جامعة المثنى المادة : فيزياء الليزر

كلية التربية الأساسية الفصل الدراسي : الأول

قسم العلوم عدد الوحدات : 3

أستاذ المادة : أ.د عمار نضال شريف

محاضرات مادة فيزياء الليزر للعام الدراسي 2026/2025

- مفردات المادة :

الاسبوع	المفردات النظرية	المفردات العملية
الأول	اساسيات عمل الليزر	تحديد الطول الموجي لليزر بطريقة الحيود.
الثاني	نموذج بور والنظرية الكمية للنموذج الذري	قياس حزمة انفراج الليزر
الثالث	المبادئ الاساسية لأينشتاين في وصف تفاعل الاشعاع مع المادة عملية الامتصاص المستحث , عملية الانبعاث التلقائي , عملية الانبعاث المحفز , معادلة المعدل (احتمالية الانبعاث المحفز على احتمالية الانبعاث التلقائي)	دراسة درجة تشتت شعاع الليزر ومقارنتها مع درجة تشتت الضوء الاعتيادي
الرابع	انقلاب التعداد وطرق الضخ	دراسة صفة السطوع لإشعة الليزر عن طريق دراسة العلاقة بين قدرة وقطر شعاع الليزر.
الخامس	مخططات الضخ الثلاثية والرباعية وشروطهما	مقارنة النقاوة الطيفية لضوء الليزر (He-Ne) مع النقاوة الطيفية لمصباح الصوديوم.
السادس	قدرة الضخ ونمو عامل الربح في الوسط المكبر	قياس نصف قطر تخصر شعاع الليزر عند مركز المرنان.
السابع	التذبذب في الليزر / التجويف الرنيني / المرنان الليزري وانواعه معادلات عتبة الربح للمرنانات ذي المرآتين وذي المرآة الواحدة وعديمة المرايا	استعمال الليزر في قياس سمك قنينة زجاجية.
الثامن	شرط استقرار التجويف الرنيني	تعيين معامل الامتصاص باستخدام الليزر ل الزجاج والسائل (الماء).
التاسع	صيغ التذبذب للمرنان الليزري / انواع انماط الليزر	ليزر هليوم –نيون لايجاد القدرة النسبية الخارجة لليزر
العاشر	اليات انتقاء الانماط الليزرية	ليزر Neodymium-Yttrium-Aluminum-Garnet(nd-yag) لايجاد القدرة النسبية الخارجة لليزر.
الحادي عشر	خسائر انتاج الليزر وطرائق معالجتها	: ليزر ثاني اوكسيد الكاربون لايجاد القدرة الخارجة وكفاءة اليزر.
الثاني عشر	اسباب خصائص الليزر	دراسة الحيود وايجاد الطول الموجي لضوء الليزر بإستحدام شق منفرد
الثالث عشر	ليزرات الحالة الصلبة (الياقوت , النديميوم , شبه الموصل) وتطبيقاتهم	دراسة الحيود وايجاد الطول الموجي لضوء الليزر بإستحدام محزز الحيود
الرابع عشر	ليزرات الحالة الغازية (الهليوم نيون الذري , ايون الاركون , ثاني اكسيد الاوكسجين الجزيئي)	دراسة الحيود وايجاد الطول الموجي لضوء الليزر بإستحدام ثقب دائري.
الخامس عشر	ليزرات الحالة السائلة , الليزر الكيميائي , الالكترون الحر تطبيقات الليزر / المدنية / العسكرية / الصناعية	

- المصادر

ت	المؤلف(Author)	اسم الكتاب(Book Title)
1	د. بسام معروف مصطفى، د. خليل إبراهيم حيدر، د. وليد محمد سعيد	فيزياء الليزر / جامعة الموصل
2	د. محمد رضي محمد، د. عبد الهادي مطلق	أساسيات هندسة الليزر وتطبيقاته الجامعة التكنلوجيه
3	Orazio Svelto	Principles of Lasers
4	William T. Silfvast	Laser Fundamentals

- الأهداف المعرفية للمقرر:

1- فهم **المبادئ الذرية والكمية :**استيعاب فرضيات نموذج بور والنظرية الكمية للتركيب الذري، وكيفية انتقال الإلكترونات بين مستويات الطاقة المختلفة.

2- **تحليل آليات تفاعل الإشعاع مع المادة :**التمييز الدقيق (مفهوماً ورياضياً) بين العمليات البصرية الثلاث الأساسية: الامتصاص المستحث، الانبعاث التلقائي، والانبعاث المحفز.

3- **استيعاب شروط توليد الليزر :**فهم مفهوم "انقلاب التعداد (Population Inversion) " كشرط أساسي لعمل الليزر، والتعرف على طرق الضخ المختلفة ومقارنة مخططات الضخ الثلاثية والرباعية وشروط عملها.

4- **اشتقاق وفهم معادلات المعدل :**القدرة على صياغة وحل "معادلات المعدل (Rate Equations) " لحساب احتمالية الانبعاث المحفز مقارنة بالتلقائي، وحساب نمو عامل الربح وقدرة الضخ في الوسط الفعال.

5- **فهم هندسة المرنان واستقراره :**استيعاب وظيفة التجويف الرنيني (المرنان)، والتمييز بين أنواع المرنانات، وتطبيق شروط استقرار التجويف رياضياً .

6- **تحليل حسابات العتبة والخسائر :** حساب "عتبة الربح (Gain Threshold) " للمرنانات بمختلف تصميماتها (ذات المرآتين، المرآة الواحدة، وعديمة المرايا)، ومعرفة أسباب خسائر إنتاج الليزر وكيفية معالجتها.

7- **التمييز بين أنماط التذبذب :**التعرف على صيغ التذبذب (الأنماط الطولية والعرضية لليزر) وفهم الآليات التقنية المستخدمة لانتقاء أنماط محددة.(Mode Selection)

8- **تفسير الخصائص الفريدة لليزر :**ربط الأسباب الفيزيائية الكامنة وراء خصائص شعاع الليزر (أحادية اللون، الاتجاهية العالية، الترابط الزماني والمكاني، والشدة العالية) بآلية توليده.

9- **التصنيف والمقارنة بين منظومات الليزر المختلفة :**المعرفة العميقة بآلية عمل ومستويات طاقة ومكونات ليزرات الحالة الصلبة (الياقوت، النديميوم، شبه الموصل)، الغازية (الهيليوم-نيون، الأرجون، والسائلة والكيميائية والإلكترون الحر.

10- **تحديد التطبيقات العملية :**إدراك وفهم شريحة واسعة من تطبيقات الليزر في الحياة العملية وتصنيفها تبعاً للمجالات (المدنية والطبية، الصناعية، والعسكرية).

- المخرجات التعليمية المتوقعة:

1- حساب شروط الاستقرار والربح : حساب معلمات الاستقرار لأي تجويف رنيني، واشتقاق معادلات عتبة الربح للمرنانات (ذات المرآتين، المرآة الواحدة، وعديمة المرايا).

2- حل معادلات المعدل رياضياً :استخدام معادلات المعدل لحساب التغير الزمني لتعداد مستويات الطاقة وكثافة الفوتونات، وتحديد طاقة الضخ اللازمة لتحقيق انقلاب التعداد .

3- التمييز بين العمليات الإشعاعية :الحساب الرياضي لنسب الاحتمالية بين عمليات الامتصاص المستحث، الانبعاث التلقائي، والانبعاث المحفز باستخدام معاملات آينشتاين.

4- تشخيص ومقارنة منظومات الليزر :التمييز عملياً ومفهومياً بين المكونات، ومخططات الضخ (الثلاثية والرباعية)، وطرق التشغيل لليزرات الحالة الصلبة (الياقوت، النديميوم، شبه الموصل) والغازية ، الأرجون، والسائلة والكيميائية.

5-معالجة خسائر المرنان وانتقاء الأنماط :تحديد مصادر الفقد داخل التجويف الرنيني واقتراح الحلول الهندسية لمعالجتها، بالإضافة إلى تطبيق تقنيات عزل الأنماط للحصول على نمط أحادي عالي الجودة.

6-توظيف خصائص الليزر في التطبيقات :ربط الخصائص الفيزيائية للشعاع (الاتجاهية، الترابط، أحادية اللون، الشدة) وتوظيفها بشكل صحيح في التطبيقات المدنية، الصناعية (كالقطع واللحام)، والعسكرية (كقياس المدى والتوجيه).

تمهيد لبعض المفاهيم الاساسية

الطيـف (الاشـعاع) الكهرومغناطيـسي: ويتـضمن الموجـات الراديويـة radio waves، الموجـات الدقيقـة microwaves، الاشـعة تحـت الحمـراء infrared radiation، الـضوء المرئـي visible light، الاشـعة فـوق البنفسجية ultraviolet radiation، الاشعة السينية x-rays، اشعة كاما gamma rays.

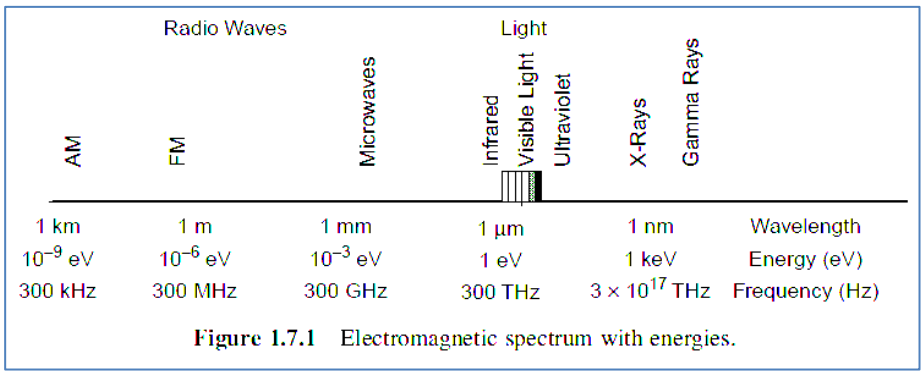
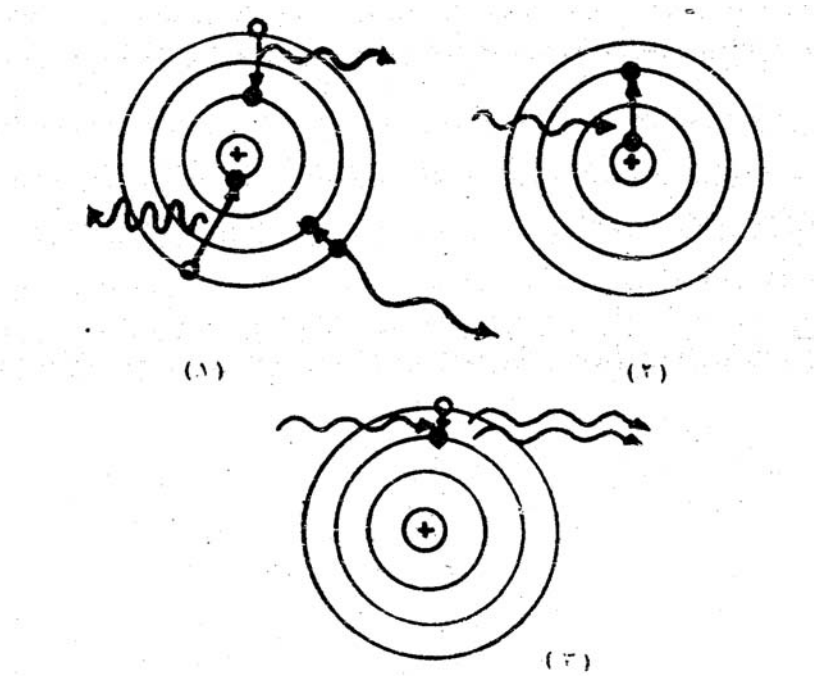


Figure 1.7.1 Electromagnetic spectrum with energies.

الليزر: هو اشعاع كهرومغناطيسي ذو درجة عالية من خصائص متعددة منها صفة احادية الموجة كما انه يشكل مصدر ضوء للاشعاع المتشاكه المتحد في الطور في الزمان والمكان كما انه ينبعث باتجاه محدد قليل الانفراج وبهذا تتركز قدرة الاشعاع في حزمته الضيقة فيعطيها صفة الاتجاهية عالية الدقة ولمسافات كبيرة اضافة الى صفة السطوع او اللمعان.

الانبعاث والامتصاص: يبين الشكل ادناه فكرة عن عمليات: الانبعاث الذاتي العشوائي- الامتصاص- الانبعاث المحفز.



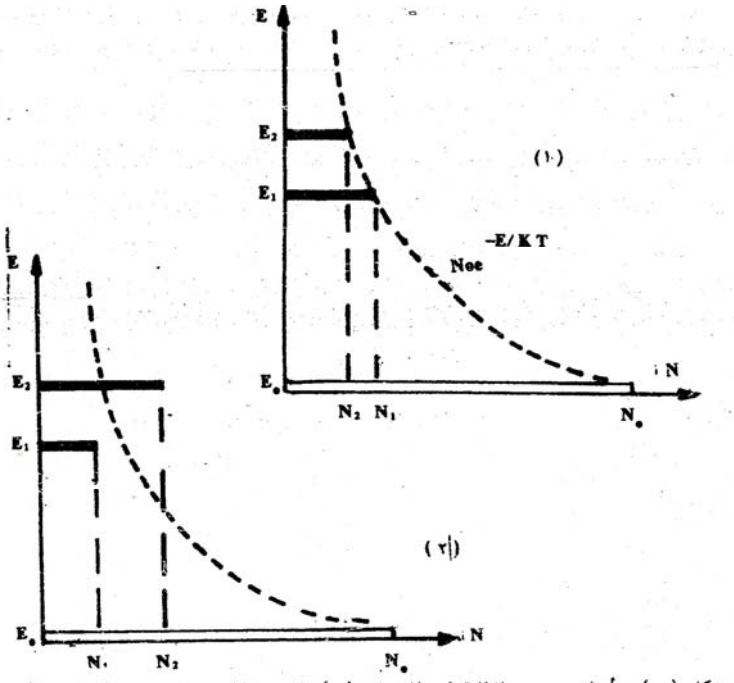
شكل (ب) : (١) عملية الانبعاث الذاتي العشوائي ، (٢) عملية الامتصاص لفوتون ساقط ، (٣) عملية الانبعاث المحفز.

ان الذرة او الجزيئة المتهيجة تبعث بمحض طبيعتها (من دون تاثير خارجي) الاشعاع الكهرومغناطيسي بغية العودة الى وضع تكون فيه طاقتها اقل ما يمكن وهو انبعاث تلقائي عشوائي الاتجاه والطور. ان معظم مصابيح الضوء التقليدية يكون مصدر اشعتها الواقع في المدى المرئي من الاشعاع الكهرومغناطيسي بناء على هذه العملية. اذن لابد

للذرة او الجزيئة ان تمتص اولا مقدارا من الطاقة لكي تكون مهيجة اصلا وهذ هي عملية الامتصاص. اما عملية الانبعاث المحفز فلا يكفي ان تكون الذرة مهيجة فقط بل يجب ان تكون تحت تاثير اشعاع كهرومغناطيسي ذي تردد مناسب لاحد انتقالاتها فيدفعها او يظطرها لهذا الانتقال باعثة اشعاعا كهرومغناطيسيا بالتردد والطور ذاته وباتجاه الاشعة الساقطة، من هنا جاءت صفة الاتجاهية العالية وصفة التشاكه وصفة النقاوة الطيفية للانبعاث المحفز (اشعة الليزر).

دالة التوزيع لبولتزمان: عندما يكون النظام الذري او الجزيئي لوسط ما في حالة التوازن الثرموداينميكي، مثلا غاز بدرجة حرارة T فان ذرات الوسطو او جزيئاته تتوزع على مستويات الطاقة وفق دالة توزيع معينة تدعى بدالة التوزيع لبولتزمان حيث تتناقص عدد الجزيئات المتواجدة في وحدة الحجم في مستوى ما (تاهيل ذلك المستوى) مع الزيادة في طاقة المستوى وكما هو مبين في الشكل (جـ1). فكلما كانت فاصلة الطاقة بين مستويين اكبر (طول الموجة المناظر اصغر) كلما كان الفرق في تاهيل المستويين اكبر. لمثل هذه الاوساط وفي درجة حرارة الغرفة يمكن اعتبار جميع ذرات الوسط (او جزيئاته) تقريبا في المستوى الارضي (E_o اوطا مستوى للطاقة) وان المستويات الاعلى منه تكون شبه فارغة.

التاهيل العكسي: في الاوساط التي يكون فيها فاصل الطاقة بين مستويات ذراتها او جزيئاتها كبير نسبيا (طول الموجة يقع في المدى المرئي) يكون تاهيل المستوى الاعلى صغير واحتمالية حدوث عملية الانبعاث المحفز واطئة. لتنشيط هذه العملية بين مستويين للطاقة يجب ضخ الطاقة الى النظام بشكل يكفل جعل تاهيل المستوى المستوى الاعلى اكثر من المستوى الاوطا منه، اي الاخلال بحالة التوازن التي اشرنا اليها اعلاه. في هذه الحالة يقال بان التاهيل العكسي بين هذين المستويين قد تحقق لاحظ الشكل (جـ2) فاذا ما سلطنا اشعاعا كهرومغناطيسيا بتردد يناسب فرق الطاقة بين هذين المستويين بدات عملية الانبعاث المحفز وتضخم الاشعاع الساقط، في هذه الحالة لا يمكن تطبيق قوانين الاتزان الثرموداينميكي على مثل هذا النظام.



شكل (جـ): تأهيل مستويين للطاقة في نظام ما: (١) التوزيع الطبيعي لبولتزمان (حالة التوازن الثرموداينميكي). (٢) التوزيع العكسي لها.

المرنان: تجويف رنيني الغرض منه تقوية التذبذب وتغذيته والعمل على ديمومته وهو جزء ضروري في جهاز الليزر حيث يوضع الوسط الذي تحدث فيه عملية الانبعاث المحفز بداخله. ان ارتداد الاشعة ذهابا وايابا عن جدرانه وتشكيلها بما يسمى بالموجات الواقفة تمنح فرصة تزويد الوسط نفسه بنفسه (تغذية استرجاعية) بالفوتونات ذات المواصفات المطلوبة لعملية الانبعاث المحفز. لمرنان الليزر تصاميم معينة ولا يمكن ان تكون على هيئة صندوق مقفل ذي ابعاد تناسب طول الموجة لان طول الموجة الضوئية صغير جدا.

خصائص (صفات) اشعة الليزر

1- النقاوة الطيفية: او صفة احادية الطول الموجي او اللون حيث يكون الانبعاث عن المصدر الضوئي بطول موجة واحدة تقريبا. ان معظم المصادر الضوئية التقليدية يكون طيفها المتصل او المتقطع عريض ويمكن الحصول منها على مصدر لاشعاع ذي نقاوة طيفية جيدة باستخدام وحدات بصرية مثل المرشح، ولكن هذا بالطبع ياتي على حساب شدة المصدر مما يحدد من استخدامه. لنتاج الليزر نقاوة طيفية تفوق اي مصدر ضوئي اخر.

2- الاتجاهية: هذه الصفة الواضحة للعيان لاول وهلة حيث يشاهد حزمة ضيقة مستقيمة (قليلة الانفراج) يتحدد بها انتقال نتاج الليزر وهي الصفة التي ينفرد بها عن غيره من المصادر الضوئية. تبعث مصادر الضوء التقليدية الاشعاع في جميع الاتجاهات وضمن زاوية مجسمة مقدارها 4π من الزوايا نصف قطرية المجسمة في حين ينحصر انبعاث الليزر في مخروط يغطي زاوية مجسمة لا تتعدى بضع مايكرو زاوية نصف قطرية مجسمة. ان الانفراج البسيط في حزمة الليزر هو نتيجة الحيود عن فتحة المسرب لمرنان الليزر ولذا يمكن تعيين زاوية الانفراج، او قدر بقعة الليزر على بعد مسافات كبيرة وبصورة تقريبية جيدة باستخدام معادلة الحيود للموجة الضوئية من فتحة دائرية:

$$\theta = k\frac{\lambda}{D}$$

تمثل D قطر الفتحة المسرب للمصدر الضوئي، λ طول الموجة للاشعة ويكون للمعامل k في معادلة الحيود من فتحة دائرية الشكل المقدار(1.22). ويمكن ربط زاوية الانفراج θ بمقدار البقعة التي ترسمها حزمة الليزر في المستوي المستعرض اي بالكمية w_o حيث تساوي:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_o} = \frac{2\lambda}{\pi w_o} = 0.64\frac{\lambda}{2w_o}$$

وهذا التعبير يمثل نموذج حيود بفتحة تساوي $2w_o$ بدلا من D.

3- التشاكه: تتصف الموجة الضوئية بالسعة والطور وهاتان الكميتان مرتبطتان مع بعضهما بقوانين الحركة الموجية. ان صفة التشاكه تتعلق بمتقلبات السعة والطور وتغيراتهما مع اختلاف الموضع في الفضاء وكذلك مع الزمن ومن هنا جاء مفهوم التشاكه الفضائي والتشاكه الزمني على التوالي. قد يكون للمصدر الضوئي تشاكه فضائي شبه تام وتشاكه زمني لدرجة ما والعكس وارد. فاذا وصف الضوء بالتشاكه فهذا يعني بانه يحقق مبدا التشاكه الفضائي والزمني ولدرجة كبيرة كما هو الحال في اشعة الليزر.

ان التشاكه الزمني يرتبط بالنقاوة الطيفية، فالمصدر الضوئي ذو النقاوة الطيفية العالية يملك درجة عالية من التشاكه الزمني.

4- السطوع: قد يتصور القارئ عند مشاهدته لحزمة الليزر البراقة بان قدرة هذا المصدر تفوق بكثير قدرة مصابيح الانارة التقليدية. ان العكس صحيح فالاخيرة تفوق قدرتها عدة مراتب قدرة الليزر ويعزى سبب الشدة العالية لحزمة الليزر الى تركيز الطاقة المنبعثة فضائيا في حزمة ضيقة القطر بسيطة الانفراج. من هنا جاءت علاقة هذه الصفة بصفة الاتجاهية، اذ يعرف سطوع مصدر ضوئي على انه مقدار الطاقة المنبعثة في وحدة الزمن لوحدة المساحة من السطح ولوحدة الزاوية المجسمة لهذا يمكن القول بان ليزر هيليوم- نيون الذي لا تتجاوز قدرته $1mW$ هو مصدر اسطع من الشمس.

الفصل الاول: تعامل الاشعاع مع المادة

اشعاع الجسم الاسود

اذا فرضنا بان هناك تجويفا مملوء بوسط عازل متجانس الصفات لاي اتجاه كان في الفضاء وان جدران هذا التجويف قد حفظ بدرجة حرارة T، فان مثل هذه الجدران تبعث اشعاع كهرومغناطيسي باستمرار كما انها تستلم ما يسقط عليها من الاشعاع وعندما يصبح معدل الامتصاص والانبعاث متساو يقال بان شرط التوازن قد تحقق عند اي موضع داخل التجويف او عند جدرانه ويطلق على اشعاع هذا التجويف باشعاع الجسم الاسود.

كما يمكن وصف الاشعاع لحالة التوازن هذه بكثافة طاقته ρ ويقصد بها مقدار الطاقة الموجودة في وحدة الحجم من التجويف. ولما كانت هذه الطاقة تختص بالاشعاع الكهرومغناطيسي لهذا كان من الافضل التعبير عنها بدلالة المجال الكهربائي $E(t)$ والمجال المغناطيسي $H(t)$، حيث يتم تعريفها حسب العلاقة الاتية:

$$\rho = \frac{1}{2}\varepsilon E^2(t) + \frac{1}{2}\mu H^2(t)$$

حيث ان ε، μ هما على التوالي السماحية الكهربائية والنفوذية المغناطيسية للوسط الذي يملا التجويف. ان طاقة الاشعاع للجسم الاسود هي دالة للتردد، اي ان طاقة الاشعاع الكهرومغناطيسي تتوزع على قيم مختلفة للتردد ويعرف هذا بتوزيع الطاقة الطيفي ρ_v حيث يمثل المقدار $\rho_v dv$ كثافة طاقة الاشعاع في مدى تردد محصور بين v و $v+dv$ لذا تكون العلاقة بين ρ و ρ_v على الوجه الاتي:

$$\rho = \int_0^\infty \rho_v dv$$

ان دالة توزيع الطاقة الطيفي هي دالة عامة لا تعتمد على شكل التجويف او طبيعة جدرانه وتعتمد فقط على التردد ودرجة حرارة التجويف.

النتائج المستحصلة لاشعاع الجسم الاسود على ضوء الميكانيك الكلاسيكي

ان الاحتمالية dp لتردد معين لتجويف تقع طاقة الاشعاع فيها بين المقدار E و $E+dE$ على النحو التالي:

$$dp = Ce^{-E/KT}dE \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

حيث ان C يمثل مقدار ثابت و K ثابت بولتزمان. وعند استخدام هذه المعادلة يكون معدل الطاقة $\overline{E}$ لتردد صيغة تذبذب معينة:

$$\overline{E} = \frac{\int_0^\infty Ee^{-E/KT}dE}{\int_0^\infty e^{-E/KT}dE} = KT \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

وان عدد صيغ التذبذب لمدى معين من التردد تعطى بالشكل التالي:

$$N_v dv = V\frac{8\pi v^2 dv}{c^3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

حيث ان V يمثل حجم التجويف و c تمثل سرعة الضوء. وان عدد صيغ التذبذب المتواجدة في هذا المدى من التردد مقسوما على حجم التجويف، يعطى كالتالي:

$$\rho_v dv = \frac{N_v dv}{V}\overline{E}$$

$$\rho_v dv = \frac{8\pi v^2 KT}{c^3}dv \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

ويمكن كتابة المعادلة (4) بدلالة طول الموجة ايضا، اي ان:

$$\rho_\lambda d\lambda = \frac{8\pi K}{\lambda^5}\lambda T d\lambda \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

هذه المعادلة تمثل التوزيع الطيفي لاشعاع جسم اسود حسب حسابات رايلي- جينز حيث ان هذه المعادلة قد تطابقت مع النتائج التجريبية عند الاطوال الموجية القصيرة وفشلت في تفسير اشعاع الجسم الاسود عند الاطوال الموجية الطويلة.

النتائج المستحصلة لاشعاع الجسم الاسود على ضوء الميكانيك الكمي

تنص هذه الفرضية الاساسية على ان طاقة التردد لتجويف اشعاع كهرومغناطيسي لا يمكن ان تاخذ اية قيم بل ان الطاقة يجب ان تاخذ قيما معينة محددة ويجب ان تكون هذه القيم مضاعفات عددية لكمية اساسية تتناسب مع تردد صيغة التذبذب للاشعاع، بمعنى اخر، فرض بلانك بان طاقة التذبذب E لصيغة معينة ذي تردد v يعبر عنها بالشكل الاتي:

$$E = hv$$

$$n = 0,1,2,..... \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

يمثل h مقدار ثابت يدعى بثابت بلانك. ان في مضمون هذه الفرضية تحديد لكيفية التعامل مع داخل التجويف وجدرانه، اي ان التعامل مع اشعاع الجسم الاسود يتم على اساس التعامل مع كمات من الطاقة، ومقدار كل كم يساوي hv وهذا الكم يطلق عليه بالفوتون. وعلى ضوء هذه الفرضية يكون معدل الطاقة لصيغة معينة من التذبذب ذي تردد v على الشكل الاتي:

$$\overline{E} = \frac{\sum_0^\infty nh\nu e^{-nh\nu / KT}}{\sum_0^\infty e^{-nh\nu / KT}}$$

$$\overline{E} = \frac{h\nu}{e^{h\nu / KT} - 1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

وان عدد صيغ التذبذب لمدى معين من التردد تعطى بالشكل التالي:

$$N_\nu d\nu = V \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

حيث ان V يمثل حجم التجويف و c تمثل سرعة الضوء. وان عدد صيغ التذبذب المتواجدة في هذا المدى من التردد مقسوما على حجم التجويف، يعطى كالتالي:

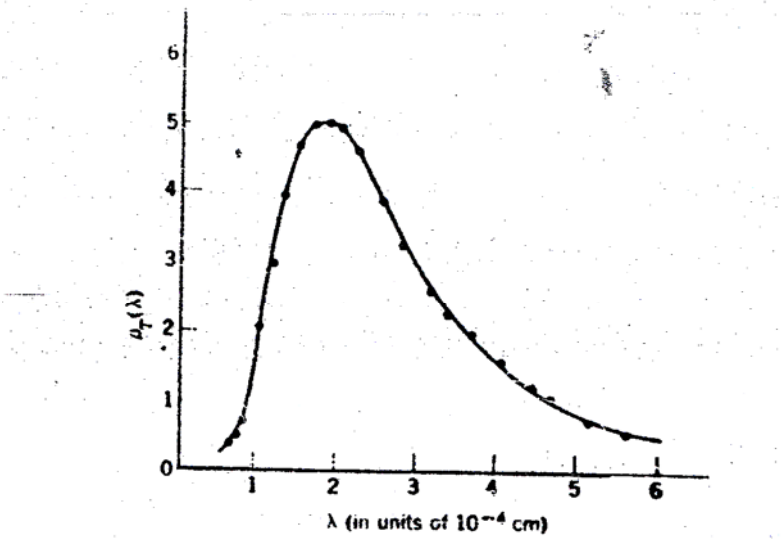
$$\rho_\nu d\nu = \frac{N_\nu d\nu}{V} \overline{E}$$

$$\rho_\nu d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3\left(e^{h\nu / KT} - 1\right)} d\nu \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

والتي يمكن كتابتها ايضا بدلالة طول الموجة λ ، اي ان:

$$\rho_\lambda d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5\left(e^{hc / \lambda KT} - 1\right)} d\lambda \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

وهذا هو التوزيع الطيفي لاشعاع الجسم الاسود كما وجده ماكس بلانك والذي هو في توافق تام مع القيم التجريبية وكما هو موضح بالشكل ادناه:



شكل (١ ـ ٦): مقارنة بين التوزيع الطيفي لبلانك والنتائج التجريبية.

س: متى يمكن ان تختزل معادلة الاشعاع للجسم الاسود على ضوء فرضية ماكس بلانك الى معادلة رايلي- جينز لاشعاع هذا الجسم.

ملاحظة: من المفيد معرفة العلاقة بين كثافة الطاقة (ρ) لاشعاع الجسم الاسود (داخل التجويف) والشدة (I) للاشعاع، اذ يمكن البرهنة على ان العلاقة بين هذين المقدارين هي:

$$\rho = \frac{4I}{c}$$

كذلك تكون العلاقة بين المقادير الطيفية، اي ان:

$$\rho_\nu = \frac{4I_\nu}{c}$$

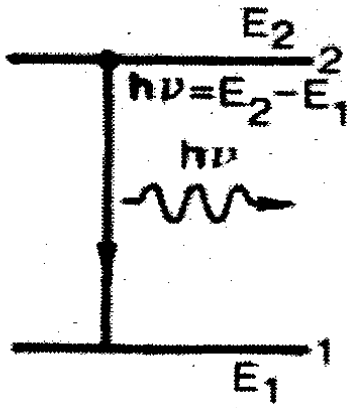
فاذا ما عوضنا عن (ρ_ν) من المعادلة (4) في العلاقة الاخيرة نحصل على تعبير يمثل التوزيع الطيفي لشدة الضوء المنبعثة عن سطح الجسم الاسود.

الانبعاث الذاتي (التلقائي)

لنفرض ان مستويي لذرة او جزيئة لوسط ما هما : (1)، (2) لنفرض بان $E_1 < E_2$ (لاحظ الشكل ادناه). للسهولة نفرض ان المستوى (1) هو المستوى الارضي لذرة المادة وان الذرة في البداية هي في المستوى (2). فما دام $E_1 < E_2$ فالذرة طبيعيا تحاول الاضمحلال الى المستوى (1) وبهذا تحرر طاقة بمقدار E_2-E_1 على شكل موجات كهرومغناطيسية، هذه الظاهرة تدعى بالانبعاث الذاتي (التلقائي) او المشع، اما تردد الموجة المنبعثة فيعبر عنها بدلالة قانون بلانك، اي ان:

$$\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

حيث ان h هو ثابت بلانك.



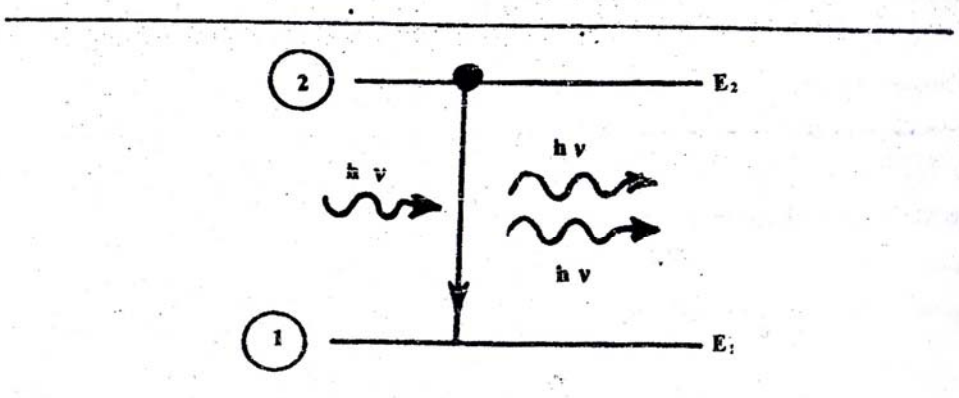
ان الانبعاث الذاتي يكون مميزا بانبعاث فوتون بطاقة E_2-E_1 مساوية الى $h\nu$ عندما تضمحل الذرة من مستوى الطاقة (2) الى مستوى الطاقة (1). ويوصف هذا الانبعاث عادة على النحو التالي: لنفرض ان وحدة الحجم من المادة تحوي عددا من الذرات يساوي N_2 في المستوى (2) في الزمن (t) مثلا. بهذا يكون معدل الاضمحلال لذرات المادة نتيجة الانبعاث الذاتي والمعبر عنه بالمقدار $(dN_2/dt)_{sp}$ متناسبا مع العدد N_2، اي ان:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{sp} = -AN_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

حيث ان المعامل A يدعى باحتمالية الانبعاث الذاتي او المعامل A لاينشتاين. ان الانبعاث الذاتي هو احد الطريقتين المحتملتين لاضمحلال الذرة: فالاضمحلال قد يحدث دون ان يصحبه انبعاث لموجات كهرومغناطيسية ويدعى هذا الاضمحلال (بالاضمحلال غير المشع) وتخسر الذرة فرق الطاقة عن طريق اصطدامها بما حولها من الذرات او الجزيئات المماثلة او المخالفة او عن طريق اصطدامها بجدار الاناء الذي يحويها.

الانبعاث المحفز

لنفرض ان الذرة موجودة ايضا في المستوي (2) ولكن هذه المرة بحضور اشعاع كهرومغناطيسي متواجد في الوسط وتردد (v) بحيث ان (hv) يساوي تماما الفرق بين طاقتي المستويين (1) و(2). عند توفر هذا الشرط، اي عندما يكون تردد الموجات الساقطة مساويا لتردد الانتقال الذري فهناك احتمالية محددة لهذا الاشعاع ان يحفز الذرة التي هي في المستوي (2) ويجبرها على الانتقال منه الى المستوي الاوطا (1). في هذه الحالة يتحرر فرق الطاقة ($E_2 - E_1$) للذرة المنتقلة على شكل موجات كهرومغناطيسية تضاف الى الموجة الساقطة وتتحد صفاتها معا بشكل خاص. ففي هذه الحالة وبسبب كون عملية الانبعاث المحفز عملية اضطرارية ومن قبل الموجة الساقطة فالموجة المنبعثة من اية ذرة محفزة في المستوي (2) تكون متحدة في الطور مع الموجة الساقطة كما ان الاخيرة تحدد اتجاه انتقال الموجة المنبعثة. ان هذا يمثل فرقا جوهريا بين الانبعاث المحفز والانبعاث الذاتي فالاخير يحدث بصورة تلقائية محضة وبمجرد وجود الذرة في حالة محرضة فالذرة المضمحلة تبعث اشعاعا كهرومغناطيسيا لا يكون له علاقة طور محددة بتلك الذي تبعثه ذرة اخرى متواجدة في المستوي ذاته كما ان هذا الاشعاع قد ينتقل باي اتجاه في الفضاء.



شكل (١ ـ ٩) : تخطيط توضيحي لعملية الانبعاث المحفز.

