي كانت معروفة في الفيزياء الكلاسيكية نقطة انطلاق لشرح التأثير المتبادل بين حقل خارجي والذرات وفق مبادئ النظرية الكوانتية . لذلك لابد هنا من التذكير بنظرية الإشعاع الحراري التي تصف علاقة كثافة الإشعاع $\rho_{(\upsilon)}$ مع التردد υ ودرجة الحرارة المطلقة T والتي تدعى علاقة رايلي (***Rayleig***) :

$$\rho_{(\upsilon)} = \frac{8\pi.K.T.\upsilon^2}{c^3} \qquad (١٤-١)$$

حيث : $\rho_{(\upsilon)}$ كثافة الإشعاع وهي عبارة عن الطاقة في واحدة الحجم وفي واحدة التردد .

K ثابت بولتزمان .

c سرعة الضوء .

لكن من أجل القيم الكبيرة لـ $\left(\frac{\upsilon}{T}\right)$ لاتتوافق النتائج التجريبية مع العلاقة **(١-١٤)** ، وإنما مع علاقة فين (***Wien***) التالية فقط :

$$\rho_{(\upsilon)} = \frac{8\pi.h.\upsilon^3}{c^3} \cdot e^{-\frac{h\upsilon}{K.T}} \qquad (١٥-١)$$

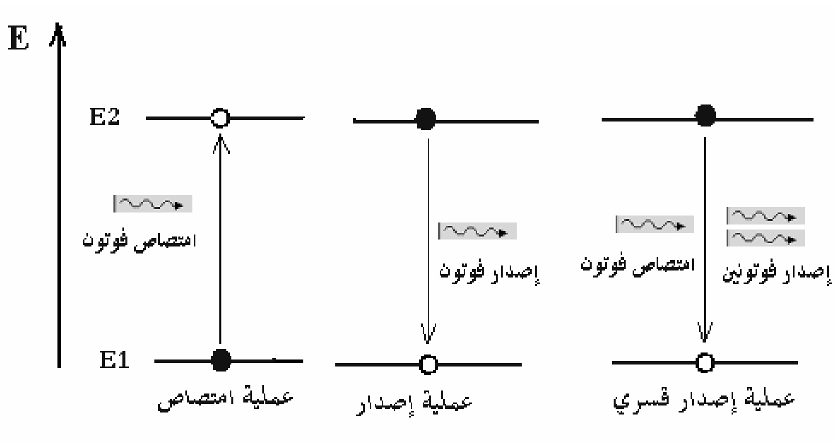
أما علاقة الطاقة لكافة الترددات فقد أوجدها بلانك (***Planck***) من خلال إدخال مفهوم تكميم سويات الطاقة عند دراسة التأثير المتبادل بين الحقل الخارجي والذرة:

$$\rho_{(\upsilon)} = \frac{8\pi.h.\upsilon^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\upsilon}{K.T}} - 1} \qquad (١٦-١)$$

لكن بشكل أوسع من ذلك يبقى الاهتمام في آلية التأثير المتبادل بين حقل خارجي والذرات أو الجزيئات في حالتي الامتصاص أوالإصدار عندما يوصف الحقل الخارجي بواسطة علاقة كثافة الطاقة **(١-١٦)** . ولدراسة آلية هذا التأثير المتبادل سوف نكتفي بأخذ سويتين فقط بعين الاعتبار من مجموعة السويات العديدة

للذرات ولتكن السوية الأولى ذات الطاقة E_1 والسوية الثانية ذات الطاقة E_2 ، هذا مع العلم أنه ليس بالضرورة أن تكون السوية E_1 هي السوية الأساسية في الذرة .

إن تفاعل الضوء مع الذرات يترافق بثلاث عمليات هي: عملية الامتـصاص و عملية الإصدار العفوي وعملية الإصدار القسري. وهذه العمليات الـثلاث تترافـق بانتقالات تحدث في ذرات المادة بين السويتين E_1 و E_2 عند أي درجة حرارة وهذا مايتعلق بعملية التوازن الحراري والشكل التالي يوضح مستويي الطاقة وتأثير كل عملية انتقال على الذرة وعلى الضوء كما في الشكل (**١-٤**) .



الشكل (١-٤) عمليات : الإمتصاص ، الإصدار العفوي ، الإصدار القسري

سنقوم في هذه المرحلة بدراسة تأثير كل عملية من العمليات الانتقالية الـثلاث السابقة على معدل التغير في عدد الذرات N_2 في السوية المثارة E_2 وذلك في حالة التوازن الحراري. فالعلاقة بين عدد الذرات في سويات الطاقة المختلفة عنـد التـوازن الحراري يمكن وصفها بمعادلة ماكـسويل-بولتزمـان ***(Maxwell-Boltzman-Law)*** التالية:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \cdot e^{-\frac{h\upsilon}{K.T}} \qquad (١-١٧)$$

حيث: K : ثابت بولتزمان.

N_2 : عدد الذرات في السوية المثارة E_2 .

N_1 : عدد الذرات في السوية الأساسية E_1 .

g_1 , g_2 : درجة التعدد للسوية الأساسية والمثارة والذي يمثل الطرق المختلفة لتوزع الذرات التي لها نفس الطاقة . لأنه يجب أن تكون إحدى السويات على الأقل متعددة وذلك لأن الانتقال $j_2 = 0 \leftrightarrow j_1 = 0$ غير مسموح .

T : درجة الحرارة المطلقة.

υ : تردد الإشعاع و h : ثابت بلانك .

مثال:

احسب النسبة بين عدد الذرات (N_1 , N_2) في السويات الطاقية E_1 , E_2 عند درجة حرارة الغرفة $T=300K$ وذلك إذا كان الفرق بين سويات الطاقة $0.5\ eV$. ثم حدد طول موجة الإشعاع الصادر λ عند انتقال إلكترون من السوية E_2 إلى السوية E_1 ؟

الحل:

بالتعويض في معادلة ماكسويل- بولتزمان:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{(E_2-E_1)}{K.T}}$$

$$= e^{-\frac{(0,5\ eV)(1,6.10^{-19}\ J/eV)}{(1,38.10^{-23}\ J/K)(300\ K)}}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = 4.10^{-9}$$

وهذا يعني أنه عند درجة حرارة الغرفة تتواجد 10^9 ذرة في السوية الأساسية بينما لايتواجد سوى أربع ذرات في السوية المثارة.

ولتحديد طول الموجة لدينا العلاقة:

$$\lambda = \frac{h\upsilon}{\Delta E}$$

$$\lambda = \frac{(6,626 \cdot 10^{-34}\ J.\sec).(3.10^{8}\ m/\sec)}{(0,5\ eV).(1,6.10^{-19}\ J/eV)} = 2,48\ \mu m$$

وطول الموجة هذا يقع في مجال الأشعة تحت الحمراء القريبة *(NIR)* .

١-٣-١- الإصدار التلقائي:

تعتمد عملية الإصدار التلقائي على عدد الذرات في السوية المثارة $N_٢$ فكلما زاد العدد $N_٢$ كلما ساهم ذلك في زيادة عملية الإصدار التلقائي ، كما يتعلق هذا الانتقال بالمعامل $A_{٢١}$ الذي يعبر عن احتمال حدوث الإصدار التلقائي ويدعى معامل أينشتاين للإصدار التلقائي، كما أن معدل التغير في عدد الذرات في السوية المثارة بالنسبة للزمن يكون دائماً سالباً لأن العدد $N_٢$ يتناقص مع الزمن ويمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة :

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21} \cdot N_2 \qquad (١-١٨)$$

إن هذا الإصدار الذي يزيد من عدد الفوتونات الصادرة يتناسب مع عدد الذرات في السوية المثارة $N_٢$ لكنه مستقل عن كثافة طاقة الإشعاع أي عن $\rho_{(\upsilon)}$ (الكثافة الطيفية للاشعاع) .

من العلاقة السابقة يمكننا أن نكتب :

$$\frac{dN_2}{N_2} = -A_{21} \cdot dt$$

وبالتكامل نجد أن :

$$N_{2(t)} = N_{2(t_0)} \cdot e^{-A_{21}.t}$$

ومنه نستنتج أن أبعاد الثابت $A_{٢١}$ هو مقلوب الزمن وهو يدعى بالثابتة الزمنية وهي تعبر عن عمر الحالة المثارة (أو متوسط فترة بقاء الإلكترونات في السوية المثارة)

ويرمز له τ_{21} حيث أن :

$$\tau_{21} = \frac{1}{A_{21}}$$

ومنه تصبح العلاقة التي تعطي عدد الذرات في السوية المثارة بالشكل :

$$N_{2(t)} = N_{2(t_0)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

١-٣-٢- الامتصاص:

على العكس من عملية الإصدار التلقائي ترتبط عملية الامتصاص بعدد الذرات N_1 في السوية الأساسية E_1 ، أي كلّما ازداد العـدد N_1 كلمـا ازدادت عمليـة الامتصاص . ويعتمد هذا الانتقال من السوية الأساسية إلى السوية المثارة على المعامل B_{12} الذي يدعى معامل أينشتاين للامتصاص ، وهو يعبر عن احتمال حدوث عمليـة الامتصاص. كما أن معدل التغير في عدد الذرات N_2 في السوية المثارة E_2 بالنسبة إلى الزمن يكون دائماً موجباً لأن N_2 يزداد بسبب عملية الامتصاص ، بينما يكـون ذلك سالباً بالنسبة إلى عدد الذرات في N_1 في السوية الأساسية E_1 لأنه يتناقص مـع الزمن .

وكما نعلم تحدث عملية الامتصاص إذا توفر فوتون ذو طاقة تـساوي فـرق الطاقة بين السويتين E_1 و E_2 أي أن:

$$h \cdot \upsilon = \Delta E = E_2 - E_1$$

وللتعبير عن مدى تحقق هذه العلاقة في عملية الامتصاص نستخدم مفهوم كثافة طاقـة الإشعاع *(Energy density of Radiation)* كتابع للتردد $\rho_{(\upsilon)}$ التي تعبر عن احتمال وجود فوتونات عند التردد υ في واحدة الحجم . ويمكن التعبير عـن تـأثير عمليـة الامتصاص على تغير تعداد السوية الأساسية E_1 بالمعادلة التالية:

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12} \cdot N_1 \cdot \rho_{(\upsilon)} \qquad (١-١٩)$$

١-٣-٣- الإصدار القسري:

تعتمد عملية الإصدار القسري على عدد الذرات في السوية المثـارة $E_٢$ ، أي كلما ازداد العدد $N_٢$ كلما ازدادت عملية الإصدار القسري ، وكذلك يعتمد هـذا الانتقال على المعامل $B_{٢١}$ الذي يعبر عن احتمال حدوث عملية الإصدار القـسري ، ويكون معدل التغير في تعداد السوية $E_٢$ بالنسبة إلى الزمن سالباً لأنـه كلمـا ازداد معدل التغير تناقص العدد $N_٢$. كما أن عملية الإصدار القسري تحدث إذا توفر فوتون ذو طاقة تساوي فرق الطاقة بين السويتين $E_٢$ و $E_١$ أي أن :

$$h\upsilon = \Delta E = E_2 - E_1$$

وبما أن عملية الإصدار القسري تحدث فقط عند وجود تأثير حقل خارجي أي أنهـا ترتبط مع كثافة طاقة الإشعاع $\rho_{(\upsilon)}$ وبالتالي يمكن التعبير عن تأثير عملية الإصـدار القسري على تغير عدد الذرات في السوية المثارة $E_٢$ بدلالة كثافة طاقة الإشعاع $\rho_{(\upsilon)}$ كتابع للتردد بالمعادلة التالية :

$$\frac{dN_2^*}{dt} = -B_{21} \cdot N_2 \cdot \rho_{(\upsilon)} \qquad (١-٢٠)$$

حيث يدعى $B_{٢١}$: معامل أينشتاين للإصدار القسري ، وهو يتعلق بخواص الذرة أي بالسويتين $E_١$ و $E_٢$ ، ويدعى أيضاً احتمال الإصدار القسري .

إن المعادلات الثلاث الـسابقة (**١-١٨**)، (**١-١٩**)، (**١-٢٠**) تمثـل الحـالات المختلفة التي يمكن من خلالها أن يتفاعل حقل أشعة خارجي مع الذرات .

من قانون انحفاظ الطاقة ، حيث أنه في حالة التوازن الحراري يجب أن يكـون عدد الانتقالات من السوية $E_٢$ إلى السوية $E_١$ مساوياً لعدد الانتقالات من السوية $E_٢$ إلى السوية $E_١$ ، يمكن أن نكتب:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} + \frac{dN_2^*}{dt} \qquad (١-٢١)$$

بالتعويض نحصل على :

$$N_1 \cdot B_{12} \cdot \rho_{(\upsilon)} = \lfloor A_{21} + B_{21} \cdot \rho_{(\upsilon)} \rfloor N_2 \qquad (١-٢٢)$$

ومنه نجد أن :

$$\rho_{(\upsilon)} = \frac{A_{21} \cdot N_2}{B_{12} \cdot N_1 - B_{21} \cdot N_2}$$

$$\rho_{(\upsilon)} = \frac{A_{21}}{\frac{N_1}{N_2} B_{12} - B_{21}} \qquad (١-٢٣)$$

نعوض عن المقدار $\frac{N_1}{N_2}$ بقيمته من قانون ماكسويل بولتزمان فنجد أن :

$$\rho_{(\upsilon)} = \frac{A_{21}}{B_{21}} \left[\frac{1}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \cdot e^{\frac{h\upsilon}{KT}} - 1} \right] \qquad (١-٢٤)$$

وهذه العلاقة تمثل قانون أينشتاين في الإشعاع .

وبمقارنة علاقة أينشتاين مع قانون بلانك للاشعاع نستنتج أنه حتى يكون هناك تطابق بين العلاقتين يجب أن يكون :

$$B_{21} = B_{12} = B \qquad (١-٢٥)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi \cdot h \cdot \upsilon^3}{c^3} \qquad (١-٢٦)$$

وبهذه العلاقة استطاع أينشتاين أن يبرهن على صحة قانون بلانك التجريبي بإدخالـه فكرة الإصدار القسري للفوتونات .

من العلاقة (**١-٢٥**) نلاحظ أن احتمال امتصاص الذرة لفوتون ذو طاقة $h\upsilon$ من حقل الإشعاع الخارجي يساوي تماماً احتمال إصدار الذرة المثارة بـشكل قـسري لفوتون بنفس الطاقة وتحت تأثير نفس الحقل الخارجي. كذلك يمكننا الاستنتاج مـن

العلاقة (**١-٢٦**) أن احتمال الانتقال للاصدار القسري يتناسب طردأمع احتمال الانتقال للاصدار التلقائي ، ولكنه يتناقص بشدة كتابع للتردد υ لأنه يتناسب عكساً مع القوة الثالثة للتردد ($B_{21} \sim \frac{1}{\upsilon^3}$) . أي أن عملية الإصدار القسري تصبح أقل احتمالاً كلما كانت υ كبيرة جداً ، وهذا هو السبب بأن الليزرات في مجال الأمواج القصيرة (في مجال فوق البنفسجية أو السينية) تلاقي صعوبات تقنية كبيرة عند تصنيعها . كما أن احتمال الإصدار التلقائي A_{21} واحتمال الإصدار القسري B_{21} يتعلقان بخواص الذرة ويمكن حسابهما بسهولة اعتماداًعلى النظرية الكوانتية .

تشرح الدراسة السابقة عملية تبادل الطاقة بين الذرات وحقل إشعاع خارجي وذلك بغض النظر عن عملية تبادل الدفع ، والذي درسه أينشتاين أيضاً وأدى إلى نتائج إضافية لفهم عملية الإصدار القسري . وكذلك يجب على عمليات الامتصاص والإصدار للفوتونات أن تحقق قانون انحفاظ الدفع بالنسبة للذرات ، وهذا يعني أن الذرة سوف تحصل على دفع بمقدار $\frac{h\upsilon}{c}$ وذلك بنفس اتجاه الأشعة الساقطة على الذرة في حالة الامتصاص، أما في حالة الإصدار فتحصل على الدفع $\frac{h\upsilon}{c}$ باتجاه معاكس لجهة الأشعة الساقطة . ومن ذلك يمكن الاستنتاج أنه في حالة الإصدار القسري تحدث عملية اصدار الفوتون بنفس اتجاه الفوتون الوارد من الأشعة الساقطة على الذرة ، وهذه الخاصية هي مبدأ أساسي في عملية تطور الليزر. وكذلك تؤكد الدراسات الكوانتية النظرية أنه في حالة الإصدار القسري تتولد موجة لها نفس خصائص الموجة الواردة من حيث التردد ، اتجاه الانتشار والاستقطابية بالإضافة إلى التوافق في الطور بين أشعة الإصدار القسري والأشعة الواردة بحيث أنه كلما كان التغير في الطور صغيراً كانت الأشعة المترابطة ذات نوعية أفضل .

الفصل الثاني

الخصائص العامة للخطوط الطيفية الليزرية

٢-١- مقدمة:

تتولد أشعة الليزر داخل المادة عند أطوال موجية محددة توافق الأطوال الموجية لخطوط طيف الإصدار المنبعثة من المادة وذلك من أجل الانتقالات بين سويات الطاقة المختلفة ضمن الذرات أو الجزيئات . وبالتالي يعبر الخط الطيفي عن العلاقة التي تربط بين شدة الإشعاع الكهرطيسي المنبعث من المادة كتابع للتردد υ أو للطول الموجي λ وذلك من أجل انتقال محدد بين سويتي طاقة E_1 , E_2 .

عند دراسة الانتقالات التي تتم بين السويات الإلكترونية في الذرات نفترض عادة" أن الخط الطيفي الصادر عن الذرة المثارة يظهر فقط عند تردد معين ووحيد υ يحدد بالعلاقة :

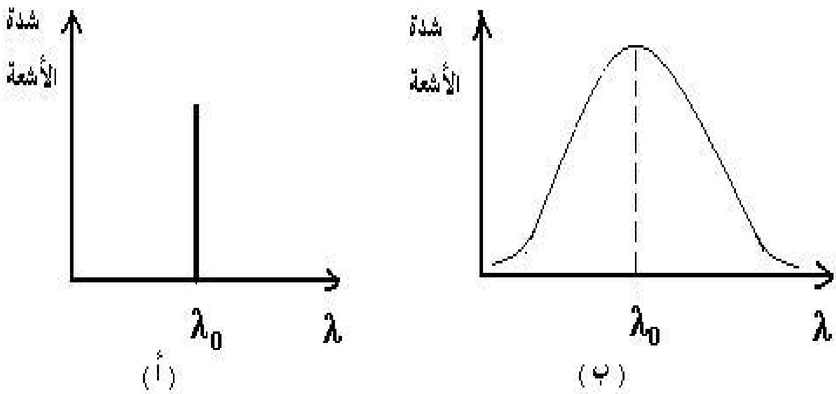
$$E_2 - E_1 = h \cdot \upsilon$$

ولكن في الواقع فان عمليات الإصدار والامتصاص لاتحدثان عند تردد وحيد محدد بدقة إنما يتم ذلك عند حزمة من الترددات القريبة من بعضها البعض لتشكل ما يدعى تعريض الخط الطيفي $\Delta\upsilon$ ، وهذا التعريض في الخطوط الطيفية يعتمد على كثير من العوامل التي سندرسها بالتفصيل .

من المعروف عن أشعة الليزر أنها أشعة وحيدة اللون (*Monochromatic*) ، ويعني هذا المصطلح نظرياً طولاً موجياً محدداً بدقة λ_o ، لذلك عند التعبير بيانياً عن قيمة التغير النظرية في شدة الطيف المنبعث عن انتقال ليزري لإلكترون من سوية E_2 إلى سوية E_1 كتابع للطول الموجي فإنه ينتج خط وحيد يعرف بـالخط الطيفي

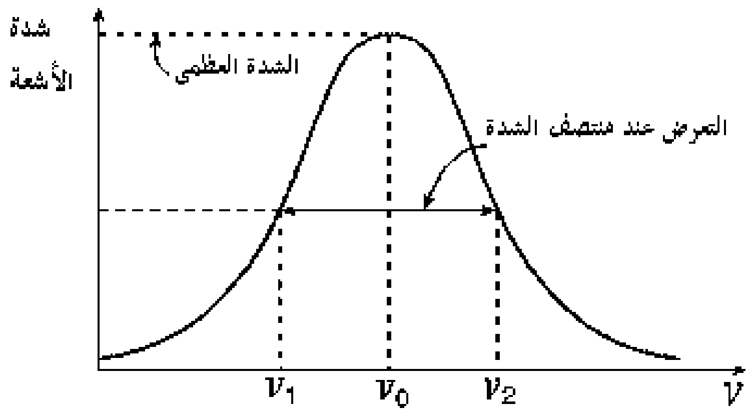
(spectral line)، كما هو موضح بالشكل (**٢-١- أ**)، حيث تكون شدة الأشعة عند الأطوال الموجية $(\lambda < \lambda_o)$ و $(\lambda > \lambda_o)$ مساوية للصفر .

ولكن في الواقع عند رسم طيف الإصدار ، والذي يمثيل العلاقة بـين شـدة الأشعة الصادرة أو المنبعثة من المادة والطول الموجي نلاحظ أن للخطوط الطيفية الناتجة تعريضاً محدداً مقداره $\Delta\lambda$ (أو تعريض في التردد $\Delta\upsilon$) يعرف بالتعريض الطيفـي ***(spectral - linewidth)*** بحيث تكون القيمة العظمى للطول الموجي عنـد λ_o ولكـن يتناقص هذا الطول الموجي في مجال الأطوال الموجية الأصغر والأكبر من λ_o كما هـو موضح بالشكل (**٢-١- ب**).



الشكل(٢-١) يوضح شكل الخطوط الطيفية

ولدراسة شكل وتعريض الخطوط الطيفية الليزرية سوف نعتمد في دراستنا على الطريقة الأكثر شيوعاً ، وهي التعريض عند منتصف قيمة الشدة العظمى والتي توافـق التردد υ. ***(Full Width at Half Maximum)*** والتي يرمز لها اختصاراً ***(FWHM)*** كما هو موضح بالشكل (**٢-٢**).



الشكل(٢-٢) التعريض في الخط الطيفي

هناك عدة عوامل تؤدي إلى تعريض الخطوط الطيفية لأشعة الليزر وبالتالي ينتج لدينا أنواع مختلفة للتعريض منها:

- التعريض الطبيعي ويسمى أحياناً التعريض الناتج عن عمر السوية المثارة.
- تعريض دوبلر وهو تعريض ينتج عن حركة الذرات.
- التعريض التصادمي .

لذلك سنقوم بدراسة كل عامل من هذه العوامل بالتفصيل لتوضيح تـأثيره في الخـط الطيفي .

٢-٢- العرض الطبيعي للخطوط الطيفية *(natural spectral linewidh)*:

لقد اعتبرنا في دراستنا أن سويات الطاقة التي تنتقل بينها الإلكترونـات أثنـاء عملية الامتصاص والإصدار محددة تماماً، أي أن قيمة الطاقة لكل سوية محددة بدقـة ، وهذا يعني أن قيمـة الارتيـاب أو الـشك في تحديـد هـذه القيمـة معدومـةٌ: $(\Delta E_1 = \Delta E_2 = 0)$ ، ولكن هذا يتناقض مع مبـدأ الـشك والارتيـاب لهـايزنبرغ *(Heisenberg)* لأنه وفقاً لهذا المبدأ يجب على الذرة المثارة إلى السوية E_2 أن تبقى في هذه السوية زمناً لانهائياً حتى يكون الارتياب في تحديد قيمة طاقة الـسوية يـساوي

الصفر حيث إن :

$$\Delta E \cdot \Delta t > h$$

$$\Delta E = h \cdot \Delta \upsilon$$

$$\Rightarrow \quad h \cdot \Delta \upsilon \cdot \Delta t > h$$

$$\Delta \upsilon > \frac{1}{\Delta t}$$

أي أنه كلما كان الزمن الذي تقضيه الذرة في السوية المثارة أطول كان التغير في التردد صغيراً. ولكن نعلم أن الزمن الذي تبقى فيه الذرة في الحالة المثارة ذو قيمة محددة ، لأن الذرة إذا أثيرت إلى سوية طاقة ما فسوف تبقى فيها فترة زمنية محـددة ثم تعـود إلى السوية الاساسية بعد أن تصدر طاقة على شكل فوتونات. لذلك وللتغلب على هـذا التناقض بين مبدأ الشك والعمر المحدد لبقاء الذرة في السوية المثارة نفرض أن سويات الطاقة لها عرض طاقي وأن الذرات تتوزع باحتمال أكبر ما يمكن عنـد التـردد υ_o . لذلك تكون احتمالات الانتقالات عند ترددات أصغر أو أكبر مـن υ_o صـغيرة لأن احتمال توزع الذرات يكون في منتصف حزمة سوية الطاقة أكبر ما يمكن .

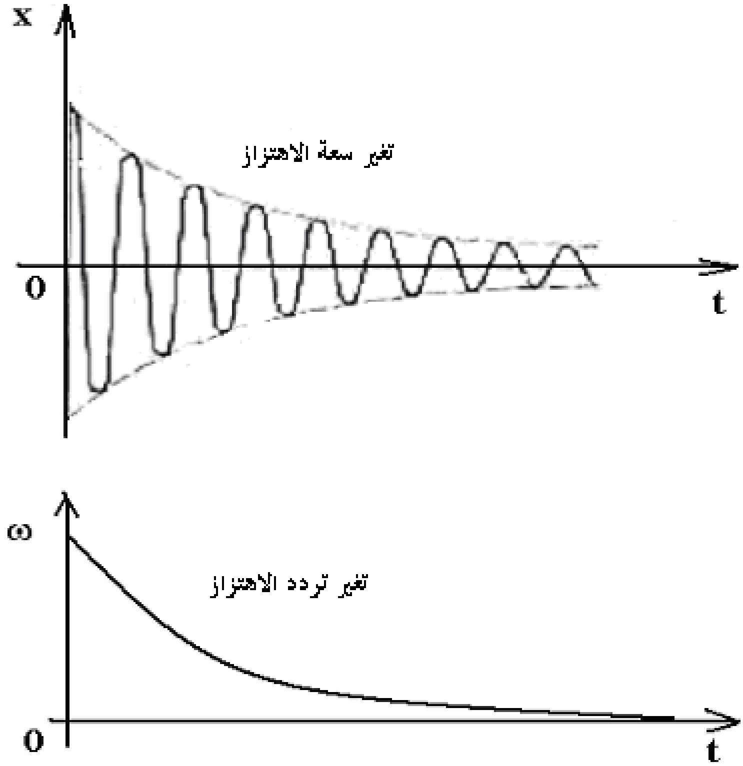
لذلك نأخذ متوسط عمر السوية τ كمقياس للارتياب في الزمن Δt . يقدر عادة تعريض الخط الطيفي الطبيعي لسوية طاقية i بالمعادلة التالية :

$$\Delta \upsilon_i = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_i}$$

حيث يكون عرض السوية الأساسية $(\Delta \upsilon_i = ٠)$ لأن عمر الحالة لهذه السوية يكـون كبيراًجداً $(\tau_i = \infty)$ ، بينما تمتلك سويات الطاقة المثارة متوسط عمر للحالـة المثـارة ضمن المجال $(١٠^{-٩} Sec - ١٠^{-٦})$.

ولإثبات أن التعريض الطبيعي للخط الطيفي محققاً للعلاقة السابقة نتبع الطريقة التالية، نفترض أنه لدينا جسيم مشحون بشحنة سالبة مثلاً (إلكترون) ومعلق بواسطة نابض ، فعند إزاحة هذا الجسيم عن وضع التوازن بمقدار x سوف يهتز بتردد زاوي

قدره ω ، ونتيجة لهذا الاهتزاز سوف ينطلق اشعاع كهرطيسي وذلك وفق قـوانين الالكتروديناميك التي تنص على أن الشحنة المتسارعة تطلق أشعة كهرطيسية . وبما أن الجسيم مرتبط بالنابض فإنه سوف يلاقي إعاقة تعمل على إخماد الحركـة الاهتزازيـة لتصبح حركة متباطئة وتتناقص سعة الاهتزاز كما هو موضح بالشكل (**٢-٣**).



الشكل(٢-٣) تغير سعة الحركة الاهتزازية للإلكترون

كما يمكن وصف حركة الجسيم المشحون باستخدام معادلة الحركة الاهتزازية التوافقية المتخامدة :

$$\frac{d_2 x}{dt^2} + \gamma \cdot \frac{dx}{dt} + \omega_o^2 \cdot x = 0 \qquad (٢-١)$$

حيث تقبل هذه المعادلة حلاً من الشكل :

$$x = a_0 \cdot e^{-\frac{\gamma \cdot t}{2}} \cdot \cos \omega_0 . t \qquad (٢-٢)$$

نفرض أن :

$$a_{(t)} = a_0 \cdot e^{-\frac{\gamma \cdot t}{2}} \qquad (٢-٣)$$

حيث إن : $\omega_o = ٢\pi\upsilon_o$ التردد الزاوي .

γ : معامل تخامد الحركة الاهتزازية وواحدته مقلوب الزمن (Sec^{-1})؛

أي أن $(\gamma = ١/\tau)$.

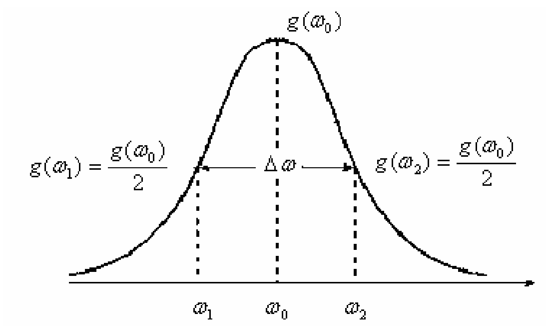
لذلك يمكن كتابة المعادلة X بصورة مشابهة لمعادلة الحركة التوافقية البسيطة بعد الأخذ بعين الاعتبار أن سعة الاهتزازة $a_{(t)}$ هي تابع أسي للزمن :

$$x = a_{(t)} \cdot \cos \omega_0 . t \qquad (٢-٤)$$

وباستخدام تحليل فورييه *(Fourier analysis)* نحصل على تابع توزع الترددات الـذي يعطي احتمال وجود تردد ω وذلك وفق المعادلة :

$$g_{(\omega)} = \frac{\frac{\gamma}{2\pi}}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2} \qquad (٢-٥)$$

الذي يمكن تمثيله بيانياً بالشكل (**٢-٤**).



الشكل(٢-٤) تابع توزع الترددات

حيث يوضح الشكل أن أكبر احتمال لحدوث الإصدار هو عند التـردد ω_o وذلك لأن شدة الإصدار I_o تكون أكبر ما يمكن عند هذا التردد ، وأن الاحتمـال يقل كلما ابتعدنا عن ω_o .

وبالتالي تكون قيمة $g_{(\omega o)}$ الموافقة $\omega = \omega_o$ هي:

$$\omega = \omega_0 \quad \Rightarrow \quad g_{(\omega_0)} = \frac{2}{\pi \cdot \gamma} \qquad (٢-٦)$$

أما قيمة تابع توزع الترددات $g_{(\omega)}$ عند منتصف الشدة العظمى أي عند التـرددات الموافقة $\omega_١$ و $\omega_٢$ فتكون :

$$g_{(\omega_1)} = g_{(\omega_2)} = \frac{1}{2} g_{(\omega_0)} = \frac{1}{\pi \cdot \gamma} \qquad (٢-٧)$$

ومن العلاقة (**٢-٥**) نحصل على تابع توزع الترددات عند منتصف الشدة :

$$g_{(\omega_1)} = g_{(\omega_2)} = \frac{\frac{\gamma}{2\pi}}{(\delta\omega)^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2} \qquad (٢-٨)$$

حيث إنّ :

$$\delta\omega = |\omega_1 - \omega_0| = |\omega_2 - \omega_0|$$

وبمقارنة العلاقتين (**٢-٧**) و(**٢-٨**) مع بعضهما البعض نستنتج أن:

$$\delta\omega = \frac{\gamma}{2} \qquad (٢-٩)$$

ومن الشكل السابق يمكن أن نستنتج أيضاً أن التعريض في التردد عند منتصف الشدة العظمى يساوي :

$$\Delta\omega_{(FWHM)} = 2\delta\omega = \gamma \qquad (٢-١٠)$$

وبما أن :

$$\Delta\omega = 2\pi \cdot \Delta\upsilon$$

$$\Rightarrow \quad \Delta\upsilon = \frac{\gamma}{2\pi}$$

وكنا قد اعتبرنا أنّ : $\gamma = \frac{1}{\tau}$

$$\Delta\upsilon = \frac{1}{2\pi \cdot \tau}$$

نعوض عن قيمة γ بدلالة $\Delta\omega$ في العلاقة(**٥-٢**) فنجد أن:

$$g_{(\omega)} = \frac{\frac{\Delta\omega}{2\pi}}{(\omega_1 - \omega_0)^2 + \left(\frac{\Delta\omega}{2}\right)^2} \qquad (٢-١١)$$

ويمكن أن نعوض عن ω بدلالة التردد υ فنحصل على :

$$g_{(\upsilon)} = \frac{\frac{\Delta\upsilon}{2\pi}}{(\upsilon_1 - \upsilon_0)^2 + \left(\frac{\Delta\upsilon}{2}\right)^2} \qquad (٢-١٢)$$

وهذه المعادلة هي عبارة عن تابع لورنتز.

نستنتج من ذلك أن عرض الخط الطيفي وشكله ليس ثابتاً ، ويتغير بشكل عام وذلك حسب العوامل المؤثرة على الذرات أثناء عملية الإصدار الضوئي، ويمكن تمثيل شكل هذا التعريض للخط الطيفي بواسطة تابع لورنتز ، وبالتالي يمكن الحصول علـى القيمة العظمى I_o لشدة الأشعة الصادرة من أجل $(\upsilon = \upsilon_o)$ وعرضه الموافق لنـصف قيمة الارتفاع $\Delta\upsilon$.

٢-٣- تأثير مفعول دوبلر على عرض الخطوط الطيفية:

كما نعلم أن ظاهرة دوبلر هي تغير في التردد المقاس نتيجة الحركة النسبية لمنبع الترددات والمراقب وكمثال على ذلك الصوت الذي نسمعه عند مرور سيارة مسرعة

بالقرب منا، فعندما يتحرك منبع الترددات باتجاه المراقب الثابت في نقطة فإن التردد المقاس يزداد وعندما يبتعد منبع الترددات عن المراقب يصبح التردد المقاس أقل من تردد المنبع. وبما أن ذرات وجزيئات الوسط الفعال عندما يكون في الحالة الغازية ، تكون في حركة دائمة نتيجة لاكتسابها طاقة حرارية من الوسط الخارجي، لذلك تحدث أيضاً ظاهرة دوبلر للذرات المثارة التي تصدر أشعة كهرطيسية ، لذلك فان المطياف (*Spectrometer*) الذي يستخدم لقياس الترددات الصادرة عن الذرات المتحركة سوف يقيس ترددات مختلفة في حالة إذا كانت الذرات مقتربة من المطياف أو إذا كانت مبتعدة عنه ، والترددات المقاسة تتعلق بالسرعة النسبية للذرات بالنسبة للمطياف وذلك وفق معادلة دوبلر التالية :

$$\upsilon = \upsilon_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right) \qquad (٢-١٣)$$

حيث : υ تردد دوبلر المقاس.

υ_o تردد المنبع .

v سرعة الذرات .

c سرعة الضوء .

وبما أنه يمكن التمييز إحصائياً بين مجموعة من الذرات وفقاً لسرعاتها ، فلو اختلفت مجموعة في سرعتها فإن الترددات الصادرة عنها سوف تكون مختلفة وبالتالي نستطيع تمييز الترددات نتيجة لاختلاف السرعات. وبالاعتماد على النظرية العامة للغازات فان احتمال انتماء ذرة إلى مجموعة من الذرات سرعتها تنحصر في المجال v و $v+dv$ يمكن إيجاده من توزع ماكسويل- بولتزمان:

$$g_{(v)} = \frac{dN}{N} = \sqrt{\frac{m}{2\pi \cdot K \cdot T}} \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2K.T}} \cdot dv \qquad (٢-١٤)$$

حيث إن : dN عدد الذرات التي تمتلك سرعات محصورة بين v و $v+dv$.

N عدد الذرات الكلي .

m كتلة الذرة .

T درجة الحرارة المطلقة .

K ثابت بولتزمان .

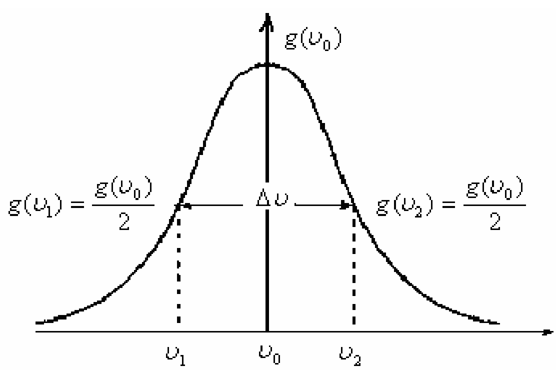
وبما أن الترددات الصادرة عن الذرات المثارة نتيجة للانتقال بين مستويي الطاقة E_2 و E_1 سوف تكون مرتبطة بسرعة هذه الذرات ، لذلك سنقوم انطلاقاً من علاقة دوبلر بإيجاد العلاقة بين السرعة v والتردد υ :

$$v = c\left(\frac{\upsilon - \upsilon_0}{\upsilon_0}\right) \quad \Rightarrow \quad dv = \frac{c}{\upsilon_0} \cdot d\upsilon$$

نعوض قيمة v و dv في المعادلة (**٢-١٤**) فنحصل على :

$$g_{(\upsilon)} = \frac{c}{\upsilon_0} \cdot \sqrt{\frac{m}{2\pi \cdot K \cdot T}} \cdot e^{-\frac{m \cdot c^2 \cdot (\upsilon - \upsilon_0)^2}{2K \cdot T \cdot \upsilon_0^2}} \cdot d\upsilon \qquad (٢-١٥)$$

وهذه المعادلة تمثل تابع غاوص (*Gaussian Function*) والتي تعطي التعريض في الخط الطيفي الناتج عن ظاهرة دوبلر والشكل (**٢-٥**) يمثل هذا التعريض.



الشكل (٢-٥) التعريض الطيفي الناتج عن مفعول دوبلر

وعندما يكون: $\upsilon=\upsilon_o$ فانّ:

$$g_{(\upsilon 0)}=\frac{c}{\upsilon_0}\cdot\sqrt{\frac{m}{2\pi\cdot K\cdot T}}\cdot d\upsilon \qquad (٢-١٦)$$

وعندما تكون $\upsilon=\upsilon_١$:

$$g_{(\upsilon_1)}=\frac{c}{\upsilon_0}\cdot\sqrt{\frac{m}{2\pi\cdot K\cdot T}}\cdot e^{-\frac{m\cdot c^2\cdot(\upsilon_1-\upsilon_0)^2}{2K\cdot T\cdot\upsilon_0^2}}\cdot d\upsilon \qquad (٢-١٧)$$

بتقسيم المعادلة (**٢-١٧**) على المعادلة (**٢-١٦**) نحصل على :

$$\frac{g_{(\upsilon_1)}}{g_{(\upsilon_0)}}=\frac{1}{2}=e^{-\frac{m\cdot c^2\cdot(\upsilon_1-\upsilon_0)^2}{2K\cdot T\cdot\upsilon_0^2}} \qquad (٢-١٨)$$

للتخلص من التابع الأسي نأخذ لوغاريتم الطرفين فنحصل على المعادلة التالية :

$$Ln\,2=\frac{m\cdot c^2}{2K\cdot T}\cdot\left(\frac{\upsilon_1-\upsilon_0}{\upsilon_0}\right)^2 \qquad (٢-١٩)$$

$$\Rightarrow\quad \frac{\upsilon_1-\upsilon_0}{\upsilon_0}=\sqrt{\frac{2K\cdot T\cdot Ln\,2}{m\cdot c^2}} \qquad (٢-٢٠)$$

ومن الشكل نلاحظ أن :

$$\upsilon_1-\upsilon_0=\frac{\Delta\upsilon}{2}$$

$$\Rightarrow\quad \frac{\Delta\upsilon}{2\upsilon_0}=\sqrt{\frac{2K\cdot T\cdot Ln\,2}{m\cdot c^2}}$$

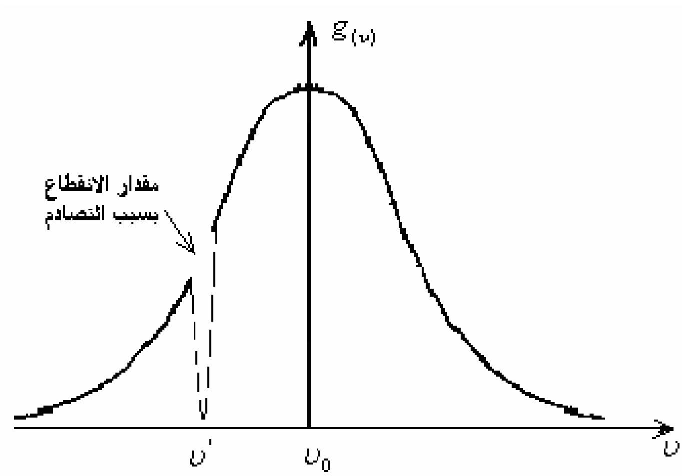
$$\Rightarrow\quad \Delta\upsilon=2\upsilon_0\cdot\sqrt{\frac{2K\cdot T\cdot Ln\,2}{m\cdot c^2}} \qquad (٢-٢١)$$

نلاحظ من هذه العلاقة أن التعريض يتناسب طرداً مع التردد الأساسي υ_o للاشعاع الصادر ، فنستنتج من ذلك أن ظاهرة دوبلر تؤثر على الأشعة الصادرة ذات الترددات الكبيرة مثل الإشعاع الكهرطيسي في مجال اللون اليزرق وما فوق أما في مجال الأشـعة

ذات الترددات الصغيرة أي في مجال اللون الأحمر وما دون فان ظاهرة دوبلر لاتلعب دوراً هاماً في التعريض ، كما أن التعريض الناتج عن ظاهرة دوبلر يزداد بازدياد درجة الحرارة ويتناقص مع تناقص كتلة الذرات.

٢-٤- زيادة العرض نتيجة لتصادم الذرات:

تؤدي الحركة العشوائية للذرات إلى تصادمات بين بعضها البعض مما يسبب تعريض في الخطوط الطيفية يدعى التعريض التصادمي حيث يتسبب في انقطاع قطار الأمواج المنبعث من الذرة المثارة كما في الشكل (**٢-٦**)، وهذا الانقطاع يدوم لفترة قصيرة جداً من مرتبة $(10^{-13}\ Sec)$.



الشكل (٢-٦)

وتكون المحصلة النهائية لهذه التصادمات هو اتساع في مجال الترددات الصادرة عن الذرات المتصادمة حول التردد الأساسي υ_o وفي هذه الحالة فإن التابع الذي يعطي شكل الخط الطيفي هو :

$$g_{(\upsilon)} = \frac{\dfrac{\Delta\upsilon}{2\pi}}{(\upsilon-\upsilon_0)^2 + \left(\dfrac{\Delta\upsilon}{2}\right)^2} \qquad (٢-٢٢)$$

وبالتالي فإن التعريض الناتج عن التصادمات يعطى بالعلاقة:

$$\Delta\upsilon = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_c} \qquad (٢-٢٣)$$

حيث : τ_c يمثّل الزمن الفاصل بين التصادمات .

والشرط الأساسي لهذا التابع هو أن يكون الزمن بين التصادمات τ_c أكبر بكثير من زمن التصادم نفسه t_c أي أن : $\tau_c >> t_c$. و يعتبر هـذا الـشرط صحيحاً عندما تكون السرعة النسبية للجسيمات المتصادمة كبيرة جداً بحيث ينتج عن تصادمها عندئذٍ فعلاً متبادلاً قوياً إذا أخذنا بعين الإعتبار وجهة النظر الكوانتية ، أو أن ينتج عن التصادم تغير في طور الاهتزازات من وجهة النظر الكلاسيكية .

كما أن هذا التعريض الذي تسببه التصادمات يلعب دوراً أساسـياً في تحديـد عرض الخطوط الطيفية ، وذلك لكل من خطوط الامتصاص أو خطـوط الإصـدار للمواد المختلفة . ويأخذ هذا التعريض اشكالاً مختلفة وفقاً للشروط التي تتواجد فيها الجسيمات المتصادمة أو لنوع التصادمات (مرنة أو لامرنة) .

فعندما يكون التصادم بين الجسيمات من النوع اللامرن الذي يؤدي إلى انتقال الذرة من سوية طاقة مثارة إلى سوية طاقة أدنى انتقالاً غير مشع ، فإن ذلك يساهم في تقصير العمر الوسطي للسوية المثارة ، وهذا بدوره يؤدي إلى ازدياد عـرض الخـط الطيفي . أيضاً في حالة التصادم المرن حيث تحتفظ الذرة بطاقتـها الداخليـة بعـد الاصطدام يطرأ ازدياد في عرض الخط الطيفي . ولكن هناك صعوبات كـبيرة عنـد المعالجة النظرية لهذا التعريض بسبب التعقيدات في دراسة عمليات التآثر المتبادل بـين الذرات المتصادمة ، والتي تكون متغيرة مع الزمن أثناء عملية التصادم نفسها .

ولحل هذه المشكلة هناك نظريتان تكملان بعضهما البعض وتعتمـدان علـى الطرق التقريبية ، كما أنهما توافقان حالتين حديتين للتآثر المتبـادل همـا : نظريـة الضربات التي تستخدم في دراسة حالة التآثر المتبادل اللحظي بين الذرات المتـصادمة، والنظرية الإحصائية في حالة التآثر المتبادل الإحصائي بين الذرات المتصادمة .

ان العوامل السابقة تؤثر كثيراً في شكل الخطوط الطيفية الصادرة عن الـذرات المثارة حتى عندما تكون هذه الذرات معزولة عن بعضها البعض ، ولكـن في حالـة الغازات ذات الضغوط العالية وكذلك الأجسام الصلبة نجد أن هناك ظاهرتين يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار أيضاً:

- الفعل المتبادل بين الذرات مع بعضها البعض الذي يؤدي إلى تعريض سويات الطاقة.
- عدم خضوع جميع ذرات الوسط لنفس الشروط ويعود ذلك إمـا لتـشوه الشبكة البلورية للجسم الصلب أو لاختلاف تركيب الجسم من نقطـة إلى أخرى.

٢-٥- العرض المتجانس والعرض غير المتجانس للخطوط الطيفية

(homogeneous and inhomogeneous broadening)

وانطلاقاً من الدراسة السابقة والأنواع المختلفة من التعريض في الخطوط الطيفية يمكن تقسيم هذا التعريض إلى نوعين :

- **العرض المتجانس**: ***(Homogenous Broadening)*** مثل التعريض الطبيعـي ، والتعريض الناتج عن التصادمات بين الذرات مع بعضها الـبعض ، أو مـع الشوارد ، أو مع الإلكترونات الحرة ، أو مع جدران الوعاء و كذلك تفاعل الذرة مع فونونات الشبكة البلورية في حالة الأجسام الصلبة . ويوصف شكل

الخطوط الطيفية في هذه الحالة بواسطة تابع لورنتز الذي يعطى بالصيغة :

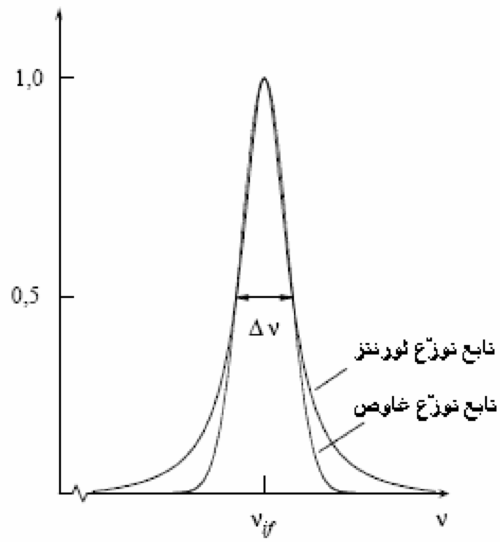
$$g(\omega-\omega_0)=\frac{2}{\pi\cdot\Delta\omega_0}\cdot\frac{1}{1+\frac{(\omega-\omega_0)^2}{\left(\frac{\Delta\omega_0}{2}\right)^2}} \qquad (٢-٢٤)$$

- **العرض غير المتجانس:** *(Non-homogenous Broadening)* مثل التعـريض الذي ينتج عن مفعول دوبلر ، وكذلك التعريض الذي يتم بسبب الشوارد في الشبكات البلورية الشاردية أو الزجاجية حيث تسبب هذه الـشوارد توليـد حقول كهربائية وتختلف هذه الحقول من شاردة إلى أخرى، ووفقاً لمفعول- شتارك ، تنتج التغيرات الموضعية في الحقل الكهربائي تغـيرات في سـويات الطاقة وبالتالي تغير في ترددات الانتقالات بين هذه السويات. ويوصف شكل الخطوط الطيفية في هذه الحالة بواسطة تابع غاوص الذي يعطى بالصيغة:

$$g(\omega-\omega_0)=\frac{2}{\Delta\omega_0}\cdot\left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\cdot\exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{\left(\frac{\Delta\omega_0}{2}\right)^2}\cdot\ln 2\right] \qquad (٢-٢٥)$$

والشكل (**٢-٧**) يوضح الفرق بين التعريض الناتج عن تابع توزع لورنتز وتابع توزع غاوص.

وذلك لأنه في حالة تعريض دوبلر يمكننا التمييز بين مجموعة من الذرات وأخرى وذلك حسب سرعتها وهذا مالاحظناه من معادلة ماكـسويل- بولتزمـان لتـوزع السرع. أما في حالة التعريض التصادمي والتعريض الطبيعي لايمكن التمييز بين مجموعة وأخرى.



الشكل (٢-٧)

وفي حالة التعريض غير المتجانس فان التضخيم الليزري يحدث بواسطة مجموعة محددة من الذرات فقط، أما في حالة التعريض المتجانس فإن الذرات كلّها تشارك في عمليـة التضخيم الليزري وهذا ماسنراه لاحقا.

الفصل الثالث
شروط توليد أشعة الليزر

٣-١- لمحة تاريخية عن الليزر:

تعتبر تقانات الليزر من العلوم المتطورة التي أخذت طريقها بسرعة كبيرة إلى العديد من التطبيقات في مجالات الحياة المختلفة ، مثل استخدام الليزر في التطبيقات الطبية والاتصالات وكذلك في الأبحاث العلمية والهندسية والعسكرية.

الليزر هو جهاز يعمل على تضخيم الطاقة المقدمة إليه من مصادر مختلفة ومن ثم إصدارها على شكل إشعاع كهرطيسي بأطوال موجية محددة ، وهو يتألف من وسط ليزري فعال *(Laser active medium)* ، ومن مجاوبة ضوئية "مرنان" *(Resonator)* بالإضافة إلى وسيلة ضخ *(Pumping)* . وهذا تعريف بسيط يمكن من خلاله البدء في الموضوع وتوضيح فكرة عمل الليزر ، حيث أننا في النهاية نحصل على شعاع ضوئي له العديد من الخواص الفيزيائية الفريدة التي تميزه من أي مصدر ضوئي آخر.

استقَت كلمة الليزر (*LASER*) من الأحرف الأولى للكلمات اللاتينية التي تعبر عن فكرة عمل الليزر: تضخيم الضوء بواسطة الإصدار القسري : ***Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation***.

وكان العالم أينشتاين *(Einstein)* في عام **١٩١٧** أول من وضع الأساس النظري لعملية الإصدار القسري *(stimulated emission)* التي تعتبر شرطاً أساسياً من شروط توليد الليزر.

لم يكن اكتشاف أشعة الليزر وليد مصادفة أو نتيجة عمل فردي . فلقد تعاقبت بحوث كثيرة وتداخلت خلال أعوام طويلة من الجهود المتنوعة في بلدان مختلفة، فجاء

هذا الاكتشاف حصيلة جهد بشري مشترك قام به علماء نظريون وآخرون تجريبيـون حيث ساهم كل منهم بنصيب معين . فأشعة الليزر نشأت عن تطوير فكرة المايزر التي اقترحها العالم تاونز (*Townes*) في عام **١٩٥١** والمايزر يعني تضخيم الأمواج المايكروية بواسطة الإصدار القـسري للأشـعة ***(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)*** ومنذ ذلك الحين اعتبر المايزر شيئاً معروفـاً فاسـتعمل في مجالات الرادار والراديو.

وفي عام **١٩٥٨** اقترح العالمان تاونز و شاولو ***(Townes and Schawlow)*** ايجاد مايزر جديد من نوعه يعمل في منطقة الترددات الضوئية للطيف الكهرطيسي. واعتماداً على ذلك تم تصميم أول جهاز ليزر في عام **١٩٦٠** من قبل العالم مايمان ***(Maiman)*** حيث استخدم بلورة الياقوت الأحمر وبالتالي كان أول ليزر هو ليزر اليـاقوت ***(Ruby-Laser)*** ومنذ ذلك التاريخ أصبح العالم بأسره يهتم بهذا المنبع غير التقليدي للـضوء الذي ساهم بفتح المجال واسعاً لتطوير العلوم والتقانات في كافة المجالات والتي تعتمـد بشكل مباشر أو غير مباشر على أشعة الليزر وتطبيقاتها . كما شمل التطوير أيضاً فيزياء الليزر وأجهزة الليزر .

يمتلك شعاع الليزر خصائص تميزه من أي مـصدر مـن مـصادر الإشـعاع الكهرطيسي، ومن هذه الخصائص أن الليزر أحادي اللون ***(Monochromaticity)*** أي أن له طول موجة وحيداً وهذا مايميزه من الضوء العادي، حيث أنه بتحليـل الـضوء الأبيض الصادر عن الشمس أو من مصباح ضوئي مثلاً نلاحظ إنه يحتوي على العديد من الأطوال الموجية ، كما هو واضح عند تحليل الضوء باستخدام الموشور.

كما أن شعاع الليزر يتصف بأن له اتجاهاً وحيداً ***(Directionality)*** بحيود مهمـل بالمقارنة مع الضوء الصادر عن مصباح كهربائي حيث إن الضوء ينبعـث في كافـة الاتجاهات وبحيود كبير.

بالإضافة إلى ذلك تتميز أشعة الليزر بخاصية الترابط ***(Coherence)***، وهذا يعني

أن هنالك علاقة ثابتة في فرق الطور بين الأمواج المتداخلة مما يؤدي إلى تداخل بناء ، ويمكن تمييز نوعين من الترابط : ترابط زماني ***(Time Coherence)*** وترابط مكـاني ***(Space Coherence)*** .

ومن أجل دراسة فيزياء الليزر و خصائص الأشعة الليزريـة تعتبـر مفـاهيم الالكتروديناميك في صيغته الكلاسيكية أو الكوانتية من الناحيـة النظريـة المـدخل الأساسي لوصف حقل الإشعاع،وكذلك مفاهيم الميكانيك الكوانتي لوصف الذرات . ووفقا لطريقة الدراسة يمكن فهم العمليات الفيزيائية التي تؤدي إلى فعل الليزرة ، ومن ثم الخصائص المختلفة لأشعة الليزر ، وهنا يمكننا التمييز بين عدة نظريات وهي :

- **النظرية الكلاسيكية** : و تعتمد هذه الطريقة على معادلات النـسبة حيث يتم وصف حقل الإشعاع بواسطة عدد الفوتونات واحتمـال الانتقالات ، والمنظومة الذرية بواسطة عدد الإلكترونات في السويات الإلكترونية المختلفة ، ومن ذلك يمكن استنتاج شرط العتبة ، شـدة الأشعة الليزرية وكذلك ديناميكية العمليات الـتي تـؤدي إلى فعـل الليزرة.
- **النظرية نصف الكلاسيكية** : وتعتمد على وصف حقـل الإشـعاع بواسطة الالكتروديناميك الكلاسيكي انطلاقا من معادلات ماكسويل للحقول الكهرطيسية وتوصف المنظومة الذريـة وفقـا للميكانيـك الكوانتي وبذلك نحصل على معلومات إضافية تتعلق بالطور والتردد ، وتلاقي هذه النظرية استخداما واسعا في حالة الليزرات الغازية.
- **النظرية الكوانتية** : وتعتمد على وصف حقل الإشـعاع وكـذلك المنظومة الذرية بواسطة النظرية الكوانتية حيث يمكن بهـذه الطريقـة دراسة تعريض الخطوط الطيفية وكذلك التغيرات في التـردد (وفقـا لنظرية الاضطراب) وهذا كله يستند بشكل كـبير علـى الدراسـة

الاحصائية للفوتونات . ولقد استبدلت هذه النظرية في كثير من الأحيان بالنظرية الكلاسيكية أو النظرية نصف الكلاسيكية.

كما أن حقل الإشعاع الليزري يتألف من اهتزازة واحدة أو أكثر (إنماط) والتي يمكن وصفها أو تمييزها بواسطة ترددها ، شدتها (عدد الفوتونات) أو استقطابها. وفي هذه الحالة يتحدد التردد وفقا لنوعية الوسط الليزري الفعّال والمرنان ، بينما الشدة تتحدد وفقا لحالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة وكذلك باحتمال الانتقالات التي تحدث بين السويات الإلكترونية التي تشكّل كلا من السوية الليزرية العليا وكذلك السوية الليزرية السفلى .

وفي دراستنا لفيزياء الليزر سوف نعتمد اعتماداً أساسياً على النظرية الكلاسيكية لأنها تشرح شروط ومبادئ عمل الليزر بطريقة سهلة ومبسطة.

٣-٢- انعكاس إسكان سويات الطاقة : *(Population Inversion)*

تعتبر عملية انعكاس إسكان سويات الطاقة شرطاً أساسياً من شروط حدوث عملية الإصدار القسري واللازمة بدورها من أجل تضخيم الأشعة الكهرطيسية ومن ثم الحصول على أشعة الليزر . وانعكاس إسكان سويات الطاقة هي عملية توزيع جديدة لذرات مادة الوسط الليزري الفعال على سويات الطاقة العليا والتي تختلف عن التوزيع في حالة التوازن الحراري *(thermal equilibrium)* والذي يمكن وصفه احصائياً بالاعتماد على توزع ماكسويل- بولتزمان. ولتوضيح عملية انعكاس إسكان سويات الطاقة لابد من شرح توزيع الذرات على سويات الطاقة في حالة التوازن الحراري ومإذا يحصل لها عند الانزياح عن حالة التوازن بعد اعطاء طاقة لهذه الذرات .

بالاعتماد على مبادئ الترموديناميك نعلم أنه إذا كان لدينا مجموعة احصائية من الذرات في حالة توازن حراري مع الوسط المحيط عند درجة الحرارة T فان هذه

الذرات سوف تتوزع على سويات الطاقة بعدد محدد بما يتناسب مـع طاقـة هـذه السويات. فإذا كان (N_i) عدد إسكان السوية i يمثل عدد الذرات التي تتواجـد في السوية ذات الطاقة E_i ، وبالتالي فان معادلة بولتزمان ***(Boltzmann equation)*** تحدد العلاقة بين عدد الذرات في سوية طاقة محددة ودرجة الحرارة المطلقة كما يلي :

$$N_i = const \cdot e^{-\frac{E_i}{KT}} \qquad (٣-١)$$

حيث : $K=١،٣٨,١٠^{٢٣}$ *joul/K°* ثابت بولتزمان.

E_i سوية الطاقة i حيث $i=١, ٢, ٣,....$ وليست بالضرورة السوية الأساسـية أي أن: $E_i > E_{i-١}$.

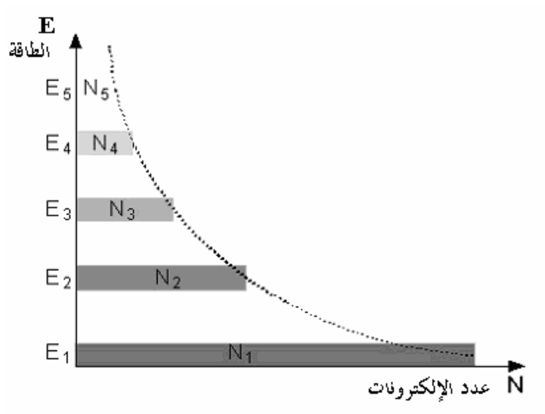
T درجة الحرارة المطلقة .

const : عبارة عن ثابت التناسب، وهذا الثابت يفقد أهميته عندما ندرس تـوزع الذرات على سوية طاقة محددة بالنسبة إلى توزع الذرات علـى سـوية طاقـة أخرى. وهو يعبر بشكل عام عن تعدد أو تحلّل السوية .

إذا نلاحظ من علاقة بولتزمان أنه كلما كانت درجة الحرارة T مرتفعة كان عـدد السكان سوية الطاقة N_i كبيراً ومن جهة أخرى كلما كانت سوية الطاقة E_i عالية كان عدد السكان هذه السوية منخفضاً.

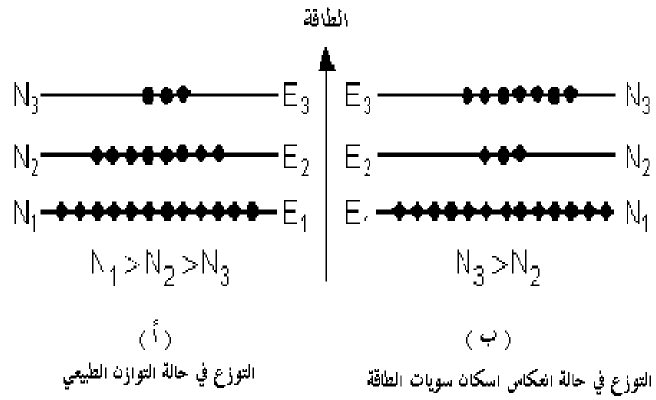
وبشكل عام تكون كل الذرات عند درجات الحرارة المنخفضة في السوية الأساسـية ومع ازدياد درجة الحرارة تثار هذه الذرات من السوية الأساسية إلى سويات الطاقـة الأعلى ونحصل بذلك على توزع جديد للذرات على سويات الطاقة وهـذا التـوزع خاضع لقانون ماكسويل- بولتزمان الإحصائي عند حالة التوازن الحراري .

والشكل **(٣-١)** يبين عدد السكان سويات الطاقة في كل سوية في حالة التوازن الحراري.



الشكل(٣-١) توزّع الإلكترونات على سويات الطاقة في حالة التوازن الحراري

إذا نستنتج مما سبق أن علاقة بولتزمان تبين أن عدد إسكان سـويات الطاقـة المختلفة هو ......$N_1>N_2>N_3$ أي أن عدد إسكان سويات الطاقة العالية يكون دائماً أقل من عدد إسكان سويات الطاقة المنخفضة وهذا يوافق حالة الإسـكان الطبيعـي للذرات على سويات الطاقة . فعند إعطاء طاقة إلى مجموعة من الذرات فإننا نحـصل على انزياح عن وضع التوازن لتوزع الذرات على سويات الطاقة وينتج توزع جديد يكون فيه عدد الذرات N_3 في السوية E_3 مثلاً أكبر من عـدد الـذرات N_2 في السوية E_2 وهذه العملية تدعى انعكاس إسكان سويات الطاقة وهذا يمكن توضيحه بالشكل(**٣-٢**) .



الشكل (٣-٢)

والعملية التي نحصل بواسطتها على انعكاس إسكان سويات الطاقة تدعى عملية الضخ الضوئي وهذا ما سنراه لاحقاً .

أما عند دراسة التوزع النسبي $\frac{N_2}{N_1}$ للذرات على سويتي الطاقة E_2 و E_1 فإننا نحصل على :

$$N_1 = const \cdot e^{-\frac{E_1}{KT}} \qquad \& \qquad N_2 = const \cdot e^{-\frac{E_2}{KT}}$$

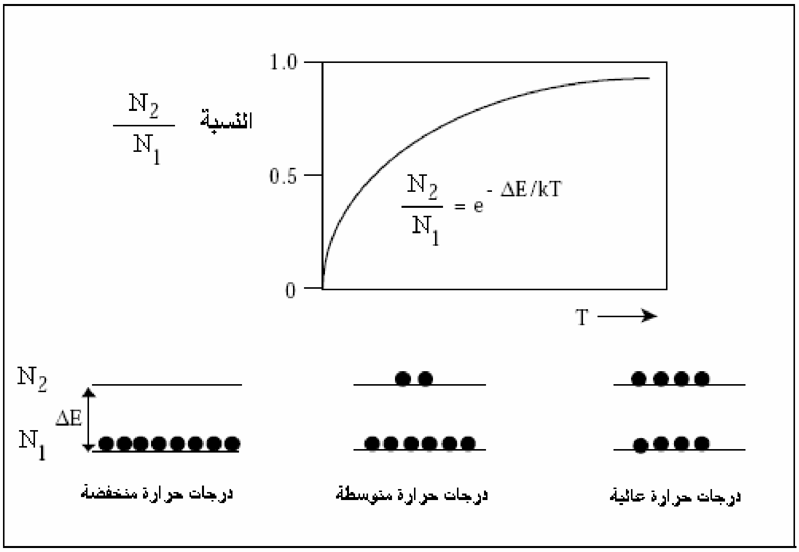
$$\Rightarrow \quad \frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{(E_2-E_1)}{KT}} \qquad (٣-٢)$$

من علاقة التوزع النسبي نستنتج أن النسبة $\frac{N_2}{N_1}$ لاتتعلق بمقدار طاقة كل سوية على حدة وإنما تتعلق بفرق الطاقة بين السويتين $(E_2 - E_1)$ أي أنه يمكن القول :

- يكون التوزع النسبي $\frac{N_2}{N_1}$ كبيراً كلما كانت درجة الحرارة مرتفعة، إذا كان الفرق بين طاقة السويتين $(E_2 - E_1)$ ثابتاً ومحدداً .
- يمكن أن يأخذ التوزع النسبي $\frac{N_2}{N_1}$ القيم المحصورة بين ٠ و ١ .

وهذا التوزع النسبي وعلاقته بدرجة الحرارة موضح بالشكل **(٣-٣)**.

إنّ عملية الضخ هي الوسيلة الليزرمة لنقل أكبر عدد ممكن من الذرات من مستواها الأساسي إلى المستوى المثار والذي تنطلق منه عملية الإصدار القسري لتوليد أشعة الليزر ، كما تؤمن عملية الضخ استمرارية حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة . وتتم عملية الضخ من خلال إعطاء طاقة خارجية من مصادر مختلفة إلى الذرات ، لذلك سوف نستعريض أهم عمليات الضخ في نهاية هذا الفصل .



التغيّر النسبي لإسكان سويات الطاقة كتابع لدرجة الحرارة

الشكل (٣-٣)

٣-٣- الامتصاص ومعامل الربح الصغير: *(small signal Gain Coefficient)*:

تؤدي عملية امتصاص فوتون من قبل ذرة إلى تغير في حالة الذرة من ذرة مستقرة إلى ذرة مثارة بطاقة تساوي طاقة الفوتون الذي امتصته، هذا ما يحدث بالنسبة إلى ذرة مفردة ولكن إذا أخذنا بعين الاعتبار الحالة الماكروسكوبية والتي توافق حالة عدد كبير من الذرات فإذا كانت شدة الأشعة الواردة I_o فإن جزءاً منها I_A سوف يمتص من قبل ذرات المادة , و سينعكس جزء I_R عن سطح المادة , وسيتشتت جزء I_S بواسطة الذرات وأما الجزء المتبقي I_D فإنه ينفذ من خلال المادة أي أنّ :

$$I_o = I_A + I_R + I_S + I_D \qquad (٣-٣)$$

أما إذا كانت شدة الاشعة المنعكسة وكذلك شدة الاشعة المتشتتة صغيرة بالمقارنة مع الشدة الممتصة والشدة النافذة فإنه يمكن إهمالها و في هذه الحالة يمكن التعبير عن

العلاقة التي تربط بين شدة الأشعة الواردة وشدة الأشعة النافذة وعلاقتهما بكل مـن سماكة المادة ومعامل الامتصاص بواسطة قانون بيير-لامبيرت:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \qquad (٣-٤)$$

حيث I : شدة الشعاع النافذ من المادة .

I_o : شدة الشعاع الوارد عند سطح المادة .

X : سماكة المادة .

α : معامل الامتصاص وهو يتعلق بطبيعة المـادة وإذا قـدرت سماكـة المـادة بالسنتيمتر (cm) تكون أبعاد α هي (cm^{-1}) .

نستنتج من هذا القانون أنه كلما ازدادت سماكة المادة تناقصت شدة الأشعة النافذة .

نلاحظ مما سبق أنه لاينتج شعاع ليزر لأن شدة الأشعة النافذة أقل من الأشـعة الواردة والمطلوب هو الحصول على تضخيم للأشعة الواردة وذلك بعد مرورها عـبر المادة، وكما نعلم أن عمليتي الإصدار القسري والإصدار التلقائي تزيد من شدة الأشعة بينما عملية الامتصاص تؤدي إلى تناقص في شدة الأشعة النافذة عبر المادة، وللحصول على أشعة الليزر يجب أن تكون عمليات الإصدار أكبر من عملية الامتصاص .

لقد ذكرنا سابقاً أن العالم أينشتاين درس تفاعل الأشعة الكهرطيسية مع المـادة من خلال عمليات الانتقال الثلاث : الامتـصاص، الإصـدار التلقـائي والإصـدار القسري. فإذا فرضنا أنه لدينا شعاع ضوئي يسير وفق اتجاه المحور Z ويمر من خلال وسط غازي مؤلف من ذرات ،ولتبسيط الدراسة نفترض أنه لدينا انتقال مشع واحد يتم بين سويتي الطاقة $E_٢$ و $E_١$ بحيث يكون تردد الضوء الصادر: $\upsilon_{21} = \dfrac{E_2 - E_1}{h}$

ويمكن وصف الشعاع الضوئي بواسطة شدته التي تعطى بالعلاقة :

$$I_{(\upsilon)} = c \cdot \rho_{(\upsilon)} \qquad (٣-٥)$$

حيث $I_{(\upsilon)}$: شدة الشعاع الضوئي (وتمثل الطاقة في واحدة الحجم في واحدة الزمن).

C : سرعة الضوء.

$\rho_{(\upsilon)}$: كثافة الطاقة وواحدتها $J/m^2 Sec$.

ان التغير الكلّي في شدة الأشعة الصادرة أو النافذة من المادة $I_{(\upsilon)}$ نتيجة تفاعل الشعاع الضوئي مع ذرات الوسط الموجودة في السوية E_1 وكذلك مع الذرات الموجودة في السوية E_2 وذلك في المسافة Δz يحدث نتيجة مساهمة عمليات الامتصاص , الإصدار العفوي والإصدار القسري حيث تكون مساهمة كل عملية كما يلي :

عملية الامتصاص :

$$\Delta I_A = -N_1 \cdot \Delta z \cdot \rho_{(\upsilon)} \cdot B_{12} \cdot g_{(\upsilon)} \cdot h\upsilon \qquad (٣-٦)$$

والاشارة السالبة تدل على أن عملية الامتصاص تؤدي إلى تناقص في شدة الأشعة .

عملية الإصدار العفوي :

$$\Delta I_{spont} = N_2 \cdot \Delta z \cdot A_{21} \cdot g_{(\upsilon)} \cdot h\upsilon \qquad (٣-٧)$$

عملية الإصدار القسري :

$$\Delta I_{induced} = N_2 \cdot \Delta z \cdot \rho_{(\upsilon)} \cdot B_{21} \cdot g_{(\upsilon)} \cdot h\upsilon \qquad (٣-٨)$$

وبالتالي فان التغير الكلي في الشدة يكون عبارة عن مجموع التغيرات الناتجة عن العمليات السابقة أي أن :

$$\Delta I_{(\upsilon)} = \Delta I_{hnduced} + \Delta I_A + \Delta I_{spont}$$

$$\Delta I_{(\upsilon)} = N_2 \cdot \Delta z \cdot \rho_{(\upsilon)} \cdot B_{21} \cdot g_{(\upsilon)} \cdot h\upsilon - N_1 \cdot \Delta z \cdot \rho_{(\upsilon)} \cdot B_{12} \cdot g_{(\upsilon)} \cdot h\upsilon + N_2 \cdot \Delta z \cdot A_{21} \cdot g_{(\upsilon)} \cdot h\upsilon \qquad (٣-٩)$$

تمثل $g_{(\upsilon)}$ الشدة الطيفية ، حيث إن عدد الانتقالات الكلي داخل كامل عرض الخط الطيفي يتناسب مع شدة الخط الطيفي $g_{(\upsilon)}$.

إن عمليتي الإصدار القسري والإصدار التلقائي تؤديان إلى ازدياد شدة الشعاع الضوئي فهي لذلك موجبة بينما عملية الامتصاص تؤدي إلى تناقص في شدة الشعاع الضوئي فهي سالبة .

$$\frac{\Delta I_{(\upsilon)}}{\Delta z}=\frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,z}=N_2\cdot\rho_{(\upsilon)}\cdot B_{21}\cdot g_{(\upsilon)}\cdot h\upsilon-N_1\cdot\rho_{(\upsilon)}\cdot B_{12}\cdot g_{(\upsilon)}\cdot h\upsilon+N_2\cdot A_{21}\cdot g_{(\upsilon)}\cdot h\upsilon \qquad (٣-١٠)$$

نعوض قيمة $\rho_{(\upsilon)}=\frac{I_{(\upsilon)}}{c}$ من العلاقة (**٣-٥**) في العلاقة (**٣-١٠**) فنحصل على :

$$\Delta I_{(\upsilon)}=N_2\cdot\Delta z\cdot\left(\frac{I_{(\upsilon)}}{c}\right)\cdot B_{21}\cdot g_{(\upsilon)}\cdot h\upsilon-N_1\cdot\Delta z\cdot\left(\frac{I_{(\upsilon)}}{c}\right)\cdot B_{12}\cdot g_{(\upsilon)}\cdot h\upsilon+N_2\cdot\Delta z\cdot A_{21}\cdot g_{(\upsilon)}\cdot h\upsilon \qquad (٣-١١)$$

ويمكن كتابة هذه العلاقة بالشكل التالي :

$$\frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,z}=\left(\frac{h\upsilon}{c}\right)\cdot\left(B_{21}\cdot N_2-B_{12}\cdot N_1\right)\cdot g_{(\upsilon)}\cdot I_{(\upsilon)}+N_2\cdot A_{21}\cdot g_{(\upsilon)}\cdot h\upsilon \qquad (٣-١٢)$$

وبما أن عملية الإصدار التلقائي تتم في كافة الأحوال وذلك عند وجود أو عدم وجود حقل خارجي أو فوتونات ساقطة على المادة وبالتالي فهي لاتتعلـق بالـشدة $I_{(\upsilon)}$ وفي تقريب مقبول يمكن إهمال الحد الناتج عن عملية الإصدار التلقائي من العلاقة الـسابقة لتصبح بالشكل التالي :

$$\frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,z}=\left(\frac{h\upsilon}{c}\right)\cdot\left(B_{21}\cdot N_2-B_{12}\cdot N_1\right)\cdot g_{(\upsilon)}\cdot I_{(\upsilon)} \qquad (٣-١٣)$$

وكنا قد وجدنا أن : $B_{12}=B_{21}$

وباعتبار أن : $N_2-N_1=\Delta N$

تأخذ العلاقة السابقة الشكل التالي :

$$\frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,z}=\left(\frac{h\upsilon}{c}\right)\cdot B_{21}\cdot\Delta N\cdot g_{(\upsilon)}\cdot I_{(\upsilon)} \qquad (٣-١٤)$$

من هذه العلاقة نستنتج أن قيمة التغير في الشدة $I_{(\upsilon)}$ بالنسبة للمسافة z تكون سالبة إذا كانت $(\Delta N<٠)$ أي أن $(N_١>N_٢)$ وهذا ما يحدث في الطبيعة لأنه عنـدما يكون عدد الذرات في السوية $E_١$ أكبر من عددها في السوية $E_٢$ يؤدي ذلك إلى أن عملية الامتصاص للاشعاع تتغلب على عملية الإصدار وبالتالي يؤدي ذلك إلى تناقص في شدة الشعاع الوارد ولا نحصل في هذه الحالة على عملية تضخيم للشعاع الوارد ،

لذلك إذا أردنا أن تتم عملية التضخيم من أجل الحصول على أشعة ليزرية يجـب أن تكون قيمة التغير في الشدة $I_{(\upsilon)}$ بالنسبة للمسافة z موجبة وهذا يتحقق عندما تكـون $(\Delta N > ٠)$ أي أن $(N_٢ > N_١)$ أي عندما يكون عدد الذرات في السوية المثـارة $E_٢$ أكبر من عدد الذرات في السوية الأساسية $E_١$ وهذا يدعى انقلاب إسكان سـويات الطاقة أو (انقلاب التعداد ***Population Inversion***) وهو شرط أساسي من شـروط توليد الأشعة الليزرية .

كنا قد وجدنا سابقاً أن :

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi \cdot h \cdot \upsilon^3}{c^3} \quad \Rightarrow \quad B_{21} = A_{21} \cdot \frac{c^3}{8\pi \cdot h \cdot \upsilon^3}$$

نعوض قيمة $B_{٢١}$ في العلاقة (**٣-١٤**) فنجد أن :

$$\frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,z} = \left(\frac{h\upsilon}{c}\right) \cdot \left(A_{21} \cdot \frac{c^3}{8\pi \cdot h \cdot \upsilon^3}\right) \cdot \Delta N \cdot g_{(\upsilon)} \cdot I_{(\upsilon)}$$

$$\frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,z} = A_{21} \cdot \frac{c^2}{8\pi \cdot \upsilon^2} \cdot \Delta N \cdot g_{(\upsilon)} \cdot I_{(\upsilon)} \qquad (٣\text{-}١٥)$$

ويمكن كتابة هذه العلاقة بدلالة طول الموجة λ لتأخذ الشكل :

$$\frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,z} = A_{21} \cdot \frac{\lambda^2}{8\pi} \cdot \Delta N \cdot g_{(\upsilon)} \cdot I_{(\upsilon)} \qquad (٣\text{-}١٦)$$

نرمز بـ $\gamma_{o(\upsilon)}$ للمقدار :

$$\gamma_{0(\upsilon)} = A_{21} \cdot \frac{\lambda^2}{8\pi} \cdot \Delta N \cdot g_{(\upsilon)} \qquad (٣\text{-}١٧)$$

ويدعى معامل الربح الصغير أو معامل التضخيم لليزر .

وبالتالي يمكن كتابة العلاقة (**٣-١٦**) بالشكل :

$$\frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,z} = \gamma_{0(\upsilon)} \cdot I_{(\upsilon)} \qquad (٣\text{-}١٨)$$

$$\frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,I_{(\upsilon)}} = \gamma_{0(\upsilon)} \cdot dz \qquad (٣-١٩)$$

بمكاملة طرفي هذه العلاقة مع الأخذ بعين الاعتبار أن dz تتغير من القيمة ٠ إلى القيمة L التي تمثل أبعاد المادة التي طولها L فنجد أن :

$$\int \frac{d\,I_{(\upsilon)}}{d\,I_{(\upsilon)}} = \int_0^L \gamma_{0(\upsilon)} \cdot dz$$

$$I_{\upsilon(L)} = I_{\upsilon(0)} \cdot e^{\gamma_{0(\upsilon)} \cdot L} \qquad (٣-٢٠)$$

$$\Rightarrow G_{(\upsilon)} = \frac{I_{\upsilon(L)}}{I_{\upsilon(0)}} = e^{\gamma_{0(\upsilon)} \cdot L} \qquad (٣-٢١)$$

يسمى المقدار $G_{(\upsilon)}$: نسبة التضخيم لأشعة الليزر وهو يتعلق بالتردد υ .

ونلاحظ من العلاقة (**٣-٢٠**) أنه عندما يكون معامل الربح الصغير (معامل التضخيم) $\gamma_{o(\upsilon)}$ كبيراً فإن الشدة I_υ تزداد بسرعة كبيرة إلى حد الاشباع .

ومن معادلة معامل التضخيم (**٣-١٧**) يمكن الاستنتاج أن واحـدة المقـدار : $A_{21} \cdot \frac{\lambda^2}{8\pi} \cdot g_{(\upsilon)}$ هي واحدة مساحة $(m^٢)$ لذلك فهي تعرف أيضاً باسم مـساحة مقطع عملية الإصدار القسري ***(Gross-section for stimulated emission)*** ويرمز له σ_{SE} وهو يعبر أيضاً عن احتمال حدوث عملية الإصدار القسري, فكلمـا ازدادت مساحة المقطع ازدادت عملية الإصدار القسري :

$$\sigma_{SE(\upsilon)} = A_{21} \cdot \frac{\lambda^2}{8\pi} \cdot g_{(\upsilon)} \qquad (٣-٢٢)$$

وبالتالي يمكن كتابة معادلة معامل التضخيم لليزر بالشكل التالي :

$$\gamma_{0(\upsilon)} = \sigma_{SE(\upsilon)} \cdot \Delta N \qquad (٣-٢٣)$$

إذا كما نلاحظ هنا أيضاً يجب أن يكـون $(\Delta N > ٠)$ أي أن : $(N_٢ > N_١)$ حـتى يكون معامل الربح $\gamma_{o(\upsilon)}$ موجباً وبالتالي الحصول على أشعة الليزر .

٣-٤- شرط العتبة: *(Threshold Requirement)*

كنا قد وجدنا سابقاً أن تضخيم الضوء يحدث إذا تحققت حالة الانعكـاس في إسكان سويات الطاقة، أي يجب أن تكون السوية الليزرية العليا مشغولة بالإلكترونات بنسبة أكبر من السوية الليزرية السفلى ولكن هذا الشرط لازم بحد ذاته لتحقيق عملية الليزرة والحصول على تضخيم في الأشعة لكنه غير كاف . ولشرح ذلك نفرض أنـه لدينا وسط ليزري فعال بحيث تمتلك ذرات هذا الوسط سويتي طاقة E_1 و E_2 والتي يمكن للإلكترونات أن تنتقل بين هاتين السويتين من خلال التأثير المتبادل مـع حقـل شعاع خارجي ذي طاقة تتناسب مع الفرق بين سويتي الطاقة $(\Delta E = E_2 - E_1 = h\upsilon)$.
وبتأثير منبع الضخ الضوئي سوف يتغير عدد الإلكترونات على كل مـن الـسويتين السابقتين بحيث يصبح عددها في السوية المثارة كبيراً والتي تؤدي عنـد عودتهـا إلى السوية الأساسية إلى الحصول على عدد كبير من الفوتونات ذات كثافة عالية جداً .

كما أن كثافة الفوتونات في الليزر سوف تتغير مع الـزمن بـسبب عمليـات الإصدار القسري والإصدار العفوي والامتصاص بالإضافة إلى الخسارة الناتجـة عـن المرنان. ولدراسة شرط العتبة سوف نستخدم مفهوم كثافة الفوتونات بدلاً من كثافة الطاقة التي استخدمناها عند دراسة شرط انعكاس إسكان سويات الطاقة لذلك سوف نستبدل كثافة طاقة حقل الإشعاع $\rho_{(\upsilon)} . d\upsilon$ بكثافة الفوتونات n عنـد التـردد υ بحيث يكون:

$$n = \rho_{(\upsilon)} \cdot \frac{d\,\upsilon}{h\upsilon} \qquad (٣\text{-}٢٤)$$

وبما أن الليزر يمثل منبعاً ضوئياً قوياً جداً لذلك تكون كثافة الفوتونات عاليـة جـداً بحيث: $(n >> 1)$.

والتغير في كثافة الفوتونات ضمن الليزر بالنسبة للزمن تتعلّق بالعوامل التالية :

- **الإصدار العفوي :**

يتعلق الإصدار العفوي بعدد الإلكترونات N_2 الموجودة في السوية المثارة E_2 ويمكـن التعبير عن ذلك بواسطة العلاقة :

$$\frac{dN'}{dt} = A_{21} \cdot N_2 \qquad (٣-٢٥)$$

حيث A_{21} معامل الانتقال الذي يعبر عن احتمال حدوث الانتقال العفوي. وبمـا أن الإصدار العفوي يتم في جميع الاتجاهات بشكل متساوٍ فإنه يؤدي إلى تغير صغير جداً في كثافة الفوتونات ضمن إنماط المرنان.

- **الإصدار القسري:**

نتيجة لعملية الإصدار القسري يزداد عدد الفوتونات في حقل الإشعاع وهـو أيـضاً يتعلّق بعدد الإلكترونات N_2 في السوية E_2 ويعبرعن التغير في كثافة الإلكترونـات بالعلاقة:

$$\frac{dN''}{dt} = B_{21} \cdot N_2 \cdot \rho_{(\upsilon)} \qquad (٣-٢٦)$$

حيث B_{21} معامل الانتقال الذي يعبرعن احتمال حدوث الانتقال القسري.

$\rho_{(\upsilon)}$ كثافة الطاقة.

- **الامتصاص:**

في هذه الحالة تتناقص كثافة الفوتونات بشكل يتناسب طرداً مع عدد الإلكترونـات N_1 في السوية السفلى E_1 بحيث يكون لدينا :

$$\frac{dN'''}{dt} = -B_{12} \cdot N_1 \cdot \rho_{(\upsilon)} \qquad (٣-٢٧)$$

- **الخسارات التي تحدث ضمن المرنان :**

وتتناسب هذه الخسارات طرداً مع كثافة الفوتونات وعكساً مع الفترة الزمنية الـتي يبقى خلالها الفوتون ضمن الوسط الليزري الفعال t. أي أن :

$$\frac{dN^*}{dt} = -\frac{n}{t_0} \qquad (٣-٢٨)$$

وتنشأ الخسارة في المرنان بسبب عمليات التشتت والامتصاص ومن خـلال عـاملي الانعكاس المحددين لمرايا المرنان ، كما تلعب الخسارة الناتجة عن عملية الانعراج دوراً هاماً وذلك لأن مرايا المرنان ذات أبعاد محددة ونصف قطر محدد (وسـوف نـدرس العوامل التي تساهم في الخسارة التي تحدث ضمن المرنان لاحقاً بالتفصيل).

وبالتالي فان التغير الكلّي في كثافة الفوتونات بالنسبة للزمن يمكن تمثيله بمعادلـة تحتوي على التغيرات الناتجة عن العمليات السابقة أي أن :

$$\frac{dn}{dt} = B_{21} \cdot N_2 \cdot \rho_{(\upsilon)} - B_{12} \cdot N_1 \cdot \rho_{(\upsilon)} - \frac{n}{t_0} + A_{21} \cdot N_2 \qquad (٣-٢٩)$$

ويمكننا اهمال الحد الذي يمثّل التغير الناتج عن عملية الإصدار العفوي لأنه كما ذكرنا سابقاً يساهم بتغير صغير في كثافة الفوتونات مقارنة بالتغيرات الناتجة عن العمليـات الأخرى أي أنّ :

$$\frac{dn}{dt} = B_{21} \cdot N_2 \cdot \rho_{(\upsilon)} - B_{12} \cdot N_1 \cdot \rho_{(\upsilon)} - \frac{n}{t_{0\ 2}} \qquad (٣-٣٠)$$

وبتعـويض قيمـة $\rho_{(\upsilon)}$ مـن العلاقـة **(٣-٢٤)** وبعـد الأخـذ بعـين الاعتبـار أنّ: $B_{21} = B_{12} = B$ وبالاصلاح نجد أن:

$$\frac{dn}{dt} = \left[\frac{h\upsilon}{d\upsilon} \cdot B \cdot (N_2 - N_1) - \frac{1}{t_0}\right] \cdot n \qquad (٣-٣١)$$

وعندما تكون قيم كل من N_1 و N_2 ثابتة مع الزمن نحصل على تغيـر أسـي في كثافة الفوتونات بحيث يمكن كتابة العلاقة السابقة بالشكل :

$$\frac{dn}{n} = \left[\frac{h\upsilon}{d\upsilon} \cdot B \cdot (N_2 - N_1) - \frac{1}{t_0}\right] \cdot dt \qquad (٣-٣٢)$$

وبالتالي فان :

$$n_{(t)} = n_{(0)} \cdot e^{\left[\frac{h\upsilon}{d\upsilon}\cdot B\cdot(N_2-N_1)-\frac{1}{t_0}\right]\cdot t} \qquad (٣-٣٣)$$

فإذا كان الوسط الليزري الفعال في حالة توازن حراري فإنه وفقاً لتوزع ماكسويل-بولتزمان سوف يكون لدينا دائماً $(N_2 < N_1)$ وبالتالي سوف تتناقص كثافة الفوتونات مع الزمن بشكل أسي ، أما عندما تكون $(N_2 > N_1)$ فهذا يعني أنه سيكون لدينا حالة انعكاس في إسكان سويات الطاقة وبالتالي فان كثافة الفوتونات ستزداد بشكل أسي مع الزمن ونحصل على عملية تضخيم للضوء بسبب الإصدار القسري. ولكن حتى تستمر عملية تضخيم الضوء يجب أن تكون الخسارة في الإشعاع أقل من التضخيم ولهذا السبب يجب أن تؤخذ الخسارة دائماً بعين الاعتبار.

إذا يمكن القول إنه يحدث التضخيم إذا كان التغير في كثافة الفوتونات موجباً أي أن $\left(\frac{dn}{dt} > 0\right)$ لذلك نجد من العلاقة **(٣-٣١)** :

$$\left[\frac{h\upsilon}{d\upsilon}\cdot B \cdot\left(N_2 - N_1\right) - \frac{1}{t_0}\right]\cdot n > 0 \qquad (٣-٣٤)$$

$$\Rightarrow N_2 - N_1 > \frac{d\,\upsilon}{B\cdot h\upsilon\cdot t_0} \qquad (٣-٣٥)$$

ولكن كنا قد وجدنا سابقاً أن :

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi\cdot h\upsilon^3}{c^3}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{B} = \frac{8\pi\cdot h\upsilon^3}{c^3\cdot A}$$

بالتعويض في العلاقة **(٣-٣٥)** نحصل على:

$$N_2 - N_1 > \frac{8\pi\cdot\upsilon^2}{c^3\cdot A\cdot t_0}\cdot d\upsilon \qquad (٣-٣٦)$$

وهذه العلاقة هي عبارة عن شرط عتبة الليزر وهي تبين القيم التي يجب اختيارها لمعاملات الليزر من أجل تحقيق شرط العتبة بسهولة. لذلك نستنتج أنه يجب أن تكون

الخسارة أقل مايمكن لأنها تتناسب كما ذكرنا مع $\left(\frac{1}{t_0}\right)$. وبما أنه من أجـل القـيم الكبيرة للتردد υ سوف يؤدي إلى قيم كبيرة لحالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة $(N_٢ - N_١)$ لأنها تتناسب طرداً مع $\upsilon^٢$ ومن أجل ذلك يجب أن يكون مقدار التعريض في الخطوط الليزرية $d\upsilon$ أصغر مايمكن حتى تتحقق عملية الليزرة والسبب في ذلـك يتعلق بالازدياد الكبير في عملية الإصدار العفوي مقارنة بالإصـدار القـسري لأن: $(A \sim B \cdot \upsilon^٣)$. لذلك تزداد صعوبة تحقيق عملية الليزرة مع ازدياد التـردد، لـذلك تعترض العلماءَ صعوبات كبيرة عند تصميم الليزرات التي تعمل في مجـال الأمـواج القصيرة كالليزرات التي تعمل في مجال الأشعة السينية لأن ذلك يتطلب كثافة طاقـة عالية .

إذا يتضمن شرط العتبة أن يكون التضخيم لليزر G دائماً أكبر من الخسارة V بحيث يكون الشرط $(G \,.\, V > ١)$ دوماً محققاً. ولكن عملية التضخيم لاتستمر هكذا بشكل تلقائي لأنه عند الشدات العالية لضوء الليزر يكون هنـاك انتقـالات كـثيرة للذرات المثارة إلى السوية الأساسية نتيجة للاصدار القسري مما يؤدي إلى تنـاقص في معامل التضخيم بسبب تناقص قيمة ΔN وهكذا حتى الوصول إلى حالة توازن بـين عدد الذرات التي تنتقل إلى السويات المثارة تحت تأثير عملية الضخ وعدد الذرات التي تنتقل من السوية المثارة إلى السوية الأساسية بسبب عملية الإصدار القسري وفي هذه الحالة المستقرة يكون لدينا : $(G.V = ١)$.