توصف عملية الانبعاث المحفز بالمعادلة الاتية:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{st} = -W_{21}N_2$$

حيث ان (W_{21}) يدعى باحتمالية الانتقال المحفز وكما هو الحال للمعامل (A) يكون للمعامل (W) وحدة مقلوب الزمن (s^{-1}) ولكن المقدار (W) لا يماثل المقدار (A) من ناحية كون الاول لا يعتمد فقط على الانتقال المحدد بين

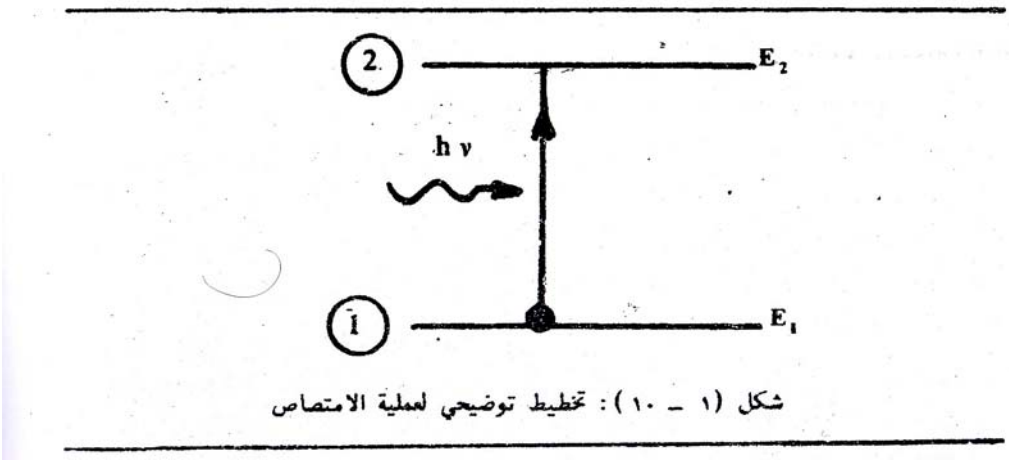
المستويين المعنيين (1) و (2) وانما يعتمد على شدة الاشعاع الكهرومغناطيسي الساقط، فلموجة كهرومغناطيسية مستوية يكون:

$$W_{12} = \sigma_{21} F$$

حيث يمثل المقدار (F) التدفق الفوتوني للموجة الساقطة، اما ثابت التناسب (σ_{21}) فهو كمية لها ابعاد المساحة وتدعى بمقطع الانبعاث المحفز.

الامتصاص

لنفرض الان بان الذرة متواجدة في المستوي الاوطا للطاقة، المستوي (1) فاذا كان هذا المستوي الارضي فان الذرة ستبقى هناك ما لم تتعرض الى محرض خارجي وكمثال على هذا تعرض الوسط الى اشعاع كهرومغناطيسي ذي تردد (ν) بحيث ان ($h\nu$) يساوي فرق الطاقة بين المستويين قيد الدرس. في هذه الحالة تكون للذرة احتمالية محدودة للارتقاء الى المستوي الاعلى (2) اذ تغذي الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة الذرة بمقدار فرق الطاقة ($E_2 - E_1$) الذي تحتاجه لاتمام عملية الانتقال هذه والتي تدعى بعملية الامتصاص.



شكل (١ ـ ١٠): تخطيط توضيحي لعملية الامتصاص

يمكننا بطريقة مماثلة ان نعبر عن معدل الامتصاص بالمعادلة:

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_{ab} = -W_{12} N_1$$

حيث ان (N_1) تمثل تاهيل المستوي (1)، اي عدد الذرات المتواجدة في المستوي (1) لوحدة الحجم من الوسط الذري في زمن معين. كما يمثل المقدار (W_{12}) احتمالية الامتصاص وبنفس الطريقة يمكن التعبير عن المقدار (W_{12}) بالعلاقة:

$$W_{12} = \sigma_{12} F$$

حيث يكون للمقدار (σ_{12}) بعد المساحة ويدعى بمقطع الامتصاص ويعتمد فقط على الانتقال المعين.

اخيرا لابد لنا ان نذكر بان مقطعي الامتصاص والانبعاث المحفز متساويان ($\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma$) وهذا يعني ايضا تساوي احتمالية عملية الانبعاث المحفز لاحتمالية عملية الامتصاص اي ان ($W_{12} = W_{21} = W$) عند تواجد الذرة

في اشعاع كهرومغناطيسي مناسب وهي نتيجة توصل اليها اينشتاين في مطلع القرن السابق. كما يمكن القول بان عملية الانبعاث المحفز هي عملية امتصاص سالبة او باتجاه معاكس.

مقطع الانتقال، معامل الامتصاص ومعامل الكسب

يمكن تعريف مقطع الانتقال (σ) بالشكل الاتي:

$$\sigma = \frac{W}{F} \quad .....(1)$$

حيث ان ($F = I/\hbar\omega$) والذي يمثل التدفق الفوتوني وعند تعويض قيمتة في معادلة (1) نحصل على:

$$\sigma = \frac{W}{I}\hbar\omega \quad .....(2)$$

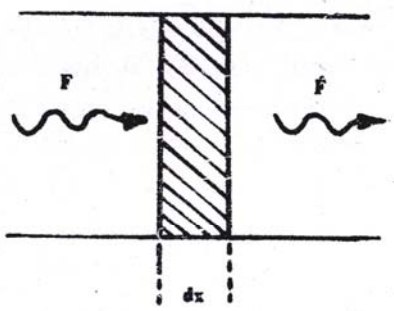
ويمكن ايضا وصف الفصل المتبادل للاشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة بكمية اخرى معروفة الا وهي معامل الامتصاص (α) والذي يرتبط مع مقطع الانتقال (σ) بالعلاقة الاتية:

$$\alpha = \sigma(N_1 - N_2) \quad .....(3)$$

فاذا كان تاهيل المستوى الاوطا (N_1) اكبر من تاهيل المستوي الاعلى منه (N_2) لذا فان المقدار (α) مقدار موجب، وبهذا الشكل فان هذا المعامل يعتمد على تاهيل المستويين لذرات المادة، اضافة الى هذا فان اهمية استخدام معامل الامتصاص (α) تقع في امكانية قياسه وبصورة مباشرة في اكثر الحالات وذلك كما يلي:

لاحظ الشكل ادناه، فاذا سقط سيل فوتوني (F) على وسط متجانس باتجاه (x) مثلا فان التغير في هذا التدفق (dF) نتيجة عبوره مسافة (dx) في الوسط يمكن التعبير عنه بالمعادلة:

$$dF = -\alpha F dx \quad .....(4)$$



شكل (١ ـ ١٣) : التغير المتناهي في الصغر dF في التدفق الفوتوني لموجة كهرومغناطيسية مستوية نتيجة عبورها مسافة d x في الوسط .

فاذا قطع هذا السيل مسافة (L) داخل المادة فان النسبة بين التدفق (F) والتدفق الساقط (F_o) تكون:

$$F = F_o e^{-\alpha L} \quad .....(5)$$

وبدلالة شدة الاشعاع (I) يكون:

$$I = I_o e^{-\alpha L} \quad .....(6)$$

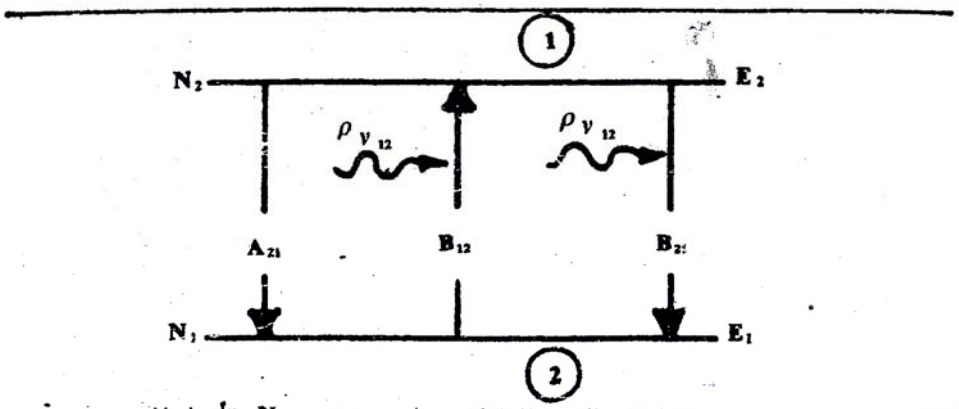
ومن الاستنتاجات الاخرى حول الموضوع هي الحالة التي يكون فيها ($N_1 < N_2$) وهي حالة الليزر فان معامل الامتصاص المعرف في المعادلة (6) يغدو سالبا وفي هذه الحالة تتضخم الموجة الساقطة بدلا من ان تضعف نتيجة الامتصاص من قبل الوسط، عندها نتكلم عن كمية جديدة (G) تعرف بالشكل الاتي:

$$G = -\alpha = \sigma(N_2 - N_1) \quad .....(7)$$

هذه الكمية تدعى بمعامل الكسب.

حسابات اينشتاين لمعاملات الاحتمالية

لو نظرنا الى الشكل ادناه وفرضنا بان (N_2, N_1) ذرة خلال المتر المكعب هما على التوالي تاهيل هذين المستويين في حالة التوازن وان (ρ_v) تمثل الكثافة الطيفية، لذلك فهناك احتمالية لحدوث العمليات الثلاث الاتية الا وهي: الانبعاث التلقائي، الانبعاث المحفز والامتصاص.



شكل (١ ـ ١٢) : توضيح المعاملات الاحتمالية لاينشتاين ، N_1 و N_2 تأهيل المستويين E_1 و E_2 على التوالي اما التردد ν_{12} فيعطى بالعلاقة : $h\nu_{12} = (E_2 - E_1)$

1- الانبعاث التلقائي (الذاتي): يحصل من المستوى (2) الى المستوى (1) باحتمالية مقدارها (A_{21}) ذرة لكل ثانية وان عدد مثل هذه الانتقالات في الثانية الواحدة وفي المتر المكعب ويساوي ($A_{21}N_2$).

$$r_{sp} = A_{21}N_2 \quad .....(1)$$

2- الامتصاص: فيحصل عند وجود المادة في وسط اشعاع كهرومغناطيسي وبكثافة (ρ_{v12}) فان ذرة المادة التي في المستوى (1) قد تمتص هذا الاشعاع وتقفز الى المستوى (2) باحتمالية ($W_{12} = B_{12}\rho_{v12}$) ذرة لكل ثانية، حيث ان المقدار (B_{12}) ثابت ويدعى بمعامل B-اينشتاين. اما عدد مثل هذه الانتقالات من المستوى الاسفل باتجاه نحو الاعلى في الثانية الواحدة وللمتر المكعب من المادة يساوي ($W_{12}N_1$) او يساوي ($B_{12}N_1\rho_{v12}$).

$$r_{ab} = B_{12}N_1\rho_{v12} \quad .....(2)$$

3- الانبعاث المحفز: والذي يحصل بحضور المادة تحت تاثير الاشعاع الكهرومغناطيسي ايضا ذو الكثافة الطيفية (ρ_{v12}). فالذرة التي هي في المستوى الاعلى تتحفز بسبب هذا الاشعاع وتنتقل الى المستوى الاوطا وباحتمالية

تساوي ($W_{21} = B_{21}\rho_{v12}$) ذرة لكل ثانية، حيث ان المقدار (B_{12}) ثابت ويدعى بمعامل B-اينشتاين. اما عدد مثل هذه الانتقالات من المستوى الاعلى باتجاه نحو الاسفل في الثانية الواحدة وللمتر المكعب من المادة يساوي ($W_{21}N_2$) او يساوي ($B_{21}N_2\rho_{v12}$).

$$r_{st} = B_{21}N_2\rho_{v12} \quad .....(3)$$

ولما كانت المادة في حالة توازن ثرموداينميكي، فان عدد الانتقالات باتجاه نحو الاسفل يجب ان تعادل عدد الانتقالات باتجاه نحو الاعلى، اي ان ($r_{ab} = r_{sp} + r_{st}$):

$$B_{12}N_1\rho_{v12} = A_{21}N_2 + B_{21}N_2\rho_{v12} \quad .....(4)$$

$$B_{12}N_1\rho_{v12} - B_{21}N_2\rho_{v12} = A_{21}N_2$$

وبترتيب الحدود يمكن ان نحصل على المعادلة الاتية:

$$\rho_{v12} = \frac{A_{21}N_2}{B_{12}N_1 - B_{21}N_2} \quad .....(5)$$

وبقسمة البسط والمقام في معادلة (5) على (N_2)، نحصل على:

$$\rho_{v12} = \frac{A_{21}}{B_{12}\left(\frac{N_1}{N_2}\right) - B_{21}} \quad .....(6)$$

وباستخدام احصاء بولتزمان لحالة التوازن الثرموداينميكي ولتوزيع ذرات المادة على مستويات الطاقة لها، اي ان:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu}{KT}} \quad .....(7)$$

وبتعويض معادلة (7) في معادلة (6) نحصل على:

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}}{B_{12}e^{\frac{h\nu}{KT}} - B_{21}} \quad .....(8)$$

وبمقارنة هذه المعادلة بمعادلة بلانك لاشعاع الجسم الاسود والتي هي:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3\left(e^{h\nu/KT} - 1\right)} \quad .....(9)$$

ينتج ان: $B_{12} = B_{21} = B$ وعليه وبمساواة معادلة (8) مع معادلة (9) نحصل على:

$$\frac{A}{B\left(e^{h\nu/KT} - 1\right)} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3\left(e^{h\nu/KT} - 1\right)}$$

$$\therefore \frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad .....(10)$$

تشير المعادلة (10) الى ان احتمالية حدوث عملية امتصاص المادة لاشعاع الجسم الاسود مكافئة تماما لاحتمالية حدوث عملية الانبعاث المحفز وبسببه ايضا.

ملاحظة: من معادلة اينشتاين اي معادلة (8) فان:

$$\rho_v = \frac{A}{B\left(e^{hv/KT} - 1\right)}$$

$$\rho_v = \frac{A}{BR} \quad \Rightarrow R_o = \frac{A}{\rho_v B}$$

نجد ان: $(R_o = e^{hv/KT} - 1)$، حيث ان (R_o) تسمى بالنسبة بين معدل الانبعاث الذاتي ومعدل الانبعاث المحفز لزوج من مستويات الطاقة.

مثال: احسب النسبة بين معدل الانبعاث الذاتي الى معدل الانبعاث المحفز لمصباح تنكستن بدرجة حرارة $(2000K^o)$، وكان معدل تردد الانبعاث مساويا $(5\times10^{14}\,Hz)$، ثم جد النسبة بين تاهيل مستويي الطاقة المناظرين لهذا الانتقال؟

Solution:

$$R_o = e^{hv/KT} - 1$$

$$R_o = e^{\frac{6.6\times10^{-34}\times5\times10^{14}}{1.38\times10^{-23}\times2000}} - 1 \approx e^{12} - 1 = 1.5\times10^{5}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{hv}{KT}} \approx e^{-12} = 6.14\times10^{-6}$$

مثال: احسب النسبة بين معدل الانبعاث الذاتي الى معدل الانبعاث المحفز لطول موجة الضوء الاصفر اي لطول موجة $(590nm)$ بدرجة حرارة الغرفة $(300K^o)$، ثم جد:

1- النسبة بين تاهيل مستويي الطاقة المناظرين لهذا الانتقال؟

2- باية درجة حرارة يكون معدل الانبعاث المحفز مساويا الى معدل الانبعاث الذاتي؟

3- ما طول الموجة التي يكون لها $(R_o = 1)$ بدرجة حرارة الغرفة؟

مثال: في التوزيع الطيفي للجسم الاسود فان (λ_m) هي قمة طول الموجة التي تعطي النهاية العظمى للدالة التي تمثل هذا الاشعاع في قانون فين، فاذا علمت ان ثابت فين هو $(2.9\times10^{-3}\,m.K^o)$ فاحسب مقدار (λ_m) في درجة حرارة $(6000K^o)$ وما هو اللون المناظر لطول الموجة هذه؟

مثال: اثبت ان معامل الكسب (G) يعطى بالصيغة:

$$G = \left(N_2 - N_1\right)\frac{Bnhvg(\Delta v)}{c}$$

حيث ان (B) يمثل معامل B- اينشتاين، (n) هو معامل انكسار الوسط، (h) هو ثابت بلانك، (v) هو تردد الاشعاع، $g(\Delta v)$ هي دالة شكل الخط الطيفي وان (c) هي سرعة الضوء بالفراغ؟

Solution:

ان مقطع الانتقال يعطى بالمعادلة:

$$\sigma = \frac{W}{F} \quad .....(1)$$

حيث ان (W) تمثل احتمالية الانتقال و(F) هو التدفق الفوتوني والذي يعطى بالمعادلة الاتية:

$$F = \frac{I}{h\nu} \quad .....(2)$$

وعند تعويض معادلة (2) في معادلة (1) نحصل على:

$$\sigma = \frac{W}{I} h\nu \quad .....(3)$$

وبما ان احتمالية الانتقال تعطى ($W = B\rho_\nu = B\rho g(\Delta v)$) وعند تعويضها في معادلة (3) نحصل على:

$$\sigma = \frac{\rho B h\nu g(\Delta v)}{I} \quad .....(4)$$

ولكن شدة الاشعاع تعطى ($I = \rho c / n$) وعند تعويض قيمتها في معادلة (4) نحصل على:

$$\sigma = \frac{Bnh\nu g(\Delta v)}{c} \quad .....(5)$$

وبما ان معامل الامتصاص (α) يعطى :

$$\alpha = (N_1 - N_2)\sigma$$

$$\alpha = (N_1 - N_2)\frac{Bnh\nu g(\Delta v)}{c} \quad .....(6)$$

وبما ان معامل الكسب هو ($G = -\alpha$) وعليه يكون:

$$G = (N_2 - N_1)\frac{Bnh\nu g(\Delta v)}{c} \quad .....(7)$$

مثال: أ) اذا تضاعفت شدة الضوء المارة مرة واحدة خلال وسط ليزري الذي طوله ($0.5m$)، احسب معامل الكسب على اعتبار ان الجهاز لا يتضمن خسارة. ب) اذا كانت الزيادة في شدة الاشعاع بمقدار (5%) فقط لنفس المسار فكم يكون معامل الكسب؟

Solution:

a) $I = I_o e^{GL}$

$2 = e^{0.5G}$

$\ln 2 = 0.5G$

$G = 1.39m^{-1}$

b) $I = I_o + 0.05I_o = 1.05I_o$

$1.05I_o = I_o e^{0.5G}$

$$G = \frac{ln1.05}{0.5} = 0.098m^{-1}$$

مثال: اذا تضاغفت شدة الضوء المار خلال وسط ليزري طوله $(1m)$، احسب: 1- معامل الكسب على فرض ان الجهاز لا يتضمن خسارة. 2- اذا كانت الزيادة في شدة الاشعاع بمقدار (6%) فقط ولنفس الطول فكم يكون مقدار معامل الكسب؟

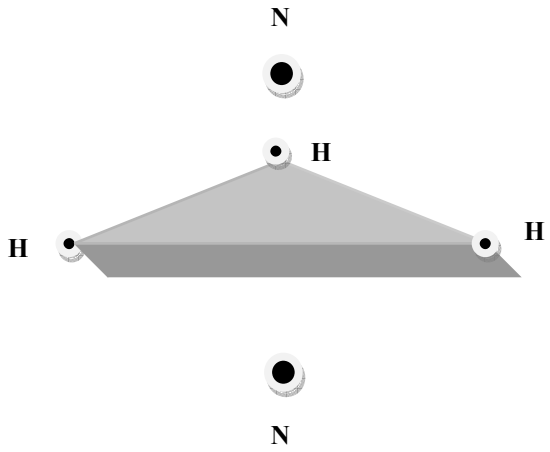
الفصل الثاني: اسس عمل الليزر

نظرة تاريخية:

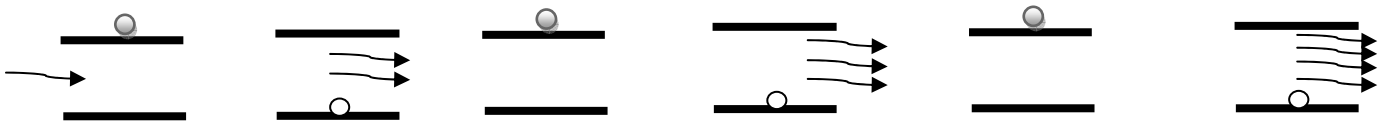
كلمة الميزر (MASER) جاءت من الحروف الاولى للنص الوارد في اللغة الانكليزية الذي يتكون من الكلمات: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation والذي يعني تضخيم الموجات المايكروية بواسطة الانبعاث المحفز للاشعاع.

ان فكرة تضخيم الاشعة الكهرومغناطيسية بواسطة الانبعاث المحفز قد شغلت عقول كثير من الباحثين وخصوصا بعد الحرب العالمية الثانية وكان اول مشروع ناجح لهذه العملية كان من قبل العالم تاونس وطلابه في جامعة كولومبيا عام 1954. حيث اول ميزر وكان يعمل عند الطول الموجي ($1.25cm$) وكان هذا الطول الموجي يستخدم في الرادار. فلغرض تكبير هذه الموجة والتي ترددها ($28.87GHz$) وللحصول على التوزيع العكسي قام هذا العالم بفصل جزيئات الامونيا ذات الطاقة العالية المتواجدة في المستوى الاعلى بالحركة باتجاه معين يخالف حركة الجزيئات المتواجدة في المستوى الاوطا باستخدام مجال كهربائي غير متجانس من خلال ترتيب معين لاقطاب المجال.

ان جزيئة غاز الامونيا تعد مصدرا مناسبا لتضخيم الموجات الدقيقة (المايكروية) بالانبعاث المحفز. حيث تستطيع هذه الجزيئة (NH_3) ان تاخذ طاقتين مختلفتين اعتمادا على موقع اهتزاز ذرة النتروجين بشكل عمودي على مستوي ذرات الهيدروجين الثلاث كما في الشكل ادناه:



فعند وجود جزيئات الامونيا بمستويين مختلفين في الطاقة داخل خزان معين وعند سقوط فوتون واحد ذا طاقة مساوية لفرق الطاقة بين المستويين المختلفين لجزيئات الامونيا فانه قد يسبب تفاعلا متسلسلا كما في الشكل ادناه بحيث يتغلب الانبعاث المحفز على عملية الامتصاص وبذلك تتكون موجة كهرومغناطيسية واقفة ضمن مدى الموجات الدقيقة ومكبرة بواسطة الانبعاث المحفز المتسلسل.



شكل يوضح الانبعاث المحفز المتسلسل بين ثلاث جزيئات امونيا ذات مستوى عال من الطاقة عند قصفها بفوتون واحد.

يتميز ميزر الامونيا بنقاوة طيفية عالية اذ يستخدم مقياسا لمعايرة الترددات ومن جهة اخرى فان لميزر الامونيا مساوئ حددت من استخدامه اذ ان قدرته الخارجة واطئة جدا وفي حدود ($10^{-10}W$) علاوة على صعوبة مؤالفة هذا الميزر للعمل بترددات مختلفة.

الليزر

بينما كانت تقنية الميزر في طريقها الى الرسوخ كانت الرغبة شديدة لتوسيع نطاق تطبيق تقنية الانبعاث المحفز ليشمل طيف الاشعة تحت الحمراء والاشعة المرئية. ان تاونس وبالتعاون مع شافلوف في عام 1958 الصعوبات والمشاكل التي تستجد في تصنيع الميزر البصري والتي تحتاج الى اجراء تغيير في التوضيحات النظرية بالاضافة الى اجراء تحويرات مهمة في التقنية العملية المستخدمة في بناء الليزر. لذلك فان ملخص اهم تلك المشاكل والعقبات والاراء التي وردت في تلك الدراسة هي:

1- تكون الفروق في مستويات الطاقة (ΔE) اللازمة لتوليد اشعة مرئية كبيرة مقارنة بالمقدار (KT) في درجة حرارة الغرفة، بينما تكون فروق الطاقة في حالة الميزر صغيرة بالمقارنة بالكمية ذاتها. ان هذا يؤدي الى ضرورة البحث عن اساليب اخرى لتاهيل المستوى المتهيج للطاقة المطلوب تحفيزه. في هذه الحالة يكون معدل ضخ الطاقة لجهاز الليزر اعلى بكثير مما عليه في الميزر.

2- في حالة تهيج الذرة ولانبعاث واقع في نطاق الاشعاع المرئي، يكون الانبعاث التلقائي هو المهيمن على عملية انبعاث الاشعاع والمطلوب الان هو تقليص هذا النشاط والعمل على انعاش الانبعاث المحفز.

3- في كل من الميزر والليزر، توضع المادة الفعالة في تجويف حيث تتم عملية التكبير وتقوية التذبذب، يدعى هذا التجويف بالمرنان ففي حالة الميزر يمكن بسهولة تصميم تجويف ليناسب طول الموجة المايكروية بحدود ($1.25cm$) وتسمح فقط باحتواء صيغة واحدة للتذبذب. اما في حالة التطبيق في نطاق الطيف المرئي حيث يكون طول الموجة صغير جدا حيث يكون متوسط طول الموجة حوالي ($0.5\times10^{-4}cm$). ان اي تصميم لحجم تجويف يمكن تحقيقه عمليا سيسمح بتواجد عدد كبير من صيغ التذبذب تقع ضمن النطاق الترددي للخط الطيفي قيد الانبعاث. حيث ان الصيغ العديدة للتذبذب تضعف عمل الليزر وتؤثر على استقراريته.

4- في مدى الموجات المايكروية ولعملية الانبعاث المحفز يمكن انجاز الضخ البصري باستخدام اشعة صادرة عن مولدات اشارة يمكن مؤالفة ترددها مع التردد المطلوب بينما لم تكن تتوفر حينذاك مصادر ضوئية تعمل بنفس الطريقة وذات قدرة عالية قبل ظهور مصادر الليزر ذاتها.

لم يتمكن هذين العالمين من انتاج اول ميزر بصري (ليزر) فقد اتيحت الفرصة لغيرهم لصنع اول نتاج لميزر بصري في مختبرات بحوث هيوز في الولايات المتحدة عام 1960 حيث انجز الاختراع من قبل مايمن والذي اعتمد في انجازه على ما نشره تاونس وبعد عدة ايام فقط. استخدم مايمن الايقوت الوردي كوسط فعال لاول ميزر بصري وهي المادة التي استخدمت من قبله في الميزر ولكن بانتقاء خطة ضخ تتضمن ثلاث مستويات لتوليد التاهيل العكسي للمستوى الوسطي مستخدما بذلك مصباح ومضي من الزينون للتشعيع وبهذا اصبح الياقوت مادة فعالة مكبرة عند

الطول الموجي ($693.3nm$) اضافة الى الطول الموجي ($1.25cm$) الصادر من الميزر، وبعد ذلك توالت عدة انواع من الليزرات.

تاريخيا تعد بحوث الليزر امتداد لبحوث الميزر حيث اطلق على الليزر في بادئ الامر بالميزر البصري واما تسميته الان بالليزر (LASER) فلقد جاءت وبالتسلسل من الاحرف الاولى للتعبير التالي: (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)، والتي تعني تضخيم الضوء المرئي بواسطة الانبعاث المحفز للاشعاع.

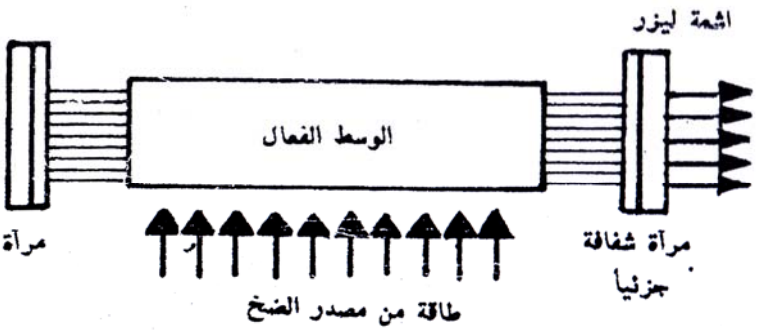
فكرة الليزر

لكي تعمل اجهزة الليزر يجب ان يتوفر لها ثلاثة شروط اساسية وهي:

1- وجود الوسط الفعال: القاعدة الاساس لعمل الليزر وهو نظام ذو عدد كبير من الذرات او الجزيئات او الايونات بحالتها الصلبة او السائلة او الغازية والتي تبعث طيفا يقع جزء منه في المدى المرئي من الاشعاع الكهرومغناطيسي.

2- تحقيق التاهيل العكسي: وهو شرط ضروري لجعل عملية الانبعاث المحفز نشطة وبما ان هذه الشرط لا يتحقق تحت الظروف الاعتيادية لذا تستخدم طرق ضخ معينة تنفذ وفق مخططات خاصة تناسب مستويات الطاقة لذرات الوسط الفعال.

3- التغذية الاسترجاعية: وهو شرط ضروري لكي ياخذ الاشعاع المنبعث تذبذبه الصحيح ويؤدي بالتالي الحصول على حزمة من الاشعة ذات درجة عالية من صفة الاتجاهية وصفة التشاكه بدون هذا الشرط يعمل الليزر كمكبر. يمكن تحقيق هذا الشرط باستخدام تجويف رنيني ذو تصميم مناسب يدعى بالمرنان. اوا تصميم لمرنان ناجح استخدم لاشعة الانبعاث المحفز في المدى المرئي هو مقياس التداخل لفابري- بيرو.



شكل (٢ ـ ٢) : رسم تخطيطي لمذبذب الليزر ، الوسط الفعال والمرنان .

ملاحظة: عند تحقيق الشروط الثلاثة اعلاه يبقى هناك شرطا يدور حول الموضوع ككل وهو مهم لعمل كل من الميزر والليزر ويطلق عليه شرط العتبة ولابد من تحقيق متطلبات هذا الشرط لتبدا عملية التكبير في الوسط الفعال ومن ثم عملية التذبذب في المرنان ويرجع سبب هذا الى كون اجهزة الليزر كاية اجهزة عملية غير مثالية، تتضمن من مسببات الخسارة والتبدد الكثير وهي على العموم اجهزة ذي كفاءة واطئة اذا ما قورنت بالاجهزة العملية الاخرى.

التاهيل العكسي وشرط العتبة

ترجع الخسارة الكلية في جهاز الليزر الى عوامل مختلفة واهمها:

1- النفوذ عند المرايا للمرنان ولذلك تصنع المرايا بشكل يحقق لها القدرة انعكاسية مثلى الا ان الخسارة في مثل هذه المرايا تاتي ايضا عن الامتصاص والتطاير اضافة الى خسائر الحيود.

2- الخسارة في الوسط الفعال لليزر بسبب حدوث انتقالات اخرى لا علاقة لها بانتقال الليزر وهو يحدث نتيجة امتصاص الوسط لنطاق عريض من طاقة الضخ. اضافة الى الخسارة المتسببة عن التطاير بسبب فقدان الوسط الفعال للتجانس البصري وهذه الخسارة تتواجد بشكل خاص في ليزر الحالة الصلبة.

لتسهيل الحسابات، دعنا ندمج جميع عوامل الخسارة عدا تلك المتسببة عن النفوذ في المرايا بمعامل خسارة واحد يكافئ المقدار (γ). هذا سيعمل على تقليص معامل الكسب (G) المتمثل بالمعادلة ($I = I_o e^{GL}$) الى ($I = I_o e^{(G-\gamma)L}$).

لحساب الربح عند العتبة سيتم حساب مقدار التغير في شدة الاشعاع نتيجة رحلة (دورة) كاملة واحدة له داخل المرنان، فلو فرضنا بان هذا الوسط يملا الفسحة ما بين المرآتين (M_2, M_1) واللتين لهما قدرة انعكاسية (R_2, R_1) على التوالي وانهما على مسافة (L) بينهما. وان هذه الشدة بعد انعكاسها عن المرآة (M_2) ستصبح ($R_2 I_o e^{(G-\gamma)L}$) وبعد رحلة كاملة فان مقدار الربح (Γ) يعبر عنه بالنسبة بين الشدة النهائية الى الشدة الابتدائية، اي ان:

$$\Gamma = \frac{I}{I_o} = R_1 R_2 e^{2L(G-\gamma)} \qquad .....(1)$$

فاذا كان الربح اكبر من واحد عند التردد المطلوب فان التضخيم ينمو وكذلك التذبذب، اما في حالة كون الربح اقل من واحد فان التذبذب يتلاشى، لذا يمكن كتابة شرط العتبة على النحو التالي:

$$R_1 R_2 e^{2L(G_{th}-\gamma)} = 1 \qquad .....(2)$$

$$e^{2L(G_{th}-\gamma)} = \frac{1}{R_1 R_2} \qquad .....(3)$$

وتمثل (G_{th}) معامل كسب العتبة، والذي ياخذ الشكل التالي:

$$G_{th} = \gamma + \frac{1}{2L} ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \qquad .....(4)$$

يمثل الحد الاول (γ) في معادلة (4) الخسارة في الوسط الفعال (خسارة الحجم) ويمثل الحد الثاني الخسارة في تصميم المرنان وهذه الخسارة تتضمن التسرب النافع لنتاج الليزر.

مثال: احسب قيمة التاهيل العكسي اللازم للحصول على معامل كسب ($1m^{-1}$) لليزر النيوديميوم- ياك عندما يكون زمن عمر المستوى الاعلى ($230\mu s$) وطول الموجة ($1.06\mu m$) وان ($\Delta v = 3\times10^{13}\,Hz$) ومعامل انكسار الوسط ($1.82$)؟

Solution:

$$\because\ N = \frac{Gc}{Bhvng(\Delta v)}$$

$$\because\ g(\Delta v) = \frac{1}{\Delta v}, A = \frac{1}{\tau}, \frac{A}{B} = \frac{8\pi hv^3}{c^3}, v = \frac{c}{\lambda}$$

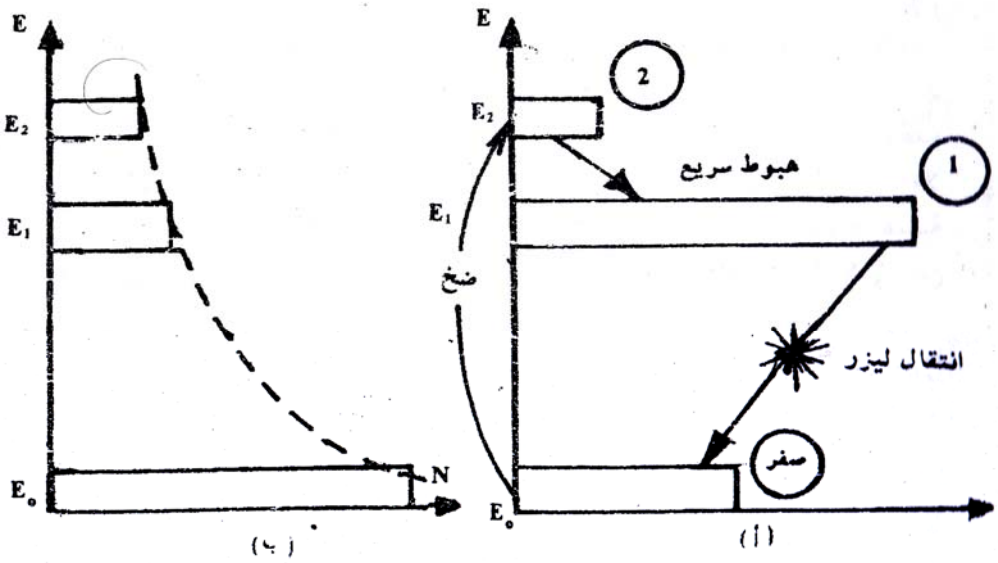
$$N = \frac{8\pi\Delta vG\tau}{n\lambda^2} = \frac{8\pi\times3\times10^{13}\times1\times230\times10^{-6}}{1.82\times\left(1.06\times10^{-6}\right)^2} = 8.48\times10^{22}\,m^{-3}$$

مثال: احسب معامل الكسب عند العتبة من المعلومات التالية لليزر الياقوت: مقدار التاهيل العكسي الحرج ($5\times10^{22}\,m^{-3}$)، معامل انكسار الوسط (1.5) وعرض خط انتقال ($7\times10^{11}\,Hz$) ومعامل A-اينشتاين ($300s^{-1}$) لطول موجة تساوي ($694.3nm$)؟

خطط الضخ

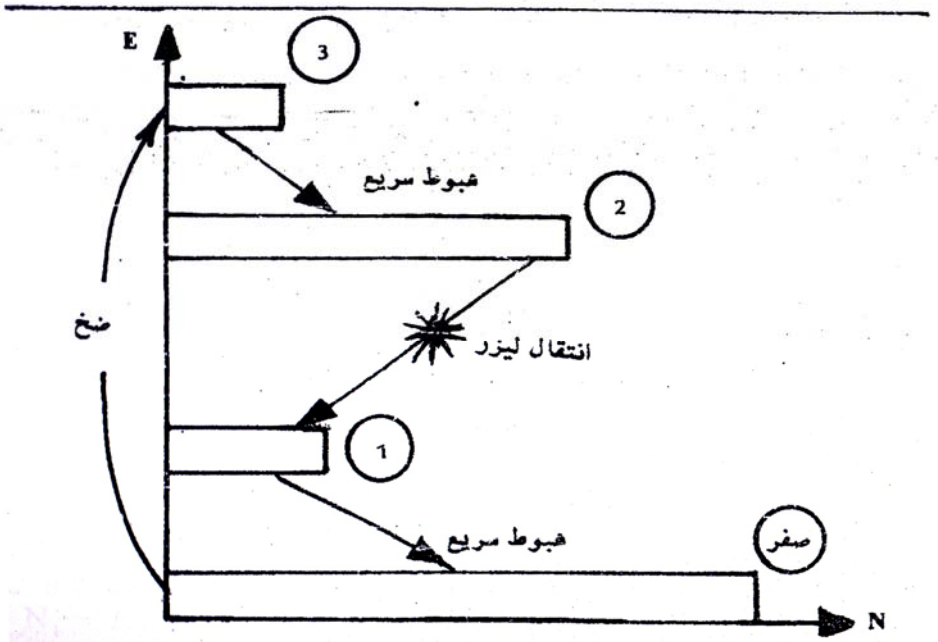
يتضمن هذا البند دراسة المخطط الذي يتم بواسطته تحقيق التاهيل العكسي لوسط الليزر، اي دراسة كيفية ضخ الوسط الفعال بطاقة من مصدر ما بحيث يتسبب عن هذه العملية خلق وضعية غير طبيعية لتاهيل مستويات الطاقة ذات العلاقة بانبعاث طيفي معين. ان تحقيق التاهيل العكسي بمقدار يتجاوز القيمة الحرجة لمستويين ضمن هذا المخطط يؤدي الى اشعاع يتضخم عن طريق الانبعاث المحفز.