٣-٥- الليزر ثلاثي السويات :

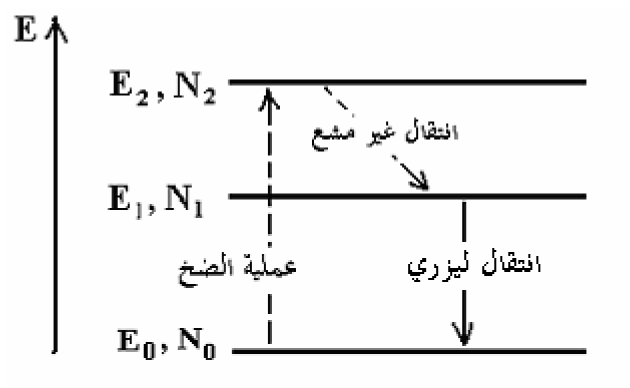
قبل البدء في دراسة الليزر ثلاثي السويات سوف نتطرق إلى مناقشة إمكانيـة الحصول على ليزر ثنائي السويات . من أجل ذلك نفرض لدينا مجموعـة الـذرات موجودة في سويتي طاقة $E_.$ و $E_١$. فعند اكتساب هذه الذرات لطاقة من الوسـط

الخارجي سوف تنتقل الإلكترونات من السوية الأساسية $E_{.}$ إلى السوية المثـارة E_{1} وفي الوقت نفسه هناك احتمال أن تعود الاكترونات من السوية المثـارة إلى الـسوية الأساسية من خلال عملية الإصدار العفوي أو الإصدار القسري وهذا ممكن الحدوث لعدم توفر سويات طاقة أخرى يمكن للإلكترونات الانتقال اليها . وكما نعلم حـتى يكون عدد الفوتونات الصادرة عن عملية الإصدار القسري أكبر من عدد الفوتونات الصادرة عن عملية الإصدار العفوي يجب أن يتحقق شرط انعكاس إسكان سـويات الطاقة. ولكن في حالة الذرات الثنائية السوية هذا غير ممكن في حالة التوازن وذلـك لأنه دائماً لدينا ازدياد في الإصدار العفوي على حساب الإصدار القسري ، وكـذلك فان عملية الضخ الضوئي لاتؤدي إلى تحقيق انعكاس في إسكان سويات الطاقـة لأن أشعة الضخ سوف تؤدي إلى امتصاص واصدار قـسري بـشكل متـساو أي أن : $B_{21} = B_{12}$ وبالتالي يمكن تحقيق حالة الانعكاس فقط من خلال وجود سويات طاقـة اضافية لأن ذلك ضروري جداً وهذا ماسوف نلاحظه عند دراسة الليـزرات ثلاثيـة السويات والليزرات رباعية السويات. إذا نستنتج من ذلك أنه لايمكن مـن الناحيـة العملية تصميم أو الحصول على ليزر ثنائي السويات.

أما في حالة الليزر ثلاثي السويات ، فيوجد في الجملة ثلاث سويات للطاقة $E_{.}$، E_{1} وE_{2} حيث تستطيع الإلكترونات بواسطة عملية الضخ الضوئي الانتقال إلى السوية E_{2} بعد امتصاصها للطاقة ويجب أن يكون عمر الحالة المثارة لهذه السوية صغيراً جـداً وغالباً يكون من مرتبة $10^{-8} Sec$ لذلك تبقى عند وجود ضخ ضوئي قوي شبه فارغة لأن زمن تواجد الإلكترونات في هذه السوية قصير جداً.

إذا بعد أن تصبح الإلكترونات في السوية المثارة E_{2} سوف يكون لها امكانيتان لاعطاء طاقتها والعودة إلى السوية الأساسية $E_{.}$ كما هو موضح بالشكل(٣-٤) . أما الانتقال مباشرة من السوية E_{2} إلى السوية $E_{.}$ وذلك عبر عملية الإصدار العفوي أو الانتقال بشكل غير مباشر مـن خـلال الانتقال أولاً إلى السوية E_{1} والتي تكـون

شبه مستقرة واعطاء الطاقة التي توافق الفرق في الطاقة بين السويتين $\Delta E_{21}=E_2-E_1$ بشكل غير مشع أي على شكل حرارة إلى الوسط الخارجي . وبما أن عمر السوية E_1 أكبر من عمر السوية E_2 يؤدي ذلك إلى ازدياد عدد الإلكترونات في السوية E_1 . بعد ذلك تنتقل الإلكترونات من السوية E_1 إلى السوية الأساسـية E_0 بواسـطة عمليـة الإصدار القسري وبالتالي تحقيق انتقال ليزري والحصول على أشعة ليزرية ذات طـول موجة يتوافق والفرق بين السويتين E_1 و E_0 .



الشكل (٣- ٤)

ولكن لتحديد أي من هذين الانتقالين ذي الأفضلية على الآخر فإن ذلك يرتبط بطبيعة وخصائص الجملة الليزرية من جهة وبعمر السويات المثارة من جهة أخـرى، فعلى سبيل المثال في حالة ليزر الياقوت فان زمن انتقال الإلكترونات مـن E_2 إلى E_0 مباشرة من مرتبة $(t_{20}=10^{-6}sec)$ بينما زمن الانتقال مـن E_2 إلى E_1 مـن مرتبـة $(t_{21}=10^{-8}sec)$ لذلك سوف ينتقل حوالي (٩٩٪) من الذرات المثارة إلى الـسوية E_1 بينما الباقي (١٪) ينتقل إلى السوية الأساسية E_0 مباشرة. كما أن عمر السوية المثارة E_1 كبير جداً $(\tau_1=10^{-3}sec)$ مقارنة بالسوية المثارة E_2 حيث $(\tau_2=10^{-8}sec)$ ، وهذا هو السبب في الحصول على كثافة إلكترونية كبيرة في السوية E_1 مقارنة بالـسوية E_2 والتي يمكن اعتبارها شبه فارغة. لذلك عند تطبيق عملية ضخ ضوئي قوي ينتقل العدد الأكبر من الذرات إلى السوية E_1 مقارنـة بعدد الذرات التي ينتقل إلى السوية E_0 .

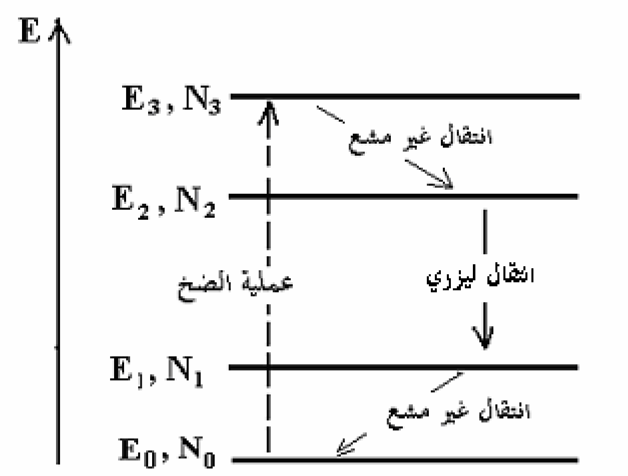
وبهذه الطريقة نكون قد حققنا شرط انعكاس إسكان سويات الطاقة من خلال وجود سويات اضافية ومن ثم يمكن الحصول على أشعة ليزرية مضخمة.

ولكن بما أنه في كل دورة للإلكترون في السويات الثلاثة سوف توافق ثلاثة انتقالات متتالية أولاً من $E_0 \to E_2$ ومن ثم $E_2 \to E_1$ وبعد ذلك من $E_1 \to E_0$ فهذا يؤدي إلى مخالفة قواعد الانتقال للعزم الزاوي ، لأنه من غير الممكن للإلكترون بعد ثلاثة انتقالات متتالية العودة إلى السوية الأساسية . فكما نعلم فإن قواعد الانتقال بالنسبة للعدد الكوانتي للعزم الزاوي $(\Delta l = \pm 1)$ يجب أن تكون دوماً محققة . وبالرغم من ذلك فان الليزرات ثلاثية السويات كليزر الياقوت مثلاً ممكنة التحقق لأن كمية الطاقة الفائضة من خلال العزم الزاوي تعطى إلى بلورة الياقوت ولكن يكون ذلك على حساب الربح . ومن جهة أخرى يجب في هذا النوع من الليزرات أن ينتقل أكثر من نصف عدد الإلكترونات التي سوف تشارك في فعل الليزرة إلى السوية E_1 حتى تتشكّل حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة. وسوف ندرس معادلات الحالة التي تصف الانتقالات بين السويات الليزرية في الليزر رباعي السويات والتي تعتبر عامة وشاملة ويمكن تطبيقها على الليزر ثلاثي السويات .

٣-٦- الليزر رباعي السويات:

وجدنا في حالة الليزر ثلاثي السويات أننا نحتاج إلى عملية ضخ ضوئي قوي لتحقيق الانعكاس في إسكان سويات الطاقة بين السويتين E_1 و E_2 وتصبح هذه العملية أكثر سهولة عند وجود سوية اضافية تكون طاقتها أقل من طاقة السوية الليزرية السفلى أي سوية تكون محصورة بين السوية الأساسية والسوية الليزرية السفلى . أي إذا اعتبرنا أنه لدينا السوية الأساسية E_0 وأن السوية E_1 ذات طاقة أعلى بحيث تكون غير مشغولة بالإلكترونات عند درجة حرارة الغرفة ، فبواسطة عملية الضخ الضوئي سوف تنتقل الإلكترونات من السوية E_0 إلى السوية المثارة E_3 مباشرة لتعود بعد ذلك بواسطة انتقال غير مشع إلى السوية E_2 حيث تتشكّل حالة

انعكاس في إسكان سويات الطاقة كما وجدنا في حالة الليزر ثلاثي السويات ومن ثم يحدث الانتقال الليزري من السوية الليزرية العليا E_2 إلى السوية الليزرية الـسفلى E_1 لتعود بعدها الإلكترونات بشكل غير مشع إلى السوية الأساسية E_0 وهذه الانتقـالات موضحة بالشكل (٣- ٥).



الشكل (٣ – ٥)

ويجب أن يكون عمر الحالة المثارة للسوية E_1 صغيراً جداً أي مثل عمر الحالـة المثارة للسوية E_3 وذلك حتى يبقى بشكل دائم شبه فارغ مما يـسمح للـسوية E_2 أن تكون دائماً مشغولة بالإلكترونات . لذلك تكمن أهمية الليزر رباعي السويات في أنه عند طاقة ضخ صغيرة يمكن الحصول على حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة وبالتالي تضخيم الأشعة وإمكانية عمل الليزر بشكل مستمر.

إذا كما نلاحظ أن الانتقالات من السوية المثارة الأعلى إلى الأدنى تـتم امـا بوساطة انتقالات غير مشعة أو من خلال اصدار فوتونات.

فالانتقالات غير المشعة تحدث نتيجة للتأثير المتبادل بين ذرات الوسط مثل عمليـات التصادم بين الذرات أو من خلال الاهتزازات ضمن الشبكة البلورية للوسط الليـزري الفعال . وتدعى هذه الانتقالات في الذرات المثارة التي تترافق بإعطاء طاقتها للوسـط

الخارجي بشكل غير مشع بعمليات "الاسترخاء" للسويات المثارة *(Relaxation)* . وتحدد نسبة الاسترخاءات للسويات المثارة عدد الانتقالات غير المشعة في الثانية .

أما الانتقالات المترافقة بإصدار فوتونات فتتم اما عن طريق عملية الإصدار العفوي أو عن طريق الإصدار القسري. كما أنه في حالة الإصدار العفوي لايتطلّب ذلك عملية ضخ ضوئي بينما تكون عملية الضخ الضوئي ضرورية في حالة الإصدار القسري وفي هذه الحالة تؤخذ بعين الاعتبار النسب التي تساهم بها كل عملية من العمليات السابقة حيث يعبر عن كل عملية تدخل في تأثير متبادل مع العمليات الأخرى بواسطة نسبة المساهمة الموافقة لهذه الحالة في عملية التأثير المتبادل الكلية.

لذلك إذا كانت خصائص الوسط الليزري الفعال معلومة فاننا نستطيع بالاعتماد على نموذج معادلات النسبة أن نستنتج المعادلات التي تعبر عن انعكاس إسكان سويات الطاقة n وكذلك كثافة الفوتونات p في واحدة الحجم وذلك بشكل تقريبي . وفيما يلي سوف نستنتج هذه المعادلات في حالة الليزر الرباعي السوية.

٣-٧- معادلات النسبة لوصف الليزر رباعي السويات:

(Rate Equations)

كما لاحظنا سابقاً فانه بوساطة عملية الضخ الضوئي سوف تتوزع الإلكترونات في الليزر رباعي السويات على سويات الطاقة الأربعة والمبينة بالشكل (٣ – ٥) وذلك بأعداد مختلفة تتناسب وطاقة كل سوية . ومن خلال كثافة إسكان سويات الطاقة التي تشارك في فعل الليزرة يمكن تحديد حالة الوسط الليزري الفعال بشكل مفصل . هذا مع الأخذ بعين الاعتبار أن التغير في عدد الإلكترونات لسوية ما يكون موجباً عند اكتساب هذه السوية للإلكترونات وسالباً عند مغادرة الإلكترونات لهذه السوية.

فإذا اعتبرنا أن n_{tot} هو عدد الإلكترونات الكلّي الموجودة في السويات

الأربع في ليزر رباعي السويات وهذا العدد ذو قيمة ثابتة ويعطى بالعلاقة :

$$n_{tot} = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 = const \qquad (٣\text{-}٣٧)$$

$$\Rightarrow \frac{dn_{tot}}{dt} = 0 \qquad (٣\text{-}٣٨)$$

حيث N_i يمثل عدد الإلكترونات في السوية i=٠،١،٢،٣ .

وبالاستناد إلى أن عمر الحالة المثارة للسوية $E_٣$ التي يتم ضخ الإلكترونات اليها صغيراً جداً بالمقارنة مع فترة بقائها في السويات الأخرى وكذلك الحال بالنسبة للسوية $E_١$ حيث تكون الفترة التي تبقى خلالها الإلكترونات في هذه السويات قصيرة جـداً لدرجة يمكن اعتبار هذه السويات شبه خالية من الإلكترونات أي أن : $(N_٣ = N_١ \approx ٠$) وبالتالي تصبح المعادلة (**٣-٣٧**) بالشكل :

$$n_{tot} \approx N_0 + N_2 \qquad (٣\text{-}٣٩)$$

وفي حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة يكون لدينا :

$$n = N_٢ - N_١ \approx N_٢ \qquad (٣\text{-}٤٠)$$

وذلك لأن $N_١ \approx ٠$ فمن ذلك يمكننا أن نستنتج أن :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dN_2}{dt} \qquad (٣\text{-}٤١)$$

ويعني ذلك أن التغير في إسكان السويات n بالنسبة للزمن يعـادل التغيـر في عـدد الإلكترونات بالنسبة للزمن التي تشغل السوية الليزرية العليا $N_٢$. هذا مع العلـم أن عدد الإلكترونات في هذه السوية $E_٢$ يتغير وفقاً لعدة عمليات مختلفة منها :

أ- عملية الضخ الضوئي (الامتصاص):

في هذه الحالة يتناسب التغير في عدد الإلكترونات المثارة إلى الـسوية $E_٢$ في واحـدة الزمن طرداً مع عدد الإلكترونات $N_٠$ في السوية الأساسية $E_٠$ وكذلك مع احتمـال الانتقال من السوية $E_٠$ إلى السوية $E_٣$ ويمكن التعبير عن ذلك بالعلاقة :

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{pump} = \eta \cdot W_{03} \cdot N_0 \quad = \ W_p \cdot N_0 \qquad (٣-٤٢)$$

حيث: $W_{٠٣}$ احتمال الانتقال من السوية $E_{٠}$ إلى السوية $E_{٣}$ وهي تتعلق بشكل مباشر مع طاقة الضخ الفعلية.

η فعالية أو مردود عملية الضخ الضوئي والذي يعبر عن احتمال قيام السوية $E_{٣}$ بعمليةاسترخاء تؤدي إلى انتقال الإلكترونات إلى السوية $E_{٢}$.

$W_p=\eta.W_{٠٣}$ نسبة الضخ بالنسبة لإلكترون واحد وهي تعبر عن عدد الدورات التي يقوم بها الإلكترون بين السويات الأربع في واحدة الزمن.

ب- الإصدار العفوي:

ومن العمليات التي تؤثر في السوية $E_{٢}$ أيضاً الانتقالات التي تؤدي إلى اصدار عفوي للفوتونات وفي هذه الحالة يعبر عن تغير عدد الإلكترونات $N_{٢}$ في السوية $E_{٢}$ بالعلاقة :

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{spont} = -\Gamma \cdot N_2 \qquad (٣-٤٣)$$

حيث : $\Gamma=١/\tau_{spont}$

τ_{spont} : العمر الوسطي للفوتون قبل أن تصدره الذرة بشكل عفوي وهو يمثل الثابت الزمني للاصدار العفوي.

ج- الإصدار القسري:

وأخيراً يجب أن يؤخذ أيضاً بعين الاعتبار الإصدار القسري الذي يرافق الانتقال من السوية الليزرية العليا $E_{٢}$ إلى السوية الليزرية السفلى $E_{١}$ ، وفي هذه الحالة يتناسب التغير في عدد إلكترونات السوية $E_{٢}$ طرداً مع الفرق في عدد الإلكترونات $N_{١}$ و $N_{٢}$ في السويتين $E_{١}$ و $E_{٢}$ وكذلك يتناسب طرداً مع كثافة فوتونات الحقل الليزري p و يعبر عن ثابت التناسب بوساطة مساحة مقطع السطح الفعال σ من أجل امتصاص أو اصدار فوتون أي أن :

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{stimu} = -\sigma \cdot c \cdot p \cdot (N_2 - N_1) \qquad (٣-٤٤)$$

حيث : σ مساحة مقطع السطح الفعال للتأثير المتبادل بين فوتون وذرة من الوسـط الليزري الفعال.

c سرعة الضوء.

وبما أن : $n = N_2 - N_1$ بالتعويض بالعلاقة السابقة نجد أن :

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{stimu} = -\sigma \cdot c \cdot p \cdot n \qquad (٣-٤٥)$$

وبشكل عام يكون التغير بالنسبة للزمن لعدد الإلكترونات في السوية E_2 هو عبارة عن مجموع كافة التغيرات السابقة أي أن :

$$\frac{dN_2}{dt} = -\sigma \cdot c \cdot p \cdot n - \Gamma \cdot N_2 + W_p \cdot N_0 \qquad (٣-٤٦)$$

ومقارنة العلاقة **(٣-٤٦)** مع العلاقة **(٣-٤١)** وبتعويض قيمة N_0 من العلاقـة **(٣-٣٩)** مع الأخذ بعين الاعتبار أن $(n \approx N_2)$ نجد أن :

$$\frac{dn}{dt} = -\sigma \cdot c \cdot p \cdot n - \Gamma \cdot n + W_p \cdot (n_{tot} - n) \qquad (٣-٤٧)$$

هذه المعادلة تعبر عن تغير إسكان سويات الطاقة بالنسبة للزمن خلال عملية الليزرة أي أنها تصف إسكان السويتين E_2, E_1 اللتين تمثلان السوية الليزرية العليا والسوية الليزرية السفلى في الليزر رباعي السويات.

ومن المهم أيضاً في عملية الليزرة معرفة تغير كثافة الفوتونـات الناتجـة عـن الانتقالات القسرية بالنسبة للزمن وتأثير ذلك على الانتقالات التي تحدث من السويات المثارة إلى السوية الأساسية ، حيث أنه عند كل عملية امتصاص سوف يختفي فوتـون بينما ينتج لدينا فوتون إضافي عند كل عملية اصدار قسري. ومن جهة أخرى فـان كثافة الفوتونات المتولدة لمرة واحدة لاتبقى ثابتة ضمن المرنان وإنما سوف تتناقص مع الزمن ويتناسب هذا التناقص مع زمن التخامد في كثافـة الفوتونـات τ_{ph} بـسبب

خسارة قسمٍ منها ضمن المرنان وذلك لأن عدد من الفوتونات سيتم خسارتها بسبب عمليات الانعكاس أو الانعراج أو بطرق أخرى ضمن المرنان . انطلاقاً من ذلك يمكن أن نعبر عن التغير في كثافة الفوتونات p بالعلاقات التالية:

أ- التغير الناتج عن عملية الإصدار القسري:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{stimu}=\left(-\frac{dN_2}{dt}\right)_{stimu}=\sigma\cdot c\cdot p\cdot(N_2-N_1)$$

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{stimu}=\sigma\cdot c\cdot p\cdot n \qquad (٣-٤٨)$$

ب-التغير الناتج عن الخسارة ضمن المرنان والذي يعبر عنه بالعلاقة التالية :

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{loss}=-\frac{p}{\tau_{ph}} \qquad (٣-٤٩)$$

حيث يعبر τ_{ph} عن زمن التخامد في كثافة الفوتونات الناتجة عن الخسارة ضمن المرنان ويحدد بالعلاقة :

$$p=p_0\left[\exp\left(\frac{t}{\tau_{ph}}\right)\right]^{-1} \qquad (٣-٥٠)$$

كما أن هناك التغير الناتج عن عمليات الإصدار العفوي الذي يمكن اهماله وذلك لأن هذا التغير صغير جداً مقارنة بالتغيرات الناتجة عن العوامل السابقة . وبالتالي يكــون التغير الكلّي في كثافة الفوتونات بالنسبة للزمن هو عبارة عن مجموع التغيرات السابقة أي أن :

$$\frac{dp}{dt}=\sigma\cdot c\cdot p\cdot n-\frac{p}{\tau_{ph}}$$

$$\frac{dp}{dt}=p\left(\sigma\cdot c\cdot n-\frac{1}{\tau_{ph}}\right) \qquad (٣-٥١)$$

ونلاحظ من هذه العلاقة أنه حتى يتحقق لدينا حالة انعكاس ومن ثم تزايد في كثافــة الفوتونات الناتجة عن عملية الإصدار القسري يجب أن يكون التغيــر موجبــاً أي أن

يكون المقدار $\left(\frac{dp}{dt}>0\right)$ وهذا يعني أن الانعكاس يجب أن يكون أكبر من قيمة محددة لـ n تدعى العتبة ويرمز لها بـ n_{th} أي أن :

$$\frac{dp}{dt}>0 \;\Rightarrow\; n>n_{th}=\frac{1}{\sigma\cdot c\cdot\tau_{ph}} \qquad (٣-٥٢)$$

إذا تمثّل المعادلتان (**٣-٤٧**) و (**٣-٥١**) معادلتي النسبة لليزر رباعي الـسويات ، فالمعادلة الأولى (**٣-٤٧**) تعبر عن حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة وبالتالي عن التغير في إسكان هذه السويات بينما المعادلة (**٣-٥١**) تعبر عن تغير كثافة الفوتونـات الناتجة عن عملية الإصدار القسري وتأثير الخسارة في الفوتونات التي تحـدث ضـمن المرنان .

٣-٨- الحلول المستقلة عن الزمن لمعادلات النسبة لليزر رباعي السويات (الحالة المستقرة):

المعادلتان (**٣-٤٧**) و(**٣-٥١**) هما معادلتان تفاضليتان لاخطيتان ومترابطتان مع بعضهما ، كما أنهما تحتويان على الحدين p و n . ومن جهة أخرى لاتوجد حلـول معروفة لهما بدقة تامة ، لأن حلّهما معقّد ويعتمد على البرمجيات والحاسوب . لذلك سوف نعتمد فيما يلي حالة خاصة نحاول من خلالها تبسيط هاتين المعادلتين من أجل الحصول على حلول مقبولة لهما، وهذه الحالة الخاصة تمثّل حالة العمل المستقّر لليـزر والتي توافق حالة التوازن التي يعبر عنها بالمعادلات التالية :

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt}&=0\\ \frac{dp}{dt}&=0\end{aligned} \qquad (٣-٥٣)$$

وبالتعويض في العلاقة (**٣-٤٧**) نجد أن :

$$\frac{dn}{dt} = -\sigma \cdot c \cdot p \cdot n - \Gamma \cdot n + W_p \cdot (n_{tot} - n) = 0 \qquad (٣-٥٤)$$

$$n = \frac{W_p \cdot n_{tot}}{\sigma \cdot c \cdot p + \Gamma + W_p} \qquad (٣-٥٥)$$

ومن هذه العلاقة نجد أن حالة الانعكاس في الليزر رباعي السويات تتـشكّل عنـدما ($n > ٠$) أي وفقاً للعلاقة (**٣-٥٥**) عندما يكون ($W_p > ٠$) أي نسبة الضخ لإلكتـرون واحد دائماً موجبة.

وما دام الليزر يعمل تحت قيمة عتبة أو قريباً منها فلا يتشكّل أي حقل فوتونات اطلاقاً وهذا يعني أن كثافة الفوتونات تكون معدومة أي : ($p = ٠$) ومن أجل نـسبة ضخ صغيرة جداً أي من أجل ($W_p << \Gamma$) سوف يزداد الانعكاس في إسكان سـويات الطاقة طرداً مع تزايد نسبة الضخ وفي هذه الحالة تعطى قيمة الانعكاس المحددة بالعلاقة (**٣-٥٥**) بالعلاقة التالية :

$$n = \frac{W_p \cdot n_{tot}}{\Gamma} \qquad (٣-٥٦)$$

تدل هذه العلاقة على أن الليزر رباعي السوية يحقق حالة الانعكاس مباشرة عند عملية الضخ الضوئي وهذا يعتبر ميزة ايجابية هامة مقارنة بالليزرات الأخرى ذات الـسويات المختلفة مثل الليزر ثلاثي السويات.

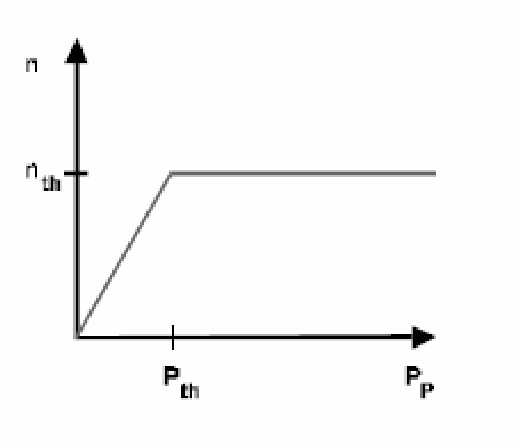
أما كثافة الفوتونات في الحالة المستقرة (حالة التوازن) فتصبح بعد أخذ العلاقة (**٣-٥٣**) بعين الاعتبار بالشكل:

$$\frac{dp}{dt} = p\left(\sigma \cdot c \cdot n - \frac{1}{\tau_{ph}}\right) = 0 \qquad (٣-٥٧)$$

وهذه العلاقة تكون محققة عندما يكون شرط العتبة المحدد بالعلاقة (**٣-٥٢**) من أجـل عملية الانعكاس محققاً.

كما أنه عند حالة التوازن والعمل المستقر لليزر لايمكن تحقيق حالة الانعكـاس عند قيمة أكبر من قيمة العتبة حـتى لـو كانت كثافـة الفوتونـات موجبـة أي

($p > 0$) أو حتى بواسطة عملية ضخ ضوئية قوية وذلك لأنه مع ازدياد عملية الانعكاس سوف تزداد كثافة الفوتونات أيضاً والتي سوف تحافظ بدورها على عملية الانعكاس عند قيمة العتبة وذلك بسبب الازدياد أيضاً في احتمال حدوث عملية الإصدار القسري والشكل (**٣-٦**) يوضح ذلك.



الشكل (٣ – ٦)

وفي الحالة التي تكون فيها قيمة الانعكاس عند قيمة العتبة معروفة وذلك في حالة الليزر المستقر يمكن انطلاقاً من ذلك استنتاج العلاقة التي تعطي كثافة الفوتونات p ، فمن أجل ذلك نعوض $n = n_{tot}$ في العلاقة (**٣-٥٥**) وبعد الاصلاح نحصل على العلاقة التالية:

$$\boldsymbol{p = \tau_{ph}\left[W_p\left(n_{tot} - n_{th}\right) - \Gamma \cdot n_{th}\right]}$$

$$\boldsymbol{p = \tau_{ph}\left[\left(n_{tot} - n_{th}\right)\left(W_p - \frac{\Gamma \cdot n_{th}}{n_{tot} - n_{th}}\right)\right]} \qquad (٣\text{-}٥٨)$$

وإذا عرفنا نسبة الضخ (معدل الضخ) عند العتبة بالعلاقة:

$$W_{th} = \frac{\Gamma \cdot n_{th}}{n_{tot} - n_{th}} \qquad (٣\text{-}٥٩)$$

في هذه الحالة يمكن كتابة العلاقة (**٣-٥٨**) بدلالة W_{th} لتصبح بالشكل :

$$p = \tau_{ph}(n_{tot} - n_{th})(W_p - W_{th}) \qquad (٣-٦٠)$$

وفي حالة الليزر رباعي السوية لدينا بشكل عام $(n_{tot} >> n_{th})$ أي أنه يمكننا اهمـال قيمة n_{th} بالمقارنة مع قيمة n_{tot} في العلاقة (**٣-٥٩**) لتأخذ الشكل:

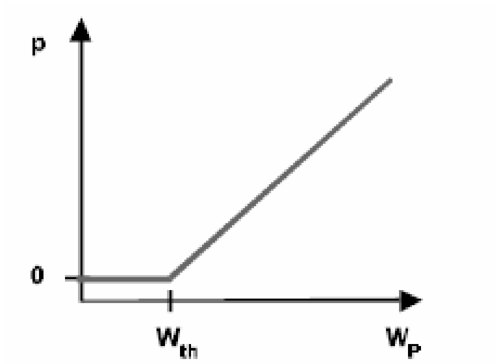
$$W_{th} = \frac{\Gamma \cdot n_{th}}{n_{tot}} \qquad (٣-٦١)$$

كما أن العلاقة التي تعبر عن كثافة الفوتونات (**٣-٦٠**) تأخذ الشكل :

$$p = \tau_{ph} \cdot n_{tot} \cdot (W_p - W_{th}) \qquad (٣-٦٢)$$

ومن أجل $(W_p < W_{th})$ تكون كثافة معدومة أي أن : $p = ٠$ وذلك موضح بالشكل التالي (**٣- ٧**) .

أي أنه في هذه الحالة تكون طاقة الضخ أقل من طاقة العتبة وعندها لايتـشكّل حقل فوتونات وبالتالي لاتتولد أشعة ليزرية .



الشكل (٣ – ٧)

٣-٩- طاقة الخرج الليزرية *(Laser Output Power)* :

لقد وجدنا سابقاً أن كثافة الفوتونات وكذلك نسبة الضخ التي تؤدي إلى تحقيق حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة عبارة عن مقادير لايمكن تحديدها أو تعـيين قيمتها بطرق القياس المباشرة. ولكن في الواقع ترتبط كثافة الفوتونات ضمن المرنان مع

طاقة الخرج الليزرية P_A والتي بدورها قابلة للتحديد والقياس ، بينما ترتبط نسبة الضخ مع طاقة الضخ P_p المعطاة إلى الوسط الليزري الفعال .

وبما أن الطاقة E المختزنة ضمن المرنان يمكن وصفها كجداء بين كل من كثافة الفوتونات p وحجم المرنان V وكذلك طاقة الفوتون الناتج عن الانتقال بين السويتين E_2 و E_1 حيث تحدد طاقته بالعلاقة :

$$\Delta E_{21} = E_2 - E_1 = h\upsilon_{21}$$

وبالتالي فإن العلاقة التي تعبر عن الطاقة المختزنة في المرنان تأخذ الشكل :

$$E = p \cdot V \cdot \Delta E_{21} = p \cdot V \cdot h\upsilon_{21} \qquad (٣-٦٣)$$

وطاقة الخرج الليزرية هي عبارة عن الجزء من الطاقة المختزنة في المرنان الذي يغـادر المرنان في واحدة الزمن .

وفي الحالة التي يكون فيها عمل الليزر مستقراً يبقى محتوى المرنان من الطاقة ثابتاً لأنه يتم التعويض عن الفوتونات التي تغادر المرنان بواسطة عملية الإصدار القـسري الناتجة عن الوسط الليزري الفعال . وانطلاقاً من ذلك تعطى طاقة الخـرج الليزريـة بالعلاقة :

$$P_A = \frac{E \cdot T}{\tau_R} \qquad (٣-٦٤)$$

حيث: T هي عبارة عن نفوذية مرآة المرنان (المرآة التي تسمح لأشعة الليزر بمغادرة المرنان والتي تكون نسبة عكسها للأشعة غير تامة).

τ_R الزمن الذي يستغرقه الشعاع الضوئي (أو الفوتونات) لإتمـام دورة كاملة ضمن المرنان.

نعوض العلاقة (**٣-٦٣**) في العلاقة(**٣-٦٤**) فنجد أن :

$$P_A = \frac{p \cdot V \cdot \Delta E_{21} \cdot T}{\tau_R} \qquad (٣-٦٥)$$

وإذا عوضنا عن p بقيمتها من العلاقة (**٣-٦٢**) نجد أن :

$$P_A = \Delta E_{21} \cdot V \cdot n_{tot} \cdot T \cdot (W_p - W_{th}) \cdot \frac{\tau_{ph}}{\tau_R} \qquad (٣-٦٦)$$

والمقدار $(\frac{\tau_{ph}}{\tau_R})$ يمثل قيمة التخامد أو التناقص في الفوتونات خـلال دورة كاملـة واحدة لهذه الفوتونات ضمن المرنان وهذا التناقص ينتج عن سببين : الأول جزء مـن الفوتونات T الذي ينفذ من مرآة المرنان على شكل أشعة ليزرية والثاني الخـسارة في الفوتونات L الناتجة عن الامتصاص والتشتت والانعراج ......

ويمكن التعبير عن ذلك بالعلاقة التالية :

$$\frac{\tau_{ph}}{\tau_R} = \frac{1}{T + L} \qquad (٣-٦٧)$$

حيث : T تمثل الأشعة النافذة من المرنان .

L تمثل مجموع الخسارات الناتجة عن الامتصاص والتشتت والانعراج .

نعوض العلاقة (**٣-٦٧**) في العلاقة (**٣-٦٦**) فنحصل على :

$$P_A = \Delta E_{21} \cdot V \cdot n_{tot} \cdot (W_p - W_{th}) \cdot \frac{T}{T + L} \qquad (٣-٦٨)$$

كما أن الجداء $(n_{tot} . V = N_{tot})$ يعبر عن عدد الإلكترونات في الحجم الكلّي للوسـط الليزري الفعال.

ومن أجل تحقيق نسبة الضخ W_p ، يجب إعطاء طاقة للوسط الليزري الفعـال وهذه الطاقة تتناسب مع عدد الإلكترونات في الحجم الكلّي للوسط الليزري الفعـال وبفرق الطاقة $\Delta E_{٣٠}$ والذي يمثل الفرق بين السوية الأساسية $E_{٠}$ والسوية العليا التي يتم ضخ الإلكترونات اليها $E_{٣}$ وكذلك مع احتمال الانتقال $W_{٠٣}$ ويمكن التعـبير عن ذلك بالعلاقة :

$$P_p = n_{tot} \cdot V \cdot \Delta E_{30} \cdot W_{03} \qquad (٣-٦٩)$$

ويمكننا هنا تعريف المردود الكوانتي لعملية الضخ الضوئي ***(quantum efficiency for***

بأنه النسبة بين طاقة الضخ الفعلية التي تؤدي إلى انتقالات بين السويتين **Pumping)** E.
و E_3 وطاقة الضخ المعطاة إلى الوسط الليزري الفعال .

وانطلاقاً من تعريف فعالية أو مردود عملية الضخ الضوئي نجد أن :

$$\eta = \frac{W_p}{W_{03}} \quad \Rightarrow \quad W_{03} = \frac{W_p}{\eta} \qquad (٣-٧٠)$$

بالتعويض في العلاقة (**٣-٦٩**) :

$$P_p = n_{tot} \cdot V \cdot \Delta E_{30} \cdot \frac{W_p}{\eta} \qquad (٣-٧١)$$

وبطريقة مشابهة يمكن استنتاج العلاقة التي تعطي طاقة الضخ عند قيمـة العتبـة P_{th} حيث:

$$P_{th} = n_{tot} \cdot V \cdot \Delta E_{30} \cdot \frac{W_{th}}{\eta} \qquad (٣-٧٢)$$

من العلاقة (**٣-٧١**) يمكن حساب نسبة الضخ :

$$W_p = \frac{\eta \cdot P_p}{n_{tot} \cdot V \cdot \Delta E_{30}} \qquad (٣-٧٣)$$

ومن العلاقة (**٣-٧٢**) يمكن حساب نسبة الضخ عند قيمة العتبة :

$$W_{th} = \frac{\eta \cdot P_{th}}{n_{tot} \cdot V \cdot \Delta E_{30}} \qquad (٣-٧٤)$$

وللحصول على العلاقة التي تعطي طاقة الخرج الليزرية نعوض قيم W_p و W_{th} من العلاقتين (**٣-٧٣**) و (**٣-٧٤**) في العلاقة (**٣-٦٨**) فنجد أن:

$$P_A = \eta \cdot \frac{\Delta E_{21}}{\Delta E_{30}} \cdot \frac{T}{T+L} \cdot \left(P_p - P_{th}\right) \qquad (٣-٧٥)$$

وهذه العلاقة تكون محققة دائماً من أجل $(P_p \geq P_{th})$ ، أما من أجل قـيم $(P_p < P_{th})$

فان طاقة الخرج الليزرية تكون معدومة : $(P_p = ٠)$.

ومن أجل قيم لطاقة الضخ P_p أكبر من قيمة العتبة P_{th} تكون العلاقة بين طاقـة الخرج الليزرية P_A وطاقة الضخ P_p خطية متزايدة كما هو موضح بالشكل**(٣ - ٨)** وميل المستقيم الناتج يدعى درجة التأثير التفاضلية وهي تمثل مقادير مميزة ومحددة لليزر وتعطى بالعلاقة :

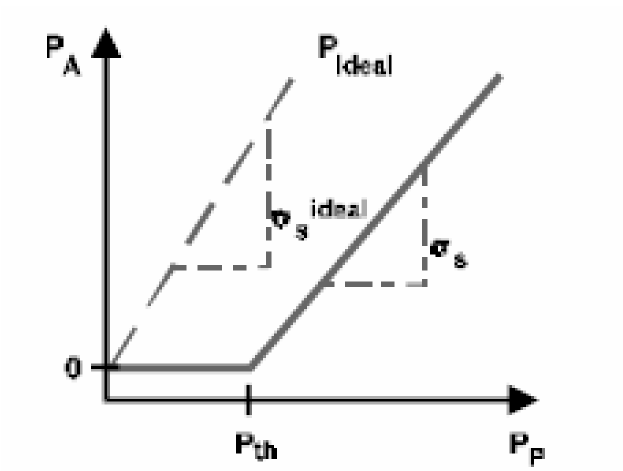
$$\sigma_s = \eta \cdot \frac{\Delta E_{21}}{\Delta E_{30}} \cdot \frac{T}{T+L} \qquad (٣\text{-}٧٦)$$

وفي الحالة الخاصة التي تمثل الليزر المثالي حيث يكون مجموع الخسارات الناتجـة عن المرنان معدومة (مثل االامتصاص،التـشتت،الانعراج) أي أن $(L = ٠)$ تكـون درجة التأثير التفاضلية في هذه الحالة :

$$\sigma_s^{ideal} = \eta \cdot \frac{\Delta E_{21}}{\Delta E_{30}} \qquad (٣\text{-}٧٧)$$

بالإضافة إلى ذلك يكون في حالة الليزر المثالي $(W_{th} = ٠)$ وفقاً للعلاقة **(٣-٥٢)** لأن:

$$n_{th} = \frac{1}{\sigma \cdot c \cdot \tau_{ph}} = 0 \qquad (٣\text{-}٧٨)$$



الشكل (٣ ــ ٨)

لأنه في هذه الحالة يكون τ_{ph} ذات قيمة كبيرة جداً وانطلاقاً من ذلك سـوف يكون $(P_{th}=\cdot)$ وفقاً للعلاقة (**٣-٧٢**) وبالتالي سيكون الخط البياني الـذي يمثـل تابعية طاقة الخرج P_A لطاقة الضخ P_p منطلقاً من نقطة الصفر في حالة الليزر المثـالي كما هو في الشكل السابق .

وهناك عوامل أخرى تؤثر في طاقة الخرج الليزرية منها النسبة من حجم الوسط الليزري الفعال التي تساهم في تضخيم الإشعاع وهنا يمكن إدخال تعبير "حجم الضخ" وهو الحجم من مادة الوسط الليزري الفعال الذي يتعريض لتـأثير حقـل الإشـعاع الخارجي أثناء عملية الضخ ، بينما تعبير " حجم الإنماط " يمثل الحجم الذي تشغله إنماط الليزر ضمن مادة الوسط الليزري الفعال .

ويمكن التأثير على كل من حجم الضخ وحجم الإنماط من خـلال اختيـار تقنيات بصرية لتركيز أشعة الضخ على كامل الوسط الليزري الفعـال أو التـصميم الهندسي والبصري الملائم للمرنان . وفي الحالة المثالية يجب أن يكون حجم الضخ أكبر من حجم الإنماط.

ومن جهة أخرى تتعلق طاقة الخرج الليزرية بمسار الأشعة ضمن المرنان لأنـه كلما كان المسار للأشعة ضمن المرنان أطول معبراً عنه بعدد الـدورات للفوتونـات ضمن المرنان ساهم ذلك في زيادة طاقة الخرج. ويمكن المساهمة في زيادة مسار الأشعة ضمن المرنان من خلال اختيار النموذج الملائم للمرنان وكذلك درجة تقعـر مرايـا المرنان أو المسافة بينهما مع الأخذ بعين الاعتبار أن المسافة بين المرايا في حالة المرنـان ذي المرايا المقعرة ليست اختيارية وإنما يجب أن تحدد بدقة كبيرة وهـذا ماسندرسـه لاحقاً.

كما أن النسبة بين طاقة الفوتونات الناتجة عن الانتقال الليزري $\Delta E_{٢١}$ إلى طاقة فوتونات الضخ $\Delta E_{٣٠}$ تدعى درجة الفعالية الكوانتية، وتكون قيمتها في حالة ليـزر

النيوديميوم-ياغ مثلاً: $\frac{\Delta E_{21}}{\Delta E_{30}} = \frac{810\ nm}{1064\ nm} = 0,76$ ، ومن أجل الحصول على أفضل قيمة لطاقة الخرج الليزرية عند طاقة ضخ محددة يجب أن تكون درجة التأثير σ_s المعطاة بالعلاقة (**٣-٧٦**) قريبة جداً من درجة التأثير σ_s^{ideal} في حالة الليزر المثالي. وبما أنه لايمكن تغيير قيم كل من η ، ΔE_{21} أو ΔE_{30} لأن هذه القيم تكون محددة في نموذج ليزري ، لذلك تبقى الإمكانية الوحيدة هي جعل قيمة النسبة $\frac{T}{T+L}$ قريبة جداً من الواحد، وهذا لايمكن تحقيقه من خلال زيادة نفوذية مرآة المرنان بحيث نجعل $(T >> L)$ لأنه مع ازدياد النفوذية التي تسمح بخروج أشعة الليزر سوف يتطلب ذلك زيادة في طاقة ضخ العتبة P_{th} مما يؤدي إلى تناقص في طاقة الخرج الليزرية ، وذلك حسب العلاقة (**٣-٧٥**) . لذلك تبقى الطريقة الأفضل هي جعل قيمة L أصغر ما يمكن بشكل مستقل عن قيمة T وهذا يتعلق بخصائص المرنان وأيضاً بالخسارة الناتجة عن المرنان وكذلك بنوعية الوسط الليزري الفعال والخسارة التي تنتج بسبب الامتصاص على سطح المرايا . وهناك صعوبات كبيرة أمام العلماء في إيجاد صيغة رياضياتية لتحديد هذه العوامل بدقة، لذلك يتم اللجوء عادة إلى الطرق التجريبية لتحديد درجة الترابط بين مرايا المرنان وتحسين خصائصه لتكون الخسارة أقل مايمكن، وذلك من خلال قياس طاقة الليزر كتابع لكل من T و L .

٣-١٠- الحلول التابعة للزمن لمعادلات النسبة لليزر رباعي السوية :

حتى الآن ناقشنا حلول معادلات النسبة عند عمل الليزر بشكل مستقر حيث حصلنا على علاقات تصف عمل الليزر في حالة التوازن . ولكن عند التشغيل العملي لأجهزة الليزر تظهر لدينا انزياحات عن وضع التوازن وكلما كان الانزياح كبيراً كلما أدى ذلك إلى ازدياد التأثير السلبي على عمل الليزر.

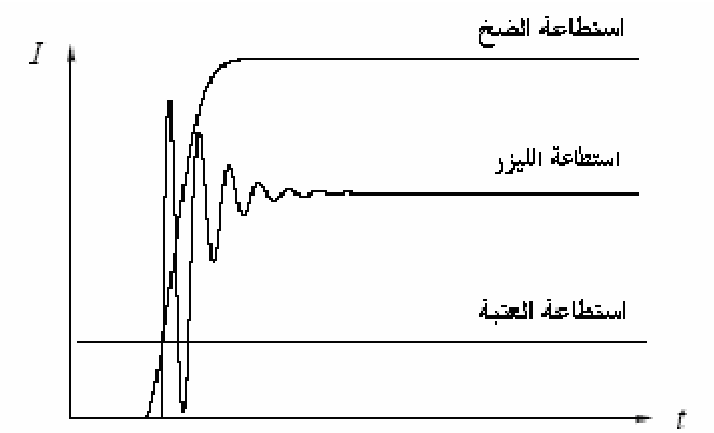
وتظهر هذه الانزياحات عن وضع التوازن والتي تدعى أحياناً إضطرابات نتيجة

للتغير في شدة طاقة الضخ المعطاة من المنبع الضوئي أو عن الاضطرابات الميكانيكيـة الخفيفة التي يتعريض لهل المرنان مثل الاهتزازت أو التأثير الحراري....

ويجب التمييز بين الانزياحات الصغيرة والانزياحات الكبيرة لأن لكل منـهما تأثيراً مختلفاً على عمل الليزر.

في حالة الانزياحات الصغيرة عن وضع التوازن يؤدي إلى تغـير في انعكـاس إسكان سويات الطاقة وأيضاً إلى تغير في كثافة الفوتونات وهذا يعني أنه عندما تكون $(\delta p << p\ ,\ \delta n << n)$ فان ذلك يؤدي إلى اهتزازات توافقية متخامدة لكل من n و p حيث يتلاشى تأثير هذه الانزياحات بعد فترة قصيرة من بدء عمل الليزر ليستمر عمله بعد ذلك بشكل مستقر .

أما في حالة الانزياحات الكبيرة عن وضع التوازن ينتج لدينا في هـذه الحالـة اهتزازات لاتوافقية غير متخامدة لطاقة الخرج الليزرية وهذه الحالة تؤدي إلى ظهـور قمم كبيرة على شكل نتوءات ***(Spikes)*** أي أن طاقة الخرج الليزرية تظهر على شكل قمم متعاقبة وتدعى هذه الظاهرة التوالد النتوئي ***(Spiking)*** كما هي موضـحة في الشكل(**٣-٩**).



الشكل (٣ – ٩) ظاهرة التوالد النتوئي

وفي هذه الحالة يمكن لطاقة القمـة الأولى ***(initial Spike)*** أن تفـوق

القيمة المستقرة لطاقة الخرج الليزرية بعدة مراتب تصل أحياناً حتى آلاف المرات مما يؤدي إلى تخريب سطوح مكونات وأجزاء الليزر كالمرايا أو حتى تخريب مادة الوسط الليزري الفعال كتخريب بلورة النيوديميوم-ياغ مثلاً في ليزر النيوديميوم-ياغ . ومثل هذه الظاهرة تقود أحياناً إلى حالة التدمير الذاتي لليزر عند بدء عملية التشغيل . والانزياحات الكبيرة عن وضع التوازن تظهر عادة عند بدء عملية تشغيل الليزر أو عند بدء عملية الضخ الضوئي . وهذه الظاهرة تلاحظ غالباً في ليزرات الجسم الصلب .

كما أنه لايمكن إيجاد حلول لمعادلات النسبة إلا بالاعتماد على البرمجيات ومساعدة الحاسوب ويعتمد وصف هذه الحلول على الطرق الكيفية أو النوعية ***(qualitative)*** كما يلي :

عند بدء عملية الضخ ($t = ٠$) لايوجد عملياً أية فوتونات ضمن المرنان مادامت طاقة الضخ لم تبلغ قيمة طاقة ضخ العتبة ، وبالتالي يبدأ حقل الفوتونات بالتشكّل ضمن المرنان عندما تصل قيمة انعكاس إسكان سويات الطاقة إلى قيمة العتبة . ولكن بسبب الفترة الزمنية التي تحتاجها الفوتونات لاتمام دورة كاملة ضمن المرنان يمكن لكثافة الفوتونات أن تصل إلى حالة التوازن خلال هذه الفترة الزمنية .

ومن جهة أخرى تزداد أيضاً عملية الانعكاس بشكل خطي متزايد مع الزمن حتى تتجاوز قيمة الانعكاس عند العتبة والتي تؤثر بدورها في ازدياد كثافة الفوتونات لتؤدي بالنهاية إلى انطلاق الليزر . ولكن بما أن الإصدار القسري الناتج عن عمل الليزر سوف يؤدي إلى انخفاض في انعكاس إسكان سويات الطاقة بشكل سريع ليصل إلى قيمة أدنى من قيمة العتبة مما يسبب في تعطيل حقل الإشعاع ضمن المرنان أي إلى تناقص في شدة الأشعة الليزرية وهذا يؤدي بدوره إلى توقف الليزر عن العمل حتى تقوم عملية الضخ بإثارة الذرات من جديد للوصول إلى حالة انعكاس في إسكان سويات الطاقة ومن ثم لتبدأ أشعة الليزر بالازدياد من جديد وهكذا تعود العملية لتبدأ من جديد ولكن يتواجد الليزر في هذه الحالة تحت العتبة بمقدار بسيط وبالتالي يكون

مقدار الطاقة الذي يجب أن يعطى لتحقيق عملية الانعكاس أقل من المرة التي سـبقته. وهكذا يعود الليزر ليعمل ضمن حالة التوازن .

٣-١١- عمليات الضخ:

كما هو معلوم فإنه في الشروط العادية ، تتوزع الإلكترونات في المنظومـات الذرية والجزيئية وفقاً لقانون ماكسويل – بولتزمان بحيث تكون السويات الأساسـية مشغولة دائماً يالإلكترونات بنسبة أكبر بكثير من السويات العليا . ولعكـس هـذه الحالة لابد من تأثير خارجي على هذه المنظومات الذرية والجزيئية وبالتالي فإن الطريقة أو الآلية التي تثار بواسطتها سويات الطاقة تعتبر مسألة هامة وذلك نسبة للدور الذي تلعبه في عملية الحصول على الأشعة الليزرية .

فعلى سبيل المثال تكون عملية الحصول على انعكاس إسكان سويات الطاقة في الليزر ذي سويات طاقة أربعة أكثر سهولة في الحالات التالية :

- إذا كان عمر السوية الليزرية العليا ($E_٢$) أي السوية الـتي يحـدث منـها الانتقال الليزري كبيراً جداً لدرجة يمكن اعتبار هذه السوية مستقرة .
- إذا كان عمر السوية الليزرية السفلى ($E_١$) أي السوية التي يحدث اليهـا الانتقال الليزري صغيراً .
- عندما يكون احتمال الانتقال بين السوية الأساسية والسوية المثارة الأعلـى أي الانتقال ($E_. \rightarrow E_٣$) كبيراً نتيجة امتصاص الطاقة من مـصدر طاقـة خارجي يؤثّر على المنظومة الذرية أو الجزيئية.
- عندما يكون عمر السوية المثارة الأعلى ($E_٣$) صغيراً جداً مما يسمح بانتقال الإلكترونات بسرعة كبيرة إلى السوية الليزرية العليا ($E_٢$) .

وبشكل عام يتوافر عدد كبير من المنظومات الذرية والجزيئية التي تمتلك سويات

طاقة تتحقق فيها الحالات السابقة والتي يمكن استخدامها كوسط ليـزري فعـال في العديد من الليزرات المختلفة .

ويمكن التمييز بين عدة عمليات مختلفة للضخ منها :

- الضخ الضوئي (الضخ بواسطة موجة كهرطيسية)
- الضخ بواسطة التصادمات (الضخ بواسطة الانفراغ الكهربائي)
- الضخ الكهربائي (الضخ بواسطة مرور تيار كهربائي)
- الضخ الكيميائي (الضخ بواسطة تفاعل بين ذرات أو جزيئات)

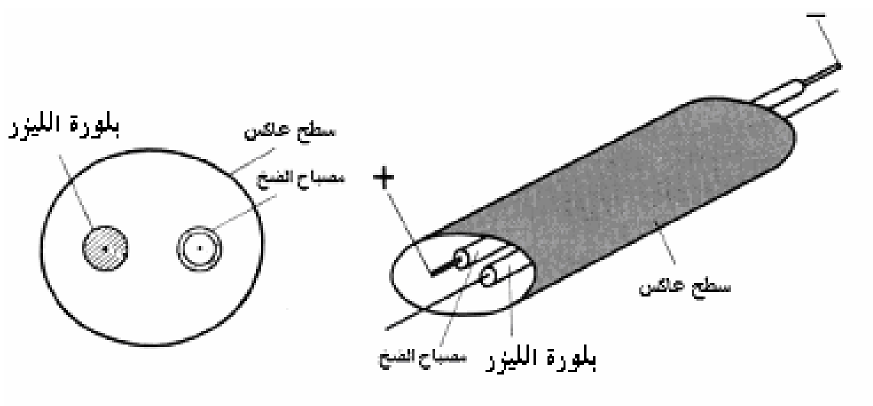
٣-١١-١- الضخ الضوئي (الضخ بواسطة موجة كهرطيسية):

تستخدم هذه الطريقة للضخ في الذرات التي تتألف من ثلاثة مستويات للطاقـة أو أكثر $(E_1, E_2, E_3.....)$ حيث توجه إلى هذه الذرات أشعة كهرطيسية ذات تردد يتوافق مع تردد الانتقال بين السوية الأساسية E_1 والسوية العليا E_3 فيتغير بذلك توزع الإلكترونات على السويات الذرية للحصول على حالة انعكـاس في إسـكان سويات الطاقة . وبعد ذلك يمكن للذرة المثارة أن تنتقل إلى سوية طاقة أدنى ويترافـق هذا الانتقال بإصدار إشعاع (فوتون) أو أن تصطدم مع ذرات أخرى مما يـؤدي إلى فقدان طاقتها بشكل غير مشع . وفي الحالة التي يكون فيها تردد الإشعاع الصادر عن الذرة مساوياً إلى تردد الإشعاع الذي امتصته فإن الإشعاع في هـذه الحالـة يـدعى الإشعاع التجاوبي ***resonance Radiation*** . ولكن في الحالة العامة تكون الانتقالات في الذرات المثارة إلى سويات طاقة أخفض من السوية المثارة ولكن ليس بالضرورة إلى السوية الأساسية التي انتقلت منها بعد امتصاصها للطاقة وفي هذه الحالة تمتلك الأشعة الصادرة ترددات أصغر من تردد الإشعاع التجاوبي .

وتعتبر طريقة الضخ الضوئي من الطرق الملائمة جداً في ليزرات الجسم الصلب وكذلك في الليزرات الصباغية والسبب في ذلك هو أن التعريض في خطوط الامتصاص

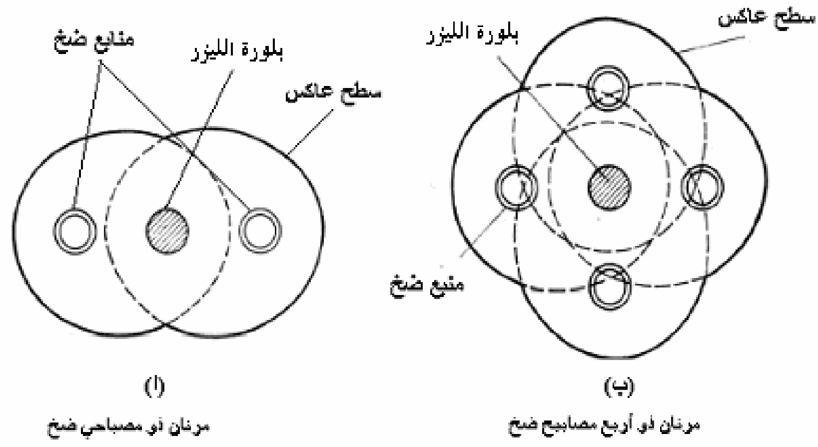
الطيفية للمواد الصلبة والسائلة يسمح بالاستفادة من حزم الضخ الضوئية بدلاً من سويات الضخ وذلك على عكس الليزرات الغازية حيث تمتلك الغازات خطوط امتصاص ذات عرض طيفي صغير .

ومن جهة ثانية فإن التصميم التقني عند استخدام طريقة الضخ الضوئية يكون أكثر سهولةً في ليزرات الجسم الصلب ، فيمكن مثلاً وضع مصباح الضخ بموازاة قضيب الوسط الليزري الفعال ليكونا على شكل قضيبين متوازيين يوضعان داخل مرنان سطوحه الداخلية عاكسة للأشعة كما في الشكل **(٣-١٠)** .



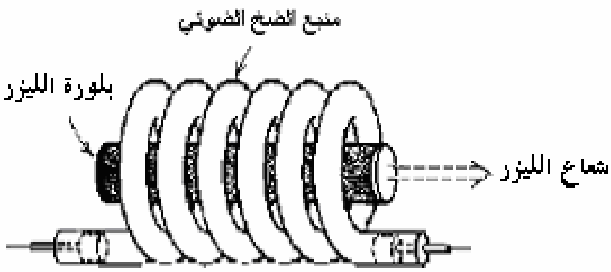
الشكل(٣-١٠)

وقد يأخذ المرنان أشكالاً أو تصاميم مختلفة فقد يكون على شكل أسطوانة دائرية أو على شكل أسطوانة إهليلجية كما يمكن في بعض الحالات استخدام عدة مصابيح ضخ ضوئية في ليزر واحد توضع في مرنان ذي تصميم خاص كما في الشكل **(٣-١١)** .



الشكل (٣-١١)

وفي بعض الحالات الأخرى يمكن أن يلتف مصباح الضخ على شكل حلـزوني حول قضيب الوسط الليزري الفعال كما في الشكل **(٣-١٢)**.



الشكل (٣-١٢)

والغاية من كل هذه التصاميم المختلفة للمرنان هي العمل على تركيز أكبر نسبة ممكنة من أشعة الضخ الضوئية الصادرة عن منبع الضخ على مادة الجسم الصلب الـتي تمثّل الوسط الليزري الفعال من خلال عملية الانعكاس التي تعاني منها أشعة الـضخ على السطوح الداخلية العاكسة للمرنان .

والحالة المثالية لعملية الضخ الضوئي هي أن تكون طاقة الأشعة الساقطة علـى مادة الوسط الليزري الفعال تساوي طاقة الأشعة الصادرة عنه وهذا يعني أن النسبة بين قيمة هاتين الطاقتين تساوي الواحد . وهذه النسبة تعبر عن كفاءة التحويل أو نـسبة التحويل . ولكن في الواقع تكون هذه النسبة أصغر من الواحد لأن انعكاسية السطوح الداخلية للمرنان لاتكون ١٠٠ % كما أن هناك ضياعاً في أشـعة الـضخ بـسبب عمليات التبعثر والإنعكاسات التي تؤدي إلى سقوط أشعة الضخ على نقـاط خـارج الوسط الليزري الفعال . وهناك سعي دائم من أجل اختيار تصاميم ملائمة للمرنـان بحيث تتوافق خواصه الهندسية والتقنية مع عملية الضخ المستخدمة .

ويتم تشغيل مصابيح الضخ من خلال ربطها مع وحدة تغذية كهربائية لتـأمين طاقة الانفراغ الكهربائي للغازات التي تملأ هذه المصابيح .

ويمكن استخدام منابع ضوئية مختلفة منها

- المصابيح الكهربائية ذات الاستطاعات العالية كما هـو الحـال في ليزرات الجسم الصلب .
- الليزرات التي تستخدم في عملية ضخ الليزرات الصباغية .

وعند اختيار مصابيح الضخ الضوئية يجب مراعاة أن تكون الأشعة الكهرطيسية الصادرة عنها ذات توزع طيفي للأطوال الموجية ملائمة لخطوط امتصاص مادة الوسط الليزري الفعال ، كما يجب أن تمتلك منابع الضخ استطاعة ضخ عالية تتناسـب مـع طاقة الضخ عند العتبة .

٣-١١-٢- الضخ بوساطة التصادمات (الضخ بوساطة الإنفراغ الكهربائي):

تعتمد هذه الطريقة في إثارة سويات الطاقة للـذرات أو الجزيئـات بواسـطة عمليات تبادل للطاقة غير مشعة (أي لاتترافق بإصدار أشعة ضوئية) . وتحدث هذه العمليات عندما تكون المـواد في حالتـها الغازية وذلك نتيجة التـصادمات بـين

ذرات الغاز مع بعضها البعض والتي تترافق مع انتقال طاقة إحدى الذرات إلى ذرة أخرى مما يؤدي إلى توزع جديد لإلكترونات هذه الذرات على سويات الطاقة المختلفة وفقاً للطاقة التي امتصتها نتيجة التصادم .

ولكن يجب التمييز بين نوعين من التصادمات :

أ- تصادمات مرنة : يؤدي هذا النوع من التصادمات إلى تغير الطاقة الحركية للذرات أو الجزيئات المتصادمة بينما تبقى الطاقة الداخلية (الكامنة) لكل ذرة أو جزيئة ثابتة ولايطرأ عليها أي تغيير بعد عملية التصادم .

ب- تصادمات لامرنة : وفي هذا النوع من التصادمات يحدث انتقال للطاقة الحركية للذرات والجزيئات المتصادمة إلى طاقة كامنة لإحدى الذرتين المتصادمتين أو لكلتيهما . لذلك فإن التصادمات اللامرنة هي التي تساهم في تحديد عملية توزيع إلكترونات الذرات على سويات الطاقة المختلفة .

ولكن يجب التنويه هنا إلى توزع الذرات في حالة التوازن وفقاً لسرعاتها كما وجدنا سابقاً عند دراسة تعريض الخطوط الطيفية والذي يدعى توزع ماكسويل والذي يتحدد من خلال التصادمات المرنة والتصادمات اللامرنة .

كما أنّ التصادمات اللامرنة تقسم إلى نوعين يعرفان باسم التصادمات من النوع الأول حيث تتراوح مساحة المقطع الفعال لهذا النوع بين : $(\sigma_1 \approx 10^{-14} \ldots\ldots 10^{-16}\ cm^2)$ ، والتصادمات من النوع الثاني و التي تتراوح مساحة مقطعها الفعال بين $(\sigma_2 \approx 10^{-16} \ldots\ldots 10^{-18}\ cm^2)$.

وفي التصادمات من النوع الأول تتحول الطاقة الحركية للذرات إلى طاقة داخلية كامنة بينما في التصادمات من النوع الثاني يحدث العكس فتتحول الطاقة الداخلية إلى طاقة حركية .

ويمكن الاستفادة من التصادمات من النوع الأول في عملية الانفراغ الكهربائي التي تحدث ضمن المصابيح الغازية حيث تصطدم الإلكترونات المسرعة مع الذرات أو

الجزيئات الغازية ويترافق ذلك بانتقال الطاقة الحركية لهذه الإلكترونـات إلى طاقـة داخلية في الذرات والجزيئات وتؤدي إلى نقلها إلى سويات مثارة . كما يمكن أيـضاً استبدال الإلكترونات بشوارد كهربائية يتم تسريعها تحت تأثير حقل كهربائي خارجي قوي لتصطدم بعد ذلك مع الذرات والجزيئات الغازية وإثارتها .

وتترافق التصادمات اللامرنة بعملية انتقال طاقة بين الجسيمات المتصادمة وقـد يكون انتقال هذه الطاقة إما بشكل كلّي أو جزئي . أي أنّ إحدى الجسيمات تعطـي طاقتها الداخلية كاملةً أو جزءٍ منها إلى الجسيمة الأخرى أثناء التصادم مما يـؤدي إلى زيادة طاقتها الحركية لأن جزءاً من طاقة الإثارة يتحول إلى طاقة حركية . ومن هنـا يجب السعي دائماً إلى انتقاء تصادمات تؤدي إلى تحول الجزء الأكبر من الطاقة المتبادلة إلى طاقة إثارة مع تناقص الجزء من الطاقة الذي يتحول إلى طاقة حركية .

وتعتبرطريقة الضخ بواسطة التصادمات من أكثر الطرق استخداماً في الليزرات الغازية وكمثال على ذلك ليزر غاز الهليوم – نيون .

ويمكن أن تتم عملية التصادمات :

إما بطريقة **الانفراغ الذا**تي ، حيث تتولّد حوامل الشحنات الكهربائية (الإلكترونات والإيونات) ذاتياً خلال عملية الانفراغ . وهذا النوع من الانفراغ هو الأكثر شيوعاً واستخداماً في أغلب الليزرات الغازية وهذه الطريقة من الانفراغ تعتمد بشكل عـام على الانفراغ بوساطة حقل كهربائي مستمر أو على شكل نبضات .

أو بطريقة **الانفراغ غير الذا**تي ، حيث تتولّد حوامل الـشحنات تحـت تـأثيرات خارجية مثل القذف بالإلكترونات المسرعة أو من خلال التأين الـضوئي بوسـاطة إسقاط أشعة فوق بنفسجية .

كما يمكن أن تكون التصادمات بين ذرات من نفس النوع وبالتالي فإن إثـارة هذه الذرات يكون عبر تصادمها مع الإلكترونات المسرعة . أو تصادمات بين نوعين مختلفين من الذرات بحيث تكون إحداهما في الحالة المثارة بينمـا الأخـرى في الحالـة

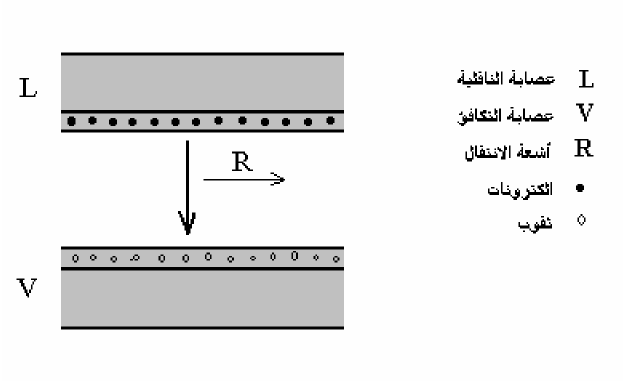
الأساسية وبعد التصادم يحدث انتقال للطاقة بينهما فتصبح الذرة المثـارة في حالتـها الأساسية والذرة الأخرى تصبح في حالتها المثارة .

ولابد من التنويه أنه عند دراسة التصادمات المرنة لإثارة الذرات أو الجزيئـات يجب أخذ مقدار الطاقة المتبادلة أثناء التصادم بعين الاعتبار وذلك لأن هناك طاقـات تعادل فرق الطاقة بين السويات الإلكترونية التي يحدث بينها الانتقال في الـذرات أو الجزيئات. لذلك عند انتقال طاقة من هذه المرتبة من ذرة إلى أخرى سـوف تحـدث عملية إثارة ومن ثم تعود الذرة إلى الحالة الأساسية من خلال عملية إصـدار ضـوئي تدعى عملية التألق الضوئي *(Luminescence)* . كما أن هناك طاقات تعادل فـرق الطاقة بين السويات الاهتزازية أو الدورانية في الجزيئات . وتكون قيمة الطاقة في هذه الحالة أصغر من طاقة السويات الإلكترونية وبالتالي فإن الإصدار الناتج عنها يكون ذا طاقة من مرتبة طاقة الأشعة ماتحت الحمراء .

٣-١١-٣- الضخ الكهربائي (الضخ بوساطة مرور تيار كهربائي) :

وهذه الطريقة في الضخ تعتبر نموذجية في ليزرات أنصاف النواقـل ، وتحـدث عملية الإثارة بالاعتماد على خاصية حقن حوامل الشحنات *(injection)* . وتتحقق حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة في حالة نصف الناقل عندما يكون عـدد أزواج الإلكترونات في عصابة الناقلية والثقوب في عصابة التكافؤ أكـبر مـن عـدد أزواج الإلكترونات في عصابة التكافؤ والثقوب في عصابة الناقلية عند نفس الفرق في الطاقة .

كما أنه من خلال تطبيق جهد كهربائي سوف يتحرك كل من الإلكترونات في الناقل من النوع n والثقوب في الناقل من النوع p على شكل انتقال ضمن وصلة من النوع *p-n* . والفرق في الطاقة بين الإلكترون – ثقب سوف يصدر على شكل أشعة كهرطيسية والشكل (**٣-١٣**) يوضح مخططاً بسيطاً لانتقال من النوع *p-n* .



الشكل (٣-١٣)

فعلى سبيل المثال في حالة *GaAs* يجب أن يكون تركيز الإلكترونات أكبر من القيمة $N_n > ٣،٨ . ١٠^{١٧}\ cm^{-٣}$ بينما تركيز الثقوب $N_p > ١،٢ . ١٠^{١٩}\ cm^{-٣}$ والجهد الكهربائي اللازم تطبيقه في هذه الحالة تتراوح قيمته $V = ٦.......١٠\ volts$ بينما كثافة التيار $\rho = ١٠٠......١٠^{٥}\ A/cm^{٢}$ وذلك وفقاً لنوع نصف الناقل ، طريقة العمل أو آلية التبريد .

٣-١١-٤- الضخ الكيميائي (الضخ بوساطة تفاعل بين ذرات أو (جزيئات) :

تعتبر هذه الطريقة شكلاً خاصاً من أشكال الضخ التي تستخدم في بعض أنواع الليزرات الغازية .فكما هو معلوم من الكيمياء فإن بعض التفاعلات الكيميائية بين الذرات أو الجزيئات تترافق بإنتشار حرارة ناتجة عن عملية التفاعل (*exoterm reaction*) ، حيث يستفاد من طاقة التفاعل الناتجة في إثارة السويات الإلكترونية لإحدى الذرات المشاركة في التفاعل الكيميائي . كما يمكن إثارة السويات الاهتزازية والسويات الدورانية في الجزيئات المتفاعلة .

ومن العمليات التي تحدث في هذا النوع من الضخ الكيميائي :

- تفاعلات التفكك الضوئية : في هذه التفاعلات تتفكك بعض الجزيئات

إلى مركبات ثانوية من خلال تفاعلها مع أشعة ضوئية بحيث يكون أحـد نواتج التفكك في الحالة المثارة مثل :

$$AB + h\upsilon \rightarrow A^* + B$$

وكمثال على هذا النوع من العمليات تفكك يود الميتان :

$$CH_3I \quad + \quad h\upsilon \quad \rightarrow \quad CH_3 \quad + \quad I^*$$

ويستخدم هذا التفاعل كآلية ضخ في ليزر اليود .

- تفاعلات التبادل الحرارية : حيث تتبادل الذرات مواقعها ضمن الجزيئات لإعطاء جزيئات ذات تركيب كيميائي جديد ويترافق ذلك بتحول الفرق بين طاقة الإرتباط بين الحالتين إلى طاقة تثير أحد عناصر التفاعل مثل :

$$A + BC \rightarrow AB^* + C$$

$$SO \ + CS \rightarrow CO^* + S_2$$

وكمثال على ذلك ليزر فلوريد الهيدروجين :

$$F + H_2 \rightarrow HF^* + H$$

- تفاعلات الاتحاد بين ذرات مختلفة بوجود ذرة وسيطة حيث ينـتج عـن ذلك تشكل جزيئة في الحالة المثارة :

$$A + B + M \rightarrow AB^* + M$$

حيث M عبارة عن ذرة تقوم بدور الوسيط في عملية التفاعل . ويستفاد من هذه التفاعلات بشكل خاص في إثارة السويات الإلكترونية وكمثـال علـى ذلك :

$$N + N + M \rightarrow N_2^* + M$$

$$N + O + M \rightarrow NO^* + M$$

ويتم تحفيز التفاعلات الكيميائية المختلفة السابقة إما بواسطة اللهب والحرارة أو بواسطة المصابيح الضوئية .

ولكن يجب التنبيه إلى أن عمليات الضخ الكيميائية تعتبر من العمليات الثانوية مقارنة بعمليات الضخ الأخرى ، كالضوئية أو الكهربائية . و تنبع أهميتها الخاصة من استخدامها للحصول على حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة في عدد محدد من المنظومات الذرية أو الجزيئية والتي بدورها تشكل إنطلاقة للحصول على أشعة ليزرية من ليزرات ذات خواص محددة ومن أجل استخدامات محددة أيضاً .

ويمكن فصل الجزيئات المثارة عن الجزيئات غير المثارة من خلال تطبيق حقل كهربائي خارجي يؤدي إلى انحراف كل نوع من هذه الجزيئات عن النوع الآخر بسبب تحريض العزوم الكهربائية المختلفة ضمن هذه الجزيئات . ومن ثم تقاد الجزيئات المثارة إلى المرنان حيث تقوم بإصدار طاقتها على شكل أشعة ضوئية عبر عملية إصدار عفوي أو إصدار قسري .

الفصل الرابع

المجاوبة الضوئية أو المرنان *(Resonator)*

٤-١- مقدمة:

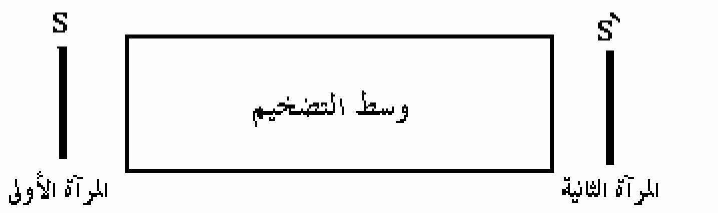
رأينا حتى الآن كيف تتم عملية الإصدار القسري ، وكيف نحقق شرط انعكاس إسكان سويات الطاقة بين السوية المثارة E_2 والسوية الأساسية E_1 . ولكن هل تكفي الموجة الواردة لإطلاق عملية الإصدار القسري ومن ثم الحصول على أشعة الليزر بواسطة تضخيم الموجة الواردة ؟ أو هل يكفي أن ينطلق فوتون عفوي من إحدى ذرات المجموعة المثارة نفسها حتى تبدأ عملية التضخيم وبأي اتجاه ستخرج أشعة الليزر مادامت الفوتونات الصادرة قسرياً ستأخذ نفس اتجاه الفوتون العفوي الأول وهو نفسه ينطلق بشكل عشوائي؟

تفرض علينا هذه الأسئلة إيجاد آلية ما نستطيع من خلالها التحكم في هذه الأشعة الصادرة من حيث الاتجاه والخصائص ، وأن نخزنها بقدر الامكان حتى نحصل على أكبر شدة ممكنة للشعاع الصادر، فمن هنا كان الاتجاه لاستعمال المرنان *(Resonator)* (المجاوبة الضوئية) والذي يساعد على تشكّل موجة مستقرة ذات تردد معين ووحيد ، ويمنع تشكّل بقية الترددات المختلفة. ولقد استخدم المرنان سابقاً لتضخيم الأمواج الكهرطيسية في المجال الميكروي ، وسوف يستخدم هنا في مجال الأمواج الكهرطيسية المرئية .

استخدمت عملية تجميع الأمواج الكهرطيسية في حيز محدد من الفراغ- سابقاً- ضمن مجال الأمواج المايكروية حيث تكون أبعاد المرنان في هذه الحالة من مرتبة الأطوال الموجية المراد تجميعها أي في مجال السنتيمتر وذلك للحصول على بعض الاهتزازات الخاصة المحددة. ولكن عند الانتقال إلى مجال الطيف المرئي تصبح الأطوال

الموجية للأشعة الكهرطيسية المرئية أصغر بكثير من أبعاد أي مرنان ممكن تحقيقه عملياً بحيث يسمح بتشكل اهتزازات خاصة محددة.

انطلاقاً من ذلك اعتمد العلماء الذين ساهموا في اختـراع الليـزر : باسـوف وبروخروف ***(Basow and Prochorow)*** من روسيا و شاولو وتاونز ***(Schaowlow and Townes)*** من الولايات المتحدة على استخدام مقياس تداخل من نوع فـابري-بيرو ***(Fabry-Perot Resonator)*** كأول مرنان وهو يتألف من مرآتين مستويتين ***S*** و ***S`*** تتوضعان بشكل متوازٍ لبعضهما البعض على مسافة ***d*** ولهمـا محـور واحـد احداهما عاكسة بنسبة ١٠٠٪ والأخرى بنسبة أقل ٩٥٪ مثلاً كما هو موضح في الشكل **(٤ - ١)**.



الشكل (٤ – ١)

ففي مجال الأمواج الكهرطيسية يأخذ المرنان شكل صندوق مستطيل الجوانـب تحسب أبعاده بدقة بالنسبة لطول الموجة الكهرطيسية المطلوب تخزينها حتى تـنعكس هذه الموجات على جوانب الصندوق وتترتب أطوارها فيصبح لدينا نظام من الأمواج المستقرة كبيرة السعة. ومعنى هذا أن الموجة تمر عدة مرات ذهاباً وإياباً فتتجمع طاقـة الموجة في حجم صغير والتي كانت ستمتد على مدى طويل لولا الانعكـاس علـى جوانب المرنان . هذه العملية ليست بحد ذاتها عملية تضخيم للموجة بل هي عمليـة تجميع لطاقة الموجة في مكان صغير الحجم فقط ، وهذا يساعد على زيادة التـضخيم الناتج عن عملية انعكاس إسكان سويات الطاقة المرتبط مع عملية الإصدار القـسري

وذلك بسبب حركة الفوتونات بين مرآتي المرنان.

لذلك إذا وضعنا الوسط الليزري الفعال ***active medium*** بين مرآتي المرنـان ، فإن الفوتون الصادر يقوم بعدد من الانعكاسات، ويصطدم بعدد كبير من الذرات في الحالة المثارة ويحثها على اصدار الفوتونات المترابطة مع بعضها البعض وتصبح الحجرة بين المرآتين مقراً لموجة مستقرة ترددها يساوي تردد الفوتون المحرض. وللحصول على أشعة الليزر يجب ألا تبقى هذه الموجة المستقرة داخل المرنان لذلك نـستخدم مـرآة عاكسة للأمواج الكهرطيسية بنسبة ٩٥٪ حيث نحصل من خلال هذه المرآة على موجة كهرطيسية هي مجموع الأمواج المنتشرة باتجاه المحور ***OX*** والعمودي علـى سـطحي المرآتين والذي يمثل المحور البصري للمرنان. بينما جميع الأمواج الأخرى التي تنتـشر وفق زوايا انحراف مختلفة عن المحور البصري للمرنان سوف تغادر المرنـان وبالتـالي الوسط الليزري الفعال بعد عدة انعكاسات على مرايا المرنان ، وهـذه الخـسارة في الفوتونات سوف تؤثر سلباً على عملية التغذية العكسية والتي تعتبر عمليـة اساسـية لاستمرار اهتزاز الليزر .

وهكذا نجد أن الفوتونات التي يكون انتشارها عمودياً على سـطح المـرآتين وموازية تماماً للمحور البصري للمرنان هي التي تؤلف فقط الموجة الليزرية المترابطـة. لذلك يجب أن يكون التضخيم الناتج عن الوسط الليزري الفعال دائمـاً أكـبر مـن الخسارة الناتجة عن الانعكاسات غير الفعالة ضمن المرنان. وهذه الخـسارة في بعـض الاهتزازات الخاصة تحدد بدورها الفترة الزمنية الوسطية لبقاء الفوتون الموافق لها ضمن المرنان، فكلما كانت الخسارة أقل كانت الفترة الزمنية الوسطية لبقاء الفوتونات ضمن المرنان أطول وهذا يؤدي إلى ازدياد احتمال أن تساهم هذه الفوتونـات في عمليـة الإصدار القسري.

من جهة أخرى لايمكن للمسافة بين المرآتين أن تكون عشوائية وإنما محـددة بدقة لأن الغاية من ذلك هي الحصول على حالة تداخل بناء وفعال بين الأمواج الواردة

والمنعكسة عن سطح المرآتين ويجب عند تداخل هذه الأمواج مع بعضها أن تؤدي إلى تشكيل موجة مستقرة وإلا فإنها سوف تفني بعضها البعض، لهذا السبب يجب أن نختار المسافة بين المرآتين بحيث تحقق شرط توليد الأمواج المستقرة داخل حيز مغلق كما هو الحال في حالة اهتزاز سلك مثلاً ، لذلك فإن المسافة بين المرآتين يجب أن تحقق العلاقة التالية:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad (٤-١)$$

حيث: n عدد صحيح.

λ طول الموجة.

وتدل العلاقة السابقة على أنه ليس بإمكاننا أن نحرض داخل المرنان سوى الأمواج ذات طول موجة محدد ووحيد λ ، لذلك عند تحديد L فإننا نحدد عملياً λ ولكن بما أنه لايمكننا أن نحدد طول الموجة λ إلا بخطأ قدره $\Delta\lambda$ فإننا نتمكن من إيجاد عدد صحيح بحيث تبقى النسبة $\frac{2L}{n}$ محققة للمتراجحة:

$$\lambda + \Delta\lambda \;\geq\; \frac{2L}{n} \;\geq\; \lambda - \Delta\lambda \qquad (٤-٢)$$

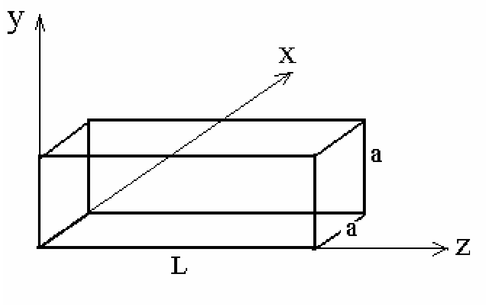
ومقياس التداخل من نوع فابري_بيرو يمثل الحالة البسيطة للمرنان الذي نضع بداخله الوسط الليزري الفعال من أجل توليد أشعة الليزر. وهناك أشكال عديدة ومختلفة للمرايا المستخدمة ولأبعاد المرنان والتي بدورها تؤثر على تردد الموجة الليزرية وتلعب دوراً هاماً في عملية استقرار الليزر .

٤-٢- الاهتزازات الخاصة (المستقرة) للمرنان:

عند دراستنا للاهتزازات الخاصة للمرنان سوف نهمل تأثير الوسط الليزري الفعال على طيف الاهتزازات الخاصة وننطلق من الشرط أنه في المرنان المغلق (على شكل صندوق) والذي له جوانب مستوية عاكسة مثالية تمتلك الاهتزازات الخاصة

متجهات العدد الموجي k وتختلف تلك الاهتزازات التي تأخذ منحى المحور البـصري للمرنان فقط بشكل بسيط عن تلك الاهتزازات الخاصة في المرنان المفتـوح والـذي يتألف فقط من مرآتين مستويتين عاكستين متقابلتين. كما نأخذ بعين الاعتبار أن كل اهتزازة خاصة مثارة سوف تمتلك فترة زمنية محددة لبقائها ضمن المرنان وهذا يعود إلى الخسارة الناتجة عن غياب جوانب المرنان . وهذه الفترة الزمنية تـؤدي إلى اخـتلاف بسيط في حقل الاهتزازات الخاصة في المرنان المغلق عنها في المرنان المفتوح ، ولكـن ضمن تقريب مقبول نفرض أن ترددات الاهتزازات الخاصة في الحالتين متقاربـة مـع بعضها البعض. وبالتالي نعتبر أن نتائج دراسة الاهتزازات الخاصة ضمن مرنان مغلـق ذي جوانب عاكسة مثالية مقبولةٌ في حالة المرنان المفتوح .

ليكن لدينا مرنان على شكل صندوق مغلق طوله L يمتـد وفـق المحـور OZ وعرضه وارتفاعه متساويان وقيمتهما a يمتدان وفق المحاور OX , OY كما هو مبـين في الشكل**(٤-٢)**.



الشكل (٤ – ٢)

إذا كان المرنان (حجرة التجاوب) من هذا الشكل ، ينتج لدينا كما هو معلوم من فيزياء الاهتزازات والأمواج معادلة الموجة ومن الشروط الحدية أمواج مـستقرة، بحيث تكون مركبات شدة الحقل الكهربائي كما يلي:

$$E_x = E_x^0 \cdot \cos(k_x \cdot x) \cdot \sin(k_y \cdot y) \cdot \sin(k_z \cdot z)$$
$$E_y = E_y^0 \cdot \sin(k_x \cdot x) \cdot \cos(k_y \cdot y) \cdot \sin(k_z \cdot z) \qquad (٤-٣)$$
$$E_z = E_z^0 \cdot \sin(k_x \cdot x) \cdot \sin(k_y \cdot y) \cdot \cos(k_z \cdot z)$$

كما أن مركبات العدد الموجي k تعطى بالعلاقات التالية :

$$k_x = m \cdot \frac{\pi}{a}$$
$$k_y = n \cdot \frac{\pi}{a} \qquad (٤-٤)$$
$$k_z = q \cdot \frac{\pi}{L}$$

حيث كل من q , n , m أعداد صحيحة .

وأن المركبات E_x^o , E_y^o , E_z^o تتحدد من الاهتزازات العرضـانية للأمـواج الكهرطيسية بالنسبة لمحور انتشارها.

كما يمكن الاستنتاج من معادلة الموجة العلاقة المعروفة التي تربط بين متجهـة العدد الموجي k والتردد الزاوي ω حيث:

$$\omega = c \cdot |k| \qquad (٤-٥)$$

وبالتالي ينتج لدينا من أجل مرنان مغلق طيف محدد من الترددات الخاصة التي تعطـى قيمتها بالعلاقة:

$$\omega = \pi \cdot c \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{q}{L}\right)^2} \qquad (٤-٦)$$

إذا انطلاقاً من العلاقة التي تصف الترددات في مرنان مغلق سـوف نـستنتج العلاقة التي تصف الترددات الناتجة في حالة المرنان المفتوح . لأجل ذلك نأخذ فقـط الاهتزازات الخاصة التي يكون منحى انتشارها موازياً أو قريباً جداً من المحور البصري للمرنان (شبه موازٍ) أي وفق المحور OZ وبالتالي يكون لدينا :

$$\begin{aligned} k_x &<< k_z = k \\ k_y &<< k_z = k \end{aligned} \tag{٤-٧}$$

ومنه نجد أن :

$$\cos(k \cdot x) \approx \frac{k_x}{k_z} = \frac{m \cdot L}{q \cdot a} << 1$$

$$\cos(k \cdot y) \approx \frac{k_y}{k_z} = \frac{n \cdot L}{q \cdot a} << 1 \tag{٤-٨}$$

$$\cos(k \cdot z) \approx 1$$

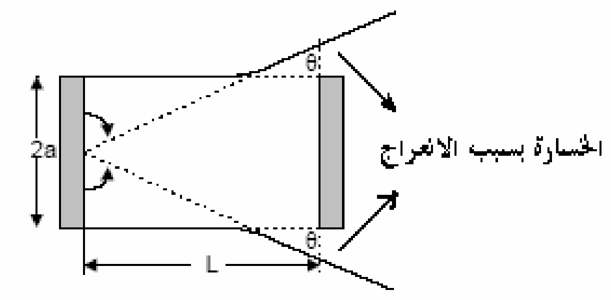
ومنه يمكن الاستنتاج أن :

$$\begin{aligned} \frac{m}{a} &<< \frac{q}{L} \\ \frac{n}{a} &<< \frac{q}{L} \end{aligned} \tag{٤-٩}$$

وإذا أخذنا ذلك بعين الاعتبار وعوضنا في العلاقة **(٦-٤)** فإنه ينتج لدينا بشكل تقريبي ترددات الاهتزازات الخاصة للمرنان الليزري من النوع فابري- بيرو العلاقـة التالية :

$$\omega = \pi \cdot c \cdot \frac{q}{L}\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{m \cdot L}{q \cdot a}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{n \cdot L}{q \cdot a}\right)^2\right] \tag{٤-١٠}$$

هذا مع العلم أنه عند اشتقاق هذه العلاقة أهملنا الخسارة الناتجة عن الانعكاسات غير الفعالة وعن انعراج الأمواج على أطراف المرآيا كما هو مبين بالشكل **(٤ – ٣)**.



الشكل (٤ ـ ٣) الخسارة بسبب الانعراج

وفي الحالة التي تكون فيها جهة انتشار الأمواج الكهرطيسية منطبقة على المحور OZ فإنه في هذه الحالة يمكن اعتبار : $m = n = ٠$ ويكون لدينا :

$$\omega = \pi \cdot c \cdot \frac{q}{L}$$

$$L = \pi \cdot c \cdot \frac{q}{\omega} \quad = \quad q \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad (٤\text{-}١١)$$

ومن هذه العلاقة يمكننا استنتاج قيمة q . ففي المجال المرئي مثلاً إذا كان L=١٠ cm وإن λ=١μm فإن قيمة q = ٢,١٠^٥ .

ومن جهة أخرى يمكن استنتاج مجال الترددات بين الاهتزازات الخاصة المتجاورة والتي تنتشر وفق المحور OZ حيث إن :

$$\omega_1 = \pi \cdot c \cdot \frac{q_1}{L}$$

$$\omega_2 = \pi \cdot c \cdot \frac{q}{L}$$

$$\Rightarrow \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = (q_2 - q_1) \cdot \frac{\pi \cdot c}{L}$$

وفي حالة الاهتزازات المتجاورة يكون : $q_2 - q_1 = 1$ وبالتالي تصبح العلاقة السابقة بالشكل :

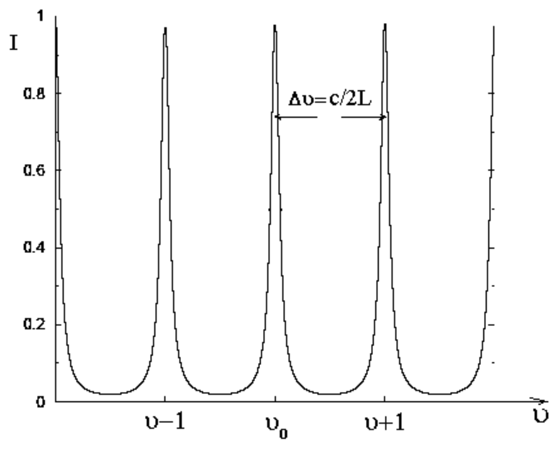
$$\Delta\omega = \frac{\pi \cdot c}{L}$$

$$\Rightarrow \Delta\upsilon = \frac{c}{2L} \qquad (٤-١٢)$$

وهذا مبين بالشكل التالي (**٤ - ٤**).

فعندما تكون المسافة بين المـرآتين العاكـستين في المرنـان L=١٠ cm مـثلاً فإن $\Delta\upsilon$=١،٥ GHz وهذا يقع ضمن مرتبة التعريض الطيفي لمنحني التـضخيم لوسـط ليزري فعال ضمن المجال المرئي للطيف.

ولكن بنية المرنان من نموذج فابري-بيرو تسمح فقط لقيم قليلة ومحددة لـ q وبالتـالي نحصل على إنماط طولية قليلة ومحددة .



الشكل (٤ – ٤)

سنبحث فيما يلي عن قيم m و n التي تكون مقبولة مع الأخذ بعين الاعتبار الخسارة الناتجة عن الانعكاس والانعراج وذلك بالنسبة لمرنان ليزري ، لذلك تؤخـذ بالاعتبار فقط الإنماط ذات القيم m و n ، والتي ماتزال داخل المرنان المفتوح ضمن الفترة الزمنية τ . إذا يمكن القول إن الانحرافات Δx , Δy وفق المحاور OX , OY التي يعاني منها شعاع ضوئي ينطلق من مركز المرنان وفق زاوية انحراف صغيرة عن المحـور

البصري للمرنان لايمكن أن تأخذ قيماً أكبر من نصف قطر المرآة $a/٢$ وذلـك بعـد الفترة الزمنية τ أي أن :

$$\Delta x_t < \frac{a}{2}$$
$$\Delta y_t < \frac{a}{2} \qquad (٤-١٣)$$

ومن أجل دورة واحدة ضمن المرنان ينتج انحراف للـشعاع الـضوئي في الاتجـاه X والاتجاه Y بالمقدار:

$$\Delta x \approx L \cdot \cos(k \cdot x) \approx \frac{m \cdot L^2}{q \cdot a}$$
$$\Delta y \approx L \cdot \cos(k \cdot y) \approx \frac{n \cdot L^2}{q \cdot a} \qquad (٤-١٤)$$

وبما أن عدد المرات التي يجتاز فيها الشعاع الضوئي المرنان ذهاباً و إياباً خـلال الفترة الزمنية τ تقدر بـ $\frac{\tau \cdot c}{L}$ مرة بحيث ينتج لدينا من العلاقات **(٤-١٤)** وبعد أخذ العلاقة **(٤-١١)** بعين الاعتبار قيم كل من m , n من أجل دورة واحدة:

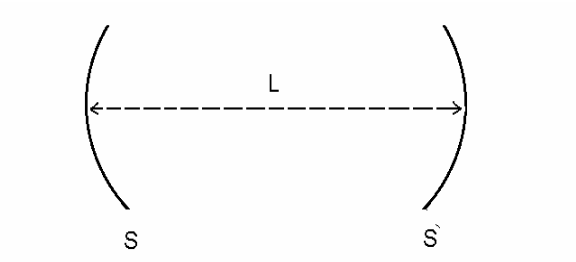
$$m < \frac{a^2}{c \cdot \lambda \cdot \tau}$$
$$n < \frac{a^2}{c \cdot \lambda \cdot \tau} \qquad (٤-١٥)$$

نستنتج من ذلك أنه بالنسبة لليزر يعتمد على مرنان من نموذج فابري-بيرو تثار فقـط اهتزازات طولانية قليلة ذات قيم مختلفة لـ q . وأيضاً اهتزازات خاصة عرضانية قليلـة ذات قيم لـ m و n صغيرة .