1- خطة الضخ في ليزر ذي الثلاث المستويات: في خطة الضخ ذي الثلاث المستويات والمقترح من قبل (بلومبركن) في جامعة هارفرد عام 1956، ترفع الذرات بالضخ بطريقة ما من المستوى الارضي (E_o) الى المستوى (E_2). فاذا انتخب الوسط بحيث عند وصول الذرات الى المستوى (E_2) فانها تهبط بسرعة الى المستوى (E_1)، اي يكون متوسط زمن العمر للمستوى (E_2) قصير جدا في حين يكون متوسط زمن العمر للمستوى (E_1) طويل جدا، عند تحقق هذين الشرطين يمكن تعبئة المستوى (E_1) بالضخ من المستوى الارضي (E_o) وعبر المستوى (E_2) فيولد عندئذ الانتقال من المستوى (E_1) الى المستوى الارضي (E_o) اشعاع الليزر المطلوب، لاحظ الشكل ادناه. ان ليزر الياقوت يعمل وفق هذه الخطة.



شكل (٢ ـ ٣) : تأهيل مستويات الطاقة لنظام ذي ثلاث مستويات
أ) التأهيل العكسي نتيجة ضخ الطاقة ـ توزيع غير متوازن يؤدي الى انتقال الليزر . ب) التأهيل حسب توزيع بولتزمان من دون ضخ .

2- خطة الضخ في ليزر ذي الاربعة مستويات: في خطة الضخ ذي الاربع مستويات، ترفع الذرات بالضخ بطريقة ما من المستوى الارضي (E_o) الى المستوى (E_3) فاذا انتخب الوسط بشكل يوفر هبوطا سريعا من المستوى (E_3) الى المستوى (E_2) وكذلك هبوطا سريعا من المستوى (E_1) الى المستوى (E_o) فان تاهيلا عكسيا سيتوفر بين المستوى (E_2) كمستوى اعلى والمستوى (E_1) كمستوى اوطا حيث يولد الانتقال بينهما اشعاع الليزر المطلوب، لاحظ الشكل ادناه. ان ليزر النديميوم يعمل وفق هذه الخطة.



شكل (٢ ـ ٤) : التأهيل العكسي لمستويات الطاقة في نظام ذي اربع مستويات نتيجة ضخ الطاقة

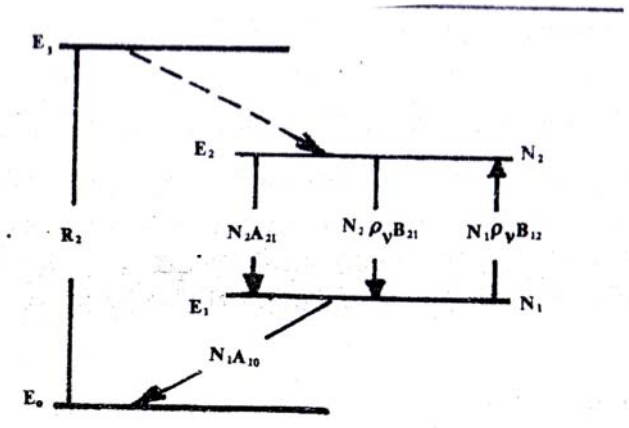
والسؤال المطروح الان ايهما افضل خطة للضخ هل ليزر ذي الثلاث المستويات ام نظام ذي الاربعة المستويات؟ للاجابة عن هذا التساؤل فان نظام الليزر ذي الاربعة المستويات يكون افضل، وذلك لان التاهيل العكسي في خطة الضخ ذي الاربعة مستويات ينفذ بسهولة اكثر من استخدام خطة الضخ ذي الثلاثة مستويات اذ تكون قدرة الضخ اللازمة في الحالة الاولى اقل. فحسب توزيع بولتزمان تكون جميع الذرات تقريبا قبل الضخ في الحالة الارضية. وعند استخدام خطة ضخ ذي ثلاثة مستويات، نبدا برفع الذرات من المستوى (E_o) الى المستوى (E_2) بعدها تهبط هذه الذرات بسرعة الى المستوى (E_1)، لذلك يبقى المستوى (E_2) فارغا تقريبا. في هذه الحالة يتحتم علينا رفع نصف عدد الذرات من المستوى (E_o) الى المستوى (E_1) عبر المستوى (E_2) لكي نساوي تاهيله اولا مع المستوى الارضي (E_o) بعد هذا يكون وصول اية ذرة اضافية الى المستوى (E_1) اشارة الى تحقيق التاهيل العكسي. اما عند استخدام خطة الضخ ذي الاربعة مستويات وما دام المستوى (E_1) فارغا في البداية فان اية ذرة تصعد الى المستوى (E_2) عن طريق المستوى (E_3) ستحقق تاهيلا عكسيا.

قدرة الضخ

لحساب قدرة الضخ اللازمة للوصول الى العتبة يجب حل المعادلات التي تعبر عن معدلات التغير في تاهيل مستويات الطاقة لوسط الليزر ولمخطط معين بدلالة عمليات الامتصاص ومعدل الضخ. لهذا سنستعين بمخطط ليزري ذي اربعة مستويات، كما في الشكل ادناه، على فرض بان الضخ انتقائي ويحدث فقط للمستوى (E_3) وبمعدل (r_2)، لذا يكون معدل التغير في تاهيل المستوى (E_2, E_1) والذي يحدث بينهما انتقال ليزري على النحو التالي:

$$\frac{dN_2}{dt} = r_2 - N_2 A_{21} + N_1 \rho_v B_{12} - N_2 \rho_v B_{21} \quad .....(1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = N_2 A_{21} + N_2 \rho_v B_{21} - N_1 \rho_v B_{12} - N_1 A_{10} \quad .....(2)$$



شكل (٢ ـ ٥) : الانتقالات الواردة في مخطط الاربع مستويات.

اذا تم الضخ بمعدل ثابت فان معدلات التغير اعلاه تساوي صفر، اي ان: ($\frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_1}{dt} = 0$)، لذا فان حل المعادلتين اعلاه للكميتين يعطي:

$$N_1 = \frac{r_2}{A_{10}} \quad \text{.....(3)}$$

وبمساواة معادلة (1) بالصفر وعند تعويض معادلة (3) فيها نحصل على:

$$r_2 - N_2 A_{21} + N_1 \rho_v B_{12} - N_2 \rho_v B_{21} = 0$$

$$r_2 - N_2 A_{21} - N_2 \rho_v B_{21} + N_1 \rho_v B_{12} = 0$$

$$r_2 - N_2 (A_{21} + \rho_v B_{21}) + \frac{r_2}{A_{10}} \rho_v B_{12} = 0$$

$$N_2 (A_{21} + \rho_v B_{21}) = r_2 + \frac{r_2}{A_{10}} \rho_v B_{12}$$

$$N_2 (A_{21} + \rho_v B_{21}) = r_2 \left(1 + \frac{\rho_v B_{12}}{A_{10}} \right)$$

$$N_2 = r_2 \frac{\left(1 + \frac{\rho_v B_{12}}{A_{10}} \right)}{\left(A_{21} + \rho_v B_{21} \right)} \quad \text{.....(4)}$$

لذا يكون الفرق بين تاهيل المستويين بالمقدار:

$$N_2 - N_1 = r_2 \frac{\left(1 + \frac{\rho_v B_{12}}{A_{10}} \right)}{\left(A_{21} + \rho_v B_{21} \right)} - \frac{R_2}{A_{10}}$$

$$N_2 - N_1 = r_2 \left[\frac{\left(1 + \frac{\rho_v B_{12}}{A_{10}} \right)}{\left(A_{21} + \rho_v B_{21} \right)} - \frac{1}{A_{10}} \right]$$

$$N_2 - N_1 = r_2 \left[\frac{\left(1 + \frac{\rho_v B_{12}}{A_{10}} \right) - (A_{21} + \rho_v B_{21})}{A_{10} \left(A_{21} + \rho_v B_{21} \right)} \right]$$

$$N_2 - N_1 = r_2 \left[\frac{A_{10} + \rho_v B_{12} - A_{21} - \rho_v B_{21}}{A_{10} \left(A_{21} + \rho_v B_{21} \right)} \right]$$

$$N_2 - N_1 = r_2 \left[\frac{A_{10} - A_{21}}{A_{10} \left(A_{21} + \rho_v B_{21} \right)} \right]$$

$$N_2 - N_1 = r_2 \left[\frac{\left(1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}\right)}{(A_{21} + \rho_v B_{21})} \right] \quad \text{.....(5)}$$

وهنا نرى وجوب كون (A_{21}) اصغر من (A_{10}) لتحقيق حدوث التاهيل العكسي وهذا الشرط يكافئ كون (τ_2) اكبر من (τ_1) اي ان المستوى الاعلى لانتقال الليزر يكون له متوسط زمن عمر اكبر من المستوى الاوطا وفي معظم انواع الليزرات يكون (τ_2) اكبر بكثير من (τ_1)، اي ان:

$$\left(1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}\right) \approx 1$$

واذا كانت قدرة الضخ لا تكفي للوصول الى العتبة فان مقدار التاهيل العكسي الناتج لا يكفي لدعم التكبير في الوسط ولهذه الحالة يمكن اهمال التحدث عن (ρ_v) لان طاقة الامتصاص تظهر على شكل انبعاث ذاتي، وعلى هذا الاساس فان معادلة (5) تصبح على الشكل التالي:

$$N_2 - N_1 \approx \frac{r_2}{A_{21}} \quad \text{.....(6)}$$

وتصح هذه المعادلة عند العتبة ايضا، اي ان:

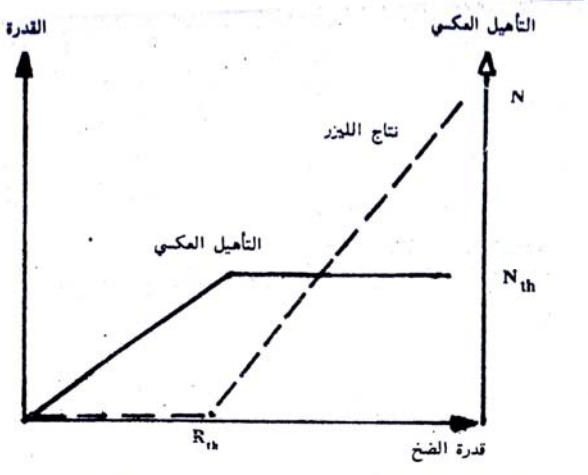
$$N_{th} = N_2 - N_1 \approx \frac{r_{th}}{A_{21}}$$

او:

$$N_{th} = r_{th} \tau_2$$

$$r_{th} = \frac{N_{th}}{\tau_2} \quad \text{.....(7)}$$

ان المعادلة اعلاه توضح ان التاهيل العكسي ينمو بصورة طردية مع زيادة قدرة الضخ حتى وصول العتبة عندها تحصل حالة الاشباع فلا يمكن زيادة التاهيل العكسي مهما زيدت قدرة الضخ والشكل ادناه يوضح العلاقة بين هذه المقادير وعلاقتها ايضا بقدرة نتاج الليزر.



شكل (٢ ـ ٦) : التأهيل العكسي وقدرة نتاج الليزر كدالة لقدرة الضخ .

ان الطاقة التي نحتاجها لضخ ذرة الى المستوى (E_2) تساوي (E_3) ولرفع العدد (N_{th}) المتواجد في وحدة الحجم نحتاج الى قدرة (P_{th}) وهذه تعطى بالمقدار:

$$P_{th} = \frac{E_3 N_{th}}{\tau_2} \quad .....(8)$$

وبما ان (N_{th}) يعطى بالعلاقة ادناه:

$$N_{th} = \frac{8\pi v^2 \Delta v G_{th} \tau}{nc^2} \quad .....(9)$$

وعند تعويض معادلة (9) في معادلة (8) نحصل على:

$$P_{th} = \frac{E_3 8\pi v^2 \Delta v G_{th}}{nc^2} \quad .....(10)$$

في هذا الوضع يكون الربح الناتج عن التاهيل العكسي مساويا الى الخسارة في الجهاز فاذا ازدادت قدرة الضخ (P) عن المقدار (P_{th}) فان هذا يمكن ان يعمل على ازدياد مقدار ($\rho_v B_{21}$) ولكي يبقى المقدار (N_{th}) ثابتا ومن المعادلة (5)، تصح العلاقة:

$$N_{th} = N_2 - N_1 = r_2 \left[\frac{\left(1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}\right)}{\left(A_{21} + \rho_v B_{21}\right)} \right] \quad .....(11)$$

وعندما يكون:

$$\left(1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}\right) \approx 1$$

وباستخدام معادلة (7) نحصل على:

$$N_{th} = r_2 \left[\frac{1}{\left(A_{21} + \rho_v B_{21}\right)} \right]$$

$$\frac{r_{th}}{A_{21}} = \left[\frac{r_2}{\left(A_{21} + \rho_v B_{21}\right)} \right] \quad .....(12)$$

وبهذا تكون:

$$\frac{A_{21} + \rho_v B_{21}}{A_{21}} = \left[\frac{r_2}{r_{th}} \right]$$

$$1 + \frac{\rho_v B_{21}}{A_{21}} = \left[\frac{r_2}{r_{th}} \right]$$

$$\frac{\rho_v B_{21}}{A_{21}} = \left[\frac{r_2}{r_{th}} - 1\right]$$

$$\rho_v = \frac{A_{21}}{B_{21}}\left[\frac{r_2}{r_{th}} - 1\right] \quad .....(13)$$

ولما كانت قدرة نتاج الليزر تتناسب طرديا مع (ρ_v) المتوفرة في الوسط وكذلك مع (r_2) لذا يمكن التعبير عن قدرة نتاج الليزر (W_{output}) على النحو التالي:

$$W_{output} = W_o\left(\frac{P}{P_{th}} - 1\right) \quad .....(14)$$

حيث ان (W_o) مقدار ثابت.

مثال: احسب قدرة الضخ عند العتبة لليزر النيوديميوم- زجاج علما بان التاهيل العكسي الحرج ($9\times10^{21}m^{-3}$) وان متوسط زمن العمر التلقائي هو ($300\mu s$) وان طاقة المستوى الاعلى للضخ لليزر هي ($1.6eV$)؟

Solution:

$$P_{th} = \frac{E_3 N_{th}}{\tau_2} = \frac{1.6\times1.6\times10^{-19}\times9\times10^{21}}{300\times10^{-6}} = 7.6\times10^6\,\frac{W}{m^3}$$

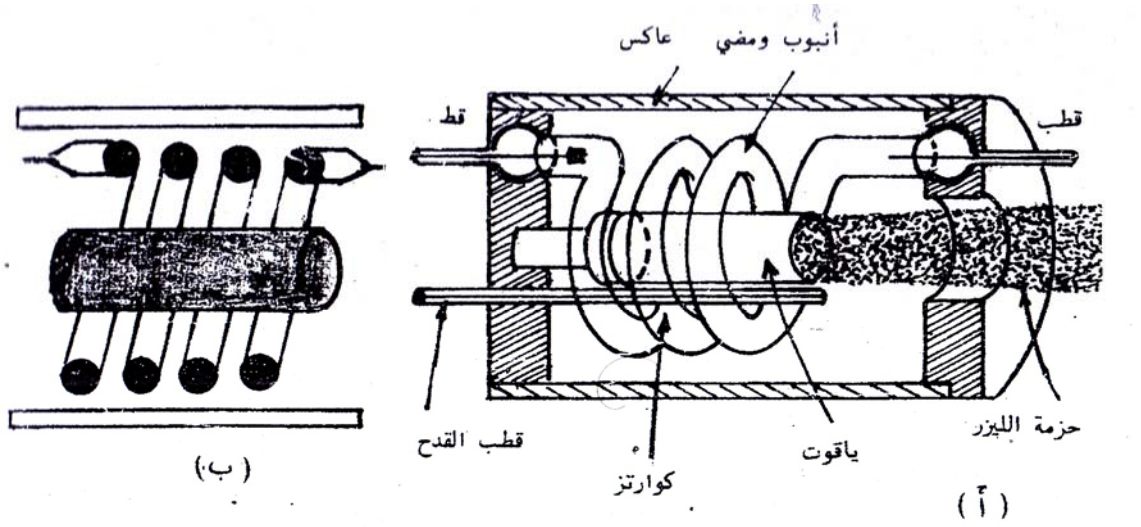
طرق الضخ

تسمى العملية التي يتم فيها ارتقاء الذرات من المستوى الارضي (E_o) الى المستوي (E_2) في خطة ذي ثلاثة مستويات، او من المستوى الارضي (E_o) الى المستوى (E_3) في خطة ذي اربعة مستويات بعملية الضخ. ان ميكانيكية الضخ وتفاصيلها تختلف باختلاف طرق الضخ وكذلك تعتمد على طبيعة المادة وقد تكون معقدة ايضا. لذلك في هذا البند سيتم التطرق الى بعض طرق الضخ وهي الضخ البصري والكهربائي والكيميائي.

1- الضخ البصري

يستخدم في هذه الطريقة مصدر ذو قدرة عالية لتهييج الوسط الفعال عند امتصاصه لهذه الطاقة وتصلح هذه الطريقة في ليزرات الحالة الصلبة مثل ليزر الياقوت والنيوديميوم وفي ليزرات الحالة السائلة كليزر الصبغة وتستخدم مصابيح الزينون (Xe) او الكربتون (Kr) بضغط يتراوح بين ($450 - 1500Torr$) في حالة الليزرات النبضية وللحصول على ليزر مستمر الموجة يستخدم غالبا مصباح الكربتون بضغط عالي يتراوح بين ($4000 - 8000Torr$) او مصباح تنكستن- يود. على الاغلب تستخدام هذه المصابيح عادة لضخ ليزر الحالة الصلبة حيث تكون المادة الفعالة على شكل قضيب اسطواني قطره يتراوح بين بضع ملمترات الى بضع سنتمرات اما طوله بين سنتمرات الى بضع اعشار المتر.

الشكل ادناه يوضح كيفية التفاف المصباح الوميضي حول الوسط الفعال حيث تصنع عادة بشكل حلزوني يسقط الضوء منه بصورة مباشرة على المادة الفعالة او بعد ارتداده عن سطح عاكس حيث استخدم هذا التصميم في ليزر الياقوت ولازال مستخدما.



شكل (٢ ـ ٧) : أ) استخدام مصباح ومضي لضخ قضيب الليزر (ليزر الياقوت)
ب) مقطع جانبي لتوضيح النظام البصري المستخدم

وسنعرض فيما يلي العوامل التي تحدد كفاءة الضخ باستخدام المصباح الوميضي وهي:

1- كفاءة نقل الطاقة المتوفرة في المصباح الى المادة الفعالة وتمثل بالكمية (η_t).

2- الكفاءة الاشعاعية للمصباح ويرمز لها (η_r) وهي كفاءة تحويل الطاقة الكهربائية التي تجهز للمصباح الى ضياء خارج في مدى طول موجي يتراوح بين (λ_1, λ_2) والذي يجب ان يقع ضمن هذا المدى الحزمة اللازمة لضخ وسط الليزر. فمثلا توفير مدى بين ($0.3 - 0.9\mu m$) لليزر النيوديميوم- ياك وتعتمد هذه الكفاءة على ابعاد المصباح.

3- كفاءة الامتصاص (η_a) والتي تعطي الجزء الذي امتصه فعليا وسط الليزر من الاشعاع النافع.

4- الكفاءة الكمية للضخ (η_q) وتاخذ بنظر الاعتبار حقيقة كون الذرات التي تصعد عن طريق الضخ لا تهبط جميعها الى المستوى المطلوب تاهيله كمستوى علوي لانتقال الليزر فبعض هذه الذرات تهبط مباشرة الى المستوي الارضي او قد تهبط الى مستويات اخرى لا علاقة لها بمخطط الضخ. ان كفاءة الضخ (η_p) يعبر عنها بحاصل جمع المقادير الاربعة اي ان:

$$\eta_p = \eta_t + \eta_r + \eta_a + \eta_q$$

فمثلا مقادير عوامل كفاءة الضخ البصري لقضيب ليزر النيوديميوم- ياك بقطر ($6.3mm$) والضخ بمصباح الكربتون فان ($\eta_t = 0.8$) و($\eta_r = 0.5$) و($\eta_a = 0.16$) و($\eta_q = 0.4$) وعليه فان كفاءة الضخ (η_p) هي تقريبا بحدود (2%).

ان تحسين كفاءة الضخ تكمن في تحسين الكفاءة الاشعاعية للمصباح وهذا يعني تحسين تقنية المصباح ليكون له طيف انبعاث يوافق طيف الامتصاص للوسط الفعال. من جهة اخرى لا نستطيع ان نعمل كثيرا في تحسين الكفاءة الكمية او كفاءة الامتصاص مادامت هذه تعتمد على خواص الوسط ذاته في حين يمكن العمل في تحسين كفاءة النقل فهي تعتمد كثيرا على تصميم الجهاز البصري المسؤول عن حفاظ ضوء الضخ المتوفر لقضيب الليزر، لذا فالحسابات بهذا الشان مهمة جدا لغرض تحقيق شروط نقل افضل للطاقة وبشكل منتظم. فمثلا يكون للشكل اللولبي للمصباح امتياز من ناحية

زيادة طول المصباح وبالتالي فانه يعطي انتظاما اكثر في ضخ الضوء الى قضيب الليزر الا ان كفاءته اقل من مصباح طولي يرافقه سطح عاكس على شكل سطح ناقص (اهليجي) كذلك يكون لابعاد المصباح (طوله ونصف قطره) وكيفية ترتيبه نسبة الى قضيب الليزر اهمية في تحديد كفاءة نقل الطاقة وكذلك في انتظام عملية تشعيع مادة الليزر. وقد يتم الضخ البصري باستخدام اشعة الليزر ذاتها فبعد نمو استخدام الليزر وانتاجه بشكل تجاري اصبح من السهل اجراء عملية الضخ البصري بصورة انتقائية.

2- الضخ الكهربائي

تستخدم هذه الطريقة في ليزر الغاز وليزر شبه الموصل ولكن عملية الاثارة تختلف من حيث الاساس في الغاز عنه في شبه الموصل. فهي تتم في الغاز عن طريق التفريغ الكهربائي في حين تتم في شبه الموصل باستخدام فرق جهد كهربائي يعمل مجاله على حقن الناقلات المشحونة (حاملات التيار) الى الملتقى له.

الاثارة في ليزر الغاز: يحتاج وسط الغاز الى فرق جهد كهربائي مناسب لاحداث عملية التفريغ الكهربائي فيه وعليه تتم عملية الضخ نتيجة مرور تيار كهربائي مناسب من خلاله وبهذا تتكون الايونات والالكترونات السريعة وتكتسب هذه الجسيمات طاقة اضافية نتيجة تعجيلها من قبل المجال الكهربائي فتصطدم مع ذرات الغاز او جزيئاته مسببة تحريضها ويعد التصادم بين الالكترونات السريعة وذرات او جزيئات الغاز هو المصدر الرئيسي للاثارة داخل انبوب التفريغ حيث تكون حركة الايونات عادة اقل اهمية من حركة الالكترونات (بسبب الاختلاف الكبير في الكتلة). ولغاز تحت ضغط واطئ، يكون معدل طاقة الالكترون اكثر بكثير من تلك للايون فبعد فترة قصيرة تحل حالة التوازن في عموم الالكترونات فيمكن ان توصف هذه الحالة بما يسمى بدرجة حرارة الالكترون الفعالة (T_e).

في الحقيقة، يتم الضخ الكهربائي في الغاز من خلال احدى العمليات التالية:

أ) لغاز يتألف من نوع واحد من المكونات: تتم عملية الاثارة عن طريق الالكترونات ووفق معادلة التصادم التالية:

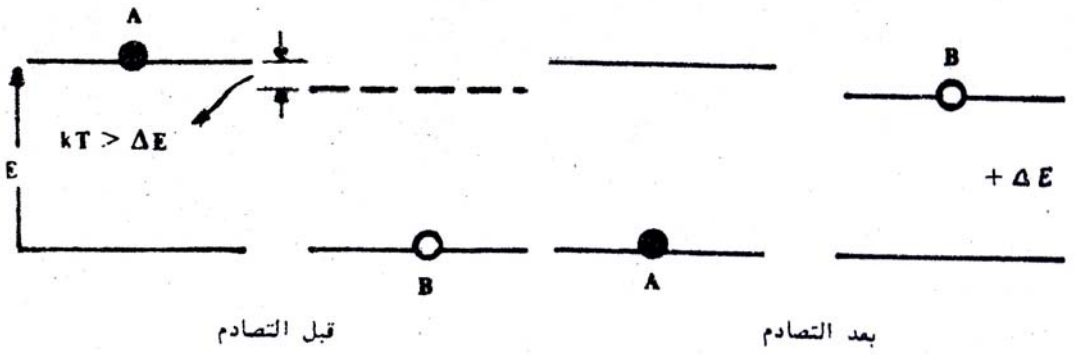
$$e + X = X^* + e$$

تمثل (X) و(X^*) الذرة او الجزيئة في الحالة الارضية والمحرضة على التوالي. يدعى هذا النوع من التصادم بتصادم من النوع الاول.

ب) لغاز يتألف من نوعين من المكونات: تتم هذه العملية من نوعين من الغازات مثل (A) و(B) فقد تتم عملية التحريض نتيجة التصادم بين الجسيمات المختلفة خلال عملية تدعى (انتقال الطاقة الرنيني). فاذا فرضنا بان الغاز (A) في الحالة المحرضة وان الغاز (B) في الحالة الارضية، لاحظ الشكل ادناه، كذلك نفرض بان فرق الطاقة (ΔE) بين انتقاليهما هو اقل من (KT). في هذه الحالة يكون هناك احتمالية ملحوظة بان نجد الغاز (A) بعد التصادم في الحالة الارضية والغاز (B) في الحالة المحرضة ويمكن التعبير عن مجمل عملية التصادم بالمعادلة الاتية:

$$A^* + B \rightarrow A + B^* + \Delta E$$

يدل المقدار (ΔE) على ان الطاقة الممنوحة من قبل الغاز (A) قد لا تساوي بالضبط تلك الممتصة من قبل الغاز (B) ويظهر هذا الفرق موجبا او سالبا في الطاقة الحركية الانتقالية، اما الحالة التي يكون عندها المقدار ($\Delta E = 0$) فهي تمثل حالة الرنين التام.



شكل (٢ ـ ٨) : تبادل الطاقة شبه الرنيني بين ذرتين مثلاً بعملية تصادم .

يدعى التصادم المتمثل بالمعادلة اعلاه بتصادم من النوع الثاني ويعد ليزر الهيليوم- نيون من الامثلة الرئيسية لنجاح طريقة الاثارة بالانتقال الرنيني للطاقة.

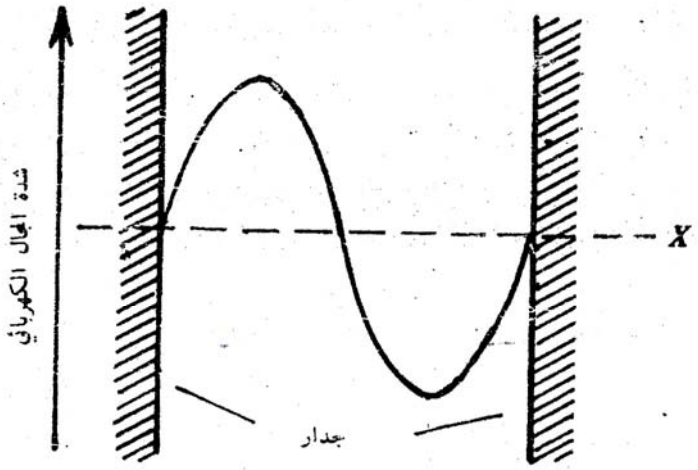
الاثارة في شبه الموصل: ان استخدام الجهد الكهربائي كاحد طرق الضخ في ليزر شبه الموصل يكون مشابها تماما للتقنية المتبعة في صمام شبه الموصل الثنائي في موضوع الدراسة النظرية او العملية للالكترونات.

3- الضخ الكيميائي: في هذه الطريقة لا نحتاج الى مصدر خارجي للطاقة فهو يتوفر ضمنيا في المادة المستخدمة فناتج التفاعل الكيميائي بين مكونات المادة المنتخبة يشكل المادة الفعالة المطلوبة لعمل الليزر في حين تمل الطاقة المتحررة من التفاعل ذاته على اثارة هذه المادة وتحقيق التوزيع العكسي لها. فمثلا في ليزر فلوريد الهيدروجين تكون المكونات المستخدمة غاز الفلور وغاز الهيدروجين وتكون جزيئة فلوريد الهيدروجين المتهيجة منتجة عن التفاعل نفسه:

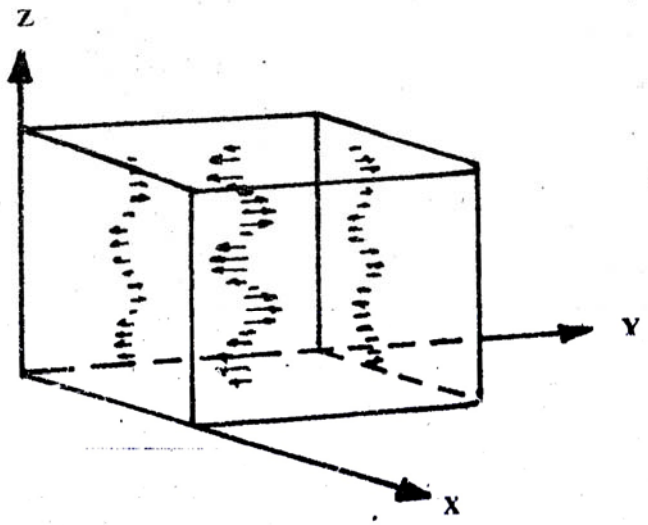
$$F + H_2 = HF^* + H$$
$$H + F_2 = HF^* + F$$

فالجزيئة المتهيجة (HF^*) تشكل المادة الفعالة في الليزر الكيميائي اعلاه ولها القابلية على انتاج الانبعاث المحفز.

المرنان تجويف رنيني يشكل مصدر التغذية الاسترجاعية في اجهزة الميزر والليزر وهو تصميم ضروري لدعم التكبير الحادث في الوسط الفعال نتيجة الانبعاث المحفز كذلك توجيهه والمحافظة على صيغة احادية الموجة لانبعاثه. يتم ذلك عادة بوضع المادة الفعالة في تجويف رنيني مناسب لتردد الاشعاع المنبعث حيث يعمل هذا التجويف كمذبذب رنيني مكونا ما يسمى (بالموجات الواقفة)، لاحظ الشكل ادناه.

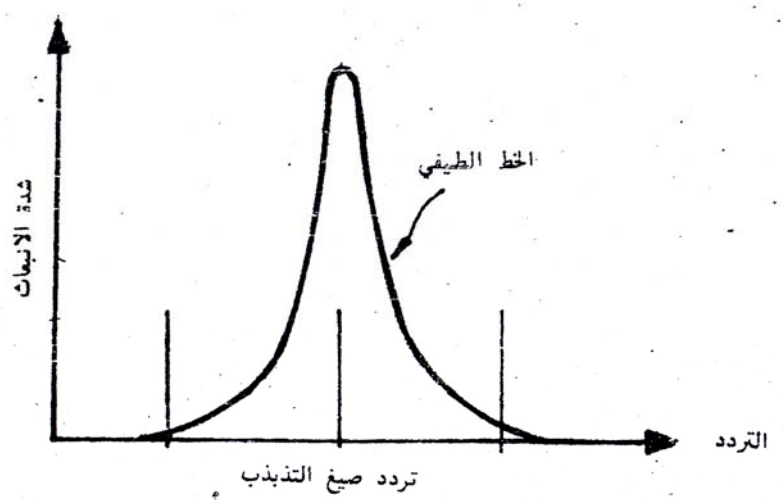


شكل (٣ ـ ١) : الموجة الواقفة للمجال الكهربائي بين جدارين موصلين .



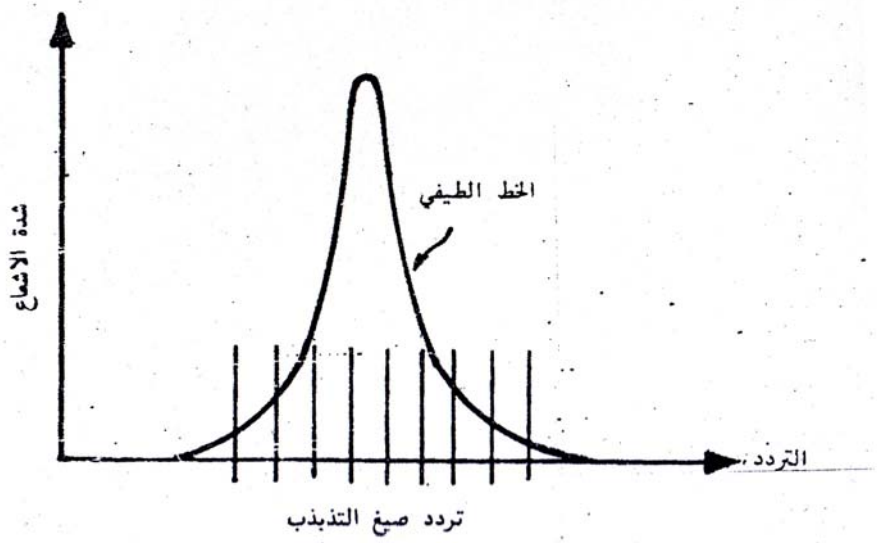
شكل (٣ ـ ٢) : صيغة تذبذب المجال الكهرومغناطيسي داخل تجويف ، يشير اتجاه السهم وطوله في أي موضع على اتجاه المجال الكهربائي ومقداره في الموضع المناظر .

هذا ما استخدم فعلا في حالة الميزر حيث تم تصميم تجويف معدني ذي ابعاد وشكل معينيين يناسب طول الموجة المايكروية بحيث يسمح لتذبذب صيغة واحدة تطابق تردد الانبعاث المحفز للموجة، لاحظ الشكل ادناه.



شكل (٣ ـ ٣) : شدة الاشعاع للجزيئة كدالة للتردد . في اغلب الحالات وفي مدى الموجات المايكروية تكون صيغ التذبذب متباعدة عن بعضها البعض بحيث تقع صيغة تذبذب واحدة ضمن غلاف الخط الطيفي للانبعاث .

اما في حالة الليزر ونظرا لقصر موجته فعلى العموم تكون المسافة بين اية صيغتين للتذبذب صغيرة جدا وهذا يعني تواجد عدد كبير من صيغ التذبذب ضمن المنحني الذي يمثل غلاف الخط الطيفي للانبعاث، لاحظ الشكل ادناه.



شكل (٣ ـ ٤) : مثال لمواضع صيغ التذبذب في الطيف المرئي . بصورة عامة تقع صيغ كثيرة العدد ضمن غلاف الخط الطيفي للانبعاث .

لذا تستوجب الحالة هذه العمل على انتخاب صيغ قليلة منها عن طريق تصميم تجويف بشكل معين، لهذا السبب جاء مرنان الليزر مختلفا عن مرنان الميزر بنقطتين رئيسيتين: اولهما: ان مرنان الليزر مرنان مفتوح عادة، اي لا توجد له جدران جانبية. وثانيها: ان ابعاد مرنان الليزر كبيرة جدا بالمقارنة بطول موجة الليزر.

لتنفيذ متطلبات الابقاء على تذبذب صيغ قليلة (تزيد عن صيغة تذبذب واحدة) لطول موجة الليزر يستخدم وكما ذكرنا مرنان مفتوح. في مثل هذا المرنان تكون صيغ التذبذب القليلة هي تلك المنتقلة باتجاه يوازي محور المرنان وبخسارة

لكنها تسمح باستمرار التذبذب حيث تفقد جميع الصيغ الباقية بعد رحلة واحدة داخل المرنان. هذا هو السبب الاساسي في استخدام مرنان مفتوح ليكون المرنان المناسب للتذبذب في مدى الاشعاع المرئي.

هناك تصاميم متنوعة للمرنان البصري ولكننا سنعرض فيما يلي بعض الانواع الشائعة الاستعمال ثم نعود لنتطرق الى بعض الحسابات النظرية التي تخص المرنان وصيغ التذبذب لامثلة منه.

تصاميم المرنان

1- مرنان المرآتين المستويتين- المتوازيتين (مرنان فابري- بيرو)

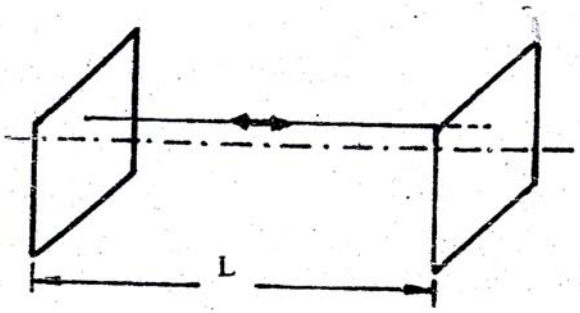
يبين الشكل ادناه شكل هذا المرنان وترتيب مرآتيه، فهو يتالف من مرآتين مستويتين متقابلتين بشكل توازي احدهما الاخرى. كتقريب اولي يمكن التفكير به للحصول على صيغ التذبذب لمثل هذا المرنان هو الجمع بين موجتين مستويتين تنتقلان باتجاهين متعاكسين يطابق محور المرنان. وعند تطبيق مثل هذا التقريب يمكن تحديد صيغ التذبذب بتحقيق شرط كون المرنان الذي طوله (L) حاوي الى عدد صحيح من نصف طول الموجة، اي ان:

$$L = n\frac{\lambda}{2} \quad .....(1)$$

هذا الشرط يضمن كون شدة المجال الكهربائي عند حدود المرايا مساويا الى الصفر، وفق هذه العلاقة تكون الترددات الرنينية كالتالي:

$$v = n\left(\frac{c}{2L}\right) \quad .....(2)$$

يمكن الحصول على هذه النتيجة بتطبيق شرط فرق الطور لمسار رحلة كاملة لموجة مستوية.