إن النتائج التي حصلنا عليها فيما تقدم من أجل المرنان المفتوح تؤكد الحقيقة أن المرنان في الليزر يكتسب أهمية أساسية لآلية عمل الليزر وكذلك لخـصائص الأشـعة الليزرية الناتجة . ويمكن الحصول على دراسة مفصلة عن الاهتزازات الخاصة المختلفـة ضمن المرنان الليزري إذا أخذنا بعين الاعتبار الخصائص الموجية للأشعة الكهرطيسية ،

كما أن أخذ ظاهرة الانعراج بعين الاعتبار تؤدي إلى نتائج دقيقة لحسابات توزع شدة الأشعة وكذلك الخسارة التي تعاني منها الأشعة ذات الإنماط المختلفة ضمن المرنان الليزري.

كما يمكننا بالاعتماد على مبـدأ هـويغنز ***(Huygens Principle)*** دراسـة الاهتزازات الخاصة عند انتشار الأمواج الكهرطيسية في المرنان المفتوح ، فـإذا كـان المرنان يتألف من مرآتين متقابلتين s و $s`$ وليس بالضرورة أن تكونا مستويتين ، قد تكونا مقعرتين كما في الشكل **(٤ - ٥)** .



الشكل (٤ – ٥)

تنشأ ظاهرة الانعراج بشكل عام عندما يعترض مسار الموجـة الكهرطيـسية حاجز ما كمرآة أو عدسة أو أي جسم آخر ، ويمكن دراسة هذه الظاهرة نظريـاًمن خلال حلول المعادلة الموجية التي تصف انتشار الأمواج الكهرطيسية. كما يمكن دراسة ظواهر الانعراج بالاعتماد على مبدأ هويغنز الذي يعتبر أن كل نقطة من سطح جبهـة الموجة يمكن أن تشكّل منبعاً لأمواج كروية عنصرية ، وتداخل هذه الأمواج العنصرية مع بعضها البعض يؤدي إلى تشكيل جبهة موجة جديدة. فان التحريض المتولّد في النقطة p والناتج عن تأثير جميع الأمواج الكروية العنصرية الواردة من النقطة q كما هو مبين في الشكل**(٤ – ٦)** يمكن التعبير عنه باستخدام علاقة كيرشوف ***(Kirchhoff-Formula)***:

$$V_p = -\frac{i}{\lambda}\int V_q \cdot \left(\frac{e^{ikr}}{r}\right) \cdot df \qquad (٤\text{-}١٦)$$

حيث: V_p تابع يصف سعة الموجة الكهرطيسية عند النقطة p .

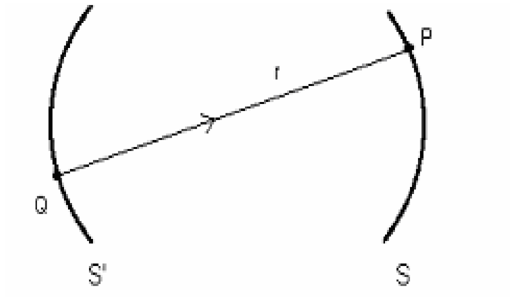
V_q تابع يصف سعة الموجة الكهرطيسية عند النقطة q .

q منبع للأمواج الكهرطيسية .

r بعد منبع الأمواج الكهرطيسية q عن النقطة p .

λ طول الموجة .

df سطح عنصري .



الشكل (٤ – ٦)

لنختر الآن جملة احداثيات بحيث يكون المحور البصري للمرنان منطبقـاً علـى المحور OZ، وبالتالي يمكن أن نصف توابع توزع سعة الموجـة عنـد النقـاط p و q بواسطة احداثياتهماعلى المحاور X و Y حيث يكون :

$$V_q = V_{(X',Y')}$$
$$V_p = V^{(1)}_{(X,Y)} \qquad (٤\text{-}١٧)$$

الدليل (١) يدل على أن التابع V_p ينشأ بعد دورة واحدة للموجة الكهرطيسية ضمن المرنان وذلك ابتداء" من النقطة q ، وبما أن الموجة الكهرطيسية تعاني خسارة عند كل عملية انعراج على أطراف المرايا داخل المرنان سيؤدي ذلك إلى تناقص في سعة الموجة بشكلٍ متتالٍ ، فإذا أخذنا دورة واحدة وعبرنا عن هذا التناقص بواسطة معامل ثابت γ فيمكن كتابة $V^{(1)}_{(X,Y)}$ بالشكل التالي:

$$V^{(1)}_{(X,Y)} = \gamma \cdot V_{(X,Y)}$$
$$\Rightarrow \quad V_p = \gamma \cdot V_{(X,Y)} \qquad (٤\text{-}١٨)$$

بتعويض العلاقتين (**٤-١٨**) و(**٤-١٧**) في العلاقة (**٤-١٦**) نجد أن:

$$\gamma \cdot V_{(X,Y)} = -\frac{i}{\lambda}\int V_{(X',Y')} \cdot \left(\frac{e^{ikr}}{r}\right) \cdot df \qquad (٤-١٩)$$

حيث أن r في هذه الحالة تعطى بالعلاقة:

$$r^2 = \left(X' - X\right)^2 + \left(Y' - Y\right)^2 + \left(Z' - Z\right)^2 \qquad (٤-٢٠)$$

والعلاقة (**٤-١٩**) تصف الاهتزازات الخاصة للمرنان الموضح بالشكل السابق.

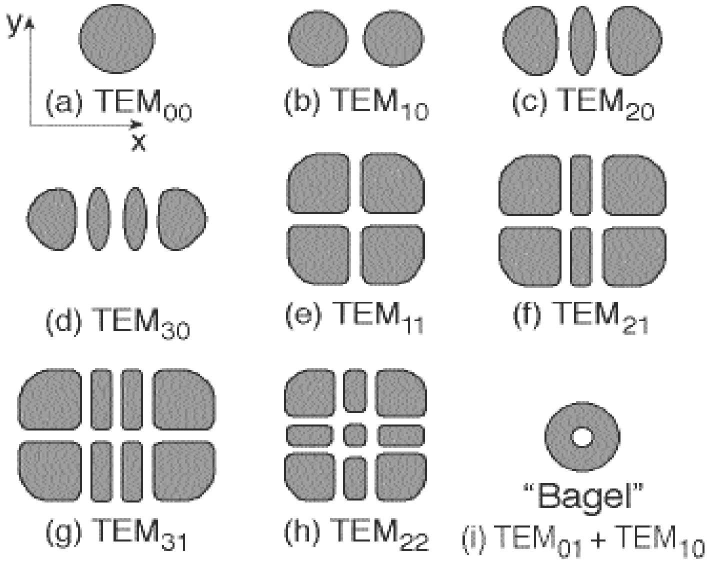
ويمثل التابع $V_{(x,y)}$ توزع حقل الأمواج الكهرطيسية الناتجة عن هذه الآهتزازات الخاصة ضمن المرنان .

أهملنا في المناقشة السابقة الخسارة الناتجة عن الانعكاسات على سطح المرايا وذلك لأن سعات الأمواج تعاني تناقصاً متجانساً على كامل سطح المرايا وبالتالي لايؤثّر ذلك على التوزع الفراغي للحقل الكهرطيسي الناتج عن هذه الأمواج .

في الواقع لايمكن إيجاد حلولٍ للتكامل المحدد بالعلاقة (**٤-١٩**) عن طريق فصل المتحولات x و y وإنما يتطلب الحل حسابات معقدة ولأجل ذلك أجريت أولى الدراسات من قبل العالمَين فوكس و لي ***(Fox and Li)*** في عام ١٩٦١ وطبقّت هذه الدراسة على أشكال مختلفة للمرنان حيث تمّ الاستنتاج أن شكل الاهتزازات الخاصة المستقرة (أو توزع الحقل في حالة الأمواج المستقرة) وكذلك الخسارة الناتجة عن الانعراج لايتعلقان بتوزع الحقل في لحظة البدء وإنما يتعلقان فقط بحالة التناظر للحقل في لحظة البدء والتي تتميز بعدد من المراكز التي تكون فيها شدة الحقل معدومة. كما أن الخسارة الناتجة عن الانعراج تكون أقل مايمكن من أجل الاهتزازات الخاصة المتناظرة والتي تنتج بدورها عن توزع ثابت للحقل ، وهذه الاهتزازات الخاصة تدعى الاهتزازات الأساسية ويمكن وصفها في أغلب الحالات باستخدام تابع توزع الشدة للحقل وفقاً لمقطع عرضي للشعاع الضوئي أي توزع شدة الحقل في مستوي عمودي على المحور البصري للمرنان . فعند توفّر الشروط التي تؤدي إلى تحريض هذه الاهتزازات الأساسية فقط ضمن الليزر عندئذ يقال إن الليزر يعمل ضمن النمط

الأساسي .

ومع ازدياد الخسارة الناتجة عن الانعراج يؤدي ذلك إلى انزياح أكبر عن حالة التناظر لتوزع الحقل عند لحظة البدء ، وهذا يؤدي بالتالي إلى تشكّل مناطق تكون فيها شدة الحقل معدومة (المراكز الصفرية). إذاً يظْهر توزع الحقل لهذه الاهتزازات الخاصة - نتيجة الانزياح عن حالة التناظر- في الاتجاه *X* وكذلك في الاتجاه *Y* مناطق تكون فيها الشدة معدومة هي عبارة عن خطوط مظلمة تقسم البقعة الضوئية إلى عدة بقـع مضيئة . وبالاستناد إلى نظرية الأمواج الكهرطيسية المايكروية التي تصف المرنان سميت هذه الأمواج الخاصة بالأمواج الكهرطيسية العرضانية ***(transverse electromagnetic wave)*** وتترتب وفقاً لأعداد الخطوط المظلمة ***m*** و ***n*** في توزع الحقل في كـل مـن الاتجاه *X* والاتجاه *Y* على الترتيب. وتلقّب هـذه الأشـكال المختلفـة بالإنمـاط الكهرطيسية العرضانية ***(Transverse Electromagnetic Modes)*** ويرمز لها $TEM_{m,n}$.
ولقد سميت بالإنماط العرضانية لليزر لأن هذه الاهتزازات الخاصة تختلف عن بعـضها البعض من خلال توزع الحقل الناتج عنها في المستوي ***X,Y*** أي في المستوي العمودي على منحى انتشار هذه الاهتزازات. كما أن أكثر الإنماط أهمية واستعمالاً هو النمط $TEM_{\cdot,\cdot}$ وهذا النمط يعطي شعاعاً مقطعه العرضي على شكل بقعة ضوئية واحـدة دائرية الشكل تكون شدة الضوء في مركزها أعظم مايمكن ، ثم تتناقص هذه الـشدة كلما ابتعدنا عن مركز الدائرة والشكل (**٤ – ٧**) يبين عدة أشكال مختلفة من الإنماط الكهرطيسية العرضانية .



الشكل (٤ ـ ٧) الإنماط الكهرطيسية العرضانية

ومن ناحية أخرى فإن مقدار الخسارة التي تعاني منها الأشعة الكهرطيسية ضمن المرنان تتعلق بالإضافة إلى الإنماط المختلفة أيضاً بالتصميم الهندسي للمرنان الذي يخضع لقوانين البصريات ، وبالتالي يمكن تقسيم الخسارة التي تعاني منها الأشعة الكهرطيسية ضمن المرنان إلى عدة أنواع نذكر منها :

١- الخسارة الناتجة عن الانعراج χ_B :

يحدث هذا النوع من الخسارة لأن شدة الأشعة تكون غير معدومة على أطراف المرايا عند توزع حقل الأمواج المستقرة داخل المرنان ، وهذا يؤدي إلى خسارة جزء من هذه الأشعة بسبب عملية الانعراج عند أطراف المرايا أثناء عملية انكسار الأشعة.

و تتعلق هذه الخسارة بأبعاد المرنان وطول موجة الضوء ويمكن التعبير عنها بالعلاقة :

$$\chi_B = \frac{1}{4N^{\frac{3}{2}}} + \theta_m \cdot \frac{L}{2a}$$

حيث θ_m : الزاوية التي يصنعها منحى انتشار الموجة مع محور المرنان.

N : عدد فرنل *(Fresnel-Number)* الذي يعطى بالعلاقة :

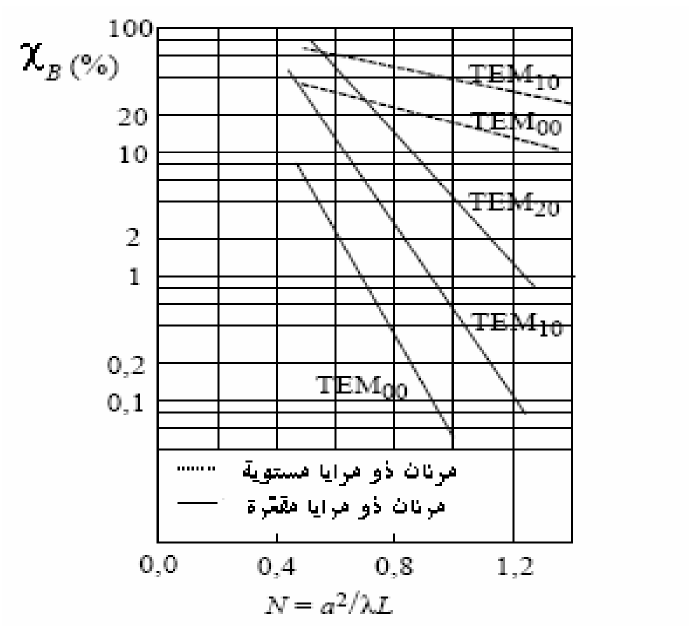
$$N = \frac{a^2}{\lambda \cdot L}$$

L : طول المرنان.

a : ارتفاع المرنان وعرضه.

λ : طول الموجة.

نستنتج من هذه العلاقة أنه إذا طرأ تغير في أبعاد المرنان بالنسبة نفسها التي تطرأ على طول الموجة فإن خصائص الاهتزازة الخاصة تبقى على حالها وكـذلك مقـدار الخسارة يبقى ثابتاً، وتكون الخسارة أقل ما يمكن في المرنان الذي يملك قيمـة كـبيرة لعدد فرنل والشكل (**٤ – ٨**) يبين تابعية الخسارة لعدد فرنل.



الشكل (٤ ـ ٨) الخسارة ضمن المرنان كتابع لعدد فرنل

٢- الخسارة الناتجة عن عدم الترابط بين مرآتي المرنان χ_A :

وتعطى هذه الخسارة بالنسبة للمرآة الأولى بالعلاقة :

$$\chi_{A1} = \frac{1}{4}(1 - R_1)(1 + R_2)$$

وللمرآة الثانية : $\chi_{A2} = \frac{1}{4}(1 - R_2)(1 + R_1)$

$$\Rightarrow \chi_A = \chi_{A1} + \chi_{A2} = \frac{1}{2}(1 - R_1 \cdot R_2)$$

٣- الخسارة الناتجة عن عدم دقة ضبط المرايا χ_G :

تنتج هذه الخسارة بسبب انحراف محور المرايا عن محور المرنان وحتى عند قـيم صغيرة لزوايا الانحراف $\beta(rad)$ وتقدر هذه الخسارة بالعلاقة :

$$\chi_G = \sqrt{\frac{L \cdot \beta}{4a}}$$

٤- الخسارة الناتجة عن التشتت والامتصاص χ_ω :

تتعلق هذه الخسارة بجودة المواد التي يتكون منها الوسط الليزري الفعال وكذلك نوعية المواد التي تدخل في تصنيع المرايا وقيمة هذه الخسارة لايمكن تحديدها بـشكل دقيق وإنما تحدد بالقياسات التجريبية.

إذا الخسارة الكلية التي تعاني منها الأشعة الكهرطيسية داخل المرنان هي عبـارة عن مجموع الخسارات السابقة مع بعضها البعض أي أن :

$$\chi_{total} = \chi_B + \chi_A + \chi_G + \chi_\omega$$

٤-٣- عامل جودة (كفاءة) المرنان الضوئي: *(Q-quality factor)*

لقد وجدنا سابقاً أنه يتشكل لدينا حقل اشعاع ضمن المرنان الضوئي الذي له شكل صندوق وليكن ذلك عند درجة الحرارة T بحيث أن التوزع الطيفي لكثافة طاقته $\rho_{(\upsilon)}$ في حالة التوازن الحراري يتعلق بكل من الترددات الخاصة الممكنة لإنماط هـذا المرنان (الصندوق) وكذلك بدرجة الحرارة T . ومن أجل الجزء من الطيـف الـذي تكون فيه الأطوال الموجية أصغر بكثير من أبعاد هذا المرنان يمكن التعـبير عـن $\rho_{(\upsilon)}$ بواسطة علاقة بلانك:

$$\rho_{(\upsilon)} = \frac{8\pi \cdot \upsilon^2}{c^3} \cdot \frac{1}{h\upsilon\left(e^{\frac{h\upsilon}{KT}} - 1\right)} \qquad (٤-٢١)$$

كما أن عدد الإنماط $n_{(\upsilon)}$ في واحدة الحجم ومجال التردد $d\upsilon(Hz)$ يكـون في هـذه الحالة كبيراً جداً.

إذا أدخلنا منبعاً ضوئياً إلى داخل المرنان فسوف تتوزع طاقة الإشعاع الناتجة عن هذا المنبع على جميع الإنماط المتشكلة ويكون لدينا حالة توازن حراري جديدة وذلك عند درجة حرارة مرتفعة . ونتيجة للعدد الكبير للإنماط المتـوفرة سـيكون عـدد الفوتونات التي تتبع كل نمط معين صغيراً جداً ، لذلك لايصلح مثل هـذه المرنانـات ليكون مرناناً ليزرياً . وحتى يكون حقل الإشعاع ضمن المرنان متركزاً على إنمـاط قليلة ومحددة يجب أن يصمم المرنان بحيث يحقق ترابطاً عكسياً قوياً (تغذية عكسية) من أجل الإنماط القليلة المرغوبة وبنفس الوقت لايعكس طاقة الإشعاع الصادرة عن منبع الإشعاع (في حالتنا الوسط الليزري الفعال) للإنماط الأخرى وإنما يعطيها إلى الوسط الخارجي . ويمكن وصف ذلك كالتالي :

إذا كان للمرنان من أجل النمط k معامل خسارة β_k فان الخسارة التي تعاني منـها طاقة الاشعة بواسطة هذا النمط الذي يختزن طاقة مقدارها W_k وفي الفترة الزمنيـة dt تعطى بالعلاقة:

$$dW_k = -\beta_k \cdot W_k \cdot dt \qquad (٤-٢٢)$$

وعند توقف المنبع عن اعطاء الطاقة سوف تتناقص طاقة الإشعاع لإنمـاط المرنـان بشكل أسي بحيث ينتج لدينا من العلاقة (**٤-٢٢**):

$$W_k(t) = W_k(0) \cdot e^{-\beta \cdot t} \qquad (٤-٢٣)$$

وانطلاقاً من ذلك نعرف جودة المرنان من أجل النمط k بالعلاقة :

$$Q_k = -2\pi\upsilon \cdot \frac{W_k}{\left(\frac{dW_k}{dt}\right)} \qquad (٤-٢٤)$$

وبتعويض العلاقة (**٤-٢٢**) في العلاقة (**٤-٢٤**) نجد أن :

$$Q_k = \frac{2\pi\upsilon}{\beta_k} \qquad (٤-٢٥)$$

كما نعرف الزمن الذي تبقى فيه الفوتونات التي تتبع للنمط k ضمن المرنان بالعلاقة :

$$\tau_k = \frac{1}{\beta_k} \qquad (٤-٢٦)$$

وبالتعويض في العلاقة (**٤-٢٥**) نجد أن:

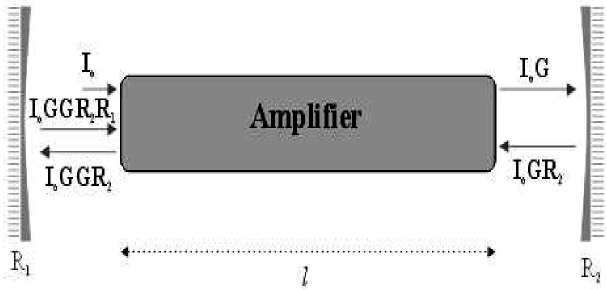
$$Q_k = 2\pi\upsilon \cdot \tau_k \qquad (٤-٢٩)$$

فإذا كان للمرنان معامل خسارة β_k صغير من أجل إنماط قليلة ومحددة يكون عندها عدد الفوتونات في الإنماط التي تمتلك معامل خسارة صغير أكبر منه في الإنماط الأخرى حتى لو كان المنبع يعطي طاقة بشكل متساوٍ لجميع الإنماط ، وبذلك يصبح احتمال الإصدار القسري أكبر بالنسبة للترددات الموافقة لهذه الإنماط القليلة والمحددة .ومثل هذا المرنان يركّز طاقة حقل الإشعاع الناتج عن الوسط الليزري الفعال على عدة إنماط قليلة فقط .

٤-٤- التغذية العكسية الضوئية: *(Optical Feedback)*

عندما تسقط فوتونات ذات شدة I_o على الوسط الليزري الفعال، كما في الشكل (**٤ – ٩**) ، فإنها سوف تتضخم بالمقدار G وتصبح شدة الأشعة بعد خروجها من الوسط $I_o.G$. وعند سقوط هذه الأشعة على المرآة العاكسة التي عامل عكسها R_2 فإن جزءاً من الأشعة سوف ينعكس بمقدار R_2 وتصبح شدة الأشعة $I_o.G.R_2$ حيث تعمل المرآة على إعادة الأشعة المضخمة إلى الوسط الفعال لتتضخم بالمقدار G مرة أخرى وتخرج منه بشدة مقدارها $I_o.G.G.R_2$ ومن ثم لتسقط على المرآة

العاكسة الأخرى والتي عامل عكسها R_1 وتكون شدة الأشعة المنعكسة في هذه الحالة $I_o.G.G.R_2.R_1$ وهذا مايحدث للأشعة عند دخولها للمضخم خـلال دورة تـضخيم واحدة ، حيث تكون محصلة التضخيم المكتسب ممثلاً بالمقدار $G.G$ بينما الخـسارة في الأشعة تكون ناتجاً عن المقدار $R_1.R_2$.



الشكل (٤ – ٩)

والشرط الأساسي حتى يعمل المرنان كمضخم للأمواج الكهرطيسية هـو أن يكون الناتج النهائي بعد دورة واحدة أكبر من الشدة الأصلية I_o أي أن:

$$I_0 \cdot G \cdot R_2 \cdot G \cdot R_1 \geq I_0$$
$$\Rightarrow R_1 \cdot R_2 \cdot G^2 \geq 1 \qquad (٤\text{-}٢٨)$$

وكنا قد وجدنا سابقاً أن نسبة التضخيم التي تعبر عن الربح الناتج عن عملية التضخيم تعطى بالعلاقة :

$$G_{(\upsilon)} = e^{\gamma_{0(\upsilon)} \cdot L} \qquad (٤\text{-}٢٩)$$

بالتعويض في العلاقة (**٢٨-٤**) نجد أن :

$$R_1 \cdot R_2 \cdot e^{2\gamma_{0(\upsilon)} \cdot L} \geq 1$$
$$\Rightarrow e^{2\gamma_{0(\upsilon)} \cdot L} \geq \frac{1}{R_1 \cdot R_2} \qquad (٤\text{-}٣٠)$$

حيث يمكن كتابة هذه العلاقة بالشكل :

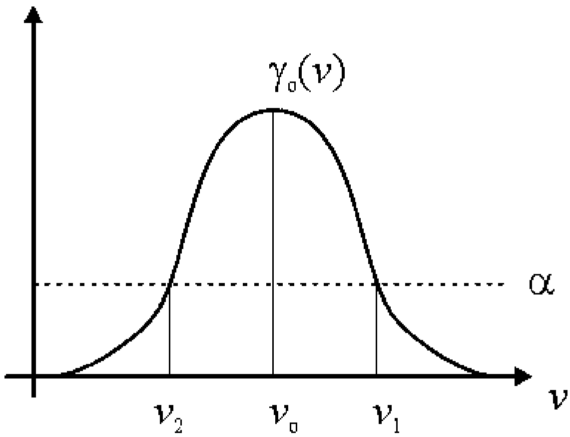
$$\gamma_{0(\upsilon)} \geq \frac{1}{2L} \cdot Ln\left(\frac{1}{R_1 \cdot R_2}\right) \qquad (٤\text{-}٣١)$$

ويمثل الطرف الأيسر من هذه العلاقة الربح في واحدة طول الموجة بينما الطرف الأيمن يمثل الخسارة فإذا رمزنا لها بـ α يمكن أن نكتب :

$$\gamma_{0(\upsilon)} \geq \alpha \quad \Rightarrow \quad \frac{\gamma_{0(\upsilon)}}{\alpha} \geq 1 \qquad (٤\text{-}٣٢)$$

نلاحظ أن الخسارة لاتتعلق بالتردد لذلك يمكن تمثيلها على منحني الربح التابع للتـردد بخط مستقيم . كما في الشكل **(٤ – ١٠)**.

نلاحظ من هذا الشكل أنه ليست كل الترددات التي تقع تحت منحني الـربح يمكن أن تؤدي إلى توليد أشعة الليزر ولكن فقط تلك الترددات التي تحقق الشرط الذي ينص على أن محصلة الربح يجب أن تكون أكبر أو تساوي على الأقل الخسارة وهذا محقق فقط في مجال التردد $\upsilon_1\text{-}\upsilon_2$ كما هو واضح في الشكل .



الشكل (٤ – ١٠)

وجدنا سابقاً أن علاقة معامل الربح أو معامل التضخيم لليزر يمكـن التعـبير عنـه بالعلاقة:

$$\gamma_{0(\upsilon)} = A_{21} \cdot \frac{\lambda^2}{8\pi} \cdot \Delta N \cdot g_{(\upsilon)} \qquad (٤\text{-}٣٣)$$

وتكون أكبر قيمة للتضخيم عند التردد υ_o أي أن :

$$\gamma_{0(\upsilon 0)} = A_{21} \cdot \frac{\lambda^2}{8\pi} \cdot \Delta N \cdot g_{(\upsilon 0)} \qquad (٤\text{-}١)$$

بتقسيم العلاقتين (**٤-٣٣**) و (**٤-٣٤**) على بعضهما نحصل على:

$$\frac{\gamma_{0(\upsilon)}}{\gamma_{0(\upsilon 0)}} = \frac{g_{(\upsilon)}}{g_{(\upsilon 0)}}$$

$$\Rightarrow \gamma_{0(\upsilon)} = \gamma_{0(\upsilon 0)} \cdot \frac{g_{(\upsilon)}}{g_{(\upsilon 0)}} \qquad (٤\text{-}٣٥)$$

كما أننا ذكرنا سابقاً أن تابع توزع الترددات داخل مجال تعريض الخط الطيفي يعطى بالعلاقة التالية :

$$g_{(\upsilon)} = \frac{\dfrac{\Delta\upsilon}{2\pi}}{(\upsilon - \upsilon_0)^2 + \left(\dfrac{\Delta\upsilon}{2}\right)^2}$$

وتكون قيمة هذا التابع عند التردد υ_o :

$$g_{(\upsilon 0)} = \frac{2}{\pi \cdot \Delta\upsilon}$$

نعوض قيم $g_{(\upsilon)}$ و $g_{(\upsilon o)}$ في العلاقة (**٤-٣٥**) فنحصل على العلاقة التالية:

$$\gamma_{0(\upsilon)} = \gamma_{0(\upsilon 0)} \cdot \frac{\left(\dfrac{\Delta\upsilon}{2}\right)^2}{(\upsilon - \upsilon_0)^2 + \left(\dfrac{\Delta\upsilon}{2}\right)^2} \qquad (٤\text{-}٣٦)$$

وهذه العلاقة تعطي قيمة الربح نتيجة عملية التضخيم عند أي تردد υ بدلالة الربح عند التردد الأساسي υ_o .وفي حالة الفعل الليزري يكون دائماً الربح عند التردد υ_o أكبر من الخسارة α .

٤-٥- المصفوفة المميزة للخلية أو المصفوفة *[ABCD]* :

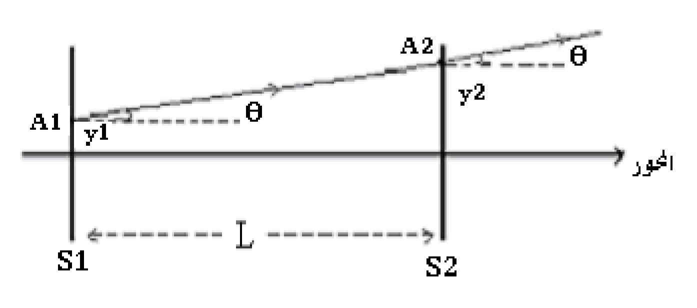
بينا سابقاً أن الغاية من المرنان هي تجميع طاقة الأمواج الكهرطيسية الناتجة عن

عملية الإصدار القسري ضمن حيز محدد ، ولذلك لابد من توصيف هـذا الحجـم الكائن بين المرآتين وتحديد أبعاده بحيث يحقق الشروط المثلى لعمليـة تجميـع طاقـة الأمواج الكهرطيسية.

لتبسيط هذه الدراسة نفرض أن الجملة الضوئية المستخدمة تحقق شروط غاوص والتي تعتبر مسار الأشعة الضوئية قريباً جداً من المحور البصري للمرنان بحيث تكـون زاوية الورود وزاوية الانعكاس صغيرتين جداً وبالتالي يمكن اعتبار أن:

$$\sin\theta \approx tg\theta \approx \theta$$
$$\Rightarrow \cos\theta \approx 1 \qquad (٤-٣٧)$$

فإذا كان البعد بين مرآتي المرنان L وكان الشعاع الضوئي ينطلق مـن المـرآة الأولى من النقطة A_1 التي تقع على ارتفاع y_1 من المحور البصري للمرآة ويصنع معـه الزاوية θ_1 ، ويسقط على المرآة الثانية عند النقطة A_2 والتي تقع على ارتفاع y_2 مـن محورها البصري ولكن يبقى ميل الشعاع الضوئي ثابتاً بحيـث يكـون : $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ وذلك كما هو مبين بالشكل(**٤ – ١١**).



الشكل (٤ – ١١)

لنحاول الآن إيجاد العلاقة التي تربط بين كل من (y_1,θ_1) من جهة و (y_2,θ_2) من جهة أخرى. فمن الشكل يمكن أن نكتب :

$$y_2 = y_1 + \overline{S_2^{'} \cdot A_2} \qquad (٤-٣٨)$$

$$\theta_2 = \theta_1 \qquad (٤-٣٩)$$

ولكن من الشكل نلاحظ أن : $\overline{S_2^{'}A_2} = tg\theta \cdot L$

وبما أن : $tg\theta \approx \theta_1$

$$\Rightarrow \overline{S_2^{'}A_2} = L \cdot \theta_1 \qquad (٤-٤٠)$$

وبالتالي يمكن كتابة العلاقتين السابقتين (**٤-٣٨**) و (**٤-٣٩**) كما يلي :

$$y_2 = y_1 + L \cdot \theta_1 \qquad (٤-٤١)$$

$$\theta_2 = 0 + \theta_1 \qquad (٤-٤٢)$$

وهما علاقتان خطيتان تكتبان بالشكل :

$$y_2 = A \cdot y_1 + B \cdot \theta_1 \qquad (٤-٤٣)$$

$$\theta_2 = C \cdot y_1 + D \cdot \theta_1 \qquad (٤-٤٤)$$

ويمكن الانتقال من الشكل الخطي للعلاقتين السابقتين إلى شكل مصفوفة يمكن كتابتها بالشكل :

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \qquad (٤-٤٥)$$

وبالتالي يمكن استنتاج مصفوفة العلاقتين (**٤-٤١**) و (**٤-٤٢**) كما يلي :

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \qquad (٤-٤٦)$$

تسمى المصفوفة المحددة بالشكل :

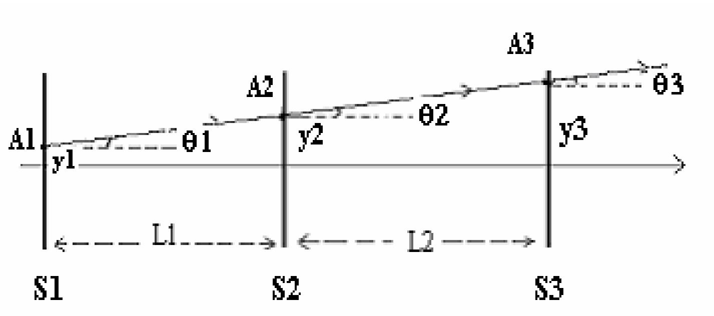
$$I = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \qquad (٤-٤٧)$$

المصفوفة المميزة للخلية وهي تصف الفراغ المحصور بين مرآتي المرنان ويرمز لها بالرمز I أو المصفوفة $ABCD$.

وفي الحالة العامة إذا كانت الجملة الضوئية مؤلفة من عدة خلايا كما هو مبين بالشكل (**٤ – ١٢**) فان المصفوفة المميزة للفراغ المحصور ضمن أجزاء هذه الجملة تنتج عن جداء المصفوفات المميزة لكل جزء من أجزاء هذه الجملة أي أن :

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \qquad (٤-٤٨)$$

$$\begin{bmatrix} y_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \qquad (٤-٤٩)$$



الشكل (٤ – ١٢)

بعد التعويض عن المصفوفة $\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$ بقيمتها من العلاقة (**٤-٤٨**) نجد أن :

$$\begin{bmatrix} y_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \qquad (٤-٥٠)$$

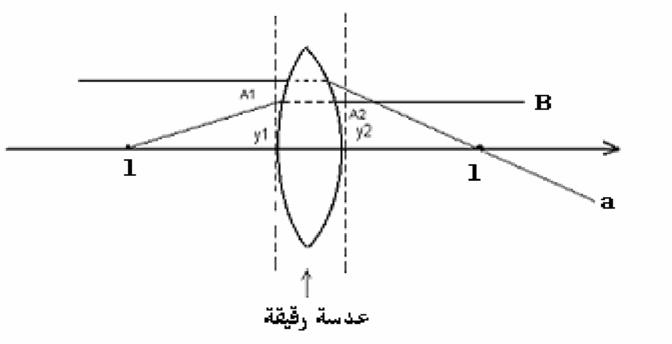
أي أن :

$$\begin{bmatrix} y_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 + L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \qquad (٤-٥١)$$

٤-٦- المصفوفة المميزة لعدسة رقيقة:

ان المصفوفة المميزة للعدسة الرقيقة تصف عملية انتقال شعاع ضوئي من المستوي الجسمي إلى المستوي الخيالي ، ومن أجل ذلك نأخذ عدسة رقيقة سماكتها مهملة بالمقارنة مع أنصاف أقطار تقعر كل من وجهيها . وليكن لدينا شعاع وارد

بشكل موازٍ للمحور البصري للعدسة ويعاني انكساراً بزاوية قدرها $\theta_{2\alpha}$ ليمر بعـد ذلك من المحرق الخيالي للعدسة ولنرمز لهذا الشعاع بالرمز (α) ، وشعاع آخـر وارد بزاوية قدرها $\theta_{1\beta}$ ومن ثم يعاني انكساراً ليأخذ بعد ذلك مـساراً موازيـاً للمحـور البصري ونرمز لهذا الشعاع بالرمز (β) وذلك كما هو مبين بالشكل **(٤ – ١٣)**.



الشكل (٤ – ١٣)

فإذا كانت لدينا النقطة A_1 والتي تبعد مسافة y_1 عن المحور البصري أي أنهـا تمثل ارتفاع الشعاع الوارد عن المحور البصري في المستوي المماسي الجـسمي وأن y_2 تمثل ارتفاع A_2 عن المحور البصري في المستوي المماسي الخيالي للعدسة وبالتالي نلاحظ من الشكل أنه بالنسبة لكلا الشعاعين أن:

$$y_2 = y_1 \qquad (٤\text{-}٥٢)$$

وهذه العلاقة محققة مهما كانت زاوية ورود الشعاع α على العدسة ، كمـا يمكننـا كتابة العلاقة **(٤-٥٢)** بشكل يحتوي على الزاوية θ_1 مثلما لاحظنا ذلـك في العلاقـة **(٤-٤١)** فنجد أن :

$$y_2 = A \cdot y_1 + 0 \cdot \theta_1 \qquad (٤\text{-}٥٣)$$

أي أن :

$$y_2 = A \cdot y_1 + B \cdot \theta_1 \qquad (٤\text{-}٥٤)$$

إذا تكون عناصر السطر الأول في المصفوفة المميزة للخلية هي :

$$A = 1$$
$$B = 0$$

ونجد من الشكل أيضاً أن ميل الشعاع α من جهة الورود أي في المستوي الجسمي للعدسة معدوم لأنه يرد موازياً للمحور البصري أي أن :

$$\theta_{1\alpha} = 0 \qquad (٤-٥٥)$$

بينما يكون الميل من جهة البروز من العدسة أي في المستوي الخيالي للعدسة مساوياً:

$$\theta_{2\alpha} = -\frac{1}{f} \cdot y_{1\alpha} \qquad (٤-٥٦)$$

حيث يمثل f البعد المحرقي للعدسة.

إذا رمزنا للمقدار ($-\frac{1}{f} = C$)وهو يدعى ثابت تقريب العدسة . فنكتب العلاقة **(٥٦-٤)** بالشكل :

$$\theta_{2\alpha} = C \cdot y_{1\alpha} \qquad (٤-٥٧)$$

وهنا أيضاً يمكن كتابة العلاقة بشكل خطي كما هو الحال في العلاقة **(٤٢-٤)** فنجد أن :

$$\theta_{2\alpha} = C \cdot y_{1\alpha} + D \cdot \theta_{1\alpha} \qquad (٤-٥٨)$$

ولكن بما أن : $\theta_{1\alpha} = 0$ تصبح العلاقة السابقة بالشكل :

$$\theta_{2\alpha} = C \cdot y_{1\alpha} + D \cdot 0 \qquad (٤-٥٩)$$

من هذه العلاقة نجد أن قيمة العنصر C في المصفوفة المميزة محددة، بينما قيمة العنصر D مجهولة ولتعيين قيمتها نجد أنه من الشعاع (β) تحدد زاوية ميل هذا الشعاع في جهة الورود أي في المستوي الجسمي للعدسة بالعلاقة :

$$\theta_{1\beta} = \frac{1}{f} \cdot y_{1\beta} \qquad (٤-٦٠)$$

بينما زاوية ميله بعد انكساره وبروزه من العدسة تحدد بالعلاقة :

$$\theta_{2\beta} = 0 \qquad (٤-٦١)$$

ويمكننا كتابة العلاقة السابقة بشكل خطي وذلك بتابعية كل من $y_{1\beta}$ و $\theta_{1\beta}$ كمـا يلي :

$$\theta_{2\beta} = C \cdot y_{1\beta} + D \cdot \theta_{1\beta} \qquad (٤-٦٢)$$

بالتعويض نجد أن :

$$0 = -\frac{1}{f} \cdot y_{1\beta} + D \cdot \frac{1}{f} \cdot y_{1\beta} \qquad (٤-٦٣)$$

نلاحظ أنه حتى تكون العلاقة (**٤-٦٣**) محققة يجب أن يكون : $D = 1$.

إذا بعد أن تم تحديد عناصر المصفوفة الأربعة A,B,C,D يمكننا أن نحدد مصفوفة الانتقال المميزة لعدسة رقيقة والتي تصف عملية انتقال شعاع ضوئي مـن المـستوي الجسمي إلى المستوي الخيالي والتي يرمز لها بالرمز T بالشكل التالي :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \qquad (٤-٦٤)$$

ولكن في الحالات التي تستخدم فيها مرايا كروية عاكسة عند تصميم المرنـان فان محرق المرآة الكروية يقع في منتصف المسافة بين مركز الكرة التي ينطبق محيطهـا على العدسة وبين رأسها ويعطى البعد المحرقي للعدسة في هذه الحالة بالعلاقة :

$$f = \frac{R}{2} \qquad (٤-٦٥)$$

حيث R نصف قطر الكرة التي تمر من محيط المرآة الكروية .

ومن أجل الحصول على مصفوفة الانتقال المميزة للعدسة الكروية نعوض قيمـة f من العلاقة (**٤-٦٥**) في العلاقة (**٤-٦٤**) فنحصل على :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix} \qquad (٤-٦٦)$$

وبما أن ثابت تقريب العدسة $C = -\frac{1}{f}$ نجد أنه بالاعتماد على العلاقة (**٤-٦٥**) أن : $C = -\frac{2}{R}$ وهو يمثل ثابت تقريب المـرآة الكروية .

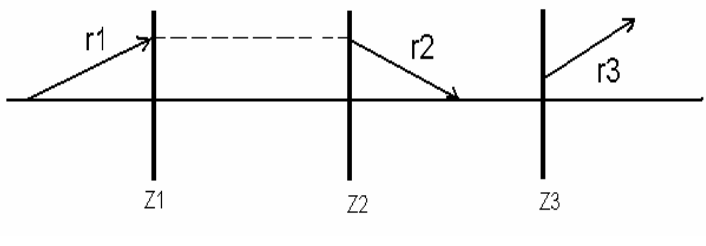
٤-٧- شرط استقرار الليزر:

ترتبط عملية استقرار الليزر بشكل مباشر بسلوك الأشعة ضمن المرنان ، لذلك فان شكل المرنان وأبعاده يلعبان دوراً أساسياً في استقرار الليزر . وبشكل عام يكـون الليزر مستقراً إذا كانت الانعكاسات التي يعاني منها الشعاع الضوئي داخل المرنـان لاتؤدي إلى خروجه من المرنان وهذا يعني أن الشعاع الضوئي يعود بعد عـدد مـن الانعكاسات إلى النقطة التي انطلق منها تماماً. اما إذا انزاح الشعاع قليلاً عـن نقطـة الانطلاق وأصبح قريباً من المحور البصري للمرنان نقول عنه في هذه الحالة إن الليـزر مستقر شرطياً . وفي الحالة التي تؤدي فيها الانعكاسات إلى خروج الشعاع من المرنان نحصل على ليزر غير مستقر .

وبما أن شكل المرايا الذي يحدد بدوره شكل المرنان يلعـب دوراً أساسـياً في عملية استقرار الليزر لذلك سوف نستنتج شرط استقرار الليزر وعلاقته بشكل المرنان.

باعتبار أن الانعكاسات ضمن المرنان تتكرر عدداً كبيراً من المرات لذلك يمكن أن نفرض أن المرنان يكافئ جملة من الخلايا الأساسية وإذا عرفنا المصفوفة المميزة لخلية أساسية واحدة نستطيع ايجاد المصفوفة المميزة للجملة بأكملها .

ليكن لدينا المجموعة المبينة بالشكل (**٤ – ١٤**):



الشكل (٤ – ١٤)

بما أن :

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \qquad (٤\text{-}٦٧)$$

$$\begin{bmatrix} r_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \qquad (٤-٦٨)$$

بتعويض العلاقة (**٤-٦٧**) في العلاقة (**٤-٦٨**) نحصل على :

$$\begin{bmatrix} r_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \qquad (٤-٦٩)$$

كما أنه يمكن اعتبار المرنان مؤلفاً من جملة خليتين كل منهما تتكون من جزئين :
الجزء الأول عدسة رقيقة الوجهين حيث تكون المصفوفة المميزة لها من الشكل :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

والجزء الثاني عبارة عن الخلاء المحصور بين صفيحتين وسماكته L ومصفوفته المميزة من الشكل :

$$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

وبالتالي يمكن استنتاج المصفوفة المميزة لإحدى الخليتين من خلال جداء المصفوفتين السابقتين أي أن :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ -\frac{1}{f} & 1-\frac{1}{f} \end{bmatrix} \qquad (٤-٧٠)$$

ومنه تكون المصفوفة المميزة للمرنان المؤلف من جملتين هي عبارة عن جداء المصفوفتين المميزتين لتلك الجملتين مع بعضهما البعض أي أن:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & L \\ -\frac{1}{f_1} & 1-\frac{1}{f_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ -\frac{1}{f_2} & 1-\frac{1}{f_2} \end{bmatrix} \qquad (٤-٧١)$$

في حالة المرآيا المقعرة يكون : $f_1 = -\frac{R_1}{2}$ و $f_2 = -\frac{R_2}{2}$ ومنه تصبح المصفوفة السابقة بالشكل :

$$T=\begin{bmatrix} 1-\frac{L}{f_2} & L(2-\frac{L}{f_2}) \\ -\frac{1}{f_1}-\frac{1}{f_2}(1-\frac{L}{f_1}) & (1-\frac{L}{f_1})(1-\frac{L}{f_2})-\frac{L}{f_1} \end{bmatrix} \qquad (٤-٧٢)$$

وهي أيضاً عبارة عن مصفوفة ***[ABCD]*** ،

$$T=\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

وبما أن العلاقة التي تربط الشعاع الوارد مع الشعاع المنعكس هي من الشكل:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix}=[T]\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \qquad (٤-٧٣)$$

وشرط الاستقرار يقضي بأن يكون هناك تناسب بين مركبات الشعاع الوارد ومركبات الشعاع المنعكس أي يجب أن يكون :

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix}=\eta\cdot\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \qquad (٤-٧٤)$$

من المصفوفتين (**٤-٧٣**) و (**٤-٧٤**) نجد أن :

$$[T]\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}=\eta\cdot\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \qquad (٤-٧٥)$$

واستناداً على علم المصفوفات فإن المقدار η يمثل قيمة خاصة للمصفوفة ***[T]*** والتي تعطى بالمعادلة :

$$\eta^2-(A+D)\eta+(AD-BC)=0 \qquad (٤-٧٦)$$

لنحسب حدود هذه المعادلة اعتماداً على القيم في المصفوفة الممثلة بالعلاقة (**٤-٧٢**) :

المقدار ***(AD - BC)*** = ١ وهذا المقدار يساوي دائماً الواحد وهو يمثل معين المصفوفة ***[T]*** ويمكن البرهان على ذلك كما يلي :

$$AD-BC = (1-\frac{L}{f_2})\left[(1-\frac{L}{f_1})(1-\frac{L}{f_2})-\frac{L}{f_1}\right] + \left[\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}(1-\frac{L}{f_1})\right]\left[L+L(1-\frac{L}{f_2})\right]$$

$$= 1-2\frac{L}{f_1}-2\frac{L}{f_2}+\frac{L^2}{f_1\cdot f_2}+2\frac{L^2}{f_1\cdot f_2}+\frac{L^2}{f_2^2}-\frac{L^3}{f_1\cdot f_2} +2\frac{L}{f_1}+2\frac{L}{f_2}-2\frac{L^2}{f_1\cdot f_2}-\frac{L^2}{f_1\cdot f_2}-\frac{L^2}{f_2^2}+\frac{L^3}{f_1\cdot f_2}$$

$$\Rightarrow AD-BC=1 \qquad (٤-٧٧)$$

وهذه العلاقة محققة في جميع الحالات وذلك بشرط أن تكـون قرينـة الانكـسار $n_١$ للوسط الذي ترد فيه الأشعة مساوية لقرينة الانكسار $n_٢$ للوسط الذي تنكسر فيه الأشعة .

كما يمكن حساب المقدار $(A+D)$ كما يلي :

$$A+D=(1-\frac{L}{f_2})+\left[(1-\frac{L}{f_1})(1-\frac{L}{f_2})-\frac{L}{f_1}\right]$$

$$A+D=(2-\frac{L}{f_1})(2-\frac{L}{f_2})-2 \qquad (٤-٧٨)$$

نعوض العلاقات (**٤-٧٧**) و(**٤-٧٨**) في العلاقة (**٤-٧٦**) فنحصل على :

$$\eta^2-\left[(2-\frac{L}{f_1})(2-\frac{L}{f_2})-2\right]\cdot\eta+1 \qquad (٤-٧٩)$$

وهي عبارة عن معادلة من الدرجة الثانية حيث مميزها يعطى بالعلاقة :

$$\Delta=(2-\frac{L}{f_1})^2\cdot(2-\frac{L}{f_2})^2-4(2-\frac{L}{f_1})\cdot(2-\frac{L}{f_2}) \qquad (٤-٨٠)$$

وإذا أخذنا حالة المرايا المقعرة يكون لدينا $f_i=\frac{R_i}{2}$ حيث R_i يمثل نصف قطر تقعر المرآة فإذا عوضنا ذلك بالعلاقة السابقة تصبح بالشكل :

$$\Delta = (2-\frac{2L}{R_1})^2 \cdot (2-\frac{2L}{R_2})^2 - 4(2-\frac{2L}{R_1}) \cdot (2-\frac{2L}{R_2})$$

$$\Delta = 16(1-\frac{L}{R_1})(1-\frac{L}{R_2})\left[(1-\frac{L}{R_1})(1-\frac{L}{R_2})-1\right] \qquad (٤-٨١)$$

نرمز للمقدار :

$$g_i = 1-\frac{L}{R_i} \qquad (٤-٨٢)$$

نعوض في العلاقة (**٨١-٤**) فنجد أن :

$$\Delta = 16 g_1 \cdot g_2 \cdot (g_1 \cdot g_2 - 1) \qquad (٤-٨٣)$$

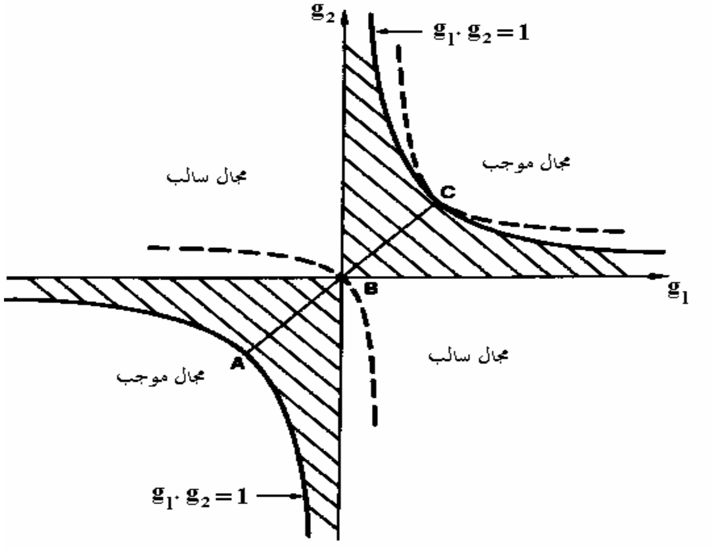
بمناقشة هذه المعادلة نستنتج أن ($\Delta = ٠$) عندما تكـون : ($g_1.g_2 = ٠$) أو عنـدما ($g_1.g_2=١$) وبالتالي فإن القيم المحصورة بين هاتين القيمتين تحددان شرط استقرار الليزر الذي يكتب بالشكل :

$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1$$
$$0 < (1-\frac{L}{R_1})(1-\frac{L}{R_2}) < 1 \qquad (٤-٨٤)$$

إذاً نلاحظ أن شرط استقرار الليزر يتعلق بكل من نصف قطر تقعر المرآة الأولى R_1 ونصف تقعر المرآة الثانية R_2 ، وذلك عندما تكون المسافة الفاصلة بينهما ثابتة.

ومن خلال مناقشة شرط استقرار الليزر نحصل على مخطط اسـتقرار الليـزر وعلاقته بأشكال المرايا ، من أجل ذلك نفترض جملة إحداثيات محورها الأفقي يمثل g_1 والمحور العمودي يمثل g_2 كما هو موضح بالشكل(**٤ - ١٥**) فإن مخطط الاسـتقرار سوف يكون محصوراً بين المنحنيين الممثلين بالعلاقتين التاليتين :

$$\mathbf{g_1 \cdot g_2 = 0}$$
$$\mathbf{g_1 \cdot g_2 = 1} \qquad (٤-٨٥)$$



الشكل (٤ – ١٥)

أي أن المجال الذي يكون فيه الليزر مستقراً هو المجال المحصور بين القطع الزائد الـذي معادلته من الشكل $g_1.g_2 = 1$ والمحورين الاحداثيين أي المنطقة المخططة في الـشكل السابق . أما المناطق الأخرى فهي توافق الليزرات غير المستقرة .

إذاً يمكننا من هذا المخطط استنتاج أشكال المرايا الملائمة لاستخدامها في تصميم المرنان بحيث نحصل على ليزر مستقرٍ ، وسوف نناقش هنا بعض الحالات الخاصة :

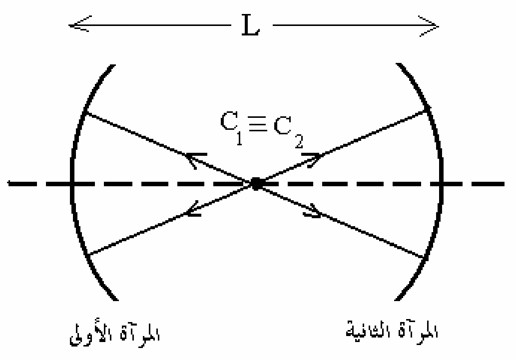
١- النقطة A التي احداثياتها : $g_1 = -1$ و $g_2 = -1$:

بالتعويض في العلاقة (**١٦- ٤**) نحصل على :

$$g_1 = -1 \quad \Rightarrow \quad L = 2R_1$$

$$g_2 = -1 \quad \Rightarrow \quad L = 2R_2$$

نستنتج من ذلك أن شكل المرآتين يجب أن يكون مقعراً ولهما نفس الـشكل ونفس نصف قطر التقعر ، كما أن المرآة الأولى تقع على محيط الكرة التي تنطبق على المرآة الثانية وكذلك العكس بالنسبة للمرآة الثانية ، أي أن للمرآتين نفس المركـز ، كما هو موضح بالشكل (**٤ – ١٦**) (مرآيا متمركزة) .



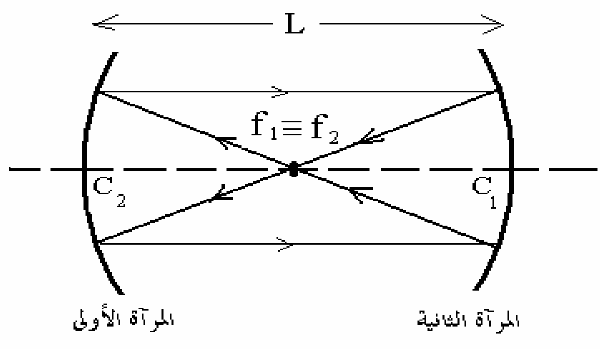
الشكل (٤ - ١٦)

٢- النقطة B التي احداثياتها : $g_1 = ٠$ و $g_2 = ٠$:
بنفس الطريقة نجد من العلاقة (**١٦- ٤**) :

$$g_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad L = R_1$$

$$g_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad L = R_2$$

وهذه الحالة توافق مرآتين مقعرتين لهما أنصاف أقطار متساوية واحداهما تقع في مركز الأخرى كما في الشكل (**٤ – ١٧**) . (مرايا متمحرقة) .



الشكل (٤ - ١٧)

٣- النقطة C التي احداثياتها : $g_1 = ١$ و $g_2 = ١$:
من العلاقة (**١٦-٤**) نجد أن : $g_1 = 1 \quad \Rightarrow \quad R_1 = \infty$

$$g_2 = 1 \quad \Rightarrow \quad R_2 = \infty$$

ومنه نستنتج أن المرايا في هذه الحالة مستوية لأن تقعر المرآة المستوية يقع في اللانهاية .

إذا اعتماداً على مخطط الاستقرار السابق يمكن إيجاد عدد لانهائي من أشـكال المرايا وأبعاد المرنان التي تحقق شرط استقرار الليزر .

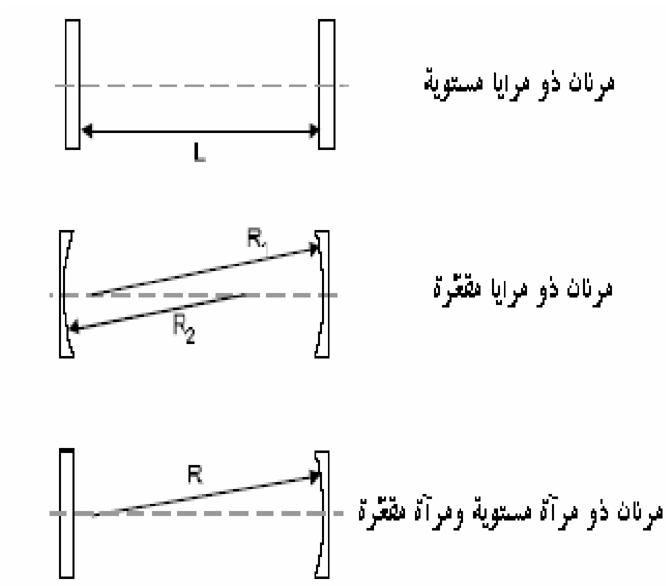
تمرين :

ناقش الحالتين التاليتين : $g_١ = ١/٢$ و $g_٢ = ١$

$g_١=١/٢$ و $g_٢ = ١/٢$

٤-٨- الأشكال المختلفة للمرنان :

لقد رأينا أن المرنان هو جزء أساسي في عملية بناء الليزر وهو يأخذ أشـكالاً وتصاميم مختلفة ، وقد يستخدم في تصميمه مثلما وجدنا سابقاً أشكالٌ مختلفـة مـن المرايا كالمرايا المستوية أو المرايا المقعرة كما في الشكل (**٤ – ١٨**).



الشكل (٤ – ١٨)

وفي الحالة التي تكون فيها عملية التضخيم في الوسط الليزري الفعـال صـغيرة يستخدم في الغالب المرنان ذو المرايا المقعرة لأن الخسارة تكون أقل ما يمكن بـسبب عملية تجميع الأشعة (تبئير) داخل المرنان . ولإيجاد طيف الترددات للمرنان ذي المرايا المقعرة نتبع الطريقة نفسها التي استخدمناها في حالة المرنان ذي المرايا المستوية (نموذج فابري-بيرو) مع الأخذ بعين الاعتبار نصف قطر تقعر المرايا R_i بالإضافة إلى البعـد بين المرايا L وبالتالي نحصل على علاقة شبيهة بالعلاقة (**٧٤-٤**) . وتستخدم العلاقـة التالية لحساب طيف الترددات للمرنان ذي المرايا المقعرة :

$$\omega=\frac{\pi\cdot c}{L}\left[(q+1)+\frac{1}{\pi}(m+n+1)\cdot arc\cos\sqrt{(1-\frac{L}{R_1})(1-\frac{L}{R_2})}\right] \qquad (\text{٤-٨٦})$$

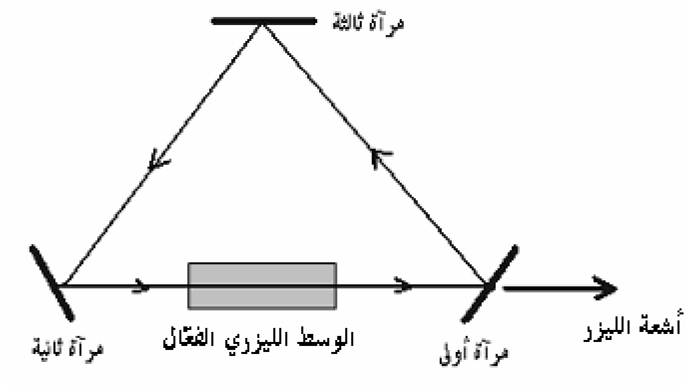
حيث : R_1 , R_2 أنصاف أقطار تقعر كل من المرآتين الأولى والثانية ، وفي الحالة الـتي تكون فيها المرايا متمحرقة أي أن : $R_1 = R_2 = L$ يكون طيف التـرددات في هـذه الحالة :

$$\omega=\frac{\pi\cdot c}{L}\left[(q+1)+\frac{1}{\pi}(m+n+1)\right] \qquad (\text{٤-٨٧})$$

عند استخدام المرايا المقعرة لايمكن اختيار أبعاد المرنان بشكل عشوائي وإنمـا تكون ذات قيم محددة تماماً وهذا ما نلاحظه أيضاً من العلاقة (**٨٦-٤**) حيث نحـصل على قيم حقيقية لطيف الترددات إذا كان البعد بين المرايا أكبر أو يساوي نصف قطر التقعر للمرايا . وهذا لاحظناه أيضاً في شرط استقرار الليزر حيث أن أبعـاد المرنـان ونصف قطر تقعر المرايا يضمنان نظام عمل ثابت ومستقر لليزر ويؤدي إلى عدم تباعد الأشعة ضمن المرنان .

إذاً يمثل كل من المرنان ذي المرايا المستوية والمرنان ذي المرايا المقعـرة حـالتين حديتين لأشكال ومجالات عمل مستقرة للمرنان . ولكن هناك أشكال أخرى منـها المرنان الحلقي الذي يستخدم عند دراسة تداخل وترابط الأمواج المنتشرة باتجاهـات متعاكسة وبشكل منفصل. والشكل (**٤ – ١٩**) يبين أحد تصاميم المرنان الحلقـي

وهو على شكل مثلث حيث يتموضع الوسط الليزري الفعال على منحـى انتـشار الأشعة.



الشكل (٤ – ١٩)

كما أن الأشعة التي تنتشر باتجاه عقارب الساعة والأشعة التي تنتشر بالاتجـاه المعاكس سوف تخرجان من المرنان باتجاهين مختلفين كما هو موضح بالشكل . ويمكننا باستخدام كاشف فوتونات قياس شدة كل من الشعاعين وبالتـالي إثبـات مفعـول التنافس بين الشعاعين ، حيث لايظهر هذا المفعول في حالة المرنان الخطي ذي المرايـا المستوية أو المقعرة .

ومن ناحية أخرى فان طيف الاهتزازات الخاصة للمرنان الحلقي تتـشابه مـع المرنان الخطي مع الأخذ بعين الاعتبار أن المسافة التي يقطعها الـشعاع خـلال دورة واحدة في المرنان الخطي هي $2L$ بينما تكون المسافة في المرنان الحلقـي L' وهـي عبارة عن محيط المرنان الحلقي وفي حالتنا محيط المثلث .

كما أنه هناك خاصية أساسية يجب ذكرها عند استخدام المرنان الحلقي والـتي تظهر عند عملية دوران المرنان حول محور عمودي على مستويه . فإذا كان المرنـان يدور بسرعة زاوية Ω حول محور الدوران وباتجاه عقارب الساعة ففي هـذه الحالـة سوف يزداد طول مسار الشعاع الضوئي الذي ينتشر بنفس الاتجاه بالنـسبة لطـول مسار الشعاع الضوئي الذي ينتشر بالاتجاه المعاكس لعقارب الساعة ممـا يـؤدي إلى

نشوء فرق في التردد بين الشعاعين عند خروجهما من المرنان وهذا الفرق في التـردد يعطى بالعلاقة التالية :

$$\Delta \upsilon = \frac{4F \cdot \Omega}{\lambda \cdot L'} \qquad (٤-٨٨)$$

حيث F مساحة سطح المرنان .

وباعتبار أن هذا الفرق في التردد يمكن تحديده بدقة كبيرة لذلك يستخدم المرنان الحلقي لقياس التغيرات التي تطرأ على السرعات الزاوية .

٤-٩- الخصائص التقنية العامة للمرنان:

إن الاستخدامات المتعددة لأشعة الليزر والعدد الكبير من الأوسـاط الليزريـة الفعالة المختلفة والمستخدمة في توليد أشعة الليزر أدت إلى بناء أنـواع مختلفـة مـن المرنانات وبقياسات مختلفة يتراوح طولها بين mm ١ وحتى m ٢٠٠ ونصف قطرها بين ٥٠μm حتى cm ٥٠ . ولكن عند تصميم هذه الأنواع المختلفة للمرنان لابد من الأخذ بعين الاعتبار بعض الشروط والمواصفات التالية:

*- يجب أن يكون طول المرنان ثابتاً والتغير في طول المرنان أثناء عمل الليزر يجب أن يكون أقل من λ/١٠ وذلك من أجل الحصول على استقرار وثبـات جيـد في تردد أشعة الليزر الناتجة. وعند استخدام مرنان ذات طول كبير يجب تثبيت حاملي المرآتين بواسطة مواد ذات ثبات عال وذات معامل تمدد حراري صغير جداً. وإذا كان المرنان ضمن صندوق مغلق يجب أن يصمم هذا الصندوق بحيث يكون توزع الحرارة المنتشرة متجانساً في كل الاتجاهات لتجنب أي انحناء أو تغير في شـكل المرنان ناتج عن عملية التمدد الحراري .

*- إذا لم تكن مرايا المرنان متصلة مع الوسط الليزري الفعال يجب أن تثبت على حوامل متينة قابلة للتغيير والمعايرة بشكل دقيق وحساس وذلك من أجل التحكم

في دقّة الحصول على الإنماط الليزرية المرغوبة، كما يجب ألاّ تتأثر هذه الحوامل بالاهتزازات والاضطرابات الناتجة عن الوسط المحيط بالمرنان .

*- يجب اعتماد وسائل وطرق مناسبة لتبريد المرايا وذلك لتجنب التأثيرات الحرارية على بنية وشكل المرايا في الحالات التي يستخدم فيها المرنان في الليزرات ذات الاستطاعات العالية .

*- المرنانات ذات الحساسية الكبيرة ودقّة التوليف العالية يجب تثبيتها على قواعد أو طاولات صلبة وثقيلة جداً وذلك لتجنب تأثير الاهتزازات الناتجة عن البناء والمساهمة في تخامد هذه الاهتزازات ، كما يجب حمايتها بمظلة عازلة للصوت من أجل منع تأثير الأمواج الصوتية .

*- في حالة ليزرات المواد الصلبة والتي تعمل بشكل نبضي يؤدي أحياناً التسخين غير المتجانس للوسط الليزري الفعال إلى تغيير وتشويه في شكل أو تجانس هذا الوسط مما يؤدي إلى ظهور مناطق تعمل على تبئير أو تجميع الأشعة الليزرية في مراكز صغيرة أي توليد تأثير مشابه تماماً لتأثير العدسات المجمعة أو المركّزة للأشعة مما يسبب تخريباً وأحياناً تدمير الوسط الليزري الفعال ، لذلك يجب اختيار مرايا المرنان بحيث تمنع حدوث هذه الظاهرة وتجنب آثارها.

*- يجب أن تكون سطوح جميع مكونات المرنان مصقولة جيداً أي أن تكون ذات تسطّح دقيق جداً وأن لايتجاوز التغير فيه بين $\lambda/10 \rightarrow \lambda/100$ من السطح المثالي سواء" كان ذلك في حالة المرنان ذات المرايا المستوية أو المرنان ذات المرايا المقعرة .

*- عند ربط مرنانين مع بعضهما البعض يجب أن يكون قطر الشعاع الضوئي وكذلك مقدار الانحناء في جبهة الموجة المنتشرة من المرنان الأول متوافقة ومتطابقة مع تلك القيم التي في المرنان الثاني .

الفصل الخامس

خصائص أشعة الليزر

٥-١- مقدمة:

لقد رأينا حتى الآن أن جهاز توليد أشعة الليزر يمثل منبعاً للضوء يسمح بالحصول على أشعة وحيدة اللون وذات كثافة طاقية عالية جداً بسبب عملية التضخيم للضوء ، والتي تتم بمساعدة ظاهرة الرنين . وبذلك يتحقق لدينا منبع ضوئي تختلف أشعته بشكل أساسي ومبدئي عن جميع المنابع الضوئية التقليدية المعروفة في المجال الطيفي الكهرطيسي . فبينما تستند المنابع الضوئية التقليدية على عملية الإصدار العفوي فإن منابع الضوء الليزرية تعتمد على عملية الإصدار القسري للذرات المثارة ،ومن هنا يطرح السؤال عن خصائص هذه الأشعة الليزرية ، وبما إذا تختلف عن خصائص المنابع الأخرى ؟

عند دراستنا للأشعة الكهرطيسية وانتشارها على شكل أمواج في الفراغ نستخدم عادة مفاهيم فيزيائية مثل سعة الموجة الكهرطيسية و التردد و الطور و جهة الانتشار ونوع استقطاب هذه الأمواج . وبالاستناد إلى مفاهيم الفيزياء الذرية والجزيئية فإن الأمواج الكهرطيسية تتولد بسبب عمليات الإصدار التي تقوم بها الذرات أو الجزيئات المثارة ، أي بواسطة مجموعة من منابع الإشعاع الذرية حيث تصدر كل ذرة قطاراً من الأمواج الكهرطيسية ذات أطوال موجية محددة . وانطلاقاً من ذلك تنتج خاصية عدم الترابط بين المقادير أو القيم التي تميّز حقل الإشعاع الناتج مع العلم أن هذه المقادير أو القيم لايمكن تعيينها بدقة عند دراسة هذا الحقل ، وإنما يمكن التعبير عنها في أغلب الأحيان بواسطة توزع محدد يمثل الاحتمال الأعظمي لهذه المقادير أو القيم . لذلك إذا أردنا وصف خصائص منبع إشعاع ضمن المجال الكهرطيسي يجب علينا معرفة التوزع الاحصائي لكل مقدار يميز حقل الإشعاع الناتج عن هذا المنبع .

ومن هنا ينشأ الاختلاف الأساسي بين حقل إشعاع منبع ضوئي عادي وبين حقل إشعاع منبع ضوئي ليزري. فالأشعة الصادرة عن منبع للضوء العادي تتألف من مساهمات عمليات الإصدار العفوي لعدد كبير من مراكز أو منابع الإشعاع والتي تكون مستقلة عن بعضها البعض ، وهذا يعني أنه لايوجد أي ارتباط بين عمليات الإصدار لهذه المراكز أو المنابع . وبناءً على ذلك يأخذ توزع جميع قيم شدات الحقل شكل توزع غاوص الذي يكون مركزه ذا قيمة معدومة .

أما بالنسبة للمنابع الضوئية الليزرية ، فإن الدراسة الاحصائية لقيم حقل الإشعاع تختلف عن دراسة المنابع العادية لأنه بسبب الخصائص المختلفة للاصدار القسري في عملية الليزرة ينتج عنه سلوك احصائي مختلف بشكل كلّي . فسعة حقل الإشعاع الليزري لايمكن وصفها بواسطة توزع غاوص الذي يكون مركزه ذا قيمة معدومة إنما بواسطة توزع حاد وضيق حول قيمة محددة.

كما أن أشعة الليزر تتميز بزيادة صغيرة جداً في عرض الخطوط الطيفية وكذلك فان حزمة الأشعة ذات اتجاهية دقيقة ومحددة . وبالرغم من أن ذلك يمكن تحقيقه في حالة الأشعة الصادرة عن المنابع التقليدية بواسطة استخدام فلتر أو مرشح ضوئي مناسب للحصول على أشعة محددة التردد والاتجاه الاّ أن شدة الأشعة الناتجة في هذه الحالة تكون صغيرة جداً لدرجة لايمكن استخدامها من الناحية العملية . وحتى عند زيادة درجة الحرارة في منابع الإشعاع الحرارية للحصول على كثافة عالية في طاقة الإشعاع فانّ ذلك يكون ذا فعالية أقل بكثير منه مقارنة بأشعة الليزر . لأنه في حالة أشعة الليزر تصدر طاقة الإشعاع بكاملها من الذرات المثارة ضمن إنماط محددة أو ضمن حقل اشعاع ذات تعريض صغير في الخطوط الطيفية أو انفراج صغير في مسار الأشعة مما يمكننا من الحصول على قيم عالية لكثافة الطاقة وهذا يفسح المجال لاستخدام أشعة الليزر في كثير من التطبيقات العملية الهامة . كما أنه بسبب الانفراج الصغير الذي تتصف فيه أشعة الليزر يمكن باستخدام أجهزة بصرية مناسبة الحصول على حزم

من الأشعة الضوئية حادة جداً وبالتالي على طاقة مركّزة وعالية الـشدة تـستخدم في تفاعلات الاندماج النووية مثلاً.

انطلاقاً من ذلك سوف تتركّز دراستنا على الخاصية الأكثر أهمية لأشعة الليـزر وهي ترابط أشعة الليزر أو الدراسة الإحصائية لهذه الأشعة . فالترابط يصف تابعيـة علاقة الطور للأمواج الضوئية المتداخلة مع بعضها البعض بالنسبة للزمـان والمكـان. ولذلك يتم التمييز دائماً بين الترابط الزماني والترابط المكاني لأشعة الليزر .

فالترابط الزماني يتعلّق بالتوزع الطيفي للمنبع الضوئي ويرتبط مباشرة مع زمن الترابط، بينما الترابط المكاني يصف التأثيرات التي تتعلّق بحجم المنبع الضوئي وبالتـالي ارتباط الأشعة الصادرة عن نقاط أو أماكن مختلفة واقعة على سطح المنبع الضوئي مع بعضها البعض . وفي حالة الأشعة الليزرية يلعب الترابط المكاني دوراً ثانوياً مقارنةً مع الترابط الزماني .

٥-٢- ترابط الأمواج الكهرطيسية:

تنشأ حالة الترابط الزماني والترابط المكاني في حقل اشعاع ما بسبب خضوع الفوتونات إلى تابع الموجة نفسه ، وهذا يعني أنه يمكن وصـف جميـع الفوتونـات باستخدام التابع الموجي نفسه . أي عندما يكون هناك فرق في الطور ثابتٌ ومحدد بين الأمواج الجزئية الناتجة عن منبع الإشعاع بحيث تتولد لدينا ظاهرة تداخل بـين هـذه الأمواج . وبما أنّ الترابط بين هذه الأمواج الناتجة عن المنبع هو شكل مـن أشـكال تداخل الأمواج الكهرطيسية لذلك لابد من التذكير أولاً بظاهرة التداخل .

تتشكّل حالة التداخل عندما تتلاقى موجتان أو أكثر مع بعضهما الـبعض في نقطة ما من الفراغ . والحقل الموجي الناتج هو عبارة عن عملية جمع شعاعي لكلّ من الحقول الموجية الموافقة للأمواج الصادرة عن المنبع في تلك النقطة .

فعلى سبيل المثال إذا كان لدينا موجتان صادرتان عن منبعين ضوئيين نقطيين L_1 و L_2 وتمتلك هاتان الموجتان نفس طول الموجـة وبالتالي نفس التردد ويكـون لـشدات

الحقول الكهربائية الموافقة لهاتين الموجتين نفس حالة الاستقطاب ولتكن عمودية على مستوي الصفحة . تعطى متجهات الحقل الكهربائي E_1 و E_2 لهاتين الموجتين في النقطة التي يحدث عندها التداخل p بالعلاقتين :

$$\overrightarrow{E_1} = A_1 \cdot \cos 2\pi\left[\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} - \delta_1\right]$$
$$\overrightarrow{E_2} = A_2 \cdot \cos 2\pi\left[\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} - \delta_2\right] \qquad (٥\text{-}١)$$

حيث تمثّل A_1 و A_2 : سعة كلّ من الموجتين .

$T = 1/\nu$: دور الاهتزاز للموجتين .

r_1 و r_2 : المسافة التي تقطعها الموجة الأولى والموجة الثانية من المنبع إلىالنقطة p التي يحدث عندها التداخل .

δ_1 و δ_2 : ثابت الطور لكل من الموجتين .

وتتحدد قيمة متجهة الحقل الكهربائي لكلتا الموجتين عند منبعيهما L_1 و L_2 في اللحظة $(t = ٠)$ من خلال ثابتي الطور δ_1 و δ_2 . كما أن الإزاحة الزاوية للتوابع الجيبية في العلاقات السابقة تمثّل الطور لكلّ من الموجتين المدروستين . وتتناسب سعات كل من الموجتين A_1 و A_2 عكساً مع المسافة التي تقطعها الموجتين r_1 و r_2 على التوالي ، وفقط في الحالة التي تكون فيها أبعاد الفراغ الذي تدرس فيه ظاهرة التداخل صغيرة جداً يمكن اعتبار أن السعات A_1 و A_2 ثابتة .

ويمكن التعبير عن متجهة الحقل الكهربائي الكلية E الناتجة عن تداخل متجهات الحقول الكهربائية لكل من الموجتين E_1 و E_2 بالعلاقة :

$$\vec{E} = \overrightarrow{E_1} + \overrightarrow{E_2} \qquad (٥\text{-}٢)$$

وبما أنه في حالة الأمواج الضوئية تكون الترددات ذات قيم كبيرة بحيث لايمكن تعقّبها بواسطة العين لذلك تستخدم مقادير فيزيائية لقياسها ، مثل الشدات الضوئية أو القيم الوسطية للاستطاعة الساقطة على واحدة المساحة.

وفي الحالة العامة يمكن الاعتماد على مفاهيم فيزيـاء الأمـواج الكهرطيـسية للحصول على الشدة الكلية للموجة الناتجة عن عملية التداخل والتي تعطى بواسـطة متجه- بوينتينغ (Poynting-Vector) :

$$\vec{S} = \vec{E} \text{ X } \vec{H}$$

ووفقاً لذلك تتناسب الشدة الكلية طرداً مع مربع شدة الحقل الكهربـائي ومعامـل التناسب في هذه الحالة يأخذ أبعاد مقاومة ويدعى " المقاومة الموجيـة" ويرمـز لـه بالرمزZ:

$$Z = \frac{|E|}{|H|} = \sqrt{\frac{\mu_r \cdot \mu_0}{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0}}$$

وتبلغ قيمة المقاومة الموجية في الخلاء (Z = ٣٧٧ Ω) وتكون واحدة شـدة الإشـعاع ($W/m^٢$) وهي تمثّل استطاعة الأشعة الساقطة على واحدة المساحة .

انطلاقاً من ذلك تعطى الشدة الكلية للموجة الناتجة عن التداخل ونرمز لهـا J بالعلاقة التالية :

$$J = \frac{1}{Z}\overline{(E_1 + E_2)^2} \qquad (٥\text{-}٣)$$

نعوض قيم $E_١$ و $E_٢$ من العلاقة (**٥-١**) وبالاستفادة من مفاهيم علم المثلثات نحصل على العلاقة:

$$\begin{aligned} J = \frac{1}{2Z}[\, & A_1^2 + A_1^2 \cdot \overline{\cos 4\pi(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} - \delta_1)} \\ & + A_2^2 + A_2^2 \cdot \overline{\cos 4\pi(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} - \delta_2)} \\ & + 2A_1 \cdot A_2 \cdot \overline{\cos 2\pi(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1)} \\ & + 2A_1 \cdot A_2 \cdot \overline{\cos 2\pi(\frac{2t}{T} - \frac{r_2 + r_1}{\lambda} - \delta_2 - \delta_1)}\,] \end{aligned} \qquad (٥\text{-}٤)$$

وبما أن القيم الوسطية بالنسبة للزمن للتوابع الجيبية التي تحتوي علـى t تـساوي إلى

الصفر وذلك خلال دور واحد وعندما يكون الزمن أكبر من دور الاهتزازة وبالتـالي تصبح العلاقة (**٤-٥**) عند مناقشتها خلال دور واحد بالشكل :

$$J = \frac{1}{2Z}[A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 \cdot A_2 \cdot \cos 2\pi(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1)] \qquad (٥\text{-}٥)$$

فإذا اعتبرنا أنّ شدات الموجتين المتداخلتين J_1 و J_2 يمكن كتابتهما بدلالة كل مـن A_1 و A_2 أي أن :

$$J_1 = \frac{1}{2Z}A_1^2$$
$$J_2 = \frac{1}{2Z}A_2^2 \qquad (٥\text{-}٦)$$

وبالتالي يمكن كتابة العلاقة (**٥-٥**) بالشكل الآتي :

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 \cdot J_2} \cdot \cos 2\pi(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1)] \qquad (٥\text{-}٧)$$

نستنتج من هذه العلاقة أنّ الشدة الكلية J لاتساوي بـشكل عـام مجمـوع الشدات الجزئية الموافقة للأمواج المتداخلة J_1 و J_2 وإنما يجب إضافة حد ثالث لهمـا مرتبط بعملية التداخل ويدعى "حد التداخل"

$$2\sqrt{J_1 \cdot J_2} \cdot \cos 2\pi(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1)$$

ويدل هذا الحد على أن الشدة الكلية عند نقاط مختلفة تتأرجح قيمتها حـول القيمـة (J_1+J_2). وتبلغ الشدة الكلية قيمتها العظمى عندما يكون فرق المسار بـين المـوجتين $(r_2 - r_1)$ عند النقطة التي يحدث عندها التداخل p كبيراً لدرجة يكون فيها :

$$\cos 2\pi(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1) = 1$$

وإذا كانت قيم ثابت الطور لكلتا الموجتين δ_1 و δ_2 متساوية تكون في هـذه الحالـة قيمة فرق المسار بالنسبة لطول الموجة λ عدداً صحيحاً.

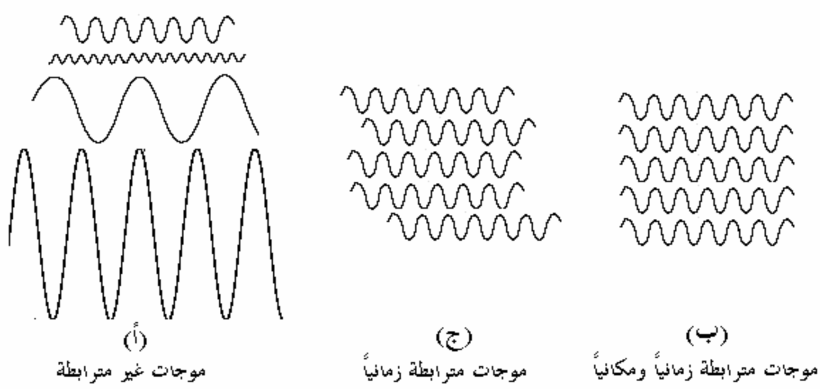
إذا يمكننا القول باختصار أنه عندما يكون المقدار: $2\pi(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1)$

مساوياً للصفر أو عدداً صحيحاً من أمثال 2π تنتج عن ذلك شدة كليـة عظمـى . وعندما يكون مساوياً لعدد فردي من أمثال π يوافق ذلك الحصول على شدة كليـة صغرى . وهذا يمكن ملاحظته بشكل واضح عندما يكون $A_2=A_1$ أي عندما $J_2=J_1$ حيث ينتج لدينا في هذه الحالة شدة كلية عظمى قيمتها $J = 4\ J_1$ وفي حالة الـشدة الكلية الصغرى تكون قيمتها $J = 0$.

ولكن لابد من التنويه هنا إلى أنه لايمكن أن تتضاعف قيمة الشدة أو تتلاشـى لأنه عندما تكون الشدة الكلية في نقطة ما من الفراغ $(J > J_1 + J_2)$ فانها سـوف تكون في نقطة أخرى من الفراغ $(J < J_1 + J_2)$ بحيث يكون مبدأ انحفـاظ الطاقـة محققاً دائماً.

إذاً بشكل عام ، نقول عن موجتين كهرطيسيتين إنهما مترابطتـان إذا كانـت بينهما علاقة طور ثابتة ومحددة بحيث يكون الفرق بين ثوابت الطور لهاتين المـوجتين $\delta_2-\delta_1$ ثابتاًمع الزمن . أما إذا تغيرت قيم ثوابت الطور δ_2 و δ_1 بشكل غير ثابـت أو مستقلين عن بعضهما فتكون الموجتان غير مترابطتين . كما أن حالة الترابط وحالـة عدم الترابط تمثلان حالتين حديتين من أجل علاقة طورية بين موجتين متداخلتين مـع بعضهما البعض ولكن هناك أيضاً حالة بينهما تمثّل الترابط الجزئي .

إذاً تتميز أشعة الليزر عن غيرها من الأشعة بأنها تتولد قسرياً مما يجعـل جميـع الفوتونات خاضعة إلى نفس تابع الموجة على عكس الأشعة المتولدة عـن الإصـدار العفوي حيث يوصف كل فوتون بتابع موجة خاص به دون سواه . وانتماء الفوتونات إلى تابع موجة واحد يؤدي إلى نشوء حالة الترابط الزماني والترابط المكاني للأمـواج الكهرطيسية الموافقة لهذه الفوتونات والشكل **(٥ - ١)** يوضح ذلك.



الشكل (٥ - ١) الترابط الزماني والمكاني لموجات مختلفة

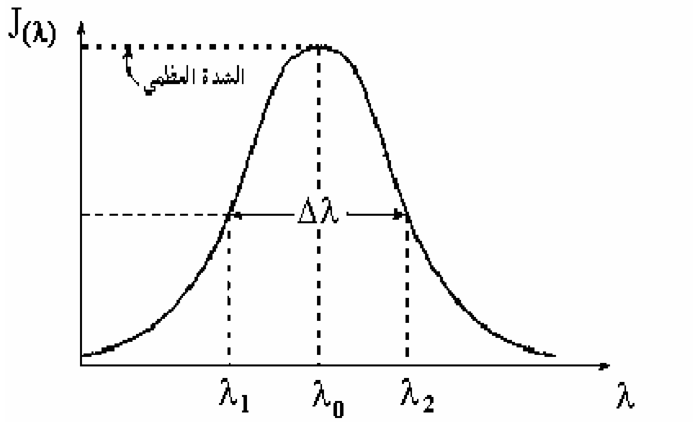
٥-٣- الترابط الزماني – زمن الترابط – طول الترابط :

إذا كان لدينا حقل اشعاع ناتج عن منبع أشعة كهرطيسية فإن الأمواج الجزئية الصادرة عن نقاط مختلفة من سطح المنبع سوف تتداخل مع بعضها البعض عند نقطة ما p من الفراغ . وكنا قد وجدنا أن الشدة الكلية J تتعلّق بشدة كل موجة وكذلك بفرق الطور بين هذه الأمواج . فإذا كان فرق الطور يأخذ قيماً متغيرة ومحصورة ضمن المجال $(0 < \Delta\delta = \delta_2-\delta_1 < 2\pi)$ فنحصل على حالة عدم الترابط . بينما تنشأ حالة الترابط عندما يأخذ فرق الطور قيمة ثابتة $(\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1 = const)$ وذلك خلال فترة زمنية $(\tau = \Delta t >> 2\pi/\omega)$ ونقول إن الحقل مترابط زمنياً في النقطة p . ويدعى الزمن الأعظمي τ الذي يبقى خلاله فرق الطور $\Delta\delta$ ثابتا : زمن ترابط منبع الإشعاع ونعني بذلك الفترة من الزمن التي تبقى فيها الفوتونات موصوفة بتابع الموجة نفسه، وبتعبير آخر فان الترابط الزماني هو مدى استقرار تابع موجة الشعاع الضوئي مع الزمن، وهذا الاستقرار في الموجة يعني استقراراً في ترددها أيضاً. كما تدعى المسافة التي تقطعها الأمواج الضوئية في جهة الانتشار خلال زمن الترابط طول الترابط ويرمز له ℓ . وبالتالي فإن العلاقة بين زمن الترابط وطول الترابط هي :

$$\tau = \frac{\ell}{c} \qquad (٥\text{-}٨)$$

نلاحظ أن تعريف طول الترابط اعتمد على مفهوم لمنبع ضوئي يصدر أمواجـاً ذات أطوال موجية λ محددة بدقة وذلك كما هو مبين في العلاقات (**٥-١**) .

ولكن وبالرغم من عدم وجود منبع كهذا فإن هذا التعريف يبقى مقبولاً ، لأنه كما نعلم لاتوجد منابع ضوئية تعطي طول موجة أو تردداً وحيداً ومحدداً بدقة حـتى باستخدام أفضل المصابيح الطيفية ، وأيضاً في الليزرات لايمكن تحقيق ذلك وإنما نحصل على ضوء يتألف من أطوال موجية أو ترددات قريبة جداً من بعـضها الـبعض وأن التوزع الطيفي للأطوال الموجية الصادرة من تلك المنابع موضحة بالشكل **(٥ - ٢)** .



الشكل (٥ - ٢) توزع الشدة الطيفية للخط الطيفي كتابع لطول الموجة

وتعريض الخط الطيفي في هذه الحالة يمكن تحديده ببساطة من خلال المقدار:

$$(\Delta\lambda = \lambda_{٢} - \lambda_{١})$$

وإذا عبرنا عن التوزع الطيفي بدلالة التردد υ بدلاًمن طول الموجة λ فاننا نحـصل على العلاقة التالية بينهما :

$$\frac{\Delta\upsilon}{\upsilon_0} \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$
$$\Rightarrow \Delta\upsilon \approx \upsilon_0 \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} \qquad (٥\text{-}٩)$$

ومن أجل كل طول موجة λ تعطى الشدة الكلية في النقطة التي يحدث عندها التداخل بالعلاقة (**٥-٧**) . فعلى سبيل المثال إذا كانت ثوابت الطـور δ_1 و δ_2 تملـك قيمـاً متساوية فاننا نحصل على شدة عظمى من أجل λ_0 عندما يكون :

$$\frac{r_2 - r_1}{\lambda_0} = n \qquad (٥-١٠)$$

حيث n عدد صحيح .

وبشكل عام لايعني هذا بالضرورة أن نحصل على شدة عظمى أيضاً من أجـل طول موجة أخرى λ_1 في النقطة التي يحدث عندها التـداخل لأن النـسبة $\frac{r_2 - r_1}{\lambda_1}$ سوف يكون لها قيمة أخرى لـ n تختلف عنها في حالة λ_0 .

كما أنه عندما تكون فروق المسارات من أجل طول الموجة λ_0 وكـذلك مـن أجل $\lambda_1 = \lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}$ صغيرة جداً أي عندما يكون المقدار $\frac{\Delta\lambda}{2}$ ، فان قيم المقـادير النسبية $\frac{r_2 - r_1}{\lambda_0}$ و $\frac{r_2 - r_1}{\lambda_1}$ لاتختلف كثيراًعن بعضها البعض بحيث يمكن الحـصول على شدة عظمى للتداخل من أجل الأطوال الموجية λ_0 و λ_1 ، وهذا ينطبـق أيـضاً بالنسبة للأطوال الموجية λ_0 و λ_2 .وبالاعتماد على ذلك يمكن اعتبار أن جميع الأطوال الموجية المحصورة ضمن المجال المحدد بكل من λ_1 و λ_2 يمكن أن تتداخل مـع بعـضها البعض والحصول على شدة عظمى .

أما عندما تزداد فروق المسارات بشكل كبير فانه نحصل على حالة تكون فيها الشدة عظمى من أجل طول الموجة λ_0 بينما من أجل طول الموجة λ_1 تكون شـدة التداخل صغرى ، ويحدث ذلك عندما تكون λ_1 كبيرة جـداً ($\lambda_1 >> \lambda_0$) وهـذا يتحقق عندما يكون :

$$\frac{r_2 - r_1}{\lambda_1} = \frac{2n+1}{2} \qquad (٥-١١)$$

وهذه الحالة تظهر عندما يكون فرق المسار كبيراً جداً لأنه عند كل طول موجة λ_0 ينتج شدة تداخل عظمى يمكن إيجاد طول موجة ثان λ_1 ينتج شدة تداخل صغرى وفرق المسار الذي تحدث من أجله هذه العلاقة بين λ_0 و λ_1 (أي التمايز في شـدات التداخل بين عظمى وصغرى من أجل λ_0 وλ_1) يتوافق تماماً مع تعريف طول الترابط ℓ وبالتالي انطلاقاً من العلاقتين (**5-10**) و (**5-11**) نحصل على :

$$\ell = r_2 - r_1 = \frac{1}{2\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_0}\right)} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_0}{2(\lambda_0 - \lambda_1)} \qquad (5\text{-}12)$$

وإذا أخذنا التقريب التالي بعين الاعتبار:

$$\lambda_0 - \lambda_1 = \frac{\Delta\lambda}{2}$$

وفي الحالة التي تكون فيها $\Delta\lambda$ صغيرة جداً يمكن أن نعتبر $\lambda_1 \approx \lambda_0$ وبالتـالي تـصبح العلاقة (**5-12**) بالشكل:

$$\ell \approx \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \qquad (5\text{-}13)$$

والآن إذا عوضنا العلاقة (**5-13**) التي تعبر عن طول الترابط بدلالة طول الموجـة في العلاقة (**5-8**) التي تعطي زمن الترابط نجد أن :

$$\tau = \frac{\ell}{c} = \frac{1}{c} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \qquad (5\text{-}14)$$

وبمقارنة العلاقة (**5-14**) مع العلاقة (**5-9**) نحصل على :

$$\tau = \frac{1}{\Delta\upsilon} \qquad (5\text{-}15)$$

وبمقارنة هذه العلاقة مع (**5-8**) نستنتج أن :

$$\ell = \frac{c}{\Delta\upsilon} \qquad (5\text{-}16)$$

أي أن طول الترابط لأشعة صادرة عن منبع ضوئي يزداد كلما تناقص التعريض الطيفي $\Delta\upsilon$ لهذه الأشعة . لذلك نجد أنه في حالة الأشعة الصادرة عن ذرات مثـارة ومتحركة تكون الترددات الوسطية لأشعة هذه الذرات مختلفة بدرجات متفاوتة بسبب التعريض الناتج عن مفعول دوبلر لأنها تتحرك بسرعات واتجاهات مختلفة مما يؤدي إلى تعريض اضافي لترددات الأشعة وتكون النتيجة تناقصاً في طول الترابط لهذه الأشعة .

ونستنتج من العلاقة (**٥-١٦**) أنه من أجل منبع ضوئي يصدر أمواجاً خلال فترة زمنية محددة فان زمن الترابط لهذه الأمواج يتوافق مع الفترة الزمنية التي تحدث خلالها عملية الإصدار وذلك عندما تكون قيمة التعريض الطيفي $\Delta\upsilon=١/\lambda$.

كما أن طول الترابط يأخذ قيماً مختلفة للغاية وذلك وفقاً لطبيعة المنبع الضوئي الذي يصدر الأمواج الكهرطيسية المترابطة . ويمكن عند شروط مناسبة (خطوط طيفية حادة جداً وذات تعريض صغير) الحصول على طول ترابط يصل إلى عدة أمتار ومن أجل هذه الحالة يكون زمن الإصدار لهذه الأمواج من مرتبة $(١٠^{-٨}\ Sec)$ ، أي أن هذا الزمن قصير جداً مقارنة بالزمن الذي ندرس فيه هذه الحالة .

أما إذا كان الضوء الصادر عن المنبع غير متجانس كما هو الحال بالنسبة للضوء الأبيض مثلاً الذي يتألف من جميع الأطوال الموجية المرئية المحصورة ما بين الأحمـر و البنفسجي فيكون طول الترابط لهذا المنبع صغيراً جداً ومن مرتبة $(\ell=١٠^{-٦}\ m)$.

مثال:

احسب طول الترابط لكل من :

أ- مصباح بخار زئبقي يصدر ضوءاً في المجال الأخضر من الطيف الكهرطيسي طول موجته $\lambda_{٠}=٥٤٦,١\ nm$ و وتعريض خطه الطيفي $\Delta\upsilon = 6\cdot 10^{8}\,Hz$.

ب- ليزر الهليوم-نيون الذي يـصدر ضـوءاً طـول موجتـه $\lambda_0 = 632,8nm$ وتعريض خطه الطيفي $\Delta\upsilon = 10^{6}\,Hz$.

الحل:

أ- بما أن طول الترابط يعطى بالعلاقة : $\ell = \dfrac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$

لذلك يجب في البداية تحديد قيمة $\Delta\lambda$ للخط الطيفي الصادر عن كل مـن بخـار الزئبق وليزر الهليوم-نيون ، وانطلاقاً من العلاقة التي تربط بين التردد وطول الموجة نجد أن :

$$\upsilon = \frac{c}{\lambda} \;\Rightarrow\; d\upsilon = -\frac{c}{\lambda^2}\cdot d\lambda$$

$$\Rightarrow\; \Delta\upsilon = -\frac{c}{\lambda^2}\cdot \Delta\lambda$$

وبالتالي يمكن حساب القيمة المطلقة لـ $\Delta\lambda$ حيث أن :

$$|\Delta\lambda| = \frac{\lambda^2\cdot\Delta\upsilon}{c}$$

فمن أجل بخار الزئبق يكون :

$$\Delta\lambda = \frac{(546{,}1\cdot10^{-9}\,m)^2\cdot(6\cdot10^8\,s^{-1})}{3\cdot10^8\,m/s} = 5{,}96\cdot10^{-13}\,m = 5{,}96\cdot10^{-4}\,nm$$

$$\Rightarrow\; \ell = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} = \frac{(546{,}1\cdot10^{-9}\,m)^2}{5{,}96\cdot10^{-13}\,m} = 0{,}50\,m$$

ب- أما بالنسبة إلى ليزر الهليوم- نيون نجد أن :

$$\Delta\lambda = \frac{(632{,}8\cdot10^{-9}\,m)^2\cdot(1\cdot10^6\,s^{-1})}{3\cdot10^8\,m/s} = 1{,}33\cdot10^{-15}\,m = 1{,}33\cdot10^{-6}\,nm$$

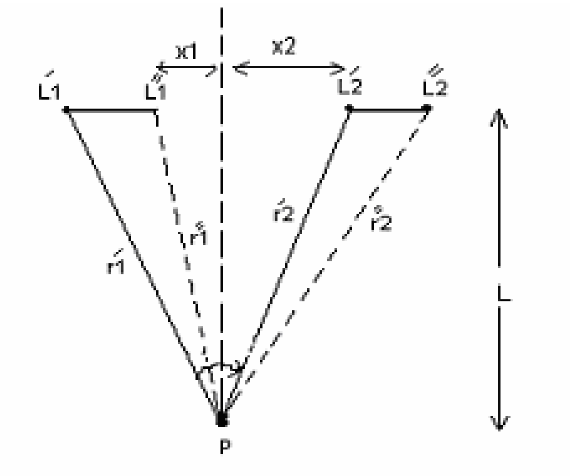
$$\Rightarrow\; \ell = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} = \frac{(632{,}8\cdot10^{-9}\,m)^2}{1{,}33\cdot10^{-15}\,m} = 301\,m$$

نستنتج من ذلك أن شعاع الليزر يمتلك طول ترابط أكبر بكثير (٦٠٠ مرة) منه في حالة مصباح بخار الزئبق .

٥-٤- الترابط المكاني :

اعتمدت مناقشاتنا في الفقرات السابقة على افتراض أن الأمواج الكهرطيـسية التي تتداخل مع بعضها صادرة عن منبع نقطي ، ولكن هذه عبارة عن حالة مثاليـة. لأنه في الواقع عند دراسة تجارب التداخل تكون المنابع الضوئية عبارة عن سـطح ذي أبعاد محددة يصدر أمواجاً كهرطيسية ، لذلك يجب أن نحدد إلى أي مـدى تكـون مساحة سطح المنبع ذات تأثير على ظاهرة التداخل ، لأنه سوف نجد أن أبعاد المنبـع يجب أن تكون محققة شروطاً محددة حتى تتداخل الأمواج الصادرة عن مثل ذلك المنبع مع بعضها البعض .

لدراسة ذلك نفترض أنه لدينا منبع ضوئي طوله $\overline{L_1L_2}$ بحيث يسقط الـضوء الصادر عنه على مرآتين عاكستين تشكلان منـبعين ضـوئيين افتراضـيين $\overline{L_1^{'}L_1^{''}}$ و $\overline{L_2^{'}L_2^{''}}$ لكل منهما امتداد محدد يعادل طول المرآتين كما في الشكل (**٥ - ٣**).



الشكل (٥ – ٣)

تصدر جميع النقاط التي يتألف منها سطح منبع ضوئي أمواجاً كهرطيسية غـير مترابطة بسبب تغيرات الطور غير المنتظمة لأن كل نقطة من المنبع تـصدر أمواجـاً

بشكل مستقل عن جميع النقاط الأخرى .

ولتبسيط الدراسة نأخذ بعين الاعتبار النقاط الحدية المتوافقة التي تمثل طرفي كل من المنبعين الافتراضيين أي النقاط L'_1 و L'_2 وكذلك النقاط L''_1 و L''_2 ونعتبر أن دراستنا على هذه النقاط يمكن تطبيقها على جميع النقاط الأخرى .

ان الأمواج الصادرة عن النقطتين L'_1 و L'_2 سوف تكون مترابطة وستتداخل مع بعضها البعض لأنها تتوافق مع نفس النقاط الحدية مـن المنبـع الأساسـي L_1L_2 وكذلك نجد نفس الشئ بالنسبة للنقاط L''_1 و L''_2. كما أن شدة التداخل في النقطة p الناتجة عن الأمواج الواردة من النقطتين L'_1 و L'_2 سوف تكون عظمى لأن $r'_1 = r'_2$ وذلك إذا افترضنا أن الفرق في ثابت الطور يساوي الصفر . وكـذلك سـوف تتداخل في النقطة p الأمواج الواردة من النقطتين L''_1 و L''_2 ولتحديـد الـشدة الكلية الناتجة عن التداخل يجب حساب فرق المسار بين هاتين النقطتين $r''_2 - r''_1$.

من الشكل السابق يمكن أن نستنتج أن :

$$\begin{aligned} r_2'' - r_1'' &= \sqrt{x_2^2 + \ell^2} - \sqrt{x_1^2 + \ell^2} \\ &= \ell \cdot \sqrt{1 + \frac{x_2^2}{\ell^2}} - \ell \cdot \sqrt{1 + \frac{x_1^2}{\ell^2}} \end{aligned} \qquad (٥-١٧)$$

وفي الحالة التي يكون فيها $(\ell >> x_1 , x_2)$ أي أن المسافة بين المنـبعين الافتراضـيين والنقطة التي يحدث عندها التداخل p كبيرة جداً تصبح العلاقة السابقة بالشكل :

$$\begin{aligned} r_2'' - r_1'' &\approx \ell\left(1 + \frac{x_2^2}{2\ell^2}\right) - \ell\left(1 + \frac{x_1^2}{2\ell^2}\right) \approx \frac{x_2^2 - x_1^2}{2\ell} \\ &\approx \frac{(x_2 - x_1)(x_2 + x_1)}{2\ell} \end{aligned} \qquad (٥-١٨)$$

ومن الشكل نستنتج أن : $\frac{x_2 - x_1}{2} = a$ والذي يمثل امتداد المنبع الضوئي .

وأن : $\frac{x_2 + x_1}{\ell} = 2\sin\theta$

2θ الزاوية التي يرى من خلالها المنبعين الضوئيين الافتراضينن من النقطة p التي يحدث عندها التداخل .

وبالتالي تصبح العلاقة السابقة بالشكل :

$$r_2^{''} - r_1^{''} \approx 2a \cdot \sin\theta \qquad (٥-١٩)$$

ومن أجل أن تتشكل شدة عظمى في النقطة p ، نتيجة لتداخل الأمواج الواردة من النقطتين $L''_١$ و $L''_٢$ ، يجب أن يكون فرق المسار الذي تقطعه هذه الأمواج صغيراً مقارنة بنصف طول الموجة $\lambda/٢$. وإذا كان $(r''_٢ - r''_١ = \lambda/٢)$ تكون شدة التـداخل عند النقطة p صغرى .

لذلك بالاستناد على العلاقة **(٥-١٩)** يمكن استنتاج قيمة امتداد المنبع الضوئي الذي تكون عنده شدة التداخل الناتجة أعظمية :

$$r_2^{''} - r_1^{''} \approx 2a \cdot \sin\theta << \frac{\lambda}{2}$$
$$\Rightarrow a << \frac{\lambda}{4\sin\theta} \qquad (٥-٢٠)$$

وفي الحالة التي تكون فيها θ صغيرة جداً يمكن تبسيط العلاقة السابقة إلى الشكل :

$$a << \frac{\lambda}{4 \cdot \theta} \qquad (٥-٢١)$$

ومن هذه العلاقة نستنتج أنه عندما تكون θ صغيرة جداً يمكن استخدام منابع ضوئية ذات أبعاد كبيرة من أجل تجارب التداخل ودراسة التـرابط بـين الأمـواج ونلاحظ أن هذا الشرط دوماً محققاً عندما تكون هذه الأمواج واردة من منابع ضوئية كبيرة وبعيدة جدا " كالنجوم مثلاً .

ناقشنا حتى الآن حالة الأمواج التي تكون مستويات الاستقطاب فيها متوازيـة فيما بينها ولكن عندما يكون مستوي الاستقطاب لإحدى الموجتين المتداخلتين متعامداً مع مستوي الورقة مثلاً ومستوي الاستقطاب للموجة الثانية واقعاً في مستوي الورقة أي عمودياً على مستوي الاستقطاب للموجة الأولى ، وإذا كانت شـدات الحقـل

الكهربائي الموافقة لهاتين الموجتين هي على التوالي $E_{1\perp}$ و $E_{2\parallel}$ فتكـون المحـصلة الكلية لشدة الحقل الكهربائي عبارة عن المجموع الشعاعي لهذه الـشدات وبالتـالي يكون لدينا :

$$E = \sqrt{E_{1\perp}^2 + E_{2II}^2}$$

وبما أن الشدة J كما وجدنا سابقاً وفقاً للعلاقات (**٥-٦**) تتناسب طرداً مع مربـع السعة A ينتج لدينا : $J = J_1 + J_2$

وهذا يعني أنه عند تلاقي موجتين مستقطبتين بشكل يكون فيه مـستويا اسـتقطابهما متعامدين مع بعضهما فان الشدة الكلية تنتج عن جمع شدات مركبات الحقل التي تمثل حالة الاستقطاب فقط ولكن الموجتين لاتتداخلان مع بعضهما البعض.

وكلما ازدادت مساحة الترابط تزداد شدة الترابط المكاني للشعاع . وبـشكل عـام لاتوجد أشعة مترابطة مئة في المئة ولكن تبقى أشعة الليزر هي أشد الأشـعة المعروفـة ترابطاً في المكان لأنها تمتلك مساحة ترابط S كبيرة جداً مقارنة مع غيرها من الأشعة. ولخاصية الترابط المكاني لأشعة الليزر تأثير كبير على انفراج الـشعاع وعلـى شـدة الشعاع وهذا ماسنشرحه فيما يلي .

٥-٥- انفراج شعاع الليزر :

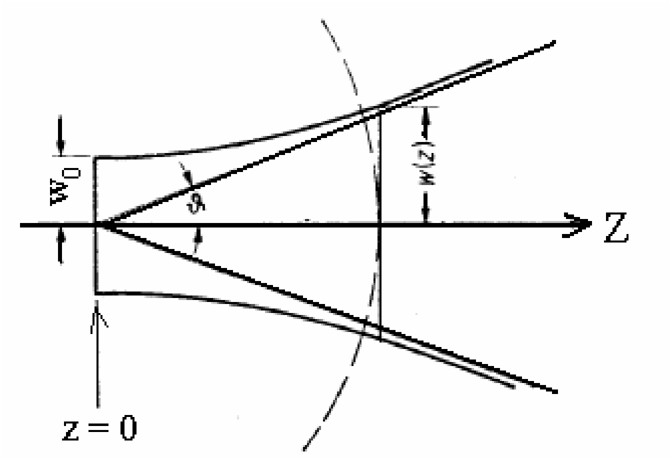
لقد وجدنا سابقاً أن الأشعة ضمن المرنان تعاني خسارة ناتجة عن الانعكاسات التي تتم بزاوية ما بالنسبة لمحور المرنان ، بينما تكون الأشعة التي تصدر عـن الوسـط الليزري الفعال وتخرج عبر إحدى مرآتي المرنان موازية لمحور المرنان ، وكلّما ابتعـدنا عن هذا المحور تتناقص شدة هذه الأشعة ويأخذ شعاع الليزر شكل مخروط كما هـو مبين بالشكل (**٥ – ٤**).

فإذا اعتبرنا أن شدة الأشعة عند نقطة تمثل مركز المرنان وتقـع علـى محـوره تساوي I_0 (للـنمط TEM_{00}) حيـث تكون $x = 0$ ، فإن شدة الأشـعة في

نقطة تبعد مسافة x عن المحورتعطى وفقاً للعلاقة :

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\frac{2x^2}{W^2}}$$

حيث يمثل w نصف قطر شعاع الليزر، والذي نعتبره شعاعاً اسطواني الشكل قطره $d = ٢w$ ، والمقدار w هي عبارة عن مقدار ثابت يتعلق بجهاز الليزر .



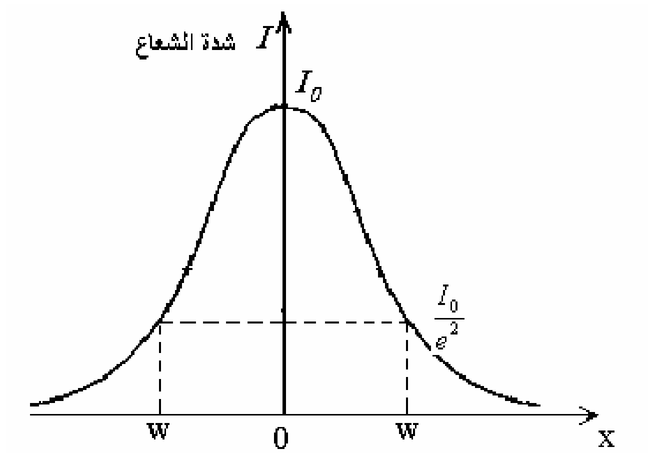
الشكل (٥ - ٤) انفراج شعاع الليزر

وبالتالي فان شدة أشعة الليزر المنبعثة باتجاه محور موازٍ لمحور المرنان وموجود على مسافة $w = x$ تكون وفقا للعلاقة السابقة :

$$I_W = I_0 \cdot e^{-2} = 0{,}135\ I_0$$

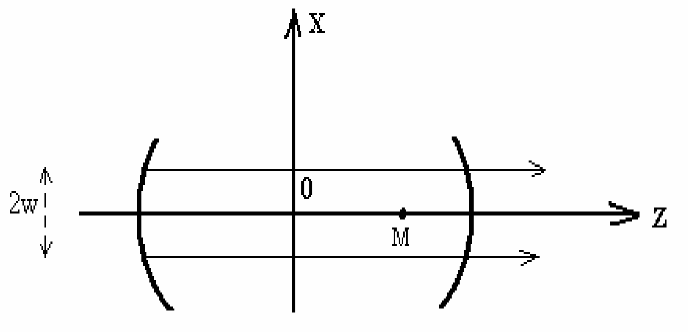
أي أن قيمة الأشعة عند هذه النقطة تكون أقل بكثير من شدة الأشعة المنبعثة عند المحور الأساسي حيث: $\frac{I_W}{I_0} = 0{,}135$.

ويوضح الشكل **(٥ - ٥)** التغير في شدة شعاع الليزر كتابع للمـسافة بالنـسبة لمركز الشعاع ، والذي مسقطه في هذه الحالة يكون على شكل تابع غاوصي .



الشكل (٥ – ٥)

إذاً انطلاقاً من ذلك نستطيع إهمال شدة الأشعة المنبعثة باتجاه مواز لمحور المرنان ولكن على مسافات أكبر من w أي من أجل قيم $x > w$ نظراً لضعفها أي أن شعاع الليزر الذي يهمنا هو الشعاع الأسطواني الذي قطر دائرته $٢w$ وهذا موضح بالشكل **(٥ - ٦).**

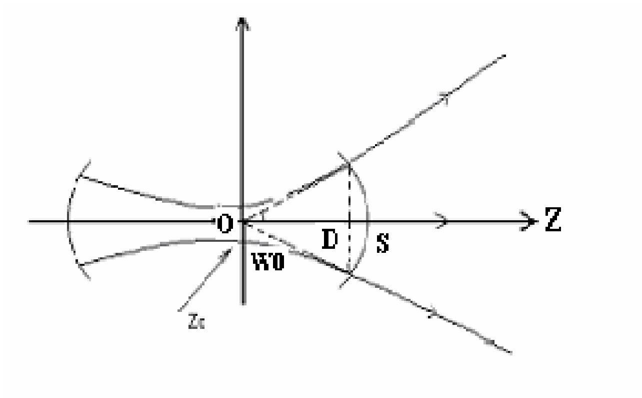


الشكل (٥ – ٦)

ولكن هل هذا صحيح تماماً من الناحية العملية ، أي هل شعاع الليزر هو اسطواني الشكل وقطره يساوي $d = ٢w$ عندما ينتشر خارج المرنان وتكون أطرافه الخارجية موازية تماماً للمحور الأساسي بنسبة ١٠٠ % دون أي انفراج في الفضاء ؟ أو هل المسافة w وبالتالي قطر دائرة شعاع الليزر $٢w$ هي ذاتها إذا اقتربنا من إحدى مرآتي المرنان أو إذا ابتعدنا مسافة ما من جهاز الليزر مثلا ؟

إذا أخذنا نقطة ما M من المحور الأساسي كما في الشكل (٥ - ٦) فما هـي المسافة التي يجب أن نبتعدها عن هذا المحور حتى نستطيع إهمال شدة الشعاع ؟.

من الناحية النظرية فإن هذه المسافة هي w أيضاً ، ولكن من الناحية العمليـة نجد أنها مختلفة قليلاً ، فقطر دائرة شعاع الليزر $٢w$ التي تحد شعاع الليزر ذي الشدة المقبولة لدينا يتغير من نقطة إلى أخرى على المحور الأساسي oz ، ويمر بقيمة دنيا $٢w.$ في النقطة $Z.$ كما هو مبين في الشكل (٥ - ٧) .



الشكل (٥ – ٧)

والعلاقة التالية توضح تغير w كتابع للمسافة التي يجتازها شعاع الليزر :

$$W_{(Z)} = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot Z}{W_0^2 \cdot \pi} \right)^2}$$

وبما أن المقدار : $Z_R = \dfrac{W_0^2 \cdot \pi}{\lambda}$ يمثّل طول-رايلي فإن العلاقة الـسابقة تأخـذ الشكل :

$$W_{(Z)} = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{Z_R} \right)^2}$$

وفي الحالة التي تكون فيها المسافة التي يقطعها شعاع الليزر كـبيرة جـداً ، أي أن : $Z >> Z_R$ ، عندها يزداد نصف القطر بشكل خطي مع المسافة حيث يعطى بالعلاقة:

$$W_{(Z)} = \frac{W_0}{Z_R} \cdot Z \quad = \quad \frac{\lambda}{W_0 \cdot \pi} \cdot Z$$

كما أن زاوية الانفراج θ تكون صغيرة جداً ومن مرتبة ميللي راديان ، وفي هـذه الحالة يكون لدينا :

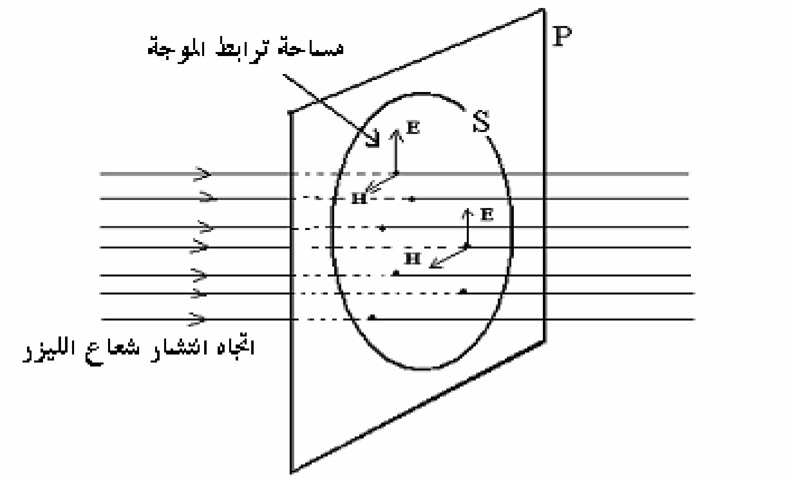
$$\theta = tg\ \theta$$

$$\Rightarrow \theta = 2 \cdot \frac{W_0}{Z_R} \quad = \quad 2 \cdot \frac{\lambda}{W_0 \cdot \pi}$$

لذلك يخرج شعاع الليزر خارج المرنان بانفراج معين كما لو كان مصدره الأساسـي موجوداً في النقطة Z. وهكذا ينتج لدينا شعاع على شكل مخروط وبزاوية انفـراج صغيرة جداً ε في قمة المخروط .

وانطلاقاً من حالة الترابط المكاني لأشعة الليزر يمكننا إدخال مفهوم " مـساحة ترابط الموجة " ، والذي يتحدد كما يلي: لنأخذ شعاعاً يسقط باتجـاه مـا ونأخـذ مسطّحاً عمودياً P على جهة انتشار هذا الشعاع كما هو مبين بالشكل**(٥ - ٨)** ، ففي كل نقطة من نقاط تقاطع الشعاع مع المسطح لدينا تابع يمثل الموجة التي تصل إلى هذه النقطة ، وقد يتغير هذا التابع للموجة من نقطة إلى أخرى من مساحة التقاطع . نسمي المساحة S من التقاطع المذكور والتي تتمثّل الموجة فيها بالتابع نفسه " مساحة ترابط الموجة " ، أي أن الموجات التي تصل إلى هذه المساحة S من المسطّح يكون لها نفس الاتجاه والطور وحالة الاستقطاب .

كما يمكن التعبير عن مساحة ترابط الموجة بأنها المساحة s الناتجة عن تقـاطع الشعاع الخارج من المرنان مع مرآة المرنان (التي يعبر من خلالها شعاع الليزر) ممـا يعني أن جميع الموجات التي تقع ضمنها لها ذات الطور في أي نقطة من مساحة التقاطع ، ونرمز لقطر هذه المساحة الدائرية D ، ويمكن اعتبارها سبب الانعراج الظـاهري لشعاع الليزر الخارج من المرنان حسب مبدأ هويغنز .



الشكل (٥ ـ ٨) مساحة ترابط الموجة

وهكذا نجد أن زاوية الانعراج $\varepsilon \sim \lambda/D$ حيث λ طول موجة الشعاع الخارج من المرنان . وبما أن D يكون أكبر بكثير من طول الموجة λ لذلك سوف تكـون الزاوية ε صغيرة جداً (تقريباً ١/١٠٠٠ راديان) ولذلك نستطيع من الناحيـة العمليـة اعتبار شعاع الليزر متوازياً وله اتجاهية محددة بدقة كبيرة في الفضاء .

٥-٦- شدة شعاع الليزر :

تنتج القيمة العالية لشدة شعاع الليزر من كون الطاقة المنبعثـة مـن الوسـط الليزري الفعال محصورة في اتجاه معين وترددات محددة بدلاً من أن تكون مـشتتة في جميع اتجاهات الفضاء بترددات وأطوار مختلفة ، كما هي الحال بالنسبة لمصادر الضوء العادية . فتختلف شدة شعاع الليزر باختلاف نوعية الوسط الليزري الفعال المستخدم وتصميم هذا الليزر . وبشكل عام تتراوح قوة الأشعة الليزرية من عدة مايكروواط في أجهزة الليزر الصغيرة إلى عدة مليارات واط في حالة ليزر الجسم الصلب والذي يعمل بشكل نبضي .

ومن جهة أخرى يمكن أن تمحرق أشعة الليزر باستخدام الطـرق والوسـائط البصرية الخاصة حتى يصل طول قطر صورة المصدر ليقارب طول الموجة المـستخدمة

وهذه هي حدود عملية الانعراج التي لايمكن تخطيها ، وهذا مايسمح لنا بتجميع كل طاقة الأشعة في مساحة ضيقة جداً تقارب النقطة الهندسية .

فعند استخدام ليزر ذي استطاعة صغيرة (١ mW) وطول موجته (١ µm) نحصل على شدة تحرق تصل إلى (١٠٠ $kW/cm^٢$) حيث الشدة : $I = P/\lambda^٢$ ، حيث P : استطاعة الأشعة . وبواسطة ليزر نبضي استطاعته ($١٠^٩W$) نصل إلى شدة تحرق من مرتبة ($١٠^{١٧}$ $kW/cm^٢$) ، وكل ذلك ناتج عن كبر مساحة الترابط في أشعة الليزر على عكس المصادر العادية للضوء حيث يكون لكل فوتون موجة ومساحة ترابط خاصة به ولايتعدى قطرها طول موجة هذا الفوتون ولذلك تكون الشدة الناتجة في هذه الحالة أصغر من شدة ضوء المنبع نفسه ، كما هي حال الشمس وهي مصدر هائل الشدة ، ولكن لاتتعدى شدة تحرقها (١ $kW/cm^٢$) .

والجدول التالي يبين الفرق بين الأشعة الصادرة عن بعض الليزرات والأشعة الصادرة عن بعض المنابع الضوئية التقليدية .

الشدة I	المنبع الضوئي
≈ 300 W/cm^2	أشعة الشمس المركزة
1 kW/cm^2	مصباح أستيلين
10 kW/cm^2	مصباح هيدروجين
100 kW/cm^2	قوس انفراغ كربوني

الشدة العظمى I_{max}	الزمن t	الإستطاعة P	طول الموجة λ	نوع اللازر
2,5 MW/cm^2	∞	10 mW	632 nm	لازر هليوم-نيون
3,8 GW/cm^2	∞	10 W	514 nm	لازر شوارد الأرغون
250 TW/cm^2	5 ns	1 MW	400 nm - - 800 nm	لازر صباغي
				Nd-YAG
890 TW/cm^2	100 ns	1 GW	10,6 µm	لازر CO_2
32 PW/cm^2	15 ns	20 MW	249 nm	لازر أكسيمر
89 PW/cm^2	5 ps	10 GW	1,06 µm	Nd-glass

٥-٧- سطوع شعاع الليزر :

بشكل عام ، تعتبر خاصية السطوع صفة هامة لأي منبع ضـوئي ، وكـذلك الحال بالنسبة إلى الليزر . ويعرف سطوع المنبع الـضوئي (أو أي منبـع للأمـواج الكهرطيسية) بأنه الاستطاعة الصادرة عن واحدة المساحة من السطح لكل واحـدة زاوية مجسمة . فإذا كان لدينا منبع ضوئي ما، وأن dS يمثل سطح عنصري عنـد نقطة ٠ من هذا المنبع ، وبالتالي تعطى الاستطاعة الصادرة عن السطح العنـصري dS ضمن زاوية فراغية مجسمة $d\Omega$ حول محور ٠٠´ بالعلاقة :

$$dP = B \cdot \cos\theta \cdot dS \cdot d\Omega$$

حيث : B تمثل سطوع المنبع الضوئي في النقطة ٠ ووفقاً للمحور ٠٠´ ، وهو مقدار يعتمد على الإحداثيات القطبية .

θ : تمثل الزاوية المحصورة بين المحور ٠٠´ والناظم على سطح المنبع، ولنفرض أنها تتطابق مع زاوية انفراج شعاع الليزر أي أن : $(\theta = \theta_d)$.

فإذا اعتبرنا أنه لدينا شعاع ليزري استطاعته P ، ومـسقطه علـى مـستوي عمودي على منحى انتشاره هو عبارة عن دائرة قطرها $(2w = R)$ ، وبالتـالي فـإن مساحة سطحها تساوي : $S = \dfrac{\pi \cdot R^2}{4}$ ، ويعاني هذا الشعاع انفراجاً بزاوية مقدارها θ_d ، ونفترض أن الزاوية θ صغيرة جداً لدرجة يمكن عنـدها اعتبـار المقـدار : $\cos\theta \approx 1$. وإذا أخذنا بعين الاعتبار أن قيمة الزاوية الفراغية المجسمة للإصدار الناتج عن المنبع تساوي: $\Omega = \pi \cdot \theta^2$ ، فيكون سطوع شعاع الليزر في هذه الحالة وفقـاً للعلاقة السابقة:

$$B = \left(\frac{2}{\pi \cdot R \cdot \theta} \right)^2 \cdot P$$

وبما أننا افترضنا أن $\theta = \theta_d$ ، لذلك يمكن التعويض عن قيمة زاوية انفراج شعاع θ_d بالاعتماد على نظرية الانعراج بدلالة طول الموجة بالعلاقة :

$$\theta_d = \frac{\beta \cdot \lambda}{R}$$

حيث β عبارة عن ثابت عددي تتحدد قيمته وفقاً لشكل توزع السعة .

وبالتعويض في علاقة السطوع السابقة نجد أن :

$$B = \left(\frac{2}{\pi \cdot \beta \cdot \lambda} \right)^2 \cdot P$$

وهي العلاقة التي تعطي سطوع المنابع الضوئية . ولكن بما أن حزم الأشـعة الليزريـة تتمتع بإتجاهية عالية، فإن سطوع أشعة الليزر يكون أكبر بعدة مراتب بالمقارنة مـع سطوع المنابع الضوئية التقليدية . وبالإضافة إلى ذلك يمكننا استخدام عدسات مجمعة أو مركزة للحصول على قيم كبيرة جداً لشدة أشعة الليزر ، وهذا مانلاحظـه عنـد استخدام أشعة الليزر في بعض التطبيقات التي تحتاج إلى شدات عالية .

الفصل السادس
أنواع الليزرات

٦-١- مقدمة:

درسنا الفصول السابقة الليزر المبدأ الفيزيائي لأجهزة توليد أشعة الليزر وطريقة العمل مع التركيز على العوامل المؤثرة فيه ، والآن سوف ندرس أنواعه المختلفة .

منذ أن خرج أول ليزر عام **١٩٦٠** إلى حيز الوجود ، أخذ هذا العلم يتطور بسرعة فائقة بحيث أصبح لكل حقل من حقول التطبيقات العلمية ، المخبرية والصناعية ليزر يتوافق مع متطلبات هذا الحقل ان كان لجهة طول موجة الليزر ، شدة شعاع الليزر ، اتجاهيته أو لجهة استقرار موجته أو تردده . وبشكل عام يمكن تقسيم أنظمة الليزر إلى عدة أنواع مختلفة ويعتمد هذا التقسيم على خاصية محددة من خصائص الليزر وهي على النحو التالي :

- الحالة الفيزيائية لمادة الوسط الليزري الفعال (جسم صلب ، سائل ، غاز، بلازما).
- المجال الطيفي للأطوال الموجية لأشعة الليزر (المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي ، تحت الأحمر فوق البنفسجي ، مجال الأشعة السينية) .
- طريقة الضخ لإثارة الوسط الليزري الفعال (الضخ الضوئي ، الضخ الكهربائي ، الضخ الكيميائي).
- طبيعة الأشعة الصادرة عن عمل الليزر (أشعة ليزرية مستمرة ، أشعة ليزرية نبضية).

- عدد سويات الطاقة التي تشارك في الفعل الليزري (ليزر ثلاثي السوية ، ليزر رباعي السوية).

وبشكل عام تعود تسمية الليزر على الأغلب وفقاً للمادة المستخدمة كوسـط ليزري فعال لأن مادة الوسط الليزري الفعال هي التي تحدد خصائص الليزر ونذكر من هذه الخصائص :

- طول موجة أشعة الليزر.
- طريقة الضخ المناسبة .
- طاقة الخرج الليزري .
- فعالية وكفاءة الليزر .

وهنا يجب التنويه دوماً إلى أن تحقيق الفعل الليزري في هـذه الحالـة يتطلـب شرطين أساسيين:

أ- الوصول إلى حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة بين السوية الليزرية الأعلى والسوية الليزرية السفلى.

ب- يجب أن يكون الوسط الليزري الفعال شفافاً بالنسبة لطول موجة الأشعة الليزرية الصادرة .

انطلاقاً من ذلك سوف نقوم بدراسة كل نوع من هذه الأنواع علـى حـدة لإعطاء فكرة واضحة عن طريقة عمل وكذلك ميزات هذه الأنواع مـن الليـزرات وسنركّز في دراستنا على أنواع الليزرات التي تعتمد على طبيعة الحالة الفيزيائية لمـادة الوسط الليزري الفعال .

٦-٢- ليزرات الجسم الصلب *(solid-state-laser)*:

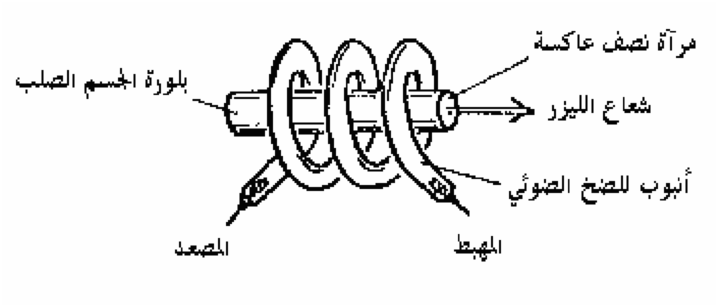
يعتبر ليزر الجسم الصلب من أولى الليزرات التي تم تصميمها منذ عـام **١٩٦٠** حيث كان الوسط الليزري الفعال عبارة عن بلورة من الياقوت الأحمر ، وحتى يومنـا هذا مازال هذا الليزر من أهم الليـزرات المستخدمة والذي يلائم بشكل خـاص

لتوليد الاستطاعات العالية التي تناسب العديد من التطبيقات الهامة.

يتألف الوسط الليزري الفعال في ليزرات الجسم الصلب من بلورات ***(Crystal)*** أو من مواد مصنوعة من الزجاج ***(glass)*** وتكون مشوبة بشوارد معدنية أو بـشوارد المعادن النادرة بحيث تتميز هذه الشوارد بامتصاصيتها لأشعة الضخ أو الإثارة الضوئية ضمن مجال طيفي واسع .

تصدر ليزرات الجسم الصلب أشعة ليزرية ضمن مجال الطيف المرئـي ومجـال ماتحت الحمراء . كما أن عملية إثارة الوسط الليزري الفعال تتم فقط عبر عملية الضخ الضوئي وذلك باستخدام منابع ضوئية مناسبة وذات خصائص ضوئية وبصرية محـددة بحيث تتحقق عملية الترابط الفعال بين أشعة الضخ والوسط الليزري الفعال . كمـا تتميز ليزرات الجسم الصلب بشكل عام بميزتين أساسيتين:

- التصميم التقني والتركيب البسيط والسهل نسبياً كما في الشكل **(٦ - ١)** .
- توليد نبضات ليزرية ذات استطاعات عالية الشدة ولكن ذات نوعية متدنيـة نسبياً .



الشكل (٦ - ١) مخطط ليزر جسم صلب

٦-٢-١- الأسس الفيزيائية لليزرات الجسم الصلب:

٦-٢-١-١- الوسط الليزري الفعال:

يتكون الوسط الليزري الفعال من شوارد مختلفة تتوضع بتراكيز محددة ضـمن

بلورة مضيفة من الزجاج أو من بلورات ذات تراكيب مختلفة . ويمكن توليد أشـعة ليزرية ضمن المجال (٠،٣ -٣μm) من ليزرات الجسم الصلب باستخدام عدد كبير جـداً من الشوارد كما في الجدول (**٦-١**) ويتم الحصول على هذه الشوارد من : المعـادن، المعادن الانتقالية ومن المعادن النادرة .

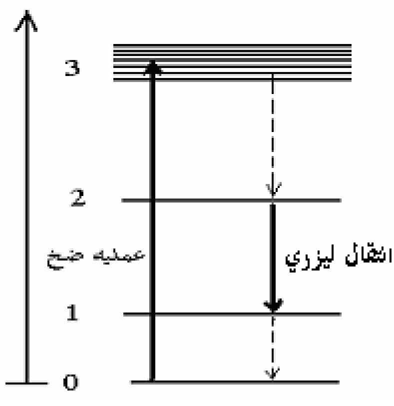
طول الموجة(μm)	البلورة المضيفة	الشاردة الفعالة
٠،٣١٤٦	$Y_{٣}Al_{٥}O_{١٢}$	$Cd^{٣+}$
٠،٥٤٤٥	$LiYF_{٤}.Cd^{٣+}$	$Tb^{٣+}$
٠،٦١٣٠	$Al_{٢}O_{٣}$	$Eu^{٣+}$
٠،٦٤٠٠	$PrBr_{٣}$	$Pr^{٣+}$
٠،٦٨٧٤	$Y_{٣}Al_{٥}O_{١٢}$	$Cr^{٣+}$
٠،٦٩٢٩	$Al_{٢}O_{٣}$	$Cr^{٣+}$
٠،٦٩٤٣	$Al_{٢}O_{٣}$	$Cr^{٣+}$
٠،٧٦٧٠	$Al_{٢}O_{٣}$	$Cr^{٣+}$
٠،٨٥٠٠	$LiYF_{٤}$	$Er^{٣+}$
٠،٨٥١٠	$YAlO_{٣}$	$Er^{٣+}$
١،٧٧٦٠	$Y_{٣}Al_{٥}O_{١٢}$	$Er^{٣+}$
٠،٨٩١٠	$Y_{٣}Al_{٥}O_{١٢}$	$Nd^{٣+}$
٠،٩٣٠٠	$YalO_{٣}$	$Nd^{٣+}$
١،٠٤١٠	$LaF_{٣}$	$Nd^{٣+}$
١،٠٤٧١	$LiYF_{٤}$	$Nd^{٣+}$
١،٠٤٩٨	$Ca_{٢}Y_{٥}F_{١٩}$	$Nd^{٣+}$
١،٠٦٤٤	$YAlO_{٣}$	$Nd^{٣+}$
٢،٠٦٥٤	$LiYF_{٤}$	$Ho^{٣+}$
٢،١٢٣٠	$YalO_{٣}$	$Ho^{٣+}$
٢،٣٤٨٠	$YalO_{٣}$	$Tm^{٣+}$
٢،٣٤٩٠	$YalO_{٣}$	$Tm^{٣+}$
٢،٦١٣٠	$CaF_{٢}$	$U^{٣+}$
١،٩١٥٠	$MnF_{٢}$	$Ni^{٢+}$
٢،٠٥٠٠	$MgF_{٢}$	$Co^{٢+}$
٢،١٦٥٠	$ZnF_{٢}$	$Co^{٢+}$

الجدول(٦-١) يبين عدداً من الشوارد المعدنية والبلورات المضيفة

وتتميز هذه الشوارد بعصابة امتصاص طيفية عريضة لأشعة الضخ حيث تـتم إثارة هذه الشوارد من السوية الأساسية إلى السوية E_3 كما في الشكل **(٦ – ٢)** ومن ثم يحدث الانتقال من السوية الليزرية العليا E_3 إلى السوية الليزرية الـسفلى E_2 بحيـث نحصل على أشعة الليزر نتيجة لهذا الانتقال.

كما أن الليزرات التي تعتمد على هذه الشوارد هي ليزرات ثلاثية الـسوية أو رباعية السوية وتصدر أشعة الليزر على شكل خطوط طيفية متعـددة وذات أطـوال موجية مختلفة ويتحدد ذلك من خلال :

- الشاردة الفعالة التي تقوم بالفعل الليزري وكذلك طبيعة الانتقالات المتعـددة التي تحدث بين سويات الطاقة في هذه الشوارد ، وذلـك لأنـه في أغلـب الشوارد يكون هناك انتقالات مشعة عديدة ومختلفة .
- نوعية البلورة المضيفة التي تحتوي على شوارد الوسط الفعال .



الشكل (٦ – ٢)

٦-٢-١-٢- عملية الضخ :

في حالة ليزرات الأجسام الصلبة تتم عملية الضخ بشكل مباشر وذلك بوساطة

الأشعة الكهرطيسية. كما أن الحصول على انعكاس في إسكان سويات الطاقة يتحقق من خلال عملية الضخ إلى السوية الليزرية العليا ويحدث ذلك غالباً في الحالات الـتي تكون فيها السوية الليزرية السفلى ذات إسكان منخفض بالإلكترونات .

وكانتقالات مترافقة باصدار أشعة ليزرية تفضل تلك الانتقالات التي تعطـي شدات أشعة طيفية عالية في طيف الفلورة لشوارد الوسط الفعال ، ويمكن تـصنيف هذه الانتقالات على الشكل التالي:

- الانتقالات الأساسية:

وهي الانتقالات التي تحدث بين مركبات السويات المتعددة مثل الانتقـال $^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$ في شاردة Nd^{3+} . وهذه الانتقالات تحدث بشكل عام انطلاقاً من السوية الأدنى وشبه المستقرة وذلك في العديد من الشوارد مثل:

(Neodymium) Nd^{3+}, (Praseodym) Pr^{3+} ,(Europium) Eu^{3+} ,(Gadolinium) Gd^{3+} ,(Terbium) Tb^{3+} , (Erbium) Er^{3+} , (Cobalt) Co^{2+} , (Dysprosium) Dy^{3+} .

- الانتقالات المتسلسلة أو الشلالية ***(cascade)*** :

وهذه الانتقالات تحدث بين سويات شبه مستقرة متتالية إما ضمن نفـس الـشاردة الواحدة مثل : $^4I_{11/2} \to {}^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$ في شاردة Er^{3+} أو بين شوارد مختلفة مثـل : $^4I_{13/2}(Er^{3+}) \to {}^5I_7(Ho^{3+})$. وبهذه الطريقة يمكن الحصول على أشعة ليزريـة بـأطوال موجية مختلفة .

- الانتقالات من النوع إلكترون-فونون :

بما أن هناك تغيرات في الحالة الإلكترونية لسويات الطاقة نتيجة لإثارة هذه السويات فقد لوحظ أيضاً أنه يمكن إحداث إثارة في اهتزازات الشبكة البلورية التي تحتوي على الشوارد الفعالة ليزرياً ، وبما أن هذه الاهتزازات تتعلق بدرجة الحرارة لـذلك يمكـن الاستفادة من هذه الميزة للحصول على انتقالات ليزرية من هذا النوع مـن خـلال احداث تغيير في درجة الحرارة ضمن حدود مدروسة. وكمثال على هذا النوع مـن

الليزرات نجد الليزر : $Ca\ \ F_2:Sm^{2+}$ الذي يعطي أشعة ليزريــة ذات طــول موجــة $\lambda=0.71\mu m$ عند درجة حرارة K ٧٥ وكذلك أشعة ليزرية ذات طول موجة $\lambda=0.74\mu m$ عند درجة حرارة K ٢٥٠ .

ومن جهة أخرى يمكن زيادة فعالية عملية الضخ إلى السويات الليزرية العليــا بإضافة شوارد ذات حساسية عالية للتفاعل مع الإشعاع مثل الــشوارد : $Er^{3+}, Nd^{3+},$ $Yb^{3+},\ Cr^{3+},\ Mn^{2+}$ (تدعى مراكز صباغية أو مراكز ملونة) بحيث تمتص هذه الــشوارد أشعة الضخ ومن ثم تنقل طاقة الإثارة هذه إلى الشوارد الفعالة ليزريــاً مــن خــلال عمليات التصادم فيما بينها أو من خلال اهتزازات الشبكة البلورية التي تحتوي علــى هذه الشوارد.

ويتألف الوسط الليزري الفعال في ليزرات الجسم الصلب من البلورة المــضيفة والشوارد الفعالة ليزرياً ويأخذ شكل قضيب زجاجي جانباه مفضضان بحيث يشكلان مرآتين عاكستين وتحققان الترابط بين أشعة الضخ والوسط الليزري الفعال والجــدول (٦- ٢) يبين أبعاد عدد من القضبان الليزرية المستخدمة في ليزرات الجسم الصلب .

نوع بلورة الجسم الصلب	الطول (mm)		القطر (mm)	
	الطول الأعظمي	الطول المثالي	القطر الأعظمي	القطر المثالي
الياقوت	٣٠٠	١٠٠	٢٥	١٠
نيوديميوم-زجاج	١٠٠٠	٣٠٠	٧٥	١٤
نيوديميوم-ياغ	١٥٠	٧٥	١٠	٥

الجدول (٢) يبين أبعاد بعض القضبان الليزرية المستخدمة في ليزرات الجسم الصلب

كما يمكن أن يتم توليد أشعة الضخ سواء في الليزر ذي العمل النبــضي أو في الليزر ذي العمل المستمر باستخدام مصابيح ذات أشكال متعددة وغــازات مختلفــة.

كما يمكن تحقيق عملية الضخ بوساطة ليزرات أخرى وفي هذه الحالة تكـون عمليـة الضخ ذات فعالية أكبر.

عند اختيار المصابيح لاستخدامها في عملية الضخ الضوئي يجب أن يكون القسم الأكبر من الأشعة التي تصدرها هذه المصابيح واقعاً ضمن المجـال الطيفـي لخطـوط امتصاص الوسط الليزري الفعال . ومن أنواع المصابيح المستخدمة في عمليـة الـضخ الضوئي في ليزرات الجسم الصلب هناك : مصابيح الزينون ، مـصابيح الكريبتـون ، مصابيح زئبقية ذات ضغط عالٍ ، مصابيح هالوجينية. حيث إنه في حالـة المـصابيح الثلاثة الأولى يمكن تبريدها بالهواء أو بالماء بينما في الحالة الأخيرة تعمل بدون تبريـد لذلك تكون نادرة الاستخدام .

٦-٢-٢- ليزر الياقوت *(Ruby-laser)* :

يعتبر هذا الليزر من أهم ليزرات الجسم الصلب بسبب إمكانية توليد استطاعات ليزرية عالية الشدة بالإضافة إلى إمكانية تصنيع بلورات من الياقوت ذات خـصائص بصرية ممتازة. ويصدر ليزر الياقوت أشعة ليزرية ذات طول موجة $\lambda = ٠،٦٩٤\ \mu m$ كما يمكن استخدامه لتوليد نبضات ليزرية . وتتألف بلورة الياقوت من الألـومين $(Al_٢O_٣)$ الذي يحتوي على شوارد الكروم $Cr^{٣+}$ بتركيز ٠،٠٥٪ . والجـدول **(٦- ٣)** يـبين بعض خصائص بلورة الياقوت .

تركيز شوارد الكروم $Cr^{٣+}$	**٠،٠٥٪**
الكثافة	**٣،٩٨** $g/cm^٣$
درجة الانصهار	**٢٣١١** K
السعة الحرارية النوعية عند الدرجة ٢٠ $^\circ C$	**٧٥٧** $J/(kg.K)$
الناقلية الحرارية عند الدرجة ٢٠ $^\circ C$	**٣٨،٥** $W/(m.K)$
طول موجة الأشعة الليزرية	**٠،٦٩٤٣**μm **,** **٠،٦٩٢٩**μm

الجدول (٦-٣) يعطي بعض القيم التقنية والفيزيائية لبلورة اليافوت

عند تعرض بلورة الياقوت لأشعة الضخ الضوئي تنتقـل الإلكترونـات بعـد امتصاصها للطاقة من السوية الأساسية E_1 (المستوى $A_2$٤) إلى الـسوية المثـارة E_3 (المستوى $F_2$٤) وبعد ذلك تعود الإلكترونات إلى السوية شبه المستقرة E_2 من خـلال إعطائها جزءاً من طاقتها للوسط الخارجي بشكل غير مشع عـن طريـق عمليـات الاسترخاء بين السويات الإلكترونية (زمن الاسترخاء مـن مرتبـة S ١٠^-٧) وتبقـى الإلكترونات في السوية E_2 فترة من الزمن تتناسب والعمر الوسطي لهذه السوية الذي يقدر mS ٢-٤ ومن ثم يحدث الانتقال المترافق بإشعاع ليزري بين السوية الليزرية العليا E_2 والسوية الليزرية السفلى E_1 . وفي حالة الياقوت تتألف كل من السوية الليزريـة العليا وكذلك السوية السفلى من مستويين متقاربين جداً من بعضهما لدرجة أنه يمكن اعتبارهما متشابهين تقريباً عند درجة حرارة الغرفة ولكن مع أفضلية بسيطة للمـستوى السفلي من E ، وهذا وافق انتقال ليزري ذي طول موجة λ=٠،٦٩٤٣μm .

ومن أجل الحصول على حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة يجب أن يكـون نصف عدد شوارد الكروم على الأقل في الحالة المثارة مما يتطلب طاقة ضـخ عاليـة ويجب أن يكون طيف منبع الضخ الضوئي متطابقاً تماماً مع طيف الامتصاص لشوارد الكروم . ومن المنابع الضوئية المستخدمة لهذا الغرض مصابيح الزينون التي تصمم على شكل أنابيب ذات شدات ضوئية عالية وتتوضع في محرق العاكس الذي يأخذ شـكلاً اهليليجياً.

تبلغ استطاعة خرج أشعة ليزر الياقوت في حالة العمل المستمر W ١٠٠ وذلـك عند طاقات ضخ عالية تتراوح قيمتها J ٢٠٠-١٠^٤ ، بينما في حالة العمل بشكل نبضي فيمكن أن تصل قيمة الاستطاعة حتى KW ٥٠٠ من أجل نبضات قصيرة مـن مرتبـة mS ٠،١-١ .

وتتميز أشعة ليزر الياقوت بشكل عام باستطاعات عالية ولكن ذات خصائص

طيفية متدنية لأنه تبدي توزعاً غير متجانس لشدة الشعاع الليزري بالنسبة لمقطع عرضي وكذلك ظاهرة ***Spiking*** .

وفيما يلي المواصفات النموذجية لليزر الياقوت:

طول الموجة	$\lambda = 694,3\ nm$
احتمال الانتقال الليزري	$333/s$
عمر السوية الليزرية العليا	$\tau = 3\ ms$
مساحة مقطع عملية الإصدار القسري	$\sigma_{SE} = 2,5\cdot 10^{-24}\ m^2$
تعريض الخط الطيفي لعملية الإصدار العفوي	$\Delta\upsilon = 3,3\cdot 10^{11}\ Hz$
كثافة انعكاس إسكان سويات الطاقة	$\Delta N = 8\cdot 10^{24}\ /m^3$
معامل التضخيم أو معامل الربح	$\gamma_0 = 20/m$
كثافة شوارد الكروم	$0,05\%$
قرينة انكسار البلورة	$n \approx 1,76$
طريقة الضخ	مصباح ضخ ضوئي
طريقة العمل	نبضي+مستمر
طاقة الخرج	$P_A = 100W$ مستمر
النمط	متعدد الإنماط

٦-٢-٣- ليزر نيوديميوم-زجاج *(Neodymium-glass-laser)* :

يتألف الوسط الليزري الفعال من شوارد النيوديميوم الثلاثية Nd^{3+} التي تتوضع بتراكيز تتراوح بين (٨٪ - ٠،٥) في بلورة من الزجاج . ويصدر هذا الليزر أشعة ذات طول موجة ($\lambda = ١،٠٦٢\ \mu m$) أي ضمن مجال ماتحت الأحمر القريب . كما يلائم بشكل جيد لتوليد نبضات ليزرية عالية الاستطاعة تستخدم في تفاعلات الاندماج

النووية وكذلك يمكن توليد أشعة باستطاعة منخفضة في حالة الاستخدام كمنبع ضخ ضوئي في الليزرات الأخرى.

يعطي طيف الفلورة للشاردة Nd^{3+} ثلاثة خطوط طيفية تنتج عن الانتقالات بين السوية E_3 والسوية E_2 وتحدد الأطوال الموجية لأشعة الليزر من المستويات التالية :

الانتقال بين المستويين $^4F_{3/2}\rightarrow{}^4I_{9/2}$ ينتج عنه طول الموجة $\lambda=0.92\mu m$

الانتقال بين المستويين $^4F_{3/2}\rightarrow{}^4I_{11/2}$ ينتج عنه طول الموجة $\lambda=1.06\mu m$

الانتقال بين المستويين $^4F_{3/2}\rightarrow{}^4I_{13/2}$ ينتج عنه طول الموجة $\lambda=1.37\mu m$

ويعتبر الانتقال المترافق بطول الموجة $(\lambda = 1.06\ \mu m)$ الأكثر شدة واحتمالاً لذلك يستخدم غالباً كانتقال ليزري أساسي في ليزر النيوديميوم-زجاج .

وكمادة مضيفة لشوارد Nd^{3+} تستخدم عادة أنواع مختلفة من الزجاج منها زجاج السيليكات، زجاج الفوسفات وزجاج الباريوم والتي تمتلك قرائن انكسار ومعاملات تضخيم مختلفة للأشعة وتتركز المميزات الايجابية للزجاج على خاصيتين هما :

- عملية التصنيع السهلة وذلك حتى من أجل الأبعاد والحجوم الكبيرة للبلورات التي توضع ضمنها الشوارد الفعالة ليزرياً .
- النوعية الجيدة والخصائص البصرية الملائمة التي تبديها الأنواع المختلفة للزجاج.

بينما تنحصر السلبيات في :

- الناقلية الحرارية الضعيفة مما يسبب ارتفاع درجة حرارة الوسط الليزري الفعال وبالتالي التأثير السلبي على خصائص أشعة الليزر، وهذا يتطلب تصنيع مواد زجاجية ذات مواصفات خاصة في حالة عمل الليزر بشكل مستمر .
- مساهمة الزجاج في زيادة عرض الخطوط الطيفية للاصدار

والامتصاص الناتج عن شوارد الوسط الليزري الفعال بشكل غـير متجانس.

٤-٢-٦ - ليزر النيوديميوم- ياغ *(Neodymium-YAG-laser)* :

يعتبر ليزر النيوديميوم-ياغ ***(العقيق)*** من أهم ليزرات الجسم الصلب فهو يعطي استطاعات عالية عند العمل بشكل نبضي بالرغم من تـصميمه الـسهل والبـسيط، وكذلك يمكن أن يعمل بشكل مستمر وبمواصفات جيدة . أما الشوارد الليزرية الفعالة هي شوارد النيوديميوم Nd^{3+} وهي نفسها كما في ليزر النيوديميوم-زجـاج الـسابق لذلك تكون الانتقالات بين سويات الطاقة هي نفسها ولكن في ليزر النيوديميوم-ياغ يوجد انتقال اضافي عند طول الموجة $(\lambda = 1.834\ \mu m)$ وهذا الانتقال يحـدث بـين المستويين : $^{4}F_{3/2} \rightarrow {^{4}I_{15/2}}$.

كما أن الاختلاف الأساسي بين ليزر نيوديم-زجاج وليزر نيوديميوم-ياغ هـو في نوعية البلورة التي تحتوي على شاردة Nd^{3+} الفعالة ليزرياً . ففي ليزر نيوديميـوم-ياغ تتركب البلورة من $(Y_3Al_5O_{12})$ أي من ايتريوم -الومينيوم- غارنـت *(Yttrium-Aluminium-Garnet)* . ويتراوح تركيز شوارد النيوديميوم Nd^{3+} ضمن هذه البلـورة بين (% ٣،٥ - ٠،٥) . أما المميزات الايجابية لبلورة الياغ مقارنة مع الزجاج فتتمثل في :

- المتانة والثبات الميكانيكي الجيدين.
- القساوة العالية .
- الناقلية الحرارية الجيدة.

وكنتيجة للتجانس الكبير والخصائص البصرية الجيدة التي تبديها بلورة الياغ فإن هذا النوع من الليزرات يصدر أشعة ذات خصائص فيزيائية أفضل من التي تـصدرها الليزرات التي تستخدم البلورات الزجاجية ، كما يتميز بإمكانية العمل ضـمن نمـط وحيد أساسي *TEM..* .

ولكن يجب التنويه إلى أن ارتفـاع درجة حرارة بلورة الياغ نتيجـة فعـل

التسخين الحراري أثناء عمل الليزر يؤدي إلى ظهور انكسار مضاعف يؤدي بدوره إلى سلوك بلورة الياغ كعدسة بصرية. ولكن تم تجنب هذا المفعول بتطوير أنواع جديـدة من بلورات الياغ لها التركيب $(YalO_3)$ بحيث يمكن اهمال الانكسار المضاعف، هـذا مع العلم أن الخصائص الأخرى لنوعي البلـورات $(Y_3Al_5O_{12})$ و $(YalO_3)$ متـشابهة تماماً.

ويستخدم ليزر النيوديميوم-ياغ للحصول على أشـعة ليزريـة مـستمرة ذات استطاعات عالية وبفعالية تصل حتى ١٥٪ ويصدر أشعة ليزرية مستقطبة خطياً لذلك يلاقي هذا النوع من الليزرات استخدامات واسعة كمنبع ضوئي في التطبيقات ضمن مجال البصريات اللاخطية وكذلك المفاعيل اللاخطية .

وفيما يلي المواصفات النموذجية لكل من ليزري النيوديميوم-ياغ و النيوديميوم-زجاج:

	Nd:glass	**Nd:YAG**
طول الموجة	$\lambda = 1{,}062 \mu m$	$\lambda = 1{,}064\ \mu m$
احتمال الانتقال الليزري	$2{,}9 \cdot 10^{3} / s$	$4{,}3 \cdot 10^{3} / s$
عمر السوية الليزرية العليا	$\tau = 290 - 340\ \mu s$	$\tau = 230\ \mu s$
مساحة مقطع الإصدار القسري	$2{,}9 - 4{,}3 \cdot 10^{-24}\ m^2$	$\sigma_{SE} = 2{,}8 \cdot 10^{-23}\ m^2$
تعريض خط الإصدار العفوي	$7{,}5 \cdot 10^{12}\ Hz$	$\Delta \upsilon = 1{,}2 \cdot 10^{11}\ Hz$
كثافة انعكاس الإسكان	$8 \cdot 10^{23} / m^3$	$\Delta N = 1{,}6 \cdot 10^{23} / m^3$
معامل التضخيم أو معامل الربح	$3 / m$	$\gamma_0 = 5 / m$
كثافة شوارد الكروم	$4{,}6 \cdot 10^{26} / m^3$	$1{,}4 \cdot 10^{26} / m^3$
قرينة انكسار البلورة	$n \approx 1{,}50 - 1{,}57$	$n \approx 1{,}82$
طريقة الضخ	مصباح ضخ ضوئي أو بواسطة ليزر	
طريقة العمل	نبضي+مستمر	

النمط	نمط وحيد أو متعدد الإنماط

٦-٢-٥- ليزر التيتانيوم – زفير *(Titanium-Sapphire-Laser)*

يعتبر ليزر التيتانيوم-زفير من أكثر الليزرات استخداماً وقابليةً للتوليف ضمن مجال طيفي من بين ليزرات الجسم الصلب الأخرى ، والذي يمكن أن يعمل ضمن مجال يبلغ ***nm*** ١١٨٠ - ٦٦٠ . كما أنه يمتلك منحنى عرضاً للربح هو الأكبر مقارنة بأي ليزر آخر ، وأيضاً يتميز بمساحة مقطع للإصدار القسري كبيرة نسبياً بصفته كليزر قابل للتوليف .

أما الوسط الليزري الفعال ***(Ti:Al₂O₃)*** هو عبارة عن بلورة من الزفير (أكسيد الألمنيوم) المشوبة بشوارد التيتانيوم بتركيز يبلغ حوالي ٠،١٪ .

ويمكن لهذا الليزر أن يعمل بشكل مستمر ليعطي استطاعة خرج تصل حتى ٥٠ ***W*** ، أو بشكل نبضي حيث يعطي نبضات قصيرة تصل مدتها حتى ***fs*** ١٠٠ وباستطاعة خرج من مرتبة ***TW*** للنبضة الواحدة ، وتستخدم في هذه الحالة طريقة غلق النمط – التي سوف نتطرق إليها لاحقاً- .

وفيما يلي المواصفات النموذجية لليزر التيتانيوم-زفير:

طول الموجة	$\lambda = 660 - 1180\ nm$
احتمال الانتقال الليزري	$2{,}6 \cdot 10^5 / s$
عمر السوية الليزرية العليا	$\tau = 3{,}8\ \mu s$
مساحة مقطع عملية الإصدار القسري	$\sigma_{SE} = 3{,}4 \cdot 10^{-23}\ m^2$
تعريض الخط الطيفي لعملية الإصدار العفوي	$\Delta \upsilon = 1{,}0 \cdot 10^{14}\ Hz$
كثافة انعكاس إسكان سويات الطاقة	$\Delta N = 6 \cdot 10^{23} / m^3$

معامل التضخيم أو معامل الربح	$\gamma_0 = 20/m$
كثافة شوارد التيتانيوم	0,1%
قرينة انكسار البلورة	$n \approx 1,76$
طريقة الضخ	مصباح ضخ ضوئي أو ليزر
طريقة العمل	نبضي+مستمر
طاقة الخرج	$P_A = 50W$ مستمر، $P_A = 10^{12}W$ نبضي
النمط	نمط وحيد أو متعدد الإنماط

٦-٢-٦- خصائص أشعة ليزرات الجسم الصلب:

تتميز الأشعة الليزرية الناتجة عن ليزرات الجسم الصلب بخطوط طيفية ذات عرض كبير نسبياً ، مما يؤدي إلى أن طول الترابط لهذه الأشعة يكون قصيراً ، كما أنها تتميز بظهور خطوط طيفية على شكل قمم متعاقبة عند عملية تشغيل الليزر وهذا مايسمى بظاهرة *(Spiking)* ، ونتيجة لاهتزازات تنتج عن عمليات الاسترخاء ضمن بلورة الوسط الليزري الفعال . وعند الوصول إلى حالة الاستقرار في عمل الليزر تبدأ هذه الاهتزازات بالتخامد ومن ثم تتلاشى لتبقى بعدها شدة الأشعة الليزرية ثابتة .

وباعتبار أن الشوارد الفعالة ليزرياً تتوضع ضمن بنية الشبكة البلورية للبلورة المضيفة لذلك سوف تتأثر هذه الشوارد بالاهتزازات الحرارية للشبكة البلورية. كما أنه خلال الفترة الزمنية التي تصدر فيها أشعة الليزر سوف يتولد عدد كبير من الاهتزازات عن الشبكة البلورية مما يؤدي إلى تعريض متجانس ومتساو في جميع خطوط الإصدار الطيفية الناتجة عن الذرات ويتعلق هذا التعريض بدرجة الحرارة ، فعلى سبيل المثال يبلغ التعريض الطيفي في حالة بلورة الياقوت $(٣,٥ . ١٠^{١١}\ Hz)$ عند درجة الحرارة $(٣٠٠\ K)$ بينما تنخفض قيمة هذا التعريض إلى $(١٠^{١٠}\ Hz)$ عند الدرجة $(٥٠\ K)$. ويتولد ضمن هذا التعريض الطيفي عدد كبير من الاهتزازات الخاصة

في المرنان **(الإنماط)** وذلك نتيجة للتضخيم القوي في ليزرات الجسم الصلب ، هذا مع العلم أنه من الممكن التحكّم في عدد هذه الاهتزازات أو الإنماط الـتي نرغـب الحصول عليها من خلال وضع بلورة الوسط الليزري الفعال ضمن مرنان ذي مرايـا مقعرة أو ضمن مرنان حلقي .

ومن جهة أخرى فإن إثارة هذا العدد الكبير في الاهتزازات الخاصة أو الإنماط يؤدي بالإضافة لزيادة عرض الخطوط الطيفية إلى توزع غير متساو في شدة الأشـعة بالنسبة لمقطع عرضي للأشعة الليزرية .

٦-٣- الليزرات الغازية *(Gas-laser)* :

تعتبر الليزرات الغازية من أكثر أنواع الليزرات أهمية للاسـتخدام في مجـالات الأبحاث العلمية، الصناعة والتطبيقات الطبية. في هذه الليزرات تستعمل الغازات وأبخرة العناصر المختلفة التي يمكن اثارتها بواسطة تطبيق جهد كهربائي، كما أنه من الـسهل جداً تغيير خصائص هذه الغازات وذلك للأسباب التالية:

- توفر العدد الكبير من الغازات أو مزيج الغازات التي يمكن استخدامها كوسط ليزري فعال .
- إمكانية تغيير معاملات الغازات المستخدمة مثل: ضغط الغاز ، درجة الحرارة والتركيب النسبي في حالة استخدام مزيج غازي .
- تعدد طرق الضخ التي تستخدم لإثارة ذرات الغاز أو الأبخرة كالضخ الضوئي، الكيميائي والكهربائي.
- إمكانية إدخال تعديلات بسيطة على تصميم هذه الليزرات بحيث تتلاءم مـع الغايات المطلوبة.

لذلك من السهل اختيار نوع الغاز الملائم بسبب توفر عدد هائل من الغـازات

من أجل الحصول على أشعة ليزرية ذات خصائص محددة لتوافق التطبيقات التي نريـد القيام بها .

وعند إجراء مقارنة بين الليزرات الغازية والأنواع الأخرى المختلفة من الليزرات نستنتج أن الليزرات الغازية تتمتع بالميزات التالية :

- إن استخدام الغازات كوسط ليزري فعال يكون أكثر تجانساً لتوزع ذرات الغـاز منه في حالة الليزرات الأخرى مما يؤدي إلى الحصول علـى أشـعة ليزريـة ذات خصائص أفضل.
- في حالة الغازات المستخدمة كوسط ليزري فعال يكون التبادل الحراري أسرع منه في الأجسام الصلبة أو السوائل مما يساعد على تصريف الحرارة المتولدة في الوسط الليزري الفعال بشكل سريع وهذا يمكّن من الحصول علـى أشـعة ليزريـة ذات استطاعات عالية عند عمل الليزر بشكل مستمر وبدون أن يكون لازدياد درجـة الحرارة أي تأثير .
- طول الوسط الليزري الفعال يكون أكبر في الليزرات الغازية وذلك بسبب ضغوط الغاز المنخفضة في الوسط الليزري الفعال التي تتراوح بين ($10-10^{4}$ *Pa*) .
- في الليزرات الغازية يمكن الحصول على ترددات أكثر دقة ونقاء في طول الموجـة وكذلك ثبات واستقرار في عمل الليزر.
- إمكانية الحصول من الليزرات الغازية على طيف واسع جداً من الترددات يمتد من مجال فوق البنفسجي ١٠٠ ***nm*** وحتى مجال الأمواج المايكروية ٢ ***mm*** .

٦-٣-١- الأسس الفيزيائية لليزرات الغازية :

٦-٣-١-١- الوسط الليزري الفعال :

هناك عدد كبير من المواد التي يمكن استخدامها كوسط ليزري فعال في الليزرات الغازية منها :

- العناصر الكيميائية التي توجد بشكل غازي في درجة حرارة الغرفة.
- العناصر التي يمكن أن تنتقل بواسطة عملية التبخير إلى الحالة الغازية (الأبخرة المعدنية).
- الجزيئات التي توجد بشكل غازي.

والجدول (٦- ٤) يبين عدداً كبيراً من الذرات والشوارد والجزيئات التي تستخدم في الليزرات الغازية مع طول موجة أشعة الليزر التي تصدرها وكذلك طريقة العمل (مستمر أو نبضي) وطريقة الضخ.

وتجدر الاشارة هنا إلى أن عدد كبير من الأطوال الموجية الليزرية الناتجة عن الليزرات الغازية ذات أهمية علمية فقط بسبب الصعوبات التقنية الكبيرة في الحصول على هذه الأطوال الموجية وكذلك بسبب تدني المردود الكوانتي لعمليات الضخ أو الاستطاعات المنخفضة جداً لأشعة الليزر.

نوع الغاز	طول موجة الأشعة الليزرية (μm)	طريقةالعمل (مستمرcw) أو (نبضي pw)	طريقة الضخ ضوئيO ، أشعة إلكترونية E انفراغG ، كيميائيC
H_2	٠،١١٦١	pw	E
KrCl	٠،٢٢٢	pw	G
KrF	٠،٢٤٨	pw	G , E
XeCl	٠،٣٠٨	pw	G
Cd^+	٠،٣٢٥	cw	G
N_2	٠،٣٣٧١	pw	G
Ne^+	٠،٣٣٩٢	cw , pw	G
Kr^{2+}	٠،٣٥٠٧	cw , pw	G
Kr^+	٠،٤١٥٤	cw, pw	G

G	*cw, pw*	٠،٤٥٤٥	Ar^+
G	*cw, pw*	٠،٤٨٨٠	Ar^+
G	*pw*	٠،٥١٠٦	*Cu*
G	*cw, pw*	٠،٥١٤٥	Ar^+
G	*cw*	٠،٥٤٣٥	*Ne*
G	*pw*	٠،٥٥٩٢	O^{2+}
G	*cw*	٠،٦٣٢٨	*Ne*
O	*pw*	١،٣١٥٢	*I*
C	*cw*	٢،٦٤-٣،١١	*HF*
C	*pw*	٤،٠١٧-٤،٦٤٧	*HBr*
G , C	*cw, pw*	٥،٠٨٦-٦،٦٦٣	*CO*
G , C , E , O	*cw, pw*	٩،١٢-١١،٠١	CO_2
G	*cw, pw*	٢٧،٩٧٠٧	H_2O
O	*cw, pw*	١١٨،٨	CH_3OH
G	*cw*	٣٣٦،٥٧٩	*HCN*
O	*cw, pw*	٤٩٦،١	CH_3F

الجدول (٤) يبين بعض ذرات،شوارد،جزيئات المستخدمة كوسط ليزري فعال

كما أن أغلب الليزرات الغازية تنتمي إلى الليزرات الرباعية السوية وتتم إثارة الإلكترونات إلى السويات العليا بواسطة الانفراغ الكهربائي . فالإلكترونات الحرة والمسرعة تصطدم بذرات الوسط الليزري الفعال أو جزيئاته فتنقلها من خلال عملية تبادل الطاقة إلى سويات أعلى ومن ثم تنتقل إلى السوية التي نريد أن يشع الليزر منها إذا كنا ندرس الإثارة المباشرة وهنا يجب أن تكون الإثارة انتقائية كي لايضيع جزء من الطاقة لإثارة السويات الأخرى غير السوية المطلوبة وبسبب الصعوبة في تطبيق هذه الطريقة يتم اللجوء إلى الإثارة غير المباشرة التي تتطلّب مزيجاً من غازين : الأول هو الغاز الذي يمثل الوسط الليزري الفعال أي الغاز الذي سيصدر الأشعة الليزرية وتكون نسبته قليلة في المزيج ، والغاز الثاني هو غاز وسيط (مساعد) ونسبته كبيرة في المزيج فيتم في هذه الحالة إثارة ذرات الغاز الوسيطة التي تتواجد مع ذرات غاز

الوسط الليزري الفعال إلى سويات ذات طاقة تكافئ السويات التي نريد ان تثـار في ذرات غاز الوسط الليزري الفعال حيث يتم بعد ذلك تبادل للطاقة بين ذرات الغازين لنحصل في نهاية العملية على انعكاس في إسكان سويات طاقة الغاز الأساسي ، ومـن جهة أخرى يمكن أن تكون عملية الضخ تفريغاً متواصلاً أو نبضياً .

٦-٣-١-٢- عملية الضخ:

في الليزرات الغازية نحافظ على استمرارية حالة الانعكاس في إسكان سـويات الطاقة بالاعتماد على خطوتين مترافقتين :

الخطوة الأولى إثارة الإلكترونات لتنتقل إلى السوية الليزرية العليا أما الخطوة الثانيـة فتعتمد على تفريغ السوية الليزرية السفلى.

في الخطوة الأولى التي تهدف إلى جعـل الـسوية الليزريـة العليـا مـشغولة بالإلكترونات بنسبة أكبر مايمكن تستخدم العمليات التالية :

- إثارة السويات الإلكترونية العليا من خلال عملية التصادم بين الـذرات ذات النوع المتماثل والتي تؤدي إلى انتقال طاقة الذرات الحركية إلى الإلكترونـات في السويات الأساسية مما يؤدي إلى انتقالها إلى السويات المثارة ، وتعتبر هذه الطريقة من أهم الطرق المستخدمة لعمليات الضخ في الليزرات الغازية . وهنا تلعب الإلكترونات في مصابيح الانفراغ الغازية أو الأشعة الإلكترونية الـدور المسيطر على عمليات التصادم.
- إثارة ذرات أو جزيئات غاز الوسط الليزري الفعال من خلال عملية التصادم مع الذرات أوالجزيئات الوسيطة والمثارة وشبه المستقرة مما ينتج عـن هـذا التصادم تبادل للطاقة وهذه الحالة تدعى ليزر الانتقـال ***(Transfer-Laser)*** ، أما إثارة الذرات أو الجزيئات الوسيطة فتتم بوساطة التصادم مع الإلكترونات الحرة ، الضخ الضوئي أو التفاعلات الكيميائية.
- إثارة السويات الجزيئية في الغازات التي تتواجد بـشكل جزيئـي

بواسطة عملية الضخ الضوئي والتي تعتبر عملية الـضخ الوحيـدة في حالـة الجزيئات التي تتألف من ثلاث ذرا ت ومافوق وذلك في الليزرات الغازية التي تصدر أشعة ذات أطوال موجية في مجال تحت الأحمر البعيد.

- إثارة السويات الذرية بواسطة تفاعلات التفكك الضوئية للجزيئات حيـث تستخدم في هذه الحالة مصابيح الزينون ويعتبر ليزر اليود من أهم الأمثلة على ذلك.
- إثارة السويات الاهتزازية في الجزيئات من خـلال التفـاعلات الكيميائيـة فالليزرات التي تثار بهذه الطريقة تدعى الليزرات الكيميائية . وحتى الآن أمكن استخدام هذه الطريقة في عملية ضخ الليزرات الغازية التي تـصدر أشـعة في مجال تحت الحمراء من الطيف الكهرطيسي.

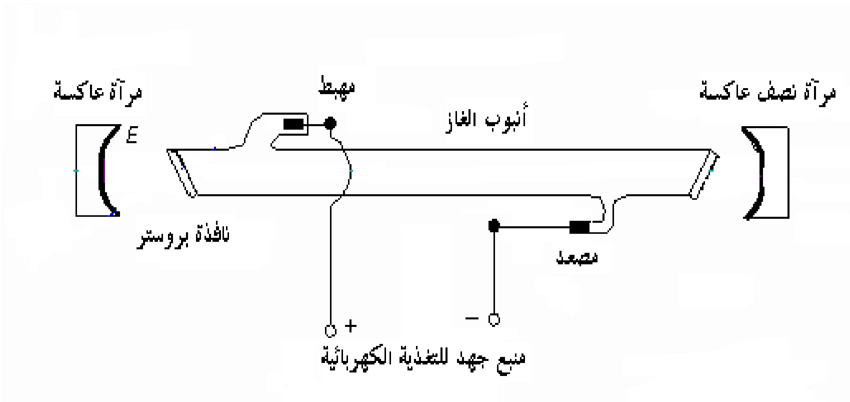
أما بالنسبة إلى لخطوة التي تعتمد على تفريغ السوية الليزريـة الـسفلى مـن الإلكترونات فتستخدم العمليات التالية :

- تفريغ السوية الليزرية السفلى من خلال عملية الإصدار العفوي.
- التفريغ بواسطة التصادمات التي تؤدي إلى اعطاء طاقة الـذرات المثـارة إلى الوسط الخارجي بشكل حرارة أي من خلال الانتقالات غير المشعة.
- التفريغ من خلال عملية الإصدار القسري التي تتم على شـكل انتقـالات متسلسلة " شلالية " ***(Cascade)*** وذلك ضـمن الـسويات الاهتزازيـة في الجزيئات الغازية.
- التفريغ من خلال عملية تفكيك الجزيئات .

وبشكل عام ، فان الوصول إلى حالة انعكاس إسكان سويات الطاقـة يكـون أكثر سهولة كلما كان متوسط عمر الحالة للسوية الليزرية العليا τ_2 كبيراً وكلما كان عمر الحالة للسوية الليزرية السفلى τ_1 صغيراً ، أي يجب أن يكون : $\tau_2 >> \tau_1$.

٦-٣-١-٣ - تركيب الليزر الغازي:

يتألف الليزر الغازي من أنبوب يحتوي على الغاز أو مزيج من الغازات كوسط ليزري فعال يتوضع بين مرآتين عاكستين تشكلان المرنان الليزري بالإضافة إلى منبـع جهد لتغذية الليزر والشكل (**٦ – ٣**) يبين مخطط تركيب ليزر غازي.



الشكل (٦ ـ ٣) مخطط تصميم ليزر غازي

ويوجد الغاز ضمن أنبوب زجاجي يتراوح طوله عادة بين بضعة سـنتيمترات وحتى ٢٠٠*m* بينما القيم النموذجية لطول الأنبوب تتراوح بين *(٠،٣ - ١،٥ m)* . أما قطر الأنبوب فيمكن أن تتراوح قيمته بين *(٠،١- ٥٠ cm)* والقيم النموذجيـة *(٠،١-٢ cm)*. وتكون كمية الغاز المعبأة ضمن الأنبوب ثابتة ومحددة مسبقاً في الأنابيب المغلقـة وفي هذه الحالة يكون للأنبوب عمر تشغيل محدد يتراوح بين ١٠^{٣} وحـتى ٢,١٠^{٤} سـاعة تشغيل كما هو الحال في ليزر الهليوم-نيون أو في ليزرات الغازات المثالية الأخرى.

كما أنه هناك ليزرات تستخدم فيها أنابيب مصممة بطريقة نستطيع من خلالها تفريغ وتعبئة الغاز وفق معايير محددة كنسب التركيب في حالة مـزيج الغـازات أو الضغط وكمثال على ذلك ليزر ثاني أكسيد الكربون أو ليزر فلوريد الكريبتون.

أما ضغوط الغازات ضمن الأنبوب فتتـراوح بـين *(P_g = ١٠ - ٢,١٠^{٣} Pa)* وفي حالات استثنائية يمكن أن يصل ضغط الغاز إلى *(١٠^{٥}Pa)* كما هو الحال في ليزر ثـاني

اكسيد الكربون.

وبما أنه عند تشغيل الليزر تتولد حرارة تؤدي إلى رفع درجة حرارة غاز الوسط الليزري الفعال مما يسبب في تغير في قيمة ضغط هذا الغاز وزيادة الطاقة الحركية للذرات التي تؤدي إلى حدوث تصادمات غير مرغوبة ولتجنب ذلك يمكن تبريد الغاز باستخدام الطرق التالية :

- التبريد بالهواء وهذه الطريقة تستخدم في الليزرات ذات الاستطاعات المنخفضة مثل ليزر الهليوم-نيون.
- التبريد بالماء حيث يتم تزويد جهاز الليزر بدارة تبريد تعمل على الماء وهذه الطريقة تستخدم في حالة الليزرات ذات الاستطاعات المتوسطة والعالية مثل ليزر غاز ثاني أكسيد الكربون وليزر شوارد الأرغون.

وفي الليزرات الغازية يمكن التمييز بين نوعين للمرنان هما:

أ-**المرنان ذو المرايا الخارجية:** وفي هذه الحالة تتوضع مرايا المرنان خارج الأنبوب ويكون طرفي الأنبوب مغلقان بواسطة نوافذ زجاجية تميلان عن محور انتشار الأشعة بزاوية تعادل زاوية بروستر φ وذلك لتجنب الخسارة الناتجة عن عملية الانعكاس على سطوح النوافذ وتحدد قيمت هذه الزاوية بدقة حسب نوع الزجاج المستخدم لأنها تتعلّق بقيمة قرينة انكسار الزجاج وفقاً للعلاقة:

$$(tg\ \varphi = n)$$

حيث تمثل n قرينة انكسار مادة الزجاج التي تصنع منها النوافذ . وبما هذه المرايا تقع خارج الأنبوب الغازي لذلك تكون قابلة للتغيير بحيث يمكن ضبطها لعزل نمط معين من إنماط الموجة أو يمكن تغييرها لعزل إحدى الموجات المتوفرة في أشعة الليزر وذلك لتوفّر عدد كبير من الأطوال الموجية في الليزرات الغازية، وتكون أشعة الليزر الصادرة في هذه الحالة ذات استقطاب خطي .

ب-**المرنان ذو المرايا الداخلية:** وفي هذه الحالة تتوضع المرايا في طرفي الأنبوب

الذي يحتوي على الغاز أي بدل النوافذ الزجاجية كما في المرنـان ذي المرايـا الخارجية وتكون ثابتة لامجال لتغييرها، وينتج عن ذلك أشـعة ليزريـة غـير مستقطبة . والخاصية الايجابية لهذا النوع من المرنان تتمثل في أن الخسارة الناتجة المرنان تكون صغيرة بينما تنحصر السلبية في التخريب الذي يحدث على مرايـا المرنان نتيجة تعريضها للصدم من ذرات الغازات ضمن الأنبوب.

٢-٣-٦- الليزرات الغازية في المجال فوق البنفسجي:

يمكن الحصول على أشعة كهرطيسية مترابطة ضمن مجال الأشعة فوق البنفسجية من الطيف الكهرطيسي من الليزرات الغازية حيث يمكن الحصول علـى أشـعة ذات طول موجة $(\lambda = 116.1\ nm)$ من ليزر الهيدروجين الغـازي H_2*-Laser* أو مـن الليزرات الصباغية المختلفة بدءاًمن طول الموجة $(\lambda = 340\ nm)$. وتتميز الليـزرات الغازية بأفضليتها مقارنة بالليزرات الأخرى لأنه يمكن الحصول منعا على عدد كـبير جداً من الأطوال الموجية المختلفة وذات استطاعات خرج عاليـة وكـذلك الـربح والمردود الجيد. ويحدث الإصدار القسري ضمن المجـال فـوق البنفـسجي نتيجـة للانتقالات بين السويات في الحالات التالية:

- في حالة الذرات المؤينة:

يمكن الحصول على أشعة ليزرية من شوارد بعض الذرات مثل : *N ,O ,Cl ,F ,Xe ,Kr* *,Ar ,Ne*, حيث يتراوح طول موجة الأشعة في هذه الحالة بين $(154.8\text{-}400\ nm)$. وتتم إثارة هذه الشوارد بوساطة التصادم المرن ضمن مصابيح الانفراغ ذات ضغط منخفض ضمن المجال $(P_{gas} = 0.3 - 1.5\ Pa)$ ولكن تكون كثافة التيار المطبقة عاليـة $(J \approx 100\ A/cm^2)$ ويمكن أن يحدث ذلك بشكل مباشرمثل :

$$A + e^- \rightarrow A^{+*} + e^- + e^-$$

أو على مراحل متسلسلة :

$$A + e^- \rightarrow A^+ + e^- + e^- \rightarrow A^{+*} + e^- + e^-$$

- في **حالة الجزيئات المعتدلة:**

وتحدث الانتقالات هنا بين السويات الجزيئية المستقرة والتي تمثل السويتين الليزرية العليا والسفلى أو بواسطة الانتقالات للإلكترونات من الحالة الحرة إلى الحالة المرتبطة والتي تدعى ***(Bound-Free-electron)*** وفي هذا النوع من الانتقالات تكون الجزيئات مستقرة فقط في الحالة المثارة.

ومن أهم الجزيئات المستخدمة جزيئات الغازات النادرة والتي تشكّل مايسمى أكسيمر ***(Excimer)*** مثل : Xe^*, Kr^*, Ar^* أو جزيئات هالوجينات الغازات النادرة التي تشكّل أكسيبلكس ***(Exciplex)*** مثل : XeF^*, KrF^*, ArF^* .

وكأمثلة على الليزرات الغازية التي تصدر أشعة في مجال فوق البنفسجي نذكر ليزر غاز الآزوت والليزر الإكسيمر.

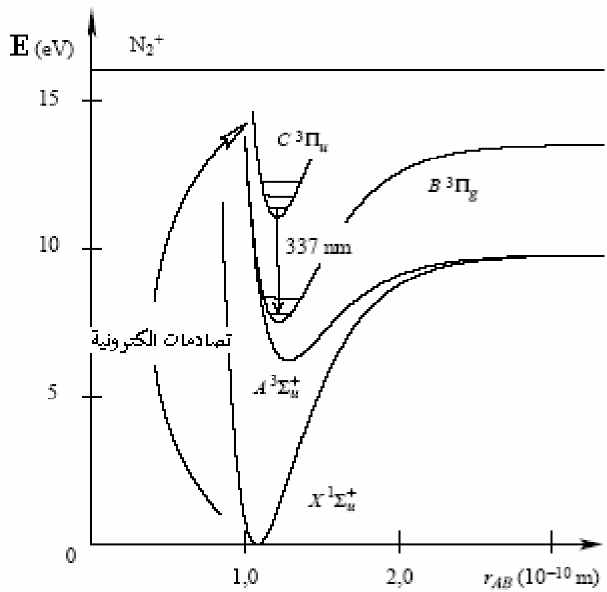
٦-٣-٢-١- ليزر غاز الآزوت ***(N_2-Laser)*** :

يعتبر ليزر غاز الآزوت من الليزرات ذات الاستطاعة العالية والتي تصدر أشعة ليزرية ضمن مجال فوق البنفسجي بطول موجة$(\lambda=٣٣٧.١nm)$. ويكتسب هذا الليزر أهمية في التطبيقات العديدة كمنبع ضخ لليزرات الصباغية أو في التطبيقات المطيافية وكذلك يستخدم لتحفيز التفاعلات الكيميائية الضوئية .

تنتج الأشعة الليزرية لغاز الآزوت عن الانتقال بين السويات الاهتزازية في السويات الإلكترونية الثلاثية المختلفة ضمن جزيئة الآزوت المعتدلة. كما أن عملية إثارة الإلكترونات إلى السويات الأعلى انطلاقاً من السوية الأساسية تتم من خلال التصادم المباشر بين الإلكترونات الحرة وجزيئات الآزوت، حيث تبلغ الطاقة الوسطية لإلكترونات التصادم *(١٥ ev)* كما هو مبين بالشكل **(٦ – ٤).**

وبما أن السوية العليا تتميز بعمر حالة صغير نسبياً *(٤٠ ns)* فان الحصول

على حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة يتم فقط عبر الإثارة بوساطة نبـضات قصيرة أقل من (١٥ *ns*) .



الشكل (٦ ـ ٤) مخطط سويات الطاقة في جزيئة الآزوت

وفيما يلي المواصفات النموذجية لليزر غاز الآزوت:

طول الموجة	$\lambda = 337{,}1\ nm$
احتمال الانتقال الليزري	$2{,}5 \cdot 10^{7}\ /\ s$
عمر السوية الليزرية العليا	$\tau = 40\ ns$
مساحة مقطع عملية الإصدار القسري	$\sigma_{SE} = 4 \cdot 10^{-17}\ m^2$
تعريض الخط الطيفي لعملية الإصدار العفوي	$\Delta\upsilon = 2{,}6 \cdot 10^{11}\ /\ s$
كثافة انعكاس إسكان سويات الطاقة	$\Delta N = 2{,}5 \cdot 10^{17}\ /\ m^3$
معامل التضخيم أو معامل الربح	$\gamma_0 = 10/m$
ضغط الغاز	$P_g = 20 - 270\ \ Torr$

طريقة الضخ	انفراغ كهربائي سريع
درجة حرارة الإلكترونات	$T_e = 20000K$
درجة حرارة الغاز	$T_g = 300K$
طريقة العمل	نبضي
طاقة الخرج	$P_A = 250KW - 1MW$
النمط	متعدد الإنماط

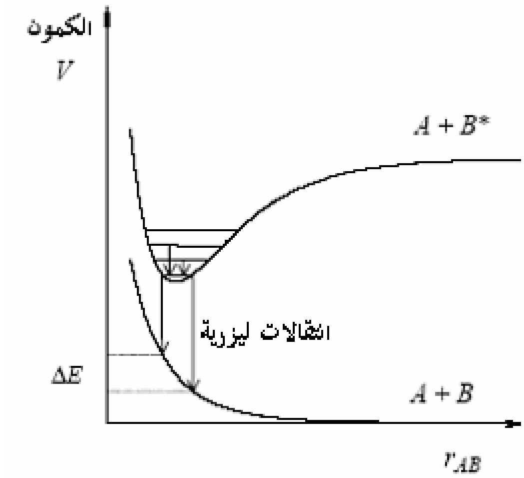
٦-٣-٢-٢- ليزر الإكسيمر *(Excimer-Laser)* :

ان كلمة أكسيمر *(Excimer)* ناتجة عن دمج كلمتين مع بعضهما هما *(Excited)* و *(Dimer)* وهي تعبر عن ذرتين مرتبطتين مع بعضهما البعض وموجودتين في الحالة المثارة . وهناك حالات تستخدم فيها التسمية أكسيبلكس *(Exciplex)* ، حيث تكون الذرات المرتبطة ليست من نفس النوع وإنما من أنواع مختلفة. ولكن تبقى التسمية ليزر الإكسيمر هي الأكثر شيوعاً واستخداماً وتطلق على كل الأنواع.

إن من أهم أنواع ليزرات الإكسيمرهي ليزرات هالوجينات الغازات النادرة ، والتي تعتبر من الليزرات التي تعطي أعلى الاستطاعات في مجال فوق البنفسجي، وتعمل بشكل نبضي وذات مردود يصل حتى ١٠٪ . وتستخدم هذه الليزرات في مجال الطباعة الحجرية الضوئية *(photolithography)*، وكذلك كمنبع ضخ ضوئي في الليزرات الصباغية كما تلاقي استخداماً واسعاً في مجال تفاعلات الاندماج النووية.

ان إصدار أشعة الليزر ينتج عن انتقال الإلكترونات من الحالة الحرة إلى الحالة المرتبطة، أي من النوع *(Bound-Free-electron)* ضمن جزيئة الإكسيمر المثارة، وكمثال على ذلك ليزر فلوريد الكريبتون KrF^* حيث يبين الشكل (٦ – ٥) مخطط سويات الطاقة لهذا الليزر. والانتقال المترافق باصدار أشعة الليزر يتم بين السوية الجزيئية شبه المستقرة $B^٢\sum_{١/٢}$ والسوية الأساسية غير المستقرة $X^٢\sum_{١/٢}$. ويمكن

اعتبار أن السوية الليزرية الأساسية السفلى دائماً غير مشغولة بالإلكترونات ، وذلك لأن زمن التفكك للجزيئة في هذه السوية صغير جداً ويبلـغ ($\tau_{Diss} \approx ١٠^{-١٢} s$) لـذلك يكون زمن الضخ بواسطة الأشعة الإلكترونية أو بواسطة الانفراغ الكهربائي طويلاً ($\tau_{pump} \le ١ \mu s$) وهذا يؤدي إلى كفاءة عالية في المردود.



الشكل (٦ ـ ٥) مخطط سويات الطاقة في ليزر الإكسيمر

يمكن تمثيل عملية إثارة ليزر KrF^* عند استخدام الأشعة الإلكترونية بـ المخطط التالي :

$$e^- + Kr \rightarrow Kr^* + ٢e^-$$

$$e^- + F_٢ \rightarrow F + F^-$$

$$F^- + Kr^* + M \rightarrow KrF^* + M$$

حيث يمثل M وسيطاً لاتمام التفاعل بين شاردة الفلوريد وذرة الكريبتون المثارة وهـو غالباً عبارة عن غاز نادر مثل غاز الأرغون Ar .