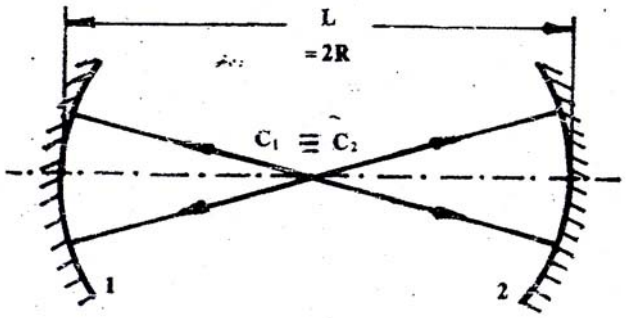


شكل (٣ ـ ٥):مرنان المرآتين المستويتين ـ المتوازيتين .

ان مرنانا بهذا التصميم يكون حساسا لشرط توازي المرآتين فاي خطا بسيط في تطابق محوري المرآتين او المسافة بينهما يكون سببا لحيود معظم الاشعة وبالتالي زيادة الخسارة، لهذا السبب قد يكون التعامل مع المرايا المقعرة اسهل وقد استخدمت فعلا في تصاميم مرنان الليزر.

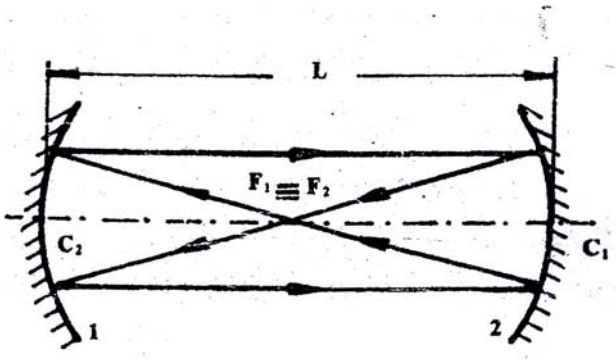
2- المرنان الكروي

للتغلب على خسارة حيود الاشعة في مرنان فابري- بيرو، يستخدم المرنان المبين في الشكل ادناه، والذي يمثل مرنانا كرويا- متحد في المركز ففيه تكون المرآتان الكرويتان المقعرتان المتساويتان في التكور بوضع بحيث ينطبق مركز تكور الاولى على الثانية اي ان المسافة بينهما تساوي قطر احدهما ($2R$). لتحديد صيغ التذبذب لهذه الحالة نرجع الى انعكاسات الاشعة وهي مبينة على الشكل، هذا الشكل يوحي لنا بجمع موجتين كرويتين تنتقلان بعكس الاتجاه ومن مركز انبعاث واحد يمثل مركز التكور المشترك لكلا المرآتين. وبتطبيق العلاقة بين طول الموجة وطول المسار البصري بين المرآتين في حالة الرنين نتمكن من الحصول على نفس المعادلات الواردة في حالة المرنان ذو المرآتين المستويتين.



شكل (٣ ـ ٦) : المرنان الكروي ـ المتحد في المركز.

اما المرنان المتمثل بالشكل ادناه، مثال اخر لمرنان كروي- المتحد في البؤرة ويتالف هذا المرنان من نفس المرآتين الواردتين في المثال السابق غير ان المسافة التي تفصل بين المرآتين تساوي (R) اي ان بؤرة المرآة الاولى (F_1) تقع على بؤرة المرآة الثانية (F_2) وينتج عن هذا الوضع سقوط مركز تكور احدهما على قطب المرآة الاخرى. ولهذا النوع من المرنان لا يمكن الحصول ببساطة على صيغ التذبذب بتطبيق اعتبارات البصريات الهندسية.

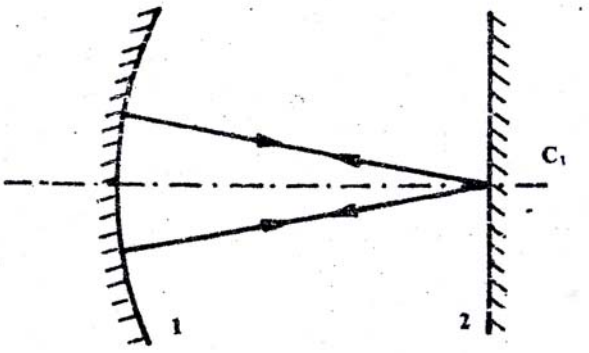


شكل (٣ ـ ٧) : المرنان الكروي ـ المتحد في البؤرة.

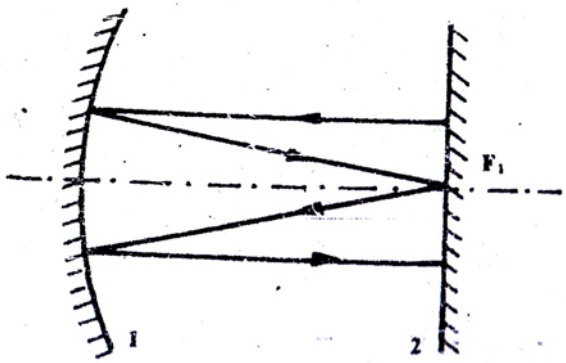
ويمكن ايضا تصميم مرنان باستخدام المرآتين اعلاه ولكن بوضعهما على مسافة اكبر من (R) او اصغر من ($2R$) او اصغر من (R) ايضا.

3- المرنان الكروي- المستوي

يتالف هذا المرنان من مرآة كروية مقعرة واخرى مستوية ويمكن الحصول من ترتيبهما وفق التصميمين المبينين في الاشكال ادناه، حيث يمثل الاول مرنانا نصف كروي والثاني مرنانا نصف بؤري.

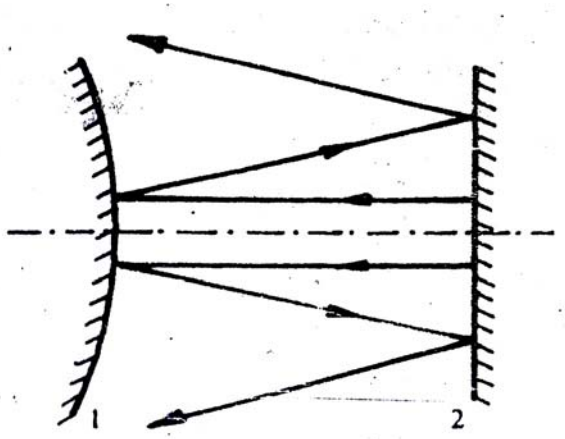


شكل (٣ ـ ٨) : مرنان نصف كروي.



المرنان الكروي العام

ان التصاميم الواردة اعلاه للمرنان هي حالات خاصة من مرنان كروي عام يتالف من مرآتين بتكور قد يختلف، اي بانصاف اقطار تكون على العموم غير متساوية (R_1, R_2) كما قد يكون المقدار (R) سالبا او موجبا (باعتبار قيم R موجبة للمرايا المقعرة وسالبة للمرايا المحدبة) او ذا بعد لانهائي. توضع المرآتان على مسافة (L) من بعضهما بحيث يتطابق محورهما ولما كان بامكان (R) ان ياخذ اي قيمة موجبة او سالبة فان اجتماع المرآتين لتكونا المرنان قد يعطي اشكالا مختلفة. ان الحسابات المهمة لاي شكل من هذه الاشكال يقع في حسابات خسارة الحيود وترددات الرنين وسعة صيغة التذبذب. كما يمكن تصنيف الاشكال الناتجة الى صنفين رئيسيين، الاول هو المرنان المستقر والثاني هو المرنان غير المستقر. يمكن معرفة صنف المرنان بطريقة بسيطة وذلك بمتابعة رسم بعض الانعكاسات المتتالية لشعاع ساقط على احدى المرآتين من الوسط بينهما. اذ يوصف المرنان بكونه غير مستقر عندما يحيد الشعاع بعد انعكاسات متكررة الى الامام والخلف ما بين المرآتين باتجاه يبتعد عن محور المرنان. على هذا الاساس تكون النماذج المذكورة اعلاه تصاميم لمرنان مستقر في حين يوضح الشكل ادناه نموذجا لمرنان غير مستقر.



شكل (٣ ـ ١٠) مثال لمرنان غير مستقر.

شرط الاستقرار للمرنان

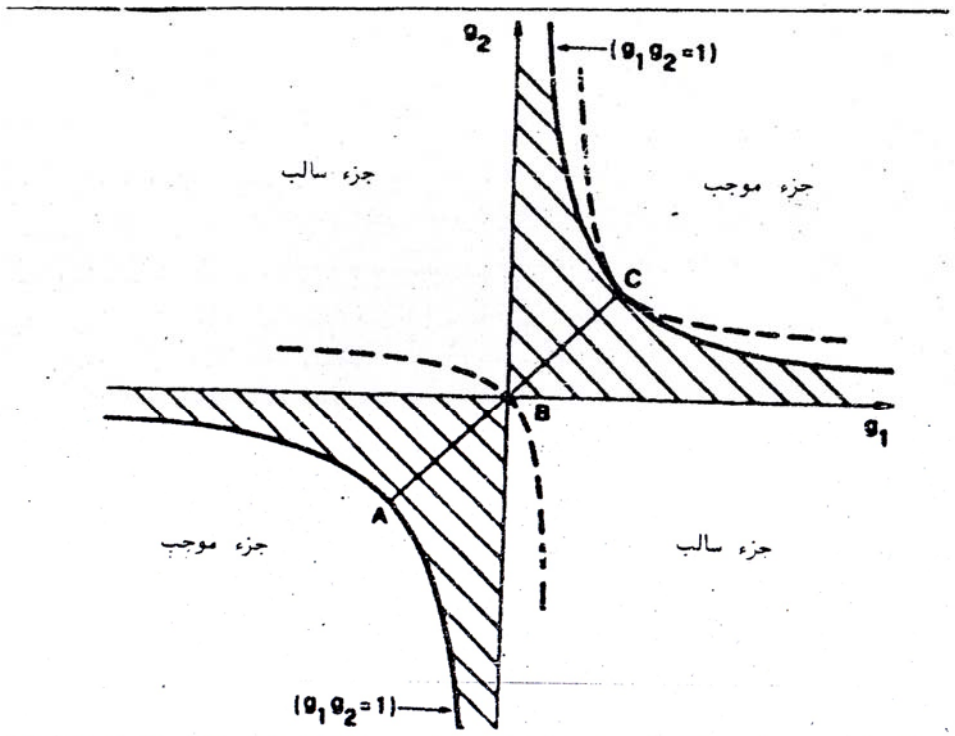
يمكن اشتقاق شرط الاستقرار لمرنان كروي عام بالاستعانة بقواعد البصريات الهندسية ووفق ما اعتمدنا عليه في البند السابق. فكما هو متوقع يعتمد شرط الاستقرار على الاوصاف الهندسية للمرنان، اي على المقادير (R_1, R_2, L) وللوصول الى هذا الشرط يجدر بنا ان نعرف كميتين هما (g_1) و (g_2)، حيث تكون:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{\Re_1}$$
$$g_2 = 1 - \frac{L}{\Re_2} \quad \text{.....(1)}$$

بالاستعانة برسم الشكل الهندسي للمرنان ومتابعة انعكاس الاشعة عن مرآتيه، يمكن التوصل الى علاقة بسيطة تعبر عن استقراريته وهي:

$$0 < g_1 g_1 < 1 \quad \text{.....(2)}$$

يمكن تمثيل شرط الاستقرار هذا بمخطط يعرف بمخطط الاستقرار والمتمثل بالشكل ادناه، حيث تمثل قيم (g_1) على محور السينات وقيم (g_2) على محور الصادات. فعند رسم منحني الحدود ($g_1 g_2 = 1$) وتضليل المناطق التي تحقق فيها قيم (g_1) و (g_2) الشرط المتمثل في المعادلة (2) فان هذه المناطق تخص المرنان المستقر وخارجها تخص المرنان غير المستقر. اما الخط المستقيم (AC) والذي يصنع زاوية مقدارها (45°) مع محوري (g_1) و (g_2) فله اهمية خاصة. اذ تمثل النقاط الواقعة عليه مواصفات مجموعة تخص المرنان الكروي. ان هذا الخط يمثل اعداد المرنان التي تملك مرآتيها نصف قطر تكور متساوي ومنها الامثلة A وB وC حيث تمتلك هذه صفات اضافية اذ يكون المرنان (A) متحد في المركز والمرنان (B) متحد في البؤرة والمرنان (C) ذو المرآتين المستويتين. ان هذه الاشكال الثلاثة للمرنان تقع على الخط الفاصل بين منطقة الاستقرار ومنطقة عدم الاستقرار.



شكل (٣ ـ ١٢) : مخطط الاستقرار لمرنان كروي عام . منطقة الاستقرار تناظر الاجزاء المخططة في الشكل ، اما المنحنيات المرسومة بخط متقطع فتناظر الاعداد الممكنة للمرنان المتحد البؤرة .

صيغ التذبذب للمرنان

التجويف الرنيني لانبعاث الليزر هو مرنان مفتوح يتالف من مرآتين وحسابات صيغ التذبذب لمثل هذا التجويف تتضمن خسارة الحيود عن هاتين المرآتين، كذلك يدخل شكل المرآتين وابعادهما بالاضافة الى المسافة بينهما. لالقاء الضوء على وصف صيغ التذبذب وكيفية توزيع شدة المجال عند المرآتين او في اي موضع بينهما وخارج المرنان ايضا نستعين بمثالين لمرنان الليزر هما: مرنان المرآتين المتوازيتين ومرنان كروي متحد البؤرة.

1- صيغ التذبذب للمرنان ذو المرآتين المستويتين- المتوازيتين

اول من اعطى معالجة تقريبية لمثل هذا المرنان هما شافلوف وتاونس اللذين اقترحا في دراستهما حلا مناظرا لذلك المتبع في حالة تجويف الليزر، اي حسابات التجويف الرنيني المتوازي الاضلاع المطلق. فاذا كانت كل من مرآتي المرنان مربعة الشكل ولنفرض الان بان لكل منهما طول ضلع يساوي ($2a$) ولنفرض ايضا بانهما على مسافة (L) من بعضهما. فان ترددات الرنين لمثل هذا التجويف تعطى بالشكل التالي:

$$\nu = \frac{c}{2}\left[\left(\frac{n}{L}\right)^2 + \left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{\ell}{2a}\right)^2\right]^{1/2} \qquad .....(1)$$

حيث ان (n,m,ℓ) هي اعداد صحيحة، فاذا تم اهمال جوانب هذا التجويف فيمكن اعادة كتابة العادلة (1) بعد فتحها على شكل متسلسلة بطريقة فك ذي الحدين والاكتفاء بالحدين الاولين على النحو التالي:

$$\nu \approx \frac{c}{2}\left[\frac{n}{L} + \frac{\left(\ell^2 + m^2\right)L}{8na^2}\right] \qquad .....(2)$$

بهذا يكون لصيغة تذبذب محددة للتجويف المفتوح اعلاه تردد رنيني محدد يعطى بمجموعة من القيم تحددها الاعداد (n,m,ℓ). كذلك نلاحظ من المعادلات السابقة بان فرق التردد بين صيغتين للتذبذب لهما نفس القيم للمقدارين (m,ℓ) ولكنهما يختلفان بمقدار واحد للعدد (n) يمكن التعبير عنه وفق العلاقة التالية:

$$\Delta v_n = \frac{c}{2L} \qquad .....(3)$$

ان صيغ التذبذب التي يكون لها نفس القيم للمقادير (m,ℓ) وتختلف بالمقدار (n)، تختلف فيما بينها فقط في كيفية توزيع المجال على امتداد محور المرنان (z) اي طوليا وغالبا ما يطلق على مثل هذه الصيغ بالصيغ الطولية للتذبذب او الصيغ المحورية. لذا تمثل الفاصلة الترددية (Δv_n) فرق التردد بين صيغتين طوليتين متعاقبتين.

اما اذا اختلفت صيغ التذبذب في المقدار (m) او بالمقدار (ℓ) او بكليهما وكان لها نفس القيم للمقدار (n) فتدعى مثل هذه الصيغ بالصيغ المستعرضة فيكون فرق التردد بين صيغتين مستعرضتين تختلفان بالمقدار (m) بمقدار واحد كالتالي:

$$\Delta v_m = \frac{cL}{8na^2}\left(m+\frac{1}{2}\right) \qquad .....(4)$$

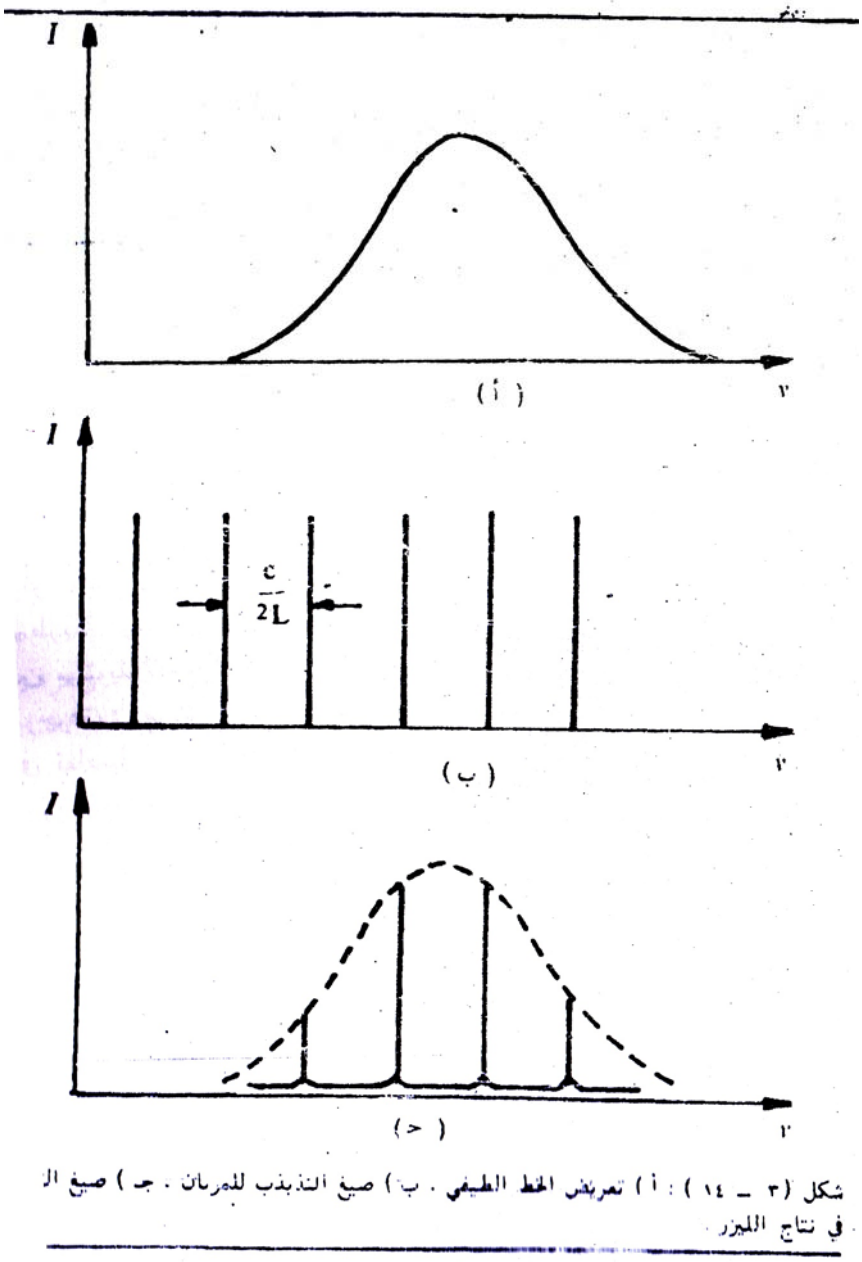
ويكون فرق التردد بين صيغتين مستعرضتين تختلفان بالمقدار (ℓ) بمقدار واحد كالتالي:

$$\Delta v_\ell = \frac{cL}{8na^2}\left(\ell+\frac{1}{2}\right) \qquad .....(5)$$

لمرنان ذو قيم عملية للمقدار (L) تكون (Δv_n) في حدود بضع مئات ميكاهرتز في حين تكون (Δv_m) او (Δv_ℓ) في حدود بضع ميكاهرتز. نود ان نبين في هذا الباب بان استخدام مصطلح الصيغ الطولية والمستعرضة قد يكون مركبا وقد يوحي خطا بوجود نوعين منفصلين من صيغ التذبذب منها طولية والاخرى مستعرضة لكن الحقيقة وكما ذكرنا بان هناك ثلاث مقادير محددة لتعريف صيغة التذبذب وهي الاعداد (n,m,ℓ) وكذلك يكون كل من المجال الكهربائي والمغناطيسي للاشعاع متذبذبا بشكل عمودي تقريبا على محور المرنان (z). ان تغير هذين المجالين بالاتجاه المستعرض على محور المرنان يحدد بالمقدارين (m,ℓ) بينما يعبر عن تغير المجال باتجاه المحور (z) اي طوليا وبامتداده بالمقدار (n). فعندما نتحدث عن صيغة تذبذب مستعرضة نعطي لها مقدارا محددا للعدد (m) وكذلك للعدد (ℓ) فيما نترك العدد (n) لياخذ اية قيمة. كذلك يتم تعريف الصيغة الطولية بمقدار معين للعدد (n) بينما بينما يغض النظر عن قيمتي (m,ℓ).

والان يرد السؤال: كم صيغة تذبذب تقع ضمن خط الانتقال لليزر؟

ان عدد صيغ التذبذب الطولية تعتمد على عرض الخط الطيفي وايضا على طول المرنان لليزر. فكلما زاد طول المرنان كلما قلت الفاصلة الترددية بين اي صيغتين وهذا يؤدي الى تذبذب عدد اكبر من الصيغ ضمن خط الانبعاث لليزر، لاحظ الشكل ادناه. اما عدد صيغ التذبذب المستعرضة فتعتمد على شكل المرآة وحجمها وعلى قيم اخرى تخص بناء الليزر. فعندما تتواجد عدد من صيغ التذبذب في نتاج الليزر يقال انه ليزر (متعدد الصيغ).



شكل (٣ ـ ١٤) : أ) تعريض الخط الطيفي . ب) صيغ التذبذب للمرنان . جـ) صيغ ال
في نتاج الليزر .

يمكن عمليا الحصول على تذبذب صيغة مستعرضة واحدة بادخال عوامل خسارة تعمل على اضمحلال الصيغ المستعرضة الاخرى واضطرار الليزر المتعدد الصيغ للعمل بصيغة مستعرضة معينة. في بعض انواع الليزر يوضع حاجز ذو فتحة دائرية يمكن التحكم بمقدارها لتعمل على المحور البصري للمرنان الغاية منها حجب جميع صيغ التذبذب المستعرضة عدا الصيغة (TEM_{00}). يكون هذا ممكنا لان هذه الصيغ بطبيعتها لا تطابق تماما محور المرنان لذا تعاني من الخسارة من قبل الحاجز فتضمحل قبل ان تاتي الخسارة على الصيغة (TEM_{00}) والمطابقة للمحور، لاحظ شكل (3-19)، ان مثل هذه الصيغة المستعرضة للتذبذب والتي تتصف بالتماثل في توزيع الشدة لهذه الصيغة. وينطبق هذا التوزيع على كل من المجالين الكهربائي والمغناطيسي للموجة الكهرومغناطيسية المتذبذبة بشكل عمودي على محور المرنان (z).

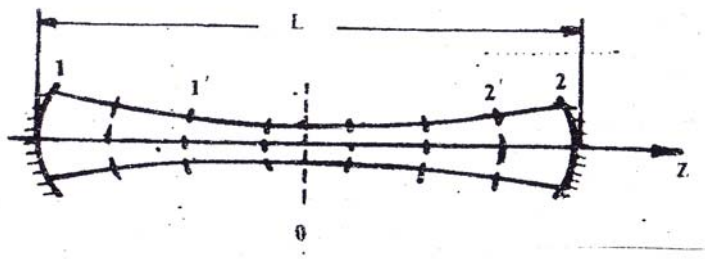
ان صيغة التذبذب المستعرضة التي يكون فيها ($m=0,\ell=1$) او العكس ($m=1,\ell=0$) هي صيغة تذبذب غير متماثلة وتعرف بالصيغة (TEM_{10}) او الصيغة (TEM_{01}). لمثل هذه الصيغ تكون خسارة الحيود الناتجة عن مرآتي المرنان ولطول موجة معينة اكبر لصيغة تذبذب غير متماثلة مثلا (TEM_{01}) منها لصيغة تذبذب متماثلة (TEM_{00}).

2- صيغ التذبذب للمرنان المتحد البؤرة

بنفس الطريقة جاءت حسابات بويد وكوردن لصيغ التذبذب لمرنان كروي متحد في البؤرة وبطول يساوي (L) ويمكن تسهيل الحسابات بانتخاب المرآة بمقطع مربع الشكل طول ضلعه ($2a$) وجعل المسافة (L) اكبر بكثير من (a)، بهذا يمكن تقريب المسافة بين نقطتين متقابلتين تقريبا على المرآتين بالمسافة (L) فيمكن عندئذ حساب شدة الاشعاع عند المرآتين.

عند تطبيق نظرية الحيود في حسابات المرنان ولمرنان متحد البؤرة يمكن التوصل الى العلاقة التي تعبر عن حجم البقعة $w(z)$ التي ترسمها الحزمة في الموضع (z)، فاذا انتخبنا مركز المرنان ليمثل نقطة الاصل ($z=0$)، لاحظ الشكل ادناه، فان المعادلة تصبح على النحو التالي:

$$w(z)=w_o\left[1+\left(\frac{2z}{L}\right)^2\right]^{1/2} \qquad .....(1)$$



شكل (٣ ـ ٢٠): حجم البقعة وسطوح تساوي الطور لصيغة تذبذب TEM_{00} لمرنان متحد البؤرة.

فيها تمثل (w_o) حجم البقعة عند مركز المرنان، اي في الموضع ($z=0$)، وتعطى بالمعادلة:

$$w(z=0)=w_o=\left(\frac{L\lambda}{2\pi}\right)^{1/2} \qquad ..... \quad (2)$$

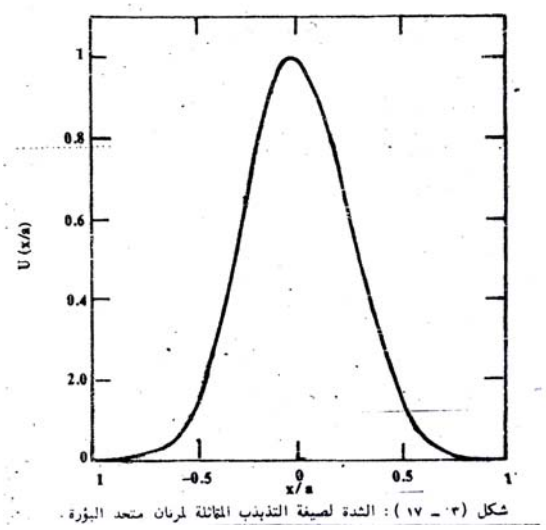
يعبر الشكل اعلاه عن ابعاد الحزمة اي عن حجم الحزمة كدالة للموضع وعلى امتداد محور المرنان وقد رسم وفق المعادلة (1) في هذا الشكل يلاحظ بان للحزمة تخصر ويدعى اصغر حجم للبقعة بخصر الحزمة ويكون في الموضع

($z=0$) في هذه الحالة، اي ان (w_o) تمثل حجم البقعة عند خصر الحزمة، كذلك يمكننا ان نلاحظ بان حجم البقعة عند المرآتين اي عند الموضع ($z=\pm L/2$) يكون:

$$w(z=\pm\frac{L}{2})=\sqrt{2}w_o=\left(\frac{L\lambda}{\pi}\right)^{1/2} \quad .....(3)$$

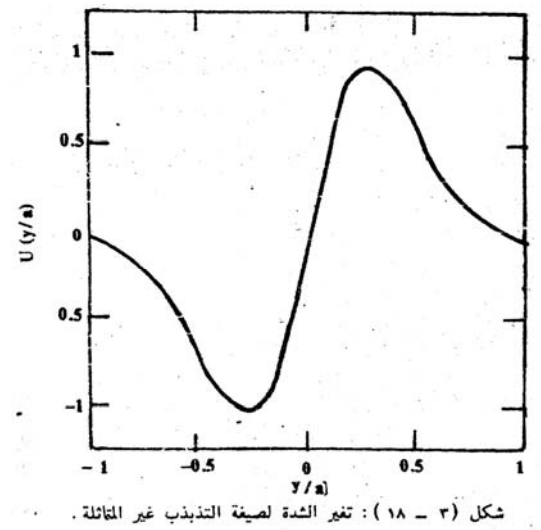
وكما نلاحظ بان حجم البقعة عند المرآتين اكبر بمقدار ($\sqrt{2}$) من قيمتها عند مركز المرنان. ان هذه النتيجة متوقعة تماما اذا ما تذكرنا بان كل من مرآتي المرنان تعمل على تبئير الحزمة في مركزها.

يمثل الشكل ادناه توزيع الشدة عند المرآتين لصيغة التذبذب (TEM_{00}) وهو شكل كاوسي نصف قطري اي شعاعي ولو نظرنا الى المرآة لراينا بقعة مضيئة حجمها يعطى بالمعادلة (3)، مثلا يكون حجم البقعة عند المرآة حوالي ($0.3mm$) بطول موجة ($600nm$) ولمرنان طوله ($0.5m$).

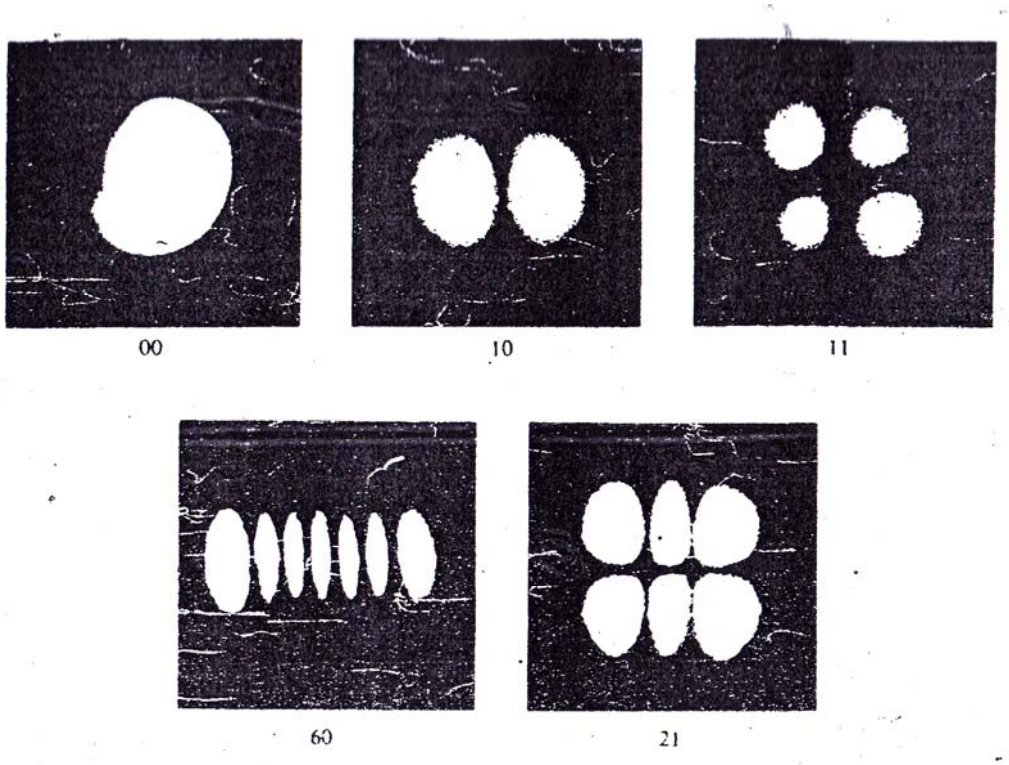


شكل (٣ ـ ١٧) : الشدة لصيغة التذبذب المثالة لمرنان متحد البؤرة.

تعطي حسابات بويد وكوردن لهذا المرنان توزيع الشدة عند المرآتين ولصيغ تذبذب غير متماثلة ايضا فمثلا لصيغة تذبذب (TEM_{01})، حيث ان ($\ell=0, m=1$)، يعبر الشكل ادناه عن تغير شدة المجال باتجاه نصف القطر وعلى امتداد محور y حيث يكون التوزيع باتجاه محور x مناظرا لما هو وارد في الشكل اعلاه. ام شكل البقعة عند المرآة فتبدو كما هو مبين في الشكل (3-19).



شكل (٣ ـ ١٨) : تغير الشدة لصيغة التذبذب غير المثالة.



شكل (٣ ـ ١٩): نماذج لنتائج ليزر توضح خصائص توزيع الشدة لصيغ تذبذب مستعرضة مختلفة، الارقام تشير الى قيم m،l.

توصف حزمة الليزر ايضا بتكور جبهة الموجة لها ويعبر عن نصف قطر تكور جبهة الموجة عند موضع ما داخل المرنان او على امتداد محوره (z) بالمقدار $R(z)$. للمرنان اعلاه، تعطى الحسابات المتعلقة به التعبير التالي:

$$R(z)=z\left[1+\left(\frac{L}{2z}\right)^2\right] \quad .....(4)$$

ان سطوح تساوي الطور (جبهة الموجة) عند مواضع مختلفة مبينة بالخطوط المتقطعة في الشكل (3-20). فعند الموضع ($z=0$) تكون $R(z=0)=\infty$ ، اي ان شكل الجبهة يكون مستويا كما هو متوقع من اعتبارات وضعية التماثل، كذلك نرى قيمة $R(z)$ عند الموضع ($z=\pm L/2$) اي عند المرآتين تساوي (L) وهذا ما نتوقعه بسبب كون سطح المرآة يمثل جبهة موجة كروية.

عامل النوعية للمرنان

يعرف عامل النوعية (Q) لاي مرنان بانه النسبة بين ($2\pi\times$الطاقة المخزونة) الى الطاقة المتبددة خلال دورة واحدة.

ان التجويف الرنيني ذو عامل النوعية العالي يخزن الطاقة بصورة جيدة بينما لا يفعل التجويف الرنيني ذو عامل النوعية الواطئ ذلك. اضافة الى ذلك، يرافق عامل النوعية العالي الخط الطيفي الضيق نسبيا في حين يرافق عامل النوعية الواطئ الخط العريض نسبيا. هذه العلاقة بين (Q) وعرض الخط الطيفي ($\Delta\nu$) يمكن التعبير عنها ببساطة وعلى النحو التالي:

$$Q=\frac{\nu}{\Delta\nu}$$

حيث ان (v) التردد الرنيني، في الحقيقة يعمل وسط الليزر على تغذية صيغ التذبذب بالطاقة فنظريا اذا كانت الطاقة المتبددة تساوي صفر يكون لعامل النوعية قيمة لانهائية ولكن عمليا لابد من وجود خسارة وهذا يعني ان للخط الطيفي تعريض بسيط وحاليا يمكن تقليص عرض الخط الطيفي لقيمة تقارب ($1Hz$).