أما عند استخدام طريقة الانفراغ الكهربائي لإثارة ليزر KrF^* فيكون المخطط بالشكل التالي:

$$e^- + Kr \rightarrow Kr^* + e^-$$

$$Kr^{*} + F_{٢} \rightarrow KrF^{*} + F$$

ومن أجل الحصول على فعالية ومردود عالٍ في تشكّل الإكسيمر وكذلك على عدد كبير من الذرات في الحالة المثارة يتطلب ذلك أن يكون ضغط الغاز كـبيراً أي: P_{gas}>١٠^٥ Pa .

و بنفس الطريقة يمكن الحصول على ليزر الإكسيمر من هالوجينات الزئبق ***HgI*** ***, HgB , HgCl*** والتي تثار أيضاً بنفس التقنيات السابقة.

ولكن لابد من التنويه هنا إلى أن أكثر الخسارات التي تتعريض لها أشعة ليزرات الإكسيمر ناتجة عن عمليات الامتصاص للأشعة فوق البنفـسجية والـتي تقـود إلى تفاعلات ضوئية تؤدي إلى تفكك جزيئات الإكسيمر.

وفيما يلي المواصفات النموذجية لبعض ليزرات الإكسيمر:

طول الموجة	$\lambda = 337{,}1\, nm(XeF), 308nm(XeCl), 248nm(KrF), 193(ArF)$
احتمال الانتقال الليزري	$0{,}8 - 2{,}5 \cdot 10^{8} / s$
عمر السوية الليزرية العليا	$\tau = 4 - 12\ ns$
مساحة مقطع عملية الإصدار القسري	$\sigma_{SE} = 2{,}4 - 4{,}5 \cdot 10^{-20}\ m^{2}$
تعريض الخط الطيفي لعملية الإصدار العفوي	$\Delta\upsilon = 10^{13}\, Hz$
كثافة انعكاس إسكان سويات الطاقة	$\Delta N = 10^{20} / m^{3}$
معامل التضخيم أو معامل الربح	$\gamma_{0} = 2{,}4 - 4{,}5 / m$
ضغط الغاز	$P_{g} = 1500\, Torr$
طريقة الضخ	انفراغ كهربائي +أشعة إلكترونية
درجة حرارة الإلكترونات	$T_{e} = 15000 - 20000K$
درجة حرارة الغاز	$T_{g} = 450K$
طريقـــــــة العمـــــل	نبضي

طاقة الخرج $P_A = 100W$

النمط متعدد الإنماط

٦-٣-٣- الليزرات الغازية في المجال المرئي:

كما هو الحال في ليزرات االجسم الصلب يمكن أيضاً توليد أشعة ليزرية في المجال المرئي من الطيف وذلك عند استخدام عددٍ من الغازات المختلفة كوسط ليزري فعال. ومن أهم الليزرات الغازية التي تصدر أشعة ليزرية مرئيـة وتلاقـي اسـتخدامات في مجالات تطبيقية واسعة :

- ليزر هليوم- نيون .
- الليزرات التي تستخدم فيها شوارد الغازات المثالية كوسط ليـزري فعال ، مثل ليزر شاردة غاز الأرغون Ar^+ وكذلك ليزر شاردة غاز الكريبتون Kr^+ .
- ليزرات الأبخرة المعدنية مثل ليزر هليوم-شاردة الكادميوم وكـذلك ليزر هليوم - شاردة النحاس.

وتتميز هذه الليزرات باستقرار وثبات عاليين في التردد كما هو الحال في ليـزر هليوم-نيون ، وكذلك بالحصول على استطاعات عالية في حالة عمل الليزر بـشكل مستمر كما هو الحال في ليزرات شوارد الغازات المثالية.

والانتقالات التي تحدث في الوسط الليزري الفعال لهذه الليزرات هي عبارة عن انتقالات إلكترونية تحدث في الذرات المعتدلة مثل *(Pb, Cu, Ar, Ne,…)* أو في شوارد الـذرات مثـل $(Ar^+, Kr^+, Xe^+, Cd^{+٢},…)$ أو في الجزيئـات المعتدلـة مثـل $(Co, Co_٢, N_٢, …)$.

٦-٣-٣-١- ليزر الهليوم-نيون *(He-Ne Laser)* :

إن ليزر الهليوم-نيون هو عبارة عن ليزر يعمل بشكل مستمر في المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي وكـذلك يمكـن أن يعمل أيضاًفي مجال ما تحت الأحمر. ويتميز

هذا الليزر بأنه يعطي استطاعات خرج صغيرة وفي أغلب الأحيان من مرتبـة الميلـي واط، كما أن تصميم هذه الليزرات بسيط وذات كلفة مادية قليلة. كما يعتبر ليـزر الهليوم-نيون من أكثر الليزرات استخداماً وخاصة عند الطول الموجي النـاتج عـن الانتقال الليزري الذي يقع في المجال المرئي $(\lambda = ٦٣٢،٨\ nm)$ أي ذو لون أحمر والذي تتميز أشعته بكثافة عالية واتجاهية دقيقة مما يسمح باسـتخدامه في مجـالات توليـف ومعايرة الأنظمة البصرية والميكانيكية وكذلك في أجهزة التحكّم والسيطرة.

بالإضافة إلى ذلك يوجد في ليزر الهليوم-نيون عدد كبير من الانتقالات الليزرية الأخرى التي تحدث بين السويات الإلكترونية لـذرة النيـون مثـل الانتقـالات : $(٣S_i \rightarrow ٢P_j)$ ، $(٣S_i \rightarrow ٣P_j)$ و $(٢S_i \rightarrow ٢P_j)$ ولكن الانتقـالات الأكثـر احتمـالاً والأعلى كثافة هي الانتقالات :

$$٣S_٢ \rightarrow ٢P_٤ \quad ; \quad \lambda = ٠،٦٣٢،٨\ \mu m$$

$$٢S_٢ \rightarrow ٢P_٤ \quad ; \quad \lambda = ١،١٥٢٣\ \mu m$$

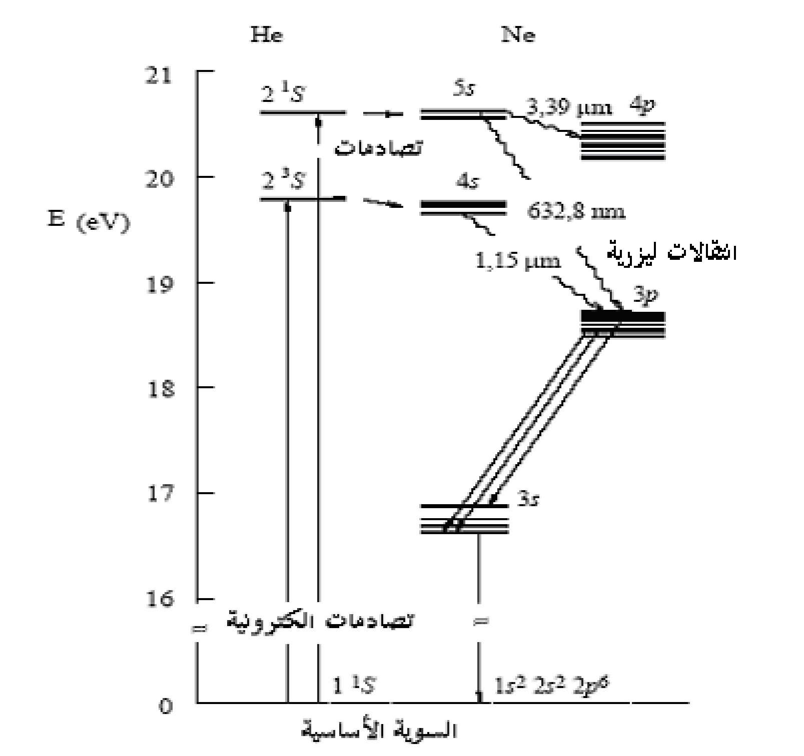
$$٣S_٢ \rightarrow ٣P_٤ \quad ; \quad \lambda = ٣،٣٩١٣\ \mu m$$

وهذه الانتقالات مرتبطة مع بعضها اما من خلال السوية الليزريـة العليـا بالنـسبة للأطوال الموجية $٠,٦٣٢٨\ \mu m$ و $٣،٣٩١٣\ \mu m$ أو من خلال السوية الليزرية الـسفلى بالنسبة للأطوال الموجية $٠،٦٣٢٨\ \mu m$ و $١،١٥٢٣\ \mu m$ وهذا موضح بالشكل **(٦ - ٦)**.

وللحصول على حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة تستخدم طريقة الانفراغ الكهربائي حيث تتم إثارة إلكترونات ذرة النيون إلى السويات الليزرية العليا $٢S_٢$ و$٣S_٢$ بشكل أساسي بواسطة التصادمات اللامرنة بين ذرات النيون وذرات الهليـوم شـبه المستقرة والتي تكون في الحالة المثارة نتيجة تصادمها المباشر مع الإلكترونات.

وتتم عملية تفريغ السويات الليزرية السفلى $٢P_٤$ و $٣P_٤$ بواسـطة الإصـدار العفوي والذي يترافق بأطوال موجية تتراوح قيمتها بـين $(\lambda_{spont} = ٠،٥٤ - ٠،٧\ \mu m)$ و $(\lambda_{spont} = ٢،٠ - ٢،٤\ \mu m)$ كما تساهم عملية تصادم الذرات المثارة مـع الجـدران

الداخلية للأنبوب الحاوي على الغاز في تفريغ السويات الليزرية السفلية وهذا يـؤدي إلى أن معامل التضخيم الذي يعبر عنه بواسطة معامل الربح الصغير g يتناسب عكساً مع قطر الأنبوب الذي يحتوي على الغاز أي أنّ : $(g \sim d^{-1})$ وبالإضافة إلى ذلـك يتعلّق معامل الربح الصغير بكل من ضغط الغاز ونسبة تركيب الغاز $He:Ne$ وبكثافة التيار.



الشكل (٦ ـ ٦) مخطط سويات الطاقة في ليزر الهليوم-نيون

ومن أجل ليزر الهليوم-نيون تكون نسب الضغط للمزيج الغازي لكل من غاز الهليوم وغاز النيون بالنسبة لكل من الانتقالات الليزرية الموافقة كما يلي :

$$P_{He} : P_{Ne} = ١٠ : ١ \quad ; \quad ٢S_i \rightarrow ٢p_j$$

$$P_{He} : P_{Ne} = ٥\text{-}٧ : ١ \quad ; \quad ٣S_٢ \rightarrow ٣p_j$$

$$P_{He} : P_{Ne} = ٥\text{-}٧ : ١ \quad ; \quad ٣S_٢ \rightarrow ٢p_j$$

وبشكل عام يتحدد الضغط المثالي للغاز P_g من أجل الحصول على التـضخيم الأعظمي كتابع لقطر الأنبوب d الـذي يحتـوي علـى الغـاز حيـث يكـون : $(P_g \cdot d \approx ٥٣٠)$ وكذلك يمكن تحديد الكثافة المثالية للتيـار J_{opt} يكـون لـدينا : $(J_{opt} \cdot d^{¼} \approx ١٠)$ حيث تقدر واحدة الضغط بالباسـكال Pa ، وقطـر الأنبـوب بالميلليمتر mm وكثافة التيار ميللي أمبير على السنتيمتر مربع $mA/cm^٢$ وفي الحالـة العادية تكون: $(J_{opt} = ٥ - ٥٠٠ \ mA/cm^٢)$

كما أن العلاقة بين معامل الربح الصغير المثالي g_{opt} وقطر أنبوب الغاز (عندما $d<٣mm$) من أجل الأطوال الموجية المختلفة الناتجة عن الانتقالات الليزريـة تتحـدد بالعلاقة :

$$g_{opt} . d = ٠،٢٤ \ m^{-١} \quad ; \quad \lambda = ٠،٦٣٢٨ \ \mu m$$

$$g_{opt} . d = ١،٢٤ \ m^{-١} \quad ; \quad \lambda = ١،١٥٢٣ \ \mu m$$

ومن أجل ليزر الهليوم-نيون يأخذ معامل الربح الصغير القيم التالية والموافقـة لطـول موجة الانتقال الليزري :

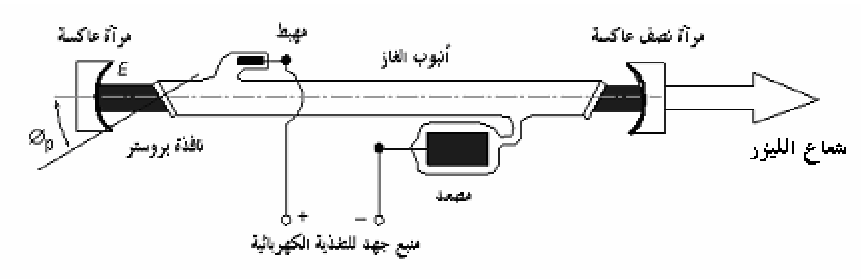
$$g \approx ٠،٥ \ m^{-١} \quad ; \quad \lambda = ٠،٦٣٢٨ \ \mu m$$

$$g \approx ٤ \ m^{-١} \quad ; \quad \lambda = ١،١٥٢٣ \ \mu m$$

$$g \approx ١٠٠ \ m^{-١} \quad ; \quad \lambda = ٣،٣٩١٣ \ \mu m$$

ونلاحظ أن معامل الربح الصغير ذو قيمة صغيرة نسبياً من أجل طول الموجـة $(\lambda = ٠،٦٣٢٨ \ \mu m)$ لذلك إذا أردنا الحصول على استطاعات عالية أكبر من $٥٠mW$ عند طول الموجة هذه يجب إضافة تقنيات تسمح بإلغاء الانتقال الموافق لمعامل الـربح الصغير ذي القيمة الكبيرة أي الانتقال الموافـق لطـول الموجـة $(\lambda=٣،٣٩١٣\mu m)$ أو استخدام أنابيب انفراغ غازية ذات أطوال كـبيرة حيـث يكـون $(L > ١m)$ وفي الحالات المألوفة يتراوح طول أنبوب ليزر الهليـوم- نيـون : $(L = ١٠\text{-}١٠٠ \ cm)$.

والشكل (**٦ – ٧**) يوضح مخطط تصميم ليزر هليوم- نيون .



الشكل (٦ ـ ٧) مخطط ليزر الهليوم ـ نيون

كما أن الجدول (٦- ٥) يبين بعض القيم المميزة لليزر الهليوم-نيون وخصائص الأشعة التي يصدرها ، وهذا الليزر يعتبرأحد الليزرات الغازية التقليدية والذي يتميـز بطول ترابط كبير لأشعته .

الواحدة	القيمة	خصائص ليزر هليوم-نيون
μm	٠،٥٤٣٥ / ٠،٦٣٢٨ / ١،١٥٢٣ / ٣،٣٩١٣	طول الموجة
	٣،٤,١٠^{٦}/s	احتمال الانتقال الليزري
s	٣,١٠$^{-٨}$	عمر السوية الليزرية العليا
$m^{٢}$	٣,١٠$^{-٧}$	مساحة مقطع عملية الإصدار القسري
Hz	١،٥,١٠^{٩}	تعريض الخط الطيفي للاصدار
$m^{-٣}$	٥,١٠^{١٥}	كثافة انعكاس إسكان السويات
$m^{-١}$	٠،١٥	معامل الربح
-	بشكل مستمر	طريقة العمل
mW	٠،٥ - ١٠٠	استطاعة الخرج
-	$P_{He} : P_{Ne}$ = ٥-٧: ١	نسبة المزيج الغازي
Pa	٢٧٠	ضغط الغاز
	انفراغ كهربائي	طريقة الضخ
K	٤٠٠	درجة حرارة الغاز
mm	٢	قطر شعاع الليزر
$m\ rad$	٠،٥	زاوية انفراج الشعاع
%	٠,١	المردود
	$TEM_{..}$	النمط

الجدول (٦- ٥) يبين الخصائص الفيزيائية والتقنية للليزر هليوم-نيون

كما يتميز هذا الليزر بثبات واستقرار في التردد من مرتبـة $(\upsilon/\Delta\upsilon=10^{14}-10^{15})$ وهذه تعتبرقيمة كبيرة جداً بالمقارنة مع الليزرات الأخرى وهذه الميزة تعطيه أهمية كبيرة للإستخدام في مجالات مختلفة مثل أداة ضبط وتحكّم في تقنيات قيـاس الأطـوال ، في قياس السرعات ، قياس نعومة السطوح المـستوية ، التـصوير الثُلاثـي الأبعـاد – الهولوغرافي - وكذلك في دراسات وتجارب التشتت للأشعة الليزرية .

٢-٣-٣-٦- ليزرات الغازات المثالية :

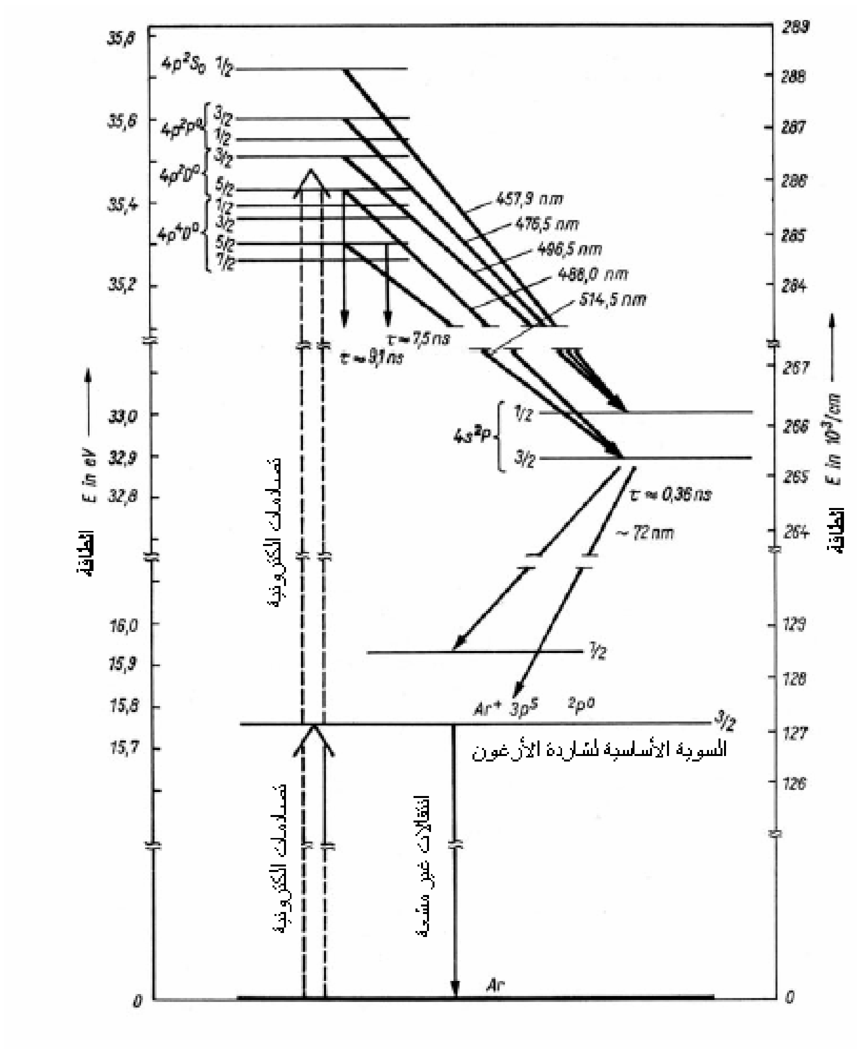
تعتبر ليزرات الغازات المثالية من الليزرات ذات الاستطاعات العالية والتي تعمل بشكل مستمر في المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي ويمكن أيضاً أن تصدر أشـعة ليزرية ذات أطوال موجية عديدة تقع في المجال فوق البنفسجي وحتى تحـت الأحمـر القريب وتتراوح استطاعة الخرج لهذه الليزرات *(٠،٥ - ٢٠ W)* . وتبلغ قيمة المردود في هذه الليزرات حوالي *(٠،١٪)* .

وتأخذ الليزرات التي يستخدم فيها شوارد غـازات الأرغـون والكريبتـون ومزيجهما أهمية كبيرة ضمن هذه المجموعة ، وتلاقي استخدامات واسعة في مجـالات متعددة مثل منابع للضخ الضوئي في ليزرات المواد الصباغية ، التصوير الهولـوغرافي ، تقنيات القياس ، تخزين ومعالجة المعلومات ، الطب وفي معالجة المواد .

كما أن اصدار الأشعة الليزرية ينتج عن الانتقالات من الـسويات المثـارة في شوارد ذرات الغاز المثالي كشوارد Ar^{+} و Kr^{+} . حيث في أغلب الأحيان تكـون السوية الليزرية العليا هي عبارة عن سوية إلكترونية من المجموعة ٤*p* بينمـا تكـون السوية الليزرية السفلى من المجموعة ٤*s* كما هو موضح بالشكل (**٦ – ٨**).

ومن أجل الحصول على حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة ، تتم عملية إثارة الإلكترونات إلى السويات العليا اما بوساطة التصادمات الإلكترونية مع الذرات المعتدلة حيث تثار الإلكترونات من السوية الأساسية بطريقة النبـضات أو بواسـطة التصادمات الإلكترونية الثنائيـة المراحـل وذلك باستخدام تيارات ذات كثافـات

عاليــة في أنابيــب انفــراغ ذات ضــغط مــنخفض حيــث تأخــذ القــيم : $(J \approx ١٠٠\text{-}١٠٠٠\ A/cm^{٢})$ و $(P_g \approx ٧٠\ Pa)$ و $(d \approx ٢،٥\ mm)$ عندما يعمل الليزر بــشكل مستمر .فان التصادم الأول يؤدي إلى تشكيل شوارد الغاز المثالي والــتي تكــون في السوية الأساسية وبعد ذلك مباشرة تثار بواسطة التصادم الإلكتروني الثاني إلى السوية الليزرية العليا .



الشكل (٦ ـ ٨) مخطط سويات الطاقة في ليزر شوارد غاز الأرغون

تتم عملية تفريغ السوية الليزرية السفلى من الإلكترونات عبر عملية الإصـدار العفوي والمترافق بطول الموجة $(\lambda = ٧٢\ nm)$.

وفي هذا النوع من الليزرات ، يتناسب كل من معامل التـضخيم واسـتطاعة الخرج ، في حالة عمل الليزر بشكل مستمر ، طرداً مع مربع كثافة التيـار أي أنـه بشكل عام يكون : $(P \sim J^٢)$. والقيمة العظمى التي يمكن أن تأخذها كثافة التيـار هي من مرتبة $(J \approx ١٠^٣\ A/cm^٢)$ وهي محدودة بمقدار مقاومة أنبوب الانفراغ الـذي يحتوي على الغاز للتيارات العالية .لذلك يجب أن تكون المواد التي يصنع منها أنبـوب الانفراغ الغازي ذات ناقلية حرارية كبيرة من أجل عملية التوزيع الحراري السريع من داخل الأنبوب إلى خارجه ، كما يجب أن تكون مقاومتها للصدم كبيرة لتجنب التلف الذي تتعريض له جدران الأنبوب الداخلية نتيجة للتصادمات التي تسببها شوارد الغاز المثالي ، وأكثر المواد ملائمة لصناعة أنبوب الانفراغ الغرانيت و أكـسيد البيريليـوم BeO .

وتتميز الأشعة الليزرية التي تصدرها ليزرات الغازات المثالية عند العمل بـشكل مستمر بأنها تتألف من سلسلة من الخطوط الطيفية ذات الشدات العالية والتي يمكـن فصلها عن بعضها بسهولة بوساطة استخدام تقنيات اضافية ضمن جهاز الليزر مثـل المواشير أو شبكات الانعراج والجدول التالي يبين بعض هذه الخطوط الطيفية في ليـزر شوارد الأرغون واستطاعة الخرج الليزرية الموافقة لهذه الخطوط .

استطاعة الخرج P(w)	طول الموجة λ(nm)
٠،٥ - ٢	٤٧٦،٥
٢ - ٥٠	٤٨٨،٠
٠،٥ - ٢	٤٩٦،٥
٢ - ٥٠	٥١٤،٥
١	٣٥١،١
١	٣٦٣،٨

كما أنّ الجدول (٦- ٦) يبين أهم الميزات التقنية والفيزيائية لليزرات الغازات المثالية.

الواحدة	$Ar^{+}+Kr^{+}$-Laser	Kr^{+}-Laser	Ar^{+}-Laser	الخصائص التقنية والفيزيائية
nm	٤٠٠ - ٨٠٠	٤٠٦،٧ - ٧٩٩،٣	٤٥٤،٥ - ٥٢٨،٧	مجال الأطوال الموجية
-	٥	١٣	١٠	عدد الخطوط الطيفية
W	٠،١ - ٢	٠،٥ - ٢٠	٠،٥ - ٢٠	الاستطاعة
-	$P_{Ar} : P_{Kr}$ =١:٣	Kr , %	Ar , %	نسبة الغاز
Pa	١, ٣ - ١٣٠	١،٣ - ١٣٠	١،٣ - ١٣٠	ضغط الغاز
-	مستمر	مستمر	مستمر	طريقة العمل
mm	١ - ١٠	١ - ١٠	١ - ١٠	قطر انبوب الغاز
-	٠،١٪	٠،١٪	٠،١٪	المردود
-	انفراغ	انفراغ	انفراغ	طريقة الضخ
A A	*(٤٠-٢٥) **(٣٠٠-٢٠٠)	*(٤٠-٢٥) **(٣٠٠-٢٠٠)	*(٤٠-٢٥) **(٣٠٠-٢٠٠)	شدة تيار الانفراغ

الجدول (٦- ٦) يبين الميزات التقنية والفيزيائية لعدد من ليزرات الغازات المثالية

(* عندما يكون قطر أنبوب الغاز صغيراً ** عندما يكون قطر أنبوب الغاز كبيراً)

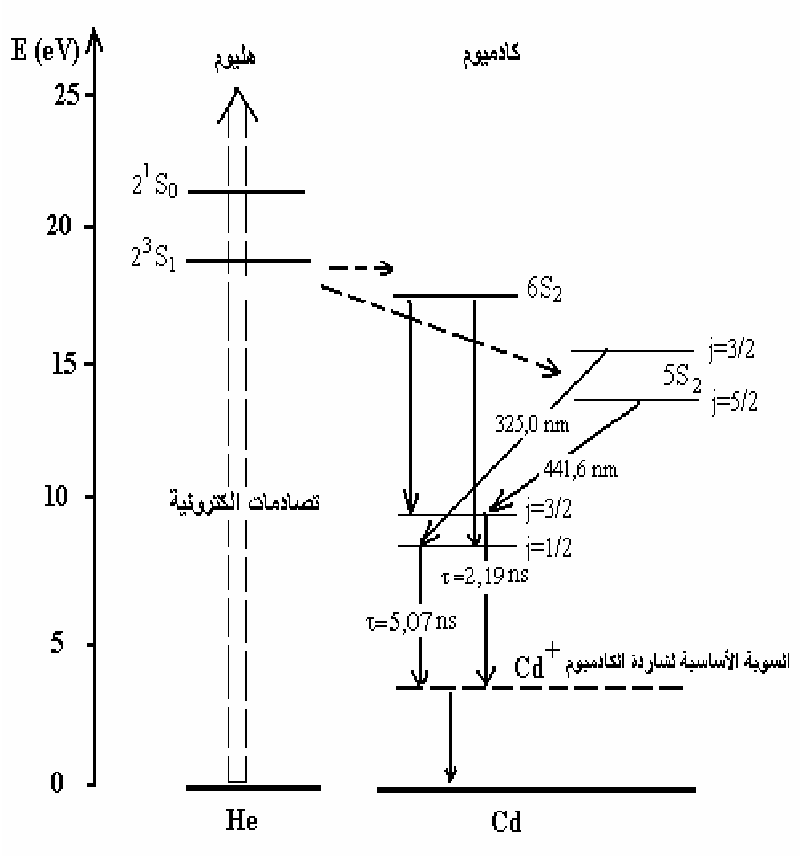
٦-٣-٣-٣ - ليزرات الأبخرة المعدنية :

تصدر ليزرات الأبخرة المعدنية الممزوجة مع بعض الغازات أشعة ليزريـة ذات أطوال موجية متعددة وتقع ضمن المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي . كما أن هناك عدداً من هذه الليزرات يعمل بشكل نبضي مثل ليـزر الهليـوم – بخـار النحـاس ***(He-Cu-Laser)*** حيث يبلغ زمن النبضة الواحدة ***(١٠٠ ns)*** واسـتطاعتها يمكـن أن تصل إلى قيم عالية حتى***(٥٠٠ KW)***. بينما ليزرات الأبخرة المعدنية التي تعمل بـشكل مستمر مثل ليزر الهليوم – بخار الكادميوم ***(He-Cd-Laser)*** و ليزر الهليوم – بخـار السيلينيوم ***(He-Se-Laser)*** تتشابه مع ليزر الهليوم-نيـون مـن جهـة خـصائص الاستطاعة.

تستخدم ليزرات الأبخرة المعدنية في معالجة المواد ، الهولوغرافيا أو كمنبع ضوئي لإثارة الفلورة في الدراسات الطيفية وفي عملية الضخ الضوئي لليزرات الصباغية .

ان الانتقالات الليزرية تحدث في هذا النوع مـن الليـزرات بـين الـسويات الإلكترونية في الذرات المعتدلة أو شوارد الأبخرة المعدنية , والشكل **(٦ - ٩)** يوضـح ذلك .

تتم عملية إثارة ذرات الأبخرة المعدنية بطريقة الانفراغ الغازي إما بشكل إثارة مستمرة أو على شكل نبضات وذلك بعد إضافة غاز الهليوم الذي تشارك ذراتـه في عملية التصادمات لتحقيق عملية الانفراغ كما يلعب غاز الهليـوم دوراً أساسـياً في المحافظة على استمرارية الانفراغ الغازي . كما يجب أن يكون ضغط غاز الهليوم عالياً بشكل كاف ويجب أيضاً تسخين أنبوب الانفراغ من أجل تجنب عمليـة تكـاثف الأبخرة المعدنية على نوافذ بروستر .



الشكل (٦ ـ ٩) مخطط سويات الطاقة في ليزر الهليوم ـ بخار الكادميوم

ويمكن الحصول على الأبخرة المعدنية بالاعتماد على طريقتين :

- تبخير المعادن النقية وذلك بتسخينها حتى درجات حرارة عالية جداً كما هو الحال بالنسبة إلى معدن النحاس حيث تبلغ درجة حرارة تحوله إلى بخار $(T = ١٨٠٠ - ٢٣٠٠\ K^o)$.
- تفكك الروابط المعدنية التي تربط ذرات المعادن بغيرها من الذرات عند درجات حرارة تبلغ $(T = ٧٠٠ - ٨٠٠\ K^o)$ مثل هالوجينات المعادن و الأكاسيد المعدنية ولكن المردود من الأبخرة المعدنية في هذه الحالة صغير .

ويتم تحقيق حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة لهذا النوع من الليـزرات اما بطريقة التصادمات الإلكترونية المباشرة كما هو الحال في الذرات المعدنية المعتدلـة مثل ***Cu , Pb , Au , Ca ,....*** أو من خلال التصادمات من النوع الثاني غير المباشـرة حيث تصطدم ذرات الأبخرة المعدنية مع ذرات غاز الهليوم المثارة مما يؤدي إلى تـشرد ذرات المعدن واثارتها بنفس الوقت وتستخدم هذه الطريقة في حالـة ذرات ***He-Cd ,*** ***He-Zn , He-Sr , He-Sn , He-Pb*** .

و يبين الجدول (**٦-٧**) أهم الميزات التقنية والخصائص الفيزيائية لبعض ليزرات الأبخرة المعدنية .

الميزات التقنية والفيزيائية	***He-Cd⁺-Laser***	***He-Se⁺-Laser***	***He-Cu-Laser***	***الواحدة***
طول الموجة	**٣٢٥،٠ ; ٤٤١،٦**	**٤٦٠ - ٦٥٣**	**٥١٠،٦ ; ٥٧٨،٢**	***nm***
طريقة العمل	**مستمر**	**مستمر**	**نبضي**	**-**
الاستطاعة	**١ - ٥٠**	**٠،١ - ١٠**	***(*٥-٧٠*).*١٠^{٣}**	***mW***
استطاعة النبضة	**-**	**-**	**١٠٠ -٥٠٠**	***KW***
المردود	**٠،١**	**٠،١**	**١**	**%**
التبريد	**هواء**	**ماء**	**ماء**	**-**
ضغط الغاز	P_{He} = **٤٥٠** P_{Cd} = (**٠،١-١**)	P_{He} = **٥٠٠** P_{Se} = (**٠،٠٥-٥**)	P_{He}=(**١٠٠٠-٢٠٠**) P_{Cu} = **١٠**	***Pa***

الجدول (٦- ٧) الميزات التقنية والخصائص الفيزيائية لليزرات الأبخرة المعدنية

٦-٣-٤- الليزرات الغازية في المجال ماتحت الأحمر *(IR-Laser)* :

تتميز هذه الليزرات الغازية بأن تعريض خطوطها الطيفية صغير ونحصل علـى الأشعة الليزرية في مجال تحت الأحمر نتيجة للانتقالات التي تتم بين السويات التالية :

- الانتقالات بين السويات الإلكترونية في الذرات والتي ينـتج عنـها

اصدار أشعة تقع في مجال تحت الأحمر كما هو الحال في ليزر الهليوم-نيون وليزر اليود .

- الانتقالات بين السويات الاهتزازية-الدورانية في الجزيئات الموجودة في السوية الإلكترونية الأساسية مثل ليزرات كل من : ***HF , HBr , CO , CO_2 , SO_2 , HCN*** .
- الانتقالات بين السويات الدورانية في الجزيئات الموجودة في السوية الإلكترونية الأساسية مثل ليزرات : ***CH_3F , HF*** .

ومن أجل الحصول على حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقـة في هـذه الليزرات تستخدم عدة طرق مختلفة نذكر منها :

*- الانفراغ الكهربائي : حيث تستخدم هذه الطريقة في حالة أنابيب الانفراغ الـتي تعمل بشكل مستمر ويمكن تحقيق ذلك عند ضـغط للغـاز $(P_{Gas}= ٥٠ - ١٠٠ \ Pa)$ وكثافة تيار $(J = ٥ - ٥٠ \ mA/cm^٢)$.

*- الضخ الضوئي : ويتم ذلك من خلال الامتصاص المباشر للأشعة الضوئية حيـث يستخدم كمنبع ضوئي في هذه الحالة ليزر غاز ثاني أكسيد الكربون***(CO_2-Laser)*** ذو ضغط منخفض ويعمل بشكل مستمر .

*- الضخ الكيميائي : ونصادف هذه الطريقة في الحالة التي تترافق مع عملية التركيب الكيميائي لجزيئات الوسط الليزري الفعال أو مع عملية تفكّك أو تحطّـم الجزيئـات المثارة خلال التفاعلات الكيميائية والتي تؤدي إلى تشكيل جزيئات أو ذرات تتـوزع فيها الإلكترونات على السويات بحيث تتطابق تماماً مع حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة الليزرية كما هو الحال في ليزرات فلوريد الهيدروجين وفلوريد الـدوتيريوم : ***(DF-Laser , HF-Laser)*** .

وهناك عدد كبير من الليزرات الغازية التي تصدر أشعة في مجال تحت الأحمـر ومن الأمثلة على ذلك :

٦-٣-٤-١- ليزر أحادي أكسيد الكربون *(CO-Laser)* :

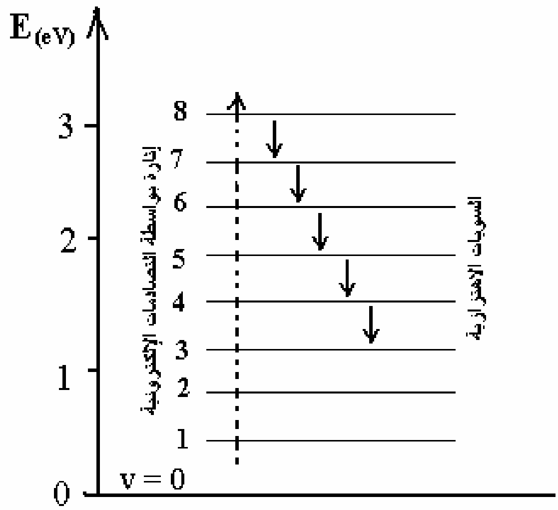
يصنف ليزر أحادي أكسيد الكربون ضمن مجموعة الليزرات ذات الاستطاعات العالية والتي تصدر أشعتها سواء بشكل نبضي أو مستمر في مجال تحت الأحمر وبأطوال موجة تقع ضمن المجال ($\lambda = 5 - 6\ \mu m$) كما أن درجة المردود (أو درجة الفعالية) لهذا الليزر تعتبر أيضاً الأعلى في مجموعته حيث تصل إلى ($\eta = 40 - 50\%$) . ولكن عمل هذا الليزر يتطلّب تبريداً للغاز إلى درجة حرارة تصل إلى ($T \leq 100 K^o$) مما يجعل مجالات استخدامه محدودة مقارنة مع الليزرات الغازية الأخرى في مجال تحت الأحمر مثل ليزر ثاني أكسيد الكربون . ويلاقي ليزر أحادي أكسيد الكربون بشكل خاص استخداماً واسعاً في الدراسات الطيفية .

إن عملية اصدار الأشعة الليزرية في جزيئة أحادي أكسيد الكربون تحصل على شكل خطوط طيفية عديدة ناتجة عن الانتقالات بين السويات الاهتزازية-الدورانية أي بين السويات ($v_j \rightarrow v_{j-1}$) حيث يمكن للعدد j أن يأخذ قيماً عديدة ($j = 3.....37$) ، وتحدث هذه الانتقالات بشكل متعاقب (تسلسلي) حيث تكون السوية الليزرية السفلى في الانتقال الليزري الأول بنفس الوقت السوية الليزرية العليا في الانتقال الليزري الثاني وهكذا بالنسبة إلى بقية الانتقالات الأخرى، كما هو موضح بالشكل(**٦ - ١٠**).

وبما أن آلية تحويل الطاقة الاهتزازية إلى طاقة انتقالية أو طاقة حرارية ضمن جزيئة أحادي أكسيد الكربون يكون بطيئاً جداً ، وذلك على العكس من الجزيئات الأخرى ثنائية الذرات مثل ... , *HF , HBr , NO* ، فإن ذلك يجعل المردود الكوانتي في حالة ليزر أحادي أكسيد الكربون يصل حتى ١٠٠ % .

وكما ذكرنا فإن عمل هذا الليزر يتطلّب درجة حرارة منخفضة فانه يمكن تحقيق ذلك اما عن طريق تبريد جهاز الليزر بكامله أو تبريد الغاز فقط، كما يمكن

أيضاً استخدام تقنيات تبريد تعتمد على مبدأ جريان الغاز تساعد على تصريف الحرارة الناتجة خلال عمل الليزر وإبقاء درجة حرارة الغاز منخفضة .



الشكل (٦ - ١٠) مخطط سويات الطاقة في جزيئة أول أكسيد الكربون

٦-٣-٤-٢- ليزر ثاني أكسيد الكربون (CO_2-Laser) :

يعتبر ليزر ثاني أكسيد الكربون من أهم أنواع الليزرات وهو يصدر أشعة ليزرية ذات طول موجة يقع ضمن المجال (λ = ٩–١١ μm) ولكن الموجة (λ = ١٠ μm) هـي الأكثر شيوعاً . كما يمكن الحصول من ليزرات ثاني أكسيد الكربون التي تعمل بشكل مستمر على استطاعات ليزرية تعتبر الأعلى بالنسبة إلى استطاعات الليزرات الأخـرى حيث تتجاوز قيمتها ١٠٠ *KW* , ودرجة المردود عالية جداً وتبلـغ ٢٠ % وتـأتي في الأهمية بعد ليزرات *HF* , *CO* وكذلك ليزرات أنصاف النواقل . ويوفر ليزر ثـاني أكسيد الكربون إمكانية توليد نبضات ليزرية ذات عرض أقل مـن ٣٠ *ps* وهـذه النبضات هي الأقصر من بين كل الليزرات الأخرى . وعند العمل بـشكل مـستمر باستطاعات خرج ليزرية قيمتها عدة واطات يمكن تحقيق استقرار وثبـات في تـردد موجة الليزر من مرتبة ($\Delta\upsilon/\upsilon \approx$ ١٠$^{-١٣}$) ولايمكن تحقيق درجة استقرار في التردد أفضل

من ذلك الاّ من ليزر الهليوم-نيون وعند استطاعات صغيرة جداً من مرتبة μW ١٠.

ويبين الجدول (٦- ٨) الخصائص التقنية والفيزيائية لكل من ليزر أحادي أكسيد الكربون وليزر ثاني أكسيد الكربون.

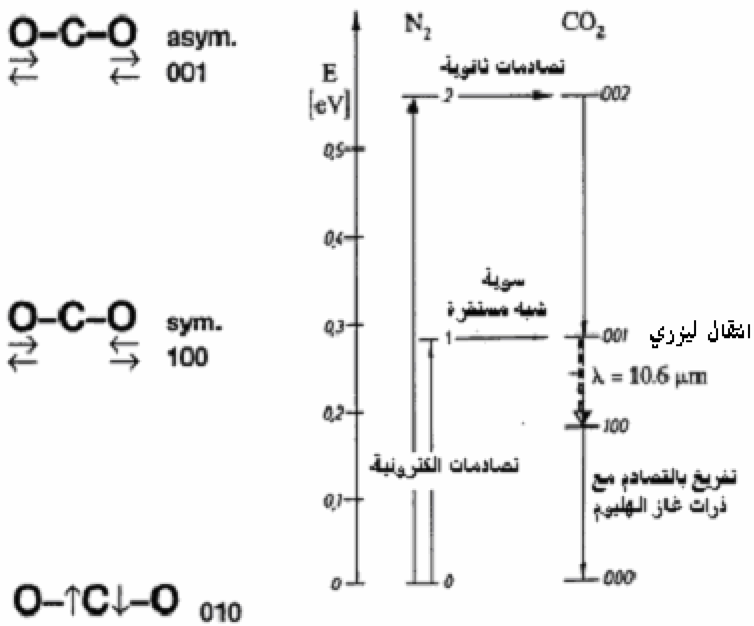
الخصائص الفيزيائية والتقنية	*CO-Laser*		*CO₂-Laser*		*الواحدة*
	نبضي	*مستمر*	*نبضي*	*مستمر*	
طول الموجة	٦،٦........٤،٩		١٠،٦	٩...١١	μm
الاستطاعة	-	١٠...١٠٠٠	١٠٠...١٠^{١٢}	١...١٠^{٥}	W
زمن النبضة	- ٥٠		١٠$^{-٤}$....١٠^{٥}	-	μs
درجة المردود	٤٠ ٤٠...٥٠		٥...٣٠	٥...٣٠	%
المزيج الغازي	He,CO,O_2 CO,N_2		١٠٪CO_2 +١٠٪N_2 +٨٠٪He		-
ضغط الغاز	١٠^{٣} ٢,١٠^{٤}		١٠^{٣}...١٠^{٤} ١٠^{٤}...١٠^{٦}		Pa
طريقة التبريد	الآزوت السائل		التبادل الغازي		-
درجة حرارة التبريد	٨٠...٢٧٠ ١٠٠...٣٠٠		-		K^o

الجدول(٦-٨) يبين الخصائص الفيزيائية والتقنية لكل من ليزر أحادي أكسيد الكربون وليزر ثاني أكسيد الكربون

ليزر ثاني أكسيد الكربون من أكثر الليزرات استخداماً من الناحية التقنية أو من الناحية التجارية ، فهو يستخدم في المعالجة الماكروسكوبية للمواد ، عمليـات صـقل سطوح المواد ، وفي الفيزياء النووية لفصل النظائر المشعة أو تفاعلات الاندماج النووية، الدراسات والتطبيقات الطيفية أو في الطب ضمن العمليات التي تعتمد على الجراحة الليزرية.

من ناحية أخرى بما أن جزيئة ثاني أكسيد الكربون CO_2 هي جزيئة خطيـة ،

فهي تمتلك ثلاثة إنماط من الاهتزازات الأساسية وبالتالي فان اصدار الأشعة الليزرية عند طول الموجة $(\lambda = 10\ \mu m)$ ينتج عن الانتقالات بين السويات الاهتزازية-الدورانية . وبما أن السويات الدورانية ذات طاقة أخفض من السويات الاهتزازية ، لذلك تحتوي سوية اهتزازية ما في جزيئة CO_2 عدد كبير من السويات الدورانية ضمنها مما يسمح بعدد كبير جداً من الانتقالات بين هذه السويات ، والشكل (٦ – ١١) يبين مخطط سويات الطاقة ففي جزيئة ثاني أكسيد الكربون .



الشكل (٦ – ١١) مخطط سويات الطاقة في جزيئة ثاني أكسيد الكربون

ونحصل على حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة بوساطة الطرق التالية :

- التصادمات الإلكترونية في حالة الانفراغ الغازي أو إثارة جزيئات غاز ثاني أكسيد الكربون بواسطة تيار من الإلكترونات الحرة .
- التصادمات بين جزيئة ثاني أكسيد الكربون والجزيئات الأخرى التي

توجد معها ضمن المزيج الغازي مثل جزيئات غاز الآزوت $N_٢$ والتي تكون سوياتها الاهتزازية مثارة بحيث تنتقل الطاقة منها إلى جزيئات ثاني أكسيد الكربون .

- طريقة الضخ الضوئي والتي تتم باستخدام منبع ضـوئي ذي طـول موجة $(\lambda_p \approx ٤،٣\ \mu m)$.
- إثارة جزيئات ثاني أكسيد الكربون عبر التفاعلات الكيميائية .

وتترافق الطرق السابقة بعوامل تؤثر سلباً وتؤدي إلى انخفاض في حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة وبالتالي إلى تناقص في معامل التضخيم لأشعة الليزر ومـن هذه العوامل :

*- تفكك جزيئات غاز ثاني أكسيد الكربون $CO_٢$ ولينتج عـن ذلـك التفكـك جزيئات أحادي أكسيد الكربون CO ويمكن أن يحدث هذا التفكك خلال فترة زمنية قصيرة $(٠،١\text{-}١\ Sec)$.

*- ارتفاع درجة حرارة الغاز بسبب الحرارة التي تنتج عن عملية الـضخ أو إثـارة السويات التي تساهم في الانتقالات الليزرية .

ويمكن الحد أو تخفيض تأثير هذه العوامل من خلال إضافة جزيئات من غازات أخرى مثل $(H_٢O\ ,\ H_٢\ ,\ Pt)$ تقوم بدور المرجع الكيميائي لمنع حدوث عملية التفكك لجزيئة غاز ثاني أكسيد الكربون أو من خلال استخدام تقنيات تبريد مناسبة تؤدي إلى خفض درجة حرارة الغاز ضمن أنبوب جهاز الليزر والتي تعتمد على مبـدأ انتـشار وتبادل الحرارة وتساهم في عملية انتقال الحرارة من الغاز إلى جدران الأنبوب والـذي بدوره يتم تبريده بواسطة الماء أو زيت تبريد مناسب . وهذه الطريقة تستخدم في حالة ليزرات ثاني أكـسيد الكربـون ذات الاسـتطاعات الـتي تقـع ضـمن المجـال $(P_{max} = ٥٠ - ٨٠\ W)$.

بالإضافة إلى ليزر أول أكسيد الكربون وليزر ثاني أكسيد الكربون هناك أنواع

أخرى من الليزرات التي تصدر أشعة ليزرية بشكل مستمر أو نبضي وفقاً لعدد كـبير جداً من الخطوط الطيفية يتجاوز عددها ٥٠٠ خط طيفي وبأطوال موجية مختلفة تقع ضمن مجال (λ = ٢،٥ μm – ٢ mm) أي ضمن مجال تحت الأحمر البعيد من الطيـف الكهرطيسي . ولكن باعتبار أن القسم الأكبر من هذه الأطـوال الموجيـة يترافـق باستطاعات خرج ليزرية صغيرة جداً وبصعوبات تقنية بالغة في الحصول عليها ، لذلك ينحصر استخدام مثل هذه الليزرات في مجال الأبحاث العلمية فقـط ، حيـث تبلـغ استطاعة الخرج في أفضل الحالات ($P \approx$ ١٠ – ٤٠٠ mW) كما أن أكبر طول موجـة لخط طيفي تم الحصول عليه هي (λ = ١،٩٦٥٣٤ mm) من ليزر بروميد الميتان الغازي (CH_3- Br- Laser) وباستطاعة خرج صغيرة قيمتها (P = ١ mW) . وتستخدم هذه الليزرات في عمليات فصل النظائر ، تقنيات مراقبة ودراسة تلـوث البيئـة الليـدار (*Light Detection and Ranging LIDAR*) وفي مطيافية الجسم الصلب .

الخصائص الفيزيائية والتقنية	H_2O-Laser	D_2O-Laser	HCN-Laser	CH_3F-Laser	الواحدة
طول الموجة	٢٨	٦٦	٣٣٧	٤٩٦	μm
الاستطاعة(مستمر)	١٠٠	ـ	١٠٠	٤٠	mw
استطاعة النبضة	٥	١٧	١	٥٠٠٠-١٠٠٠	kw
درجة المردود	ـ	٠،٧	ـ	٠،٠٦	%
ضغط الغاز	٣٥٠	٢٧٠	١٠٠٠-٥٠٠	١٣٠	Pa
طريقة الضخ	انفراغ كهربائي	ضوئي	انفراغ كهربائي	ضوئي	-

الجدول (٩) يبين الخصائص الفيزيائية والتقنية لعدد من الليزرات التي تعمل في مجال تحت الأحمر

كما يمكننا الحصول على أشعة ليزرية من عدد كبير من الجزيئات الأخرى أيضاً مثل جزيئات ..... $NH_3 , H_2O , H_2S , SO_2 , HCN$ التي تثار بطريقة الانفراغ أو مثل جزيئات ... $CH_3F , CH_3\text{-}OH , HCOON , NH_3 , D_2O$ والتي تثار بطريقة الـضخ الضوئي باستخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون ، وبشكل عام تصدر الأشعة الليزرية من هذه الجزيئات نتيجة للانتقالات التي تتم بين السويات الاهتزازية-الدورانيـة أو بـين السويات الدورانية . ويبين الجدول (٦- ٩) عدداً من هذه الليزرات مع خصائـصها الفيزيائية والتقنية .

٦-٣-٥- خصائص أشعة الليزرات الغازية :

تتميز الأشعة الليزرية الصادرة عن الليزرات الغازية بأن زيادة العـرض الـذي تبديه الخطوط الطيفية لهذه الأشعة صغيرة بالمقارنة مع زيادة عرض الخطوط الطيفيـة للأشعة الليزرية في حالة ليزرات الجسم الصلب وذلك بسبب التجانس الجيد للوسـط الليزري الفعال (الوسط الغازي) كما أنها ذات نوعية أفضل بالنسبة لكل من طـول ترابط الأشعة، الاستقرار في سعة الأشعة ، انفراج الأشعة وكذلك التجانس المنتظم في توزع الشدة بالنسبة للمقطع العرضي لشعاع الليزر .

كما أن الخصائص الطيفية لهذه الأشعة تتعلّق بشكل كبير بزيادة العرض الناتجة عن مفعول دوبلر اللامتجانس والذي تسببه حركية جزيئات الغاز . حيث يكون التغير في تعريض دوبلر $\delta\upsilon_D$ صغيراً بالنسبة لتأثير درجة حرارة الغـاز وحجـم ذرات أو جزيئات الغاز ولكنه بالمقابل يتعلّق بشكل كبير بطول الموجة حيث نجد على سـبيل المثال أن :

تكون قيمة التغير في تعريض دوبلر لطول الموجة $\lambda = ١٠،٦ \ \mu m$ في ليزر غاز ثـاني أكسيد الكربون عبارة عن $\delta\upsilon_D \approx ٥٠ \ MHz$.

وتكون قيمة التغير في تعريض دوبلر لطول الموجة $\lambda = ٠،٦٣٣ \ \mu m$ في ليـزر غـاز الهليوم-نيون عبارة عن $\delta\upsilon_D \approx ١،٥ \ MHz$.

بينما تكون قيمة التغير في تعريض دوبلر لطول الموجة $\lambda = ٠،٤٨٨\ \mu m$ في ليزر غـاز شوارد الأرغون عبارة عن $\delta \upsilon_D \approx ٣،٥\ MHz$.

وهناك سبب إضافي لهذا التعريض اللامتجانس وهو أن الليزرات الغازية تصدر أشعتها وفقاً لعدد كبير من الاهتزازات الخاصة (الإنماط) مما يؤدي إلى تعريضٍ نسبي في الخطوط الليزرية . ويمكننا تحقيق عمل لليزر وفقاً لنمط واحد اما بإضافة تقنيـات لفصل الترددات عن بعضها أو باستخدام مرنان ذي طول قصير حيث يـستخدم في ليزر الهليوم-نيون أنبوب غازي ضمن مرنان طوله $(L \leq ١٠\ cm)$.

٦-٤- ليزر أنصاف النواقل *(Semiconductor-Laser)* :

وضعت الأسس النظرية لليزرات أنصاف النواقل عام **١٩٥٩** ولكنها لم تتحقـق عملياً الاّ بعد عام **١٩٦٢** ، حيث تمّ صنع أول ليزر نصف ناقل من النـوع غـاليوم-أرسنيد *(Ga-As-Laser)* . أما في الوقت الحاضر فهناك عشرات الأنواع من أنصاف النواقل التي يمكن استخدامها في توليد أو إصدار الأشعة الليزرية .

وتستخدم في هذا النوع من الليزرات بلورات نصف ناقلة تعتمد على الوصـلة من النوع *p-n* كوسط ليزري فعال والذي تتم اثارته بواسطة مرور تيار كهربـائي نتيجة تطبيق جهد كهربائي خارجي . وبالتالي يصدر أشعة ليزرية مترابطة ذات أطوال موجية مختلفة تقع في مجال الأشعة فوق البنفسجية مروراً بالأشعة المرئية وهكذا حـتى مجال الأشعة تحت الحمراء أي أنها تقع ضمن المجال $(\lambda \approx ٠،٣٢ - ٣٢\ \mu m)$ من الطيـف الكهرطيسي .

وتتميز ليزرات أنصاف النواقل بالمقارنة مع الليزرات الأخرى بالخصائص التالية:

- درجة فعالية عالية للاستطاعة (مردود عالٍ) يصل حتى ١٠٪ .
- طريقة الإثارة (عملية الضخ) السهلة والبسيطة للوسـط الليـزري الفعال ، حيث يتم تحويل الطاقة الكهربائية بشكل

مباشر إلى أشعة ليزرية مترابطة سواء كان ذلك في حالة العمل المستمر لليزر أو في حالة العمل بشكل نبضي .

- أبعاد وحجوم ليزرات أنصاف النواقل المتناهية في الصغر حيث تتراوح هذه الأبعاد أجزاء من الميلليمتر : الطول أقل من ٠،٥ *mm* والعـرض أقل من ٠،٤ *mm* والارتفاع أقل من ٠،١ *mm* .
- إمكانية التعديل المباشر للتردد من خلال التيار الكهربائي ويمكـن أن يصل إلى مجالات عالية من مرتبة *GHz* (أي ١٠١٠ *Hz*) .
- تطبيق جهود إثارة صغيرة جداً .
- عمر الاستخدام الطويل جداً حيث يصل إلى ١٠٧ ساعة عمل.

ويمكن الحصول من ليزرات أنصاف النواقل على مجال واسع نسبياً من الأطوال الموجية وذلك من خلال تغيير فجوة الطاقة (المسافة) بين عصابة الناقليـة وعـصابة التكافؤ E_g حيث يتم تحقيق ذلك باستخدام تراكيب مختلفة للوسط الليزري الفعـال (على سبيل المثال استخدام الروابط $(A_{III}\ B_V)$. ويمكن تحديد طول الموجة للأشعة الصادرة من العلاقة :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g} = \frac{1237}{E_g}$$

حيث يقدر طول الموجة بالنانومتر (*nm*) و E_g بالإلكترون فولط (*eV*) .

$h = ٦،٦٣ . ١٠^{-٣٤}\ J.s$ ثابت بلانك .

$c = ٣ . ١٠^{٨}\ m/s$ سرعة الضوء .

وتتطلّب صناعة ليزرات أنصاف النواقل تقنيات بالغة الدقة وعالية التطور . كما تلاقي هذه الليزرات استخدامات واسعة في مجالات متعددة منها :

- نقل المعلومات ويتم ذلك باستخدام الكابلات الضوئية (تقنيات نقـل المعلومات عبر الكابل الضوئي) وفي تقنيات معالجة المعلومات الرقمية.

- تستخدم كليزرات تحكّم ومراقبة في العمليات وكـذلك في تقنيـات الحواسيب .
- استخدامها كأجزاء أو أقسام أساسية في تصنيع الأجهزة الإلكترونيـة مثل أنظمة الفيديو والصوت ، الطابعات الليزريـة ، أجهـزة قيـاس المسافات ، أجهزة المراقبة والرصد التي تعمل في مجال تحـت الأحمـر وكذلك في الهولوغرافيا .
- في الأجهزة الطيفية المستخدمة في دراسة وقياس الأطياف .

٦-٤-١- الأسس الفيزيائية لليزرات أنصاف النواقل :

إن عملية إصدار الفوتونات في الليزر الذي يعتمد في صناعته على مواد أنصاف ناقلة تكون شبيهة تماماً بعملية إصدار الفوتونات في الذرة المعزولـة ، فالإلكترونـات عندما تنتقل من سوية طاقة عليا إلى سوية أدنى تصدر اشعاعاً ضوئياً . لكن لايمكـن للإلكترون أن ينزل من سوية أعلى إلى سوية أدنى الا إذا كان هناك مكـانٌ شـاغر . فهذه المشكلة غير موجودة في حالة الذرة المعزولة لأن الإلكترون الذي كان في السوية الأساسية ثم انتقل إلى سوية أعلى ترك مكانه شاغراً وبإمكانه أن يعود ليـشغل هـذا المكان من جديد . أما في حالة أنصاف النواقل فقد اعتمد العلماء لحل هذه المـشكلة على وجود نوعين من أنصاف النواقل :

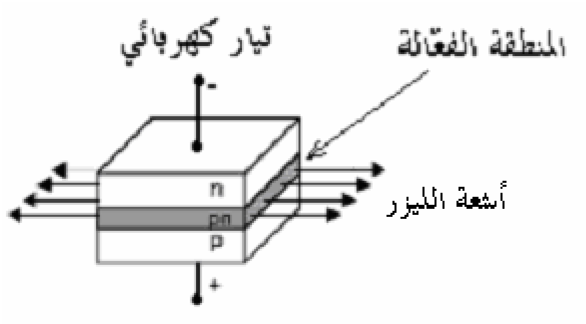
- أنصاف نواقل من النوع *(n)* :

للحصول على هذا النوع من أنصاف النواقل يمزج الجرمانيوم الرباعي التكـافؤ مـع الزرنيخ الخماسي التكافؤ فتتشارك ذرة الزرنيخ بأربعة إلكترونات مع ذرة الجرمـانيوم ويبقى إلكترون واحد يمكن أن يتحرر من نواته عند اكتسابه من الوسط المحيط طاقـة صغيرة جداً *(٠،٠١ eV)* وتنتج لدينا إلكترونات حرة.

- أنصاف نواقل من النوع *(p)* :

ينتج هذا النوع من أنصاف النواقل عند إضافة عناصر ثلاثية التكافؤ (غاليوم ، انديوم) إلى الجرمانيوم فتقوم إلكترونات ذرة الغاليوم مثلاً بشغل ثلاث روابط فقط مـن ذرة الجرمانيوم وبالتالي فانه يبقى أماكن شاغرة في عصابة التكافؤ تسمى (الثقوب) .

ونقوم بغية صناعة متصل ثنائي بوصل نصف ناقل من النوع *(n)* مع نصف ناقل من النوع*(p)* . وعند تطبيق فرق في الكمون على المتصل الثنائي ومرور تيار كهربائي يجعل إلكترونات الموجودة في نصف الناقل *(n)* تنتقل إلى الثقوب الموجودة في نـصف الناقل *(p)* مما يؤدي إلى حدوث انتقال مشع في منطقة الاتصال .كما هـو موضـح بالشكل (**٦ – ١٢**).



الشكل (٦ - ١٢) مخطط ليزر نصف ناقل

إذا "نلاحظ أن هناك عدة أنواع من سويات الطاقة التي يمكـن للإلكترونـات الانتقال فيما بينها واصدار طاقة على شكل موجة كهرطيسية . كما نلاحظ أيضاً أن مفهوم سويات الطاقة في حالة أنصاف النواقل تختلف عنه في حالة سـويات الطاقـة الإلكترونية ضمن الذرات التي ناقشناها سابقاً .

تتوزع سويات الطاقة في نصف الناقل بشكل مستمر في كل من عصابة التكافؤ وعصابة الناقلية وتكون هذه السويات قريبة جداً من بعضها الـبعض بحيـث يمكـن اعتبارها مستمرة . ويمكن لكل سوية من هذه الـسويات أن تحتـوي فقـط علـى إلكترونين، وفي درجات الحرارة المنخفضة (عند درجة الصفر المطلـق) تكـون

السويات ذات الطاقة المنخفضة مشغولة بالإلكترونات بينما تكـون الـسويات ذات الطاقة العالية خالية من الإلكترونات والحد الفاصل بين هاتين الحالتين يتحدد بواسطة سوية فرمي ***(Fermi)*** والتي تمثّل أعلى سوية طاقة مشغولة بالإلكترونات .

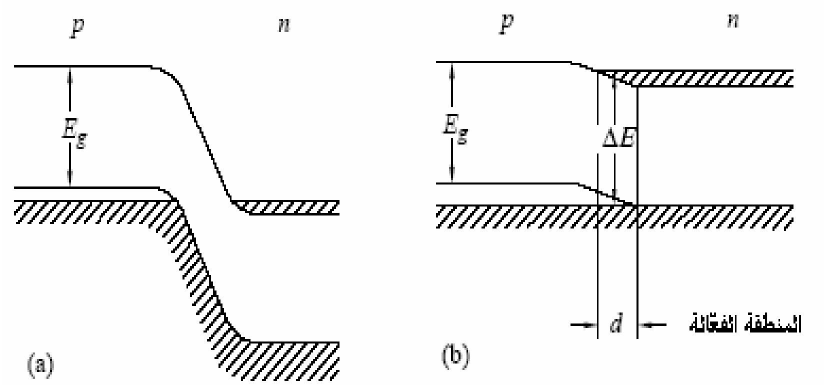
ولايمكن تحقيق حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة في حالـة التـوازن الحراري الموافقة لدرجة الصفر المطلق وذلك لأنه وفقاً لتوزع فرمي يعطى احتمال أن يوجد إلكترون في السوية E بالعلاقة :

$$P = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_f}{KT}}}$$

حيث تمثّل E_F طاقة سوية فرمي .

٦-٤-٢- عملية الضخ :

هناك اختلاف أساسي بين عمليات الضخ المختلفة والمستخدمة في الليزرات التي درسناها سابقاً وعملية ضخ ليزرات أنصاف النواقل ، حيث تحدث عملية الـضخ في ليزر نصف الناقل عند تطبيق فرقاً في الكمون على المتصل الثنائي مما يؤدي إلى انزياح بين سويات الطاقة كما هو موضح بالشكل (٦ - ١٣).



بدون تطبيق جهد كهربائي　　　　عند تطبيق جهد كهربائي

الشكل (٦ - ١٣) مخطط سويات الطاقة في ليزر نصف ناقل

وتتعلق قيمة هذا الانزياح مع فرق الكمون المطبق من خلال العلاقة :

$$\Delta E = e \cdot V$$

وعند انتقال الإلكترونات من سويات عصابة الناقلية إلى سويات عصابة التكافؤ سوف تعطي طاقة تصدر على شكل أشعة تقع ضمن المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي .

وتكون عملية الإصدار في هذه الحالة مشابهة لعملية الإصدار القسري عندما تكون طاقة الفوتون المحرض مساوية للفرق بين طاقة الإلكترون وطاقة الثقب الذي يحدث بينهما الانتقال مما يؤدي بالنتيجة إلى اصدار فوتونين لهما نفس الطاقة ونفس طول الموجة ، أي أن الدور الذي تلعبه منطقة الاتصال بين نصف الناقل من النوع n ونصف الناقل من النوع p يشابه تماماً دور الوسط الليزري الفعال في تضخيم الأشعة.

وتعتبر هذه الطريقة ، لتحقيق عملية الضخ ، الأكثر شيوعاً واستخداماً ولكن توجد أيضاً طرق أخرى مثل عملية الضخ باستخدام أشعة إلكترونية حيث تنتج حاملات شحنة حرة بواسطة تأثير الإلكترونات المسرعة والتي تمتلك طاقة حركية E_k أصغر من طاقة العتبة E_s التي تبدأ عندها العيوب بالتشكّل داخل المادة التي يتألف منها نصف الناقل وكذلك تكون أكبر من طاقة العتبة E_i التي تؤدي إلى تشرد الذرات في مادة نصف الناقل .

وهناك أيضاً طريقة الضخ الضوئي التي تعتمد على استخدام مصابيح ضوئية نبضية ذات استطاعات عالية أو بوساطة استخدام الليزرات الأخرى وتبلغ كثافة استطاعة الضخ في هذه الحالة $(١٠^{٧}\ W/cm^{٢})$.

يبين الجدول (٦- ١٠) عدداً من مواد ليزرات أنصاف النواقل مع طول الموجة للأشعة التي تصدرها وكذلك طريقة الضخ الضوئي الملائمة .

تركيب المواد	طول الموجة (µm)	طريقة الضخ كهربائية	ضوئية	إلكترونية
GaN	٠،٣٦		*	
GaAs	٠،٨٢......٠،٩٢	*	*	*
GaSb	١،٥........١،٨	*	*	*
InP	٠،٨٩.....٠،٩١	*	*	
InAs	٣،٠.......٣،٢	*	*	*
InSb	٤،٨......٥،٣	*	*	*
$Ga_xIn_{١-x}P$	٠،٥٦.......٠،٩٠	*	*	
$Ga_xIn_{١-x}As$	٠،٩.......٣،٢	*	*	*
$Al_xGa_{١-x}As$	٠،٦٢.....٠،٩٠	*	*	*
$Al_xGa_{١-x}Sb$	١،١.....١،٨	*		*
PbS	٤،٣	*		*
PbSe	٨،٥	*		*
PbTe	٦،٥	*		*
$Pb_xSn_{١-x}Se$	٨.......٣٢	*		*
$Pb_xSn_{١-x}Te$	٦،٥.......٣٢	*	*	*
$Pb_xCd_{١-x}S$	٠،٥.......٤،١	*		
$Pb_xGe_{١-x}Te$	٤،٤.......٦،٥	*		

*	٠،٣٣......٠،٤٩	$Zn_xCd_{١-x}S$
*	٠،٥٠......٤،١	$Cd_xHg_{١-x}Te$

الجدول (٦- ١٠) يبين بعض المواد المستخدمة في ليزرات أنصاف النواقل وطول موجة أشعتها

(x النسبة المئوية للعنصر ضمن المزيج)

ومن جهة أخرى يمكن إيجاد العلاقة التي تعطي قيمة تيار العتبة والتي تمثّل شدة التيار اللازم مروره في المتصل الثنائي حتى يبدأ الليزر بالعمل واصدار الأشعة الليزرية . لذلك نفرض أنّ عصابة الناقلية في نصف الناقل p تحتوي على عدد من الإلكترونات $N_٢$ في واحدة الحجم ، وأنّ عصابة التكافؤ تحتوي على عدد من الإلكترونات $N_١$ والتي تمتلك إمكانية الاتحاد مع الثقوب . فعند تطبيق جهد كهربائي أو مرور تيار كهربائي فسوف يؤدي ذلك إلى تضخيم للأشعة عند مرورها في منطقة الاتصال ويعطى عامل التضخيم بالعلاقة :

$$\alpha_{(\upsilon)} = \left(N_2 - N_1\right)\frac{\lambda^2 \cdot g_{(\upsilon)}}{V \cdot 8\pi \cdot \tau} \qquad (١)$$

حيث يمثّل : V حجم منطقة الاتصال . $g_{(\upsilon)}$ تابع التوزع للخط الطيفي الناتج عن عملية الإصدار . τ الفترة الزمنية التي تحدث خلالها عملية الإصدار التلقائي نتيجة لاتحاد الإلكترونات مع الثقوب.

ويأخذ عامل التضخيم قيمته العظمى عندما تكون قيمة تابع التوزع $g_{(\upsilon)}$ أعظم مايمكن ويتحقق ذلك عند قيمة للتردد توافق $\upsilon_.$ لأنه عند هذه القيمة للتردد يأخذ التابع $g_{(\upsilon_.)}$ القيمة $(١/\Delta\upsilon)$ ومنه نجد أن القيمة العظمى لعامل التضخيم تأخذ الشكل:

$$\alpha_{(\upsilon)\max} = \left(N_2 - N_1\right)\frac{\lambda^2}{\Delta\upsilon \cdot V \cdot 8\pi \cdot \tau} \qquad (٢)$$

وعند انتشار الأشعة بين طرفي المتصل الثنائي ، والذي يمكن تشبيهه بالمرنان ، سوف يؤدي ذلك إلى ضياع في طاقة الأشعة بسبب عمليات الامتصاص التي تحدث ضمن أنصاف النواقل وكذلك بسبب الخسارة الناتجة عن عملية الانعكاس على

أطراف المتصل الثنائي. فإذا كانت قيمة الطاقة الضائعة β فانه يجب أن تكون قيمـة معامل التضخيم أكبر من قيمة الطاقة الضائعة وذلك حتى يبدأ الليزر بإصدار الأشـعة أي أنه يجب أن يكون $(\alpha_{max} \geq \beta)$ ومن العلاقة (٢) نجد أن :

$$\left(N_2 - N_1\right)\frac{\lambda^2}{\Delta\upsilon \cdot V \cdot 8\pi \cdot \tau} \geq \beta \qquad (٣)$$

$$\frac{\left(N_2 - N_1\right)}{\tau} \geq \frac{\beta \cdot \Delta\upsilon \cdot V \cdot 8\pi}{\lambda^2} \qquad (٤)$$

وبما أن شدة التيار هي عبارة عن كمية الكهرباء في واحدة الزمن لذلك يجب أن تكون شدة التيار التي توافق الانتقال المشع الناتج عن اتحاد الإلكترونات مع الثقوب ضـمن المتصل الثنائي مساوية إلى :

$$I = \frac{N_2 \cdot e}{\tau} \qquad (٥)$$

وبما أنه في حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة يكون لدينا $N_2 >> N_1$ لذلك يمكننا اهمال N_1 بالنسبة لـ N_2 وتصبح العلاقة (٤) بالشكل :

$$\frac{N_2}{\tau} \geq \frac{\beta \cdot \Delta\upsilon \cdot V \cdot 8\pi}{\lambda^2} \qquad (٦)$$

وإذا ضربنا طرفي هذه العلاقة بشحنة الإلكترون e نجد أن :

$$I = \frac{N_2 \cdot e}{\tau} \geq \frac{\beta \cdot \Delta\upsilon \cdot V \cdot 8\pi \cdot e}{\lambda^2} \qquad (٧)$$

وبما أنّ حجم منطقة الاتصال $(V = s.d)$ حيث s سطح المتصل الثنائي و d سماكـة هذه المنطقة فبالتعويض في العلاقة السابقة ينتج لدينا :

$$I \geq \frac{\beta \cdot \Delta\upsilon \cdot s \cdot d \cdot 8\pi \cdot e}{\lambda^2} \qquad (٨)$$

$$J = \frac{I}{s} \geq \frac{\beta \cdot \Delta\upsilon \cdot d \cdot 8\pi \cdot e}{\lambda^2} \qquad (٩)$$

وهذه هي العلاقة التي تعطي قيمة كثافة التيار اللازم مروره ضمن المتصل الثنائي حتى يبدأ الليزر نصف الناقل بالعمل، والجدول (٦-١١) يبين عدداً من مواد أنصاف النواقل المستخدمة في صناعة المتصلات الثنائية وطول الموجة الناتج عنها وكذلك كثافة التيار اللازم ودرجة الحرارة .

مواد نصف الناقل	طول الموجة (μm)	درجة الحرارة (K°)	كثافة التيار (kA/cm^2)
GaAs	٠،٨٤٠	٤،٢	٠،٠٣
GaAs	٠،٩١٠	٣٠٠	٤٠.....٢٠
(In,Ga)As	١،٠٨٥	٧٧	١،٩
InP	٠،٩٠٧	٧٧	٠،٧٥
(In,Ga)P	٠،٦١٠	٧٧	٥،٩
GaSb	١،٥٥٠	٧٧	٣......٢
InSb	٥،٣٠٠	٤،٢	٤......٣
In(As,Sb)	٣،١٧٠	٧٧	٠،٨
PbS	٤،٣٢٥	٤،٢	٠،٣
(Al,Ga)As	٠،٨٥٠	٣٠٠	٠،٧
PbSe	٦،٩٠٠	٧٧	٦......٤
(Ga,In)(As,P)	١،٣٠٠	٣٠٠	٠،٥
PbTe	٦،٥٠٠	٤،٢	٢......٠،٥
(Al,Ga)(As,Sb)	١،٧٧٠	٣٠٠	١،٦
Pb(S,Se)	٤،٧٤٠	٧٧	٦
(In,Ga)(As,Sb)	١،٩٠٠	٩٠	٠،٩
(Pb,Cd) S	٣،٥٠٠	٤،٢	٠،١٨٥
(In,Ga)(As,Sb)	١،٩٠٠	١٨٠	١٠
(Pb,Ge)Te	٥،٥٠٠	٤،٢	٠،١
(Pb,Sn)Se	١٨،٠٠	٧٨	١٠.....٣

الجدول (٦-١١) يبين قيم كثافة التيار اللازمة لعمل ليزر المتصل الثنائي وكذلك درجة الحرارة وطول موجة أشعة الليزرة الصادرة عن بعض المواد المستخدمة في تركيب أنصاف النواقل

٦-٥- الليزرات الصباغية *(Dye-Laser)*

لقد بدأ تطور الليزرات الصباغية منذ عام **١٩٦٦** حيث تمّت عملية إنجـاز أول ليزر صباغي يعمل بشكل نبضي واستمر ذلك حتى عام **١٩٧٢** حتى استطاع العلمـاء تصنيع ليزرات صباغية تعمل بشكل مستمر . تصدر هذه الليزرات أشعة تقع في المجال الطيفي *(λ = ٠،٣٢ – ١،٢٨ μm)* . وتتم عملية إثارة جزيئات الوسط الفعال بطريقـة الضخ الضوئي فقط .

ويمكن التمييز بين عدة أنواع من هذه الليزرات وذلك وفقاً للفترة الزمنية الـتي تحدث خلالها عملية الضخ الضوئي أو نوع تلك العملية وهذه الأنواع هي :

- الليزرات الصباغية ذات العمل المستمر حيث تكون عملية اصـدار الأشـعة الليزرية بشكل مستمر .
- الليزرات الصباغية ذات المصابيح الوميضية والتي تعمل بشكل نبضي وتتراوح مدة النبضة الليزرية الواحدة بين ٣ – ٠،٣ μs .
- الليزرات الصباغية - النانوثانية وهي ليزرات نبضية وتتراوح مدة النبضة بين ٥ – ٢٠ ns .

وتتصف الليزرات الصباغية بإمكانية تحديد طول موجة الأشعة التي تـصدرها بشكل جيد ، كما يمكن تغيير خصائص أشعتها حسب الغاية التي سـوف تـستخدم لأجلها من حيث شدة الأشعة أو عرض ومدة نبضة ليزرية منها . وأدت هذه الصفات إلى فتح المجال واسعاً أمام استخدام هذه الليزرات في العديد من التطبيقات وأهمهـا في الدراسات الطيفية ، فصل النظائر ، وفي الطب والبيولوجيا وكذلك في حماية البيئة .

٦-٥-١- الأسس الفيزيائية لليزرات الصباغية :

٦-٥-١-١- الوسط الفعال :

يحدث الإصدار القسري في الليزرات الصباغية نتيجة لانتقالات الفلورة التي تتم بين السويات الإلكترونية ضمن الجزيئات الصباغية . وهذه الجزيئات هي عبارة عـن جزيئات عضوية تتكون من عدة ذرات مختلفة مرتبطة مع بعـضها الـبعض بـروابط كيميائية بحيث تشكّل نوعية هذه الروابط بين الذرات حالـة فيزيائيـة تـؤدي إلى إكتساب الجزيئات الناتجة عنها خاصية التألق الضوئي أي الفلورة ***(Florescence)***.

وهناك العديد من المركبات الكيميائية التي تتميز أو تمتلك هذه الخاصية مثـل الرودامين ***(Rhodamin ٦G)*** الكومارين ***(Coumarin)*** ، الاكـسانتين ***(Xanthen)*** والبولي ميتين ***(Polymethin)*** والجدول (**٦- ١٢**) يبين عدداً من الجزيئات الصباغية المستخدمة كوسط فعال في الليزرات الصباغية مع أهم خصائصها الفيزيائية .

الجزيئة الصباغية	***كتلة الجزيئة النسبية***	***نوع الليزر الصباغي***	***الوسط المذيب***	***التركيز (مول/ليتر)***	***طول موجة الأشعة (nm)***
ترفينيل	**٢٣٠**	**نانوثانية**	**سيكلوهكسان**	**٥,١٠$^{-٣}$**	**٣٦٠ ... ٣٢٢**
بوتيل-*PBD*	**٣٥٤**	**وميضي** **نانوثانية**	**ديميتيل فورميد** **تولوين**	**٢,١٠$^{-٤}$** **٤,١٠$^{-٣}$**	**٣٨٠ ... ٣٥٥** **٣٩٥ ... ٣٥٥**
٤-٤'-ديفينيل ستيلبن	**٣٣٢**	**نانوثانية**	**ديوكسان**	**١,١٠$^{-٣}$**	**٤١٥ ... ٣٩٥**
ستيلبن-٣	**٥٦٣**	**نانوثانية** **مستمر**	**ميثانول** **ايتيلين غليكول**	**١,١٠$^{-٣}$** **١،١,١٠$^{-٣}$**	**٤٦٥ ... ٤١٠** **٤٩٠ ... ٤٠٠**
٧-أمينو-٤-ميتيل كومارين	**١٧٥**	**نانوثانية** **وميضي**	**ايتانول** **ايتانول**	**٥,١٠$^{-٣}$** **٣,١٠$^{-٤}$**	**٤٦٠ ... ٤٢٠** **٤٦٠ ... ٤٢٠**
كومارين	**٢٥٥**	**نانوثانية** **مستمر**	**ايتانول** **ايتيلين غليكول**	**٥,١٠$^{-٣}$** **٣,١٠$^{-٣}$**	**٤٩٥ ... ٤٥٥** **٥١٥ ... ٤٧٠**

رودامين $6G$	٤٧٩	نانوثانية مستمر	ايتانول ايتيلين غليكول	$٥,١٠^{-٣}$ $٢,١٠^{-٣}$	٥٧٠ ... ٦١٥ ٥٧٠ ... ٦٥٠
رودامين B	٤٧٩	نانوثانية وميضي	ايتانول ايتانول	$٢،٥,١٠^{-٣}$ $٣,١٠^{-٤}$	٥٩٥ ... ٦٥٠ ٦٠٠ ... ٦٤٥
كريسيل فيوليت	٣٦١	وميضي	ايتانول	$٨,١٠^{-٥}$	٦٤٥ ... ٧٠٠
نيل بلو A	٤١٨	نانوثانية مستمر	ايتانول ايتيلين غليكول	$٢,١٠^{-٣}$ $١,١٠^{-٣}$	٦٨٥ ... ٧٣٠ ٧١٠ ... ٧٩٠
أوكسازين ١	٤٢٤	نانوثانية وميضي	ايتانول ايتانول	$٥,١٠^{-٣}$ $١،٥,١٠^{-٤}$	٧٢٥ ... ٧٧٥ ٧٠٠ ... ٧٦٥
هكساسيانين ٣	٥٣٦	نانوثانية مستمر	ديميتيلسلفوكسيد ايتيلين غليكول	$٢,١٠^{-٣}$ $١,١٠^{-٣}$	٨٤٥ ... ٨٧٠ ٨٣٠ ... ٩٤٠

الجدول(١٢) يبين عدد من الجزيئات الصباغية مع خصائصها الفيزيائية

ويمكن للوسط الليزري الفعال أن يأخذ أشكالاً أو حالات مختلفة عند استخدامه في الليزرات الصباغية مثل :

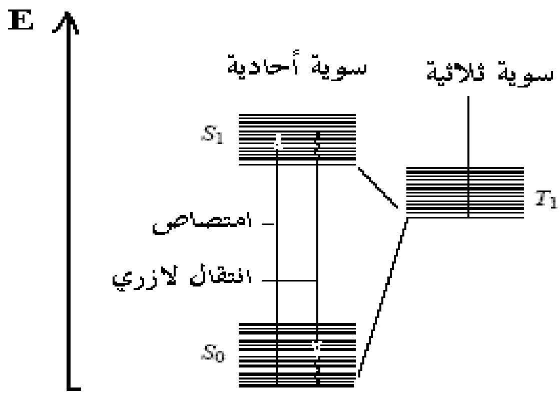
- الحالة السائلة : وتكون على شكل محلول ناتج عن عملية إذابة الجزيئات الصباغية في بعض المحاليل الكيميائية، وهذه الحالة هي الأكثر استخداماً وشيوعاً في الليزرات الصباغية .
- الحالة الصلبة : حيث يتم إدخال الجزيئات الصباغية ضمن البنية الشبكية لبعض البلورات الصلبة .
- الحالة الغازية : وفي هذه الحالة تستخدم أبخرة الجزيئات الصباغية كوسط فعال .

وفي الحالة العامة يكون تركيز الجزيئات الصباغية ضمن المحلول صغيراً حيث تتراوح قيمته $١٠^{-٤}$ – $٥,١٠^{-٣}$.

يتألف مخطط سويات الطاقة للجزيئة الصباغية من سويات أحادية

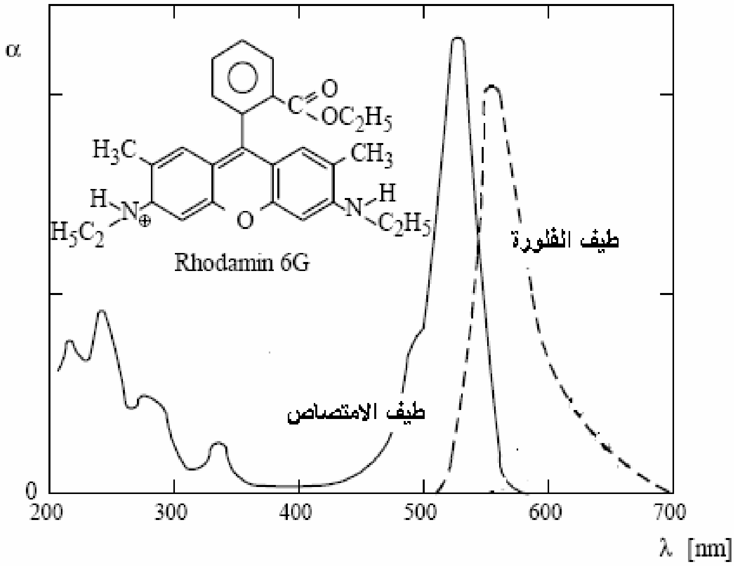
$S_0, S_1, S_2, ...$ ذات حالة تعددية سبينية $M = 1$ حيث $(M = 2S + 1)$ وفي هـذه السويات تمتلك الإلكترونات في كل مدار قيماً متعاكسة للعـدد الكـواتي الـسبيني وتتألف كذلك من سويات ثلاثية $M = 3$ أي تمتلك الإلكترونات في هذه الـسويات قيماً متساوية للعدد الكواتي السبيني (سبينات متوازية) والشكل (**٦ – ١٤**)يوضح ذلك .

وتمتلك هذه السويات الإلكترونية عدداً من السويات الاهتزازية – الدورانيـة والتي تكون عريضة بشكل كبير نسبياً نتيجة الترابط فيما بينها من جهة ونتيجة للتأثير المتبادل مع جزيئات المذيب أو المحلول الكيميائي التي تحيط بها من جهة أخرى .



الشكل (٦ - ١٤) مخطط سويات الطاقة في ليزر صباغي

وهذا التعريض يؤدي بدوره إلى الحصول على عصابات طيفية عريضة في طيف اصدار الفلورة أو طيف الامتصاص الذي ينتج عـن الانتقـالات بـين الـسويات الإلكترونية كما يظهر في طيف الامتصاص وطيف الفلورة لمركب الرودامين والمبـين بالشكل (**٦ – ١٥**)، هذا مع العلم أنه عند درجة حرارة الغرفة تتواجد أغلب هـذه الجزيئات الصباغية في السوية الاهتزازية الأساسية .



الشكل (٦ - ١٥) الصيغة الكيميائية وطيف الامتصاص وطيف الفلورة لجزيئة الرودامين

٦-٥-١-٢- عملية الضخ :

يتم الحصول على حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة في الليزرات الصباغية من خلال إثارة السويات الاهتزازية S_i^v $(i=١،٢،٣،..)$ في السويات الإلكترونية المثارة وذلك باستخدام طريقة الضخ الضوئي . ولكن بسبب الارتباط القوي ان كان بين مكونات الجزيئة الواحدة أو بين الجزيئات مع بعضها البعض ضمن الوسط الفعال تنشأ عملية تبادل في توزع الإلكترونات على السويات الاهتزازية خلال فترة زمنية قصيرة جداً أقل من $١٠^{-١٢}$ *Sec* والذي يمكن وصفه بواسطة توزع بولتزمان. وبالتالي فإن الإصدار القسري يحدث على شكل خطوط طيفية عريضة ومتجانسة ونتيجة للانتقالات من السوية الليزرية العليا S_1^0 إلى السوية الليزرية السفلى S_0^v . وبالإضافة إلى الانتقالات المترافقة بإصدار أشعة ليزرية هناك أيضاً انتقالات أخرى لاتترافق بإصدار أشعة ولكنها تؤدي إلى إفراغ السوية S_1^0 من الإلكترونات ومن هذه الانتقالات:

- عمليات الاسترخاء (***internal Conversion***) ضمن السوية الواحدة

والتي تؤدي إلى انتقالات غير مشعة تحدث من السويات الاهتزازية العليا إلى الـسوية الاهتزازية الأساسية .

- عمليات العبور الداخلي من السويات الإلكترونية الأحادية إلى السويات الإلكترونية الثلاثية ضمن الجزيئة ***(intersystem Crossing)*** ، وهذه العمليات تتم خلال زمن من مرتبة نانوثانية (حوالي ***ns*** ٥٠) ولكن بما أن عمر السويات الإلكترونية الثلاثية كبير جداً حيث يبلغ ***(Sec*** ١٠ – ١٠^-٦ ***)*** لذلك لاتلعب هذه الانتقالات ضمن الجزيئـة أي دور في فعل الليزرة .

وبعد عملية الضخ الضوئي ، تكون في أغلب الأحيان ، السوية الليزرية السفلى والموافقة للسوية الإلكترونية الأساسية S_0^v والمؤلّفة مـن مجموعـة مـن الـسويات الاهتزازية شبه خالية من الإلكترونات (تحتوي على عدد قليل جداً من الإلكترونات فقط) .

ومن جهة أخرى بما أن عملية الضخ الضوئي لإثارة السويات الاهتزازية المتعددة تتم من خلال استخدام منابع ضوئية ذات استطاعة عالية وبأنواع وطرق مختلفة فـإن ذلك يؤدي إلى اختلاف وتمايز بين الليزرات الصباغية المختلفة والتي يمكـن تـصنيفها وفقاً لذلك في ثلاثة أنواع :

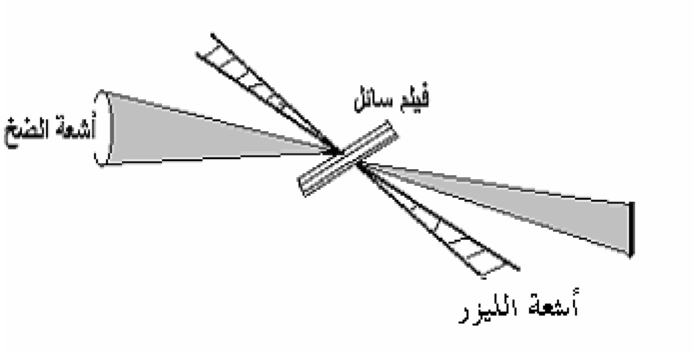
أ- ليزر صباغي – مستمر :

تتم عملية الضخ الضوئي في هذا النوع من الليزرات الصباغية بشكل مـستمر وذلك باستخدام بعض أنواع الليزرات الغازية والتي تعمل أيـضاً بـشكل مـستمر وباستطاعة خرج أقل من ***(W*** ١ ***)*** ومن أكثر الليزرات الغازية ملاءمة لهذا الغـرض ليزر غاز الأرغون المؤين ***(Ar^+-Laser)*** وكذلك ليـزر غـاز الكريبتـون المـؤين ***(Kr^+-Laser)*** .

ومن الناحية التقنية يصمم هذا الليزر بشكل يؤمن عمليـة جريـان المحلـول الصباغي المثار ضمن المرنان بحيث تكون جهة الجريان عمودية على محور المرنان كما

يكون المحلول على شكل فيلم سائل ذات ثخانة صغيرة كما هو موضـح بالـشكل (٦ – ١٦) ، ويدعى هذا النوع من التقنيات (Jet-Stream-Technique) .

وهذه التقنية تعتمد على حجيرة صغيرة خاصة سماكتـها بـضعة (١٠٠ μm) ويجري المحلول الصباغي ضمنها بسرعة تتراوح بين (١٢ m/s – ٢) وتوضع داخـل المرنان بشكل مائل بحيث تصنع مع محور المرنان زاوية تعادل زاوية بروستر . وتتميـز المحاليل الصباغية المستخدمة لهذه التقنية بأنها ذات لزوجة عالية . ومن أجل الحـصول على استطاعات عالية في حالة عمل الليزر بشكل مستمر ولنمط وحيد يمكن استخدام المرنان الحلقي.



الشكل (٦ – ١٦) مخطط ليزر صباغي – مستمر

ب- ليزر صباغي- ذو مصابيح وميضية :

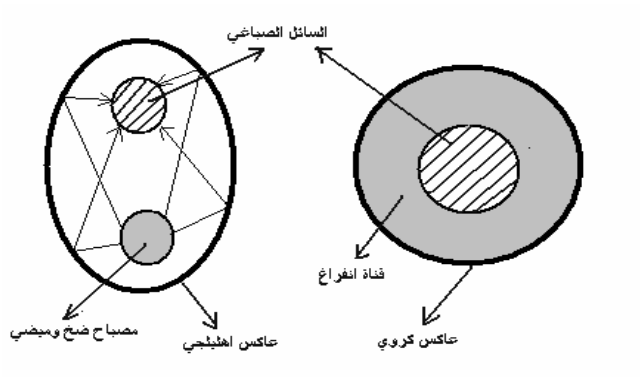
يستخدم في هذا النوع من الليزرات الصباغية مصابيح وميضية ذات أشـكال مختلفة وذلك وفقاً لنوع وطريقة تصميم المرنان وهنا يمكن التمييز بـين نـوعين مـن المصابيح:

النوع الأول يكون على شكل قضيب يتوضع ضمن المرنان ويكون مقطعه العرضـي اهليلجياً بحيث يمثل قطعاً ناقصاً يوضع في محرقه الأول الأنبوب الذي يحتـوي علـى المحلول الصباغي ويوضع في محرقه الثاني المصباح الوميضي .

والنوع الثاني هو عبارة عن مصابيح وميضية محورية تتألف من اسطوانتين لهما أقطـار

مختلفة ولهما نفس المحور بحيث تشكّل الاسطوانة الداخلية الأنبوب الذي يحتوي على المحلول الصباغي وهذه الأسطوانة موجودة ضمن الأسطوانة الخارجية التي تحدث فيها عملية الانفراغ بحيث يمثّل سطحها الداخلي الطبقة العاكسة للمرنان. والشكل **(٦-١٧)** يوضح هذين النوعين .

وفي هذا النوع من الليزرات الصباغية تتم عملية الضخ الضوئي بشكل عرضاني بحيث تكون أشعة الضخ عمودية على الأنبوب الذي يحتوي على المحلول الصبا**غي .**



الشكل (٦ ـ ١٧) مخططات ليزرات صباغية ذات مصابيح وميضية

ج- ليزر صباغي- نانوثانية :

تتم عملية الضخ في هذا الليزر الصباغي باستخدام ليزرات أخرى تعمل بشكل نبضي وتكون الفترة الزمنية للنبضة الواحدة من مرتبة النانوثانية مثل : الإكسيمر- ليزر $XeCl^*$, KrF^* وليزر غاز الآزوت وكذلك ليزر النيوديميوم-ياغ.

ويوضع المحلول الصباغي في حجيرات صغيرة ذات أشكال أسطوانية أو على شكل متوازي سطوح طول الواحدة يتراوح بين (mm ٢٠ – ١٠) ويجب أن تتميز السطوح الداخلية لهذه الحجيرات بخصائص ضوئية وبصرية جيدة وذلك من أجل تجنب الخسارة في أشعة الإصدار والناتجة بسبب عمليات التشتت والتبعثر .

٦-٥-٢- خصائص أشعة الليزرات الصباغية :

تتميز الأشعة الليزرية الصادرة عن الليزرات الصباغية بأن خطوطها الطيفية

ذات تعريض كبير ومتجانس . كما أن اصدار الطاقة الكلّية في الليزر الصباغي يحدث ضمن مجال صغير من الترددات . ويمكن أيضاً الحصول على حزمة ترددات ضيقة باستخدام مكونات بصرية أو ضوئية تسمح باختيار تردد محدد مثل : شبكة انعراج ، مرنان فابري-بيرو ، موشور . بحيث يمكن وضع هذه العناصر اما داخل المرنان أو في حالة استخدام شبكة انعراج التي يمكن وضعها بدلاً من المرآة العاكسة كلياً للمرنان وبذلك يمكن تحديد التردد المرغوب فيه من خلال عملية تدوير شبكة الانعراج .

ويبين الجدول (٦-١٣) بعض خصائص الأشعة الصادرة عن الليزرات الصباغية.

	ليزر صباغي-مستمر	ليزر صباغي-ذو مصابح وميضية	ليزر صباغي-نانوثانية	الواحدة
طول الموجة	٣٩٠ ... ١٠١٠	١٠٠٠ ... ٣٣٥	١٢٨٥ ... ٣٢٠	*nm*
عرض الخطوط	$١٠^{١٢}$	$١٠^{١٣}$ ... $١٠^{١٢}$	$١٠^{١٣}$ ... $١٠^{١٢}$	*Hz*
استطاعة الخرج	١ ... ٠،١	$(٠،٠١-١).١٠^{٦}$	$(٠,١-١).١٠^{٦}$	*W*
طاقة النبضة	-	١ ... ٠،١	$(٠،١-١٠٠).١٠^{-٣}$	*J*
زمن النبضة	-	$(٠،٣-٣).١٠^{٣}$	٢٠ ... ٥	*ns*
درجة المردود	٢٠ ... ٥	٠،٥	٢٠ ... ٥	*%*

الجدول (٦- ١٣) خصائص أشعة الليزرات الصباغية

٦-٦- أنواع أخرى من الليزرات :

بالإضافة إلى الأنواع السابقة والمختلفة من الليزرات هناك أيضاً أنواع جديدة بدأت تأخذ أهمية متزايدة في مجالات متعددة وذلك لأنها تكمل الليزرات السابقة من

حيث إصدارها لأشعة ليزرية ذات أطوال موجية مختلفة بحيث تغطي مجالات محددة من الطيف الكهرطيسي كما هو الحال بالنسبة لليزرات المراكز الملونة أو ليزرات البلازما أو من حيث الاستطاعات والتقنيات المختلفة التي يمكن استخدامها في هذه الليـزرات كما هو الحال في الليزرات الكيميائية أو ليزرات الإلكترونات الحـرة ومـن هـذه الليزرات :

٦-١-٦- ليزر المراكز الملونة *(Dye-Center-Laser)* :

يكون الوسط الليزري الفعال في هذه الليزرات علـى شـكل بلـورات ذات خصائص قلوية وتحتوي ضمن تركيبها على مراكز ملونة وبأشـكال مختلفـة مثـل: $[F, F_A(II), F_B(II), F_٢^+, F_٣^+, ...]$. وتكمن سلبية هذه الليزرات في أن المراكـز الملونة تتفكك عند ارتفاع درجة الحرارة ولا تكون ثابتة أومستقرة الاّ عند درجـات الحرارة المنخفضة $(T = ٧٧\ K)$ لذلك من الضروري جداً تبريد البلورات تبريداً دائماً.

أما خصائصها الإيجابية فتتمثّل في أن استطاعة الأشعة الصادرة عنها تكون عالية نسبياً في مجال ماتحت الأحمر القريب وفي أغلب الأحيان تكون أعلى مـن اسـتطاعة ليزرات أنصاف النواقل في هذا المجال . كما أنّ المراكز الملونة تتميز بطيـف اصـدار فلورة عريض مما يسمح بالحصول على أشعة ليزرية ذات خصائص جيدة من ناحيـة الحصول على طول موجة محددة أو بالنسبة لسهولة عمل الليزر وفق نمط واحد .

وتحدث عملية الضخ في هذه الليزرات عند عملها بشكل مستمر بواسطة الضخ الضوئي باستخدام ليزرات أخرى مثل ليزر نيوديميوم-ياغ ، ليزرات الشوارد الغازيـة والليزرات الصباغية . أما عند عمل الليزر بشكل نبضي فتستخدم في هـذه الحالـة مصابيح توهجية أو الإكسيمر-ليزر .

وتقع الأشعة الصادرة عن هذه الليـزرات ضـمن المجـال $(\lambda = ١ - ٤\ \mu m)$ وباستطاعات مختلفة تتراوح قيمتها من $(\quad)\ ٠،١W$ حتى تبلغ عدة واطات . و يبين

الجدول (٦- ١٤) خصائص بعض هذه الليزرات .

البلورة المضيفة نوع المركز الملون	*KCl:Li* $F_A(II)$	*RbCl:Na* $F_B(II)$	*LiF* F_2^+	*KF* F_2^+	الواحدة
ليزر الضخ	ليزر Ar^+, Kr^+	ليزر Kr^+	ليزر Kr^+	*Nd-YAG*	
طول موجة الضخ	٥٣٠،٦٤٧،٥١٤	٦٤٧،٦٧٧	٦٤٧	١٠٦٤	*nm*
استطاعة عتبة الضخ	١٣	٢٦	٩٠	١٢٠	*mW*
استطاعة الخرج	٢٤٠	٦	١٧٠٠	٣١٠	*mW*
درجة المردود	٢،١.....٢،٩	٢،٥.....٢،٩	٠،٨.....١،٠	١،٢٦....١،٤٨	%

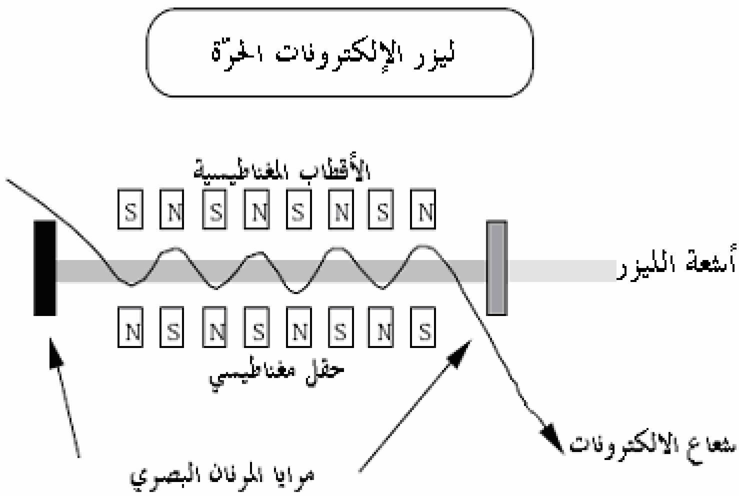
الجدول (١٤) يبين عدداً من ليزرات المراكز الملونة مع بعض خصائصها

٦-٦-٢- ليزر الإلكترون الحر *(Free-electron-Laser)*:

لقد جرى تشغيل أول ليزر يعتمد على إلكترونات حرة في العالم عام ١٩٧٧ ، وكان يصدر ضوءاً في مجال الأشعة ماتحت الحمراء بطول موجة *nm* ٣٤٠٠ ولقد أُطلق على هذه الليزرات اسم ليزرات الإلكترونات الحرة لأنها تصدر أشعة كهرطيسية مترابطة ومتشابهة في خصائصها للأشعة الليزرية التقليدية ولكنها بدلاً من الاعتماد على عملية الإصدار القسري الصادر عن الذرات أو الجزيئات فإنها تولّد الضوء من حزمة من الإلكترونات المسرعة .

يتألف الوسط الليزري الفعال في ليزرات الإلكترونات الحرة من شعاع من الإلكترونات ذات طاقة عالية جداً (والذي يتألف من مجموعة من الرزم تحوي

الواحدة على $١٠^{١٠}$ إلكترون) و يسير عبر مجموعة من الحقول المغناطيـسية المـتغيرة بانتظام (الدورية) تعمل على تعديل وتحديد مسار الإلكترونات مما يجعلها تتذبذب في سيرها فتغير إتجاهها بحيث تؤدي إلى عملية اصدار للأشعة الكهرطيسية عـن طريـق تحول الطاقة الحركية للإلكترونات إلى طاقة كهرطيسية على شكل أمـواج ضـوئية وذلك بسبب تباطؤ حركة الإلكترونات ضمن مجال الحقول المغناطيسية (مبدأ الفرملة المغناطيسية) والتي يمكن توليدها بواسطة مغانط كبيرة تتوضع أقطابها بشكل متناوب بين الأقطاب الشمالية والأقطاب الجنوبية مما يجعل مسار الإلكترونات علـى شـكل منحنٍ كما هو موضح في الشكل (**٦ - ١٨**).



الشكل (٦ - ١٨) مخطط ليزر الإلكترونات الحرّة

لكن الإشعاع الناتج عن هذه العملية مؤلف من مجموعة من الأطوال الموجية .
ولجعل الإلكترونات تشع طاقتها بشكل متسق مع بعضها البعض لابد من أن تكـون طاقتها متساوية مع بعضها البعض وذات تعريض طيفي صغير جداً وكذلك أن تكون كثافتها كبيرة ، وعندما يسير شعاع الإلكترونات عبر مجموعة من الحقول المغناطيسية المتغيرة بانتظام فسوف يتحرك كل إلكترون بشكل متسق مع الإشعاع السنكروتروني

للإلكترون المجاور ، وهكذا بعد مسار من عدة أمتار سوف تتراكم دفقات الإشـعاع بدلاً أن يفني بعضها البعض لتعطي حزمة مترابطة من الإشعاع المُضخم .

كما يمكن التحكم في طول موجة الإشعاع الصادر عن شعاع الإلكترونات من خلال تعديل طاقة الإلكترونات .

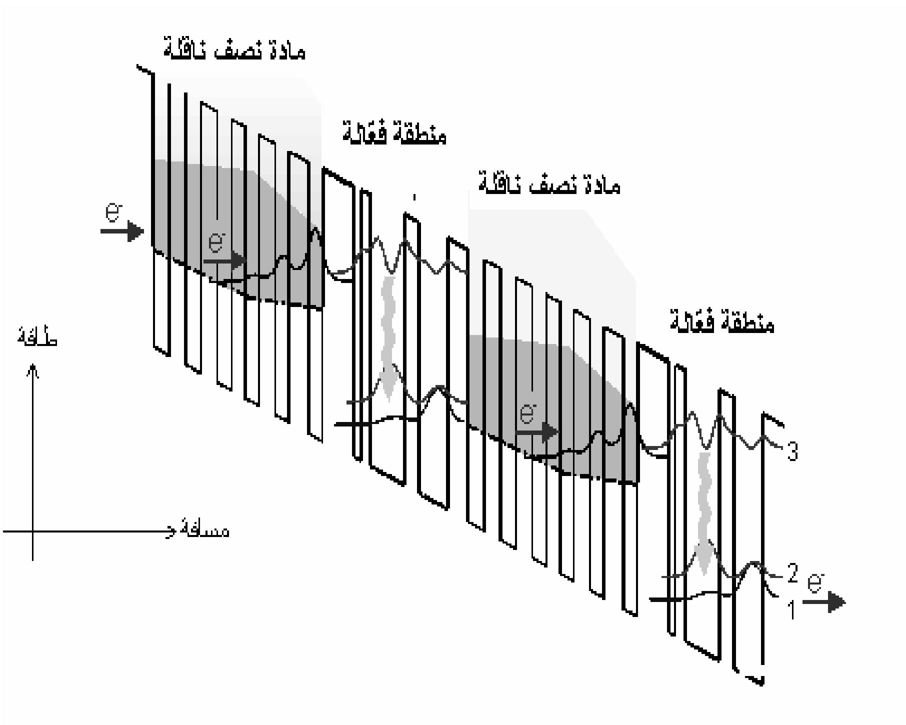
٦-٦-٣- ليزرات الشلال الكمومي *(quantum-cascade-Laser)* :

يعتمد ليزر الشلال الكمومي على مبدأ مختلف عن مبدأ الليزرات العادية وهـو يعتبر نوعاً خاصاً من ليزرات أنصاف النواقل ويستخدم ليزر الشلال الكمومي نوعـاً واحداً من حاملات الشحنة ، هي الإلكترونات ولذلك يدعى أحياناً الليزر أحـادي القطبية *(unipolar Laser)* وتتميز هذه الليزرات بأن استطاعتها أكبر من اسـتطاعة ليزرات أنصاف النواقل التي تصدر أشعة ليزرية عند نفس طول الموجة وذلك لأن كل إلكترون في ليزر الشلال الكمومي يصدر فوتونات عديدة بدلاً من فوتون واحد. ومن حيث المبدأ فانه يعمل كالشلال الإلكتروني ، فالإلكترونات تهبط بـشكل متعاقـب بسلسلة من خطوات الطاقة المتماثلة مصدرة فوتوناً ، ويعمل الأثر الشلالي هذا كمـا يلي : بعد أن يصدر الإلكترون الموجود داخل ديود نصف ناقل فوتوناً نتيجة الانتقال بين المادتين نصف الناقلتين *(p)* و *(n)* فانه لايفنى نتيجة الاتحاد بثقب كما هو الحـال في ليزرات أنصاف النواقل وإنما يتابع انتقاله إلى المرحلة الثانية ليقوم بانتقال آخر بين المادتين نصف الناقلتين ليصدر فوتوناً ثانياً ثم انتقال ثالث و رابع ...... ومن ثم تتإلى الانتقالات وذلك على اعتبار أن بنية الشلال الكمومي تتألف من عدد كبير جداً مـن طبقات أنصاف النواقل ذات فرجات عـصابية عاليـة ومنخفـضة والـتي تـسمح للإلكترونات بالانتقال من طبقة إلى التي تليها وهكذا .

وفي هذه الليزرات لاتهبط الإلكترونات في عصابة التكافؤ بل انها تصدر فوتوناً بعد عملية الانتقال من سوية طاقة منفصلة عالية في عصابة الناقلية إلى سوية أخفـض منها تقع أيضاً في عصابة الناقلية .

كما أنّ ثخانة كل طبقة تكون صغيرة جداً ولاتتجاوز ثخانة بضع ذرات فقط ، وفي أغلب الأحيان تتألف الفرجة العصابية المنخفضة من زرنيخيد الغاليوم (*GaAs*) بينما تكون المادة ذات الفرجة العصابية العالية عبارة عن Al_xGal-_xAs وتتوضع على جانبي المادة ذات الفرجة العصابية المنخفضة . ويمكن تشكيل مثل هذه البنية المؤلفة من عدة طبقات بدقة فائقة تصل إلى أبعاد ذرية وذلك باستخدام تقنية التنضيد بالحزمة الجزيئية.

إن ليزر الشلال الكمومي هو سلسلة من آبار الكمون المستقلة ولقد جمعت معاً لتصنع وحدات فعالة . فإذا جعلت حواجز المادة Al_xGal-_xAs رقيقة بما فيه الكفاية ، فباستطاعة الإلكترون أن يعبر من وحدة فعالة إلى الأخرى . وفي كل مرة يقوم فيها الإلكترون بذلك يهبط إلى مستوى طاقة أخفض ويعطي الفرق في الطاقة على شكل إصدار فوتون ضوئي كما هو موضح في الشكل (٦ – ١٩) .



الشكل (٦ - ١٩) مخطط سويات الطاقة في ليزر الشلال الكمومي

وعند تصميم ملائم لثخانة وتركيب الطبقات في الوحـدات الفعالـة يمكـن الحصول على ليزرات الشلال الكمومي بحيث تصدر أشعة ليزرية عند أي طول موجي وفي مجال واسع للأطوال الموجية المختلفة تبدأ من منطقة منتصف ماتحت الأحمر نزولاً حتى منطقة المجال التراهرتزي . وتستطيع ليزرات الشلال الكمومي أن تحتوي على مائة وحدة فعالة مكدسة فوق بعضها البعض .

ولقد اخترع العلماء فدريكو كاباسو ، كلير غماشل وزملاؤهم ليزر الشلال الكمومي عام **١٩٩٤** ، وكان تردد هذا الليزر (*THz* ٧١) ويقع في منتصف ماتحت الأحمر ومنذ ذلك الحين بدأت عملية تصنيع ليزرات الشلال الكمومي تصدر ضـوءاً يقع تردده في مجال بين منتصف ماتحت الأحمر وحتى ترددات تـصل إلى (*THz* ١٢,٥) وتعمل عند درجة حرارة الغرفة .

٦-٦-٤- ليزر الذرة المفردة *(single-atom Laser)* :

كنا قد وجدنا أنّ عمل الليزرات العادية يستند على المبدأ نفسه الذي يـتلخص في عمل عدد هائل جداً من الذرات أو الجزيئات التي يتراوح عددها مابين عدة ملايين وعدة آلاف الملايين مع بعضها البعض لإعطاء شعاعاً ليزرياً أحادي اللون وذي شدة شعاع ليزري عالية وكنا قد درسنا ذلك بالتفصيل في الفصول السابقة .

ولكن نتيجة للجهود الحثيثة لعلماء الليزر استطاعوا تطوير نوع من الليـزرات الذي يعتمد مبدأ عمله على عدد محدود وصغير جداً من الذرات حتى وصل الأمر إلى استخدام ذرة واحدة فقط.

والجدول التالي (**٦- ١٥**) يوضح المقارنة بين بعض الليزرات التي درسناها سابقاً وليزر الذرة المفردة من حيث طول المرنان (التجويفة الرنانـة) ، عـدد الـذرات

والاستطاعة الناتجة عن عمل الليزر .

نوع الليزر	هليوم-نيون	نيوديميوم-ياغ	نصف ناقل	ذرة مفردة
طول المرنان	٢٠ – ١٠٠ cm	٥ – ١٥ cm	٢ - ٥ μm	١ mm
عدد الذرات	$١٠^{١٦}$	$١٠^{١٩}$	$١٠^{٦}$ (إلكترون-ثقب)	ذرة واحدة
الاستطاعة(واط)	٠,٠٠١	١,٠	٠,٠٠٠١	$١٠^{-١٢}$

الجدول (٦- ١٥) مقارنة بين ليزر الذرة المفردة وبعض الليزرات الأخرى

كما أن ليزر الذرة المفردة يعمل بطريقة مختلفة من أجل تضخيم الضوء والتي تعتمد على مبدأ اهتزاز رابي المكمم ***(quantized Rabi oscillation)*** والذي يعرف على أنه التغير الدوري في تبادل الطاقة بين حقل الإشعاع الكهرطيسي الخارجي وبين الذرات، حيث يلاحظ أنه عند تعريض ذرة أو عدد من الذرات لموجات كهرطيسية مؤلفة من تردد مناسب ومحدد فان الذرات الموجودة في السوية الأساسية تنتقل إلى سويات مثارة بعد امتصاصها لطاقة الحقل الخارجي ويحدث هذا الامتصاص بسبب التوافق بين تردد فوتونات الحقل والفرق بين سويتي الطاقة في الذرة وعندما تصل الذرة أو مجموعة الذرات إلى الحالة المثارة لايعود بإمكانها امتصاص المزيد من الطاقة من الحقل ، وهنا تبدأ العملية بالانعكاس حيث مع استمرار الإشعاع تبدأ الذرات بإصدار طاقتها وإعطائها إلى الحقل الخارجي ، لتعود بعد ذلك إلى السوية الأساسية وهكذا تتكرر العملية من جديد من خلال امتصاص الطاقة من الحقل .

إن ليزر الذرة المفردة يعتبر النسخة الضوئية للمازر الميكروي حيث تتدفق الذرات المثارة بشكل متعاقب إلى مرنان صغير جداً ، ثم تصدر هذه الذرات فوتونات في مجال الضوء ماتحت الأحمر القريب من الطيف الكهرطيسي . فعندما تصدر الذرة الفوتون الأول في المرنان بسبب اهتزاز رابي المكمم يحدث بعد ذلك تضخيم للضوء من

خلال استمرارية اهتزاز رابي المكمم ، ومع تزايد عدد الفوتونات في المرنـان سـوف يزداد احتمال اصدار الذرة التي تمر عبر المرنان لفوتون آخر ، وهذه الطريقة مـشابهة لعملية الإصدار القسري في الليزرات التقليدية .

كما يعتمد بناء ليزر الذرة المفردة على تصميم مرنان ضـوئي يمتلـك ميـزة الاحتفاظ بالفوتون داخله لفترة زمنية طويلة نسبياً قبل أن يمتص من قبل مرآيا المرنان أو أن ينعكس مغادراً المرنان . لذلك يستعمل نوع من المرنان يدعى المرنان الفـائق ، والذي يتألف من مرآتين مضبوطتين تماماً وتمتلك كل منهما قدرة انعكاس كبيرة جداً تصل إلى *(% ٩٩،٩٩٩)* .

كما أن عملية انتقاء نوع الذرة المناسب التي ستوضع داخل المرنـان يتوافـق بصعوبة بالغة لأنه يجب اختيار ذرة تمتلك سويتي طاقة مناسبين بحيث يكـون معـدل الإصدار العفوي بينهما صغيراً ، ولهذا السبب تم اختيار ذرات الباريوم الـتي تـصدر ضوءاً عند طول موجة يبلغ *(nm ٧٩١)* عند انتقالها من السوية المثـارة إلى الـسوية الأساسية . ويمكن تحضير هذه الذرات من خلال عملية تبخير لمعدن الباريوم داخـل فرن بعد ذلك توجه ذرات البخار الناتجة إلى داخل المرنان ، وبما أنّ حجم المرنان صغير جداً وكثافة حزمة الذرات الناتجة عن البخار أيضاً صغيرة لذلك لايتواجد أكثر من ذرة باريوم داخل المرنان .

ومن أجل إثارة ذرات الباريوم قبل دخولها إلى المرنان تعريض لتـأثير حزمـة ضوئية صادرة عن ليزر ياقوت التيتانيوم عادي يتم توليفه بدقة بحيث يـثير الـذرات الموجودة في السوية الأساسية إلى السوية المثارة .

٦-٧- ليزرات الأشعة السينية : *X-Ray Laser*

بعد أن تم الحصول على ليزرات تعمل في المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي انطلقت الأبحاث لتجاوز هذا المجال بهدف الحصول على منابع للأشـعة الـسينية ،

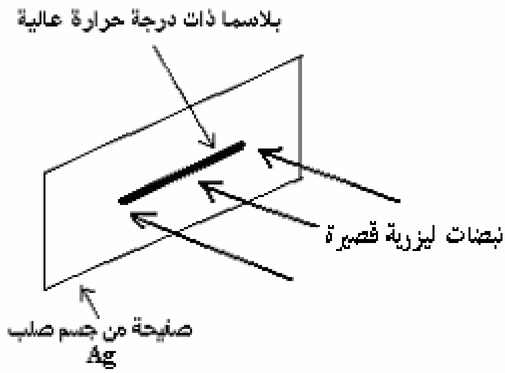
والتي تصدر ضوءاً مترابطاً ، وتعمل وفقاً لمبدأ الليزرات . ولكن بما أن طول موجة الأشعة السينية قصير فيتطلب ذلك الحصول على حالة انعكاس في إسكان سويات الطاقة بين سويات ذات فرق كبير جداً في طاقاتها . ولكن في هذه الحالة سوف يزداد احتمال الانتقال العفوي باعتبار أنه يتناسب طرداً مع القوة الثالثة لتردد الإصدار $(A_{21} \sim \upsilon^3)$، وهذا يتطلب بالنتيجة طاقات ضخ ذات شدات عالية جداً .

ومن جهة أخرى فإنه لاتوجد مرنانات ملائمة لعمل هذه الليزرات ، كما أنه لايمكن حدوث عبورات متكررة ضمن الوسط الليزري الفعال ، وإنما على الأغلب مرور واحد ، وهذا يؤدي إلى قصر زمن الربح . ولتجاوز هذه الصعوبات تقنياً وبالتالي زيادة نسبة الربح يجب وضع مرايا المرنان بالقرب من الوسط الليزري الفعال ، ولكن يؤدي ذلك إلى تخريب المرآيا بسبب الشدة العالية للأشعة السينية الصادرة .

وبالرغم من كل هذه الصعوبات استطاع الباحثون في عام **١٩٨٥** تحقيق فعل الليزرة في مجال الأشعة السينية اللينة ***(XUV)*** ، وذلك كنتيجة لعملية تضخيم الإصدار العفوي ***(Amplified Spontaneous Emission) (ASE)*** .

ومنذ ذلك الحين فُتح المجال واسعاً لتطوير عددٍ من منابع الأشعة الليزرية التي تعمل في مجال الأشعة السينية من الطيف الكهرطيسي ، والتي تعمل وفقاً لطرق مختلفة ، مثل ليزرات الأشعة السينية التي تعتمد على الإثارة بواسطة التصادمات العابرة ، أو الليزرات التي تعتمد على إعادة ارتباط الإلكترونات الحرة بالسويات الخارجية المثارة ، ولكن في أغلب ليزرات الأشعة السينية تستخدم أوساط تضخيم مؤلفة من بلازما عالية التشرد ، والتي يتم الحصول عليها بواسطة تعريض سطح صفيحة ما من جسم صلب لنبضات ليزرية ذات شدات كبيرة . وفي هذه الحالة يتم التحكم بهذه العملية بحيث نحصل على بلازما اسطوانية الشكل (على شكل خيط دقيق) ، وفي هذه الطريقة تنتزع أشعة الليزر ذرات الجسم الصلب من الطبقات السطحية للجسم الصلب وتشردها ، مولّدة بذلك بلازما ذات درجة حرارة عالية جداً ، وذات كثافة إلكترونية

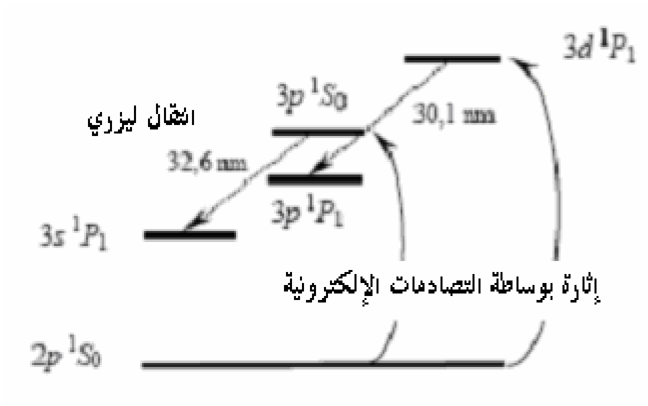
تتناقص كلما ابتعدنا عن سطح الجسم الصلب ، والشكل (**٦-٢٠**)يوضح هذه العملية .



الشكل (٦-٢٠)

وفي حالة ليزرات الأشعة السينية التي تعتمد على الإثارة بواسطة التصادمات العابرة فلقد تم في عام **١٩٩٣** الحصول على أول ليزر يعمل وفقاً لهذه الطريقة ، وذلك من شوارد التيتانيوم (Ti^{+12}) ، والتي توجد في سوية طاقة مستقرة وشبيهة بذرة النيون ، ولذلك يطلق عليها تسمية شوارد التيتانيوم الشبيهة بالنيون ويرمز لها $([He]-Ti)$ ، وتمتلك شاردة التيتانيوم عشرة إلكترونات مرتبطة بينما انتزعت الإلكترونات الإثنا عشرة الأخرى من ذرة التيتانيوم بعد عملية التشرد .

والشكل (**٦-٢١**) يوضح الانتقالات بين سويات الطاقة في شاردة التيتانيوم باعتبارها تمثّل الوسط الليزري الفعال في ليزر للأشعة السينية .



الشكل (٦-٢١)

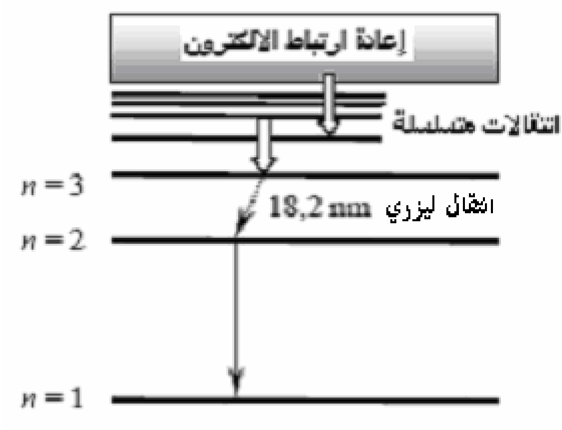
كما أن عملية الضخ في هذه الليزرات تتم على عدة مراحل : ففي المرحلة الأولى يتم توليد البلازما من شوارد التيتانيوم الشبيهة بالنيون ، بينما في المرحلة الثانية تثار هذه الشوارد للحصول على حالة انعكاس بين السويات التي تساهم في الانتقالات الليزرية مثل الانتقال $(3P \to 3S)$.

لذلك تستخدم نبضات ليزرية قصيرة من مرتبة نانوثانية ***ns*** لتوليد البلازما الأولية والمكونة من عدد كبير من شوارد التيتانيوم ***(Ti***$^{+12}$***)*** (والتي هي مشردة **١٢** مرة مقارنة بالنيون) ، ولكن لاتساهم النبضات الليزرية في تشغيل أو بدء عملية الليزرة . وبعد ذلك تسخن البلازما الناتجة إلى درجات حرارة عالية جداً بواسطة نبضة ليزرية أخرى من مرتبة بيكوثانية ***ps*** ، والتي يجب أن تكون أقصر بكثير من زمن الاسترخاءات الداخلية للبلازما . ومن ثم تؤدي التصادمات الإلكترونية في هذه البلازما الساخنة إلى حالة انعكاس يتبعها انتقالات ليزرية تعطي أشعة ذات طول موجة ***nm*** ٣٢،٦٥ الموافقة لانتقال $(3P \to 3S)$.

كما أن هناك طريقة أخرى تعتمد على توليد البلازما الساخنة بتقنية التشرد النفقي أو الأنبوبي ***(Tunnel Ionization)*** ، وذلك بوساطة نبضة ليزرية قصيرة جداً من مرتبة فمتوثانية ***fs*** وذات طاقة عالية جداً ، وتدعى هذه الطريقة التشرد بحقل ضوئي

(Optical Field Ionization)(OFI) . وعند رفع كثافة إلكترونات البلازمـا إلى قـيم كبيرة مع المحافظة على درجة حرارة منخفضة للإلكترونات عندها تصبح عملية إعادة ارتباط الإلكترونات بالسويات الخارجية المثارة أكثر احتمالاً ، وبذلك يتم الحـصول على حالة الانعكاس ، ومن ثم الانتقالات الليزرية المرغوبة، والشكل (**٦-٢٢**) يوضح هذه العملية .

وبالإضافة إلى ما سبق يمكن توليد البلازما كوسط ليـزري فعـال بوسـاطة الانفراغ الكهربائي ، فعلى سبيل المثال تستخدم شوارد الأرغون بصفتها بلازما علـى شكل أنبوب يمكن أن يصل طوله حتى ٣٥ *cm* وقطره بين ٤ – ١.٥ *mm* .



الشكل (٦-٢٢)

وعند استخدام طريقة الانفراغ الكهربائي بالتوازي مع عملية تسخين البلازمـا بوساطة نبضات ليزرية قصيرة من مرتبة بيكوثانية *ps* يمكن الحصول في هذه الحالـة على أشعة ليزرية ذات أطوال موجة قصيرة .

والجدول التالي يبين طول موجة بعض ليزرات الأشعة السينية ، ونوعية الشوارد المُستخدمة كبلازما ، وكذلك الانتقال بين السويات الموافقة للأطوال الموجية الناتجة.

نوع الشاردة	***طول الموجة*** (nm)	***نوع الانتقال***

$Si^{+١١}$	٨،٧٣	$5d \rightarrow 3p$
$Al^{+١٠}$	١٠،٥٧	$5f \rightarrow 3d$
$Al^{+٩}$	١٢،٣٥	$5d \rightarrow 3p$
$Ag^{+٣٧}$	٩،٩٣	$3p \rightarrow 3s$
$Mo^{+٣٢}$	١٣،٢٧	$3p \rightarrow 3s$
$Y^{+٢٩}$	١٥،٥٠	$3p \rightarrow 3s$
$Sr^{+٢٨}$	١٦،٤١	$3p \rightarrow 3s$
$Se^{+٢٤}$	١٦،٨٦	$3p \rightarrow 3s$
$Se^{+٢٤}$	٢٠،٩٧	$3p \rightarrow 3s$

نوع الشاردة	طول الموجة (nm)	نوع الانتقال
$Se^{+٢٤}$	٢٢،٢٩	$3p \rightarrow 3s$
$Ti^{+١٢}$	٣٢،٦٥	$3p \rightarrow 3s$
$Ar^{+٨}$	٤٦،٩٠	$3p \rightarrow 3s$
$Xe^{+٢٦}$	٩،٩٨	$4d \rightarrow 4p$
$Ag^{+١٩}$	١٣،٩٠	$4d \rightarrow 4p$
$Mo^{+١٤}$	١٨،٩٠	$4d \rightarrow 4p$

وتمثل الطرق السابقة جميعها هدفاً هاماً للأبحاث الحديثة ضمن مجال ليـزرات الأشعة السينية ، والتي تتنافس مع منابع الأشعة السينكروترونية التقليديـة وليـزرات الإلكترون الحر ، ومع طريقة مضاعفة الترددات من ليزرات الجسم الصلب . ولكـن تكمن أهمية هذه المنافسة ليس في الاستطاعة الوسطية التي تعطيها هذه المنابع فقـط ، وإنما كثافة الطاقة العالية والخصائص المميزة لهذه الأشعة وكذلك تنـاقص التعـريض الطيفي والتي تجعل ليزرات الأشعة السينية تتفوق أحياناً على منافساتها .

كما أن مجالات استخدام ليزرات الأشعة السينية يأخذ أهميته من قـدرة هـذه الأشعة على النفوذية العميقة داخل المواد بالإضافة إلى تميزها بخاصية ترابط كـبيرة . ومن هنا تأتي أهمية استخدامها في التصوير الثلاثي الأبعاد للأجسام ، وخاصة في العلوم البيولوجية ، أو أبحاث بنية المواد أو تداخل الأشعة السينية .

وفيما يلي المواصفات النموذجية لليزرات الأشعة السينية :

طول الموجة	$\lambda = 3,56 - 46,9\ nm$
احتمال الانتقال الليزري	$10^{11} / s$
عمر السوية الليزرية العليا	$\tau = 10^{-11}\ s$
مساحة مقطع عملية الإصدار القسري	$\sigma_{SE} = 10^{-19} - 10^{-20}\ m^2$
تعريض الخط الطيفي لعملية الإصدار العفوي	$\Delta \upsilon = 1 - 5 \cdot 10^{12} / s$
كثافة انعكاس إسكان سويات الطاقة	$\Delta N = 10^{20} - 10^{21} / m^3$
معامل التضخيم أو معامل الربح	$\gamma_0 = 400 / m$
كثافة الغاز	$10^{25} - 10^{26}\ ions / m^3$
طريقة الضخ	بلازما سريعة الانفراغ أو بلازما مولدة ليزرياً
درجة حرارة الإلكترونات	$100 - 1000\ eV$
درجة حرارة البلازما	$100 - 500\ eV$
طريقة العمل	نبضي
طاقة الخرج	$P_A = 1 - 2\ MW$
النمط	متعدد الإنماط

٦-٨- الليزرات النبضية: *(Pulsed Laser)*

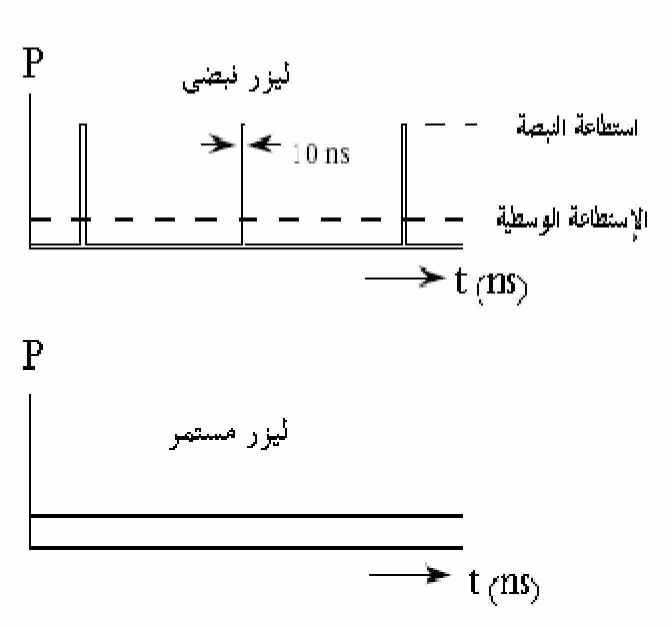
إن العدد الكبير من الليزرات الـتي درسناها ، هو من النوع الـذي يـضخ

بشكل قوي ومستمر بحيث أن حالة انعكاس إسكان سويات الطاقة تبقى محققة مـع وجود عمليات الإصدار القسري أو الإصدار العفوي ، وهذا النوع مـن الليـزرات يدعى الليزر المستمر ***(Continuous Wave Laser)*** ويرمز له اختصاراً ***(CW-Laser)***.

ومن جهة أخرى يمكن أن تمتلك السويات الليزرية المثارة عمراً وسطياً صـغيراً وبالتالي فإنها عندما تقوم بعملية الإصدار القسري ويبدأ الليزر بالعمل سـوف تفـرغ السوية المثارة بشكل سريع من إلكتروناتها وفي هذه الحالة يكون شرط انعكاس إسكان سويات الطاقة قد تحقق لفترة قصيرة يعمل خلالها الليزر ونحصل عندها علـى أشـعة ليزرية على شكل نبضة ليزرية قصيرة ومن ثم يتوقف بعدها الليزر عن العمـل وهـذا النوع من الليزرات يدعى الليزرات النبضية ***(Pulsed Laser)*** .

وهناك أنواع من الليزرات التي يمكن أن تعمل وتصدر أشعة بكلتا الطـريقتين : حالة العمل المستمر أو حالة العما النبضي .

إن جميع أنواع االليزرات التي تعمل بشكل مستمر ، تعطي استطاعات تتراوح قيمتها بين بضعة ميللي واط ، كما هو الحال في ليزر الهليوم-نيون ، وعدة كيلـوواط من ليزر النيوديميوم-ياغ أو ليزر ثاني أوكسيد الكربون . ولكن بواسـطة الليـزرات النبضية يمكن أن تبلغ استطاعة النبضة الليزرية قيماً كبيرةً جداً قد تصل إلى ($١٠^{١٢}$ *W*) وهذا مانلاحظه عادة في ليزرات الجسم الصلب التي تعمل بشكل نبضي ، وهذه القيمة للاستطاعة هائلة جداً حيث تعادل ماتنتجه محطات توليد الكهرباء مـن الاسـتطاعة الكهربائية على الكرة الأرضية بكاملها ولكن الفرق بينها هـو أن محطـات الطاقـة الكهربائية تنتج هذه الاستطاعة بشكل مستمر بينما في حالة الليزرات النبضية تعطـى هذه الاستطاعة في زمن قصير جداً يبلغ ($١٠^{-١٢}$ *sec*) . والشكل **(٦ - ٢٣)** يوضـح الفرق بين الليزر النبضي والليزر المستمر .



الشكل (٦ - ٢٣)

٦-٨-١- التشغيل النبضي :

تعتبر التقنية المستخدمة في هذه الطريقة من أبسط التقنيات في توليد نبـضات ليزرية قصيرة وقوية وهي تعتمد على استخدام منابع ضخ ضوئية تعطي أشعة الـضخ على شكل نبضات . ولهذه التقنية ميزة ايجابية هامة وذلك لأن أشعة الـضخ عنـدما تعمل بشكل نبضي سوف تمتلك استطاعة تفوق بكثير استطاعتها فيما لـو عملـت بشكل مستمر . فعلى سبيل المثال عند استخدام أشعة ضخ من مصباح الزينون تكون استطاعتها في حالة العمل بشكل مستمر W ١٠^٣ في حين تصل قيمة الاسـتطاعة في حالة العمل النبضي إلى W ١٠^٦ وعند ازدياد استطاعة أشعة الـضخ سـوف تـزداد استطاعة الخرج الليزرية . ويمكن شرح آلية عمل هذه الطريقة بأنه عنـد اسـتخدام مصباح الزينون النبضي كمنبع للضخ في ليزر الياقوت سوف تزداد شدة الأشعة بسرعة كبيرة بعد تشغيل المصباح مباشرةً حتى تبلغ شدتها العظمى ثمّ تتخامد بعد ذلك بثابت زمني مقداره sec ١،٥ . وخلال ذلك سوف تثار شوارد الكروم الثلاثيـة في بلـورة

الياقوت إلى السوية الليزرية العليا , وبما أنّ هذه السوية في شوارد الكروم تمتلك عمراً قدره $3{,}10^{-3}$ *sec* مما يساعد على ازدياد عدد الشوارد المثارة مع تزايد تـأثير أشـعة الضخ . وعندما يتحقق الشرط $G.V > 1$ أي عندما يصبح الربح أكبر من الخسارة يبدأ الليزر بالعمل وتزداد استطاعة أشعة الليزر بشكل كبير جداً .

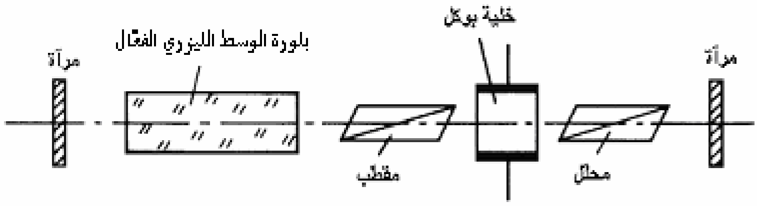
وقد يلاحظ في هذه الحالة أن قيم الاستطاعة تزداد وتتناقص لتأخذ شكل قمم متتالية بسبب ظاهرة التوالد النتوئي *(Spiking)* والتي تلاحظ عادة في ليزرات الجسم الصلب بعد بدء الليزر بالعمل مباشرةً .

كما يمكن شرح أو وصف هذه الطريقة باستخدام معادلات النـسبة التابعـة للزمن بأنه بعد تشغيل أشعة الضخ الضوئي تزداد قيمة حالة الانعكـاس في إسـكان سويات الطاقة n لتصبح قيمتها أكبر منها عند حالة التوازن أو حالة العمـل المـستقر لليزر n_s وذلك لأن استطاعة الليزر P تكون قيمتها في هذه المرحلة صغيرة , وعندما تصل حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة إلى القيمة $n > n_s$ يـصبح معامـل التضخيم أكبر من الواحد فتزداد عندها الاستطاعة بشكل أسي لتتجاوز قيمتها عنـد حالة التوازن وبعد ذلك تنهار حالة الانعكاس في إسكان سويات الطاقة لتصبح $n < n_s$ مما يؤدي إلى توقّف حقل الإشعاع الليزري وهكذا تتكرر هذه العملية بشكل متتالٍ لنحصل في كل مرة على نبضة ليزرية ذات استطاعة كبيرة .

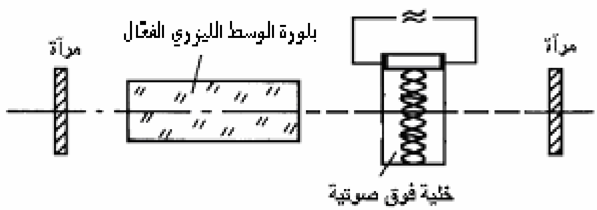
٦-٨-٢- تعديل معامل جودة المرنان (المفتاح – Q):

تعتمد هذه الطريقة على مبدأ تخزين طاقة الضخ في الوسط الليزري الفعال ومن ثمّ تفريغ هذه الطاقة بشكل صاعق على شكل نبضة ليزرية قـصيرة وذات اسـتطاعة عالية جداً .

كما يتم في هذه التقنية الغاء دور إحدى مرآتي المرنـان وذلـك باسـتخدام بلـورة كهرضوئية (خلية بوكل) مع مقطّب أو باستخدام خلية فوق صـوتية كمـا هـو موضح بالشكل (**٦ - ٢٤**).



(أ) تعديل المفتاح- Q باستخدام خلية بوكل



(ب) تعديل المفتاح- Q باستخدام خلية فوق صوتية

الشكل (٦ - ٢٤)

فعند تطبيق جهد كهربائي على هذه البلورة سوف تتغير نفوذيتها للـضوء ***T*** (كما هو الحال في خلية بوكل ***Pockel Cell***) وهذا يؤدي بالنتيجة إلى أن التغذيـة العكسية داخل المرنان (أو عملية الترابط العكسي) لم تعد موجودة وبالتالي لايمكـن أن يتشكّل أي حقل إشعاع ضمن المرنان ، لأنه عند غياب إحدى مرآتي المرنان يفقد المرنان وظيفته إذ لايمكن لليزر أن يعمل . وفي هذه المرحلة تستمر أشعة الضخ الضوئي في إثارة الوسط الليزري الفعال (شوارد الكروم في بلورة الياقوت مثلاً) وانتقالها إلى السوية الليزرية العليا , كما تزداد قيمة معامل التضخيم ***G*** لتتجاوز قيمته عند حالـة التوازن .

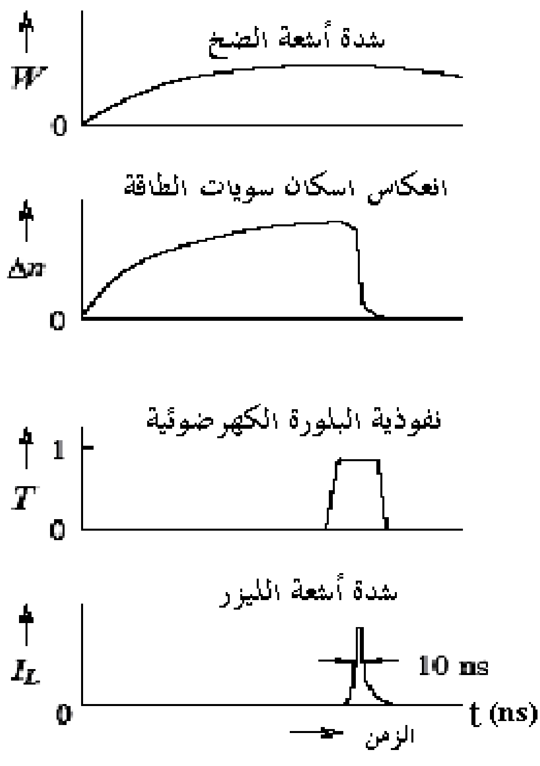
وبعد ذلك عندما تتم إعادة مرآة المرنان إلى العمل من جديد وبسبب تواجـد عملية التضخيم سيتشكّل داخل المرنان حقل اشعاع كثيف وستتحول طاقـة الـضخ المختزنة في الوسط الليزري الفعال (بلورة الياقوت في مثالنا) وفي زمن قصير جـداً بسبب عملية الإصدار القسري إلى طاقة ليزرية تخرج من المرنان على شـكل نبـضة

ليزرية قصيرة وذات استطاعة عالية وخطوات هذه الطريقة مبينة بالشكل (**٦ - ٢٥**).

إذاً نلاحظ من هذه الطريقة أن معامل جودة المرنان يتغير كتابع للزمن ولهـذا السبب سميت هذه الطريقة بتعديل معامل جودة المرنان أو ***Q-Switch*** .

ومن أجل زيادة درجة الفعالية لهذه الطريقة يجب استخدام مفتاح تبديل ضوئي سريع وذي خسارة صغيرة في الأشعة .

كما أنه بالإضافة إلى استخدام البلورات الكهرضوئية هناك المفاتيح الميكانيكية والتي تتألف من موشور أو مرايا تتحرك أو تدور حول محور بسرعة دورانية ثابتة .

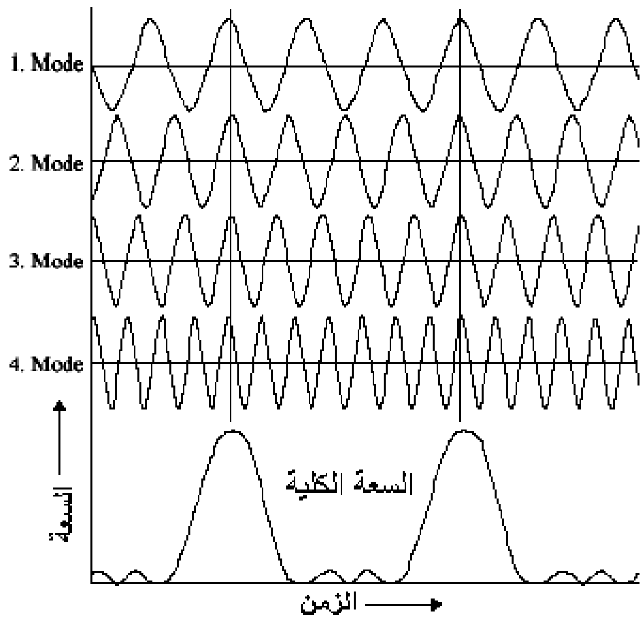


الشكل (٦ ـ ٢٥)

٦-٨-٣- طريقة غلق النمط :

وتعتبر هذه الطريقة من أهم الطرق المستخدمة للحصول على نبضات ليزريـة قصيرة بحيث إنه يمكن توليد نبضات ليزرية من مرتبة بيكو ثانية (*ps*) أو حتى أقـصر من ذلك وذات استطاعة عالية جداً من ليزرات الجسم الصلب والتي لايمكن الحصول عليها باستخدام الطرق السابقة .

وكما هو معلوم أثناء عمل الليزر فإن كل الإنماط الطولية أو العرضية سـوف تهتز معاً . وعندما يعمل الليزر ضمن إنماط عديدة فإن الموجة الناتجة التي نحصل عليها مـن خـرج الليـزر تمثّـل القيمـة العظمـى لتراكـب الأمـواج المختلفـة (*Super Position*) الموافقة لكل نمط من الإنماط كما في الشكل (**٦-٢٦**).



الشكل (٦-٢٦) تغير شدة النبضة الناتجة عن مجوعة من الإنماط ذات الأطوار المختلفة

ولكن يجب التمييز فيما إذا كانت هذه الإنماط تمتلك أطواراً موزعة بـشكل عشوائي أو إذا كانت تمتلك نفس الطور ، وذلك لأن الخرج الليزري سـوف يتغيـر كتابع للزمن وفقاً لعلاقة الطور التي تربط بين هذه الإنماط العديدة .

فإذا كانت الإنماط تمتلك نفس الطور فإن شكل الموجة الناتجة عنـها يكـون عبارة عن دفقات من الأمواج المحددة تماماً . وكلما ازداد عدد الإنماط المـشتركة في ذلك كلّما كان زمن دفقات الأمواج قصيراً وشدتها عالية . وهذه الحالة يمكن تحقيقها ضمن الليزر من خلال وضع عنصر تخامد قابل للتغيير داخل المرنان بحيث يكون نفوذاً أو شفافاً للأشعة بشكل دوري كل : $T = \frac{L}{c}$. حيث تمثل c سرعة الـضوء و L الطول البصري للمرنان ويعطى بالعلاقة : $L = 2n\ell$ وفي هذه الحالة ℓ هي الطـول الهندسي للمرنان و n قرينة الانكسار .

وإذا كان المجال الطيفي الحر للمرنان الذي يمثّل الفاصل الزمني بين تـرددات الإنماط المتتالية يعطى بالعلاقة :

$$\Delta\omega_0 = 2\pi \cdot \upsilon_0 = 2\pi \cdot \frac{c}{L} = 2\pi \cdot \frac{c}{2n\ell}$$

فإن شدة الحقل الكهربائي للموجة الكهرطيسية الموافقة لنمط من الإنمـاط وذلـك عندما تكون مستقطبة خطياً وتنتشر وفق المحور z :

$$E_k(t,z) = E_{0k} \cdot \cos\left(2\pi\upsilon t - \frac{2\pi}{\lambda} z + \phi_k\right)$$

وبما أن الأطوار الموافقة للإنماط المختلفة تتأرجح قيمها بشكل عشوائي فـإن الطور الكلّي الناتج عنها سوف تتأرجح قيمته بين $+\pi$ و $-\pi$ ، وهذا يؤدي إلى تغير استطاعة الخرج الكلية لأشعة الليزر حول قيمة وسطية بشكل كبير كتابع للزمن. ولكن يتغير هذا السلوك كلياً عندما ترتبط جميع الإنماط الليزرية مع بعضها الـبعض بعلاقة طور ثابتة .

وللاستفادة من طريقة غلق النمط لابد من توافر عددٍ من الشروط منها :

- أن يهتز الليزر وفقاً لعدد من الإنماط الطولية مقداره $(2N+1)$ نمطاً .
- أن ترتبط الإنماط مع بعضها بعلاقة طور ثابتة حيث : $\phi_{k+1} - \phi_k = \phi$.
- أن يكون للموجة الكهرطيسية الموافقة لكل الإنماط نفـس شـدة الحقـل

الكهربائي $E_{0k} = E_{0k+1} = E_0$.

- أن يكون الفرق بين ترددات الإنماط مـ ساوياً إلى : $\upsilon_{k+1} - \upsilon_k = \Delta\upsilon_{Mod}$

حيث يكون التردد الأساسي υ_0 هو التردد الموافق للإنتقال الليزري .

وبالتالي فإن شدة الحقل الكهربائي الكلي للأمواج الكهرطيسية هو :

$$E(t,z) = \sum_{k=-N}^{N} E_0 \cdot \cos\left[2\pi(\upsilon_0 + k\cdot\Delta\upsilon_{Mod})t - \frac{2\pi}{\lambda}z + k\cdot\phi\right]$$

$$E(t,z) = A(t)\cdot\cos\left(2\pi\upsilon_0 t - \frac{2\pi}{\lambda}z\right)$$

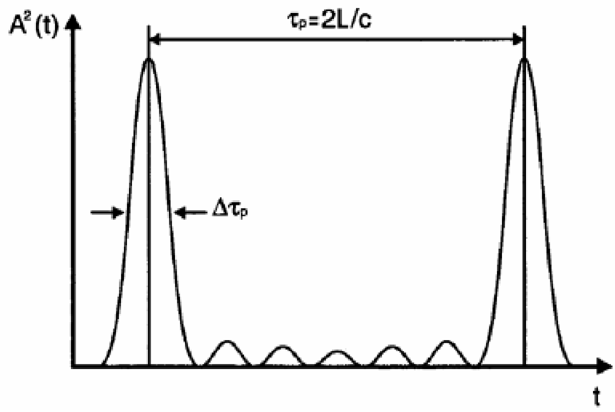
حيث اعتبرنا أن :

$$A(t) = E_0 \frac{\sin\left[(2N+1)\dfrac{2\pi\cdot\Delta\upsilon_{Mod}\cdot t+\phi}{2}\right]}{\sin\left[\dfrac{2\pi\cdot\Delta\upsilon_{Mod}\cdot t+\phi}{2}\right]}$$

وبالتالي فإن استطاعة أشعة الخرج تتناسب طرداً مع مربع شدة الحقل الكهربائي الكلي للإنماط التي يتألف منها أي أنّ :

$$I_p(t) \propto E^2(t,z) = A^2(t)\cdot\cos^2\left(2\pi\cdot\upsilon_0\cdot t - \frac{2\pi}{\lambda}z\right)$$

أي أنّ استطاعة الخرج الموافقة لهذه الموجة الكلية تتناسب طرداً مع $A^2(t)$ والشكل (**٦-٢٧**) يوضح ذلك .



الشكل(٦-٢٧) تغيّر مربع سعة الحقل *A(t)* لمجموعة من الإنماط

وإذا أخذنا بعين الاعتبار شرط علاقة الطور الثابـت أي أن : $\phi_{k+1} - \phi_k = \phi$ فإن الإنماط التي تهتز ضمن المرنان سوف تتداخل مع بعضها البعض لتوليد نبـضات ليزرية قصيرة وبالتالي فإن ذروة النبضة تكون عند اللحظة التي ينعدم فيها مقام العلاقة التي تعطي قيمة $A(t)$. ومن هنا يمكن أن نستنتج أن الفترة الزمنية التي تفـصل بـين نبضتين متتاليتين هي :

$$\tau_p = \frac{1}{\Delta\upsilon_{Mod}} = \frac{2L}{c}$$

وهي تمثّل الفترة الزمنية التي تحتاجها الأشعة الضوئية لقطع المسافة بين مرآتي المرنـان ذهاباً وإياباً .

كما يمكن استنتاج عرض النبضة الليزرية والذي يعطى بالعلاقة :

$$\Delta\tau_p = \frac{1}{(2N+1)\Delta\upsilon_{Mod}} \approx \frac{1}{\delta\upsilon_{Mod}}$$

حيث يمثّل $\delta\upsilon_{Mod}$ عرض المجال الترددي للاهتزازات التي توافـق عـرض مجـال التضخيم .

وانطلاقاً من ذلك يمكننا اعتبار الاهتزاز ضمن المرنان نبضة ضوئية تتحرك بـين مرآتي المرنان ذهاباً وإياباً . ويتطلب الحصول على نبضة ليزرية قصيرة جـداً وسـطاً

ليزرياً فعالاً ذا عرض مجال تضخيم كبير جداً ، وكأمثلة على ذلك :

- يمتلك ليزر الهليوم-نيون عرض مجال تضخيم من مرتبة :

$$\delta\upsilon_{He/Ne} \approx 2GHz = 2\cdot 10^{9}\, s^{-1}$$

وذلك بسبب تأثير التعريض الدوبلري وبالتالي فإن زمن النبضة القصيرة الناتجـة عـن ذلك : $\Delta\tau_p \approx 5\cdot 10^{-9}\, s = 500\, ps$

- وفي حالة الليزرات الصباغية التي تمتلك عرض مجال تضخيم من مرتبة :

$$\delta\upsilon_{Dye} \approx 3THz = 3\cdot 10^{12}\, s^{-1}$$

وبالتالي فإن زمن النبضة القصيرة الناتجة عن ذلك : $\Delta\tau_p \approx 300\cdot 10^{-15}\, s = 300\, fs$

لهذا السبب كانت أقصر النبضات الليزرية التي تم توليدها هي باسـتخدام الليـزرات الصباغية .

الفصل السابع
تطبيقات الليزر

٧-١- مقدمة :

احتلت الأشعة الليزرية منذ اكتشافها في بداية الستينات من القرن العشرين مكاناً هاماً في مختلف مجالات الحياة اليومية ، وأحدثت ثورة تقانية وكانت لها تطبيقات كثيرة في العلوم الأساسية وفي الطب و الصناعة و الزراعة و البيئة وفي مجالات الاتصالات ... وغيرها لدرجة اعتبر فيها الليزر أحد أهم الانجازات العلمية في القرن العشرين ، ومنذ ذلك الحين ماتزال الأبحاث العلمية تتسارع لتطويره وإيجاد مجالات جديدة لتطبيقاته . وبما أن الأشعة الليزرية تمتلك خصائص تميزها من منابع الإشعاع التقليدية فقد ارتبطت كل خاصية من هذه الخصائص بتطبيقات مختلفة .

فالترابط المكاني الكبير لهذه الأشعة سمح بالحصول على منبع ضوئي مثالي يمكن تركيز طاقته في مساحة صغيرة جداً لدرجة تبلغ فيها كثافة الطاقة قيماً عاليةً جداً مما يمكننا من معالجة المعادن بعمليات مختلفة مثل عمليات القص و الصهر و اللحام وهذا ينطبق أيضاً على المواد الأخرى مثل المواد البلاستيكية و الخشب والورق .

أما الترابط الزماني الذي يؤدي إلى استقرار وثبات في سعة أشعة الليزر فله استخدامات كثيرة في مجالات الاتصالات و نقل المعلومات .

كما أن العرض الصغير جداً في الخطوط الطيفية الليزرية والذي يؤدي إلى ثباتٍ عالٍ في التردد يفتح المجال لاستخدام هذه الأشعة في التطبيقات الهامة للدراسات الطيفية وخاصة في المطيافية ذات الأزمنة القصيرة وأيضاً في قياس الأطوال وتحديد المسافات بدقة متناهية .

وهناك أيضاً تطبيقات تعتمد على خصائص أشعة الليزر مجتمعة منها التصوير الثلاثي الأبعاد (الهولوغرافيا) والذي كانت مبادئه النظرية معروفة منذ فترة طويلة ولكن أصبح واقعاً بعد اكتشاف الليزر ، وللهولوغرافيا استخدامات واسعة في مجالات عدة.

بالإضافة إلى كل ذلك هناك عدد كبير من الاستخدامات لأشعة الليزر وسنتطرق إليها في هذا الفصل مثل استخدام الليزر في العلوم الأساسية كالفيزياء والكيمياء وفي العلوم الحيوية والطب وفي التطبيقات التقنية المختلفة .

٧-٢- تطبيقات الليزر في الفيزياء

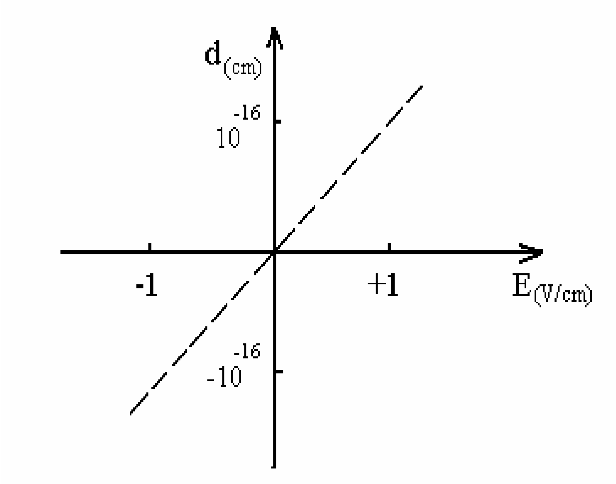
٧-٢-١ – البصريات اللاخطية

يمكن وصف عملية انتشار الضوء في الأوساط المادية بوساطة كل من الثابتتين : قرينة الانكسار n ودرجة الامتصاصية α واللتين تتعلقان بتردد الضوء بينما تكونان مستقلتين عن شدة الضوء في البصريات الخطية الطبيعية ، حيث تكون في هذه الحالة الخصائص الفيزيائية للضوء المرتبطة بكل من عمليات الانعكاس و الانكسار و سرعة الانتشار و تخامد الضوء أو تضخيمه مقادير ثابتة تتعلّق بطبيعة الوسط المادي وترتبط فقط مع تردد الضوء .

كما أن دراسات البصريات الخطية تعتمد على مبدأين : ينص المبدأ الأول على أن الأمواج الضوئية تتداخل فيما بينها بشكل مستقل ، أي أن الموجة الضوئية تنتشر في الوسط المادي بغض النظر فيما إذا كانت هناك موجة أخرى في نفس الوسط أم لا. أما المبدأ الثاني يعتمد على انحفاظ التردد وهذا يعني أنه عند التأثير المتبادل بين الضوء والمادة لا تتولد أية ترددات ضوئية جديدة ، وإنما يبقى تردد الموجة الضوئية الأساسي خارج الوسط المادي وداخله محافظاً على قيمته .

ومع العلم أن هذين المبدأين يبقيان صحيحين طالما شدة الأشعة الضوئية

صغيرة نسبياً كما هو الحال في المنابع الضوئية العادية أو التقليدية . وفي هـذه الحالـة تكون العلاقة بين الاستقطابية P وشدة الحقل الكهربائي E الموافقة للموجة الضوئية علاقة خطية . وتعني الاستقطابية هنا كثافة عزوم ثنائيات الأقطاب المتولدة نتيجة لتأثير الحقل E وهي تتناسب طرداً مع مقدار انحراف الإلكترونات d ضمن ذرات الوسط المادي عن وضع توازنها . وهذا يعني أن العلاقة الخطية هي أيضاً تنتج عن التناسـب الطردي بين الانحراف d وشدة الحقل E كما هي موضحة في الشكل **(٧ - ١)** .



الشكل (٧ – ١)

ومن جهة أخرى فإن شدة الحقول الكهربائية التي تعطيهـا المنـابع الـضوئية التقليدية تبلغ حوالي $|E| \approx 1 \ \dfrac{V}{cm}$ ، وهذه القيمة تؤدي إلى انزياح الإلكترونـات عن وضع توازنها بمقدار $|d| \approx 10^{-16}\ cm$ وهذا الانزياح يعتبر صغيراً جداً بالمقارنـة مع أبعاد الذرات والتي هي من مرتبة $10^{-8}\ cm$. ولكن عندما تكون الشدة الضوئية عالية جداً تصبح الانحرافات كبيرة جداً لدرجة يصبح عندها للمفاعيل اللاخطية دور واضح في العلاقة بين الاستقطابية وشدة الحقل الكهربائي .

وانطلاقاً من ذلك فإنه بعد التطور التقني الكبير في أجهزة الليزر ، والذي ترافق مع توليد أشعة ليزرية ذات استطاعات عالية ، أصبح ممكناً دراسة المفاعيل اللاخطية في

البصريات الضوئية وكذلك الاستفادة من تطبيقاتها في المجالات المختلفة للفيزياء .

وعند استخدام أشعة الليزر تكون شدة الحقول الكهربائية الموافقـة للموجـة الكهرطيسية كبيرة وبالتالي فإن الاهتزازات التي تقوم بها ثنائيات الأقطاب أو انزياحات الإلكترونات عن وضع توازنها تصبح اهتزازات لاتوافقية ، وهنا تجب الإشـارة إلى أن مثل هذه الجمل المهتزة لايمكن دراستها كما ندرس حركة الإلكترون الاهتزازية حول النواة ومقارنتها بالحركة الاهتزازية لنابض .

وإذا عبرنا عن الحقل الكهربائي بالعلاقة :

$$E = A \cdot \cos(\omega \cdot t) \qquad (٧-١)$$

فان الاستقطابية الخطية تعطى بالعلاقة :

$$P^L = \varepsilon_0 \cdot \chi^{(1)} \cdot E \qquad (٧-٣)$$

حيث : $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ As/Vm$ ثابت العزل الكهربائي في الخلاء .

$\chi^{(1)}$ السماحية الكهربائية الخطية للمادة .

ولكن عندما تكون العلاقة بين الاستقطابية والحقل الكهربائي لاخطية تظهـر حدود جديدة ذات درجة أعلى، وبالتالي تصبح العلاقة التي تعبر عن الاستقطابية أكثر تعقيداً، لأنها سوف تحتوي بالإضافة إلى الحد الخطي المعطى بالعلاقة **(٧-٢)** على حدود تعبر عن الحالة اللاخطية أي أن :

$$P = P^L + P^{NL} \qquad (٧-٣)$$

حيث : P^{NL} الحد الذي يمثل الاستقطابية اللاخطية وهي تعطى بالعلاقة :

$$P^{NL} = \varepsilon_0 \cdot \chi^{(2)} \cdot E \cdot E + \varepsilon_0 \cdot \chi^{(3)} \cdot E \cdot E \cdot E + \cdots\cdots\cdots \qquad (٧-٤)$$

وبالتالي يمكن كتابة العلاقة **(٧-٣)** بالشكل :

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi^{(1)} \cdot E + \varepsilon_0 \cdot \chi^{(2)} \cdot E \cdot E + \varepsilon_0 \cdot \chi^{(3)} \cdot E \cdot E \cdot E + \cdots\cdots\cdots \qquad (٧-٥)$$

حيث تمثّل $\chi^{(3)}, \chi^{(2)}$ السماحية الكهربائية الموافقة للمفاعيل من الدرجة الثانية ومن الدرجة الثالثة على التوالي . وفي حالة الأجسام الصلبة تأخذ السماحية القيم التالية :

$$\chi^{(3)} \approx 10^{-17}\ cm/V^2 \quad و \quad \chi^{(2)} \approx 10^{-10}\ cm/V \quad و \quad \chi^{(1)} \approx 1$$

ونلاحظ من هذه القيم ، أنه كلما ازدادت درجة الحد اللاخطي تصبح قيم السماحية صغيرة جداً ، ومن أجل الحصول على استقطابية لاخطية قابلة للقياس يتطلّب ذلك حقولاً كهربائية ذات شدة عالية جداً ، هذا مع العلم أن أعلى درجة للمفاعيل اللاخطية معروفة تجريبياً هي الدرجة التاسعة .

والآن إذا أخذنا بعين الاعتبار فقط الحد الخطي والحد اللاخطي من الدرجة الثانية وأهملنا الحدود اللاخطية من الدرجات الأعلى لصغرها بالمقارنة مع حد الدرجة الثانية ثم عوضنا عن الحقل الكهربائي E بقيمته من العلاقة **(٧-١)** نحصل على:

$$P = \varepsilon_0\left[\chi^{(1)} \cdot A \cdot \cos\omega t + \left(\chi^{(2)} \cdot A\right) \cdot A \cdot \cos^2\omega t\right]$$

$$P = \frac{\varepsilon_0}{2}\left(\chi^{(2)} \cdot A\right) \cdot A + \varepsilon_0 \cdot \chi^{(1)} \cdot A \cdot \cos\omega t + \frac{\varepsilon_0}{2}\left(\chi^{(2)} \cdot A\right) \cdot A \cdot \cos(2\omega t) \qquad (٧-٦)$$

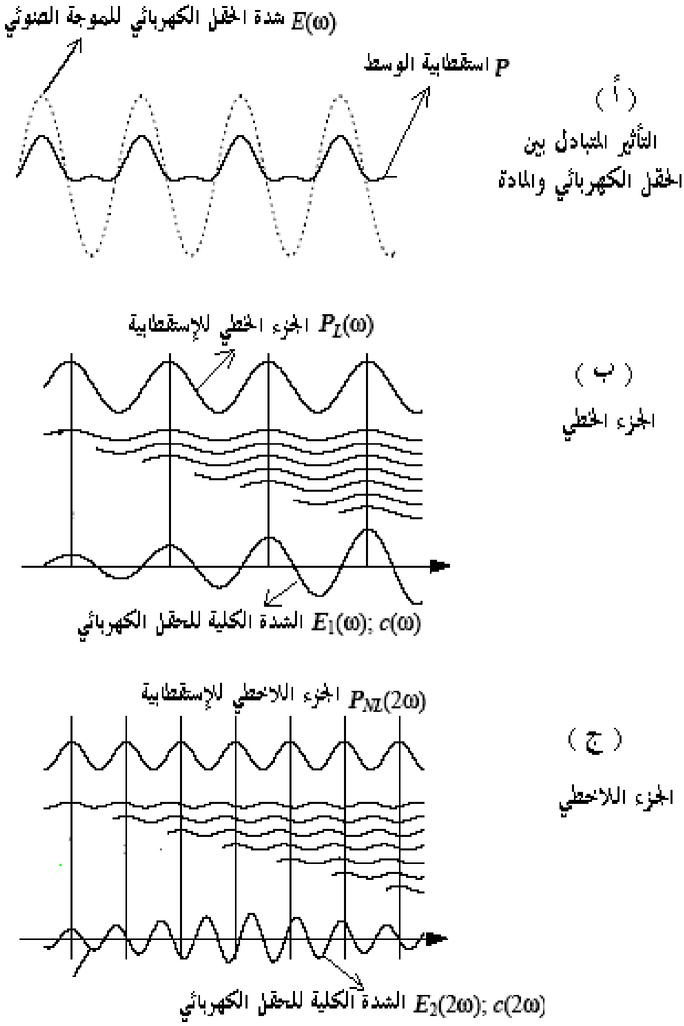
وهذه العلاقة يمكن كتابتها بالشكل :

$$P = P^{(0)}_{(0)} + P^{(1)}_{(\omega)} + P^{(2)}_{(2\omega)} \qquad (٧-٧)$$

إذاً نلاحظ أن علاقة الاستقطابية تحتوي بالإضافة إلى الحد الذي يمثل الموجة الأساسية $P^{(1)}_{(\omega)}$ وهو يتعلق بالتردد ω على حد مستقل عن التردد $P^{(0)}_{(0)}$ وحد آخر $P^{(2)}_{(2\omega)}$ يمثّل الجزء اللاخطي للاستقطابية وله تردد مضاعف ٢ω . وكذلك فإن الأمواج المتولدة عن ثنائيات الأقطاب وذات الترددات ω و ٢ω ستترافق بحقول كهربائية لها نفس الترددات وهذا يعني أنه سيتولّد بالإضافة إلى الأشعة ذات التردد ω أشعة ذات تردد مضاعف ٢ω كما هو في الشكل **(٧ - ٢)**.

ويمكن أيضاً ملاحظة المفاعيل البصرية اللاخطية في الغازات و السوائل و الأجسام الصلبة وفي البلازما . أما العامل الذي يلعب دوراً حاسماً في تحديد فيما إذا كانت هذه اللاخطية من الدرجة الثانية أو الدرجة الثالثة هو حالة التناظر الفراغي لبنية

المادة أو الوسط .



الشكل (٧ – ٢)

ويمكن تصنيف المفاعيل البصرية اللاخطية في أربع مجموعات :

***- المفاعيل الوسيطية :**

وتتميز هذه المفاعيـل بـأن الوسـط ذا الخصائص اللاخطية يلعب دور الوسـيط

في عملية التأثير المتبادل ، ويبقى في نفس سوية الطاقة التي يشغلها قبل عملية التـأثير وبعدها (وتوصف أحياناً بالعملية السلبية) وفي هذه الحالة تتعلّق عملية التأثير فقـط بعلاقة الطور بين أمواج الحقل الكهرطيسي .

أمثلة على ذلك : عملية توليد التوافقيات الضوئية ، عملية "جمع " و "طرح" الترددات المختلفة .

***- المفاعيل المتراكبة :**

في هذا النوع من المفاعيل يشارك الوسط اللاخطي بشكل فعـال في عمليـة التـأثير المتبادل وبالتالي يمكن للحقل أن يكتسب طاقة من الحقل الكهرطيسي الخارجي المؤثّر أو أن يعطي طاقة إلى هذا الحقل .

أمثلة على ذلك : تشتت رامان و تشتت بريليـوني و عمليـات الامتـصاص المتعددة الفوتونات .

***- مفاعيل التأثير الذاتي :** في هذه المفاعيل تتأثّر عملية انتشار الموجة الكهرطيـسية بسعة هذه الموجة ، كما تعتمد هذه المفاعيل على العلاقة بين شدة الموجة الكهرطيسية وقرينة انكسار الوسط .

أمثلة على ذلك : عملية التبئير الذاتي ، عملية تعديل الطور الذاتية ، مفعول – كير الضوئي .

***- المفاعيل الانتقالية المترابطة :**

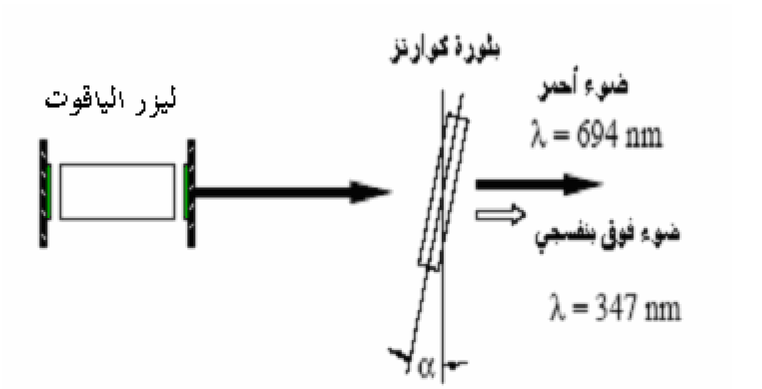
وهي عبارة عن عمليات ترتكز بشكل أساسي على عملية الإثارة المترابطة لـذرات الوسط ، وتتعلّق هذه العمليات بسلسلة من المفاعيل المعروفة في مجال الترددات العالية جداً والتي تتميز بخصائص لاخطية قوية وفعالة جداً.

أمثلة على ذلك : الصدى الفوتوني ، الشفافية المحرضة ذاتياً .

٧-٢-٢- أمثلة على المفاعيل اللاخطية :

٧-٢-٢-١- مضاعفة الترددات :

عندما تتعريض بلورة كوارتز لحقل كهربائي خارجي ذي شدة عالية فإنه يؤدي إلى انزياح الإلكترونات عن وضع توازنها وتصبح اهتزازاتها لاتوافقية ، ووفقاً لعلاقـة الاستقطابية **(٧-٦)** نلاحظ أنها تحتوي على حدود تتعلّق بترددات مـضاعفة للتـردد الأساسي . وكمثال على ذلك ، فإن الأشعة الضوئية التي يقع طول موجتها في المجال الأحمر من الطيف الكهرطيسي سوف تتحول إلى اليزرق عندما تخترق بلـورة مـن الكوارتز ، وإذا كان الشعاع الذي يعطيه الليزر المستعمل يقع في مجال ماتحت الأحمـر البعيد ، فإن الشعاع الذي نحصل عليه سيكون واقعاً في المجال الأخضر ، وبما أن الأشعة تحت الحمراء غير مرئية فتظهر البلورة في هذه الحالة وكأنها تصدر شعاعاً ضوئياً أخضر اللون من دون أن يصل إليها أي شعاع آخر . وهذا المفعول تم اكتشافه لأول مرة في المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي عام **١٩٦١** من قبل العلمـاء ***Franken , Hill ,*** ***Peters , Weinreich*** وذلك من خلال توجيه أشعة ليزر الياقوت ذات طول الموجـة $\lambda_1 = 694,3\ nm$ على بلورة من الكوارتز للحصول على أشعة ضوئية طول موجتها $\lambda_2 = 347,2\ nm$ كما هو مبين بالشكل **(٧ – ٣)**.



الشكل (٧ – ٣)

وهذا التضاعف في تردد الموجة لايحدث بواسطة بلورة أي جسم صلب وذلك لأن السماحيات $\chi^{(1)}, \chi^{(2)}, \chi^{(3)} \cdots\cdots$ تتعلّق بطريقة توزع الذرات وترتيبها داخـل بلورة الجسم الصلب . ولهذا السبب لايمكن الحصول على تـرددات مـضاعفة مـن بلورات تمتلك مركز تناظر مثلاً ، لأن الاستقطابية سوف تتغير في هذه الحالة من قيم سالبة إلى قيم موجبة عندما ينعكس اتجاه الحقل الكهربائي الخارجي من القيم الـسالبة إلى القيم الموجبة أي أن السماحيات من الدرجة الثانية $\chi^{(2)}$ والدرجة الرابعة $\chi^{(4)}$ سوف تأخذ القيمة صفر وبما أنها مرتبطة بالحدود التي تحتوي على الترددات المضاعفة وبالتالي لايمكن استخدام مثل هذه البلورات في مضاعفة التردد . لذلك لابد للبلورات أن تمتلك عدداً من الصفات تسمح باستخدامها لمضاعفة الترددات منها :

أ - اللاخطية :

أي أنه يجب أن يكون للبلورة سماحية لاخطية . وأكثر البلورات ملاءمة لذلك هـي البلورات ذات التركيب الكيميائي العضوي , ولكن هناك صعوبات كبيرة في تـصنيع بلورات عضوية ذات خصائص متجانسة وبأبعاد كبيرة ولهذا تستعمل البلـورات ذات التركيب اللاعضوي والتي يمكن تصنيعها وفقاً لمواصفات بصرية عالية الجودة وبأبعـاد كبيرة ومثل هذه البلورات تستخدم في الليزرات ذات الاستطاعات العالية جداً .

ب - الشفافية :

أي أن البلورة يجب أن تكون شفافة ونفوذية لكل أطـوال الأمـواج الكهرطيـسية الأساسية وأيضاً للأطوال الموجية ذات الترددات المضاعفة الناتجة عن عملية مـضاعفة التردد . ولهذا السبب يكون مجال عملية مضاعفة الترددات محدد غالباً في مجال فـوق البنفسجي وتقع أقصر الأطوال الموجية من أجل أغلب البلورات المستخدمة عند طول الموجة $\lambda = 120\ nm$.

ج - عتبة انهيار كبيرة :

بما أن البلورات سوف تخضع لتأثير حقول كهربائية ذات شدات عالية جداً لذلك يجب

أن تكون الخصائص البصرية و التقنية والكيميائية لهذه البلورات ثابتة .

٧-٢-٢-٢- "جمع" و "طرح" ترددي موجتين مختلفتين

عند مرور شعاعي ليزر لهما ترددان مختلفان ω_1 و ω_2 عبر بلورة جسم صلب فإنه يمكننا بالاعتماد على المفاعيل اللاخطية الحصول بالإضافة إلى الترددات المضاعفة على ترددات جديدة هي عبارة عن مجموع أو فرق الترددات الأساسية . فإذا كانت الحقول الكهربائية التي تمثّل شعاعي الليزر :

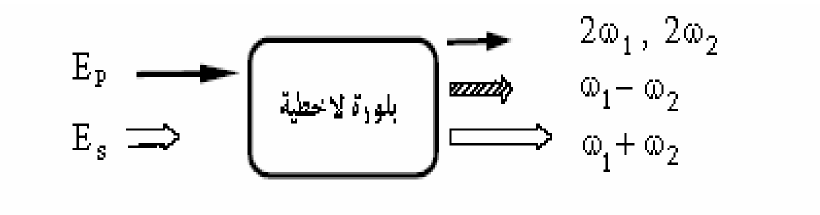
$$E_p = E_1 \cdot \cos \omega_1 t$$

$$E_s = E_2 \cdot \cos \omega_2 t$$

وإذا أخذنا الحد الأول من العلاقة **(٧-٤)** وعوضنا فيه قيمة كل من الحقلين السابقين نحصل على :

$$\chi^{(2)} \cdot E_p \cdot E_s = \chi^{(2)} \begin{bmatrix} \frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + \frac{E_1^2}{2}\cos 2\omega_1 t + \frac{E_2^2}{2}\cos 2\omega_2 t + \\ E_1 \cdot E_2 \cdot \cos(\omega_1 + \omega_2)t + E_1 \cdot E_2 \cdot \cos(\omega_1 - \omega_2)t \end{bmatrix}$$

وكما نلاحظ من هذه المعادلة أنه تنتج لدينا حدود لاتتغير مع الزمن مثل $\frac{E_1^2}{2}$ و $\frac{E_2^2}{2}$ وحدود لها تردد مضاعف لتردد الموجتين الأساسيتين مثل: $\frac{E_1^2}{2}\cos 2\omega_1 t$ و $\frac{E_2^2}{2}\cos 2\omega_2 t$ بالإضافة إلى حدودٍ لها تردد يساوي مجموع ترددي الموجتين الأساسيتين أو فرقهما : $E_1 \cdot E_2 \cdot \cos(\omega_1 + \omega_2)t$ و $E_1 \cdot E_2 \cdot \cos(\omega_1 - \omega_2)t$ وكل من هذه الحدود يمثّل موجة من الموجات التي يمكن الحصول عليها بعد مزج الموجتين الأساسيتين اللتين تردداهما ω_1 و ω_2 ، كما هو موضح بالشكل**(٧ - ٤)**:



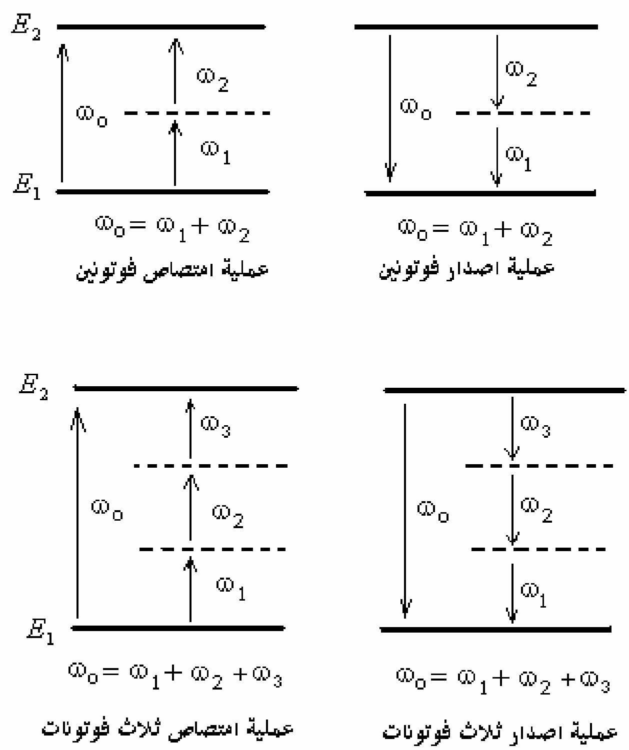
الشكل (٧ – ٤)

فإذا أخذنا مثلاً ليزر الياقوت فانه يعمل على موجتين هما : $\lambda_1 = 692{,}8\ nm$ و$\lambda_2 = 694{,}3\ nm$ فبعد مزجهما داخل بلورة لاخطية يمكننا الحصول على شعاع ليزري جديد طول موجته $\lambda = 343{,}6\ nm$ ناتج عن عملية طرح ترددي الشعاعين الأساسيين .

وتعتبر عملية جمع وطرح الترددات عملية فعالة لتحويل ترددات الأشعة الليزرية بالاعتماد على الأوساط اللاخطية من الدرجة الثانية وخاصة في مجال الأشعة فوق البنفسجية حتى طول الموجة $190nm$ ومجال الأشعة ماتحت الحمراء حتى $25\mu m$. كما أنه عند استخدام أشعة ليزرية من ليزرات المواد الملونة النانو-ثانية يمكن الحصول على مردود ذو قيمة مقبولة .

٧-٢-٢-٣- عمليات الامتصاص المتعددة الفوتونات

يتم في هذه العمليات امتصاص عدة فوتونات في نفس الوقت . فإذا كان تردد حقل الإشعاع الخارجي υ ذا قيمة أصغر من تردد الانتقال $\upsilon.$ بين سويتي طاقة E_2 , E_1 ففي هذه الحالة لايمكن أن تحدث عملية الامتصاص ضمن الشروط العادية كما هو معلوم من مبادئ ميكانيك الكم ، ولكن عندما تكون شدة الحقل الخارجي كبيرة كما هو الحال باستخدام أشعة الليزر وكان $\upsilon.$ يساوي عدداً صحيحاً من أمثال υ فيمكن للذرة أن تمتص عدة فوتونات بحيث يكون مجموع طاقاتها يتناسب مع الفرق في الطاقة بين السويتين E_2 , E_1 لتحقيق عملية الانتقال بين السويتين .



الشكل (٧ – ٥)

ومن هنا يمكن التمييز بين عدة أنواع من الامتصاص : عملية امتصاص فوتونين ، عملية امتصاص ثلاثة فوتونات ، ...... ، وهذا ينطبق أيضاً على عملية الإصـدار حيث يمكن للذرة خلال انتقالها بين السويتين E_2, E_1 أن تصدر فوتونين أو أكثـر كما هو موضح في الشكل **(٧ - ٥)** .

٧-٢-٢-٤- عمليات التبعثر :

(تبعثر رامان ***aman Scattering*** **وتبعثر بريليون** ***Brilliouin Scattering)***

عندما تسقط أشعة ضوئية على جسم صلب ما ، سائل أو غازي ، فإن قسماً صغيراً من هذه الأشعة يحيد عن مساره الأساسي ويتبعثر في مختلف الاتجاهات وذلـك بسبب عملية تصادم الفوتونات مع ذرات أو جزيئات هذا الجسم . وعند تحليل الأشعة

المتبعثرة نلاحظ أنها تحتوي بالإضافة إلى تردد الأشعة الأساسية υ_0 على ترددات لأشعة أخرى قيمتها أكبر وأصغر من υ_0 وتأخذ القيم $\upsilon_0 \pm \upsilon_1$ و $\upsilon_0 \pm \upsilon_2$ و ....

ويمكن بالاعتماد على مفعول رامان ***(Raman effect)*** فهم عملية التبعثر كما يلي : فإذا سقطت موجة ضوئية ما $E = E_0 \cdot \sin(2\pi\upsilon_0 t)$ على جزيئة فانها ستؤثر على إلكتروناتها وتجعلها تهتز تحت تأثير الحقل E وذلك مع الأخذ بعين الاعتبـار أن كتلة النواة في الجزيئة أكبر بكثير من كتلة الإلكترونات . وسيولّد هذا الاهتزاز عزمـاً ثنائي أقطاب كهربائي p و يتناسب طرداً مع شدة الحقـل الكهربـائي للموجـة الضوئية E وتعطى قيمته بالعلاقة :

$$p = \alpha \cdot E_0 \cdot \sin(2\pi\upsilon_0 t)$$

حيث α قابلية الاستقطاب للجزيئة وهي تتعلق بتردد الموجة الضوئية ، حالة التـرابط وخصائص التناظر للجزيئة .

وفي الحالة العادية وبدون حقل خارجي يكون للجزيئة حركة اهتزازيـة ذات تردد υ_M تنشأ عن اهتزاز نوى الجزيئة بالنسبة لبعضها البعض ، وبالتالي يؤدي ذلك إلى أن قابلية الاستقطاب α ستتغير بشكل دوري مع الحركة الاهتزازيـة للجزيئـة وذلك لارتباطها بالخصائص التناظرية للجزيئة ويمكن التعبير عن ذلك بالعلاقة :

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \sin(2\pi\upsilon_M t)$$

وبالتعويض في علاقة عزم ثنائي الأقطاب نحصل على :

$$p = \alpha_0 \cdot E_0 \cdot \sin(2\pi\upsilon_0 t) + \alpha_1 \cdot E_0 \cdot \sin(2\pi\upsilon_0 t) \cdot \sin(2\pi\upsilon_M t)$$

وبإصلاح هذه العلاقة نجد أن :

$$p = \alpha_0 E_0 \cdot \sin(2\pi\upsilon_0 t) + \frac{\alpha_1 E_0}{2}\{\cos[2\pi(\upsilon_0 - \upsilon_M)t] - \cos[2\pi(\upsilon_0 + \upsilon_M)t]\}$$

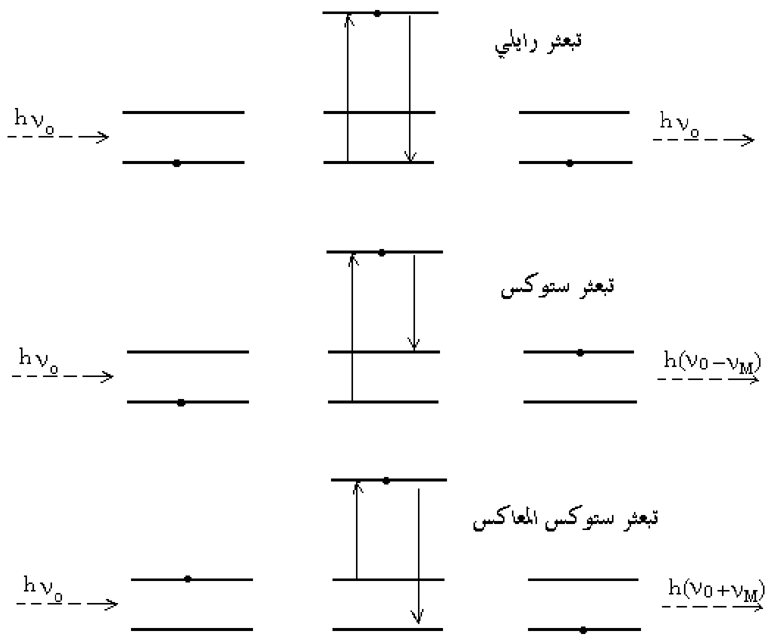
وكما نلاحظ فان علاقة عزم ثنائي الأقطاب تحتوي على ثلاثـة تـرددات ، وبالتالي فإن هذا العزم سوف يصدر أمواجاً أيضاً وفقاً لهذه الترددات . ويمثل التـردد υ_0 التردد الأساسي للموجة الضوئية وهذا يعني أن الجزيئة تصدر أشعة لها نفس طول

الموجة الأساس ويتوافق ذلك مع تبعثر رايلي المـرن ***(elastic Rayleigh scattering)*** وبالإضافة إلى التردد الأساسي تظهر الترددات :

$$\upsilon_s = \upsilon_0 - \upsilon_M$$

$$\upsilon_{as} = \upsilon_0 + \upsilon_M$$

يدعى التردد υ_s تردد ستوكس ***(Stokes-frequence)*** بينما يدعى التردد υ_{as} تردد ستوكس المعاكس ***(Anti-Stokes-frequence)*** كما هو مبين بالشكل **(٧ - ٦)**.



الشكل (٧ – ٦)

ومن جهة أخرى يمكن شرح تبعثر رامان بالاعتماد على النظريـة الجـسيمية للضوء كما يلي : عند تصادم فوتون طاقته $h\upsilon_0$ مع جزيئة ما تتواجـد في الـسوية الاهتزازية الأساسية $(\nu = 0)$ حيث ν العدد الكوانتي للحركة الاهتزازية ففي هـذه

الحالة يمكن للجزيئة أن تمتص هذا الفوتون لفترة زمنية قصيرة وتنتقل إلى سوية طاقة اهتزازية منوعة، لأنها بالأصل لاتمتلك سوية طاقة اهتزازية توافق طاقة الفوتون الذي امتصته ، وتدعى مثل هذه السوية بالسوية الاهتزازية الافتراضية وهي موضحة بالشكل السابق. ومن ثم تنتقل الجزيئة بسرعة كبيرة من السوية الافتراضية إلى سوية أخرى حقيقية وفي هذه الحالة هناك احتمالان للجزيئة :

أ- يمكن للجزيئة أن تعود إلى السوية الأساسية $(\nu = 0)$ وفي هذه الحالة تصدر الجزيئة طاقة الفوتون الذي امتصته $h\upsilon_0$. ويتغير فقط اتجاه الفوتون نتيجة التبعثر ولكن بدون أي تغير في طاقته ، وهذه الحالة توافق تبعثر رايلي .