ولليزر ذو مرنان فابري- بيرو طوله يساوي (L) وقابلية الانعكاس لاحدى مرآتيه (R_1) وللاخرى (R_2)، وعند اهمال خسارة الحيود والامتصاص فان عامل النوعية (Q) للمرنان يعطى بالمعادلة التالية:

$$Q = \frac{4\pi L}{\lambda(1 - R_1 R_2)}$$

تمرينات

1- اثبت ان الفاصلة الترددية بين النمطين المحورين لا تعتمد على التردد الرنيني وانما تعتمد على المسافة المحصورة بين المرآتين؟

2- مرنان ليزري طوله ($0.5m$) والطول الموجي لاشعة الليزر الناتجة عنه يساوي ($500nm$)، فما هي عدد الصيغ المحورية المتذبذبة في المرنان؟

3- a) لمرنان فابري- بيرو جد المعادلة التي تعبر عن (Δv_ℓ) وهو الفرق بين صيغتين مستعرضتين متعاقبتين تختلفان فقط في المقدار (ℓ)؟

b) ان صيغ التذبذب المستعرضة والتي لها نفس المقدار للعدد (n) ولكنها تختلف في مقدار العددين (m,ℓ)، قد تكون متساوية في التردد ويقال عن هذه الصيغة بان لها انحلال ترددي، برهن بان الشرط اللازم تحقيقه لمثل هذه الحالة يكمن في كون ($\ell^2 + m^2 = const.$)؟

4- a) ليزر ذو مرنان فابري- بيرو طوله يساوي (L) وقابلية الانعكاس لاحدى مرآتيه (R_1) وللاخرى (R_2)، اهمل خسارة الحيود والامتصاص وبرهن على ان (Q) للمرنان يعطى بالمعادلة التالية:

$$Q = \frac{4\pi L}{\lambda(1 - R_1 R_2)}$$

b) اذا كان طول المرنان اعلاه يساوي ($1m$) وطول الموجة لانبعاث الليزر ($632.8nm$) وانعكاسية المرآة الامامية (95%) والمرآة الخلفية تامة الانعكاسية، احسب مقدار (Q) وكذلك عرض الخط الطيفي ثم قارن هذه النتيجة مع الفاصلة الترددية للمرنان؟

5- احسب قيمة عامل النوعية لليزر النيوديميوم- زجاج بطول موجي ($1.06\mu m$)، فاذا كان عرض الخط الطيفي يساوي ($3 \times 10^{12} Hz$)، ثم احسب عدد الانماط الطولية المحورية اذا علمت ان طول المرنان ($0.5m$) ثم قارن هذه نتيجة عرض الخط الطيفي مع الفاصلة الترددية للمرنان؟

6- اذا كان عامل النوعية لمرنان طوله ($1m$) يساوي (4×10^6) ويدعم صيغة التذبذب (TEM_{00}) واذا كان طول الموجة انبعاث الليزر ($1.06\mu m$) فاحسب عدد الصيغ الطولية الواقعة ضمن خط الانبعاث؟

7- هل ان المرنان الذي طوله ($50cm$) والمكون من مرآتين احدهما مقعرة نصف قطر تكورها ($100cm$) والاخرى محدبة ونصف قطر تكورها ($-500cm$) من الصنف المستقر ام لا؟

8- مرنان يتالف من مرآة محدبة نصف قطرها ($1m$) ومرآة مقعرة نصف قطرها ($1.5m$)، ما هو مدى القيم التي يمكن ان تتخذها المسافة بين المرآتين ليبقى هذا المرنان مستقرا؟

9- مرنان متحد البؤرة طوله ($1m$) استخدم في ليزر هيليوم- نيون احسب حجم البقعة في مركز المرنان وعند مرآتيه علما بان طول موجة الليزر يساوي ($632.8nm$)؟

10- مرنان متحد البؤرة طوله ($1m$) استخدم في ليزر النيوديميوم- ياك احسب حجم البقعة في مركز المرنان وعند مرآتيه علما بان طول موجة الليزر يساوي ($1.06\mu m$)؟

11- a) اذكر الشروط على قيم (g_1, g_2) والتي تعين وضع الاستقرار الحدي لمرنان الليزر؟

b) اعطيت لك مرآتين بنصفي قطري تكور ($\Re_1=+50cm, \Re_2=+100cm$)، احسب:

1- المسافات بين المرآتين والتي تعطي استقرارا حديا للمرنان.

2- مدى المسافة بين المرآتين لكي يكون المرنان مستقرا.

3- مدى المسافة بين المرآتين لكي يكون المرنان غير مستقرا.

12- ابحث استقرارية مرنان كروي ذا مرآتين بنصف قطر تكور ذاته ($\Re$) احداهما مقعرة والأخرى محدبة, اذا كانت المسافة بينهما (L) كالآتي :

1- $L=2\Re$ 2- $L=\Re$ 3- $L=\Re/2$

13- اثبت ان:

$$\Delta\nu_{m,\ell}=\frac{cL}{8na^2}(m+\ell+1)$$

14- اثبت ان:

$$\Delta\nu_{m,\ell}=\Delta\nu_m+\Delta\nu_\ell$$

تبين من مفردات الفصول السابقة بان الشروط الاساسية الثلاثة التي يجب توافرها للحصول على اشعة الليزر هي: وجود الوسط الفعال الذي وفق خطة ضخ وطريقة ضخ معينتين يمكن تحقيق التاهيل العكسي بين زوج من مستويات ذراته او جزيئاته يحدث انتقال الليزر بينهما. في هذا الفصل سنتطرق الى كيفية تاثير هذه المتطلبات على نتائج الليزر وخصائصه كما سنحاول التعرف على الطرق والوسائل التي تمكننا من تحوير خصائص هذا النتاج الزمنية والمكانية وغيرها بما يناسب التطبيقات العملية التي تلائم احتياجاتنا.

التشغيل بموجة مستمرة (CW) والتشغيل المعتمد على الزمن (P) لنتاج الليزر

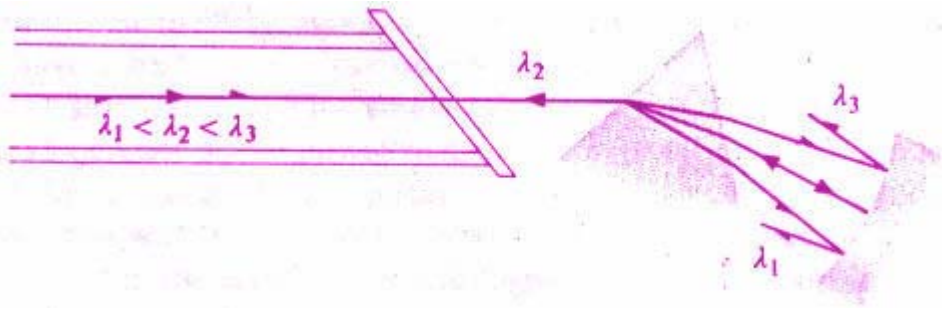
يتم وصف تصرف نتاج الليزر للتشغيل بموجة مستمرة (CW) وفق معادلات المعدل التي تصف التوازن بين معدلات التغير في التاهيل الكلي والعدد الكلي لفوتونات الليزر فهي تضع وصفا بسيطا وعمليا لتشغيل الليزر وانسياب نتاجه، فالضخ المستقر الثابت (غير المعتمد على الزمن) يعطي وضع الاستقرار لنتاج الليزر والذي يحدد له صفة الموجة المستمرة (CW). يكون لمعدل ضخ ثابت قيمة معينة لنفوذية مرآة مسرب الليزر لكي تعطي اعلى قيمة لقدرة النتاج وسبب وجود مثل هذه القيمة الحدية لنفوذية المرآة يقع في الظرفين المتعاكسين اللذين يحدثان نتيجة زيادة قيمة النفوذية. هذان الظرفان هما: ان قدرة النتاج قد تميل الى الزيادة نتيجة زيادة نفوذية المرآة وقد تميل الى النقصان بسبب الخسارة داخل المرنان كنتيجة لتسرب اكبر لفوتونات المرنان.

ولدراسة صفات نتاج الليزر المعتمد على الزمن، مثلا الليزر النبضي (P)، يجب حل معادلات المعدل لخطة ضخ ذي ثلاث مستويات او اربعة مستويات ولضخ يتغير مع الزمن بالشكل الذي نرغب فيه ان يكون النتاج دالة للزمن فيمكن حينئذ ايجاد كيفية اعتماد كل من التاهيل الكلي وعدد فوتونات الليزر الكلية وبشكل مناظر لما فعلناه لما فعلناه في الفصل السابق بشكل مستقر.

انتخاب خطوط الطيف لانبعاث الليزر

في كثير من اجهزة الليزر تحدث انتقالات ليزر عديدة وباطوال موجية مختلفة في آن واحد، فمثلا في ليزر ايون الاركون (Ar^+) تنبعث نتيجة عملية الضخ والانبعاث المحفز في وسط الليزر وفي آن واحد مجموعة من الاطوال الموجية والتي يكون اشدها الانبعاث الازرق- المخضر ($514.5nm$) والذي يطغى لونه على بقية الالوان فيعطى لون الضوء المرئي لاشعة ليزر ايون الاركون. بالرغم من كون هذه الانتقالات مجتمعة تعطي نتاج قدرته العالية الا اننا في كثير من الاحيان نحتاج الى اشعة ليزر ذي درجة عالية من النقاوة الطيفية (اي صفة احادية الطول الموجي). يمكن تحقيق هذه الغاية ببساطة وذلك باستخدام وحدة بصرية يعتمد عملها على طول الموجة توضع داخل المرنان الليزري فتعمل مثلا على تفريق الاشعة او امتصاصها حسب اطوالها الموجية. مثل هذه الوحدة البصرية هو الموشور او المحزز او المرشح. اما فعل هذه العناصر كالموشور مثلا فهو مبين بالشكل ادناه، والذي يوضع بين احدى المرآتين في المرنان والوسط الفعال فلو فرضنا بان انبعاث الليزر يشمل ثلاثة اطوال موجية وبالترتيب $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ وكان المطلوب الابقاء على الاشعة ذات الطول الموجي λ_2 دون غيرها فيرتب سقوط هذه الاشعة بصورة عمودية على مرآة المرنان بعد خروجها من الموشور وبهذا ترتد سالكة نفس المسار داخل المرنان. اما الموجة الاقصر طولا λ_1

فتعاني انكسارا اكبر في الموشور ولهذا لا تعود الى المرنان بعد انعكاسها عن مرآته. كذلك يحدث لطول الموجة λ_3 فانها ستحيد عن مسارها بعد انعكاسها عن مرآة المرنان فتعاني خسارة كبيرة وبهذا تضمحل. بهذا الترتيب قد يعاني نتاج الليزر للموجة λ_2 بعض الخسارة نتيجة الانعكاس عن وجهي الموشور ولكن اذا قطع الموشور بحيث يكون سقوط الاشعة على وجهيه بزاوية تساوي زاوية بروستر فيمكن بهذه الطريقة تلافي الخسارة.



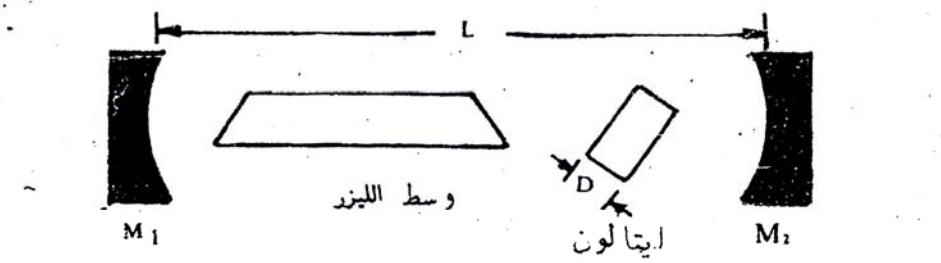
وبنفس الطريقة هذه يمكن اجراء عملية المؤالفة والحصول على ليزر بالاطوال الموجية المتوفرة في نطاق الانبعاث وذلك بتدوير الموشور او المحزز.

التشغيل بصيغة مفردة

نحتاج في كثير من التطبيقات العملية في الفيزياء والكيمياء الى نتاج ليزر ذو نقاوة طيفية عالية والمقصود بهذا تشغيل الليزر بصيغة مستعرضة واحدة وبصيغة طولية فقط. فللحصول اولا على ليزر يعمل بموجة مستعرضة واحدة وهي مثلا الصيغة (TEM_{00}) فيستخدم في مرنان الليزر وكما ورد ذكره سابقا حاجز ذو فتحة يعمل على حجب جميع صيغ التذبذب المستعرضة والابقاء على صيغة التذبذب المستعرضة الاوطا ترددا وهي الصيغة (TEM_{00}). اما تقليص عدد صيغ التذبذب الطولية والابقاء على واحدة منها فقط فهذا يعني تقليص طول المرنان (L) حتى تغدو الفاصلة الترددية بين صيغتين متعاقبتين ($\Delta\nu_n = c/2L$) اكبر من عرض الخط الطيفي لانبعاث الليزر ($\Delta\nu$)، ولما كنا لا نستطيع التحكم كثيرا بعرض خط الانبعاث لذا وجب في هذه الحالة السعي لتحوير المرنان وبطريقة ما بحيث يحقق كون المقدار ($\Delta\nu_n = c/2L$) اكبر من عرض الخط الطيفي. فاذا اصبح بالامكان جعل المسافة بين مرآتي المرنان صغيرة بمقدار يكفي لدعم تذبذب صيغة طولية واحدة فنكون بهذا قد حصلنا على ليزر يشتغل بصيغة مفردة. ان سلبيات هذه الطريقة والتي تكمن في تقليص طول الوسط الفعال لليزر وجعله بالتالي قصيرا سيحد وبشكل فعلي من قدرة نتاج الليزر.

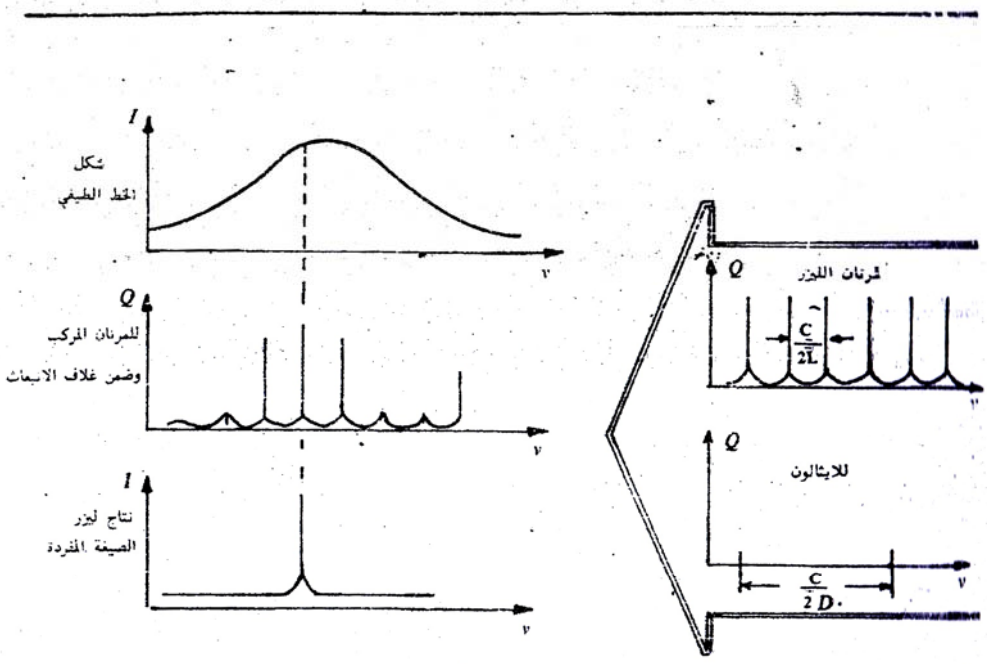
كطريقة اخرى للحصول على ليزر يشتغل بطريقة طولية مفردة للصيغة المستعرضة (TEM_{00}) والتي يمكن ان تؤدي الى نتاج ليزر ذو قدرة افضل هي طريقة ادخال عوامل خسارة الى جهاز الليزر تعمل على اضعاف صيغ التذبذب الطولية باستثناء صيغة واحدة منها، ويمكن تنفيذ هذه الفكرة بالاستعانة بمرنان فابري- بيرو والذي يمكن وضعه داخل او خارج المرنان الليزري، لاحظ الشكل ادناه. ان هذا التجويف الرنيني الاضافي والذي يتالف من قطعة

خاصة من الزجاج تدعى (الايتالون) يكون وجهيها ناعمان مصقولان وذي درجة عالية من التوازي، يختلف هذا التجويف الرنيني عن مرنان الليزر بنقطتين مهمتين اولهما بان سطحي التجويف المتوازيين قد يكون مطليين بكساء خفيف او غير مطليين لذا تكون قدرة الانعكاس لهما واطئة. وثانيهما يكون طول التجويف قصير جدا ولهذا تكون الفاصلة الترددية لاية صيغتين متعاقبتين داخل التجويف كبيرة.



شكل (٤ ـ ٢): طريقة «الايتالون» في تشغيل ليزر بصيغة تذبذب مفردة. ان هذا الايتالون يعمل على جعل عامل النوعية لصيغ التذبذب المختلفة غير متساوي فتبقى الصيغة ذات عامل النوعية الاعلى هي التي تتذبذب في مرنان الليزر.

ان وجود مثل هذا الايتالون يعمل على جعل صيغ التذبذب داخل المرنان الليزري تختلف فيما بينها بعامل النوعية لذا يتذبذب نتاج الليزر فقط بالصيغة التي لها اعلى قيمة لعامل النوعية، لاحظ تفاصيل الشكل ادناه.



شكل (٤ ـ ٣): تأثير وجود الايتالون على عامل النكعية لصيغ التذبذب لانبعاث طيفي وتذبذب الليزر الناتج.

هناك طرق اخرى لتشغيل الليزر بصيغة مفردة كاستخدام مرآة ثالثة او استخدام ماص داخل مرنان الليزر. في جميع الاحوال وعند تشغيل الليزر بصيغة مفردة طولية يكون نتاج الليزر غير مستقر ولهذا تغدو الحاجة ماسة الى استخدام

موازن او مثبت (stabilizer) يساعد على الاستقرار بالاضافة الى العمل على استقرارية ابعاد المرنان بوضع محكم وثابت غير متاثر بالتذبذبات او الصدمات الخارجية مع امكانية السيطرة على درجة الحرارة، كذلك قد يستعان بادخال انظمة التعويض. اذا لم تؤخذ مثل هذه الخطوات فان طول المرنان معرض للتغير وبهذا سيتغير تردد نتاج الليزر وقدرته لانه اي منهما حساس جدا لاي تغير يحدث لطول المرنان.

اقفال الصيغة

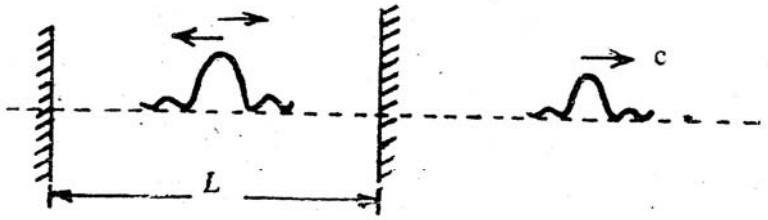
كان البحث في البندين السابقين يتعلق بتردد نتاج الليزر وكيفية تحويره ولكن لكثير من التطبيقات العملية يكون من الاهمية بمكان التاكيد على قدرة نتاج الليزر وكيفية اعتماد القدرة على الزمن بدلا من خصائص التردد للاشعة المنبعثة. وفي هذا البند سنعرض تقنية اقفال الصيغة للحصول على اشعة ليزر ذي نبضات عالية القدرة وبامد شديد القصر (يتراوح امد النبضة بضع بيكو ثانية وقدرتها بضع كيكاواط). ويتم ذلك بوضع مفتاح بصري داخل مرنان الليزر يقع قرب نهاية احدى المرآتين.

طرق اقفال الصيغة

1- اقفال الصيغة الفعال

يتم اقفال الصيغة في مرنان الليزر باضطرار صيغ التذبذب الطولية ان تتخذ من بعضها البعض طور نسبي ثابت مع الزمن. يمكن تحقيق ذلك بتضمين الخسارة او الربح لمرنان الليزر بمقدار يساوي الفاصلة الترددية بين هذه الصيغ (اي المقدار $c/2L$) ولتوضيح تاثير تضمين الخسارة للمقدار ($c/2L$)، نفرض بان الخسارة في مرنان الليزر تحدث عن تاثير بوابة (shutter) توضع بجوار احدى مرآتي المرنان. تفتح البوابة لمدة قصيرة من الزمن وبتعاقب زمني امده ($2L/c$) ثانية وتبقى مسدودة ما تبقى من الوقت. ان الفترة الزمنية اعلاه ما هي الا الزمن الذي تستغرقه النبضة لرحلة كاملة داخل المرنان، راجع الشكل ادناه، وهي تمثل ايضا مقلوب الفاصلة الترددية بين صيغ التذبذب الطولية، فاذا كانت هذه النبضة بعرض يعادل زمن فتح البوابة وتصل اليها تماما في الوقت الذي تفتح فيه هذه البوابة فان النبضة سوف لا تتاثر بوجود البوابة. اما اذا وصلت مقدمة النبضة مثلا والبوابة مسدودة فانها ستحذف وكنتيجة نهائية لهذا التضمين الدوري هو الحصول على نبضة مفردة تصطدم ذهابا وايابا بمرآتي المرنان، وفي كل مرة تصطدم فيها النبضة بمرآة المسرب للمرنان (المرآة العاكسة جزئيا) يندفع دفقا من الاشعاع الى الخارج مشكلا بهذا سلسلة من نبضات متعاقبة، الفاصلة الزمنية بينها تساوي ($2L/c$) وعرض كل منها يساوي ($2L/nc$) تقريبا، راجع الشكل ادناه.

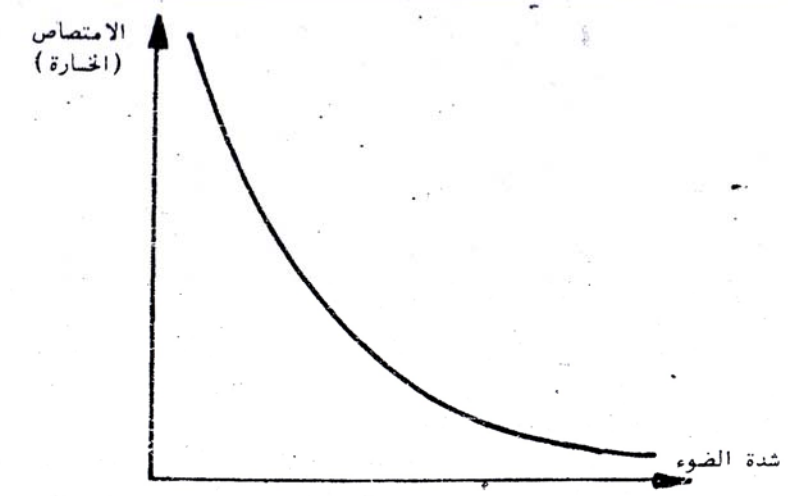
يمكن استخدام المضمنات الكهروضوئية والسمعية- الضوئية كبوابات لاقفال الصيغة في ليزر نديميوم- ياك لتعطي نبضات بامد حوالي 50 بيكوثانية. من جهة اخرى، يكون خط الانبعاث في ليزر النديميوم- زجاج عريض نسبيا، فعند اقفال الصيغة يولد تذبذب العدد الكبير من الصيغ نبضات ذي امد في حدود 1 بيكوثانية.



شكل (٤ ـ ٩) : دفقة طاقة تحصل من اقفال عدد q من صيغ التذبذب ، ترتد ذهاباً وإياباً بين مرآتي المرنان وفي كل اصطدام لها مع مراة المسرب تبعث نبضة «الصيغة المقفلة» .

2- اقفال الصيغة المعترض (الامتصاص المشبع)

يمكن استخدام وسط ماص لانجاز عملية اقفال صيغة التذبذب، مثلا استخدام صيغة معينة حيث يقل الامتصاص لمحلول الصبغة بزيادة شدة الضوء الساقط عليه كما هو مبين في الشكل ادناه. ان المواد التي تتبع هذا التصرف تدعى بالمواد الماصة القابلة للتشبع. يتم انتخاب الصبغة بحيث يقع تردد انبعاث الليزر قيد الدرس ضمن نطاق امتصاصها. ففي بادئ الامر ولمستوى ضوء واطئ الشدة تعمل الصبغة على امتصاص الضوء بحدة نظرا لكون عدد كبير من الجزيئات غير محرض ولكن كلما زادت شدة الضوء فان عددا اكثر فاكثر من مستويات الطاقة المحرضة سيتاهل الى ان تصبح جميعها مملوءة او مشبعة لذا فان محلول الصبغة سيصبح شفافا ويقال بان الصبغة قد قصرت (استهلكت).



شكل (٤ ـ ١٠) : الامتصاص كدالة لشدة الضوء الساقط لماص قابل للتشبع .

اما كيفية نمو الصيغة المقفلة فيمكن تصوره كالاتي: في البداية ينبعث في وسط الليزر انبعاث ذاتي وهو الذي يشكل مصدر التقلبات العشوائية غير المتشاكهة في الطاقة داخل المرنان، من هذه التقلبات تلك التي يكون امدها قصير فهي التي تتضخم داخل المرنان وتنمو في شدتها الى حد يمكن ان ينفذ الجزء الممثل لذروتها خلال الوسط الماص وبشئ من التوهين. اما جزء التقلبات ذو القدرة الواطئة فيعاني توهينا اقوى وبهذا يضمحل. لذا يمكن ان تنمو نبضة ذات قدرة عالية داخل المرنان وفي الوقت ذاته تستطيع الصبغة ان تستعيد نشاطها بوقت قصير بالمقارنة بامد النبضة. ان

التصرف غير الخطي لامتصاص الصبغة يسلند التقلبات الشديدة القصيرة الامد في النمو على حساب التقلبات الاضعف شدة والاطوال امدا. بضبط دقيق لتركيز الصبغة داخل المرنان يمكن العمل على نمو نبضة ضيقة من تقلبات ابتدائية. هذه النبضة ترتد ذهابا وايابا داخل المرنان مكونة سلسلة من نبضات الصيغة المغلقة على غرار ما ذكر في الطريقة السابقة ومبين في شكل (4-9).

ان المواد الماصة القابلة للتشبع توفر طريقة بسيطة وبتكاليف واطئة للحصول على ليزر الصيغة المقفلة ذي القدرة العالية، مثل ليزر الياقوت وليزر نديميوم- زجاج ويمكن استخدام محلول ما يسمى بصيغة (9740) او صيغة (9860) ومحلول سيانيد الكربتون كمواد ماصة قابلة للتشبع لليزر نديميوم- زجاج وليزر الياقوت على التوالي. عند استخدام ماص قابل للتشبع لاقفال صيغة تذبذب ليزر فان الليزر يصبح بحكم هذه العملية ليزر-احكام عامل النوعية ايضا (راجع البند التالي) فالنتيجة هي الحصول على سلسلة من نبضات الصيغة المغلقة، الضيقة (الامد $\approx$ 10بيكوثانية) ضمن غلاف طوله قد يكون في حدود بضع مئات من نانوثانية، كما قد تبلغ قدرة ذروة النبضة مقدار ضخم نظرا لقصر امد النبضة.

احكام عامل النوعية (احكام- Q)

تمثل عملية ضبط عامل النوعية- Q تقنية اخرى للحصول على دفعات قصيرة مكثفة من التذبذب (نبضات بامد نانو ثانية وبقدرة حوالي بضع ميكاواط) لانواع الليزر التي يكون نتاجها عادة نبضي يمكن توليد نبضة مفردة ذي قدرة عالية جدا وبامد اقصر. في حين يمكن من نتاج ليزر ذي موجة مستمرة (CW) الحصول على سلسلة من النبضات. ولكثير من التطبيقات، مثلا التثقيب واللحيم والتصوير السريع والرادار البصري تصبح الحاجة ماسة الى نتاج ليزر ذي قدرة عالية وبامد نبضة قصير. في هذا الباب يلزم التفريق بين الطاقة والقدرة. ان ليزر احكام- Q يعطي دائما نتاج ذو طاقة اوطا مما يعطيه في حالة عدم احكام- Q، هذا بسبب الامتصاص وعوامل اخرى لخسارة الطاقة تتطلبها عملية الاحكام. على الرغم من هذا فان قدرة نتاج ليزر احكام- Q تكون اكبر بكثير بسبب قصر امد النبضة، يمكن الرجوع الى المعادلة البسيطة التالية التي تربط بين القدرة الخارجة (P) بالواط وطاقة النبضة (E) بالجول وامد هذه النبضة ($\Delta\tau$) بالثانية، حيث تكون:

$$P = \frac{E}{\Delta\tau}$$

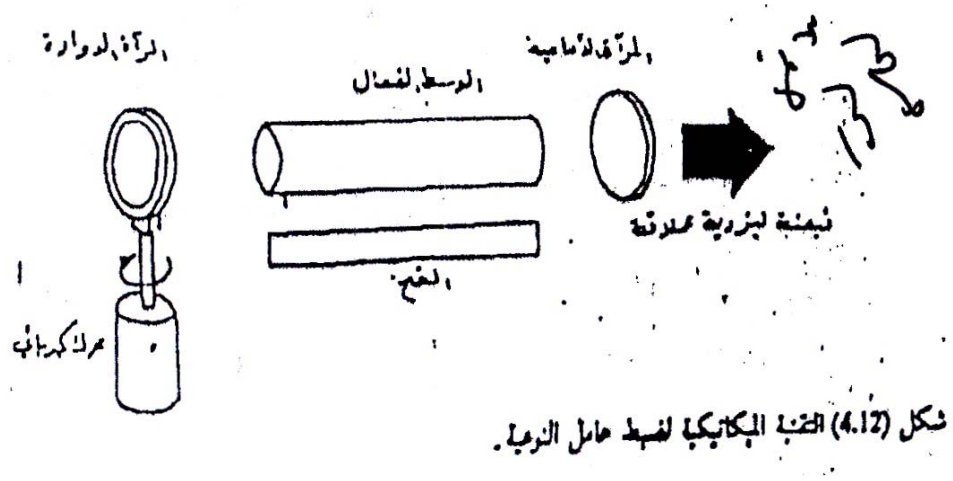
فمثلا في ليزر الياقوت تكون طاقة النبضة عادة في حدود ($10J$) وتتحرر في زمن مقداره ($1ms$)، بعد عملية احكام- Q يصبح زمن النبضة في حدود ($10ns$) وبهذا تزداد قدرة النبضة من ($10KW$) الى ($1GW$).

طرق احكام- Q

1- التقنية الميكانيكية (المرآة الدوارة)

تعتمد التقنية الميكانيكية لضبط عامل النوعية على الدوران الميكانيكي للمرآة الخلفية في المرنان، اذ يتم تدوير المرآة بسرعة فائقة بواسطة محرك كهربائي، لاحظ الشكل ادناه. حيث توجد فترة زمنية قصيرة تصبح فيها المرآتان متوازيتين وتكون قيمة عامل النوعية Q في لحظة توازي المرآتين كبيرة. ولكن في الفترات الاخرى التي لا يتحقق

فيها شرط التوازي فان قيمة Q حينئذ تكون قليلة، ان تبديل عامل النوعية من قيمة قليلة الى قيمة كبيرة يؤدي الى توليد نبضة ليزرية عملاقة، وكلما زادت سرعة دوران المرآة يقل زمن النبضة وتزداد قدرتها حسب المعادلة السابقة.

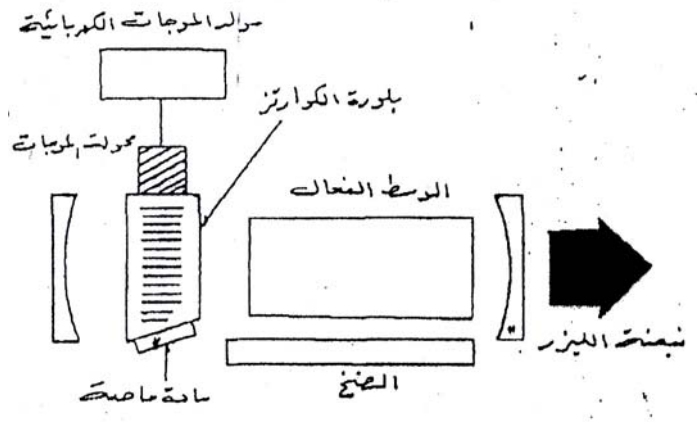


شكل (4.12) التقنية الميكانيكية لضبط عامل النوعية.

تمتاز التقنية الميكانيكية لضبط عامل النوعية بامكانية استخدامها في جميع انواع الليزرات، اذ شاع استخدامها في بداية الستينات من القرن الماضي ومع ذلك فان هذه الطريقة لا تخلو من مشاكل، حيث ان الحركة الميكانيكية العالية لاحد اجزاء المنظومة تسبب حدوث اهتزازات في كافة اجزاؤها وبالرغم من كون سرعة دوران المحرك الكهربائي فائقة الا انها ذات حدود معينة لا يمكن تجاوزها بشكل اكبر، لذا لا يمكن الاعتماد على هذه التقنية لفترة طويلة ولا يمكن الحصول على نبضات ليزرية بامد اقل من ($1\mu s$) لذلك استعيض عن هذه التقنية بتقنيات اخرى، مكنت من الحصول على نبضات ليزرية ذات زمن اقصر وقدرة اكبر.

2- التقنية الصوتية- البصرية

يستخدم فة هذه التقنية بلورة كوارتز الشفافة للحصول على النبضة العملاقة، فعند ربط هذه البلورة من طرفها العلوي بمحولة تقوم بتحويل الموجات الكهربائية الى موجات فوق صوتية، فان ذلك يؤدي الى حدوث اضطرابات دورية منتظمة داخل البلورة، اي تخلخل وتضاغط، وتبدو هذه الاضطرابات كمجموعة من الشقوق المتوازية داخل البلورة التي تعمل على حيود الضوء وتداخله بنفس طريقة حيوده في تجربة الشقين لتوماس يونك.



شكل (4.14) تقنية الصوت بصرية.

فاذا تم وضع الكوارتز بين المرآة الخلفية والوسط الفعال، وتم تزويد هذه البلورة بالموجات فوق الصوتية، فانها تعمل على حيود ضوء الليزر عن الحزمة الرئيسية وبذلك تزداد الطاقة المخزونة بزيادة التوزيع العكسي وتقل قيمة Q. اما عند ايقاف تزويد البلورة بالموجات فوق الصوتية بشكل مفاجئ، فان هذه البلورة ستصبح نافذة كليا للضوء ودون حدوث اية اضطرابات في داخلها وتصبح قيمة Q عالية مما يؤدي الى انتاج نبضة ليزرية حادة وعملاقة، وكما في الشكل اعلاه.

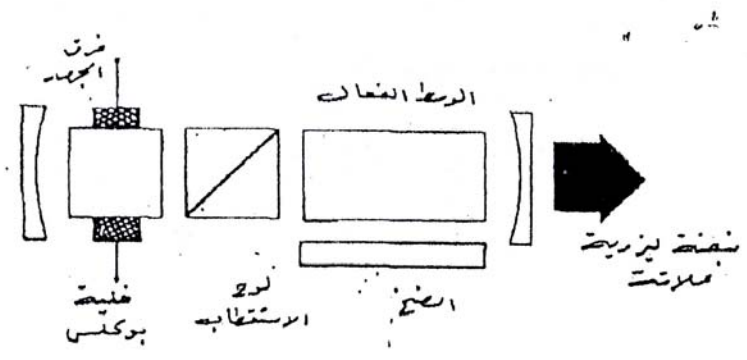
ان زمن نبضة الاخراج في هذه التقنية يعتمد على كل من سرعة الموجات الصوتية داخل بلورة الكوارتز وقطر حزمة الليزر داخل المنظومة. لذا فان الزمن اللازم لمرور موجة صوتية واحدة امام الليزر يمثل زمن نبضة الاخراج زبذلك يصبح هذا الزمن اكثر قصرا كلما قل قطر حزمة الليزر.

تعد هذه التقنية ملائمة من الناحية الاقتصادية ويكون تزامن عملها سهلا ودقيقا مع عمل بقية اجزاء المنظومة وخصوصا ضخ الوسط الفعال. ومن ناحية اخرى فان هذه التقنية تكون محدودة الاستخدام وتقتصر على الليزرات ذات القدرة الواطئة وذلك بسبب عدم امكانية بلورة الكوارتز على منع حدوث التغذية العكسية للانبعاث المحفز بشكل تام.

3- التقنية الكهروبصرية (خلية بوكلس وخلية كير)

تعتمد التقنية الكهروبصرية على عنصرين اساسيين وهما بلورة كهروبصرية كخلية بوكلس او خلية كير ولوح استقطاب. تتكون خلية بوكلس من مادة ذات مواصفات كهروبصرية بحيث يمكن السيطرة على نفاذيتها كهربائيا. ومن الملاحظ ان معامل انكسار هذه الخلية يتغير تحت تاثير المجال الكهربائي وتتحول الى مادة ازدواجية الانكسار، بحيث يعتمد معامل انكسارها على طبيعة استقطاب الضوء المار فيها. ومن المعلوم ان الضوء يتكون من مركبتين متعامدتين تهتزان بطور واحد. فعند مرور هذا الضوء عبر خلية بوكلس في حالة الغاء فرق الجهد، فان كلا المركبتين ستنفذان من الخلية بنفس السرعة والطور وذلك لان معامل انكسار المادة بالنسبة الى المركبتين متساو، وهكذا سيكون الضوء النافذ من الخلية مشابها للضوء الداخل من حيث الاستقطاب.

ولكن عند تسليط فرق جهد على خلية بوكلس فان محورا بصريا جديدا سوف يتكون نتيجة للتاثيرات الكهروبصرية، مما يؤدي الى حدوث اختلاف في قيمة معامل انكسار الخلية بالنسبة الى مركبتين. وبذلك فان المركبتين ستنفذان داخل الخلية بسرعتين مختلفتين وتخرجان من الطرف الثاني للخلية بفارق في الطور معتمدا على طول البلورة.



شكل (4.18) التقنية الكهروبصرية (خلية بوكلس)

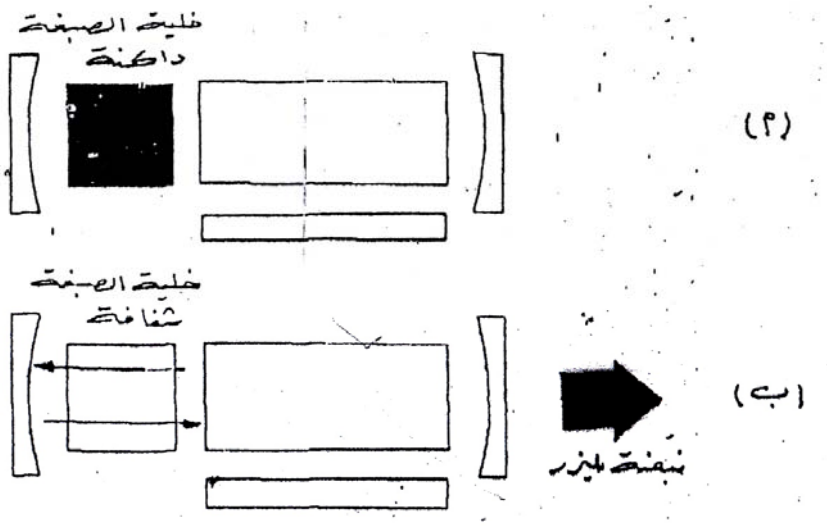
ان لوح الاستقطاب المستخدم سوف لا يسمح لهذا الضوء المستقطب بالمرور خلاله بل يعكسه الى خارج المنظومة وبذلك تصبح قيمة Q واطئة وتزداد الطاقة المخزونة بزيادة التوزيع العكسي. اما عند ازالة فرق الجهد المسلط على الخلية بشكل مفاجئ ولفترة زمنية قصيرة جدا، فان قيمة Q ستصبح عالية وتنبعث الطاقة المخزونة في التوزيع العكسي على شكل نبضة ليزرية حادة جدا وذات قدرة عملاقة، وكما هو موضح بالشكل اعلاه.