ب- يمكن للجزيئة أن تعود إلى السوية الهتزازية الأولى $(\nu = 1)$ وفي هذه الحالة تصدر الجزيئة فوتوناً ذا طاقة $h\upsilon_s = h(\upsilon_0 - \upsilon_M)$ ، وهذا الفرق في الطاقة تحتفظ به الجزيئة على شكل طاقة اهتزازية ، وهذه الحالة توافق تبعثر رامان (حالة ستوكس) .

أما إذا كانت الجزيئة قبل اصطدام الفوتون بها موجودة في سوية مثارة ما ولتكن $(\nu = 1)$ وفي هذه الحالة ينشأ بالإضافة إلى الاحتمالين السابقين احتمال ثالث :

يمكن للجزيئة أن تنتقل من السوية الاهتزازية المثارة $(\nu = 1)$ إلى السوية الاهتزازية الأساسية $(\nu = 0)$ من خلال اعطاء الفوتون هذا الفرق في الطاقة بين السويتين الاهتزازيتين بحيث يصدر فوتون ذو طاقة $h\upsilon_{as} = h(\upsilon_0 + \upsilon_M)$ ، وهذه الحالة توافق تبعثر رامان (حالة ستوكس المعاكسة) .

٧-٢-٣- المطيافية الليزرية

منذ اكتشاف أشعة الليزر في بداية الستينات من القرن الماضي دخلت وبشكل واسع كمنبع ضوئي في الدراسات الطيفية المختلفة ، فمن جهة ساهم ذلك في

تطوير الطرق الطيفية التي كانت معروفة سابقاً والتي اعتمدت على المنـابع الـضوئية التقليدية (كالمصابيح و أنابيب الانفراغ و الأشعة السينية ،.....) ، ومـن جهـة أخرى أدى إلى اكتشاف تقنيات وطرق طيفية جديدة . ويرجع الـسبب في ذلـك التطور إلى خصائص الأشعة الليزرية التي سمحت في تجاوز وحل العديد من الصعوبات التي اعترضت الطرق الطيفية المختلفة ومنها :

- الحصول على قدرة تحليل طيفية عالية، والتي لاتعتمد على تصميم أو تقنيـة الأجهزة الطيفية، وإنما على خصائص الخطوط الطيفيـة الليزريـة للمـواد المدروسة (المطيافية الخطية) .
- المطيافية الليزرية ضمن مجال تغير عرض الخطوط الطيفية وفق مفعول دوبلـر (في الغازات) .
- الوصول إلى حساسية عالية من مرتبة الذرات والجزيئات مما ساهم في ابتكار طرق تحليل طيفية تستخدم في دراسة جزيئات أو ذرات منفردة .
- دراسة الظواهر الحركية في الغازات والأطوار الكثيفة للمادة , وكذلك قياس عمليات وزمن الاسترخاء الذي تقوم به الجزيئات داخل المادة ضمن مجـال زمني من مرتبة نانوثانية ns و بيكوثانية ps ، وحديثاً ضمن مجال من مرتبـة فمتوثانية fs .
- التحليل الطيفي الموضعي للمواد ذات الحجوم الصغيرة من خلال عملية تركيز أو تمحرق أشعة الليزر لمرتبة تصل إلى $10\lambda^3$.
- التحليل الطيفي للمواد من مسافات بعيدة تصل حتى $10^5 m$.

ومن الطرق الطيفية المختلفة التي تعتمد على أشعة الليزر كمنبع ضوئي في تقنياتها :

٧-٢-٣-١- مطيافية الامتصاص الليزرية الخطية :

فكما هو معلوم فإن قدرة التحليل الطيفية محددة بسبب تعريض الخطوط الطيفية

للانتقالات التي تحدث ضمن الذرات و الجزيئات ، وبالتالي يمكن تحديد الامتـصاصية للمواد المدروسة من خلال :

- قياس النفوذية
- قياس الفلورة
- القياس المباشر للطاقة الممتصة
- قياس تغير تيار الانفراغ في حالة الانفراغ الغازي نتيجة الامتصاص (المفعـول الغلفاني-الضوئي).

ولذلك عند استخدام أشعة الليزر يمكن قياس النفوذية للمادة المدروسة وخاصة عندما تكون الامتصاصية أكبر من ١٪ . ومن أجـل دراسـة الخطـوط الطيفيـة للامتصاص، والتي تكون ضعيفة أو قريبة من بعضها البعض بشكل كبير ، يمكن تعديل تردد أشعة الليزر بحيث يصبح عندها طيف المادة قابلاً للقياس، وبـذلك تتـضاعف حساسية هذه الطريقة بمقدار 10^2 مرة مقارنة مع الطريقة المباشرة لقياس النفوذية .

كما يمكن بطريقة أخرى زيادة الحساسية وذلك بوضع المادة داخـل المرنـان ،وخاصة بالنسبة لليزرات ذات منحنى تضخيم عريض مثل ليزرات المواد الملونة وليزر النيوديميوم-ياغ . ويعتمد هذا المفعول على توزع شدة الأشعة الليزرية على الإنمـاط المحورية المختلفة وذلك بسبب مرور شعاع الليزر عدة مرات من خلال المادة وكذلك التأثير المتبادل بين الإنماط .

أما في الحالات التي تكون فيها الانتقالات من السويات المثـارة إلى الـسوية الأساسية لاتترافق بعملية اصدار أشعة كهرطيسية فتستخدم المطيافية الصوتية-الضوئية بشكل خاص في الغازات وضمن مجال الأشـعة ماتحـت الحمـراء أو الانتقـالات الاهتزازية-الدورانية في الجزيئات ، حيث تؤدي عملية امتصاص الطاقة إلى تغيـر في درجة الحرارة والتي تسبب تغيراً دورياً في الضغط عندما تكون أشعة الليـزر معدلـة تردديأ ، وبالتالي يمكن من خلال قياس هذا التغير في الضغط الحصول على الطاقة التي

امتصتها ذرات أو جزيئات المادة وتدعى هذه الطاقة (الطاقة الممتصة المكافئة للضجيج) . وتستخدم هذه الطريقة في دراسة الامتصاصية الضعيفة في مجال الأشعة ماتحت الحمراء وكذلك في دراسة إسكان السويات الاهتزازية-الدورانية المثارة .

٧-٢-٣-٢- مطيافية الأزمنة القصيرة:

بعد التطور الكبير في تقانات الليزر وخاصة في مجال النبضات الليزرية القصيرة جداً والتي تصل مدة نبضتها إلى مرتبة بيكوثانية *ps* وحتى فمتوثانية *fs* أصبح بالإمكان دراسة وبحث العمليات والظواهر الفيزيائية و الكيميائية والبيولوجية التي تحدث خلال فترات زمنية قصيرة جداً . ومن هذه العمليات :

- دراسة عمليات الاسترخاء التي تتم ضمن الجزيئات نتيجة الانتقالات الدورانية، الاهتزازية ، وكذلك الانتقالات الإلكترونية التي تحدث داخل الجزيئات سواءً أكانت في حالتها الغازية أو حتى الحالة الصلبة حيث تتراوح أزمنة هذه الاسترخاءات بين $(10^{-9}\text{-}10^{-14}\,sec)$.
- قياس عمر الفونونات البصرية، وكذلك بلازما الإلكترون-ثقب في الأجسام الصلبة، والتي تحدث ضمن فترات زمنية قصيرة جداً من مرتبة البيكوثانية *ps* والفمتوثانية *fs* .
- قياس ثوابت سرعات التفاعلات الكيميائية الجزيئية والتي تحدث ضمن فترات زمنية أصغر من $10^{-13}\,sec$.
- -دراسة العمليات الأولية للتركيب الضوئي في المجالات البيولوجية والتي تحدث ضمن فترات زمنية من مرتبة $10^{-12}\,sec$.

كما أنه باستخدام طرق مطيافية الأزمنة القصيرة يمكن قياس الإسترخاءات في الطاقة (المطيافية غير المترابطة) أو الإسترخاءات في الطور (المطيافية المترابطة) . ومن أهم الليزرات المُستخدمة في هذا النوع من المطيافية هي ليزرات الجسم الصلب ، الليزرات الغازية والليزرات الصباغية .

ومن الطرق المستخدمة في مطيافية الأزمنة القصيرة :

- قياس الفلورة الطورية:

في هذه الطريقة تتم إثارة العينة للحصول على الفلورة المدروسة بواسطة أشعة ليزريـة ذات توليف محدد ترددها υ بحيث تحدث عملية الفلورة كتابع لزمن الاضمحلال أو التخامد (*decay time* τ) مع انزياح في الطور مقداره θ . وفي الحالة العادية ترتبط هذه المقادير مع بعضها البعض بالعلاقة :

$$\theta = aec\tan(\upsilon \cdot \tau)$$

وبالتالي يمكن من خلال قياس انزياح الطور θ تحديد زمن الاضـمحلال باعتبـار أن تردد التوليف معلوم مسبقاً . وفي هذه الطريقة يمكن الوصول إلى تحلل زمني يقـع في مجال البيكوثانية عند استخدام ترددات توليف ذات قيم كبيرة من مرتبة ($١٠^٨$ *Hz*) .

- قياس الإمتصاصية :

في هذه الحالة يقاس التغير في الامتصاصية كتابع للزمن ، حيث يمكن باستخدام نبضة ليزرية فاحصة ومتباطئة زمنياً (يمكن تحقيق ذلك بواسطة وصلات إبطـاء بـصرية) دراسة امتصاصية العينة المدروسة بعد عملية إثارتها ، وبالتالي يمكن تسجيل الامتصاصية بواسطة مطياف كتابع لطول الموجة والزمن بالترابط مع تغيير طول موجـة النبـضة الفاحصة .

- تشتت رامان المحرض ليزرياً:

تستخدم طريقة تشتت رامان لدراسة كل من الاهتـزازات الجزيئيـة في الـسويات الإلكترونية الأساسية للجزيئات التي توجد في الحالة الـسائلة وكـذلك في دراسـة الفونونات البصرية في الأجسام الصلبة والتي تقع في مجال البيكوثانية *ps* .

وتعتمد هذه الطريقة على إثارة السويات الاهتزازيـة الجزيئيـة أو اهتـزازات الشبكة البلورية في الأجسام الصلبة بالإعتماد على مبدأ تشتت رامان المحرض بواسطة نبضة ليزرية قصيرة وذات شدة عالية ، وبعد ذلك يتم سبر أو دراسة حالة العينة المثارة

بواسطة نبضة فاحصة شدتها ضعيفة بالمقارنة مع شدة نبضة الإثارة .

ويؤدي تشتت رامان المحرض إلى إشغال السويات الإهتزازية المثارة أو تـشكيل اهتزازات مترابطة في العينة المدروسة . وبالتالي فإن القياسات التي تعتمد علـى مبـدأ التحليل الزمني تعطي أزمنة تتراوح قيمتها بين $(sec$ ١٠$^{-٩}$-١٠$^{-١٤})$.

٤-٢-٧- الإندماج النووي بواسطة الليزر

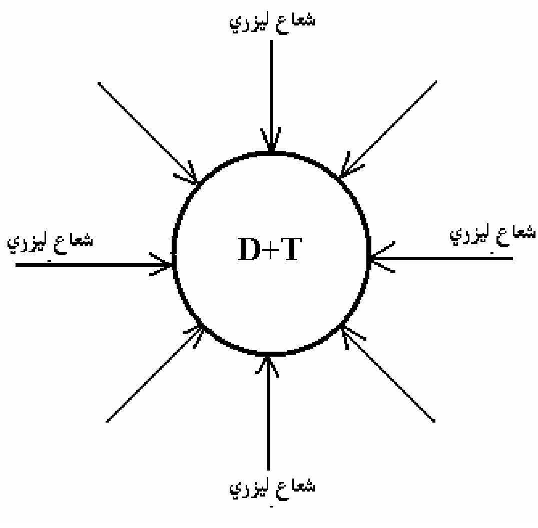
يعمل الباحثون ، في مجال الفيزياء النووية ، منذ عقود طويلة على حل مـشكلة الاستخدام الآمن والسلمي للطاقة النووية المتحررة عن عملية الاندماج أو الانـصهار النووي للنوى الذرية الصغيرة ، حيث تعتبر هذه المشكلة من المشاكل الحالية والصعبة في الفيزياء الحديثة . و تتعلّق الدراسة في الدرجة الأولى حول عملية انـدماج نظـائر الهيدروجين الثقيلة كالدوتيريوم *D (Deuterium)* والتريتيـوم *T (Tritium)* . فهـذا النوع من تفاعلات الاندماج يمكن حدوثه عندما تكون الطاقة الحركية لنـوى هـذه النظائر كبيرة جداً تفوق فيها قوى التنافر الكهرساكنة التي تتولد عند اقتـراب هـذه النوى من بعضها إلى مسافة cm ١٠$^{-١٣}$.

كما أن تفاعلات الاندماج النووية تحدث تحت شروط طبيعية كونية كما هـو الحال في العديد من النجوم كالشمس مثلاً أو تحت شروط صنعية كما هو الحـال في القنبلة الهيدروجينية .

وتكمن الصعوبات الرئيسية الواجب تجاوزها عند تحقيق ومراقبة عملية الإندماج النووية في الشروط الحدية القصوى التي تتم عندها عملية الإندماج ، فعلى سبيل المثال يمكن أن تبلغ درجة الحرارة في الشمس K ١٠^{٦} . ١٤ وهذه تعادل مقداراً من الطاقـة قيمته eV ١٠^{٣} ، كما أن الضغط يصل إلى القيمة $(Pa$ ١٠^{١٥} . ٢$)$ بينما الكثافة حـوالي $(g/cm^{٣}$ ١٠^{٢} . ٤$)$.

تكمن أهمية المسألة في اختيار الطريقة أو الوسيلة لتحقيق عملية اندماج نووية يمكن التحكم فيها ومراقبتها وهنا نستطيع التمييز بين طريقتين :

تعتمد الطريقة الأولى على توليد بلازما ذات عمر طويل $(t \approx ١\ sec)$ وذات كثافة منخفضة نسبياً في حجم كبير $(v \approx ١٠^{٢}\ m^{٣})$ بحيث يمكن التحكم بهذه البلازما بواسطة حقول مغناطيسية قوية جداً من مرتبة $١٠\ T$ كما هو الحال في منظومة توكاماك $(Tokamak)$. أما الطريقة الثانية فتعتمد على توليد بلازما ذات عمر قصير وذات كثافة عالية جداً في حجم صغير والتي يمكن تسخينها بواسطة نبضات ليزرية شدتها عالية أو بواسطة إلكترونات سريعة . أما مبدأ تفاعلات الاندماج النووية بواسطة الليزر فيعتمد على تسليط أشعة ليزرية من عدة اتجاهات مختلفة ومتناظرة على هدف كروي الشكل يتراوح قطره بين $(٠٫١ ..... ١\ mm)$ يحتوي في داخله على مزيج من الدوتيريوم والتريتيوم كما هو مبين بالشكل **(٧ - ٧)**.



الشكل (٧ – ٧)

حيث يمتص مزيج الدوتيريوم والتريتيوم طاقة الأشعة الليزرية وبالتالي ترتفع درجة حرارة المزيج إلى درجة عالية جداً تقود بدورها إلى حدوث انفجار نووي ميكروي يدعى تفاعل نووي حراري .

ويمكن تمثيل تفاعل الاندماج بالمعادلة التالية :

$$D + T \to {}^{4}He\left(3{,}5MeV\right) + n\left(14{,}1MeV\right)$$

وتدل قيم الطاقة بين قوسين على طاقة جسيمات ألفـا وطاقـة النيوترونـات المتولدة عن عملية الاندماج أو الانصهار .وبالتالي يجب العمل على اسـتخدام هـذه الطاقات المتولدة بأسلوب تقني فعال ، حيث تستخدم جسيمات ألفا في المحافظة علـى استمرارية التفاعلات النووية المتسلسلة بينما تستخدم النيوترونات في التفاعلات الـتي تقود إلى عملية انشطار اليورانيوم .ومن أجل أن يجري التفاعل المبين في العلاقة السابقة يجب أن تتحقق معايير لاوسون التالية :

- يجب أن تبلغ قيمة الجداء بين تركيز البلازما N والزمن الذي يمثّل عمر هـذه البلازما τ القيمة : $N \cdot \tau \geq 10^{14} s / cm^{3}$
- يجب أن تكون درجة حرارة البلازما : $T \geq 10^{8} K$

وحتى تكون قيمة الطاقة الناتجة عن التفاعل النووي الحراري موجبة وهذا يعـني بـأن تكون قيمتها أكبر من قيمة الطاقة المعطاة إلى التفاعل فإن ذلك يتحدد بالاعتماد على العوامل التالية :

- درجة المردود أو الفعالية η_L لليزر .
- معامل التضخيم في الطاقة K وهو يعبر عن المقدار الذي تكون فيه الطاقـة الناتجة عن التفاعل النووي الحراري أكبر من طاقة النبضة الليزرية ، كما أن هذا المعامل يتعلّق بشكل مباشر مع درجة المردود لليزر .
- درجة المردود أو الفعالية η_{el} لعملية تحويل الطاقة الناتجة عن التفاعـل إلى طاقة كهربائية .

ومن أهم الليزرات المستخدمة في مثل هذه التفاعلات هي ليـزر النيوديميـوم-زجاج الذي يعطي نبضات ليزرية في مجال البيكوثانية و الفمتوثانية ، وكذلك يمكـن أيضاً استخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون .

ومن أجل أن يكون تأثير أشعة الليزر على الهدف الكروي ، الذي يحتوي على المزيج من الدوتيريوم والتريتيوم ، فعالاً يجب أخذ العوامل التالية بعين الاعتبار :

- خصائص أشعة الليزر من حيث طاقة وزمن وشكل النبضة الليزرية ، التباعد في الحزمة الليزرية لأن عملية تبئير الأشعة الليزرية للحصول على أكبر تركيز ممكن لطاقة النبضة ضرورية جداً وكذلك ترابط هذه الأشعة .
- شكل وتركيب وكذلك حجم الهدف .
- معرفة الخصائص الفيزيائية لعملية امتصاص الأشعة الليزرية من قبل مكونات الهدف .

والجدول (١) يبين قيم استطاعة النبضات الليزرية وزمن هذه النبضات وطـول موجة الأشعة الليزرية المستخدمة في بعض المنظومات العالمية التي تبحث في تفـاعلات الاندماج النووية بواسطة الليزر .

اسم المنظومة	استطاعةالليزر (TW)	الطاقة (KJ)	زمن النبضة الليزرية (ns)	طول موجة الليزر(µm)
Nova	١٠٠	١٠٠	٠, ١-٣،٠	١،٠٦
Omega	١٥	٤	٠،٠٣-١،٠	١،٠٦
Gekko	٤٠	٢٠	٠،١-١،٠	١،٠٦ + ٠،٥٣
Delfin	٣٣	١٠	٠،٢-٣،٠	١،٠٦
Vulcan	٣،٦	١،٢	٠،١-١،٠	١،٠٦
Octal	٢	١	٠،١-١،٠	١،٠٦
Antares I	٤٠	٤٠	١	١٠،٦
Lekko VIII	١٠	١٠	١	١٠،٦

الجدول (١)

٥-٢-٧- تبريد الذرات بأشعة الليزر:

نلاحظ من التطبيقات السابقة لأشعة الليزر بأنها تقترن دائماً بفكـرة الحـرارة والتي تسمح بعمليات القطـع واللحـام والمعالجة الحرارية للمواد وحتى عمليـات

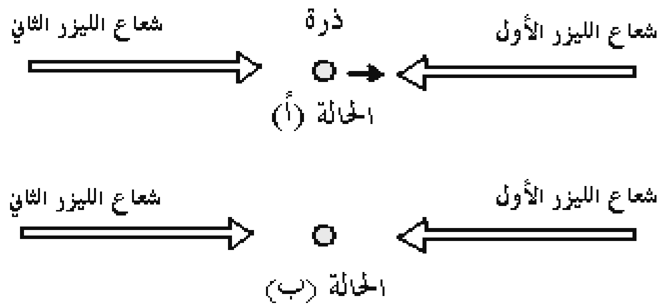
التدمير والتخريب . ولكن في السنوات القليلة الماضية دخلت وبشكل واسـع فكـرة تبريد ذرات الغازات حتى درجات حرارة منخفضة جداً من مرتبة أجزاء من مليون من الدرجة فوق الصفر المطلق .

إن الأساس في هذا التطبيق هو الفعل الميكانيكي للضوء في الأجسام الماديـة ، وبالرغم من أن التفسير العلمي في الوقت الحالي لهذا الفعل معقد للغايـة إلاّ أن آليـة التأثير تعتمد على ضغط الإشعاع الذي يؤثر به الضوء على الجسيمات المادية . وبالتالي فإن معظم تجارب تأثير الضوء في الذرات تستند من حيث الأساس على فكرة ضـغط الإشعاع .

عند وضع ذرة في مسار شعاع ليزري فإن الذرة سوف تندفع باتجاه الـشعاع ويمكن أن تتحرك بتسارع كبير جداً . وينتج ذلك من تكرار الارتدادات التي تحـدث للذرة كلما امتصت فوتوناً .وبما أنّ الفوتون يمتلك كمية حركة (دفع) فإنه ينقلها إلى الذرة بوساطة الصدم ويثير عندئذٍ تغيراً في السرعة الذرية وفق اتجاه شـعاع الليـزر ، وهذا التغير في السرعة الذي يحدثه الفوتون يختلف باختلاف طبيعة الذرات وتتراوح قيمته بين بضعة ميلليمترات في الثانية وبضعة أمتار في الثانية ويـدعى هـذا التغيـر (سرعة الارتداد) . كما أنّ الذرة سوف تعاني ارتداداً عند عملية الإصدار للفوتونات (تسمى فوتونات الفلورة) بعد أن تمتصها في المرحلة الأولى . ومن أجـل الحـصول على قوة كبيرة من هذه العملية يجب أن تتكرر الدورات المترافقة بإصدار فوتونـات الفلورة بشكل أكبر ما يمكن بحيث تتبع كل عملية امتصاص لفوتون عملية اصـدار جديد له . ولتحقيق هذه الغاية يجب أن يكون طول موجة شعاع الليزر متوافقاً مـع الانتقال الذري ، وهذا يعني أنه يجب اختيار التردد لشعاع الليزر بحيث تكون طاقـة الفوتون مساوية إلى الفرق في الطاقة بين السوية الذرية الأساسية التي تتواجد فيها الذرة قبل تعريضها لتأثير شعاع الليزر وبين السوية المثارة . ولذلك فإن الفترة الزمنية الـتي تقضيها الذرة في الحالة المثارة (عمر السوية المثارة) تلعب دوراً أساسـياً في تحديـد

معدل دورات الفلورة (مع العلم أن عمر السوية المثارة هو من مرتبة sec ١٠$^{-٩}$).

ولقد ساهمت الليزرات الحديثة ذات الترددات الملائمة في تحقيق نجاحات كبيرة في عملية توجيه دفع الذرات بواسطة أشعة الليزر . ولهذا الغرض يستخدم شعاعا ليزر متماثلان تماماً - لهما طول الموجة نفسها و الاستطاعة نفسها – ولكن ينتشران باتجاهين متعاكسين تماماً كما في الحالة (أ) من الشكل (**٧ – ٨**) والتي تمثّل ذرة متحركة بسرعة ما باتجاه اليمين حيث تلاقي شعاع الليزر الأول .



الشكل (٧ – ٨)

ووفقاً لمفعول دوبلر – فيزو الذي ينص على أنه عندما نتحرك بالنسبة إلى موجة ما فاننا نلاحظ أن تردد هذه الموجة يتغير حسب اتجاه الحركة ، فيتناقص التردد عندما تتحرك الذرة في اتجاه الشعاع بينما يزداد في الحالة المعاكسة . وإذا طبقنا ذلك على الذرة الموضوعة بين شعاعي الليزر اللذين يكون ترددهما أصغر من تردد التجاوب للذرة ، فبالتالي عندما تتحرك الذرة سيبدو لها تردد الشعاع الذي ينتشر باتجاهها يقترب من تردد التجاوب مما يؤدي إلى عملية امتصاص للفوتونات ، ويسبب شعاع الليزر عندئذٍ ضغط اشعاع أكبر منه في الحالة التي تكون فيها الذرة ساكنة . وفي الجهة المقابلة سوف تنقص القوة التي يولدها شعاع الليزر الذي ينتشر في اتجاه الذرة نفسها لأن تردد الشعاع سوف يبتعد عن تردد التجاوب . و الفرق بين قوتي ضغط الشعاعين سوف تعمل كقوة معاكسة لسرعة الذرة مما يؤدي إلى تباطؤ حركتها ومن

ثم كبحها كما في الحالة (ب) من الشكل السابق ، وهذه الطريقة تدعى (تبريـد دوبلر) وهي في الواقع إحدى التقنيات التي تسمح بكبح حركة الـذرات بواسـطة تعريضها للضوء .

ومن أجل المحافظة على الذرات المبردة بأشعة الليزر لفترة زمنية أطـول يطبـق حقل مغناطيسي ساكن على المنطقة التي أُحتجزت فيها الذرات (المصيدة الـضوئية) بحيث تكون قيمة الحقل معدومة في مركز المصيدة الضوئية وتتزايد شدته كلما ابتعدنا عن المركز . ولتوليد مثل هذا الحقل تستخدم وشيعتان يجري فيهما تياران باتجـاهين متعاكسين .

إن الذرات التي نحصل عليها بهذه الطريقة تكون مبردة إلى درجـات حـرارة منخفضة جداً ، ولكن ذلك لايمكن أن يستمر لفترة طويلة أو غير محدودة وذلك لأن عمليات الامتصاص والفلورة التي تقوم بها الذرات أثناء تعريضها لحقل إشعاع سوف تجعل هذه الذرات تقوم بسلسلة مستمرة من الارتدادات مما يؤدي إلى انزياحها عـن وضع التوازن أو السكون . كما أنّ القوة المؤثرة في الذرة هي قوة وسطية وبـسبب فوتونات الفلورة التي تصدرها الذرة عشوائياً وفي كل الاتجاهات سوف تتأرجح الذرة حول هذه القيمة الوسطية للطاقة . وهذا يمثّل إثارة للذرة توافق عملية التسخين لتقوم عندئذٍ الذرة بحركة عشوائية (حركة براونية) وعندما يبلغ مسار حركتها أطـراف المصيدة الضوئية تتسرب مغادرةً إياها ، وهذا كلّه يحدث خلال ثوانٍ قليلة .

إن عملية الحصول على ذرات غير متحركة أو بطيئة تسمح في إمكانية رصدها ودراستها ، كما يمكن حينئذٍ قياس ترددات الانتقالات بين المستويات الذريـة بدقـة كبيرة . كما أن تبريد واقتناص الذرات بواسطة أشعة الليزر يفتح المجال واسعاً أمـام دراسات وأبحاث جديدة مثيرة للاهتمام سواءً بالوصول إلى درجات حرارة منخفضة جداً حيث يمكن حدوث تكاثف من نوع كمومي خاص مثل تكاثف بوز أو من جهة تطبيقات ذلك في تحقيق ساعات ذرية ذات دقة لم يمكن الوصول إليها مـن خـلال

التقنيات الأخرى .

٧-٣- تطبيقات الليزر في الكيمياء

على الرغم من التقدم الملحوظ في علم الكيمياء خلال العقود السابقة لاختراع الليزر ، إلاّ أنه لم يطرأ أي تبدل أساسي في التطبيقات الصناعية الكيميائية . فالطرائق والوسائل المستخدمة في عمليات تفكيك الروابط الكيميائية في المواد أو إعادة تشكيلها مازالت تعتمد بشكل مباشر على تغيير شروط هذه التفاعلات مثل تغيير درجة حرارة التفاعل ، تغيير الضغط ، تغيير التركيز أو إضافة وسطاء أو محفّزات للتفاعلات الكيميائية . وباعتبار أن هذه الطرائق لم تأخذ بعين الاعتبار حركية الجزيئات المتفاعلة مع بعضها البعض أو انتقائية التفاعلات الكيميائية تصبح في كثير من الأحيان غير فعالة أو مجدية لأنها تعطي إلى جانب النواتج الكيميائية المرغوبة نواتج تفاعل ثانوية إضافية غير مرغوبة ولاجدوى منها .

ومع اختراع الليزر ابتكر الباحثون الكيميائيون تقانات جديدة وحديثة تعتمد على توجيه أشعة ليزرية على الجزيئات أو المواد المتفاعلة بغية التحكم وبشكل فعال في آليات هذه التفاعلات . وقد سمحت هذه التقانات بالتحكم في نواتج التفاعلات من خلال تحديد الطرق المناسبة لها وهذا كلّه بالإستناد إلى مفاهيم أساسية في الميكانيك الكمومي تتعلّق بالصفات الموجية لكل من الضوء والمادة . كما تظهر التطورات العلمية الحديثة أن التقانات الليزرية يمكن أن تفتح أبواباً واسعة في دراسة التفاعلات الكيميائية وتوجيهها نحو مسارات مفضلة ذات أهمية كبيرة .

وتستخدم الأشعة الليزرية في التطبيقات الكيميائية في ثلاثة مجالات هي :

- الكيمياء التحليلية من خلال استخدام تقانات المطيافية الليزرية بكافة أنواعها.
- حركية التفاعلات الكيميائية وخاصة بواسطة المطيافية الليزرية ذات الأزمنة القصيرة في مجال البيكو ثانية أو الفمتو ثانية .

- التفاعلات الانتقائية وكذلك التفاعلات الكيميائية الأولية مثل تفـاعلات اصطناع المركبات الكيميائية ، تنقية المركبات من الـشوائب ، تفـاعلات فصل النظائر .

تسمح الطرق المختلفة التي تقوم بها الجزيئات بامتـصاص الطاقـة، بتحفيـز تفاعلات كيميائية ضوئية انتقائية وذلك من خلال إثارة أو تفعيل جزيئـات محـددة ضمن مزيج ما بواسطة أشعة ليزرية ذات طول موجة أو تردد محدد . فعنـد اختيـار فوتونات ضوئية ذات طاقة $h\upsilon$ تتغير وفقاً لترددها يمكن التأثير على الطاقة الداخلية للجزيئات وذلك بغض النظر عن درجة الحرارة ، وهذا يقود بالنتيجـة إلى انطـلاق تفاعلات كيميائية متعددة تختلف عن بعضها البعض بقيم طاقات التنـشيط . ولهـذا يمكن باستخدام الأشعة الليزرية تسريع التفاعلات الكيميائية أو تحفيزها ضوئياً عنـدما يكون ذلك صعباً أو غير ممكن حرارياً . وتقسم الطاقات الداخلية للجزيئـات وفقـاً لقيمها ومجال الامتصاص الموافق لها في الطيف الكهرطيسي كما يلي :

- طاقة إلكترونية E_{el} وتكون قيمتها عدة إلكترون فـولط ، وهـي توافـق امتصاص في المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي .
- طاقة اهتزازية $E_{vib} = 0,1 \cdots\cdots 0,01\, eV$ ويحـدث الامتـصاص في مجـال ماتحت الأحمر القريب .
- طاقة دورانية $E_{rot} = 0,001 \cdots\cdots 0,0001\, eV$ ويحدث الامتصاص في مجـال ماتحت الأحمر البعيد .

ومن هنا تتوضح الإمكانيات المختلفة من أجل تنشيط تفاعل كيميائي ما وفقـاً للطاقة الداخلية للجزيئات المشتركة في هذا التفاعل . فعلى سبيل المثال فإن الجزيئة التي تحتاج إلى طاقة تفكك تبلغ قيمتها عدة إلكترون فولط يمكن تحقيق ذلـك بواسـطة امتصاص فوتون ضمن المجال فوق البنفسجي أو عدة فوتونات ضمن المجـال ماتحـت

الأحمر .

كما أنّ التطور الكبير لليزرات ذات الاستطاعات العالية التي تعمل في مجـالات طيفية متعددة ساهم مساهمةً كبيرةً في تطور مجالات الكيمياء الضوئية ، مـن جهـة التفاعلات الكيميائية الأولية عند درجات حرارة منخفضة أو من جهـة التفـاعلات الكيميائية الأولية الإنتقائية . وتتعلّق هذه التفاعلات بمواصفات وخصائص أشعة الليزر التالية :

- الترابط الزماني وأحادية طول الموجة لأشعة الليزر التي تساهم في تفعيـل أو الإثارة الانتقائية للتفاعلات الكيميائية حتى عندما يكون الفرق صـغيراً بـين عصابات الامتصاص الطيفية للمواد المتفاعلة مع بعضها البعض .
- إمكانية توليف تردد أشعة الليزر بحيث تتوافق مع ترددات خطوط الامتصاص الطيفية للجزيئات أو مع الانتقالات الكوانتية ضمن الجزيئات .
- إمكانية توليد نبضات ليزرية قصيرة جداً بحيث تكون أقصر من عمر السويات الجزيئية المثارة مما يسمح بدراسة حركية التفاعلات الكيميائيـة وعمليـات الاسترخاء ضمن الجزيئات .
- الشدة الطيفية العالية لأشعة الليزر والتي تساهم في إثارة العدد الأكـبر مـن الجزيئات الداخلة في التفاعل .
- الترابط المكاني لأشعة الليزر والذي يسمح بتركيز أو تمحرق أشعة الليـزر في مساحة صغيرة جداً مما يساعد على إثارة التفاعلات الكيميائية في نقاط محددة وحجوم صغيرة من العينات .

وبالإضافة إلى ذلك تستخدم أشعة الليزر في عمليات تخصيب أو فصل نظـائر العناصر الكيميائية وفي عمليات تنقية المواد من الشوائب .

ففي عمليات التخصيب أو الفصل للنظائر يعتمد على الانزيـاح في خطـوط الامتصاص الجزيئية أو الذرية للنظائر بسبب ارتباطها بعدد النيوترونات المختلـف في

نوى ذرات النظائر . وتحدث عملية فصل النظائر الذرية من خلال الاختلافات في كل من الكتلة (خاصة بالنسبة للعناصر الخفيفة) ، حجم النواة والسبين النووي المختلف . فالاختلاف في الكتلة يؤدي إلى انزياح في التردد وفقاً للعلاقة :

$$\Delta \upsilon \approx \upsilon \cdot \frac{m \cdot \Delta M}{M^2}$$

حيث : m كتلة الإلكترون .

M كتلة النواة .

ΔM الفرق بين كتلة النظائر .

أما بالنسبة إلى النظائر في الحالة الجزيئية المعتمدة على عصابات الامتصاص الاهتزازية، فعلى سبيل المثال يحدث انزياح في الترددات الاهتزازية في الجزيئات الثنائية الـذرات بالمقدار :

$$\Delta \upsilon = \upsilon \cdot \frac{M'(M_1 - M_2)}{2M(M_1 + M_2)}$$

M_1 و M_2 كتلة كل من النظائر .

M' كتلة الذرة المرتبطة مع النظائر .

وكمثال على ذلك عملية تخصيب اليورانيوم من فلوريد اليورانيـوم $^{235}UF_6$ إلى المركب $^{238}UF_6$ حيث تتم هذه العملية بنسبة ٢٪ . وكما هـو معلـوم فـإن لنظيري اليورانيوم مستويات من الطاقة تختلف قليلاً عن بعضها البعض ، لذلك فـإن مايمتصه النظير الأول من أشعة يختلف في طول الموجة عن الأشعة التي يمتصها الـنظير الآخر .

فعملية فصل النظيرين تقوم أولاً على إثارة أحدهما بواسطة شـعاع ليـزر ذي طول موجة مناسب ثم العمل على فصلهما قبل أن يعود النظير المثار إلى مستوى طاقته الأساسي . وبالتالي فإن أحد الحلول يقوم على حثّ النظير المثار على التفاعل بسرعة كبيرة مع مادة وسيطة لكي يعطي مركباً جديداً يمكن إزالته من مزيج النظيرين بسهولة

تاركاً بذلك النظير الآخر بمفرده . ويشترط عند انتقاء المادة الوسيطة أن تكون سرعة تفاعلها مع النظير المثار أكبر بكثير من سرعة تفاعلها مع النظير الآخر في مستوي طاقته الأساسي .

أما استخدام أشعة الليزر في الكيمياء من أجل تنقية المواد فإنه يمكن تطبيق هذه التقانات في التفاعلات التي تعطي نواتج تلوث أو شوائب ، وبحيث تكون عملية فصل الملوثات من المواد الأساسية سهلة . وتلائم هذه التقنية بشكل خاص من أجل الحصول على مواد أولية عالية النقاوة والتي تستخدم في تصنيع عناصر الإلكترونيات الميكروية والتي تتأثر خصائصها الفيزيائية بشكل كبير بالملوثات حتى من أجل تراكيز صغيرة من مرتبة $١٠^{-٩}$.

على سبيل المثال تتم تنقية $SiH_٤$ الذي يعتبر مادة أولية أساسية في تصنيع عناصر أنصاف النواقل من الملوثات مثل : $PH_٣ , ArH_٣ , B_٢H_٦$ من خلال عمليات التفكك الضوئية باستخدام ليزر فلوريد الأرغون *(Ar F-Laser)* والذي يصدر أشعة ذات طول موجة $(\lambda = ١٩٣\ nm)$.

وعند تنقية المواد الذرية تستخدم ليزرات مستمرة تعمل على إثارة الذرات إلى مستوى طاقة يقع تحت طاقة التأين وذلك على مرحلتين ، ومن ثم يطبق حقل كهربائي من أجل حدوث عملية التأين .

٧-٤- تطبيقات الليزر في العلوم الحيوية والطب:

منذ اختراع الليزرات الأولى والتعرف على خصائص أشعتها بدأ التفكير حول إمكانية استخدامها في العلوم الحيوية والطب . ولقد تمت الاستفادة من هذه الأشعة سواء في عمليات التشخيص والمعالجة أو في الأبحاث الطبية – الحيوية ، حيث تحققت نتائج إيجابية جيدة وسمحت بفتح المجال واسعاً أمام السعي لإيجاد إمكانات وتطبيقات جديدة .

كما أن شعاع الليزر يتميز بخصائص عديدة استفادت منـها العلـوم الطبيـة استفادةً كبيرةً مثل : شدة شعاع الليزر أو الشدة العالية للنبضات الليزرية ، إمكانية تجميع طاقة شعاع الليزر في نقطة صغيرة وكذلك خاصية الانتقائية في تأثير شـعاع الليزر على المادة الحية بحيث يمكن تعطيل وتدمير بعض الخلايا في الأنسجة الحية والتي لايمكن الوصول إليها مباشرة عندما تكون امتصاصيتها للأشعة الليزرية أكثر من الخلايا الأخرى التي حولها .

تؤدي عملية التأثير المتبادل بين أشعة الليزر ومكونات الأنـسجة الحيويـة إلى تغيرات نوعية في هذه الأنسجة ، مما يجعل هذه الأشعة مفيدة في المعالجة الطبيـة . و يعتمد هذا الأمر على آليات تأثير مختلفة مثل : تسريع العمليات الكيميائية الحراريـة ، تحرض التفاعلات الكيميائية الضوئية وكذلك من خلال توليد مفاعيل ميكانيكية .

ولكن يجب التنويه إلى أن هذه الأشعة ليست الاّ حزمة ضوئية مركّـزة وذات طول موجة محدد بدقة ويمكن الاستفادة من تأثيرها على أو داخل الأنسجة الحية وهذا يعني أنه لكل نوع من المعالجة الطبية يجب اختيار الليزر المناسب من حيث طول الموجة و الاستطاعة وطريقة العمل (نبضي أو مستمر) . فمثلاً الليزرات التي يقـع طـول موجتها في المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي تستخدم بشكل أساسي في معالجـة الأمراض الجلدية بأنواعها المختلفة بالإضافة إلى استخداماتها لمعالجة الأورام والالتهابات ، بينما تستخدم ليزرات أنصاف النواقل في الجراحة العامة وفي معالجة أمـراض الفـم ومعالجة جذور الأسنان ، أما الليزرات ذات الاستطاعات العالية مثل ليزرات أكـسيد الكربون فتلاقي استخداماً واسعاً كمشرط حاد في العمليات الجراحية .

والجدول التالي يبين عدداً من أهم الليزرات المُـستخدمة في المجـالات الطبيـة المختلفة و يبين مواصفاتها.

نوع اللازر	طول الموجة nm	طريقة العمل	الاستطاعة W	طاقة اللازر J	زمن التعرّض للأشعة وتردد النبضات (PRF)
Excimer: ArF KrF XeCl	 193,1 248,4 308,0	puls		0,05 ...1	8 ns - 15 ns PRF: 500 Hz
Argon-Ion	488 / 514,5	CW	0,5 - 20		
Krypton-Ion	406,7 – 799,3	CW	0,3 - 5		
Cu-Vapour	510,5 / 578,2	puls	70	0,002	25 ns - 40 ns PRF: 20 kHz
Nd: YAG-SHG	532	CW	0,1 - 20		
He:Ne	632,8	CW	0,001 - 0,025		
dye-Laser	490 – 790	puls CW	4	0,05 - 0,3	ns - 1000 s PRF: 1 Hz - 10 Hz
Rubin	694,3	puls		0,05 - 3	1-3 ns PRF: 1 Hz
Alexandrit	755	puls			100 ns, 20 ms
GaAlAs	670 – 910	puls CW	0,05 - 50		
Nd:YAG	1064 / 1318	CW puls	0,1 -120	0,1 - 2	0,1 s - CW 10 ns - 30 ns PRF: 100 Hz
Ho:YAG	2080	puls	0,1 - 20		µs PRF: 20 Hz
Er:YSGG	2790	puls	0,1 - 15		µs
Er:YAG	2940	puls	0,1 - 15		µs PRF: 30 Hz
CO_2	10600	CW puls	0,1 - 100		µs - ms

وانطلاقاً من ذلك يمكن التركيز على التطبيقات الطبية لأشعة الليزر في المجالات الأساسية التالية : الجراحة الليزرية الحرارية ، الجراحة الليزرية الدقيقة واللاحرارية والمعالجة الكيميائية الضوئية للأورام السرطانية بأشعة الليزر .

أ- الجراحة الليزرية الحرارية

بما أن أشعة الليزر تتميز بكثافة تدفق إشعاع عالية فإنها تؤدي إلى تسخين الأنسجة الحية التي تمتصها ، مما يسبب في تبخير المواد الحية (كالسوائل الموجودة في الأنسجة الحية) أو تدمير وتخريب الأنزيمات والبروتينات (عمليات التخثر الحرارية) .

وهذا التأثير المترافق مع عمليات التبخير ، التخثر أو القطع يمكن الاستفادة منه في استعمال التقانات الليزرية في المجالات الطبية المختلفة .

ولوصف المفعول الحراري لأشعة الليزر نعتمد على مبادئ عمليات الامتصاص، التبعثر ، الناقلية الحرارية و تفاعلات الأنسجة الكيميائية الحرارية .

فعند اختراق أشعة ليزر ذات توزع شدة لمقطعها العرضي $I_{(r)}$ لمادة حيوية ، فإن شدة هذه الأشعة سوف تتناقص مع ازدياد مسافة التغلغل z داخل المادة بسبب عملية الامتصاص وفقاً لقانون بيير – لامبرت في الامتصاص :

$$I_{(r,z)} = I_{(r)} \cdot \exp(-\alpha \cdot z)$$

α معامل الامتصاص ويتعلق بطول موجة أشعة الليزر .

لاتكون هذه العلاقة محققة دائماً وذلك لأن الخصائص الأساسية للمواد (وخاصة معامل الامتصاص α) ليست ثابتة بسبب عدم التجانس في الأنسجة الحية ، ولأنها تتغير أثناء المعالجة . كما أن طاقة الأشعة الممتصة في الحجم الذي يحدث فيه التأثير سوف تتحول إلى طاقة حرارية ، وهنا يمكننا التمييز بين حالتين :

الحالة الأولى عندما تكون امتصاصية الأنسجة الحية للأشعة الليزرية عالية ، وهنا يكون تأثير شعاع الليزر كمنبع نقطي ، وينحصر تأثيره على المناطق القريبة من السطح ، كما لاتتجاوز مساحة التأثير مساحة المقطع العرضي لشعاع الليزر . وفي هذه الحالة تتحول طاقة شعاع الليزر إلى حرارة تؤثر على منطقة سطحية رقيقة جداً ، مما يسمح بعملية قطع محدودة ودقيقة . وبازدياد مدة التأثير الحراري على الأنسجة الحية يزداد عمق تأثير شعاع الليزر بسبب ظهور مفعول التفحم .

أما الحالة الثانية والتي تكون فيها الامتصاصية صغيرة ، وهنا يلاحظ تأثير حراري بسيط (إحمرار) على المناطق القريبة من منطقة التأثير وذلك بسبب عملية تشتت الأشعة الليزرية وتبعثرها .

ومن ذلك يمكن الاستنتاج أنه عند استخدام أشعة الليزر في عمليات القطع أو

التبخير للأنسجة الحية يجب اختيار أشعة ليزرية ذات طول موجة محدد تمتصه الأنسجة الحية المراد معالجتها . لذلك تستخدم ليزرات تعمل بشكل مستمر وذات استطاعات عالية كما تتميز بإمكانية التحكم في كل من منطقة التأثير (المساحة ، العمق) وكذلك في فترة التأثير . ومن هذه الليزرات الأنواع التالية :

- ليزر ثاني أكسيد الكربون ***CO_2 – Laser*** .
- ليزر النيوديميوم-ياغ ***Nd – YAG Laser*** .
- ليزرات شوارد الغازات المثالية ***Kr^+ - Laser , Ar^+ - Laser*** .

وبالرغم من الاختلاف في طول الموجة لكل من هذه الليزرات فإن لكل منها تأثيراً مختلفاً بشكل كبير عن الليزرات الأخرى ، وذلك لاختلاف امتصاصيتها من قبل الأنسجة الحية .

ب- الجراحة الليزرية الدقيقة واللاحرارية

عند استخدام نبضات أشعة ليزرية مركّزة (محرقة) يمكن الحصول على كثافة استطاعة عالية جداً تصل حتى ***(10^{10} W/cm^2)*** و تولّد في الأنسجة الحية مفاعيل بصرية محرضة ليزرياً وتقود إلى تأين هذه الأنسجة ، ويترافق ذلك أيضاً بتشكل ومضات بلازما، وهذا يقود إلى نشوء وسط شفّاف ذي امتصاصية لاخطية لأشعة الليزر . وكل ذلك يحدث على شكل صاعقة ضوئية (انفجارية) تترافق بتشكيل موجة صدم كروية تنتشر في كل الإتجاهات . وهذه العملية كلها تسبب تمزق الأنسجة الحية في نقطة تأثير أشعة الليزر .

والجراحة الليزرية الدقيقة واللاحرارية تتميز بالمقارنة مع الجراحة الحرارية السابقة بأنها لاتعتمد على امتصاصية الأنسجة لأشعة الليزر وإنما على العكس من ذلك تستخدم عند معالجة الأنسجة الحية الشفافة .

ومن أهم الليزرات التي تستخدم في هذه التقنية ليزر النيوديميوم-ياغ النبضي

الذي تتراوح استطاعته بين $(1 - 20\ mJ)$ بينما يتراوح زمن النبضة الليزرية الواحدة $(10 - 30\ ns)$.

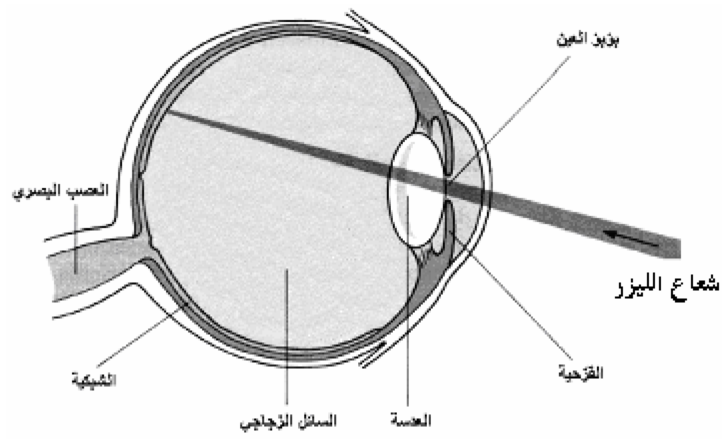
ج- المعالجة الكيميائية الضوئية للأورام السرطانية

يعتمد المفعول العلاجي للأورام السرطانية على تخريب وتدمير الخلايا السرطانية بشكل انتقائي ويحدث ذلك من خلال استخدام مركبات كيميائية فعالة ضوئياً تتوضع أو تلتصق بالخلايا السرطانية . ومن ثم تعريض هذه المركبات لأشعة ليزرية ذات طول موجة يتوافق مع ترددات امتصاصها مما يجعلها في سويات طاقة مثارة تسمح لها بالتفاعل كيميائياً-ضوئياً مع الخلايا السرطانية . وبعد ذلك تنتقل طاقة المركبات الكيميائية إلى الخلايا السرطانية مما يؤدي إلى تخريبها وتدميرها .

وفي أغلب الأحيان تكون هذه التفاعلات الكيميائية الإنتقائية معقّدة جداً وذلك بسبب جزيئات الأكسجين التي تؤدي إلى تفاعلات الأكسدة الضوئية للمركبات الكيميائية وبالتالي تحدث عمليات ضوئية ديناميكية تكون غير مرغوبة .

٧-٤-١- استخدام أشعة الليزر في طب العيون

من أهم استخدامات الليزر في طب العيون ، هو توقيف عملية انسلاخ الشبكية، فعند تمزق إحدى طبقات الشبكية أو انفصالها عن الطبقة التي تليها يسلّط شعاع الليزر باستطاعة مدروسة من خلال القرنية الشفافة للعين على الشبكية ، فيخترق هذا الشعاع القرنية ومن ثم عدسة العين ليتجمع على نقطة صغيرة محددة من شبكية العين فيؤدي ذلك إلى التحامها بمشيمة العين مما يمنع الانسلاخ من التوسع كما هو مبين في الشكل التالي .



فلشعاع الليزر ميزات عديدة تجعل استعماله مفضلاً ، فمن جهة يمكن تجميع طاقة الشعاع في نقطة صغيرة جداً مما يقلل المساحة المعطّلة من الشبكية ، وهذا مهم عندما تكون منطقة الانسلاخ في وسط الشبكية وهي المنطقة التي تلعب دوراً كبيراً في رؤية التفاصيل الدقيقة للأشياء ، ومن جهة أخرى فإن المعالجة بأشعة الليزر تتم بسرعة فائقة مما لايتطلب إجراءات تخدير أو تثبيت للمريض .

ولكن تبقى المشكلة الأساسية في انتقاء شعاع الليزر ذي طول الموجة المناسب لكي يخترق القرنية ويصل إلى الشبكية ماراً بالوسط الشفاف للعين دون أن يفقد قسماً من طاقته . وتتميز كل من عدسة العين والسائل الزجاجي في العين بنفوذية عالية للأشعة في المجال المرئي ومجال تحت الأحمر القريب أي للأشعة التي تتراوح أطوالها الموجية بين (١٢٠٠ *nm* - ٤٠٠) . أما خارج هذا المجال تكون نفوذية الأشعة صغيرة جداً لدرجة تصبح عندها النفوذية معدومة . وتوجد عدة أنواع من الليزرات التي تصدر أطوالاً موجية مناسبة منها ليزر الياقوت الذي يصدر أشعة قيمة طول موجتها ٦٩٤،٣ *nm*) ، كما أن ليزر الهليوم – نيون يصدر أشعة لها طول موجة مناسب أيضاً وقيمتها (٦٣٢،٨ *nm*) ولكن يمكن أن تترافق أيضاً بإصدار أشعة في مجال ماتحت الأحمر تمتصها القرنية وتؤدي إلى أضرار بالغة .

ولكن تطبيب العيون بأشعة الليزر يقود دوماً إلى تساؤلات حول مخاطر هـذه الأشعة على العيون . فمن أهم المخاطر عملية التكثف في عدسة العين والذي ينتج عن امتصاص طاقة أشعة الليزر . فعند دخول نبضة ليزرية إلى العين فإنها تعطي من الطاقة في زمن قصير جداً مايعادل آلاف المرات ماتعطيه أشعة الشمس مثلاً عندما تـدخل العين وخلال نفس الزمن .

٧-٤-٢- استخدام أشعة الليزر في طب الأسنان

أما في مجال طب الأسنان ، فلم تستطع أجهزة الليزر حتى الآن تحقيـق تقـدم واسع يمكن من خلاله الاستغناء بشكل كلّي أو مطلق عن أجهـزة حفـر الأسـنان التقليدية ، والتي تترافق بالألم في أغلب الأحيان . ولكن يمكن الاستفادة بشكل عـام من الليزر في معالجة تسوس الأسنان لأنه من خلال توجيه شعاع الليزر على النقطـة المنخورة من السن يؤدي إلى تبخير هذا النخر وإزالته ومنع التسوس بدلاً من القـضاء على كامل السن . وانطلاقاً من ذلك يمكن اعتبار الليزر في هذا المجال جهازاً مثاليـاً لمعالجة التسوس ، لأن كثافة الطاقة العالية التي يعطيها شعاع الليزر بالإضافة إلى اللون القاتم للمكان المنخور من السن يسهل عملية امتصاص الطاقة من الشعاع بشكل فعال كما أنّ عملية توجيه شعاع الليزر تتم بسهولة كبيرة بواسـطة اسـتخدام الأليـاف البصرية .

ومن أجل التأثير الإيجابي يمكن استخدام الليزرات النبضية (أو النبضات الليزرية) حيث يكفي أن يكون زمن النبضة الواحدة من مرتبة (sec ١٠^-٣^) حتى يكـون تأثيرها فعالاً على مكان التسوس ، وبدون أن يترافق ذلك بارتفاع درجة حرارة السن الإجمالية ، كما لايحتاج الطبيب إلى استخدام التخدير الموضعي . وإذا كانت مـساحة السن كبيرة أو عميقة فيمكن في هذه الحالة تكرار النبضات عدة مـرات وفي نقـاط مختلفة حتى إزالة أثر التسوس بالكامل .

وكذلك هناك محاولات لوقاية الأسنان بواسطة الليزر عوضاً عن معالجتها ، فبما أن نخر الأسنان يبدأ بشقوق صغيرة جداً تصيب ميناء السن مما يفسح المجال للجـراثيم والبكتريا بالدخول إلى مناطق السن الحساسة والضعيفة ومن ثم إلى اللب فلذلك قـد يكون بالإمكان مراقبة مثل هذه الشقوق ومحاولة ترميمها أو لحامها بواسـطة الليـزر حيث يمكن استعمال مواد صلبة كالبورسلان والتي يمكن صهرها بواسطة الليزر لمـلء هذه الشقوق وترصيص الأسنان لتبقى سليمة فترة أطول .

وهنا يجب التذكير بأن طرق معالجة الأسنان باستخدام أجهزة الليزر هي طرق ذات كلفة مادية كبيرة تفوق بكثير كلفة الطرق التقليدية . وانطلاقاً من ذلك نلاحظ أن التطورات الكبيرة والحديثة التي يمكن أن تحصل في مجال استخدام الليزر في طـب الأسنان لاتزال في أغلبها محصورة في مجال الأبحاث العلمية وتحتاج إلى فترة من الـزمن لتأخذ طريقها إلى حيز التطبيق في الحياة اليومية .

٧-٥- تطبيقات الليزر في الاتصالات:

عرفت فكرة استخدام الضوء في نقل المعلومات كانت معروفة منـذ منتـصف القرن الماضي ، حيث أُستخدمت وبنجاح منظومات تعمل في مجال الأشـعة ماتحـت الحمراء ولكن خاصية عدم الترابط لهذه الأشعة وبالتالي المسافة المحدودة التي يمكن لهـا اجتيازها لم تسمح بتطبيقات واسعة لهذه المنظومات . والتطـور الكـبير في أجهـزة وتقانات الليزر ساهم في توفير منبع ضوئي ذي خصائص ممتازة من جهة ترابط الأشعة التي يصدرها وبشكل خاص طول الترابط الكبير . لذلك نلمس التقـدم الواسـع في استخدام أجهزة نقل المعلومات الليزرية في المجالات المختلفة العلميـة و الـصناعية و التجارية ....

وبشكل عام تتألف منظومة نقل المعلومات الضوئية من عدة أجزاء أهمها : المنبع الضوئي (جهاز الليزر) ووحدة تعـديل ضوئية و أداة نقـل الـشعاع الـضوئي

(الكابلات البصرية) و مستقبِل ضوئي ، وأخيراً وحدة فك التعديل ومعالجة الإشارة الضوئية .

ولكن بالرغم من ذلك تبقى المشكلة الأساسية في نقل المعلومات بواسطة الضوء هي طريقة نقل الشعاع الضوئي المعدل من وحدة الإرسال إلى وحدة الإستقبال . ومن هنا يلعب الوسط الناقل للشعاع الضوئي الدور الأساسي بحيث إن خصائـصه تحـدد أبعاد وطريقة بناء منظومة النقل الضوئية بكاملها بما فيها اختيار المنبع الضوئي ووحدة الاستقبال . ويمكن التمييز بين عدة طرق : الاتصال بواسطة الشعاع المباشر ، الاتصال باستخدام الناقل الذي يحتوي على عدسات مجمعة ، الاتـصال بواسـطة الكـابلات الضوئية (الألياف البصرية) .

٧-٥-١- الاتصال بواسطة الشعاع المباشر

تعتبر طريقة الاتصال بواسطة الشعاع المباشر من أسهل الطرق ، فهي لاتتطلب وسائل إضافية مثل الكابلات والألياف الضوئية .فيكفي أن يوجه المرسل شعاع الليزر محملاً بالمعلومات من مكان محدد إلى جهاز لاقط موجود على مسافة ما حتى يستقبل الجهاز اللاقط الشعاع ، ومن ثم تستخرج منه المعلومات المنقولة . إلاّ أن هذه الطريقة تتعريض إلى خسارة وضياع في شدة أو سعة شعاع الليزر ، بفعل العناصر الموجودة في الغلاف الجوي من ذرات و جزيئات و غبار و ملوثات ... فقسم منها يمتص الأمواج الكهرطيسية وتختلف امتصاصية هذه العناصر وفقاً لتركيبها الكيميائي أو لطول موجة شعاع الليزر ، والقسم الآخر يشتت ويبعثر الأشعة . وبالإضـافة إلى ذلـك هنـاك الانفراج أو التباعد الذي يعانيه شعاع الليزر عند انتشاره على مسافات طويلة ، فكل ذلك يساهم بشكل كبير في تخامد استطاعة الأشعة الضوئية . وتحـدد النـسبة بـين الاستطاعة المستقبلة والاستطاعة المرسلة بالعلاقة التالية :

$$\frac{P_E}{P_S} = \frac{A_E \cdot A_S}{\lambda^2 \cdot R^2}$$

حيث : P_E الاستطاعة المستقبلة و P_S الاستطاعة المرسلة .

A_E و A_S مساحة مقطع ثقب جهاز الاستقبال وجهاز الإرسال .

λ طول موجة الشعاع الضوئي .

R المسافة التي يجتازها الشعاع الضوئي .

والعوامل الأساسية التي تساهم في تخامد شدة الشعاع الضوئي هي : الامتصاصية و التبعثر والانكسار الذي يعانيه الشعاع الضوئي ويؤدي إلى تغيير شكله أو جهته . ووفقاً لذلك تكون شدة الشعاع الضوئي بعد اجتيازها مسافة R محددة بالعلاقة :

$$I = I_0 \cdot e^{-\delta R}$$

حيث I شدة الشعاع بعد اجتيازه المسافة R .

δ معامل التخامد ، وهو يتألف من مجموع معاملات التخامد الناتجة عن الامتصاصية δ_1 ، التبعثر δ_2 والانكسار δ_3 . أي أن : $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$

معامل الامتصاصية δ_1 تتحد قيمته من خلال عملية امتصاص الجزيئات الموجودة في الغلاف الجوي لأشعة الليزر مثل : أكاسيد الكربون و بخار الماء و الأوزون و الآزوت و الأكسجين ....

ومن هنا تأتي الضرورة في البحث عن الأطوال الموجية لأشعة الليزر الأقل تأثراً بالعوامل الجوية . وهناك مايدعى بالثغرات الضوئية في طيف امتصاص أشعة الليزر يمكن نقل المعلومات بواسطتها لأن امتصاصها أقل من بقية الأطوال الموجية الأخرى. فعلى سبيل المثال في المجال الطيفي المحصور بين الأطوال الموجية $(\lambda = 0,4\mu m \rightarrow \lambda = 1,2\mu m)$ تكون قيمة الامتصاصية أصغر مايمكن .

يميز معامل التبعثر δ_2 الخسارة الناتجة عن عملية تبعثر الأشعة بسبب تصادمها مع جزيئات الغازات الموجودة في الغلاف الجوي كالغبار و الأبخرة و الضباب و المطر.....

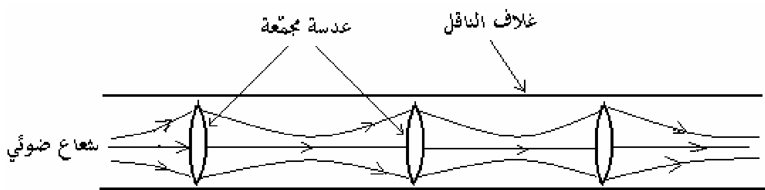
وهنا تتعلّق عملية التبعثر بحجم الجسيمات ، فعندما تكون أبعاد الجسيمات

المبعثرة للضوء أصغر من طول موجة الضوء نفسه يحصل تبعثر – رايلـي ***(Rayleigh-scattering)*** وبالتالي فإن معامل التبعثر يتناسب عكساً مع القوة الرابعة لطول الموجة : $\delta_2 \sim \lambda^{-4}$. أما عندما تكون أبعاد الجسيمات المبعثرة أكبر أو تساوي طول موجـة الضوء فيحدث تبعثر – مي ***(Mie-scattering)*** وفي هذه الحالـة يرتبط معامل التبعثر مع طول الموجة بالعلاقة : $\delta_2 \sim \lambda^{-n}$ حيـث n عـدد صـحيح موجـب قيمتـه $0 < n < 4$.

أما معامل الانكسار δ_3 فهو يتعلق بتغيرات قرينة الانكسار في الغلاف الجوي بسبب الدوامات الهوائية والتي تترافق بتغيرات في درجة حرارة الهواء والتي ينتج عنـها تأرجحات مكانية وزمانية لكل من الكثافة و الرطوبة و درجة الحرارة ومايرافق ذلك من تغير في قرينة الانكسار .

٧-٥-٢- الاتصال بواسطة الناقل ذي العدسات المُجمعة

من أجل تجاوز التأثيرات السلبية للغلاف الجوي على عملية نقل المعلومات بواسـطة الشعاع المباشر يمكن اللجوء إلى إمكانية إطلاق الشعاع الضوئي داخل أنبوب يحتـوي على وسط ملائم لانتقال الشعاع فيه (غاز ذو امتصاصية صغيرة مثلاً). ولكـن في هذه الحالة يجب وضع مجموعة من العدسات المجمعة داخل الأنبوب وعلى مـسافات محددة مهمتها تجميع الضوء من جديد كلما تباعد ، وأيضاً توضع مرايا مـن أجـل التحكم في توجيه الشعاع من خلال الانعكاسات ، كما في الشكل **(٧ – ٩)** .



الشكل (٧ – ٩)

وفي بعض الحالات يمكن الاستغناء عن العدسات كلياً وذلك بتسخين الأنبوب في أماكن العدسات مما يجعل كثافة الغاز بالقرب من جدار الأنبوب أقل منها في وسط الأنبوب وهذا التغير في كثافة الغاز في مكان التسخين يلعب دور العدسة المُجمعة للضوء .

فعلى سبيل المثال من أجل ناقل ذو عدسات مجمعة طوله $1Km$ وقطره $50\ mm$ يحتاج إلى عشرة عدسات قطر الواحدة $25\ mm$ والمسافة بين العدسة والتي تليها $100\ m$ فيكون التخامد عند نقل الشعاع الضوئي $1\ dB/Km$.

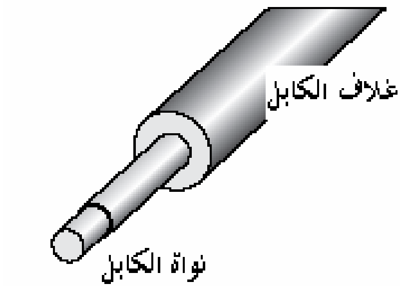
وتتميز هذه الطريقة بأن الخسارة الناتجة عن عملية الامتصاص والتبعثر خلال انتشار الشعاع الضوئي تكون أصغر مايمكن . بينما السلبيات تكمن في ضرورة الضبط الدقيق للمكونات البصرية المختلفة (عدسات، مرايا) والذي يكون أحياناً صعب التحقيق بسبب تغيرات درجة الحرارة والحركات الاهتزازية القريبة من الناقل والتي تؤثر سلباً على ضبط العدسات والمرايا , وبالإضافة إلى ذلك هناك الكلفة المادية العالية للنواقل ذات العدسات المُجمعة عندما تكون المسافة بين مكان الإرسال ومكان الاستقبال كبيرة .

٧-٥-٣- الكابلات الضوئية :

تعتمد هذه التقنية على الانعكاسات التي يقوم بها الشعاع الضوئي على جدران الكابلات من الداخل . وهذا يتطلب صناعة الكابلات بشكل يجعلها تعكس أكبر شدة ممكنة من الشعاع .

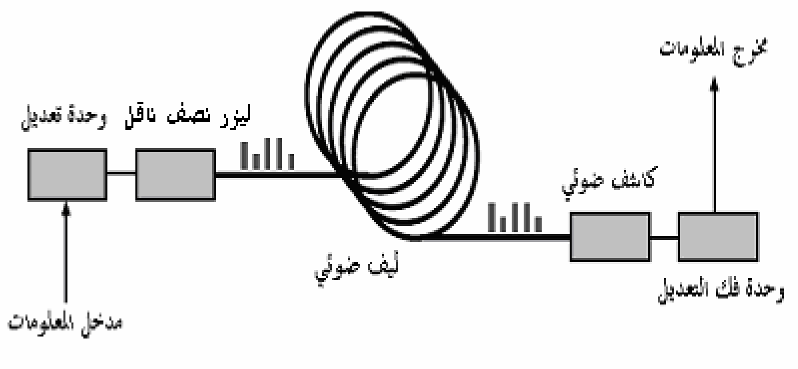
وتتألف هذه الكابلات من ألياف زجاجية تحتوي على نواة محاطة بغلاف خارجي كما هو مبين في الشكل (٧ – ١٠) ، حيث تمتلك النواة قرينة انكسار n_K أكبر من قرينة انكسار الغلاف الخارجي n_M أي أن $(n_K > n_M)$. وبالنتيجة ينتشر الشعاع الضوئي داخل نواة الكابل إلى مسافات طويلة بسبب الانعكاس الكلّي على جدران الكابل الداخلية . كما يجب أن تكون المادة الزجاجية التي تصنع منها

هذه الكابلات ذات تخامد صغير ولاتساهم في تحلّل الشعاع الضوئي .



الشكل (٧ – ١٠)

ويوضح الشكل (٧-١١) أجزاء ومكونات تقانات نقل المعلومـات بواسـطة الألياف الضوئية .



الشكل (٧ – ١١)

٧-٦- الهولوغرافيا:

عندما ننظر إلى جسم ما أو نأخذ صورة له فإن مجموعة من الأحداث تتفاعـل مع بعضها البعض ، فالضوء الصادر عن مصباح ضوئي أو من الشمس مثلاً والساقط على الجسم سوف ينعكس حاملاً إلى شبكية العين أو فيلم آلة التصوير موجة لها شكل الجسم المذكور ، ولكن تختلف سعتها من نقطة إلى أخرى ، فالنقطة القاتمة في الجسم تعكس ضوءاً ذا سعة ضعيفة ، بينما النقطة البيضاء تعكس ضوءاً شديد الـسعة، أمـا المناطق الملونة من الجسم سوف تعكـس ألوان الأشعة الموافقة لها. وبهذه الطريقـة

ترى العين الأجسام وكذلك تسجل الصور الفوتوغرافية العادية شدة الأشعة الضوئية وألوانها. ولكن سلبية هذه الطريقة تتمثّل في احتمال ضياع بعض المعلومات التي تحملها الموجة الضوئية والمتعلّقة بالمسافات التي اجتازتها ، أو نتيجة التغير الذي يمكن أن تتعريض له هذه الموجة. والمعلومات عن المسافات التي تفصل نقاط الجسم الواحد عن بعضها البعض هي أساسية لتكوين صورة ثلاثية الأبعاد لهذا الجسم ولتحقيق هذا الغرض نعتمد على التقنيات الهولوغرافية.

فالهولوغرافيا هي فن التصوير الذي يظهر الأجسام في أبعادها الثلاثة كما هي عليه في حقيقة أمرها ، ويعود أصل هذه التسمية إلى اليونانية وهي تدل على الكمال في المعلومات. وتقنيات الهولوغرافيا تسمح بتخزين الأمواج الكهرطيسية المترابطة (الضوء المترابط) المنعكسة عن الجسم المراد تصويره وذلك في مواد حساسة للضوء مثل الأفلام الضوئية أو البلورات.

تعتمد عملية تصوير الهولوغرام على مبدأ التداخل، فإذا أخذنا منبعاً ليزرياً وقسمناه إلى قسمين بواسطة مرآة نصف عاكسة بحيث يسقط القسم الأول على الفيلم الفوتوغرافي (الهولوغرام لاحقاً) ويسمى هذا القسم الشعاع المرجع ، بينما القسم الثاني يضئ الجسم المراد تصويره ثم ينعكس عنه ليعود إلى الفيلم الفوتوغرافي ويسمى الشعاع الاشارة لأنه يحمل صفات الجسم وخصائصه . و تحصل على الفيلم عملية التداخل بين هذين الشعاعين مشكّلة لوحة مؤلفة من خطوط تداخل مختلفة ، وبذلك يتم تخزين كل المعلومات التي نقلها الشعاع الاشارة على الفيلم الفوتوغرافي. ويبدو الفيلم على شكل لوحة مؤلفة من مجموعة كبيرة جداً من خطوط التداخل المتعرجة والمتناوبة بين خطوط مضيئة وخطوط مظلمة ، ولايوجد أي تشابه بين الفيلم الذي حصلنا عليه وبين الجسم الحقيقي الذي تمّ تصويره. كما أن شكل وأبعاد خطوط الانعراج تتناسب مع فرق الطور بين الموجتين الموافقتين للشعاع المرجع وللشعاع الاشارة، أي أنه عند معرفة توزع الطور للشعاع المرجع في مستوي لوحة الهولوغرام ،

يمكن من خلال شكل وأبعاد خطوط الانعراج معرفة واستنتاج توزع الطور لـشعاع الإشارة وبالتالي إعادة استخراج الصورة الافتراضية للجسم . وهذا ينطبق أيضاً علـى توزع الشدة لكل من شعاع المرجع وشعاع الاشارة لأن الهولوغرام ، يختزن بالإضافة إلى توزع الطور توزع الشدة لكلتا الموجتين الموافقتين للشعاعين المرجع والإشارة.

ولدراسة عملية تشكّل الهولوغرام يمكن وصف شدة الحقل الكهربائي الموافـق للموجة الضوئية بشكل عام بالعلاقة:

$$E = A_{(x,y,z)} \cdot \cos 2\pi\left(\upsilon t + \varphi_{(x,y,z)}\right)$$

حيث يمثّل $A_{(x,y,z)}$ سعة الموجة و $\varphi_{(x,y,z)}$ طور الموجة. فإذا كانت السعة ثابتـة بينمـا الطور تابع خطي للاحداثيات x,y,z فإن العلاقة السابقة تمثل موجة مـستوية . وإذا كانت سعة الموجة المستوية تابع للموضع أيضاً فإن العلاقة السابقة تمثل حقلاً موجياً.

وانطلاقاً من العلاقة (١) يمكن تمثيل شدة الحقل الكهربـائي لموجـة الـشعاع الإشارة المنعكسة عن الجسم وذلك في مستوي الهولوغرام ($x = ٠$) بالعلاقة :

$$E_g = A_{g_{(y,z)}} \cdot \cos 2\pi\left(\upsilon t + \varphi_{g_{(y,z)}}\right)$$

أو بالشكل العقدي :

$$E_g = A_{g(y,z)} \cdot e^{i2\pi(\upsilon t+\varphi)}$$

وكذلك شدة الحقل الكهربائي لموجة الشعاع المرجع الوارد من المنبع الضوئي وأيـضاً في مستوى الهولوغرام بالعلاقة :

$$E_r = A_{r(y,z)} \cdot \cos 2\pi\left(\upsilon t + \varphi_{r(y,z)}\right)$$

أو بالشكل العقدي :

$$E_r = A_{r(y,z)} \cdot e^{i2\pi(\upsilon t+\varphi)}$$

حيث تمثل y,z الاحداثيات لنقطة ما تقع في مستوي الهولوغرام .

وبالتالي فان الشدة $J_{(y,z)}$ الناتجة عن تداخل الموجتين السابقتين تتناسب مع :

$$J_{(y,z)} \sim \left(E_g + E_r\right)^2$$

$$J_{(y,z)} \sim A_g^2 + A_r^2 + 2A_g \cdot A_r \cdot \cos 2\pi(\varphi_g - \varphi_r)$$

أو بالشكل العقدي :

$$J_{(y,z)} \sim A_g^2 + A_r^2 + 2A_g \cdot A_r \cdot e^{i2\pi(\varphi_g - \varphi_r)} + A_g \cdot A_r \cdot e^{-i2\pi(\varphi_g - \varphi_r)}$$

حيث : A_g^2 شدة موجة الشعاع الإشارة .

A_r^2 شدة موجة الشعاع المرجع .

$A_g.A_r.cos2\pi(\varphi_g-\varphi_r)$ يمثل الحد الناتج عن عملية تداخل الموجتين وهو يحدد ويصف خطوط التداخل .

ونتيجة لعملية التداخل تؤدي الشدة $J_{(y,z)}$ إلى تلون الفيلم الفوتوغرافي المتوضع في مستوى الهولوغرام باللون الأسود بما يتناسب مع شدة خطوط التداخل وينشأ عن ذلك نفوذية سعوية $t_{(y,z)}$ ***(amplitude Transmittance)*** تكون تابعة للموضع وتتناسب طرداًمع $J_{(y,z)}$ أي أن :

$$t_{(y,z)} \sim J_{(y,z)}$$

و تكون العلاقة بينهما خطية في مجال صغير ومحدد ، لذلك يجب اختيار شدة موجة الشعاع المرجع وكذلك الفترة الزمنية التي يتعريض خلالها الفيلم الهولوغرافي للضوء بحيث تتحقق العلاقة الخطية بين $t_{(y,z)}$ و $J_{(y,z)}$.

بعد عملية تصوير الهولوغرام ومن ثم عملية تحميضه يوضع في نفس المكان الذي تم التصوير فيه وتتم اضاءته بواسطة موجة مشابهة تماماً لموجة الشعاع المرجع ، أي لها نفس طول الموجة ، نحصل بذلك على صورتين للجسم : الأولى صورة افتراضية ***(virtual image)*** والثانية صورة حقيقية ***(real image)*** مترافقة مع الافتراضية. وتكون الصورة الافتراضية خلف الهولوغرام بينما الصورة الحقيقية أمام الهولوغرام ، ولكن عند عملية إعادة إظهار الهولوغرام يتم التركيز على رؤية الصورة الافتراضية. وفي هذه الحالة يأخذ الهولوغرام دور شبكة انعراج ويعطي نتيجة لعملية التداخل المتولدة عن شبكة الانعراج صورة للجسم الحقيقي أي أنه يتشكّل خلف الهولوغرام

حقل كهربائي E تتناسب شدته طرداً مع الجداء بين النفوذية السعوية وشدة الحقـل للشعاع المرجع E_r أي أن :

$$E_{(y,z)} = t_{(y,z)} \cdot E_{r(y,z)}$$

بالاستناد إلى العلاقات (٣),(٤),(٥) نجد أن :

$$E_{(y,z)} \sim A_r\left(A_g^2 + A_r^2\right)\cos 2\pi\left(\upsilon t + \varphi_r\right) + A_g \cdot A_r^2 \cdot \cos 2\pi\left(\upsilon t + \varphi_g\right) + A_g \cdot A_r^2 \cdot \cos 2\pi\left(\upsilon t - \varphi_g + 2\varphi_r\right)$$

حيث يمثل **<u>الحد الأول</u>** من الطرف الثاني : $A_r (A_g^2 + A_r^2).\cos 2\pi(\upsilon t + \varphi_r)$ شـدة الحقل لموجة الشعاع المرجع مضروباً بمعامل نفوذية مما يؤدي إلى تنـاقص (إضـعاف) موجة الشعاع المرجع . وهذا الحد لايساهم في عملية تشكيل الهولوغرام وأحياناً قـد يكون له تأثير سلبي (تشويش) على دقة الهولوغرام ووضوحه .

<u>والحد الثاني</u> : $A_g.A_r^2 \cos 2\pi(\upsilon t + \varphi_g)$ يمثل شدة الحقل لموجة الشعاع الإشارة والتي تتناقص وفقاً لمعامل يتناسب طرداً مع A_r^2 ، وهذا الحد يوافـق تـشكيل الـصورة الافتراضية للجسم . وبالتالي يمكن باستخدام موجة مماثلة تماماً لموجة الشعاع المرجـع إعادة إظهار موجة الجسم أي (الشعاع الإشارة) وهذه هي الخطوة الأساسية في عملية التصوير الهولوغرافي.

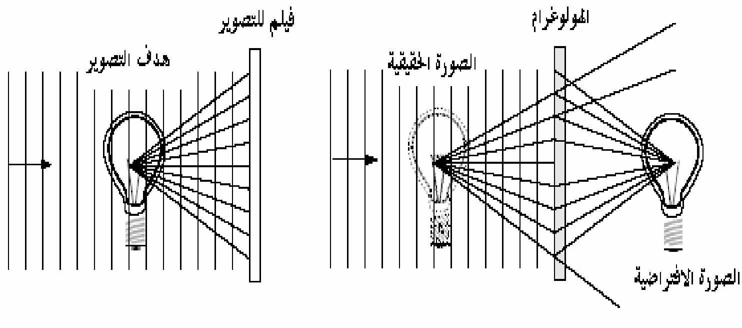
<u>والحد الثالث</u> : $A_g.A_r^2\cos 2\pi(\upsilon t - \varphi_g + 2\varphi_r)$ يمثل شدة الحقل للموجـة المترافقـة وهذا الحد يوافق الصورة الحقيقية للجسم والتي تكون مقترنة مع الصورة الافتراضية . وهي تبدي خصائص مختلفة بعض الشئ عن شكل الجسم لأن بعض الأجـزاء مـن صورة الجسم والتي تنتج عن إعادة الإظهار من النقاط الواقعة على سطح الـصفيحة الهولوغرافية سوف تغطي أو تحجب الأجزاء الأخرى والتي تنتج عن النقاط الواقعة على مسافات أعمق عن سطح الصفيحة الهولوغرافية.

وهناك عدة طرق وتقنيات للتصوير الهولوغرافي نذكر منها:

٧-٦-١- هولوغرام - غابور ***(Gabor-hologram)***

ويسمى أيضاً ***(In-Line-hologram)*** **:**

لاستخدام هذه الطريقة يجب أن يكون الجسم المراد تصويره شفافاً ويسمح بنفوذية عالية للأشعة الضوئية من خلاله. وفي هذا النوع من التصوير لايتطلّب ترابطاً كبيراً للأشعة المستخدمة في التصوير ، فالعالم غابور استخدم عند اكتشافه لهذه الطريقة ضوءاً وحيد اللون صادراً عن مصباح بخار الزئبق. أما سلبيات هذه الطريقة فتتمثّل في أن الجسم المراد تصويره يجب أن يكون ذا شفافية عالية بالنسبة للضوء المستخدم في التصوير. كما أن المنبع الضوئي والصورة الافتراضية والصورة الحقيقية تقع على خط مستقيم واحد. ويصنف هذا النوع أيضاً ضمن هولوغرام النفوذية ***(Transmission hologram)*** كما هو في الشكل (**٧ – ١٢**).



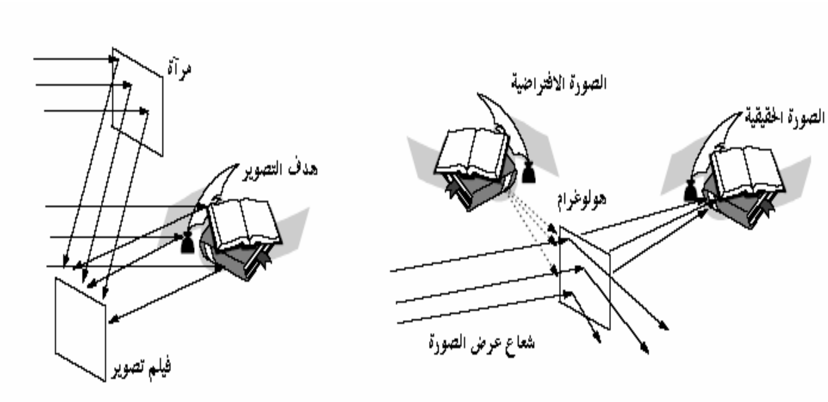
الشكل (٧ – ١٢)

ولإعادة إظهار الصورة يجب أن يعبر الضوء من خلال الهولوغرام مما يعني أن المراقب يجب أن يتواجد في جهة بينما المنبع الضوئي المستخدم لإضاءة الهولوغرام يوضع في الجهة الأخرى من الهولوغرام .

٧-٦-٢- هولوغرام - لايت - يوباتنيك (*Leith-Upatniek*)

ويسمى أيضاً *(off-Axis-hologram)* :

يتم في هذه الطريقة الهولوغرافية تقسيم شعاع الليـزر إلى شـعاعين جـزئيين باستخدام مرآة نصف عاكسة ، ذلك للحصول على شعاعين من نفس المنبع الضوئي ولهما نفس الخصائص. فالشعاع الأول الذي يمثّل الشعاع الإشارة ينعكس عن الجسم، ثم يسقط على الفيلم الهولوغرافي بزاوية ورود تختلف عن زاوية ورود الشعاع المرجع. وبذلك يمكن أخذ صور هولوغرافية لأجسام غير شفافة للضوء ولاتتوضـع في هـذه الحالة الصورة الافتراضية والصورة الحقيقية والمنبع الضوئي على خط واحد، مما يسمح برؤية الصورة الافتراضية بشكل منفرد ومستقل عن الحقيقية . أما سلبية هذه الطريقة فتكمن في ضرورة استخدام شعاع ليزري أو ضوء وحيد اللون حتماً، كما يجـب أن تكون الأجزاء البصرية والتجهيزات المستخدمة في عملية التصوير ثابتة تماماً ، لأن أي اهتزاز أو حركة خلال فترة التصوير (زمن الإضاءة) يؤدي إلى انزياح في خطـوط التداخل وبالتالي إلى تشويه في الصورة الهولوغرافية. ويـصنف هـذا النـوع مـن الهولوغرامات أيضاً هولوغرام النفوذية ، وهي موضحة في الشكل (**٧ – ١٣**).



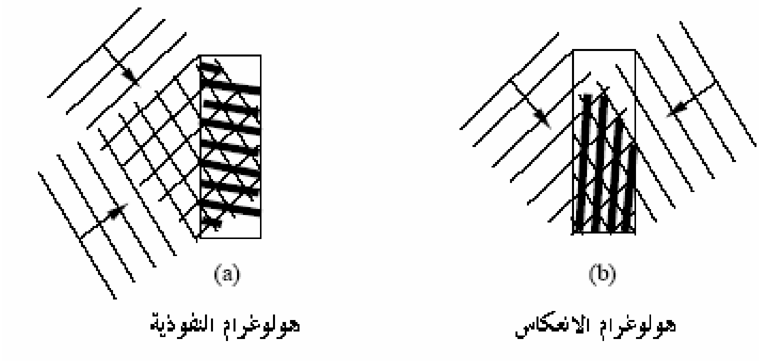
الشكل (٧ – ١٣)

٧-٦-٣- هولوغرام - دنيسجوك *(Denisjuk-hologram)*
أو هولوغرام الضوء الأبيض :

وتعتبر هذه الطريقة للتصوير الهولوغرافي من أكثر الطرق استخداماً وشـيوعاً ، حيث يستخدم الضوء الأبيض لإضاءة الهولوغرام بغية رؤية الصورة الافتراضـية . وفي هذه الطريقة يسقط شعاع الليزر بكامله على الفيلم الهولوغرافي ويوضع الجسم المـراد تصويره خلف الفيلم بحيث تكون الطبقة الفوتوغرافية الحساسة للـضوء مـن جهـة الجسم. وهذا يؤدي إلى تداخل أشعة الليزر النافذة من الفيلم مع الأشعة المنعكـسة أو المتشتتة عن الجسم لتتشكّل لدينا خطوط التداخل .

وعند عملية إعادة إظهار الصورة يجب أن يسقط الضوء على الهولوغرام مـن نفس الجهة التي ورد منها الشعاع المرجع أثناء عملية التصوير ، وعلـى المراقـب أن يكون في نفس جهة المنبع الضوئي كما في الشكل (**٧ – ١٤**).

ويدعى هذا النوع من الهولوغرافيا أيضاً هولوغرافيا الانعكـاس ***(Reflexion hologram)***.



الشكل (٧ – ١٤)

٧-٧- تطبيقات الليزر في الصناعة :

يعتمد استخدام أشعة الليزر في التطبيقات الصناعية بشكل خاص على الكثافـة العالية لطاقة هذه الأشعة مع إمكانية تركيزها أو تمحرقها على مساحة صـغيرة جـداً مهما كانت بعيدة عن جهاز الليزر بالإضافة إلى خاصية أحادية اللون والترابط والتي تلاقي تطبيقات واسعة في الدراسات الهندسية بأنواعها .

فمن خلال نتائج عملية التآثر بين أشعة الليزر والمواد الصناعية تتحدد الشروط الواجب تحقيقها للوصول إلى الهدف الأساسي من استخدام أشعة الليزر . ومن الميزات الأساسية في هذه العملية هي امتصاصية المواد لأشعة الليزر والتي تتعلّق بكل من : طول موجة أشعة الليزر ، درجة الحرارة و مواصفات المادة المرغوب معالجتها .

فمن خلال درجة الحرارة T_0 التي يبلغها سطح المادة أثناء تعريضها لأشـعة الليزر تتحدد التطبيقات الممكنة ،. فمثلاً :

- عندما : $T_0 < T_S$ ، حيث T_S درجة حرارة انصهار المادة .

ففي هذه الحالة تستخدم تقنية معالجة السطوح بالحرارة و الصدمات الحرارية .

- عندما : $T_S \le T_0 \le T_V$ ، حيث T_V درجة حرارة تبخر المادة .

تستخدم تقنيات اللِحام و الصهر وصقل السطوح .

- عندما : $T_0 > T_S$ تستخدم تقنيات القص ، الثقب ، الزخرفة .

ولقد دخلت أشعة الليزر في التطبيقات الصناعية بشكل واسع جـداً وذلـك بسبب النتائج الإيجابية التالية لتقانات استخدامها مقارنة بالتقانات التقليدية :

- منطقة التأثر الحراري محدودة وصغيرة .
- لاتسبب أي تغير ميكانيكي للمادة المصنعة .
- التقليل من التغيرات الكيميائية في تركيب المادة .
- إمكانية قص وقطع المواد اللينة والطرية مثل الأنسجة و الإسفنج ....
- العمل تحت ظروف جوية مختلفـة مثل الهواء و الخـلاء ووجـود

غازات أخرى وبدون أن تتغير استطاعة الأشعة .

- تسمح بمعالجة مناطق من المواد تصعب الوصول اليها بالطرق التقليدية .
- قابلية الاستخدام على مسافة كبيرة بين جهاز الليزر والمادة .
- إمكانية وصلها مع أجهزة تحكم وسيطرة كالحواسيب مثلاً .

والجدول (**٧- ٢**) يبين أهم الليزرات المستخدمة في التطبيقات الصناعية :

نوع الليزر	طريقة العمل	طول الموجة (μm)	قطر الشعاع (μm)
ليزر الآزوت	**نبضي**	٠،٣٣	١
ليزر الأرغون	**مستمر**	٠،٥٢.....٠،٤٦	٢
ليزر اليافوت	**نبضي**	٠،٦٩	٢
ليزر نيوديميوم-زجاج	**نبضي**	١،٠٦	٥
ليزر نيوديميوم-ياغ	**مستمر**	١،٠٦	٥
ليزر ثاني أكسيد الكربون	**نبضي + مستمر**	١٠،٦	٣٠

الجدول (٧- ٢)

و يجب عند استخدام أشعة الليزر التمييز بين حالتين من معالجة المواد :

- معالجة المواد في المجال الماكروي (مثل اللِحام و القطع و الثقب و التقسية) وذلك لأجزاء أبعادها من ٠،١ mm وحتى بضعة ميلليمترات بواسطة ليزرات ذات استطاعات عالية من $(٠،٢ - ٢٠\ KW)$.
- معالجة المواد في المجال الميكروي (مثل فصل مكونات المادة عن بعضها ومعالجة الطبقات الرقيقة من المادة) لأجزاء أبعادها من مرتبة عدة نانومترات وحتى مرتبة ميلليمتر حيث تستخدم ليزرات الجسم الصلب وليزرات الغازات المثالية .

وفي أغلب الحالات تتطلب الليزرات المستخدمة في تقانات معالجة المواد أدوات بصرية إضافية (مجموعة من العدسات والمرايا) تعمل على تركيز أو تحرق شعاع

الليزر في بقعة صغيرة جداً بغية الحصول على أكبر كثافة ممكنة لطاقة الليزر . وعند اختيار هذه الأدوات البصرية يجب الأخذ بعين الاعتبار أبعاد ومساحة مكان العمل و كثافة طاقة الإشعاع المطلوبة للعمل وكذلك قطر شعاع الليزر .

كما أنّ الوحدات التقنية لمعالجة المواد بأشعة الليزر تتطلّب بالإضافة إلى جهاز الليزر مجموعة من الأجهزة المتممة الأخرى مثل :

- منظومة التقاط وتحريك المواد المعالجة وكذلك التحكم في مسار حركتها بالنسبة إلى شعاع الليزر من أجل ضبط تأثير شعاع الليزر في المكان والشكل المناسب .
- منظومة مراقبة لكل من جهاز الليزر والمواد المعالجة .
- منظومة تحكم تعتمد على برمجيات حاسوبية تقود مراحل العمل المختلفة بشكل منتظم .

٧-٧-١- عمليات اللِحام:

تعتمد عملية اللِحام على مبدأ الصهر أو الذوبان ، حيث تصهر الأجزاء المُراد تلحيمها في أماكن محددة بواسطة شعاع ليزر . وبالتالي يمكن الاعتماد على جميع الشروط الواجب مراعاتها في تقنيات اللِحام التقليدية مع الأخذ بعين الاعتبار أنه في حالة الليزر يتم العمل بكثافة استطاعة عالية جداً , وفي حالة الليزرات النبضية يكون زمن التأثير قصيراً جداً ، ويترافق بتبريد سريع ، وقد يؤدي التدرج الكبير في درجة الحرارة قد يؤدي إلى تأثيرات إضافية غير مرغوبة ترافق عملية اللِحام مثل التقسية أو تشقق المواد المعالجة .

وتلعب أشعة الليزر دوراً هاماً في عمليات اللِحام ، على اختلاف أنواعها ، بدءاً من عملية لِحام جسمين متجانسين ومن نفس النوع إلى عملية لِحام جسمين متباينين ومن نوعين مختلفين كما هو الحال في عملية لِحام المعادن على الزجاج عند صناعة المصابيح الكهربائية والجدول **(٧-٣)** يبين عدداً من الأمثلة الإضافية :

ألمنيوم	ألمنيوم
برونز	برونز
نحاس	نحاس
نيكل	نيكل
تانتال	تانتال
ألمنيوم	نحاس
ألمنيوم	نيكل
برونز	فولاذ
ذهب	ألمنيوم
ذهب	سيليسيوم
ذهب	نيكل

الجدول (٧-٣)

كما أنّ عملية اللِحام تكون على شكل نقاط صغيرة ، يحدثها شعاع الليزر في أماكن محددة ، حيث تنتقل كمية كبيرة من الطاقة من شعاع الليزر ، فتذيب الأجزاء المُراد لِحامها في هذه النقاط . وعند اللِحام على شكل خط طويل تحدث نقاط لِحام قريبة جداً من بعضها البعض إلى درجة يمكن اعتبارها متصلة مع بعضها كما يمكن في بعض الحالات اللِحام بشكل مستمر .