تعد هذه التقنية اكثر فعالية من التقنيات الاخرى اذ لا يوجد اي جزء متحرك في منظومة الليزر وتخلو من الاصوات اثناء العمل ويعرف عن المنظومة الكهروبصرية بانها ذات تزامن سهل ودقيق جدا مع بقية مكونات جهاز الليزر بما فيها الضخ.

4- تقنية الاصباغ العضوية (الماصات القابلة للاشباع)

تعد بعض الاصباغ العضوية مادة ملائمة لتقنية ضبط عامل النوعية اذ تعتمد نفاذية هذه الاصباغ على شدة الضوء الساقط عليها، فعندما تكون شدة الاستضاءة قليلة فان الصبغة ستكون داكنة اللون وتصبح نفاذيتها للضوء قليلة جدا، اما عند زيادة شدة استضاءة الضوء الساقط عليها تدريجيا فان هذه الصبغة ستتحول بشكل مفاجئ وحاد الى صبغة شفافة ذات نفاذية عالية للضوء.

يتم عادة وضع محلول الصبغة العضوية داخل خلية معينة وتوضع الخلية بين الوسط الفعال والمرآة الخلفية، وعند ضخ الوسط الفعال تزداد الطاقة المخزونة في التوزيع العكسي وتزداد معها شدة الضوء تدريجيا داخل المرنان بينما تقل قيمة Q لان خلية الصبغة تكون في البداية داكنة اللون ولا تسمح بنفاذ الضوء من خلالها مما يؤدي الى توقف عمل المرآة الخلفية، كما في الشكل ادناه، وعند وصول شدة الضوء الى المستوى الذي يصبح فيه سائل الصبغة شفافا يسمح للضوء بالنفاذ من خلاله بسهولة فان ذلك يؤدي الى زيادة قيمة عامل النوعية Q وتنبعث نبضة ليزر ذات شدة عالية وزمن قصير جدا وبعد اطلاق النبضة الليزرية من المنظومة ترجع الصبغة تلقائيا الى اللون الداكن الاصلي لتعود قيمة Q وتصبح واطئة.



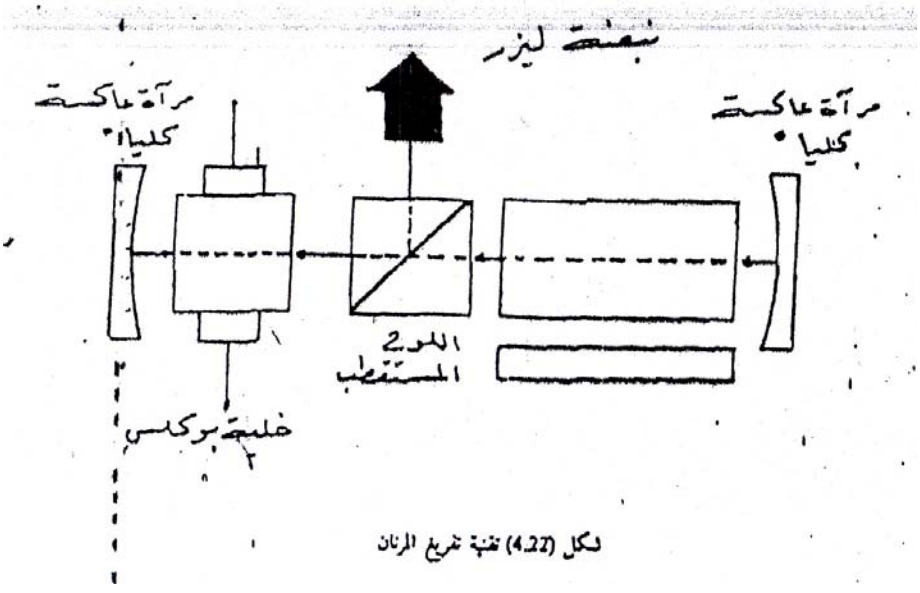
شكل (4.20) تقنية الاصباغ المشبعة

ومن الاصباغ الشائعة الاستخدام في هذه التقنية هي صبغة الزجاج المطعم باليورانيوم. ان تقنية الاصباغ العضوية بسيطة نسبيا ورخيصة التكاليف وتكون سهلة التزامن مع الاجزاء الاخرى للمنظومة ومن مساؤها فقدان الصبغة العضوية لخواصها بمرور الزمن. وقد استخدمت هذه التقنية في الليزرات واطئة القدرة.

5- تقنية تفريغ المرنان

تستخدم التقنيات السابقة لضبط عامل النوعية في كثير من الليزرات لغرض الحصول على النبضات الليزرية الحادة ذات القدرة العالية. ولكن هذه التقنيات لا يصلح استخدامها، عندما يكون عمر المستويات المتهيجة الليزرية في بعض الليزرات قصيرا الى حد لا يكفي لخزن كمية كبيرة من الطاقة في التوزيع العكسي، لذا استعيض عنها بتقنية اخرى تعرف بتقنية تفريغ المرنان.

ان مرآتي المرنان في هذه الطريقة تكون ذات انعكاسية عالية (100%) مما يجعل المرنان مغلقا، ويتم وضع اللوح المستقطب وخلية بوكلس بين الوسط الفعال واحد المرايا، كما في الشكل ادناه، فعندما يكون فرق الجهد على طرفي خلية بوكلس صفرا يتم ضخ الوسط الفعال ليذبذب الضوء بين المرآتين وتزداد الطاقة المخزونة في التوزيع العكسي والمرنان. وبسبب الانعكاسية العالية لكلا المرآتين فان الطاقة المخزونة المتزايدة سوف لن تجد لها اي منفذ للخروج من المرنان وبذلك تزداد هذه الطاقة وتصل الى اقصى حد ممكن. في هذه الحالة وعند تسليط فرق الجهد على خلية بوكلس فانها تقوم بتدوير مستوى استقطاب الضوء بحيث لا يتمكن من النفوذ خلال اللوح المستقطب وعندئذ يقوم هذا اللوح بتفريغ الطاقة المخزونة في المرنان وذلك بعكسها الى خارج المنظومة على شكل نبضة ليزرية قوية. ويلاحظ ان هذه التقنية تشبه الى حد ما التقنيات الاخرى لضبط عامل النوعية ولكن تختلف عنها من حيث تبديل قيمة Q، حيث تتبدل قيمة Q في هذه التقنية من قيمة عالية الى واطئة.



الشكل (4.27) تقنية تفريغ المرنان

يعتمد زمن نبضة الخرج الليزري في هذه التقنية على زمن دورة كاملة للفوتونات المنبعثة داخل المرنان اي يعتمد على طول المرنان (L) ويكون زمن نبضة الاخراج قصير جدا في حدود النانوثانية ($10^{-9}\,s$). ومن الجدير بالذكر ان عملية خزن الطاقة في هذه التقنية تتم في كل من التوزيع العكسي والمرنان الليزري معا، في حين ان هذه العملية في التقنيات السابقة تتم في التوزيع العكسي فقط.

الطاقة والقدرة لنبضة احكام- Q

يمكن تقدير مقدار الطاقة المرافقة لنبضة احكام- Q بالطريقة المبسطة التالية: لو فرضنا بان درجة التاهيل العكسي الابتدائي، اي قبل استخدام مفتاح احكام- Q هو (N_i) وان درجة التاهيل العكسي بعد حدوث نبضة احكام- Q هو (N_f)، فيمكن التعبير عن الطاقة (E) بالمعادلة الاتية:

$$E = \frac{1}{2} h\nu \left(N_i - N_f\right) V$$

يمثل (V) حجم الوسط الفعال لليزر، اما المقدار ($1/2$) فيظهر بسبب تغير التاهيل العكسي بوحدتين عند انطلاق كل فوتون، اي لوحدة الحجم من الوسط سيقل تاهيل المستوى الاعلى لذرة او جزيئة واحدة نتيجة انتقالها (انبعاث فوتون) الى المستوى الاوطا الذي سيزيد تاهيلها بمقدار واحد ايضا وبهذا سيتغير التاهيل العكسي بمقدار جزئيتين عند انبعاث كل فوتون.

وكمثال لحساب (E)، في ليزر اعتيادي تكون درجة التاهيل العكسي الابتدائي له ($10^{24} m^{-3}$) ولنفرض ايضا بان ($N_i >> N_f$) وان تردد الليزر يساوي ($5 \times 10^{14} Hz$) وان حجم الوسط هو ($10^{-5} m^3$)، لذا تكون طاقة النبضة:

$$E = \frac{1}{2} \times 6.6 \times 10^{-34} \times 5 \times 10^{14} \times 10^{24} \times 10^{-5} \approx 1.65 J$$

ان قدرة الذروة تمثل اكبر معدل زمني للتغير العكسي وبالتالي لانبعاث لفوتون والذي يحصل عندما تهبط قيمة التاهيل العكسي الى القيمة الحرجة (N_c) ولتقدير متوسط تاقدرة للنبضة نحتاج اولا معرفة امد النبضة. لنتصور نبضة احكام- Q تتذبذب الى الامام والوراء بين مرآتي الليزر وفي كل مرة تصطدم فيها باحدى مرآتيه تخسر طاقة ($1 - R$) نتيجة النفوذ، لذا فان النبضة ستصنع ($L/1-R$) عبورا لطول المرنان بزمن مقداره ($L/(1-R)c$). هذا الزمن يؤخذ كتعبير لامد النبضة وغالبا ما يطلق عليه بزمن عمر المرنان (t_c).

$$t_c = \frac{L}{(1-R)c}$$

بهذا تكون قدرة النبضة حوالي:

$$P = \frac{E}{t_c}$$

$$P = \frac{\left(N_i - N_f\right) h\nu V c (1-R)}{2L}$$

وعند استخدام المعلومات المعطاة في المثال الوارد اعلاه، نستطيع تقدير القدرة لنبضة احكام- Q لليزر الذي طول مرنانه ($1m$) مثلا وقدرة انعكاسية مرآته (0.8) حيث يكون:

$$t_c = \frac{L}{(1-R)c}$$

$$t_c \approx 16.7 ns$$

$$P = \frac{E}{t_c}$$

$$P \approx 10^8 W$$

مضاعفة التردد

تنبا العلماء بظاهرة مضاعفة التردد قبل اكتشاف الليزر ولكنها لم تكتشف عمليا الا عام 1961 اي بعد اكتشاف ليزر الياقوت. لقد ساعدت الشدة العالية لشعاع الليزر على دراسة الكثير من الظواهر الفيزيائية في المواد الصلبة كالتاثيرات اللاخطية في البلورات التي تعمل على مضاعفة تردد شعاع الليزر، فعند سقوط شعاع ليزر النديميوم- ياك بتردد قيمته (v) الذي يقع ضمن الاشعة تحت الحمراء القريبة (غير المرئية) على بلورة لاخطية فانه سيخرج من الطرف الثاني للبلورة بترددين (v) غير مرئي و($2v$) الذي يظهر باللون الاخضر.

ان وصف مثل هذا التاثير غير الخطي يكمن في الطريقة التي تسير فيها حزمة الضوء خلال المادة الصلبة. فالذرات في مثل هذه البلورات مكونة من نواة والكترون واحد في المدار الخارجي ويرتبط هذا الالكترون بالذرة بقوة نابضية ضعيفة وبذلك فان كل ذرة من ذرات هذه البلورة يمثل ثنائي قطب الكتروني فعند تسليط ضوء ذو شدة عالية كشعاع الليزر مثلا على هذه البلورة، تتذبذب ثنائيات القطب وتعمل على انبعاث موجات كهرومغناطيسية. فاذا كانت سعة التذبذب صغيرة، سيكون الشعاع المنبعث مشابها للشعاع الساقط من حيث التردد وهذا يعني ان البلورة قد تصرفت تصرفا خطيا. اما عند زيادة شدة الشعاع للضوء الساقط على نفس البلورة فان سعة تذبذب ثنائيات القطب ستزداد وتسلك البلورة سلوكا لاخطيا مؤديا الى تذبذب ثنائيات القطب بترددات توافقية ثنائية ($2v$) او ثلاثية ($3v$) ويقال ان البلورة قد تصرفت تصرفا لاخطيا.

فاذا كانت الشدة لمجموعة ثنائي القطب للبلورة هي ($\vec{P}$)، وهو في الحقيقة يمثل الاستقطاب او عزم ثنائي القطب لوحدة الحجم والذي يرتبط بدوره مع شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) بالعلاقة الاتية:

$$\vec{P} = \chi \vec{E} \qquad .....(1)$$

وتدعى (χ) بقابلية الاستقطاب او التاثرية الكهربائية، وعند استخدام شعاع الليزر على بلورة لاخطية فان العلاقة الخطية بين ($\vec{P}$) و($\vec{E}$) والمتمثلة بالمعادلة (1) ستصبح لاخطية. ان هذه الاستجابة اللاخطية تحت تاثير المجال الكهربائي العالي تؤدي الى انبعاث الموجات الكهرومغناطيسية بترددات مختلفة كما في المعادلة الاتية:

$$\vec{P} = \chi_1 \vec{E} + \chi_2 \vec{E}^2 + \chi_3 \vec{E}^3 + ...etc \qquad .....(2)$$

فلو كان ($\vec{E}$) على شكل مجال متذبذب كان يكون متاينا عن اشعاع كهرومغناطيسي ($\vec{E} = E_o \sin \omega t$)، فينتج عند التعويض في المعادلة اعلاه:

$$\vec{P} = \chi_1 E_o \sin \omega t + \frac{1}{2} \chi_2 E_o^2 (1 - \cos 2\omega t) + ...etc \qquad .....(3)$$

تحوي هذه المعادلة على حد له (2ω) والذي يناظر الموجة الكهرومغناطيسية التي لها تردد مضاعفا لتردد الموجة الساقطة.

تمهيد

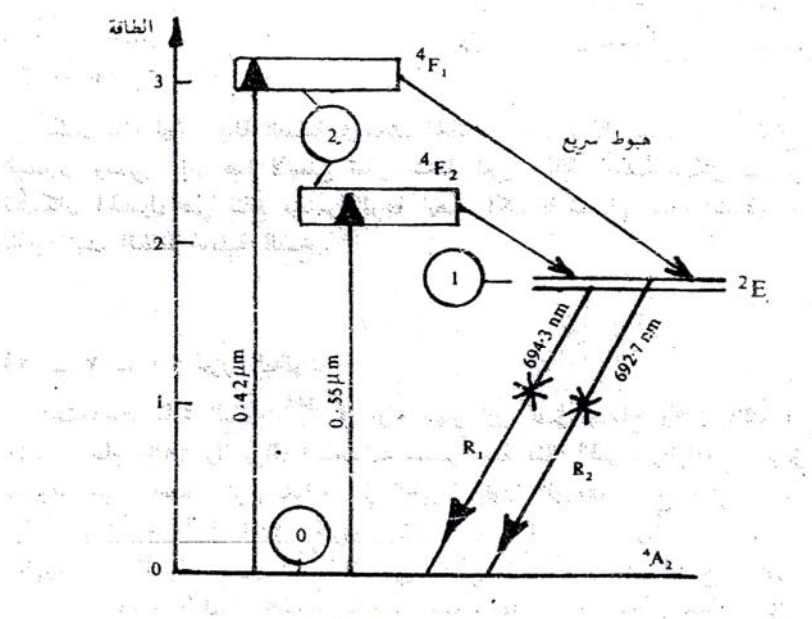
يتضمن هذا الفصل بعض المعلومات العامة، النظرية منها والتقنية لبعض انواع الليزرات. انتخبت هذه الانواع لتعطي فكرة عن المجالات الواسعة المتعددة التي يتطرق اليها البحث في هذا الموضوع وايضا لتوضيح فكرة عمل الليزر الواردة في الفصول السابقة، كما ستغطي انواع الليزر التي سنتطرق اليها الاوساط الفعالة المختلفة التي تستخدم في عمل الليزر وكذلك وسائل الضخ المختلفة مع الاشارة الى تصاميم المرنان المستخدم. ان نجاح عمل جهاز الليزر يعطي الدليل القاطع على صحة الحسابات النظرية التي يستند اليها والتي هي الاخرى قد تطورت بشكل يناسب التطور السريع في هذا الموضوع ومجالاته الواسعة.

1- ليزر الحالة الصلبة

ليزر الياقوت

استخدمت مادة الياقوت في اول جهاز ليزر عمل بنجاح وكان ذلك في عام 1960 ولا يزال استخدامه مستمرا منذ ذلك الحين. والياقوت بلورة معروفة جيدا كحجر كريم تتواجد في الطبيعة بلونها الوردي الفاتح وهي بلورة اوكسيد الالمنيوم (Al_2O_3) وتحوي نسبة ($0.1 - 0.01$) وزنا من ايونات الكروميوم الثلاثية التاين (Cr^{+3}) التي تعطي اللون الوردي الفاتح لبلورة الياقوت. تصنع البلورة مختبريا لغرض استخدامها كوسط فعال لعمل الليزر ويحصل عليها من انبات بلورة في مزيج مصهور اوكسيد الكروميوم (Cr_2O_3) بنسبة حوالي (0.05) وزنا واوكسيد الالمنيوم (Al_2O_3)، وان قطر بلورة الياقوت المستخدمة يتراوح ما بين ($1 - 20mm$) وطولها ($50 - 200mm$).

ان مخطط مستويات الطاقة لايونات الكروميوم في البيئة البلورية ذات العلاقة بعمل الليزر مبين في الشكل ادناه، فالمستويات (^2E) و($^4A_2$) ذات العلاقة بانتقال الليزر تكون حادة قليلة التاثر بمجال البلورة في حين تعاني المستويات ($^4F_1$) و($^4F_2$) تعريضا كما هو مبين في الشكل.



شكل (٦ ـ ١) : مخطط مستويات الطاقة لايونات الكروميوم في البيئة البلورية وهو نظام ذو ثلاث مستويات لعمل الليزر.

بهذا يمكن تنفيذ الضخ البصري باستخدام مصدر ذي نطاق طيفي عريض في حين يكون كل من انتقالي الليزر (R_1) و(R_2) ضيقا. يتبين من الشكل ايضا بان ليزر الياقوت يعمل بخطة ضخ ذي ثلاثة مستويات فالضخ يتم من المستوى ($^2A_2$) عبر المستوى (^2E) الى المستوى (^4F) حيث يكون الهبوط منه سريعا وغير مشع وبهذا يتحقق التاهيل العكسي للمستوى (^2E). اما الاشعاع اللازم للضخ البصري فيقع في مدى الضوء الصادر من مصباح الزينون (Xe) الوميضي الذي هو بضغط حوالي ($600mbar$).

ان انبعاث الليزر الاحمر يقع في خطين (R_1) و(R_2) بطول موجة تناظر ($694.3nm$) و ($692.7nm$) على التوالي بسبب فرق الطاقة الصغير بين مستويي (^2E). ان هذا النتاج النبضي يمكن ان يعطي قدرة بحدود ($10-50MW$) في نبضة عملاقة امدها ($10-20ns$) وكذلك يمكن ان يعطي نبضة تقدر ذروتها بضع جيكاواط وامدها ($10ps$) كما يمكن تشغيل ليزر الياقوت بموجة مستمرة (CW) اذا ما استخدم للضخ مصدر ضوئي ثابت الشدة مثلا الاستعانة بمصباح زئبقي بضغط عالي او باستخدام ليزر أخر.

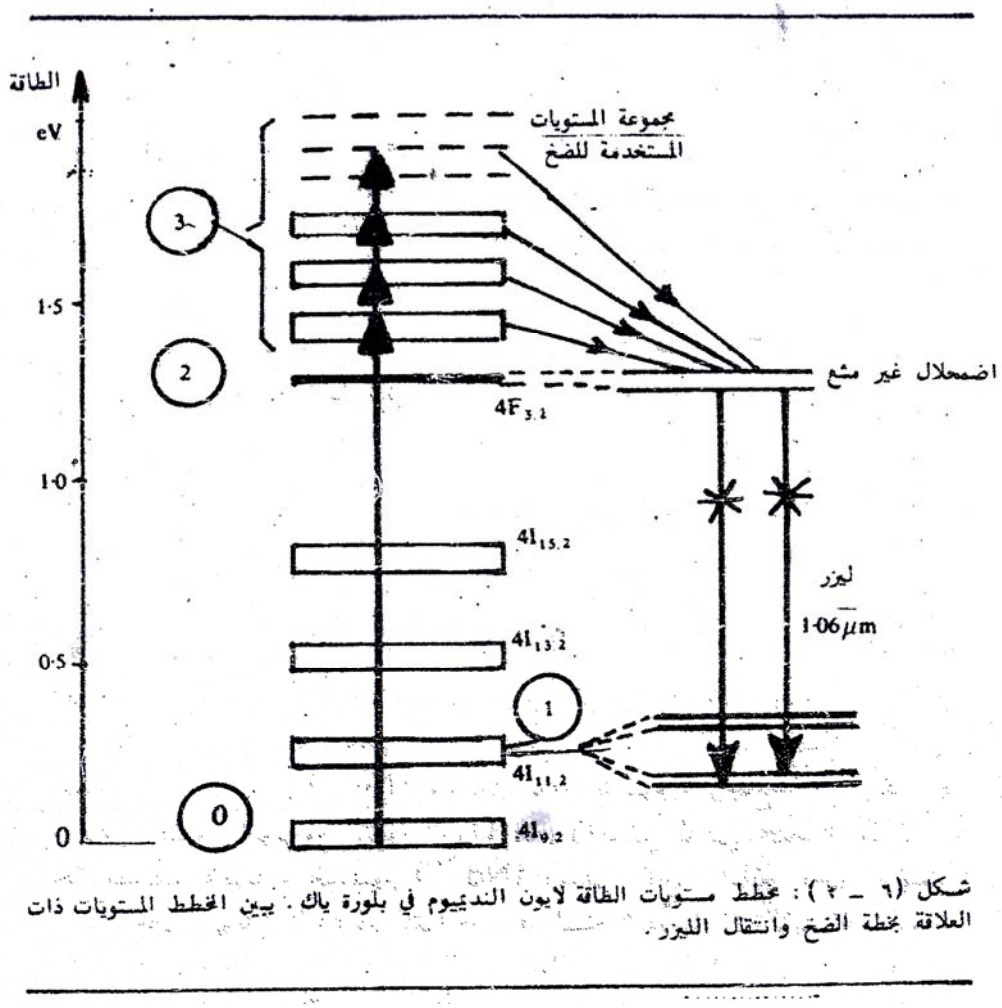
ان لليزر الياقوت تطبيقات عملية قائمة مثلا يستخدم في التصوير المجسم وتجارب تعيين المدى بما فيها الاغراض العسكرية.

ليزر النديميوم

هو الليزر الاكثر شيوعا لانواع ليزر الحالة الصلبة ويتالف الوسط الفعال فيه ببساطة من الزجاج الذي يعمل كوسط مضيف لايونات الليزر الفعالة وهي ايونات النديميوم الثلاثية (Nd^{+3}) ويدعى بليزر نديميوم- زجاج. كذلك قد تعمل بلورة عقيق اليوتريوم المنيوم ($Y_3Al_5O_{12}$) والتي تدعى مختصرا بالياك كوسط فعال مضيف لايونات النديميوم (Nd^{+3}) ويدعى الليزر الناتج بليزر نديميوم- ياك.

تعطي ايونات النديميوم المتواجدة في البيئة البلورية انتقالات ليزر متعددة ولكن اشدها يقع عند عند الانتقال الذي هو بطول موجة يساوي ($1.064\mu m$) بين مستويي الطاقة ($^4I_{11/2}-{}^4F_{3/2}$) وهذا الانتقال ممنوع وفق قواعد الانتقاء لثنائي القطب الكهربائي، لذا يكون متوسط زمن العمر للمستوى الاعلى لانتقال الليزر طويل نسبيا ($\tau = 0.23ms$). اما المستوى الاعلى للضخ فيتمثل في مجموعة مستويات الطاقة التي تقع اعلى من المستوى ($^4F_{3/2}$) ويحصل الضخ من المستوى الارضي ($^4I_{9/2}$) بنطاقين طيفيين حول الطول الموجي ($0.73-0.8\mu m$)، لاحظ الشكل ادناه.ان المستويات العديدة المستخدمة للضخ وباستخدام مصدر ضوئي ذي نطاق طيفي عريض يزيد من كفاءة الضخ. كما ان المستويات العليا للضخ تتفرغ سريعا وبانتقالات غير مشعة الى المستوى الاعلى لانتقال الليزر اي للمستوى ($^4F_{3/2}$)، كما ان المستوى الاسفل لانتقال الليزر اي المستوى ($^4I_{11/2}$) يتفرغ هو الاخر بشكل سريع وبانتقالات غير مشعة ايضا الى المستوى الارضي اي المستوى ($^4I_{9/2}$)، ومن الشكل نلاحظ بان ليزر نديميوم- ياك يعمل وفق خطة ضخ ذي اربعة مستويات ولهذا يفضل على ليزر الياقوت.

يشتغل ليزر نديميوم- ياك بموجة مستمرة (CW) او بشكل نبضي (P) وغالبا ما يستعان بالترتيب الاهليجي للعاكس لزيادة كفاءة الضخ الذي يتم باستخدام مصباح الزينون (Xe) تحت ضغط متوسط يتراوح ($600 - 2000mbar$) ومصباح الكربتون (Kr) بضغط عالي ($4 - 6atm$) للضخ النبضي والمستمر على التوالي.



شكل (٦ ـ ٢) : مخطط مستويات الطاقة لايون النديميوم في بلورة ياك . يبين المخطط المستويات ذات العلاقة بخطة الضخ وانتقال الليزر.

تكون ابعاد البلورة مشابهة بما ورد في ليزر الياقوت. اما نتاج هذا الليزر فقد تبلغ قدرته ($50MW$) عند احكام- Q له وقد تصل امد نبضته من القصر لغاية ($20ps$) في حالة اقفال الصيغة له. اما في التشغيل المستمر لهذا الليزر فقد تبلغ القدرة ($150W$) في حالة استخدام مضخم او سلسلة من مضخمات.

لهذا الليزر تطبيقات كثيرة ومتنوعة منها في تصنيع المعادن وتعيين المدى وكذلك في الجراحة الليزرية، كما ان ليزر نديميوم- زجاج يستخدم كمضخم ليزر في انظمة توليد الطاقة العالية المستخدمة في تجارب الانصهار النووي، فالانظمة المبنية على استخدام ليزر نديميوم- زجاج يمكن ان تعطي قدرة ذروة اكثر من ($20TW$) بطاقة حوالي ($1.5KJ$).

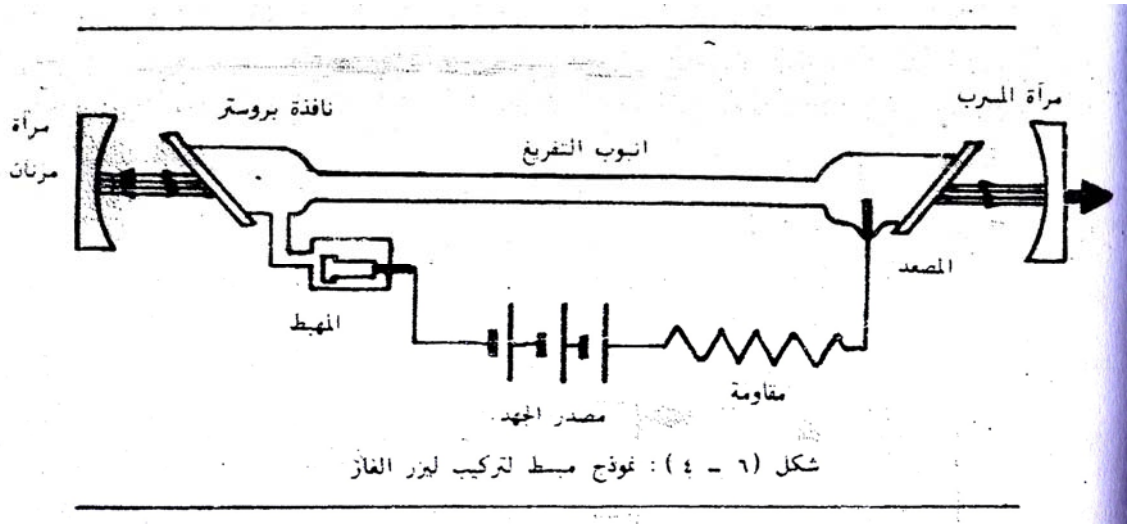
من جهة اخرى استخدمت بلورات متنوعة كثيرة تعمل كمواد مضيفة لايونات النديميوم للحصول على ظروف تصنيع وعمل انسب ونتاج اقتصادي اكثر وبايجاز يمكن القول بان الانواع المختلفة لليزر الحالة الصلبة يغطي حاليا مدى من طول الموجة يقع بين ($0.65\mu m$) ولغاية ($3.5\mu m$).

ليزر الغاز

تكون مستويات الطاقة للغاز عموما اضيق مما عليه في الحالة الصلبة ولهذا تكون الانتقالات الطيفية بينها اقل تعريضا حيث يكون ضغط الغاز عادة واطئا، لهذا السبب لا تضخ الغازات باستخدام المصابيح التي يكون طيفها عادة مستمرا. لكون نطاق الامتصاص للغاز ضيقا وعليه تكون عملية الضخ غير كفوءة، ويمكن ان يضخ الغاز بصريا باستخدام ليزر اخر. فمثلا على العموم يضخ الغاز بالطريقة الكهربائية او يتم بمرور تيار عالي (مستمر او نبضي) خلال الغاز ولقد تطورت ميكانيكية الضخ الكهربائي بتعدد انواع ليزرات.

فعند تحريض الغاز تحدث عدة عمليات وكما اشرنا اليها في الفصل الثاني، فدقيقة الغاز المحرضة (المثارة) تضمحل بعدة طرق منها التصادم من النوع الاول والثاني، الاصطدام مع الجدار وايضا عن طريق الانبعاث الذاتي ولمقدار معين من تيار التفريغ وبالتالي تحدث عملية التاهيل العكسي المطلوب والذي يكون اكثر تعقيدا فيها عنه في الحالة الصلبة بسبب الظواهر العديدة داخل الغاز وتاثرها بتغير ظروف التشغيل.

اما فيما يتعلق بتركيب الجهاز فاغلب انواع ليزر الغاز لها ترتيب مماثل لذلك المبين في الشكل ادناه، فالغاز يتواجد في انبوب ذي قطر مناسب (من بضع ملمترات الى بضع سنتمرات) طوله يحدد بنافذتين عند نهايتيه تثبت كل منها مع طرف الانبوب بزاوية تعرف بزاوية بروستر، الغرض من هذه الزاوية تقليص الخسارة في الضوء والناجمة عن الانعكاسات المختلفة عند سطح نهاية الانبوب كما انها تحدد استقطاب الضوء النافذ والذي هو في صالح خواص نتاج الليزر.



شكل (٦ ـ ٤) : نموذج مبسط لتركيب ليزر الغاز

وغالبا ما تستخدم المرايا الكروية في تصميم المرنان بدلا من المرايا المستوية لتمنح المرنان استقرارية اكثر. وتصنف الانواع المختلفة لليزر الغاز احيانا وفق تركيب الغاز المستخدم كوسط فعال لعمل الليزر وسنطرح امثلة لذلك فسنتطرق الى ليزر الذرة المعادلة وليزر الايونات الموجبة ونوع اخر هو ليزر الغاز الجزيئي.

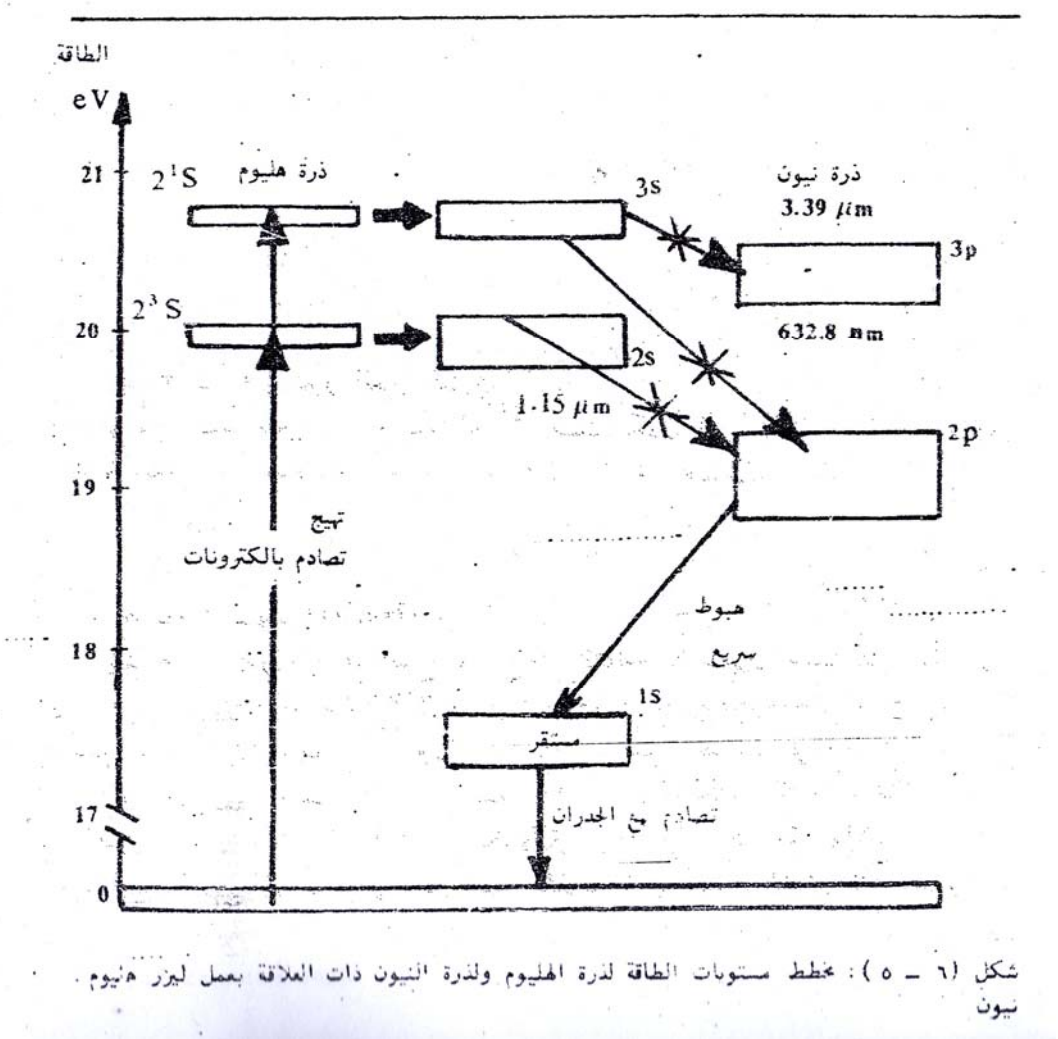
1- ليزر الغاز الذري

يدعى ايضا بليزر الذرة المتعادلة حيث يكون الوسط الفعال غاز احادي الذرة وتقع ضمن هذه المجموعة ليزر الغازات النادرة ومجموعة اخرى من ليزر ابخرة بعض المعادن.

ليزر هيليوم- نيون ($He-Ne$)

يعد هذا الليزر من اهم انواع ليزر الغاز الشائعة الاستعمال حيث كان اول ليزر غاز اشتغل بموجة مستمرة (CW) وبطول موجة ($1.15\mu m$) وحدث ذلك في مطلع عام 1960 وهو ايضا اول ليزر يتعرف عليه الطالب في دراسته المختبرية لتحقيق مبادئ البصريات الفيزيائية. ان لهذا النظام ثلاثة انتقالات ليزر بالاطوال الموجية التالية ($3.39\mu m$)، ($1.15\mu m$) والانتقال ($633nm$) الذي يقع في المدى المرئي وهو المتميز باللون الاحمر القاني الشائع الاستعمال.

يتكون ليزر الهيليوم- نيون من مزيج من ذرات الهيليوم (He) وغاز النيون (Ne) بنسبة معينة وخطوط انبعاث الليزر الانفة الذكر تعود لذرة النيون. اما دور ذرات الهيليوم فهو المساهمة في عملية الضخ وتحقيق التاهيل العكسي لمستويات ذات العلاقة بنظام النيون. ولتوضيح دور الهيليوم في عمل هذا الليزر نستعين بمخطط الطاقة للمستويات ذات العلاقة بانتقالات الليزر لكل من ذرات الهيليوم والنيون، راجع الشكل ادناه. من هذا الشكل يتبين بان مستويي الطاقة ($2s^1, 2s^3$) على التوالي لذرة الهيليوم شبه مستقرين ويحدث انتقال رنيني للطاقة بينهما وبين مستويي الطاقة ($3s, 2s$) للنيون، حيث ثبت بان هذه العملية تمثل الوسيلة الاساسية لتحقيق التاهيل العكسي في هذا الليزر.



شكل (٦ ـ ٥): مخطط مستويات الطاقة لذرة الهليوم ولذرة النيون ذات العلاقة بعمل ليزر هليوم ـ نيون

من الممكن ايضا ان تتحرض ذرات النيون مباشرة الى المستوى المطلوب بواسطة تصادمها ايضا مع الالكترونات الناتجة عن التفريغ الكهربائي ولكن عملية التاهيل العكسي للمستويين ($3s, 2s$) لذرة النيون تتم بشكل فعال وكفوء عن

طريق ذرات الهيليوم المحرضة وبهذا يحصل الانبعاث المحفز لذرات النيون بين المستويات: من المستوى ($3s$) الى المستوى ($3p$) بطول موجي ($3.39\mu m$)، ومن المستوى ($3s$) الى المستوى ($2p$) بطول موجي ($632.8nm$)، ومن المستوى ($2s$) الى المستوى ($2p$) بطول موجي ($1.15\mu m$). وبعدها تهبط هذه الذرات الى المستوى الارضي بصورة سريعة تلقائية وقد يحدث ذلك نتيجة تصادمها مع الجدران مثلا.

اما كون ليزر هيليوم- نيون سيتذبذب بهذا الانتقال او بذاك فيعتمد على انتخاب مرايا المرنان فمثلا لتذبذب طول موجة معينة يتم طلاء المرآتين بحيث تسمحان بمرور طول موجي دون اخر.

ان تعريض خط الانبعاث لنتاج الليزر يتاثر بظاهرة دوبلر فدرجة حرارة الغاز هي التي تضع حدا للتعريض حيث يكون تعريض التصادم (ضغط الغاز واطئ عادة) والتعريض الطبيعي صغير بالمقارنة مع تعريض دوبلر. لتشغيل ليزر هيليوم- نيون هناك قيما معينة لبعض الدلائل مثلا ان يكون ضغط مزيج الغاز مضروبا في قطر الانبوب الذي يحويه في حدود ($4.8 - 5mbar.mm$)، كما ان نسبة غاز الهيليوم الى غاز النيون مثلا للانتقال ($632.8nm$) تكون كنسبة (5) الى (1). ان القدرة الخارجة لاشعاع الضوء المرئي من انبوب تفريغ اسطواني الشكل بطول متر واحد وقطر ($6mm$) تكون في حدود ($0.1W$). ان معظم انابيب ليزر هيليوم- نيون المختبرية تكون بقطر يتراوح ($1 - 6mm$) وبطول ($15 - 20cm$) فقدرة النتاج لا تتجاوز ($1mW$).

بالاضافة الى ذلك فان ليزر هيليوم- نيون الذي يتذبذب بالانتقال الاحمر المرئي يستخدم في المختبرات التعليمية ويستخدم ايضا للاغراض التي تتطلب حزمة ضوئية مستقيمة مرئية بقدرة واطئة لاستخدامها لاغراض الترصيف مثلا او قراءة الرموز او في ذاكرة اقراص الفيديو.

2- ليزر الغاز الايوني

الوسط الفعال في هذه الحالة غاز متاين او بخار معدن ذراته متاينة وهذا يعني ان تمددا بسيطا قد حدث لمقياس الطاقة لمخطط مستويات الطاقة لذرة المادة، اي ان المسافة بين مستويات الطاقة لايون الذرة تكون اكبر بقليل من تلك المتعادلة نفسها. ان هذا بسبب تقليصا لطول الموجة لخطوط الطيف المنبعثة عنها، اي ان طيف الذرة المتاينة يزحف قليلا عن الطيف الذري لها باتجاه الاشعاع المرئي او فوق البنفسجي.

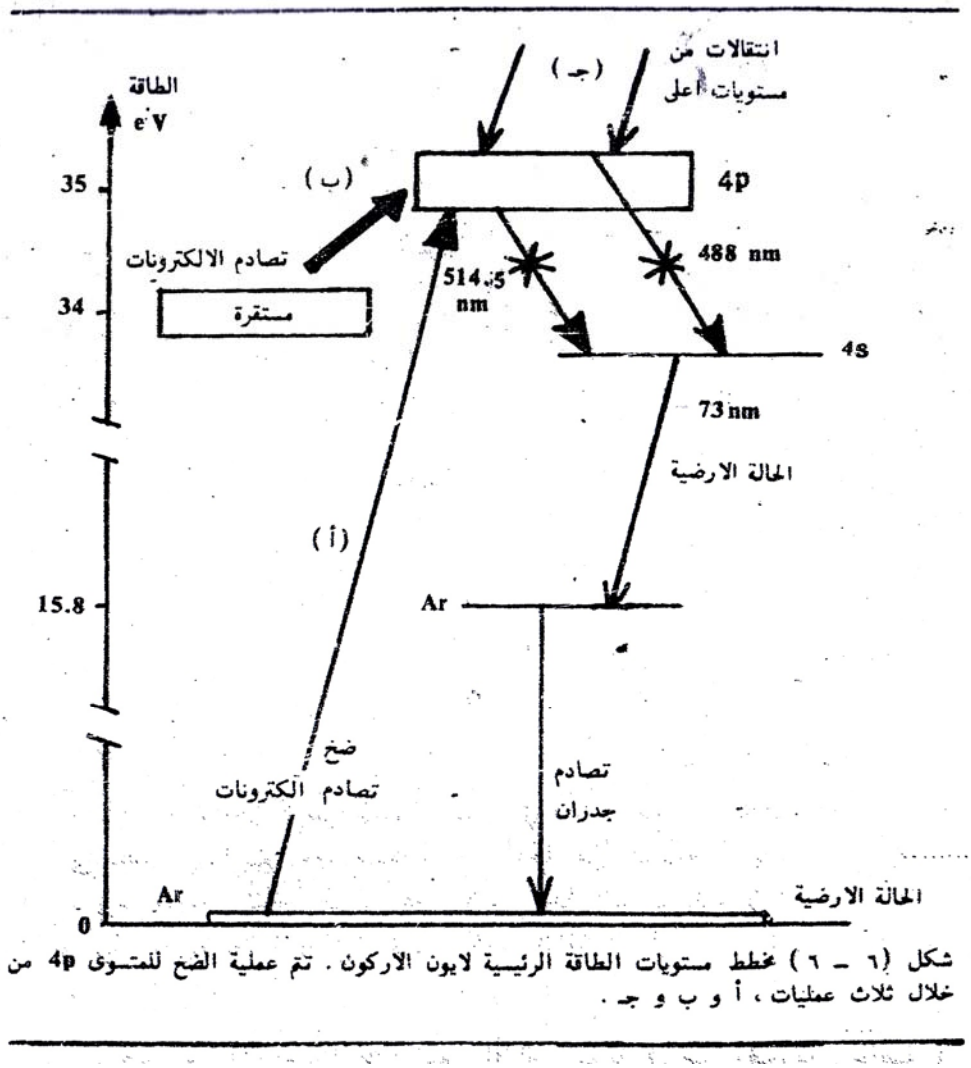
يقع ضمن هذا الحقل من الليزر مجموعتان وهما مجموعة ليزر ايونات ذرات الغازات النادرة ومجموعة ليزر ايونات ذرات المعادن.

ليزر ايون الاركون

يتم تاهيل المستوى الاعلى لانتقال الليزر في هذا النوع من الليزر بخطوتين، اي بعمليتي تصادم متتاليتين مع الالكترونات الناتجة عن التفريغ الكهربائي، فالتصادم الاول يؤين الذرة والثاني يحرض هذا الايون لهذا السبب يلزم لاتمام عملية الضخ كثافة تيار تفريغ عالية وعلى العموم تكون كثافة التيار اللازم لعمل ليزر الغاز الايوني اعلى بكثير من تلك اللازمة لعمل الليزر الذري.

يمثل ليزر ايون الاركون (Ar^+) الليزر الاكثر شيوعا في هذه المجموعة وخاصة في مختبرات ابحاث الذرة. يبين الشكل ادناه مخطط لمستويات الطاقة لايون الاركون ذات العلاقة بانبعاث الليزر حيث يتم تاهيل المستوى الاعلى

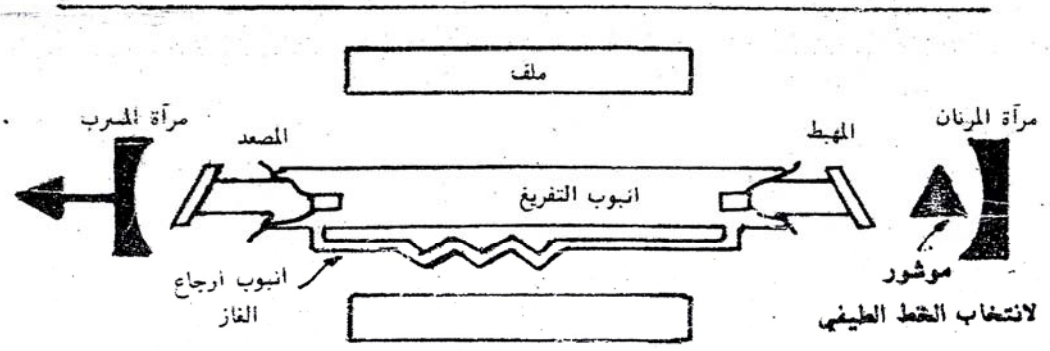
للانبعاث المحفز، المستوى ($4p$)، من خلال ثلاث عمليات مختلفة فقد تتحرض ايونات الاركون الى هذا المستوى باصطدامها مع الكترونات التفريغ (العملية أ)، وقد تكتسب ايونات الاركون التي هي في مستوى الطاقة شبه المستقر طاقة باصطدامها بالالكترونات لتحرضها الى المستوى ($4p$) اي (العملية ب) وايضا قد يتم التاهيل الى المستوى ($4p$) من خلال الانتقالات المتساقطة عليه من المستويات الاعلى منه.



شكل (٦ ـ ٦) مخطط مستويات الطاقة الرئيسية لايون الاركون . تم عملية الضخ للمستوى 4p من خلال ثلاث عمليات ، أ و ب و جـ .

ان تركيب ليزر ايون الاركون يختلف عن ذلك المبين في الشكل (6-4) بسبب كثافة التيار العالية اللازمة للضخ وبالتالي درجة الحرارة العالية الناتجة في الانبوب. ان كثافة التيار العالية تسبب الانجراف السريع لايونات الاركون نحو المهبط ولاعادتها يستخدم انبوب اخر ليكمل الدورة والذي يختلف في ابعاده عن الانبوب الرئيسي لتفادي حدوث التفريغ فيه، راجع الشكل ادناه، كذلك تستوجب كثافة التيار العالية وما ينتج عنها من ارتفاع في درجة الحرارة التي قد تصل الى ($3000^{\circ}C$) اخذ الاحتياط في تصنيع انبوب التفريغ وتبريده مثلا بدورة ماء جاري، كذلك تقليص التلف في جدران الانبوب بسبب التصادم ويستخدم لهذا الغرض مجال مغناطيسي يوازي محور الانبوب وضمن منطقة التفريغ لالتزام الالكترونات الحرة بالابتعاد عن الجدران والعمل على تواجدها في مركز الانبوب مما يزيد من كفاءة الضخ وبالتالي قدرة النتاج.

يكون قطر انبوب التفريغ ضيقا بحدود بضع ملمترات لحصر التذبذب ضمن الصيغة المستعرضة (TEM_{00}) وايضا لتقليص التيار الكلي اللازم. من جانب اخر تزداد القدرة باستخدام انابيب اوسع مما يقلل ايضا من التعرض للجدران، في كلتا الحالتين تزداد قدرة النتاج بازدياد طول الانبوبة.



شكل (٦ ـ ٧) : تصميم مبسط لانبوب التفريغ لليزر ايون الاركون .

ينتج عن عملية الضخ في ليزر ايون الغاز اكثر من انتقال ليزري واحد، الا ان اشد خطوط ليزر ايون الاركون يكون عند الانتقال ($514.5nm$) وهو الذي يعطي اللون الاخضر المزرق لنتاج ليزر ايون الاركون ويليه في الشدة الانتقال عند طول الموجة ($488nm$) ذي اللون البنفسجي وخطوط اخرى كثيرة اقل شدة. يمكن الانفراد بخط واحد في نتاج هذا الليزر عن طريق استخدام المحزز مثلا. كذلك يتميز نتاج هذا النوع من الليزر بامكانية زيادة قدرته بزيادة تيار التفريغ فلا يحدث الاشباع الا عند استخدام قيم للتيار اكبر بكثير من القيم العملية وهو على العكس من ليزر الغاز الذري. اذ ان كفاءة هذا الجهاز واطئة جدا وهي على العموم اقل من (10^{-3}).

لليزر ايون الاركون استخدامات كثيرة فبالاضافة الى شيوع استخدامه في مختبرات ابحاث الذرة يستخدم ايضا وبشكل واسع لضخ ليزر السائل وبتطبيقات اخرى في الطب مثلا حيث يعد استخدام هذا الليزر في الجراحة من التطبيقات المهمة.

3- ليزر الغاز الجزيئي

يحدث فعل الليزر بين مستويات الطاقة المختلفة للجزيئة، فلهذه الجزيئة مستويات طاقة الكترونية على غرارتلك المستويات للذرة وايضا مستويات طاقة دورانية وتذبذبية (اهتزازية)، والانتقال الطيفي قد يحدث بين اثنين من هذه المستويات وعلى هذا الاساس صنفت الانواع المختلفة لليزر الغاز الجزيئي. فالصنف الاول تكون فيه الانتقالات بين المستويات الطاقة الاهتزازية والدورانية العائدة الى حالة الكترونية واحدة (الحالة الارضية مثلا) ويعطي فرق الطاقة بين المستويات المناظرة انتقالات ليزري يقع في مدى الاشعة تحت الحمراء والبعيدة منها ($5 - 300\mu m$). من اهم انواع هذا الصنف هو ليزر ثاني اوكسيد الكربون (CO_2) الشائع الاستعمال وسيرد ذكره فيما يلي بشئ من التفصيل حيث يحتل المرتبة الاولى في التطبيقات التقنية.

اما الصنف الثاني فيعود الى انتقالات تحدث بين مستويات الطاقة الاهتزازية العائدة الى مستويات طاقة الكترونية مختلفة، في هذه الحالة تقع انتقالات الليزر في المدى المرئي والمدى فوق البنفسجي للاشعاع الكهرومغناطيسي وكمثال لهذا الصنف هو ليزر النتروجين (N_2) الذي يقع انبعاثه ضمن طول الموجة ($337nm$) وهو شائع الاستعمال في ضخ ليزر الصبغة.

اما الصنف الثالث من هذا الليزر فيحدث نتيجة الانتقالات بين مستويات الطاقة الدورانية لمستوى الطاقة الاهتزازي ذاته ولهذا تقع طول الموجة لمثل هذه الانتقالات في مدى الاشعة تحت الحمراء البعيدة ($25\mu m - 1mm$). يضخ عادة هذا الصنف من الليزر بصريا فمثلا باستخدام ليزر ثاني اوكسيد الكربون. ان الاضمحلال السريع بين مستويات الطاقة الدورانية تشكل صعوبة في عمل هذا الليزر.

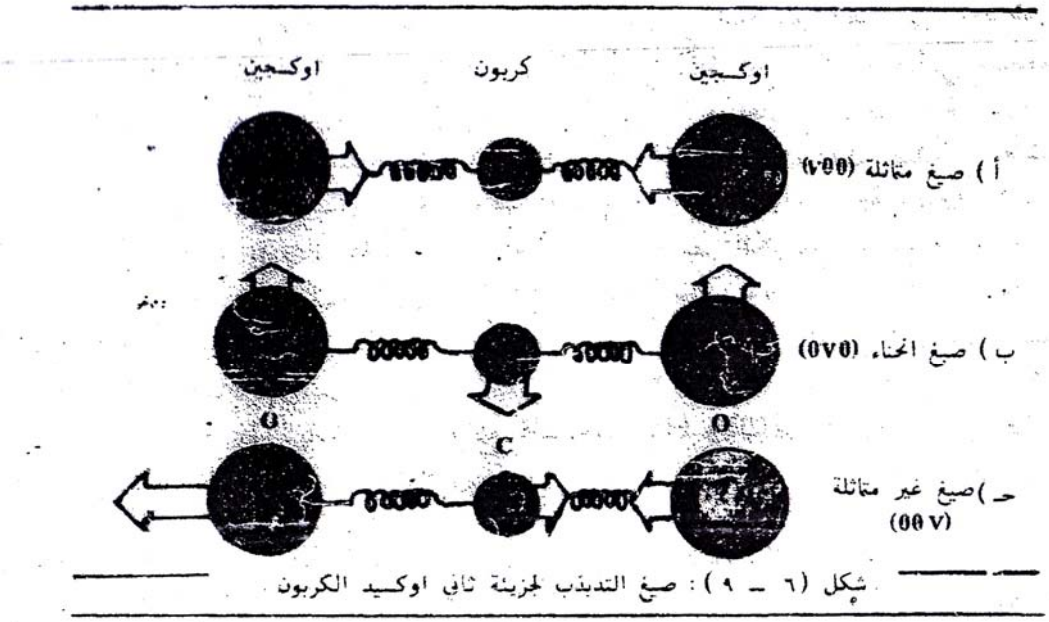
اما الصنف الرابع والاخير لهذا النوع من الليزر فيحدث نتيجة الانتقال الطيفي بين مستويات الطاقة الالكترونية وهو صنف جدير بالاهتمام ولقد اعطيت له تسمية خاصة اذ يسمى بليزر الاكسايمر او ليزر الجزيئة الثنائية المحرضة.

الاكسايمر جزيئة محرضة في حالة مهيجة مثلا (Ar_2^*) تتكون من اتحاد ذرتين متجانستين ولا يمكن ان تتواجد هذه الجزيئة في الحالة الارضية فاذا ما اضمحلت الجزيئة المهيجة الى الحالة الارضية انفكت مباشرة الى الذرتين المكونتين لها ($2Ar$) وبهذا يكون المستوى الاوطا لمثل هذا الانتقال ةالعائد لجزيئة الاكسايمر فارغا وهكذا يتحقق التاهيل العكسي.

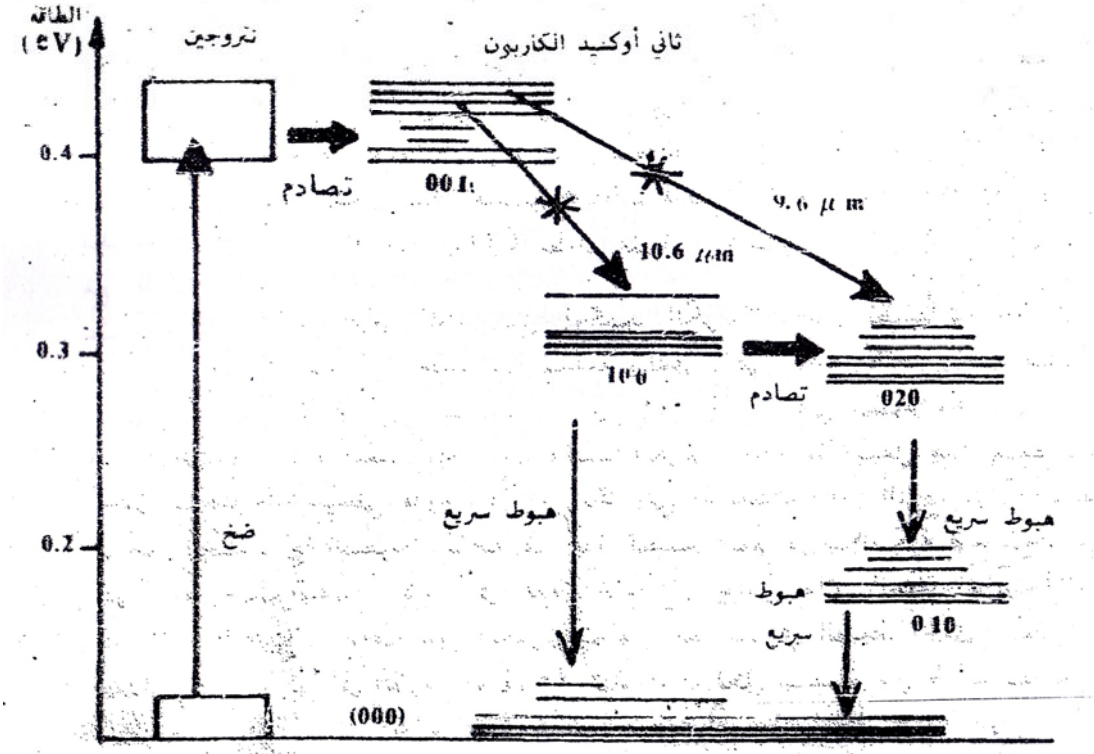
يقع ايضا ضمن هذا الصنف من الليزر نوع اخر من الجزيئات، فقد تتحد ذرة الغاز النادر مثلا الاركون او الكربتون او الزينون وهي في الحالة المحرضة مع احدى ذرات الهالوجينات مثلا الفور او الكلور لتمثل جزيئة ثنائية مركبة مهيجة ويدعى هذا النوع من الجزيئات (الاكسايبلكس). كما يدى الليزر الناتج عن استخدام هذا النوع من الجزيئات بليزر الاكسايبلكس او بليزر هالوجين الغاز النادر وتقع انتقالات هذا الصنف من الليزر في المدى فوق البنفسجي، مثلا يقع انبعاث ليزر فلوريد الاركون ArF بطول موجة ($193nm$) وليزر فلوريد الكربتون بطول موجة ($248nm$) وليزر كلوريد الزينون بطول موجة ($308nm$).

ليزر ثاني اوكسيد الكربون CO_2

تتالف جزيئة (CO_2) من ذرتين اوكسجين تقع بينهما ذرة كربون بهذا الترتيب الخطي يمكن لجزيئة (CO_2) ان تتذبذب وفق احدى الصيغ الاساسية المبينة في الشكل (9-6) او باي تركيب منها. يوصف مستوى التذبذب بثلاثة ارقام (i, j, k) ليعبر عن مقدار الطاقة المناظرة لصيغ التذبذب الثلاث للجزيئة، فمثلا يعني الترتيب (100) ان الجزيئة بهذه الحالة تتذبذب بصيغة متماثلة نقية يعبر عنها بكم واحد من الطاقة التذبذبية (الاهتزازية) وليس لها طاقة تناظر الصيغة غير المتماثلة او الصيغة المنحنية. اما مستويات الطاقة الدورانية المرافقة لكل مستوى تذبذبي فيعبر عنها بالعدد الكمي (j). يوضح الشكل (10-6) مخطط مستويات الطاقة التذبذبية للمستوى الارضي لجزيئة ثاني اوكسيد الكربون ذات العلاقة بعمل الليزر. تضخ الجزيئات من المستوى (000) الى المستوى (011) والى مستويات اعلى مما هو موجود في الشكل وعن طريق الهبوط السريع المشع وغير المشع يتم تاهيل المستوى (001) والذي يمثل المستوى الاعلى لانتقال الليزر وهو مستوى شبه مستقر.



شكل (٦ ـ ٩) : صيغ التذبذب لجزيئة ثاني اوكسيد الكربون

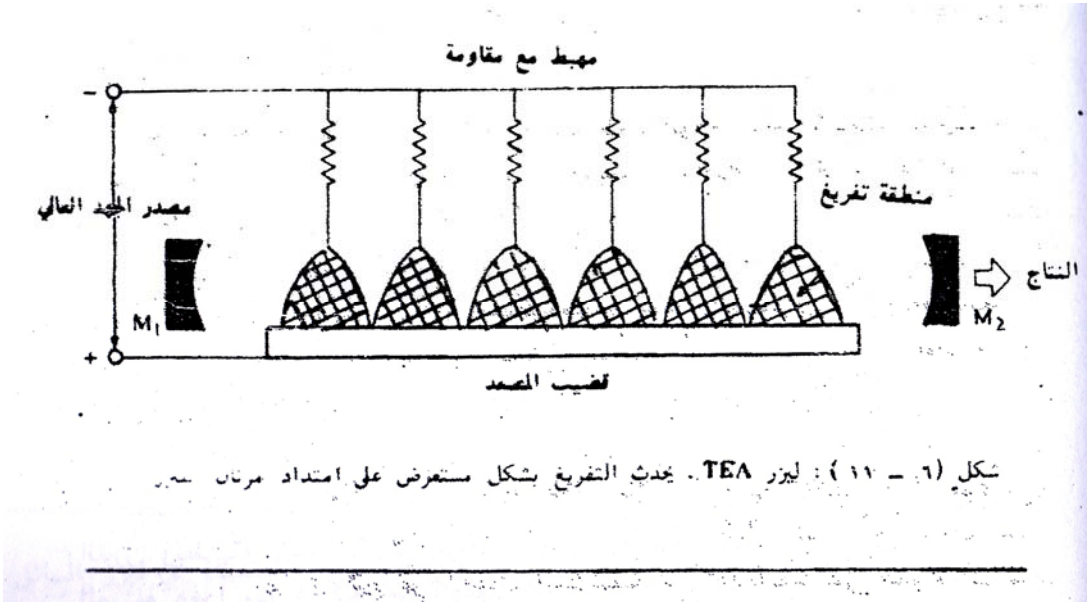


شكل (٦ ـ ١٠) : شكل مبسط لمستويات الطاقة لجزيئة CO_2 ذات العلاقة بانتقال الليزر . كل مستوى تذبذبي له عدد كبير من مستويات الطاقة الدورانية مشار اليها بالعدد J . اشد الانتقالات يقع بطول موجة ١٠.٦ مايكرومتر

فاذا تم الضخ بطاقة مناسبة فالتاهيل العكسي يتحقق بين المستوى (001) والمستويين (100) و (020) فاذا كانت الخسارة في المرنان صغيرة فان التذبذب يبدا باعثا اشد انتقالاته عند طول الموجة ($10.6\mu m$) والذي يقع في مدى الاشعة تحت الحمراء، اما الانتقال الاخر وهو اضعف فيحدث بطول موجة تساوي ($9.6\mu m$). ولزيادة كفاءة عمل ليزر ثاني اوكسيد الكربون يضاف اليه غاز النتروجين وغاز الهيليوم بنسب معينة ($40\%N_2, 50\%He$) حيث يلعب غاز النتروجين نفس الدور الذي يلعبه غاز الهيليوم في ليزر هيليوم-نيون وهو عملية انتقال الطاقة الرنيني، راجع شكل (10-6). اما غاز الهيليوم فيعمل في هذه الحالة على زيادة سرعة تفريغ المستوى (100) وبالتالي زيادة درجة التاهيل العكسي للانتقال ($10.6\mu m$).

يمكن لليزر ثاني اوكسيد الكربون ان يعطي قدرة عالية من خلال الانتقال الشديد للخط ($10.6\mu m$) فيمكن ان ترتفع كفاءة هذا الليزر الى (30%) وهي كفاءة عالية عند المقارنة مع كفاءة ليزر هيليوم-نيون مثلا، والتي تقدر بحوالي (0.02%) كما يمكن الحصول على قدرة ذروة تقع في المدى جيكاواط عند التشغيل النبضي، بالطبع يكون لمثل هذا الليزر الذي يتميز بالقدرة والكفاءة تطبيقات عملية مهمة ومتعددة. ان قدرة نتاج هذا الليزر تتناسب طرديا تقريبا مع طول الوسط الفعال لذا جاءت محاولات لزيادة قدرة النتاج (CW) الى عشرات كيلوواط ببناء ليزر (CO_2) بطول عشرات الامتار.

هناك تصاميم اخرى لليزر ثاني اوكسيد الكربون تخص تطبيقات القدرة العالية. منها النموذج المستخدم في الصناعة والذي يدعى بليزر الاثارة المستعرضة الجوي وتختصر هذه التسمية بليزر (TEA). على العموم يمكن زيادة قدرة النتاج بزيادة ضغط ثاني اوكسيد الكربون فاذا ما اشتغل هذا بضغط جوي واحد ($1atm$) فانه سيعطي قدرة اعلى من تلك التي استحصلت لهذا النوع من الليزر بالطول نفسه. اما الصعوبة الناجمة عن هذا التصميم فتقع في ميكانيكية ضخ الغاز كهربائيا حيث يتطلب الامر في هذه الحالة الى مصدر هائل للجهد الكهربائي لاحداث التفريغ والمحافظة على استمراريته في ضغط يساوي الضغط الجوي. يقدر مقدار الجهد الكهربائي اللازم بحوالي ($12KV$) لكل سنتيمتر من طول انبوب التفريغ- اذ تتطلب الحالة عادة انبوب فيه الضغط حوالي ($13.3mbar \approx 10^{-3}atm$) ويكون فرق الجهد مقداره يساوي ($8KV$) لكل متر من انبوب التفريغ، لهذا يتطلب توفير مصدر جهد هائل لاحداث تفريغ كهربائي بصورة طولية في انبوب طوله ($1m$) تحت ضغط ($1atm$)، والشكل ادناه يلقي فكرة عن طريقة التهيج هذه.



شكل (٦ ـ ١١) : ليزر TEA . يحدث التفريغ بشكل مستعرض على امتداد مرنان ...

ليزر السائل

لليزر السائل ما يتميز به عن كل ليزر الحالة الصلبة وليزر الغاز. فكما راينا، تكمن الصعوبة في ليزر الحالة الصلبة في تحضير البلورة التي يجب ان تكون على قدر عالي من التجانس وبتركيز معين من الايونات الفعالة ومتى ما حضرت البلورة لا يمكن تغيير مواصفاتها- اي لا يمكن تغيير تركيز المادة الفعالة فيها. كذلك هناك احتمالية لتلف البلورة والذي يتاصل فيها بسبب درجة الحرارة العالية التي قد تتعرض لها بحكم عملها. اما استخدام الغاز فلا يتطرق

لمثل هذه الصعوبات ولكنه لا يحتوي على قدر عالي من الذرات او الجزيئات الفعالة بسبب قلة كثافة الغاز. لذلك اختيرت السوائل او محاليل المواد المختلفة حيث يحوي السائل على كثافة عالية من الذرات او الجزيئات الفعالة التي يمكن تغيير تركيزها بسهولة كذلك يمكن تحضير السائل الفعال رخيصا وسهلا ويتم التعامل معه ببساطة. هناك الكثير من المواد العضوية التي تشكل محاليلها اوساط ليزر فعالة منها مادة الصبغة- وهي محلول صبغة عضوية معينة في سائل مذيب معين مثل سائل اثيل الكحول او مثيل الكحول او الماء والتي تشكل وسطا فعالا لليزر السائل ويدعى بليزر الصبغة. كما ان هناك مواد عضوية غير الصبغة تشكل محاليلها اوساطا لعمل الليزر ومنها الاتربة النادرة الكلابية. اما ما نحن بصدده هنا فهو محلول الصبغة العضوية التي تعمل كوسط ليزري فعال. اكتشف هذا النوع عام 1965 من قبل الباحث سوروكين ومجموعة بحثه خلال تجاربهم على ايجاد صبغة يمكن استخدامه كماص قابل للاشباع في عملية احكام- Q لليزر الياقوت.

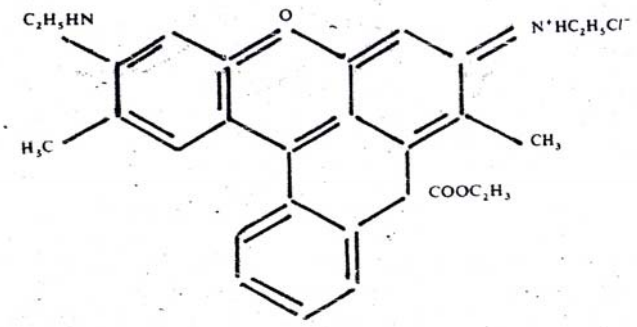
تصنف الصبغة عادة الى مجاميع حسب طول الموجة لمدى الاشعاع الذي تبعثه حيث تبعث كل مجموعة مدى معين من الطيف يتراوح مجمله ولجميع المجاميع ما بين ($1\mu m - 0.4$). هذه المجاميع هي: اصباغ البوليميثان ويكون لها مدى انبعاث يتراوح بين ($1\mu m - 0.7$) واصباغ الكسانثين ويقع انبعاثها بين ($0.7\mu m - 0.5$) واصباغ الكومارين ويقع انبعاثها بين ($0.5\mu m - 0.4$) والاصباغ التلالؤية ويقع انبعاثها بطول موجة حوالي ($0.4\mu m$).

وبسبب امكانية مؤالفة طول الموجة لمجمل نطاق الانبعاث الطيفي لهذا النوع من الليزر وبطريقة بسيطة سهلة ولمدى لا باس من طول الموجة فقد لعب ليزر الصبغة دورا مهما في كثير من الحقول التطبيقية مما ساعد ايضا على تطوره المستمر ومن اهم هذه الحقول حقل ابحاث علم الاطياف والكيمياء الضوئية وفي عملية فصل النظائر.

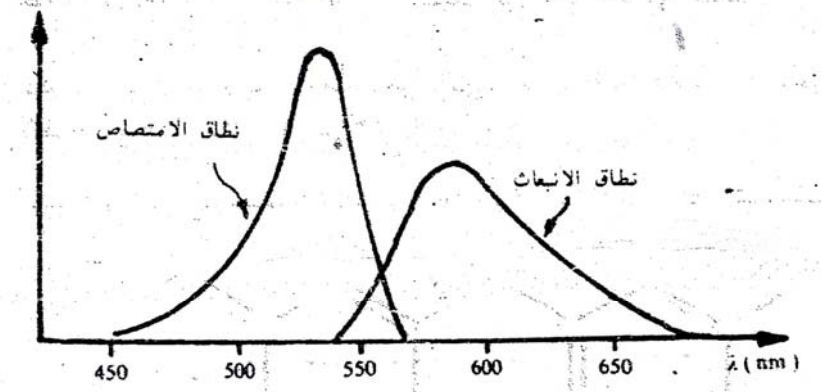
تكون جزيئة الصبغة العضوية كبيرة ومعقدة، تذوب في بعض المذيبات المعروفة ولها قدرة امتصاص عالية ولنطاق عريض من مدى الطيف الواقع في الجزء المرئي او البنفسجي من الضوء الساقط عليها ولهذا السبب تتم الاثارة في محاليل هذه المواد بواسطة الضخ البصري مثلا باستخدام مصابيح وميضية او باستخدام ليزر الحالة الصلبة او ليزر الغاز. اما الضوء المنبعث عن هذه المحاليل فيغطي مدى طيفي واسع نسبيا ويعتمد على المذيب وعلى تركيز الصبغة وكذلك على مقادير اخرى ويكون طيف الانبعاث مزاحا بعض الشئ عن طيف الامتصاص ونحو الطول الموجي الاطول، لاحظ الشكل (13-6).

تعتبر صبغة رودامين ($6G$) مادة نموذجية شائعة الاستعمال في ليزر السائل وتنتمي الى مجموعة الكسانثين. يبين الشكل (12-6) التركيب الجزيئي لهذه الصبغة وتتصف بوجود عدد من الخطوط المزدوجة وهو سر فعالية هذه المواد، يطلق على هذا الازدواج في الربط (الربط الثنائي الاقتراني). اما الشكل (13-6) فهو يوضح طيف الامتصاص والانبعاث لصبغة رودامين ($6G$) في محلول الايثانول. اما سبب هذا النطاق العريض للامتصاص والانبعاث لجزيئة الصبغة فيتبين من دراسة الشكل (14-6). يوضح هذا الشكل مخطط الطاقة لجزيئة صبغة عادية حيث يكون للجزيئة مجموعتان من حالات الطاقة، الحالات الاحادية ويشار اليها (S_0, S_1, S_2) والحالات الثلاثية ويشار اليها (T_1, T_2) فالاولى تحدث عندما يكون البرم الكلي للالكترونات المحرضة يساوي صفرا اما الحالات الثلاثية فتحدث عندما يكون البرم الكلي مساويا الى واحد. وكما تعلمت من دراستك للفيزياء الذرية بان الانتقال بين

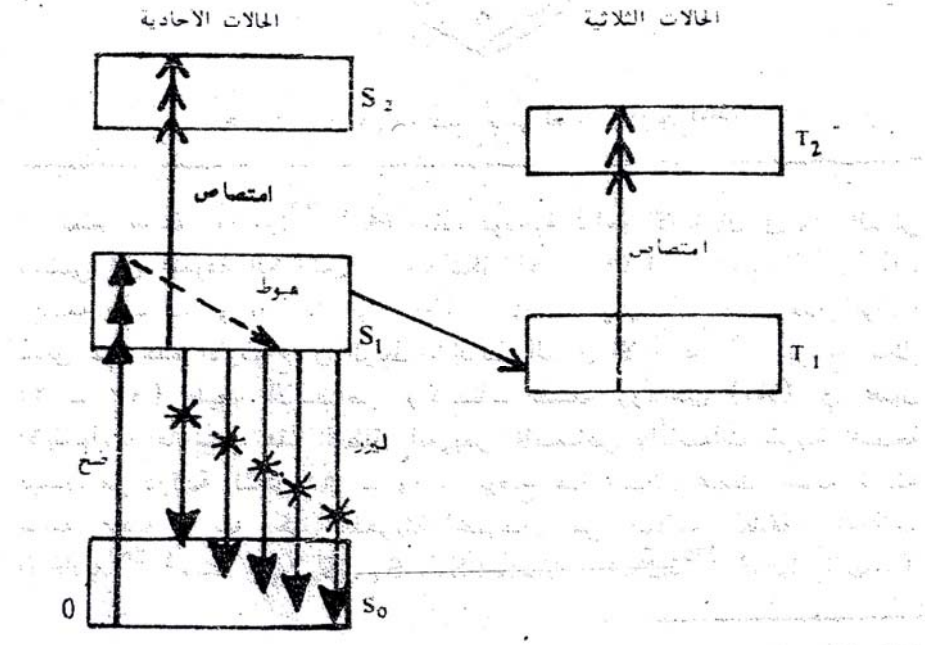
الحـالات الاحاديـة والثلاثيـة او العكـس ممنـوع حـسب قواعـد الانتقـاء لثنـائي القطـب الكهربـائي فاغلبيـة الانتقـالات المسموحة تتم بين الحالات الاحادية وايضا فيما بين الحالات الثلاثية.