ومن الليزرات المُستخدمة في عملية اللحام ليزر النيوديميوم – ياغ وذلك في لحام الأجزاء الدقيقة والصغيرة ذات سماكات حتى ١ *mm* بينما يستخدم ليزر غاز ثاني أكسيد الكربون في لحام الأجزاء السميكة حتى ٢٠ *mm* وفي هذه الحالة تكون استطاعة الليزر من مرتبة الكيلو واط .

عند اللِحام وفقاً لمبدأ الإنتقال الحراري يجب مراعاة الشروط التالية :

- كثافة طاقة الإشعاع المُستخدمة في اللِحام تكون ذات قيمة محدودة وتتعلّق بنوعية وطبيعة المواد ويجب أن لاتتجاوز القيمة (W/cm^2 ١٠^{٧}...١٠^{٦}) .

- تجنب تأثير الضغط الناتج عن تأثير أشعة الليزر على المادة في حالتها المنصهرة حتى لايسبب ذلك تشوهات في منطقة اللحام ، كما يجب المحافظة على إمكانية تبخر المادة في حده الأدنى .
- الأخذ بعين الاعتبار أن أبعاد وشكل نقاط اللِحام تتعلّق بكل من عملية الانتقال الحراري ودرجة حرارة سطح المادة وزمن تعريض المادة لأشعة الليزر وسماكة وتركيب المادة .

تلاقي عمليات اللحام بأشعة الليزر استخداماً واسعاً في لحام الأجزاء الصغيرة في التقانات الإلكترونية أو في الأجهزة الإلكترونية وذلك بسبب النتائج الإيجابية التالية مقارنة بطريقة اللحام التقليدية :

أ- الثبات الميكانيكي العالي.
ب- مقاومة الاهتزازات والصدمات أثناء عملية اللحام .
ت- الحد من الأثر الحراري المرافق لعملية اللحام على الأجزاء أو العناصر الإلكترونية .
ث- عوامل الأمان العالية أثناء عملية اللحام .
ج- عدم ملامسة عناصر أو أماكن اللحام بشكل مباشر .
ح- الحصول على نقاط لحام ذات أبعاد صغيرة جداً بالمقارنة مع عمليات اللحام التقليدية .

٢-٧-٧- عمليات الثقب والقطع :

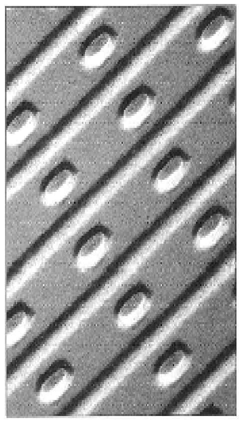
عند استخدام أشعة الليزر في عمليات الثقب يمكن التمييز بين طريقتين :

تعتمد الطريقة الأولى على شدة ثابتة لشعاع الليزر بينما تكون الشدة في الطريقة الثانية معدلة بحيث تأخذ قيماً على شكل قمم متعاقبة ، وفي هذه الحالة تزاح حجوم صغيرة من المادة في منطقة الثقب في اللحظة التي تكون فيها الشدة عظمى .

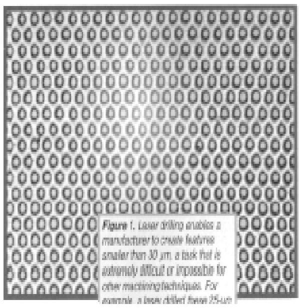
كما أنّ كلاً من درجة انصهار المادة وناقليتها الحرارية تؤثّران بشكل كبير في

عمق الثُقب ، بينما يتعلّق قطر الثُقب بكل من طاقة شعاع الليزر وطبيعة المادة . أمـا موجة الضغط الناتجة عن تأثير شعاع الليزر تؤدي إلى زيادة قطر الثقب ليأخذ قيمـة أكبر من القيمة المرغوبة ، ويلاحظ ذلك بشكل خاص عند ثقب المواد ذات الناقليـة الحرارية الضعيفة بينما ينعدم هذا التأثير في المواد ذات الناقلية الحرارية العالية كالنحاس والمعادن الأخرى .

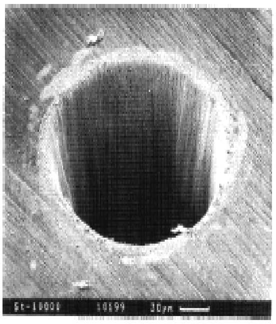
كما أنّ عملية الانصهار التي ترافق عملية الثقب تشوه الشكل الدائري للثقوب وخاصة عندما تتم عملية الثقب بنبضة ليزرية واحدة فقط ولذلك يجب استخدام عدة نبضات للثقب الواحد . والشكل (**٧ – ١٥**) يبين عدداً من الثقوب في بعض المواد المختلفة .



ثقوب في صفيحة معدنية



ثقوب في لوح من البلاستيك



ثقب في الفولاذ

الشكل (٧ – ١٥)

ومن أهم التطبيقات المعروفة ، عملية ثقب أحجار الماس التي تعتبر من أقـسى المواد المعروفة في الطبيعة . ويستفاد من أحجار الماس المثقوبة في صـناعة الأشـرطة المعدنية بعد تمرير المعدن تحت تأثير قوة سحب كبيرة من خلال الثقب . ويمكن لشعاع الليزر إحداث ثقبٍ في حجر الماس خلال دقائق بينما يتطّلب نفس العمـل بـالطرق الميكانيكية التقليدية عدة أيام ، والجدول التالي يبين أبعاد الثقب وسماكة حجر المـاس والفترة الزمنية اللازمة لثقبه بوساطة شعاع ليزري .

قطر الثقب (mm)	سماكة حجر الماس (mm)	زمن عملية الثقب (min)
٠،١	١	٢
٠،٤	١	٦،٣
٠،٩٥	١،٥	١١،٧

الجدول (٧- ٤)

ومن الليزرات المُستعملة لهذه الغاية ، ليزر النيوديميوم – ياغ وليـزر اليـاقوت النبضي حيث تكون الاستطاعة عالية ويكون زمن النبضات قصيراً مما يسبب تبخـر واقتلاع أجزاء من المادة في مكان تأثير الشعاع .

لعملية الثقب بشعاع الليزر أهمية كبيرة عند ثقب بعض القطع الـتي يـصعب الوصول اليها ، والتي يمكن أن تكون داخل الآلات الكبيرة أو مغطاة بسطوح شـفافة كالزجاج، عندئذٍ يستخدم جهاز ليزر مزود بوحدتي تحكم وتحريـك أوتومـاتيكيتين بحيث يتم متابعة عملية الثقب من مركز للمراقبة .

أما عملية قطع المواد أو قصها بأشعة الليزر ، فلا تختلف من حيث المبدأ عـن عملية الثقب ، وهي تتم بتحريك شعاع الليزر بشكل خطي باتجاه معين على سـطح المادة فيحدث ثقوباً متتالية ومتلاصقة مما يؤدي إلى قطع المادة .

ومن جهة أخرى يمكن تصنيف عمليات الثقب والقطع وفقاً لأنظمـة تـأثير الشعاع الليزري في المادة من العمليات التي تستخدم فيها الليزرات النبـضية ، بينمـا يعتبر الانقسام الحراري من العمليات التي تحدث بواسطة الليزرات المستمرة .

كما أن قطع وقص المواد غير المعدنية بأشعة الليزر يلاقي اسـتخداماً صـناعياً واسع النطاق ، وذلك منذ ظهور ليزر ثاني أكسيد الكربـون ذي التـأثير المـستمر وباستطاعات عالية . وبالرغم من أن عملية القص باستخدام الليزرات النبضية تحقّـق منطقة تأثير حراري أصغر وبالتالي آلية تبخير تضفي جودة عاليـة علـى حـواف أو أطراف القص . وعند استخدام الليزرات ذات العمل المستمر ، والتي تعتمد على آلية

التبخير في عملية القص ، فإنها تعمل بسرعة أكبر بكثير من مثيلاتها في حالة الليزرات النبضية. كما أن هذه الصفات تجعل عمليات القطع والقص بـالليزر تتفـوق علـى الطرائق التقليدية بإنتاجيتها العالية . وتضمن أشعة الليزر نظافة عالية في هذه العمليات وخاصة بالنسبة للمواد الهشة والقابلة للكسر أو المواد اللّينة أو حتى المواد القاسية .

يبين الجدول التالي بعض المعطيات التجريبية عن عمليات القطع أو القص بأشعة الليزر لبعض المواد غير المعدنية .

نوع المادة	سماكة المادة (mm)	استطاعة شعاع الليزر (W)	سرعة القص m/min
زجاج	٣،٢	٥٠٠٠	٤،٥٧
كوارتز	٣،٢	٥٠٠	٠،٧٤
خزف	٦،٥	٨٥٠	٠،٦٠
خشب معاكس	٦،٤	٨٥٠	٥،٤١
كرتون	١٩،٤	٢٠٠	٠،١٠
بلاستيك شفاف	١٠،٠	٩٠٠	٣،٥٠
بلاستيك رقائقي	٠،٤٥	٥٠٠	٤٠،٠٠
نايلون	٠،٧٦	٢٠٠	٦،١٠
اسمنت اسبستوسي	٥،٠٠	٥٠٠	٠،٠٥
جلد	٣،٢٠	٢٠٠	٠،٦٤
مطاط	٢،٠٠	١٠٠	١،٩٠

٣-٧-٧- في **معالجة السطوح**

يعتمد مبدأ المعالجة السطحية للمواد بأشعة الليزر على إمكانية إحداث تـدفق حراري ذي كثافة عالية تؤثّر في مساحة صغيرة من السطح مما يؤدي إلى تسخين المادة لدرجة حرارة عالية أو صهرها .

فعندما يصطدم شعاع ليزري بسطح مادة ما (معدن ، خليطة معدنيـة ، ...) فإن جزءاً من الشعاع سوف ينعكس عن سطح المادة بينما ينفذ الجزء المتبقي منه داخل المادة وتمتصه . والإلكترونات الموجودة في الطبقة التي تلي السطح مباشرة هـي الـتي تمتص طاقة شعاع الليزر ، حيث تتراوح سماكة هذه الطبقة بين m ١٠^-٧^.....١٠^-٦^ ، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة هذه الإلكترونات بشكل كبير بينما يكون الإرتفاع في درجة حرارة الشبكة البلورية طفيفاً .

تتم عملية انتشار الحرارة في المواد التي تعالج بأشعة الليزر وفقاً للقوانين الفيزيائية نفسها المعروفية عند دراسة انتشار الحرارة بالطرق التقليدية . كما تتعلق عملية انتشار الحرارة بكل من شدة الأثر الحراري الذي يسببه المنبع الحراري وبـالخواص الحراريـة للمواد المدروسة ومن أهمها معامل الناقلية الحرارية الذي يعبر عن قدرة المادة على نقل الحرارة أو قدرتها على السماح للتدفق الحراري بالمرور فيها . كما أن السعة الحراريـة الحجمية للمادة تلعب دوراً في تحديد شدة التدفق الحراري داخل المادة .

وعندما يكون المصدر الحراري موزعاً بشكل منتظم على السطح فـإن ذلـك يحدد مجال نفوذية التدفق الحراري في المادة بشكل تقريبي باستخدام العلاقة :

$$\delta = 2\sqrt{\alpha \cdot t}$$

δ : المسافة التي تبلغها نفوذية التدفق الحراري في المادة .

t : زمن نفوذ التدفق الحراري للمسافة δ .

α : معامل ناقلية درجة الحرارة والذي يصف سرعة تساوي درجات الحرارة عندما تكون الناقلية الحرارية غير ثابتة وهو يحدد السرعة التي تنتقل فيها الطاقة الحرارية إلى المادة . ومع ازدياد معامل ناقلية درجة الحرارة تزداد المسافة التي تبلغها نفوذية التـدفق الحراري في المادة ، وفي الحالة المترافقة بعملية انصهار يزداد عمق الانصهار .

ولإجراء المعالجة السطحية يتم تسخين الطبقات من المادة التي يصل عمقها إلى $\delta = 0{,}01.....0{,}5\ cm$ إلى درجة حرارة الانصهار أو إلى درجة حرارة قريبة من درجة

حرارة الانصهار .

ومن جهة أخرى ، فإن حالة سطح المادة المعالجة وطبيعته تؤثر تأثيراً كبيراً في عملية امتصاص الأشعة الليزرية من قبل المادة ، فعلى سبيل المثال عند ازدياد سماكـة طبقة الأكسيد على سطح المعدن كلما تضاعفت قيمة معامل الامتصاص عدة مـرات وخاصة لأشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون .

وكذلك عند زيادة خشونة السطح وتغير تركيبه الكيميائي يزداد مردود عملية تبادل الطاقة في المعالجة الحرارية للمواد بين أشعة الليزر ومكونـات المـادة . ولهـذا السبب يفضل عند إجراء المعالجة السطحية للمواد بأشعة الليزر إكساء سطح هذه المواد بطبقة تزيد من قدرة امتصاصية المادة لأشعة الليزر . ومن هذه الطبقات المستخدمة : طبقة من أكاسيد المعادن أو مسحوقها وطبقة من المواد الصباغية وطبقة مـن المـواد الكيميائية وطبقة كربونية ،....

وعند اختيار الطبقة المناسبة يجب أن تتمتع بمجموعة من الخصائص منها :

- المقدرة العالية للامتصاص بعد عملية التغطية لسطح المعدن .
- أن يكون لها درجة حرارة انصهار ودرجة حرارة تبخر عاليتان .
- أن يكون لها ناقلية حرارية عالية بحيث تسمح بانتقال الطاقة من أشعة الليزر إلى المعدن المراد معالجته .
- يجب أن تكون عملية التغطية سهلة التحضير وسهلة الترسيب على سـطح المادة وتتمتع بقدرة التصاق عالية .
- أن تحافظ على خواصها أثناء التخزين وأن تكون غير سامة .

وبشكل عام فإن الطرق المستخدمة في المعالجة السطحية متعددة ومختلفة ومـن الصعب تصنيفها وفقاً لآليات التبادل في الطاقة ولزمن هذا التبادل لأن هناك تـداخلاً كبيراً بين هذه العوامل لذلك سوف نكتفي بذكر الطرق التالية :

- **تقسية السطوح :**

تهدف عملية تقسية السطوح إلى زيادة متانة الطبقة السطحية للمواد ، ويتم ذلك بتسخين جزء محدد من سطح المادة بتعريضه لأشعة الليزر حتى تصل درجة حرارته إلى درجة حرارة عالية وبعد انقطاع تأثير أشعة الليزر فإن هذا الجزء المحدد يبرد بسرعة كبيرة بسبب انتقال الحرارة التي اكتسبها إلى الأجزاء الأخرى من المادة مما يؤدي إلى تشكل بلورات قاسية من المادة وبالتالي ازدياد قساوة السطح بشكل كبير.وإذا كانت سماكة المادة صغيرة لدرجة تكون عندها متناسبة مع أبعاد المادة نفسها عندئذٍ لايتحقق شرط الانتقال الحراري بشكل سريع مما يؤدي إلى حدوث مايسمى التخمير الليزري وهذه الحالة تلاقي استخداماً واسعاً في الصناعات الإلكترونية الدقيقة وخاصة في صناعة أنصاف النواقل .

- **صهر السطوح**

منذ اختراع الأشعة الليزرية دخلت بشكل واسع في عملية صهر السطوح وذلك بهدف تحسين خواص هذه السطوح من حيث التقليل من خشونتها أو خفض مساميتها . وبالتالي يجب اختيار أشعة ليزرية تضمن الحصول على خواص سطحية جيدة للمواد وخاصة فيما يتعلّق بالبنية الميكروية لهذه السطوح . ولكن في هذه الحالة لايمكن تحديد سرعة التبريد . ومن أجل الحصول على سطح غير تبلوري يجب أن تكون سرعة التبريد كبيرة ولهذا لايزيد عمق الصهر للطبقات السطحية عن ٥٠ μm .

- **تحفيز التفاعلات الكيميائية السطحية**

إن عملية تحفيز التفاعلات الكيميائية السطحية وخاصة في المواد الخلائطية بواسطة الأثر الحراري لأشعة الليزر أو من خلال توليد طبقة رقيقة جداً من البلازما بالقرب من سطح المادة يهدف إلى الحصول على نواتج تفاعل (تفاعل أكسدة وتفاعل إرجاع) تشكل طبقة ذات تركيب كيميائي خاص تغطي سطح المادة .

- **التأثير الصدمي**

ويعتمد ذلك على أثر الموجة الصدمية التي ترافق الأشعة الليزرية عند اصطدامها بسطح المادة والتي تؤدي إلى زيادة متانة السطح وتسمح بإطلاق التفاعلات الكيميائية-الفيزيائية ، وكذلك في تحريض الانتقالات من النوع *p-n* في أنصاف النواقل .

- **التغطية السطحية**

الهدف من هذه الطريقة هو عملية صهر لسطح المادة ثم إضافة عناصر معينة وخلطها مع السطح في منطقة الانصهار مما يؤدي إلى تشكل طبقة سطحية ذات تركيب كيميائي مؤلّف من المادة الأساسية وعنصر الخلط . وهذه التقانة تسمح بتوليد طبقة على سطح المادة تمتلك خواص مختلفة عن خواص المادة نفسها .

وعند استخدام الأشعة الليزرية في معالجة السطوح لابد من اختيار أجهزة ليزرية تتلاءم مع تقانات هذه المعالجة . فيجب أن تتمتع هذه الليزرات باستطاعة خرج عالية إن كان في حالة العمل المستمر أو العمل النبضي بالإضافة إلى وثبات في طول موجة الأشعة الليزرية . وتعتبر ليزرات الجسم الصلب مثل ليزر النيوديميوم-ياغ والنيوديميوم-زجاج والليزرات الغازية مثل ليزر ثاني أكسيد الكربون من الليزرات الأكثر استخداماً في طرائق معالجة السطوح للمواد بمختلف أنواعها .

٧-٨- تطبيقات الليزر في دراسة تلّوث البيئة

أسهم التطور الكبير في أجهزة الليزر وخاصة ما يتعلّق بتوليد أشعة ذات طول موجة محددة إسهاماً فعالاً في إمكانية مراقبة تلوث البيئة . فبواسطة شعاع الليزر تسهل مراقبة وقياس نسبة وجود بعض المواد أو العناصر الضارة للصحة في الهواء, ويتم ذلك بقياس نسبة امتصاص الأشعة الليزرية عند اجتيازها الجو الملوث أو بقياس تبعثر وتشتت هذه الأشعة عن الاتجاه الأساسي . فطول الموجة الذي تمتصه الذرات

والجزيئات الموجودة في الهواء يختلف باختلاف نوعية هذه الذرات والجزيئات وبالتالي يمكن تحديد تراكيزها في الهواء وحتى لو كانت بنسبٍ صغيرةٍ .

وبما أنّ أشعة الليزر تتميز بشدتها العالية وأحادية اللون فذلك يفسح المجال أمام استخدامها في معرفة نسب وتركيب المواد الملوثة للغلاف الجوي وخاصة فوق المـدن وعلى ارتفاعات عالية تصل إلى عدة كيلومترات، كما هو الحال عند استخدام تقانـة الليدار ***light Detection and Ranging*** ***LIDAR*** التي تعتمد في عملها على مبـدأ تبعثر الأشعة الضوئية بعد اصطدامها بالجسيمات الموجودة في الهواء أو الغلاف الجوي.

وبما أن الأشعة سوف تتبعثر في كافة الاتجاهات ، فإن جزءاً منها سيتبعثر باتجاه جهاز الليدار حيث يجمع بواسطة تليسكوب ، وينقل بعدها إلى وحـدة تـضخيم للإشارة باستخدام مضخم إشارة ***Photomultiplier*** ومن ثم تحول الإشارة الضوئية إلى إشارة كهربائية ، ليتم تحليلها زمنياً بمساعدة البرامج الحاسوبية كمـا هـو مبـين بالشكل(**٧ – ١٦**).

ويمكن تحديد المسافة z التي يقطعها الشعاع الضوئي من معرفة الزمن الـذي استغرقه الشعاع ذهاباً وإياباً من العلاقة :

$$z = \frac{t \cdot c_A}{2}$$

حيث: c_A سرعة الشعاع الضوئي في الغلاف الجوي (أو الهواء) .

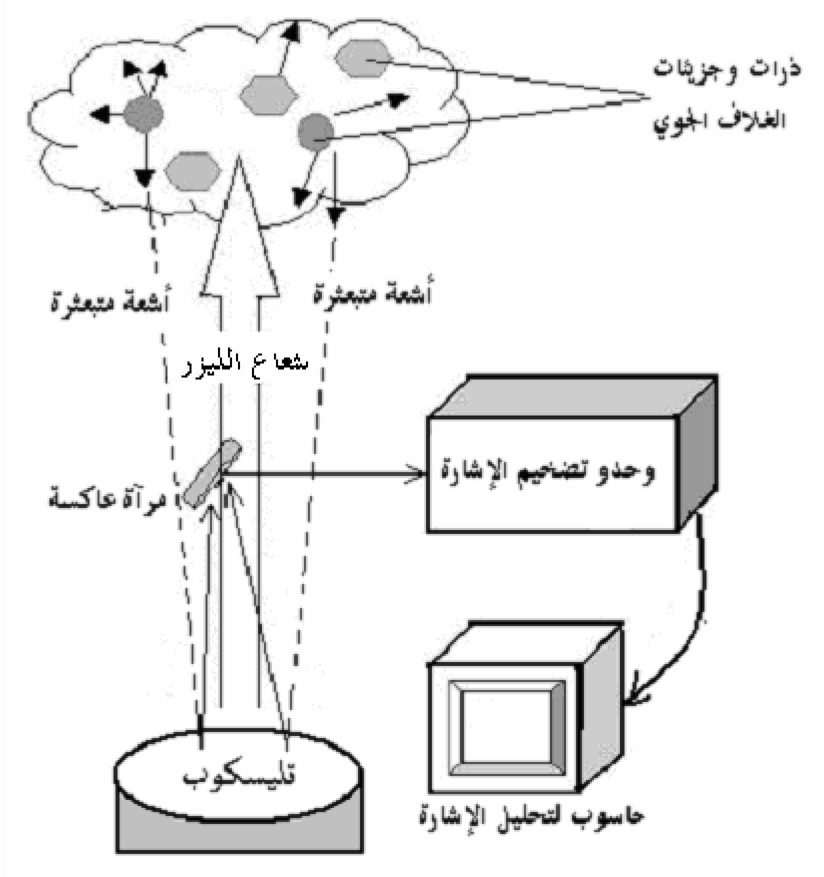
t الزمن بين لحظة إطلاق الشعاع الضوئي ولحظة عودته إلى جهاز الليدار .

كما أن قدرة التحليل العظمى للارتفاع Δz تتعلق بكل من زمن نبضة شعاع الليزر τ_L والثابت الزمني لأجهزة الكشف الإلكترونية τ_N وكذلك بالزمن الذي تستغرقه عملية التآثر بين شعاع الليزر وجسيمات الهواء τ_W أي أنّ :

$$\Delta z = \frac{c_A}{2(\tau_L + \tau_N + \tau_W)}$$

وفي الحالة العامة يمكننا إهمال زمن عملية التآثر τ_W وذلك لـصغره بالمقارنـة مـع

الأزمنة الأخرى ، وعند استعمال نبضة ليزرية مدتها $\tau_L = 10\ ns$ من ليزر نيوديميوم – ياغ نبـضي وأجهـزة كـشف إلكترونيـة ثابتـها الـزمني يتـراوح بـين $\tau_N = 50......200\ ns$ نحصل على قدرة تحليل عظمى للارتفاع تتراوح قيمتها بـين $\Delta z = 7,5......30\ m$.



الشكل (٧ – ١٦)

وتحدد شدة الأشعة المتبعثرة I_R باستخدام معادلة الليدار التي يمكن من خلالها استنتاج تراكيز ونسب الذرات والجزيئات الموجودة في الغلاف الجوي :

$$I_{R(z,t)} = P_{0(\lambda)} \cdot \frac{s \cdot c_A}{2z^2} \cdot \beta_{(z,\lambda)} \cdot \exp\left[-2\int_0^z \alpha_{(z,\lambda)} \cdot dz\right]$$

حيث: P_0 استطاعة النبضة الليزرية الواحدة التي يبلغ طول موجتها λ .

s مساحة سطح التليسكوب .

$\beta_{(z,\lambda)}$ معامل التبعثر في الاتجاه العكسي (باتجاه جهاز الليدار) .

$\alpha_{(z,\lambda)}$ معامل الانطفاء ***extinction coefficient*** .

وكذلك يمكن استخدام هذه التقانة مراقبة الغازات في الأجواء المغلقة كالمصانع والمختبرات ، وكل ذلك يمكن إجراؤه بدون ملامسة مكان القياس أو المادة المرغـوب دراستها .

وتتميز هذه التقانة في دراسة التلوث بالخصائص التالية :

- إمكانية تجنب الأماكن الخطرة أو غير المسموح التواجد فيها مثل المفاعلات النووية أو المختبرات الكيميائية التي تتعامل مع مواد سامة .
- عدم التأثير على عمليات القياس كما هو الحال عند قياس درجة الحـرارة أثناء التجارب الفيزيائية الدقيقة .
- القياس السهل والسريع على مسافات بعيدة وحجوم كبيرة مثـل النجـوم البعيدة وقمم الجبال والسيارات المتحركة ...

ويعتمد مبدأ هذه التقانة على إرسال نبضة ليزرية إلى الغلاف الجوي أو الفضاء أو في أي مجال آخر حيث تحدث عملية تآثر متبادل بين الأشعة والجسيمات (الذرات والجزيئات ...) الموجودة في تلك الأمكنة ، وبنتيجة ذلك تعاني الأشعة من عملية تبعثر (تبعثر رامان – تبعثر رايلي) وبتحليل الأشعة المبعثرة يمكن الحصول علـى بعـض القياسات مثل معرفة نوعية الملوثات وتركيبها وكذلك نسبتها وتركيزها .

ووفقاً لآلية التآثر المتبادل بين أشعة الليزر والغلاف الجوي يمكن تحديد مجالات الاستفادة المختلفة كما يلي :

- التبعثر التجاوبي : ***Resonance Scattering*** حيث يمكن قياس تركيـز ذرات الصوديوم ***Na*** في الهواء حتى تركيز مقداره ١٠^٣ ذرة في السنتيمتر المكعب

وعلى ارتفاع km ٩٠ في الغلاف الجوي .

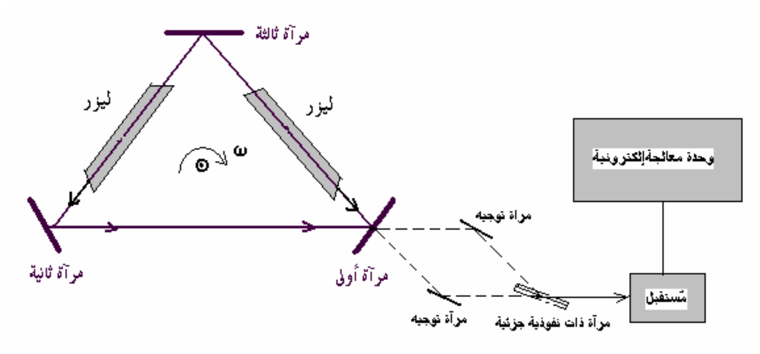
- تبعثر رامان : *Raman Scattering* ويسمح بقياس تركيز الأوزون $O_٣$ وكذلك غاز ثاني أكسيد الكبريت $SO_٢$ بدقة في التركيز تصل إلى ٠,٠٠٥ . $١٠^{-٦}$ وعلى ارتفاع عدة كيلومترات .
- الامتصاص التجاوبي : *Absorption Resonance* عند قياس تركيز ثاني أكسيد الآزوت $NO_٢$ بدقة تصل حتى $١٠^{-٦}$. ٠,٢ وعلى ارتفاع يصل حتى km ٤ .

٧-٩- قياس السرعات

٧-٩-١- قياس السرعة الدورانية

تستخدم الأشعة الليزرية في قياس سرعات الأجسام المتحركة على منحى دائري، قياس السرعة الدورانية (الزاوية) ، وذلك باستخدام الليزر الحلقي ، الذي يثبت مع الجسم المتحرك بحيث يكون محور الدوران ماراً من مركز سطح الليزر الحلقي.

والليزر الحلقي هو عبارة عن ليزرين موضوعين على ضلعي حلقة مغلقة على شكل مثلث ، ويصدران أشعة لها نفس طول الموجة ولكن باتجاهين مختلفين ، كما هو موضح بالشكل (**٧-١٧**) .



الشكل(٧-١٧)

ومن أجل قياس السرعة الدورانية (الزاوية) يستفاد من مبدأ أن زمـن دوران شعاع ليزري ضمن مرنان حلقي دوار يزداد أو يتناقص وفقاً لجهة الدوران . فإذا كان اتجاه شعاع الليزر بنفس جهة دوران المرنان فيقابل ذلك زيادةً في زمن الدوران ، أمـا إذا كان اتجاه شعاع الليزر بعكس جهة دوران المرنان فيؤدي ذلك إلى تناقص زمـن الدوران . ولقد اكتشف هذا المفعول لأول مرة العـالم *SAGNAC* في عـام **١٩٦٢** وطبقه فيما بعد كل من العالمين *MICHELSON* و *GALF* .

ففي حالة الليزر الحلقي يؤدي تغير زمن الدوران الذي يعني عملياً تغيراً في مسار الشعاع ضمن المرنان إلى انزياح في تردد المرنان . وبالنتيجة يتولد لدينا مـا يـسمى انشطار في التردد ضمن المرنان بين الاهتزازات الليزرية الناتجة عن الليزرين المتعاكسين، وهذا الانشطار يعطى بالعلاقة :

$$\Delta \upsilon = \frac{4 \cdot A}{L \cdot \lambda} \cdot \Omega$$

حيث : L طول المرنان في الليزر الحلقي .

A مساحة سطح الليزر الحلقي .

Ω السرعة الزاوية و λ طول موجة شعاع الليزر .

وبالتالي يمكن قياس هذا الانشطار في التردد من خلال تداخل شـعاعي الليـزر مـع بعضهما البعض على مرآة ذات نفوذية جزئية ، ومن ثم يمكن توجيه الحزمة الناتجة عن التداخل إلى مستقبِل وبعد ذلك إلى وحدة معالجة إلكترونية .

و تستخدم في هذا النوع من قياس السرعة الليزرات الغازية التي تصدر أشـعة ضمن المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي مثل ليزر الهليوم-نيون . كما أنه بالاعتماد على هذه الطريقة يمكن قياس سرعات دورانية صغيرة جداً مـن مرتبـة $^o/h$ ٠،٠١ ، وبالتالي وفقاً لهذه الحساسية تكتسب الليزرات الحلقية أهمية كبيرة من أجل استخدامها في الجيروسكوبات الضوئية ، والتي لها تطبيقات واسعة في أجهزة التوجيه وكذلك في أجهزة الملاحة الجوية و الفضائية .

٧-٩-٢- قياس السرعة الخطية

تعتمد الطريقة الأكثر استخداماً في هذا المجال على مبدأ انزياح الترددات وفقـاً لمفعول دوبلر ، وذلك نتيجة عمليات انعكاس أو تبعثر (تشتت) الأشعة على سطوح الأجسام المتحركة . ويمكن قياس الانزياح في التردد من خلال عملية التداخل الضوئي بين الأشعة المنعكسة أو المُبعثرة من جهة وبين أشعة الليزر الأساسية من جهة ثانيـة . وإذا أهملنا مفعول دوبلر التربيعي ، أي عندما تكون ($v << c$) ، فإن الانزيـاح في التردد يعطى بالعلاقة :

$$\Delta \upsilon = \frac{1}{2\pi} \cdot \vec{v} \cdot \left(\vec{k}_S - \vec{k}_O \right)$$

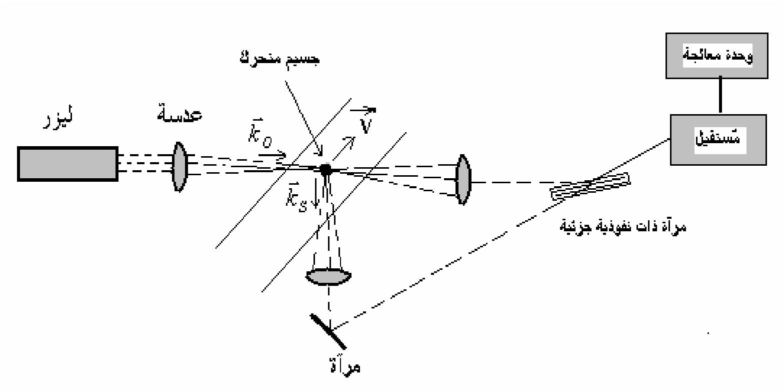
حيث : v متجهة السرعة الخطية .

k_S متجهة العدد الموجي للأشعة المنعكسة أو المُبعثرة .

k_O متجهة العدد الموجي للأشعة الساقطة على الجسم المتحرك .

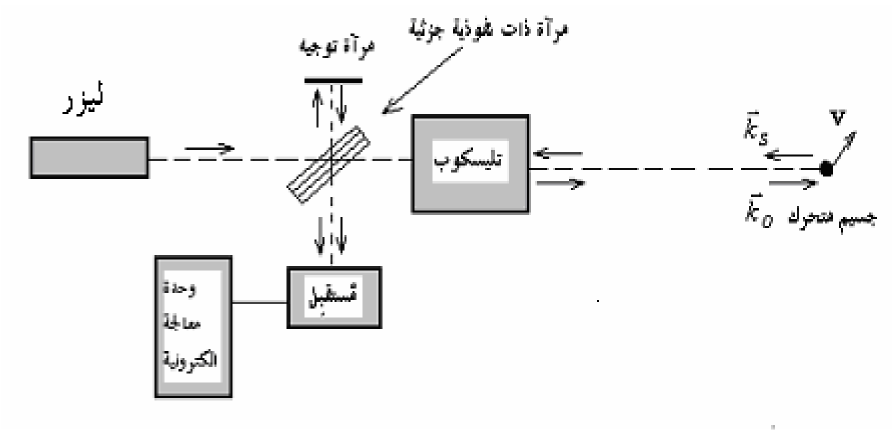
يستخدم في هذه الطريقة ترتيب-مايكلسون ، حيث توضع عـواكس لأشـعة الليزر عند الجسم المتحرك ، وهذا يسمح بقياس سرعة الأجـسام المتحركـة علـى مسافات مختلفة . وفي حالة الاعتماد على الضوء المُبعثر يمكـن بالإضـافة إلى قيـاس سرعات الأجسام الماكروسكوبية قياس سرعة جريان أو تدفق الغازات والسوائل عندما تحتوي على مراكز تبعثر الضوء الساقط عليها .

أما مبدأ هذه الطريقة فهو موضح بالشكل (**١٨-٧**) ، حيث يركـز شـعاع الليزر بواسطة عدسة على مساحة صغيرة في المنطقة التي تتحرك فيها الأجسام ، ومـن ثم يجمع الضوء المُبعثر عن هذه الأجسام بواسطة عدسة أخرى ، ويوجه بواسطة مرآة عاكسة إلى مرآة ذات نفوذية جزئية حيث يتداخل مع شعاع الليزر الأساسي الذي مر عبر المادة ، ومن ثم إلى مستقبِل ليقاد بعد ذلك إلى وحدة معالجة إلكترونية .



الشكل(٧-١٨)

وبالإضافة إلى هذه الطريقة في قياس السرعة الخطية يمكن استخدام مقياس تداخل-مايكلسون ، كما في الشكل (**٧-١٩**)، حيث تستبدل المرآة في الطريقة السابقة بسطح الجسم المتحرك ، والذي يبعثر الضوء . وبذلك يمكن قياس سرعات الأجسام المتحركة عندما تكون على مسافات بعيدة . وتستخدم هذه الطريقة بشكل خاص في دراسة الغازات المنطلقة والناتجة عن عملية احتراق الوقود في الصواريخ .



الشكل(٧-١٩)

١٠-٧ تطبيقات الليزر في المجالات العسكرية:

فتح اكتشاف الليزر المجال واسعاً للاستفادة منه في التطبيقات العسكرية، ولكن ليس كوسيلة أو أداة للقتال، وإنما كوسيلة مساعدة ترفع من مستوى التجهيزات العسكرية القتالية وتحسن أداءها .

فلقد راودت العلماء أفكار تقضي باستخدام الحزم الليزرية في عمليات اعتراض الصواريخ العابرة للقارات وتشكيل ما يشبه الدرع الوقائي ، لكن لم يعلن عن نجاح مثل هذه الأفكار حتى الآن ، وذلك لأنه من أجل تفجير صاروخ يحمل رؤوساً نووية نحتاج إلى طاقة عالية ومن مرتبة *KW* ولفترة زمنية تصل إلى دقائق . هذا مع العلم أن مثل هذه الصواريخ تحلّق على ارتفاعات عالية في الغلاف الجوي (عشرات الكيلومترات) ، ونظراً لتزايد انفراج شعاع الليزر مع تزايد المسافة ، فإن الطاقة اللازمة سوف تزداد أيضاً لتصل إلى مرتبة *MW* ، وحتى لو تم الحصول على هذه الطاقة فإن عملية إيصالها إلى مسافات بعيدة ، هي عملية شبه مستحيلة ، لأن طاقة بهذه الشدة سوف تؤين الذرات والجسيمات المتواجدة في الهواء ، وتمنع الشعاع بالتالي من بلوغ هدفه .

ولذلك تحول الاهتمام إلى الاستفادة من أشعة الليزر في الاتصالات العسكرية كوسيلة اتصال مباشر لنقل المعلومات والأوامر أو كوسيلة تصوير من أجل استخدامها في المواقع المتقدمة من جبهات القتال .

كما تمت الاستفادة من خصائص أشعة الليزر بغية استخدامها في قياس المسافات بدقة كبيرة جداً ، وتحديد الأهداف وتتبعها .

ومع تطور تقانات الصواريخ دخل الليزر كأداة توجيه ذات فعالية كبيرة، ودقة لامتناهية في التوجيه نحو الأهداف . ولهذا الغرض يمكن لأحد الأفراد أو الآليات أو حتى الطائرات أن توجه شعاعاً ليزرياً نحو الهدف ، فينعكس هذا الشعاع عنه في كافة الاتجاهات حيث يمكن التقاطه ، وتوجيه الصواريخ إلى النقطة التي انعكس عنها

الشعاع بدقة كبيرة . وبهذه الطريقة يكون القصف أكثر دقة وحتى لو تدخل سـلاح الطيران عندما يكون الجيشان متقاربين من بعضهما .

أما فيما يتعلق بمستقبل هذه التطبيقات فإن مجالات الليزر في المواضيع العسكرية مازال يستأثر باهتمام مراكز الأبحاث العسكرية العالمية ، ولكنه يجري بسرية تامة مـا يجعل معرفتنا محدودة جداً بمدى التقدم الذي تحقق في هذا المجال .

الفصل الثامن

أمان الليزر

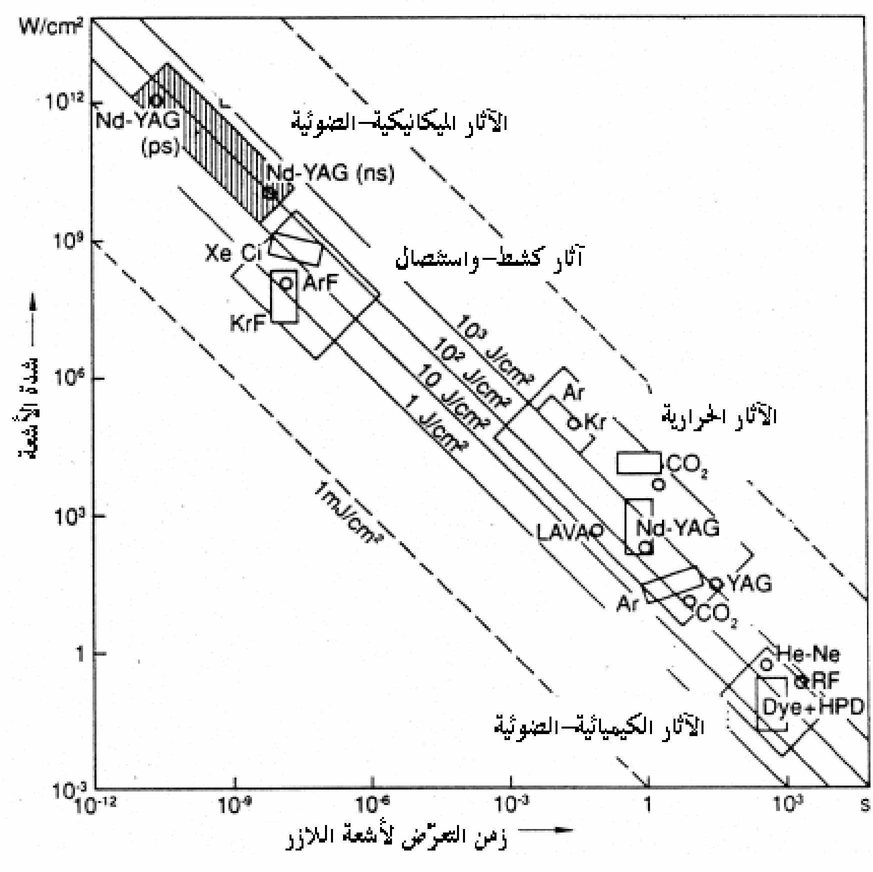
٨-١- مقدمة :

تستخدم أشعة الليزر منذ أكثر من أربعين عاماً في مجالات كثيرة تقنية ، علمية ، طبية ، عسكرية ،.... كما أن التطور التقني السريع في انتاج أجهزة الليزر باستطاعات مختلفة أدى إلى انتشار واسع في تطبيقات واستخدامات هذه الأجهزة وكذلك إلى انخفاض كبير في كلفة انتاجها .

ولكن بالرغم من الاستخدامات الجيدة والإيجابية وخاصة في المجالات الطبية ان كانت علاجية أو تشخيصية فإن ذلك يترافق دائماً بتأثير مباشر لأشعة الليزر على الإنسان ، وخاصة على سبيل المثال بعد أن أصبحت معالجة بعض أمراض الجلد ممكنة باستخدام أشعة الليزر . كما أن توفر أجهزة الليزر وبأسعار رخيصة ساهم في ازدياد انتشارها واستخدامها في مجالات عديدة من حياتنا اليومية . ولكن تبقى الحالة الأكثر خطورة هي عند العمل مع أجهزة ليزرية ذات استطاعات عالية دون المعرفة بتأثيرها على الانسان أو مدى خطورة التعامل مع هذه الليزرات على صحة الانسان . كما أن هناك الكثيرين ممن يستخدمون أجهزة الليزر في أعمالهم دون أن يكون لديهم أية خبرة أو تأهيل مناسب حول طبيعة هذه الأجهزة أو الأشعة الليزرية وبالتالي فانهم يجهلون تماماً أضرارها وأخطارها وكذلك طرق الأمان الملائمة عند استخدامها .

انطلاقاً من ذلك يجب علينا عند العمل بأشعة الليزر الانتباه إلى الأضرار التي يمكن أن نتعريض لها وهي على نوعين : أضرار ليزرية مباشرة تنتج عن تأثير أشعة الليزر الصادرة عن المنبع الليزري مباشرة على الجسم البشري غير المحمي بوسائل الأمان الملائمة مثل تضرر العيون أو الحروقات الجلدية أو تأثير أشعة الليزر المنعكسة

عن سطوح عاكسة أو مشتتة ، وكذلك أضرار ليزرية غير مباشرة تنتج عن التجهيزات المساعدة والمتممة لعملية تشغيل أجهزة الليزر أو تأثير أشعة الليزر على الوسط المحيط بمكان العمل مما يسبب اندلاع حرائق أو مواد سامة تنتج عن تفاعل أشعة الليزر مع العينات التي نقوم بدراستها ، والشكل **(١-٨)** يوضح العلاقة بين شدة الأشعة الليزرية وزمن التعريض لها والآثار التي تسببها .



الشكل(٨-١)

لذلك لابد من شرح هذه الأضرار بالتفصيل من أجل ايجاد قواعد محددة وواضحة يجب التقيد بها عند العمل بأشعة الليزر من أجل الحفاظ على سلامة الأفراد .

٨-٢- الأضرار الليزرية المباشرة :

إن احتمال التعرض إلى أضرار صحية عند العمل بأشعة الليزر وكذلك نوعية هذه الأضرار تتعلّق بعدة عوامل منها طاقة أشعة الليزر وكثافة الأشعة وطول الموجة ومدة التعرض للاشعاع بالإضافة إلى طبيعة الجزء من جسم الانسان الذي يتعرض لأشعة الليزر ، لذلك يمكن تقسيم تأثير هذه الأشعة إلى ثلاثة مفاعيل :

٨-٢-١- المفعول الحراري :

يمتد التأثير البيولوجي لهذا المفعول من حالة احمرار الجلد وحتى حالة الاحتراق وهو المفعول الأكثر ضرراً ويتعلّق بكثافة طاقة الأشعة والاستطاعة المؤثّرة والفترة الزمنية التي يتعرض لها الجسم للأشعة وكذلك العمق الذي تؤثّر فيه . ويؤدي هذا التأثير إلى تشكّل خط حاد يفصل بين البقعة التي تأثّرت بالأشعة والوسط المحيط بها دون أن يؤدي ذلك إلى نزيف دموي ، وهذا التأثير يستخدم عادة في العمليات الجراحية الدقيقة.

٨-٢-٢- المفعول الحراري-الصوتي اللاخطي :

يظهر تأثير هذا المفعول عندما تكون كثافة الطاقة والاستطاعة عاليتين جداً. ففي هذه الحالة يترافق المفعول الحراري بمفعول آخر صوتي لذلك سمي بالمفعول الحراري-الصوتي وهو عبارة عن مفعول لاخطي ، حيث يؤدي ذلك إلى احتراق شديد في الجلد لدرجة التبخّر الذي يسبب انفجار خلايا البشرة مترافقاً بأصوات تنتج عن ذلك الانفجار . كما يمكن أن يؤدي إلى توليد موجات ضغط عالية على العين أو الدماغ ونلاحظ هذه الحالة عند استخدام الليزرات النبضية حيث تكون النبضة الليزرية قصيرة جداً وذات كثافة طاقة واستطاعة عاليتين جداً . فعندما يتعريض الجلد لمثل هذه النبضات تتولد موجات ضغط عالية الشدة تسبب تمزق الجلد وتتناثر أجزاء صغيرة من المنطقة التي تعريضت للتأثير ويترافق ذلك دائماً مع نزيف دموي حاد .

٨-٢-٣ - المفعول الكيميائي-الضوئي :

ينتج هذا المفعول عن تأثير الأشعة الليزريـة ذات كثافـة طاقـة واسـتطاعة منخفضتين على مكونات خلايا الجلد مما يؤدي إلى تغيرات وظيفيـة في التفـاعلات الكيميائية التي تحدث ضمن مكونات الخلايا . ولكن آلية هذا التأثير مازالت غامـضة بعض الشئ لأنه غير محدد تماماً فيما إذا كان الضرر الناتج ذا آثار محدودة أم يترافـق ذلك بتأثيرات مختلفة على الجينات الموجودة ضمن الخلايا .

إن أكثر الأجزاء من الجسم البشري تعرضاً للأضرار الناتجة عن الأشعة الليزرية المباشرة هي **العين** عند استخدام ليزرات تصدر أشعة في المجال المرئي وتحـت الأحمـر القريب **والجلد** عند استخدام ليزرات تصدر أشعة في مجال فوق البنفسجي وتحـت الأحمر البعيد، لذلك سوف نناقش أضرار العين وأضرار الجلد بالتفصيل .

٨-٣- أضرار العين :

تتميز كل من عدسة العين والسائل الزجاجي في العين بنفوذية عالية (تصل إلى ٩٠٪) للأشعة في المجال المرئي ومجال تحت الأحمر القريب ، أي للأشعة الـتي تتـراوح أطوالها الموجية بين (*nm* ١٢٠٠ - ٤٠٠) . أما خارج هذا المجال تكون نفوذية الأشـعة صغيرة جداً لدرجة تصبح عندها النفوذية معدومة مـن أجـل الأطـوال الموجيـة (λ>١٤٠٠) حيث لاتنفذ أية أشعة إلى شبكية العين . انطلاقاً من ذلك تمثل الأشـعة المرئية والأشعة تحت الحمراء القريبة الخطر الأكبر على العين . فالأشعة التي تجتاز حدقة العين (أبعادها *mm* ٨-٢) سوف تتجمع على شكل نقطة على الشبكية نتيجة لعملية التمحرق التي تقوم بها عدسة العين للأشعة و يكون قطر هذه النقطة حوالي (١٠ *µm*) مما يؤدي إلى ازدياد في شدة الأشعة بشكل كبير جداً من ١٠^٥–١٠^٦ ضعفاً . ويتعلّـق

ذلك بكل من قطر حدقة العين وقطر الخيال المتشكّل على الشبكية وفقاً للعلاقة التالية:

$$V = \frac{R_p^2}{R_s}$$

حيث : V : معامل التضخيم .

R_p : قطر حدقة العين وتتراوح قيمتها من ($2\text{-}8\ mm$) .

R_s : قطر الخيال المتشكّل على شبكية العين .

فمثلاً إذا كانت شدة الأشعة الليزرية عند الحدقة $25 W/m^2$ سوف تزداد عند الشبكية لتصل إلى القيمة $12.5 MW/m^2$.

إذاً نستنتج أن طبيعة ومقدار الضرر الذي يمكن أن تتعرض له العين يتعلّق بالعوامل التالية :

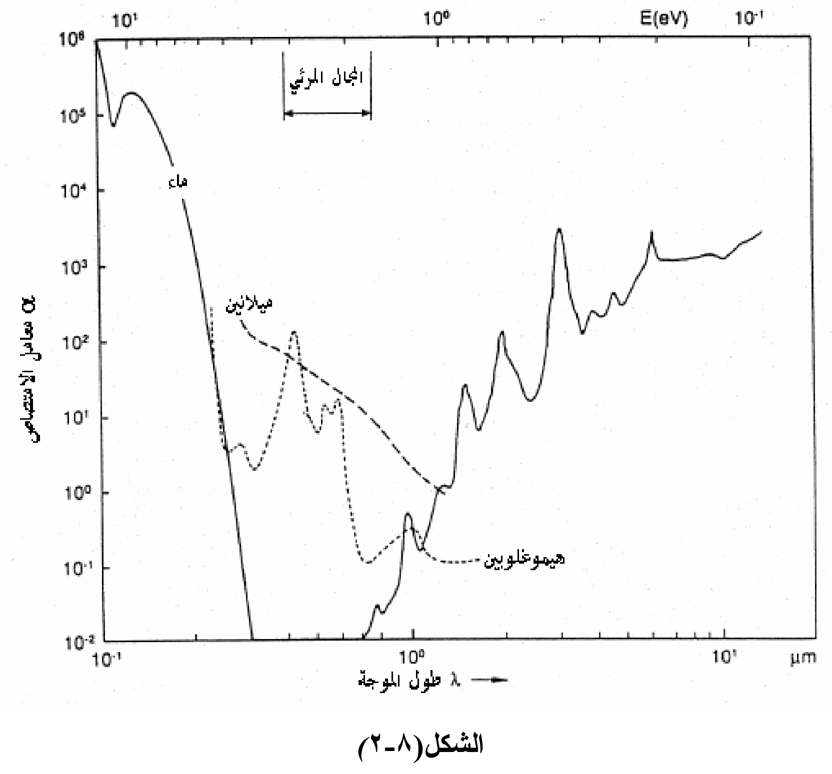
- طول موجة أشعة الليزر .
- كثافة الطاقة أو استطاعة أشعة الليزر .
- قطر حدقة العين .
- مساحة الخيال المتشكّل على شبكية العين .
- الفترة الزمنية التي تتعريض لها العين للأشعة المباشرة وغير المباشرة .

انطلاقاً من ذلك يمكن أن تتضرر عدسة العين والسائل الزجاجي في العين وشبكية العين وأيضاً الأجفان التي تحمي العين لدرجة يتعذّر عندها معالجة الأضرار الناتجة .

ويجب التنويه أيضاً إلى أنه بسبب تمحرق عدسة العين لأشعة الليزر يمكن أن تتضرر الشبكية وتتشكّل عليها مناطق عمياء (بقع سوداء) والتي لايلاحظها الشخص المصاب بشكل مباشر وهذا يحدث عندما تدخل أشعة ليزر على شكل نبضات إلى العين بشكل مفاجئ أو عندما تكون أشعة الليزر في مجال تحت الأحمر القريب والتي لايمكن رؤيتها بالعين المجردة .

٨-٤- أضرار الجلد :

تكون الأضرار التي تلحق بالجلد نتيجة لتعرضه لأشعة الليزر عادة أقل منـها في حالة العين . ولكن تبقى احتمالات تضرر الجلد هي الأعلى بسبب المساحة الكـبيرة للجلد بالمقارنة مع العين . كما أن طبيعة الضرر تتعلّق بشكل أساسي بطول موجـة أشعة الليزر، فالأشعة في المجال المرئي وفي مجال تحت الأحمر القريـب تمتلـك قـدرة انعكاس كبيرة على سطح الجلد تصل إلى نسبة ٥٠ % مما يقلل من ضرر هذه الأشعة، وبما أن طبقة الجلد عند الإنسان تتكون بشكل أساسي من الماء والميلانين والهيموغلوبين فإن امتصاصية كل مكون من هذه المكونات تختلف عن المكونات الأخرى بالنـسبة لعلاقتها مع طول الموجة أو مع شدة الامتصاص ، والشكل (٨-٢) يوضح معامـل الامتصاصية لهذه المكونات كتابع لطول الموجة .



الشكل(٨-٢)

وبالمقابل يمتص الجلد بنسبة كبيرة جداً الأشعة التي تقع في المجال فوق البنفسجي وفي مجال تحت الأحمر البعيد مما يؤدي إلى أضرار بالغة الخطورة مثل الاحتراق وهـذا يتعلّق بالعوامل التالية :

- امتصاصية أو تشتت أشعة الليزر على الأنسجة الجلدية وذلـك وفقـاً لطول موجة الليزر المستخدم .
- كثافة طاقة الأشعة الساقطة على الجلد .
- الفترة الزمنية التي يتعرض خلالها الجلد لأشعة الليزر .
- مساحة البقعة من الجلد التي تتعرض للأشعة .

وهناك دراسات تبين القيم الحدية التي تبدأ عندها أضرار أشعة الليزر على الجلد وذلك بتابعية كثافة الأشعة على واحدة المساحة والفترة الزمنية التي يدوم خلالها التأثير والجدول **(١-٨)** يوضّح بعض القيم لعدد من الليزرات المستخدمة .

نوع الليزر	***كثافة الأشعة*** ***(J/cm²)***	***الفترة الزمنية للتأثير*** ***(Sec)***
ليزر الياقوت (مستمر)	٢٠ - ١١	٢،٥,١٠^{-٣}
ليزر الياقوت (نبضي)	٠،٣٤ - ٠،٢٥	٧٥,١٠^{-٩}
ليزر الأرغون	٨،٢ - ٤،٠	١
ليزر CO_2	٢،٨	١
ليزر نيوديميوم (نبضي)	٥،٧ - ٢،٥	٧٥,١٠^{-٩}
ليزر نيوديميوم - ياغ	٧٨ - ٦٤	١

الجدول (١-٨) يوضح القيم الحدية لكثافة الأشعة والفترة الزمنية للتأثير والتي تظهر عندها أضرار على الجلد

٨-٥- الأضرار الليزرية غير المباشرة :

تنشأ هذه الأضرار دائماً عند التعامل مع أجهزة الليزر بطرق مختلفة ، وتتعلّق أسباب هذه الأضرار إما بالأجهزة المرتبطة مع أجهزة الليزر أو بتأثير أشعة الليزر على الوسط المحيط بمكان العمل أو بالمواد التي تجري معالجتها أو دراستها بأشعة الليزر . ويمكن تصنيف هذه الأضرار كما يلي :

١- أضرار ناتجة عن التيار الكهربائي : ان وحدات التغذية الكهربائية ووحدات التحكّم بأجهزة الليزر تأخذ مساحة واسعة في مكان العمل وخاصة إذا كانت أجهزة الليزر من ذوات الاستطاعات العالية التي تحتاج إلى جهود كهربائية عالية تتراوح بين $(30 - 35\ kV)$ لتوليد أشعة الضخ التي تستخدم فيما بعد لإثارة الوسط الليزري الفعال .

٢- أضرار ناتجة عن الأشعة السينية : عند تشغيل وحدات التغذية الكهربائية ذات الجهود العالية $V > 15\ kV$ سوف تتولد لدينا أشعة سينية ، لذلك يجب التأكد من هذه الأشعة واتخاذ إجراءات الوقاية والأمان منها عند العمل ضمن هذه الشروط .

٣- أضرار ناتجة عن تحطّم مكونات أجهزة الليزر : يمكن ولأسباب مختلفة أن تتحطّم أو تنكسر الأنابيب الزجاجية التي تحتوي على غازات الوسط الليزري الفعال أو المصابيح المستخدمة في عملية الضخ الضوئي أو بعض مكونات أجهزة الليزر المصنوعة من الزجاج لذلك يجب الانتباه والحذر عند التعامل مع هذه الأجهزة .

٤- أضرار ناتجة عن أجهزة التبريد : يمكن التعرض لهذه الأضرار عند استخدام الآزوت السائل لتبريد الأجسام الصلبة التي تحتوي على شوارد الوسط الليزري الفعال كما هو الحال في ليزرات الجسم الصلب وبالتالي لابد من الانتباه عند التعامل مع الآزوت السائل لما له من آثار حارقة في حالة سقوطه على الجلد .

بالإضافة إلى الأضرار السابقة هناك أضرار تنتج عن اندلاع حرائـق بـسبب الاهمال في مراقبة اتجاهية ومسار شعاع الليزر أو بسبب الاضاءة الشديدة التي تنتج عن مصابيح الضخ الضوئي غير المحمية بحواجز حاجبة للضوء أو بسبب تشكّل مواد سامة نتيجة لتفاعل أشعة الليزر مع المواد والمركبات الكيميائية التي تجري دراستها.

٨-٦- تصنيف الليزرات وفقاً لدرجة الأمان :

إن الغاية من وضع تصنيف لأجهزة الليزر هي اتخاذ احتياطات الأمان الملائمـة والمناسبة عند استخدام هذه الأجهزة بما يتلاءم ودرجة تصنيفها ، ومن جهة أخـرى وضع جداول تحتوي على مواصفات وخصائص الأشعة الليزرية وكـذلك الأجهـزة الليزرية والغاية من ذلك مساعدة المُستخدم على معرفة تلك المواصـفات والحـصول عليها مباشرة من الجداول .

كما أن عملية التصنيف تأخذ بعين الاعتبار قدرة هذه الأجهزة علـى الحـاق الضرر المباشر أو غير المباشر بالمستخدمين وتأثير ذلك على كل من العين والجلد وقد اعتمد في هذا التصنيف على المقادير الآتية :

- طول موجة أشعة الليزر أو مجال الأطوال الموجية التي يصدرها الليـزر وكذلك تحديد فترة الإصدار .
- طريقة عمل الليزر (بشكل مستمر أو نبضي) ومعرفة القيمة الوسطية لاستطاعة خرج الليزر .
- في حالة الليزرات النبضية يجب معرفة زمن النبضة الواحـدة ، شـدة النبضة وتردد النبضة .

انطلاقاً من ذلك صنفت الليزرات في أربع درجات حسب مقدار الضرر الذي تسببه كل درجة :

أ - ليزرات الدرجة الأولى (بدون أضرار) :

تصنف في هذه الدرجة أجهزة الليزر التي لاتسبب أشعتها أية أضرار وذلك لأن استطاعتها تكون أصغر من قيمة العتبة التي يرمز لها Q_{exe} ، وهي القيمة التي لاتظهر عندها أية أضرار . ومن أجل أغلب الليزرات تعين قيمة Q_{exe} من حاصل الجداء بين مقدارين يمثّل الأول القيمة العظمى لطاقة الليزر التي تسقط على واحدة المساحة خلال زمن التعريض للأشعة ، والمقدار الثاني يمثّل القيمة العظمى لمساحة الفتحة الضوئية التي تخرج منها أشعة الليزر .

ب - ليزرات الدرجة الثانية (أضرار ضعيفة) :

في هذه الدرجة تصنف أجهزة الليزر ذات الاستطاعات الصغيرة والتي تقع طول موجة أشعتها في المجال المرئي من الطيف . ولاتسبب هذه الليزرات أضراراً قويةً عند النظر بشكل مباشر إلى الشعاع ولكن بالرغم من ذلك يجب الانتباه إلى الفترة الزمنية التي يتم التعريض خلالها إلى أشعة الليزر . وكمثال على هذه الليزرات نجد :

- الليزرات التي تعمل بشكل مستمر ، ويقع طول موجتها ضمن المجال $(400 - 700\ nm)$ بحيث لاتتجاوز استطاعتها العظمى القيمة $0.4\ \mu W$ ومن أجل الفترة الزمنية $t_{max}<0.25\ Sec$ التي يجري التعرض خلالها للأشعة الليزرية .
- أجهزة الليزر الماسحة ***Scanning-Laser*** .

ج - ليزرات الدرجة الثالثة (أضرار متوسطة) :

تحت هذه الدرجة تصنف الليزرات ذات الاستطاعات المتوسطة التي لاتتجاوز قيمتها $(0.5W)$ وكمثال على هذه الليزرات :

- الليزرات التي تعمل في مجال الأشعة ما تحت الحمراء من الطيف الكهرطيسي وطول موجتها $(\lambda=1.4\mu m-1mm)$ وكذلك الليزرات ضمن مجال فوق

البنفسجي وطول موجتها $(\lambda=٢٠٠-٤٠٠\ nm)$.

- الليزرات التي تعمل بشكل مستمر وفي المجال المرئي من الطيف الكهرطيسي وطول موجتها $(\lambda=٤٠٠-٧٠٠\ nm)$.
- الليزرات التي تعمل بشكل نبضي في مجال تحت الأحمر القريب وطول موجتها $(\lambda=٧٠٠-١٤٠٠\ nm)$.

د - ليزرات الدرجة الرابعة (أضرار شديدة) :

تدخل ضمن هذه الدرجة الليزرات ذات الاستطاعات العالية والتي تسبب أشعتها المباشرة أو المتشتتة أضراراً بالغة للعين والجلد . وهذه الليزرات تتجاوز استطاعتها $(P > ٠.٥\ W)$ والفترة الزمنية للتعرض للأشعة $t_{max}>٠.٢٥\ Sec$ ومثال عليها الليزرات في مجال فوق البنفسجي $(\lambda=٢٠٠-٤٠٠\ nm)$ ، الليزرات في المجال المرئي $(\lambda=٤٠٠-٧٠٠\ nm)$ والليزرات في مجال تحت الأحمر القريب $(\lambda=٧٠٠-١٤٠٠\ nm)$.

ملاحظة : بشكل عام يصنف كل جهاز ليزر يصدر أشعة ليزرية عند أطوال موجية مختلفة في الدرجة التي توافق طول الموجة الذي يسبب الضرر الأكبر عند عمل هذا الليزر .

انطلاقاً من ذلك نجد أنه من الضروري جداً وضع مقادير كمية ثابتة لتحديد مدى الضرر بما يتوافق وشروط استخدام أجهزة الليزر وهذه المقادير تحدد بدورها اجراءات واحتياطات الأمان اللازم اتخاذها أثناء العمل بأجهزة الليزر . ومن المقادير الهامة التي يجب علينا معرفتها هي كثافة تدفق أشعة الليزر والتي يرمز لها □ φ_r وفي الحالة التي تهمل فيها امتصاصية الهواء وانفراج شعاع الليزر تعطى بالعلاقة :

$$\varphi_r = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi \cdot d_0^2}$$

حيث تمثّل : A : مساحة المقطع العرضي لشعاع الليزر وهو في الحالة المثالية علـى شكل دائرة .

P : تدفق أشعة الليزر .

$d_0=2w$: قطر شعاع الليزر عند نقطة خروجه من جهـاز الليـزر أي عندما $r=0$ ، و w عبارة عن نصف القطر .

أما إذا أخذنا انفراج شعاع الليزر بعين الاعتبار والذي يرمز له θ وامتصاصية الهواء μ وإذا كانت r هي المسافة بين نقطة خروج شعاع الليزر من الجهاز والنقطة التي تقاس عندها φ_r فان العلاقة السابقة تصبح بالشكل :

$$\varphi_r = \frac{4P \cdot e^{-\mu \cdot r}}{\pi (d_0 + r \cdot \theta)^2}$$

وتأخذ امتصاصية الهواء القيم التالية : في حالة الرؤية الجيدة $(\mu = 10^{-7}\, cm^{-1})$ ، في حالة الرؤية السيئة $(\mu = 10^{-5}\, cm^{-1})$ وفي حالة الضباب $(\mu = 0^{-4} cm^{-1})$.

وبالاضافة إلى كثافة تدفق الإشعاع هناك مقدار مسافة الأمان الأصغرية وهـي تمثّل البعد r_s عن فتحة خروج شعاع الليزر من الجهاز والذي تكون عنـده القيمـة العظمى لاستطاعة شعاع الليزر المباشر أو غير المباشر (المتشتت) ماتزال تسبب ضرراً . ويمكن تحديد هذه المسافة من أجل عدة حالات مختلفة :

- الحالة التي لايخضع فيها شعاع الليزر لأية تأثيرات خارجية بواسـطة أدوات بصرية (عدسات ، فلترات،...) في هذه الحالة تكون العلاقة التي تعطي قيمة مسافة الأمان الأصغرية :

$$r_s = \sqrt{S-1} \cdot \frac{d_0}{\theta}$$

S: تمثّل معامل تخامد شعاع الليزر وهو عبارة عن النسبة بين كثافة تدفق الإشعاع عند المسافة r_s وبين كثافة تدفق الإشعاع الأعظمي .

• الحالة التي يستخدم فيها تلسكوب :

$$r_s = \sqrt{S_T - 1} \cdot \frac{d_T}{\theta_T}$$

S_T : معامل تخامد شعاع الليزر الناتج بعد مروره بالتلسكوب.

d_T : قطر شعاع الليزر بعد خروجه من التلسكوب .

• الحالة التي تستخدم فيها عدسة أسطوانية :

$$r_s = \left(\sqrt{1 + \frac{180}{\theta_z} \cdot \theta \cdot S_z} - 1 \right) \cdot \frac{d_0}{2\theta}$$

S_z : معامل تخامد شعاع الليزر المار من خلال العدسة الأسطوانية .

θ_z : انفراج شعاع الليزر الناتج عن استخدام العدسة الأسطوانية .

• الحالة التي يستخدم فيها تلسكوب مع عدسة أسطوانية :

$$r_s = \left(\sqrt{1 + \frac{180}{\theta_z} \cdot \theta_T \cdot S_{Tz}} - 1 \right) \cdot \frac{d_T}{2\theta_T}$$

S_{Tz} : معامل تخامد شعاع الليزر بعد مروره بالتلسكوب والعدسة الأسطوانية .

والجدول (**٢-٨**) يحتوي على القيم المحسوبة لمسافة الأمان الأصغرية من أجل ليزر الهليوم-نيون الذي يعمل بشكل مستمر عند طول الموجة ($\lambda = ٦٣٢٫٨\ nm$) .

تدفق الاشعة عند الجهاز *(mW)*	١	١	٥	١٠
قطر شعاع الليزر *(mm)*	٢	١	١	١
انفراج الشعاع (بالدرجة)	٢	٢	٢	٢
مسافة الأمان الأصغرية بدون تأثيرات خارجية *(m)*	٢٧٢	٢٧٦	٦٢٠	٨٧٠

مسافة الأمان الأصغرية بوجود تلسكوب (٢٠ مرة) *(m)*	٤١٠٠	٤٨٠٠	١١٧٠٠	١٦٧٠٠
مسافة الأمان الأصغرية بوجود عدسة θ_z=١٧ *(m)*	٩،٢	١٠	٢٣	٣٣
مسافة الأمان الأصغرية بوجود تلسكوب وعدسة *(m)*	١،٧	٣،٤	١٧	٣٤

الجدول (٢-٨) يبين مسافة الأمان الأصغرية من أجل ليزر هليوم-نيون في حالات مختلفة

٨-٧- إجراءات الأمان الخاصة بالعين :

يجب استعمال النظارات الواقية في كل مكان توجد فيه أجهزة ليزرية أو أدوات تعمل بأشعة الليزر للحماية من تأثيرات الأشعة الليزرية. ويجب أن تحتوي هذه النظارات في تركيبها على مواد تلعب دور مرشحات ضوئية تعمل على مبدأ فلتر الامتصاص الانتقائي . والهدف من ذلك هو عدم السماح بمرور أشعة ليزرية ذات طول موجة محددة ، بينما يسمح لبقية الأطوال الموجية للطيف المرئي بالنفوذ من خلاله مع المحافظة على طاقتها . ومن ذلك يمكن الاستنتاج أنه لايمكن استخدام أي مرشح ضوئي امتصاصي مع أي ليزر فلكل نوع من الأشعة الليزرية هناك مرشحات ضوئية ملائمة لها لأنه توجد علاقة بين طول موجة الأشعة الليزرية ونوعية المرشح الضوئي.

وبالإضافة إلى ذلك يجب تحديد سماكة المرشح الضوئي بما يتناسب مع استطاعة جهاز الليزر . ولكن تبقى العقبة الكبيرة عند تصنيع مثل هذه المرشحات الضوئية الامتصاصية هو الثبات الحراري ، لأنه عند تعرضها لأشعة الليزر سوف تتحول طاقة الأشعة الليزرية الممتصة بكاملها إلى حرارة قد تؤدي إلى تحطيم زجاج أو بلورة المرشح والذي بدوره يشكّل خطراً اضافياً غير مباشر نتيجة لتطاير القطع الزجاجية

المتحطمة التي يمكن أن تؤذي العين أو الجلد . لذلك يجب مراعاة ذلك عند تصنيع المرشحات بحيث تحقق مواصفات تقنية محددة وتكون ذات ثبات حراري كبير ويكون التوزع الحراري ضمنها متجانساً ومنتظماً .

وبالإضافة إلى استخدام النظارات الواقية يجب إجراء مراقبة طبية دائمة ودورية وتحت إشراف أطباء العيون لتشخيص الأضرار الناتجة عن العمل للأشخاص الذين يستخدمون أشعة الليزر وبالتالي معالجة هذه الأضرار في الوقت المناسب ، فمن المُحتمل أن تصاب العين بأضرار لايمكن معرفتها أو ملاحظتها الاّ من خلال الفحوصات الطبية للعين .

٨-٨- اجراءات الأمان العامة :

أدى التطور الكبير الذي شهدته علوم الليزر إلى وضع جملة من القواعد العامة من أجل زيادة عوامل الأمان عند استخدام أجهزة الليزر . ولذلك يجب دوماً التأكيد على التقيد التام بهذه القواعد وفقاً لطبيعة وهدف العمل الذي نقوم به ، إن كان باستخدام تجهيزات التجارب المخبرية التي تعتمد على أشعة الليزر أو من جهة استعمال أجهزة الليزر كأداة للعمل في المجالات المختلفة الأخرى أو حتى لأسباب تجارية . لذلك نورد قواعد الأمان العامة التالية :

٨-٨-١ - قواعد الأمان في المخابر وحجرات العمل :

١. يجب دائماً وضع اشارة التحذير "***LASER***" ذات اللون الأصفر على أبواب المخابر والحجرات التي تحتوي على تجهيزات مخبرية أو أدوات تعمل بأشعة الليزر .
٢. عدم السماح بدخول الأشخاص الذين لاعمل لهم إلى المخابر أو الحجرات التي وضعت عليها إشارة التحذير من الليزر .

٣. يجب أن تكون حجرات العمل مضاءة بشكل جيد وذلك من أجل حرية التحرك بوضوح دون الاصطدام بالأجهزة وخاصة الأدوات البصرية التي تستخدم لضبط مسار شعاع الليزر والتحكّم فيه ، كما يجب أن يكون الطلاء على الجدران من النوع غير اللامع لتجنب انعكاس أشعة الليزر عن الجدران بشكل عشوائي .

٤. يجب أن يتوفر قاطع تغذية عام خارج المخبر أو حجرة العمـل بحيـث يسمح بقطع التغذية عن جميع التجهيزات والوحدات الملحقـة بـأجهزة الليزر في الحالات الطارئة .

٥. قبل البدء بعملية تشغيل أجهزة الليزر يجـب تنبيـه جميـع الأشـخاص الموجودين داخل المخبر أو حجرة العمل .

٦. عدم وضع أية مواد قابلة للاشتعال أو الانفجـار ضـمن المخـابر أو حجرات العمل .

٨-٨-٢- قواعد الأمان على طاولة العمل :

١. يجب وضع حواجز عاتمة للأشعة حول الأجهزة الليزرية ومسارات الأشـعة وذلك لتجنب أشعة الليزر المباشرة أو غير المباشرة ، كمـا يجـب حجـب المصابيح الضوئية التي تستخدم في عملية الضخ الضوئي لإثارة الوسط الليزري الفعال .

٢. يجب وضع إشارات تنبيه لضرورة استخدام النظارات الواقية أو مرشـحات ضوء امتصاصية تتناسب مع كل جزء من التجهيزات المستخدمة في العمـل، وخاصة في حالة الأشعة الليزرية المتعـددة ، وبـأطوال موجيـة مختلفـة أو باستطاعات مختلفة .

٣. عند القيام بعملية ضبط وتثبيت الأدوات البصرية والتجهيـزات المختبريـة في حالة استخدام ليزرات نبضية يجب فصل التغذية عن وحدات الضخ الضوئي المستخدمة لإثارة الوسط الليزري الفعال وذلك لتجنب أية تغذيـة مفاجئـة لمصابيح الإثارة التي تؤدي بدورها إلى إطلاق نبضات ليزرية .

٤. في الحالة التي تعمل فيها الليزرات بشكل نبضي أو بشكل مستمر في المجال غير المرئي من الطيف الكهرطيسي يجب التنبيه عن هذه الأشعة بواسطة إشـارات ضوئية أو صوتية وذلك لتنبيه الأشخاص الموجودين بالقرب من طاولة العمل إلى أن أجهزة الليزر في حالة تشغيل . كما يجب اختيار لون الضوء لاشارات التنبيه الضوئية بحيث يمكن رؤيته بوضوح عند استخدام مرشحات ضوئية أو نظارات واقية لحماية العين .

٥. يجب تحديد طول مسار أشعة الليزر ضمن حجرة العمل بمـا يتناسـب مـع متطلبات العمل وذلك بواسطة الأدوات البصرية المناسبة .

٦. إزالة جميع الأجسام ذات السطوح العاكسة للضوء والتي يمكن أن تتواجد على خط مسار أشعة الليزر أو تغطيتها باستخدام سطوح أو مواد عاتمة للضوء .

٧. عدم النظر بشكل مباشر إلى شعاع الليزر أثناء عملية ضبط مـسار الـشعاع وحتى في حالة ارتداء النظارات الواقية .

٨. عند استخدام الليزرات ذات الاستطاعات العالية والتي تعمل بشكل نبضي أو حتى التي تعمل بشكل مستمر يجب ارتداء وسائل أمان ووقاية لكامل الجسم .

٩. يجب أن تكون أجهزة الليزر ذات مواصفات تقنية عالية وتـؤمن متطلبـات الأمان المختبرية فيما يتعلّق بالهدف الذي تستخدم لأجله أو درجة الأضرار التي يمكن أن تسببها .

١٠. إذا كانت أجهزة الليزر تعمل باستخدام جهود كهربائية عالية $(V>15\ kV)$ يجب اتخاذ اجراءات أمان ووقاية من الأشعة السنية التي يمكـن أن تـصدر عنـد

استخدام الجهود الكهربائية العالية .

١١. يجب تغطية مسار شعاع الليزر قدر الإمكان بواسطة حواجز عاتمة . وفي الحالة التي تكون فيها مسارات أشعة الليزر مكشوفة يجب إغماض العيون في لحظة تشغيل الليزر وخاصة في حالة الليزرات التي تعمل بشكل نبضي .

١٢. يجب التأكد دوماً من سلامة وصلاحية النظارات الواقية وكذلك فعاليتها البصرية وخاصة عند استخدام الليزرات ذات الاستطاعات العالية .

١٣. المراقبة التامة والانتباه الكامل للأجهزة الليزرية عندما تكون في حالة التشغيل وعدم تركها أو مغادرة مكان العمل ولو لفترة قصيرة .

بالإضافة إلى كافة الاجراءات السابقة يجب العمل دائماً على تأهيل وتدريب الكادر العلمي والفني الذي يعمل على تشغيل أجهزة الليزر أو الذي يستخدم أشعة الليزر حتى تكون جاهزيتهم متناسبة مع مقتضيات ومتطلبات العمل بحيث تتوافق المعرفة العلمية والانتباه مع بعضهما للوصول إلى شروط عمل صحيحة وسليمة تضمن أمان وحماية جميع العاملين من جهة وتحقيق الهدف المنشود من استخدام أشعة الليزر من جهة أخرى .

المصطلحات العلمية

انكليزي – عربي

A

[ABCD] matrices	المصفوفة ***[ABCD]***
absolute	مطلق
~ temperature	درجة حرارة مطلقة
absorption	امتصاص
~ band	عصابة امتصاص
~ coefficient	معامل الامتصاص
~ factor	عامل الامتصاص
~ of radiation	امتصاص الاشعاع
~ process	عملية الامتصاص
~ ratio	نسبة الامتصاص
~ spectrum	طيف الامتصاص
action	فعل
active	فعال
~ molecul	جزيئة فعالة
~ medium	وسط فعال
amplification	تضخيم
~ of light	تضخيم الضوء
amplitude	سعة
analytical	تحليلي
angstrom (A^o)	انغستروم(واحدة طول)
angular	زاوي
~ frequency	تردد زاوي

anharmonic	لاتوافقي
~ oscillator	هزاز لاتوافقي
anisotropic	لامتناحي
anti	مضاد
antisymmetric	معاكس للتناظر
approximation	تقريبي
argon (Ar)	أرغون (عنصر غازي)
~ ion – laser	ليزر شاردة الأرغون
associate	مرتبط – مشارك
atom	ذرة
average	متوسط
axe	محور

B

balance	توازن
band	عصابة
~ electron	إلكترون عصابة
~ width	عرض العصابة
beam	حزمة – شعاع
~ splitter	مجزئ الحزمة
biconcave lens	عدسة مقعرة الوجهين
biconvex lens	عدسة محدبة الوجهين
binding	ارتباط
~ energy	طاقة الارتباط
Boltzmann constant	ثابت بولتزمان
Boltzmann distribution	توزع بولتزمان
Brewster's angle	زاوية بروستر
Brewster's window	نافذة بروستر
broadening	تعريض

bromine (Br)	بروم (عنصر)

C

cadmium (Cd)	كادميوم (عنصر)
carbon dioxide (CO٢)	ثاني أكسيد الكربون
~ laser	ليزر ثاني أكسيد الكربون
carbon monoxide (CO)	أحادي أكسيد الكربون
~ laser	ليزر أحادي أكسيد الكربون
cavity	تجويفة
charge	شحنة
~ displacement	انزياح الشحنة
coherence	ترابط
~ length	طول الترابط
~ time	زمن الترابط
~ light	ضوء مترابط
collisional	تصادمي
~ broadening	تعريض تصادمي
~ deactivation	تفريغ الطاقة بالتصادم
~ energy transfer	نقل الطاقة بالتصادم
~ ionization	تأين بالتصادم
coduction	ناقلية
~ band	عصابة الناقلية
conservation	انحفاظ
~ of energy	انحفاظ الطاقة
constant	ثابت
continuous	مستمر
~ laser	ليزر مستمر
cooling	تبريد

~ circuit	دارة تبريد
cooper (Cu)	نحاس (عنصر)
~ vapor laser	ليزر بخار النحاس
correlate	يرتبط
correlation	ارتباط
crystal	بلورة
current	تيار
~ density	كثافة التيار

D

damping	تخامد
~ coefficient	معامل التخامد
decay	تلاش
~ time	زمن التلاشي
degeneracy	تحلّل
diffraction	انعراج
~ losses	الخسارة بسبب الانعراج
diode	متصل ثنائي – ديود
~ laser	ليزر متصل ثنائي
dipole	ثنائي قطب
~ moment	عزم ثنائي قطب
direct	مباشر
~ pumping	ضخ مباشر
disharge	انفراغ
~ tube	أنبوب انفراغ
dispersion	تبدد
dissociation	تفكك
~ energy	طاقة التفكك
Doppler effect	مفعول دوبلر
Doppler shift	انزياح دوبلر

Doppler broadening	تعريض دوبلر
dye	صباغ
~ laser	ليزر صباغي
~ solvent	محلول صباغي

E

effect	مفعول – تأثير
Einstein coefficient	معامل أينشتاين
elastic	مرن
~ collision	تصادم مرن
electric	كهربائي
~ dipole	ثنائي قطب كهربائي
~ field	حقل كهربائي
electromagnetic	كهرطيسي
~ radiation	إشعاع كهرطيسي
~ wave	موجة كهرطيسية
electron	إلكترون
~ beam	حزمة-شعاع من الإلكترونات
~ distribution	توزع إلكتروني
~ transition	انتقال الإلكترونات
emission	اصدار – انبعاث
~ spectrum	طيف الإصدار
energy	طاقة
~ level	سوية طاقة
equation	معادلة
~ of state	معادلة الحالة
equilibrium	توازن
excimer	إكسيمر

~ laser	ليزر إكسيمر
excitation	إثارة
~ energy	طاقة الإثارة
excited	مثار
~ atom	ذرة مثارة
~ level	سوية مثارة
~ state	حالة مثارة
exponential decay	تخامد أسي
exponential dependence	تابعية أسية

<u>F</u>

Fabry-Perot interferometer	مقياس تداخل فابري-بيرو
factor	عامل
~ of proportionality	عامل التناسب
~ of safety	عامل الأمان
far-infra read	تحت الحمراء البعيدة
femto second (fs)	فمتوثانية (واحدة للزمن)
fiber optics	الألياف البصرية
field	حقل
flash	وميض
flashlamp	مصباح وميضي
fluorescence	فلورة – تفلور
fluorine (F)	الفلور (عنصر)
focus	محرق – بؤرة
focusing	تمحرق – تبئير
forbidden band	عصابة محظورة
fourier transformation	تحويل فورييه
four-level laser	ليزر رباعي السوية
free-electron laser	ليزر الإلكترونات الحرة

frequency	تردد
~ doubling	مضاعفة التردد
Fresnel diffraction	انعراج فرنل
Fresnel number	عدد فرنل
full width at half maximum	التعريض عند منتصف ارتفاع القمة ***(FWHM)***
fundamental	أساسي
~ frequency	تردد أساسي
fusion by laser	الاندماج بالليزر

G

gain	ربح – كسب
gallium (Ga)	غاليوم (عنصر)
gas	غاز
~ disharge	انفراغ غازي
~ ideal	غاز مثالي
~ laser	ليزر غازي
~ pressure	ضغط الغاز
Gaussian distribution function	تابع توزع غاوصي
glass	زجاج
ground state	الحالة الأساسية

H

harmonic	توافقي
~ motion	حركة توافقية
Heisenberg uncertainty principle	مبدأ هايزنبرغ
helium (He)	هليوم (عنصر)
helium-neon laser	ليزر الهليوم-نيون
homogeneous	متجانس
~ broadening	تعريض متجانس

hologram	هولوغرام (صورة ثلاثية الأبعاد)
holography	هولوغرافيا (تصوير ثلاثي الأبعاد)
horizontal	أفقي

I

ideal	مثالي
incoherent	غير مترابط
index of refraction	قرينة الانكسار
induced	محرض
inelastic	لامرن
~ collision	تصادم لامرن
infra read radiation	أشعة تحت الحمراء
internal conversion	انقلاب داخلي
interference	تداخل
~ constructive	تداخل بناء
~ destructive	تداخل هدام
inverse	انعكاس – انقلاب
~ population	انعاس إسكاني
ion	شاردة
isotope	نظير
~ separation	فصل النظائر

J

K

Kerr effect	مفعول كير
krypton (Kr)	كريبتون (عنصر)
krypton-ion laser	ليزر شاردة الكريبتون

L

laser	ليزر
~ cooling	تبريد بالليزر

~ induced fluorescence	الفلورة المحرضة ليزرياً
~ pumping	الضخ بالليزر
~ spectroscopy	مطيافية ليزرية
~ threshold	عتبة الليزرة
~ vapourisation	تبخير بالليزر
lasing	عملية الليزرة
level	سوية
lifetime of level	عمر السوية
light	ضوء
~ amplification	تضخيم الضوء
~ source	منبع ضوئي
linear	خطي
~ light	ضوء خطي
liquid laser	ليزر سائل (صباغي)
longitudinal	طولاني
~ wave	موجة طولانية
Lorentzian function	تابع لورنتز
loss	خسارة
~ factor	عامل الخسارة
low level	سوية منخفضة
luminescence	تألّق

M

maser	مازر
Maxwell distribution	توزع ماكسويل
metastable state	حالة شبه مستقرة
mean value	قيمة وسطية
measure	قياس
medium	وسط

mirror	مرآة
mode	نمط
molecular	جزيئي
~ level	سوية جزيئية
~ orbital	مدار جزيئي
momentum	دفع
~ conservation	انحفاظ الدفع
monochromatic	أحادي اللون
~ radiation	إشعاع أحادي اللون

N

natural	طبيعي
~ level width	عرض السوية الطبيعي
neodymium (Nd)	نيوديميوم (عنصر)
neodymium-glass laser	ليزر النيوديميوم-زجاج
neodymium-YAG laser	ليزر النيوديميوم-ياغ
near-infraread	تحت الأحمر القريب
nitrogen	آزوت (عنصر)
nitrogen laser	ليزر الآزوت
nonlinear	لاخطي
~ optical effects	المفاعيل البصرية اللاخطية

O

optical	بصري – ضوئي
~ axis	محور بصري
~ fiber	ألياف بصرية
~ pumping	ضخ ضوئي
~ resonator	مرنان – مجاوب ضوئي
oscillation	اهتزاز
output	خرج
~ power	استطاعة الخرج

P

partial coherence	ترابط جزئي
phase	طور
~ difference	فرق الطور
phonon	فونون
phosphorescence	فسفرة
photo -	ضوئي
photodiode	ثنائي ضوئي
photon	فوتون
polarizability	استقطابية
polarization	استقطاب
polarized light	ضوء مستقطب
population	إسكان
~ density	كثافة إسكان
~ inversion	انعكاس –انقلاب إسكان
power	استطاعة
Poynting vector	متجه بوينتنغ
pressure	ضغط
propability	احتمال
pulse	نبضة
pulsed disharge	انفراغ نبضي
pulsed laser	ليزر نبضي
pumping	ضخ
~ radiation	أشعة الضخ

Q

quality factor (Q-factor)	عامل الجودة
Q-switch	مفتاح الجودة
Q-switching	تبديل الجودة
quantum	كمومي
~ cascade laser	ليزر الشلال الكمومي

~ number	عدد كمومي
~ yield	مردود كمومي
R	
radiation	إشعاع
~ density	كثافة الإشعاع
~ field	حقل إشعاع
~ intensity	شدة الإشعاع
radiationless transition	انتقال غير مشع
radiative transition	انتقال مشع
Raman effect	مفعول رامان
Raman scattering	تشتت – تبعثر رامان
~ spectroscopy	مطيافية رامان
reaction	تفاعل
real image	صورة حقيقية
reflection	انعكاس
refraction	انكسار
refractive index	قرينة انكسار
relative	نسبي
relaxation	استرخاء
resonance	رنين – تجاوب
resonator	مرنان – مجاوب
rod	قضيب
rotational transition	انتقال بين سويات دورانية
rotational-vibrational	انتقال بين سويات اهتزازية-دورانية
ruby	ياقوت
~ laser	ليزر الياقوت
rule	قاعدة
S	
safety	أمان

saturation	إشباع
~ current	تيار الإشباع
scattering	تشتت – تبعثر
second harmonic	التوافقية الثانية
~ generation	توليد التوافقية الثانية
semiconductor	نصف ناقل
~ laser	ليزر نصف ناقل
shift	انزياح
short –pulsed laser	ليزر نبضات قصيرة
signal	إشارة
solid	صلب
solid-state laser	ليزر جسم صلب
source	منبع
space	مكان – حيز
spatial coherence	ترابط مكاني
spectral	طيفي
~ line	خط طيفي
spectroscopy	مطيافية
spherical	كروي
splitter	مجزئ – شاطر حزمة ضوئية
spontaneous	عفوي
emission	إصدار عفوي
stability	استقرار
~ codition	شرط الاستقرار
stable laser	ليزر مستقر

T

temporal coherence	ترابط زماني
thermal	حراري
~ radiation	إشعاع حراري

three-level laser	ليزر ثلاثي السوية
threshold for inversio	عتبة الانعكاس
transition	انتقال
triplet level	سوية ثلاثية
two-level laser	ليزر ثنائي السوية
two-photon absorption	امتصاص ثنائي الفوتون
U	
ultraviolet	فوق بنفسجي
uncertainty principle	مبدأ الإرتياب
unstable	غير مستقر
V	
vacuum	خلاء
vapor	بخار
variable	متغير
vector	متجه – شعاع
velocity of light	سرعة الضوء
vibrational transition	انتقال اهتزازي
virtual image	صورة افتراضية
visible light	ضوء مرئي
W	
water cooling	تبريد بالماء
wave	موجة
~length	طول الموجة
~ propagation	انتشار الموجة
X	
X-rays	أشعة سينية
X-ray laser	ليزر الأشعة السينية
xenon (Xe)	الزينون (عنصر)
xenon-fluoride laser	ليزر فلوريد الزينون
Y	

YAG-laser	ليزر ياغ
yield	مردود – محصلة
yttrium (Y)	إيتريوم (عنصر)

المراجع العلمية

أ- المراجع العربية :

١- د. ضيف الله نصور – إلكترونيات الجسم الصلب – الكهرباء الانضغاطية والليزر، منشورات جامعة حلب **١٩٨٥-١٩٨٦** .

٢- أ .غ. غريغوريانتس ، آ.ن.سافونوف – طرائق المعالجة السطحية بالليزر – ترجمة د. محمد غانم ، المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر ، دمشق **١٩٩٢** .

٣- أ .غ. غريغوريانتس ، آ.ن.سافونوف – معالجة المواد غير المعدنية بالليزر – ترجمة د. محمد غانم ، المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر ، دمشق **١٩٩٣** .

٤- د.إلياس شمعون ، د.راجي أبو شقرا - أشعة لايزر – معهد الإنماء العربي – بيروت **١٩٨٠** .

ب- المراجع الأجنبية :

٦ *-William T.Silfvast : Laser Fundamental , second Edition , Cambridge University Press (٢٠٠٤).*

٧ *–Chang , William S.C. : Priciples of Lasers and Opitics , Cambridgee University Press (٢٠٠٥) .*

٨ *-Bergmann . Schaefer : Lehrbuch der Experimentalphysik, Band ٣ , OptiK , Walter de Gruyter , Berlin . New York (١٩٩٣).*

٩ -*Wissensspeicher Lasertechnik , ٣.Auflage , VEB Fachbuch –verlag Leipzig (١٩٨٩).*

١٠ - *W.Brunner , W.Radloff , K.Junge : Quantenelektronik , Eine Einfuerung in die Physik drs Lasers , ٢.Auflage , VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft , Berlin (١٩٧٧).*

١١ -*Wolfgang Demtroeder : Laserspektroskopie , Grundlagen und Techniken , ٢.Auflage , Springer Verlag Berlin Heidelberg (١٩٩١).*

١٢ -*LASER , Technology and Aplications : Yearbook ١st Edtion, Vulkan-verlag ,Essen (١٩٨٨).*

١٣ -*Leon J.Radziemski ,Richard W. Solarz : Laser Spectroscopy and its Applications ,Marcel Dekker, INC , New York (١٩٨٧).*

١٤ -*David L.Andrews : Lasers in Chemistry ,Akademie-verlag Berlin (١٩٨٧) .*

١٥ –*J. Hermann , B. Wilhelmi : Laser fuer ultrakurze Lichimpulse , Akademie-Verlag Berlin (١٩٨٤) .*

١٦ - *Derek Albert Long : Raman Spectroscopy , McGraw-Hill International Book Company , (١٩٧٧).*

١٧ - *BI-LEXIKON : Optik , VEB Bibliographisches Institut Leipzig (١٩٨٨).*

١٨ - *Ernst Grimsehl : Lehrbuch der Physik , Band ٣ , Optik , Teubner , Leipzig (١٩٨٧).*

١٩ - *BROCKHAUS abc , Physik ,VEB F.A. Brockhaus verlag , Leipzig (١٩٨٩).*

٢٠ - *Progress in Molecular Spectroscopy , Band* ٢٠ *, Teubner-Texte zur Physik ,Leipzig (*١٩٨٨*).*
٢١ *–H. Haken , H . C. Wolf : Atom – und Quantenphysik ,* ٤*.Auflage , Springer-Verlag (* ١٩٨٧*) .*