شكل (٦ ـ ١٢) . التركيب الجزيئي لصبغة رودامين (6G) .



شكل (٦ ـ ١٣) : طيف الامتصاص والانبعاث المحفز لمحلول رودامين (6G) في الايثانول .

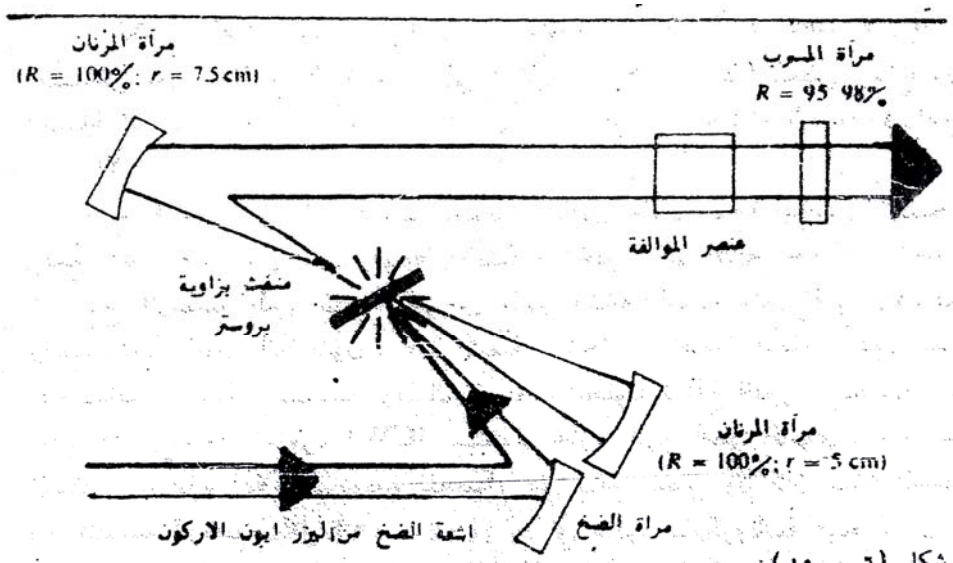


ان تهيج جزيئة الصبغة يتم بارتقاء الجزيئة من الحالة الارضية (S_0) الى الحالة المتهيجة (S_1) كما تحدث انتقالات سريعة غير مشعة في المستويات المختلفة للحالة (S_1) والى اوطا مستوى لها. اما انتقالات الليزر فتتم بين اوطا مستوى للحالة (S_1) والمستويات المتوسطة للحالة (S_0) ولما كان هناك مستويات طاقة دورانية وتذبذبية عديدة لكل من (S_1) و(S_0) لذا يكون لانتقالات الليزر نطاق عريض. ان الحالات الثلاثية للجزيئة لا تدخل بشكل مباشر في عمل الليزر ولكن تاثيرها على عمله سلبي فهناك احتمالية صغيرة لحدوث الانتقال الممنوع من (S_1) الى (T_1). ولما كان الانتقال من (T_1) الى (S_0) ممنوعا ايضا فان الجزيئات تزداد في المستوى (T_1). لكن الانتقال من (T_1) الى (T_2) مسموحا ويحدث بتردد مطابق تقريبا لتردد انبعاث الليزر وهذا غير مستحسن اذ حالما يتواجد جزء ملحوظ من الجزيئات التي تنتقل من المستوى (S_1) الى (T_1) فان الامتصاص من المستوى (T_1) الى (T_2) يكون شديدا ويعمل بسرعة على تقليص ربح الليزر وبامكانه ان يوقف عملية الانبعاث المحفز. لهذا السبب تعمل بعض انواع ليزر الصبغة بشكل نبضي وبنبضة امدها اقصر من الزمن اللازم لتاهيل المستوى (T_1) بمقدار ملحوظ. اضافة الى ذلك قد يحدث امتصاص بين الحالات الاحادية الاعلى مثلا من (S_1) الى (S_2) لبعض انواع ليزر الصبغة لذا يتم انتخاب الصبغة بحيث ان تردد هذه الانتقالات لا تقع في المدى ذات الاهمية.

تضخ جميع انواع ليزر الصبغة بصريا ويكون طول الموجة للمصدر المستخدم للضخ اقل بقليل من طول موجة الانبعاث المحفز. يتم الضخ تجاريا باستخدام المصابيح الوميضية وليزر غاز النتروجين وليزر الحالة الصلبة وليزر ايون الاركون وايضا ليزر ايون الكربتون. اما كيفية انتخاب المصدر فيعتمد على نطاق الامتصاص للصبغة المستخدمة وكذلك الصفات المطلوبة لنتاج الليزر. وللحصول على نتاج ذات موجة مستمرة (CW) يستخدم تجاريا ليزر الغاز الايوني. اما بقية المصادر المذكورة اعلاه فتستخدم للحصول على نتاج نبضي ولما كان بناء المستوى (T_1) للصبغة يتم في حدود مايكروثانية (على العكس من تلك المستخدمة في ضخ ليزر الحالة الصلبة حيث يكون زمن التفريغ في المصباح في حدود ملي ثانية)، لهذا تستخدم مصابيح وميضية سريعة خاصة.

تعتمد كفاءة ليزر الصبغة على نشاط المحلول الذي يتباطئ تدريجيا مع الزمن وكذلك بسبب ارتفاع درجة حرارته بسبب تشعيعه. لذا جعل محلول الصبغة يدور في حركة مستمرة بواسطة مضخة فيدفع المحلول من خلال منفث (خرطوم دقيق يتدفق منه السائل بجريان طبقي) حيث يضخ بصريا وبنفس الوقت يبرد المحلول العائد بعد ضخه بصريا بالتبادل الحراري مع الماء الجاري. بهذه الطريقة امكن تشغيل سائل الصبغة بموجة مستمرة (CW) وفي درجة حرارة الغرفة وبنتاج ذي قدرة تتراوح بين ($10mW - 1W$). اما نتاج الليزر الذي يكون نبضيا فقد تبلغ قدرة نبضته اكثر من ($1KW$) ويمكن تكبيرها الى ($100MW$)، كما يمكن توليد نبضات شديدة القصر بحدود ($1ps$).

لليزر الصبغة اهمية في كثير من التطبيقات بسبب امكانية مؤالفة طول الموجة لنتاجه وتتم عملية المؤالفة بوضع موشور في طريق اشعة الليزر او بتبديل احدى مرايا المرنان بمحزز عاكس الذي يعمل كمرآة وعنصر تفريق في آن واحد، بتدوير المحزز (او المرآة في حالة استخدام الموشور) يمكن انتقاء اي طول موجي واقع في نطاق انبعاث الصبغة- مثلا في حالة استخدام محلول صبغة رودامين ($6G$) يقع نطاق الانبعاث في مدى يتراوح بين ($550nm$) و($600nm$)، ان الشكل ادناه يوضح الترتيب المتبع في ليزر الصبغة.



شكل (٦ ــ ١٥):
شكل تخطيطي لليزر الصبغة الذي يجري محلوله خلال منشت (عمودي على سطح الورقة) ويتم موالفة ناتجه بوجود عنصر تفريق يوضع في طريقة اشعة الليزر وداخل المرنان ذاته.

ان اعلى قدرة يعطيها محلول صبغة ما تعتمد على المحلول ذاته وعلى طول الموجة المستخدمة للضخ كذلك على ترتيب المرايا وطلائها وترصيفها كما تضاف ايضا مواد نشطة مثلا ($Cyclo-Octatetraehe$) وتسمى مختصرا (COT) لتنشيط محلول الصبغة وبالتالي رفع كفاءته وزيادة قدرة نتاجه.

الليزر الكيمياوي

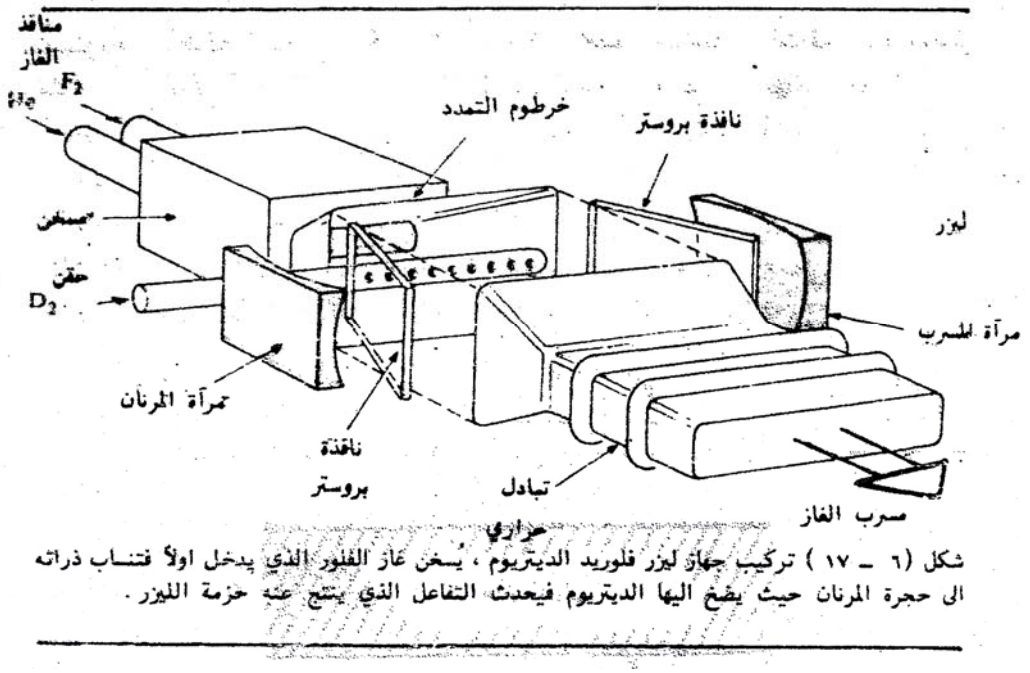
لا يوصف هذا النوع من الليزر حالة المادة الفعالة التي تعمل كوسط لليزر ولكنه يشير الى الطريقة التي تتم فيها عملية الضخ والتاهيل العكسي، فقد تكون المواد الكيمياوية المستخدمة للتفاعل بحالة صلبة او سائلة او بحالة غاز على الرغم من ان الغاز غالبا ما يستخدم في انواع هذا الليزر. ففي الليزر الكيمياوي تتكون جزيئة الوسط الفعال نتيجة التفاعل الكيمياوي بين المواد المستخدمة كذلك تؤدي الطاقة المتحررة عن التفاعل الى تهيج هذه الجزيئات مسببة الانبعاث المحفز بين مستوياتها التذبذبية، لذا يقع معظم الاشعاع في مدى الاشعة تحت الحمراء، اي بين ($1-10\mu m$). ان اهمية هذا الليزر تقع في ان تشغيله لا يحتاج الى دوائر الكترونية معقدة ولا الى مصادر خارجية لضخ الطاقة باستمرار كتلك المستخدمة في انواع الليزر الانفة الذكر. كما يتوقع ان تؤدي الطاقة العالية الناتجة عن التفاعل الكيمياوي لوحدة الحجم والكتلة الى نتاج ليزر ذو قدرة عالية. ان الليزر الكيمياوي يمكن ان ينتج نبضات ليزر بقدرة اعلى مما تنتجه الانواع الاخرى. يمكن تمثيل التفاعل الكيمياوي المستخدم في هذا النوع من الليزر على النحو التالي:

$$A + BC \rightarrow AB + C + \text{طاقة}$$

ان الجزيئة (AB) الناتجة عن التفاعل تمثل جزيئة الوسط الفعال لليزر كما ان الطاقة المتحررة من التفاعل تعمل على تهيج هذه الجزيئات. طبق هذا التفاعل على مادتي التفاعل الهيدروجين او الديتريوم واحد الهالوجينات ودرس على نطاق واسع لغرض استخدامه في الليزر الكيمياوي، من انواع هذا الليزر ليزر فلوريد الهيدروجين (HF) وليزر كلوريد الهيدروجين (HCl) وليزر بروميد الهيدروجين (HBr) وكذلك ليزر فلوريد الديتريوم (DF)، وللاخير يكون التفاعل:

$$F + D_2 \rightarrow DF^* + D$$

كما يبدو ان الحاجة تكمن الى استخدام مصدر للطاقة لبدء التفاعل الذي يحدث بعد تحرر ذرات المكونات الاصلية للتفاعل مثلا ذرة فلور او ذرة هيدروجين. اما تركيب الجهاز فيعتمد على نوع التفاعل ومواده الكيمياوية والشكل ادناه يبين التركيب المستخدم لليزر فلوريد الديتريوم، حيث يملا الجهاز اولا بغاز نادر مثلا غاز الهيليوم او غاز النتروجين ليعمل كوسط ناقل لمواد التفاعل ولمخلفاتها اذ يجري باستمرار. ثم يضاف غاز التفاعل الاول، غاز الفلور مثلا ثم يحقن الديتريوم خلال انبوب ذات خراطيم متعددة ويحدث التفاعل بين مرآتي المرنان حيث تنبعث حزمة الليزر باتجاه عمودي على اتجاه جريان مواد التفاعل حيث تطرح مخلفات التفاعل خارجا. في الوقت الذي لا يحتاج فيه الليزر الكيمياوي الى طاقة ضخ خارجية مستمرة الا انه يحتاج بشكل مستمر ضخ المواد اللازمة للتفاعل كما ان بعض المواد كالفلور مثلا فعالة وتسبب الصدأ والتآكل. وان استخدام هذا النوع من الليزر غالبا ما يقع للاغراض العكسرية.



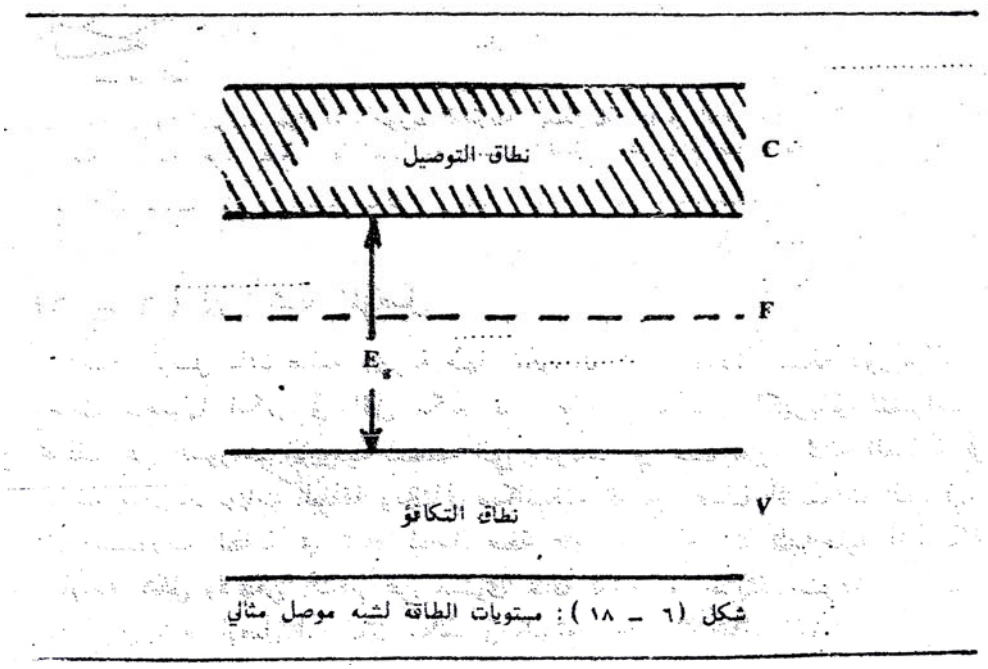
شكل (٦ ـ ١٧) تركيب جهاز ليزر فلوريد الديتريوم ، يُسخن غاز الفلور الذي يدخل اولاً فتنساب ذراته الى حجرة المرنان حيث يضخ اليها الديتريوم فيحدث التفاعل الذي ينتج عنه حزمة الليزر .

ليزر شبه الموصل

شبه الموصل مادة صلبة بلورية فيها تشكل الذرات المفردة شبيكة دورية، معامل توصيلها الكهربائي اقل بكثير من معامل التوصيل الكهربائي للفلزات. تختلف عن البورات الايونية الصلبة التي ذكرناها في بحث ليزر الحالة الصلبة في طريقة تمثيل مستويات الطاقة وبالتالي ميكانيكية الضخ وعملية الانبعاث الضوئي. تمثل مستويات الطاقة في شبه الموصل صفة عامة من الصفات الداخلية للشبيكة البلورية ككل ولا يمكن التكلم عن مستوى طاقة لذرة او جزيئة منفردة او ايون منفرد في شبه الموصل او ايون مطعم في بلورته. هذا بالاضافة الى ان ليزر شبه الموصل يختلف عن ليزر الحالة الصلبة في اغلب الصفات الفيزيائية والهندسية وابرزها الاختلاف في الحجم، فلا يتجاوز اكبر بعد في ليزر شبه الموصل عن ($1mm$) وكذلك ان الخصائص الفيزيائية لشبه الموصل ذات العلاقة بعمل الليزر والتي تتغير مع الظروف الخارجية كالضغط ودرجة الحرارة تختلف عن تلك الخصائص وظروف تغيرها للبلورات الايونية او الزجاج في ليزر الحالة الصلبة، لذا غدى موضوع فيزياء شبه الموصل حقلا خاصا قائما بذاته.

مستويات الطاقة: يوضح الشكل ادناه مخطط مستويات الطاقة لشبه موصل مثالي (بلورة نقية) حيث يتميز بوجود نطاقين عريضين للطاقة مفصولين عن بعضهما بنطاق طاقة محرم (فجوة) عرضه (E_g).يطلق على هذين النطاقين بنطاق التكافؤ (V) ونطاق التوصيل (C)، يتالف كل منهما من عدد كثيف من حالات الطاقة ولا يعبر عن احتمالية تواجد الكترون في مستوى طاقة ما (E) في حالة التوازن حسب احصاء ماكسويل- بولتزمان بل يعطى بدلالة توزيع فيرمي- ديراك وبالدالة $f(E)$ التي تعطى بالمعادلة التالية:

$$f(E)=\frac{1}{\left(1+e^{(E-F)/KT}\right)} \quad .....(1)$$



شكل (٦ ـ ١٨) : مستويات الطاقة لشبه موصل مثالي

تمثل (T) درجة الحرارة المطلقة و(F) طاقة ما يسمى بمستوى فيرمي ويقع ضمن نطاق الفجوة، كما ان هذا المستوى يتميز بالاعتبارات التالية: عند الصفر المطلق، ($T=0$) ولقيم ($F < E$) اي لنطاق التوصيل تكون $f(E)=0$. ولقيم ($F > E$) تكون $f(E)=1$ ، اي ان هذا المستوى (F) المتمثل بالشكل اعلاه يمثل الحد بين مستويات طاقة فارغة تماما ومستويات طاقة مملوءة تماما في درجة الصفر المطلق، فنطاق التوصيل فارغ من الالكترونات تماما ونطاق التكافؤ مملوء بها تماما وفي هذه الدرجة يعمل شبه الموصل كعازل كهربائي.

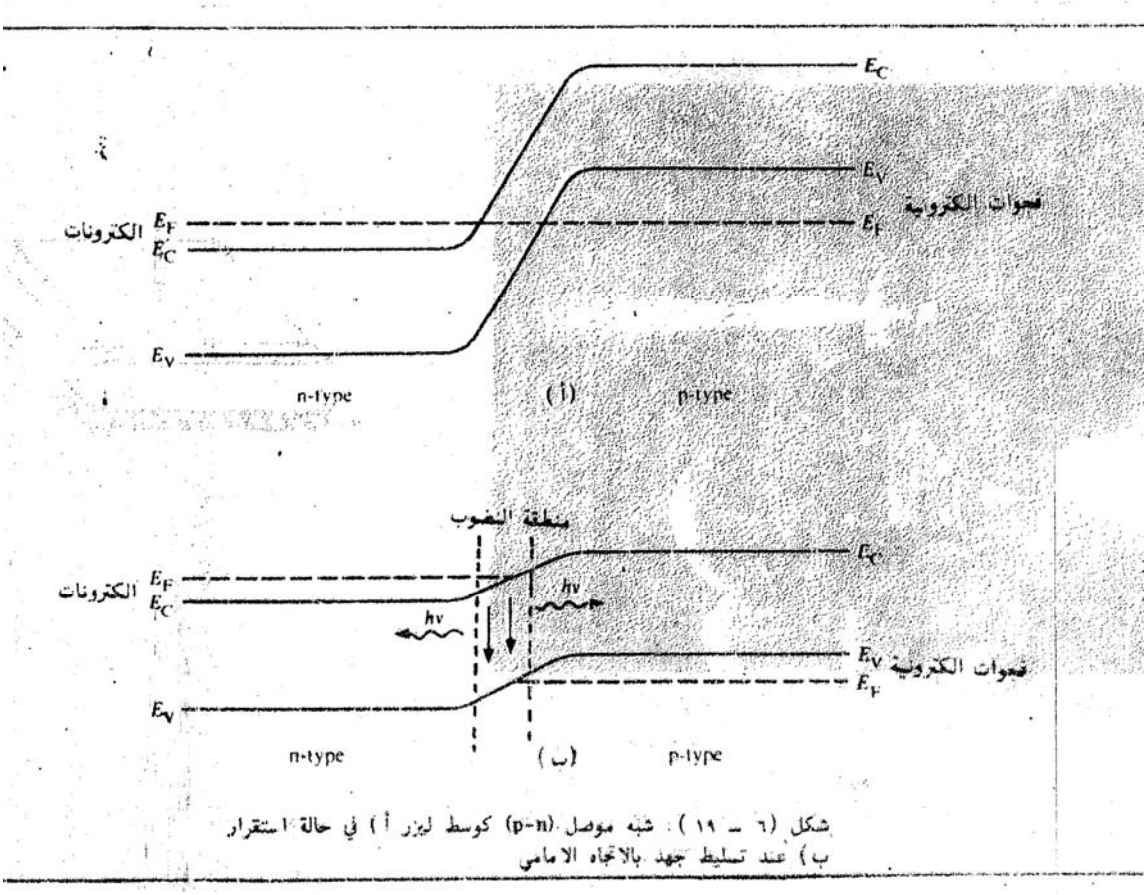
في درجة حرارة اعلى من الصفر المطلق ($T > 0$) يتواجد بعض الالكترونات في نطاق التوصيل مخلفة ورائها فجوات الكترونية في نطاق التكافؤ وبناء على ذلك يصبح بالامكان سريان تيار كهربائي بين النطاقين.

ان المخطط البسيط الآنف الذكر يصف مستويات الطاقة لبلورة نقية مثالية تماما. اما مخطط الطاقة لبلورة حقيقية فيحتمل ان يتضمن مستويات طاقة اضافية نتيجة لوجود العيوب البلورية كالشوائب والفجوات والانفكاكات. ان وجود الشوائب في البلورة يعمل على تحديد عدد الجسيمات التي تعمل كناقلات للتيار (الالكترونات والفجوات الالكترونية) ولهذا تمثل اهمية بالغة في عملية التاهيل العكسي وبالتالي الانبعاث المحفز وعلى العموم يمكن تصنيف الشوائب الى الانواع التالية: الشوائب المانحة وتقع مستويات الطاقة لها عموما قرب نطاق التوصيل والشوائب القابلة وتقع مستويات الطاقة لها عموما قرب نطاق التكافؤ واخيرا الشوائب التي تقع مستويات الطاقة لها في عمق نطاق الفجوة

والنوعن الاولان هما من الاهمية حيث يتم زرع كليهما عمدا في البلورة لانتاج بلورة نوع سالب (*نوع – n*) او بلورة نوع موجب (*نوع – p*) من اشباه الموصلات. في كثير من التطبيقات يتم معالجة شبه الموصل بشوائب من كلا النوعين حيث تنتشر الذرات المانحة في احد جزئي البلورة وتنتشر القابلة منها في الجزء الاخر وتدعى منطقة الالتحام بينهما بالملتقى *p-n*.

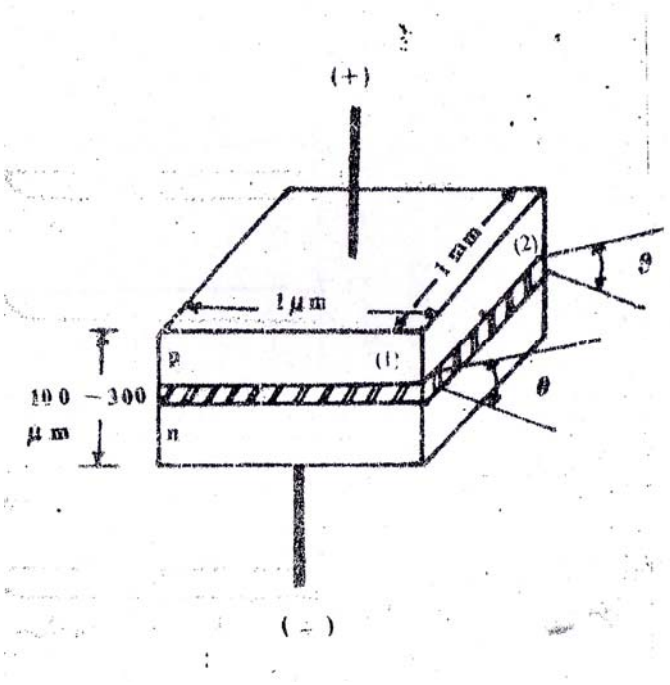
التاهيل العكسي والضخ الكهربائي: لغرض تحقيق التاهيل العكسي يجب اذن ضخ عدد من الالكترونات الى منطقة التوصيل وزيادة الفجوات الالكترونية في منطقة التكافؤ. فعند تسليط جهد كهربائي بالاتجاه الامامي للملتقى، اي بربط النوع الموجب (*p*) لشبه الموصل الى القطب الموجب لمصدر كهربائي وربط النوع السالب (*n*) الى القطب السالب لمصدر الجهد تتحرك حاملات التيار نحو الملتقى ويلتحمان عنده وينتج عن ذلك انبعاث له صفات الاشعاع المحفز وللمقارنة مع عمل انواع الليزر السابقة فان شبه الموصل الذي يتم تشغيله بجهد امامي لا يكون في حالة توازن حراري وذلك لسريان تيار كبير خلال الملتقى مما يجعل منطقة الملتقى بعيدة عن حالة التوازن وفي هذه الحالة لا يمكن تطبيق مبدا توزيع فيرمي- ديراك على هذه المنطقة.

ان الاستمرار في زيادة عدد الشوائب المانحة في شبه الموصل السالب ولتراكيز اعلى من مقدار معين مثلا ($10^{16}\,atom/cm^3$) او اكثر حيث تعمل الذرات المانحة وبصورة جماعية على تحطيم البناء الكلي لمستويات الطاقة في شبه الموصل مسببة زحزحة مستوى فيرمي الى الاعلى وعند الاستمرار في زيادة التركيز يخترق مستوى فيرمي نطاق التوصيل ايضا، راجع الطرف الايسر من الشكل ادناه. اما زيادة تركيز الذرات القابلة فتعمل على خفض مستوى فيرمي الى مكان قد يصل تحت الحافة العليا لنطاق التكافؤ وهذا مبين في الطرف الايمن من الشكل نفسه. وعند اختراق مستوى فيرمي لنطاق التكافؤ او التوصيل يطلق على شبه الموصل في هذه الحالة بانه منحلا.



شكل (٦ ـ ١٩) : شبه موصل (p-n) كوسط ليزر أ) في حالة استقرار
ب) عند تسليط جهد بالاتجاه الامامي

نستنتج مما سبق ولتحقيق التاهيل العكسي وتنفيذ الضخ الكهربائي يتم باعداد شبه الموصل ليعمل كوسط فعال لليزر، ويتم ذلك باعداد صمام شبه الموصل بملتقى *p-n*، فيه النوع الموجب (p) منحلا والنوع السالب (n) منحلا، اي كل منهما مطعما بالشوائب المناظرة وبتركيز اكبر من ($10^{18} atom/cm^3$)، والشكل ادناه يبين صماما فيه النوعان من مادة واحدة ملتصقتان لتكونا الملتقى وفي هذه الشكل او الحالة يكون الملتقى متجانس.



الامتصاص والانبعاث المحفز في شبه الموصل: عند ربط الصمام بفرق جهد امامي (V) يساوي تقريبا (E_g / e) فان المجال الكهربائي، كما مبين في شكل (19-6) سيعمل على ازاحة موضع مستوى فيرمي في كل نوعي البلورة بمقدار يعطى بالعلاقة:

$$\Delta F = eV \quad .....(2)$$

كما يسبب استخدام الجهد الامامي في حقن حاملات التيار (الالكترونات في منطقة التوصيل في *نوع- n* والفجوات الالكترونية في منطقة التكافؤ في *النوع- p*) وباتجاهين متعاكسين نحو منطقة الملتقى وبهذا يتم التحامهما في طبقة ضيقة تدعى (بطبقة النضوب)، تنبعث عنها الاشعة المطلوبة.

ان مستويات الطاقة والمبينة في النوعين (n, p) والتي هي ليست في حالة توازن حراري مع بعضها البعض يمكن ان تفسر كالتالي: يحدث في كل نطاق وبصورة سريعة وضع التوازن الحراري النسبي قيمكن عندئذ وصف التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة في كل نطاق بحالة يطلق عليها (شبه مستويات فيرمي) ويعبر عنها بدالة فيرمي- ديراك وكالاتي:

$$f(E)_V = \left(1 + e^{(E-F_V)/KT}\right)^{-1}$$
$$f(E)_C = \left(1 + e^{(E-F_C)/KT}\right)^{-1} \quad .....(3)$$

اما الملتقى وكما اشرنا سابقا سيكون في هذه الحالة بعيدا عن حالة التوازن ولا يمكن معاملته كمستوى فيرمي للانتقال المحفز.

عند التحام الكترون مع فجوة موجبة فان الطاقة الكلية تتحر كفوتون يعطى تردده وفق معادلة بلانك، اي ان:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad .....(4)$$

وتمثل (E_1) و(E_2) طاقة الالكترون في الحالة الابتدائية والنهائية على التوالي، كما يمكن للالكترون وهو في الحالة الابتدائية ان يمتص الفوتون ويرتقي الى نطاق التوصيل وبما ان القوانين العامة للانبعاث والامتصاص للاشعاع الكهرومغناطيسي يصح تطبيقها للاشعة المنبعثة عن الالتحام في ملتقى شبه الموصل فانه يتوقع حدوث الانبعاث المحفز كلما تحرر فوتون.

والان تحت اي ظرف يزيد معدل الانبعاث على معدل الامتصاص في منطقة الملتقى بربح يستطيع تجاوز العتبة؟

يعتمد معدل الامتصاص والانبعاث على عدد الفوتونات المتواجدة في المرنان على معامل اينشتاين-B للانتقال، كذلك يتناسب معدل الانبعاث المحفز مع حاصل ضرب احتمالية تواجد الالكترون في المستوى الاعلى واحتمالية عدم تواجده في المستوى الاوطا، في حين يتناسب معدل الامتصاص مع احتمالية تواجد الالكترون في المستوى الاوطا واحتمالية عدم تواجده في المستوى الاعلى، لذا وللحصول على انبعاث محفز يجب ان يزيد المعدل الزمني للانبعاث المحفز على نظيره للامتصاص، اي ان يكون:

$$f_C(1-f_V) > f_V(1-f_C) \quad .....(5)$$

وهذا يتطلب كون $f_C > f_V$ ومن المعادلة (4) ينتج:

$$F_C-F_V > E_2-E_1=h\nu \quad .....(6)$$

وبما ان ($E_2 - E_1$) ليس اقل من (E_g)، لذا يكون:

$$F_C-F_V > E_g \quad .....(7)$$

وتكافئ هذه المتباينة شرط التاهيل العكسي في الانواع الاخرى من الليزر والتي سبق ان اشرنا اليها.

وصف الجهاز: يمثل الشكل السابق نموذجا لليزر شبه الموصل ذو الملتقى p-n تشكل فيه المنطقة المظللة طبقة النضوب. ان اكثر الاوساط الشائعة الاستعمال لمثل هذا النوع هو مادة زرنيخيد الكاليوم ($GaAs$)، وعموما يكون الصمام صغير الحجم اذ يكون سمك المادة الفعالة في حدود ($1\mu m$) وهي اكثر سمكا من طبقة النضوب التي تكون صغيرة جدا في حدود ($0.1\mu m$)، اما ابعاد الصمام الاخرى فلا يتجاوز الطول والعرض عن ($1mm$) اما السمك فلا يتجاوز ($0.5mm$). تقطع البلورة بحيث يكون سطحيها متوازيان وسطوحها الاخرى عمودية على بعضها البعض وعلى سطح الملتقى، يصقل زوجا متقابلا من سطحيها الجانبيين (السطح 2) والذي يقابله ويترك الزوج الاخر خشنا (السطح 1) والذي يقابله لتقليص الانعكاسات البراقة غير المرغوب فيها ولا يحتاج الوجهان الصقيلان الى الاكساء بطبقة عاكسة ليعملا مرآتي فابري- بيرو لان معامل انكسار شبه الموصل عالي، فمثلا يكون لبلورة ($GaAs$) حوالي (3.6) وبهذا تكون انعكاسية السطوح النهائية (شبه موصل- هواء) حوالي (35%)، تثبت قاعدة الثنائي هذه على قاعدة معدنية صلبة لتشكل ايضا قطبا كهربائيا.

بسبب الحيود فان حزمة الليزر تحتل منطقة الملتقى ويكون للشعاع الخارج انفراج كبير نسبيا (θ) وبحدود بضع درجات كذلك تكون كثافة تيار العتبة لليزر شبه الموصل ذو الملتقى المتجانس عالية نسبيا في درجة حرارة الغرفة فمثلا تكون لصمام ($GaAs$) حوالي ($10^5 A/cm^3$). تقل هذه الكثافة وبسرعة بانخفاض ظرف درجة الحرارة هذا بسبب كون المقدار $f_C(1-f_V)$ يزداد مع نقصان درجة الحرارة في حين يقل المقدار $f_V(1-f_C)$ مع نقصانها وبهذا يزداد الكسب كلما انخفضت درجة الحرارة وكنتيجة لهذا فان ليزر شبه الموصل ذو الملتقى المتجانس لا يعمل بشكل مستمر (CW) الا في درجات الحرارة الواطئة (عند درجة حرارة الهيدروجين السائل لشبه الموصل $GaAs$). تم التغلب على هذه الصعوبة باستخدام تصميم يتضمن زوجا من الملتقى غير المتجانس حيث امكن تشغيل ليزر هذا التصميم بشكل مستمر وفي درجة الحرارة الغرفة وايضا بكثافة تيار للعتبة اقل منه في حالة التشغيل النبضي. للتشغيل النبضي لليزر شبه الموصل يسلط مجال كهربائي عبر الوسط على شكل نبضة بطاقة تقارب طاقة الفجوة ويزداد التيار عبر الملتقى بشكل غير خطي مع الجهد المسلط حتى يقترب هذا حوالي ($1.5V$) لثنائي ($GaAs$) من طاقة الفجوة حيث تلاحظ الاشعة المنبعثة من جميع الاتجاهات ومجمله طيف ذو نطاق عريض فلشبه الموصل ($GaAs$) تكون اشعة تحت الحمراء بنطاق ($840nm - 830$) وتتغير الاشعة المنبعثة بتغير تيار الملتقى كما تعتمد طول الموجة المنبعثة على تركيز الشوائب وعلى التيار الكهربائي.

يمكن الحصول على قدرة قصوى تقدر بمئات الواط من صمام ($GaAs$) مثلا عندما يضخ بشكل نبضي وفي درجات حرارة واطئة حوالي ($77K$) ولا تتجاوز القيمة القصوى عن ($15W$) في درجة حرارة الغرفة اما تشغيله بشكل مستمر فيعطي قدرة بين ($10mW - 5$) في الدرجة نفسها.

يغطي نتاج ليزر شبه الموصل مدى عريض من الطول الموجي الذي يتراوح بين ($30\mu m - 0.7$)، وكما ذكرنا بان اهم نموذج لهذا النوع من الليزر هو ليزر ($GaAs$)، كما ان كفاءته عالية نسبيا وبمعدل (10%)، لذا يعتبر ليزر شبه الموصل من انواع الليزر ذات الكفاءة العالية كذلك ان عرض نطاق تذبذب حزمته تقريبا ($10^{12} Hz$) لشبه الموصل ($GaAs$) يرشح تشغيله بالصيغة المقفلة، كما يعد ليزر شبه الموصل ($GaAs$) من اهم المصادر المستخدمة في الاتصالات البصرية التي تستخدم الالياف البصرية كوسك ناقل لها. كما ان عمر الصمام طويل ($10^6 h$) عند استخدام ليزر ($GaAs$) المزدوج- الملتقى غير المتجانس، كذلك يستخدم هذا النوع من الليزر في عدد من التطبيقات المهمة تلك التي تتطلب قدرة واطئة (كعمليات القراءة والمسح) ومصدرا ضوئيا باشعاع واقع في منطقة الاشعة تحت الحمراء.