الفصل الثامن

تذبذب الحالة المستقرة و تعديل خرج الليزر
Steady State Oscillation and Modifying the laser output

1-8 أنقلاب التعداد و شرط عتبة الضخ Population inversion and Pumping Threshold Condition

من معادلة لربح الإشارة الصغيرة في الفصل الرابع يمكن أن نستنتج أن أنقلاب التعداد اللازم لبلوغ العتبة الليزرية هو:

$$\gamma_0(\nu) = A_{21}\frac{\lambda^2}{8\pi}\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right)g(\nu)$$

$$\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right) = \frac{8\pi\,\gamma_0(\nu)}{A_{21}\lambda^2 g(\nu)} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

عند عتبة أنقلاب التعداد

$$\Delta N_{th} = \frac{8\pi\,\gamma_{th}(\nu)\tau_{21}}{\lambda^2 g(\nu)} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

لاحظ أن العتبة الليزرية عندما $g(\nu)$ يكون حدها الأقصى عند $\nu = \nu_0$ و هو المقابل لمركز عرض الخط الطبيعي

$$g(\nu_0) = \frac{1}{\Delta\nu} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

$$\Delta N_{th} = \frac{8\pi\,\gamma_{th}(\nu)\tau_{21}\Delta\nu}{\lambda^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

2-8 قدرة الضخ المطلوبة للوصول إلى شرط العتبة

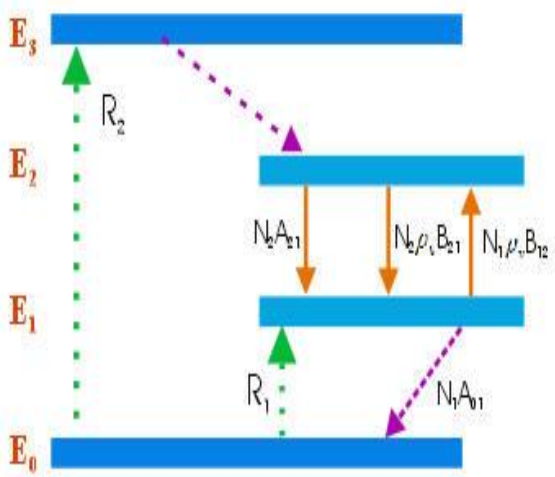
Pumping power required to reach threshold condition

للحصول على القدرة المطلوبة لمنظومة ليزر الاربعة مستويات للوصول إلى العتبة سوف نستخدم المعادلات المعدل.

أولا: نحن نفترض أن $E_1 >> KT$ لذا فأن التعداد الحراري (بدون عملية الضخ) من مستوى الطاقة 1 لا يكاد يذكر.

ثانيا : افترضنا أنه لا يتغير تعداد الحالة الأرضية خلال الفعل الليزري.

R_1 و R_2 هما معدلي الضخ حيث معادلة المعدل للتعداد تعبر عن التغيير في N_2 وN_1



شكل (42): لمنظومة ليزر الاربعة مستويات

$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - N_2A_{21} - \rho_\nu B_{21}(N_2 - N_1) \qquad \ldots\ldots\ldots (5)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = R_1 + \rho_\nu B_{21}(N_2 - N_1) + N_2A_{21} - N_1A_{10} \qquad \ldots (6)$$

مع شرط الحالة المستقرة $dN_2/dt = dN_1/dt = 0$ (افترضنا أن $g_1=g_2$ و $R_1=0$)

من خلال حل معادلتي المعدل (5) و (6) أعلاه نحصل

$$N_1 = \frac{R_2}{A_{21}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

$$N_2 = R_2 \frac{\left[1 + \frac{\rho_\nu B_{21}}{A_{10}}\right]}{A_{21} + \rho_\nu B_{21}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

منها نجد

$$N_2 - N_1 = R_2 \frac{\left[1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}\right]}{A_{21} + \rho_\nu B_{21}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

لأنقلاب التعداد $A_{21}<A_{10}$ أو $T_{21}>T_{10}$ (المستوى الليزري العلوي لديه زمن عمر الأنبعاث التلقائي (T_{21}) أطول من المستوى السفلي (T_{10}).
في معظم الليزر $T_{21}>>T_{10}$ و لذلك يكون 0 ⍰ ($1-A_{21}/A_{10}$)

- عند العتبة At threshold

في العتبة كثافة الأشعاع ρ_ν صغيرة جدا و يمكننا أن نفترض أن ($\rho_\nu=0$)

$$(N_2 - N_1)_{th} = \Delta N_{th} = R_{th} \frac{\left[1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}\right]}{A_{21}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

- في الحالة المستقرة In steady state

في وضع الحالة المستقرة يصبح الربح مساويا للخسائر عند ذلك يمكن أن نكتب

$$(N_2 - N_1)_{ss} = (N_2 - N_1)_{th} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

$$\Delta N_{th} = R \frac{1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}}{A_{21} + \rho_\nu B_{21}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

من المعادلتين (10) و (12) نحصل على

$$\frac{R_{th}}{A_{21}} = \frac{R}{A_{21} + \rho_\nu B_{21}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (13)$$

و لذلك فأن كثافة التعداد ρ_ν تصبح

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}}{B_{21}}\left(\frac{R}{R_{th}} - 1\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (14)$$

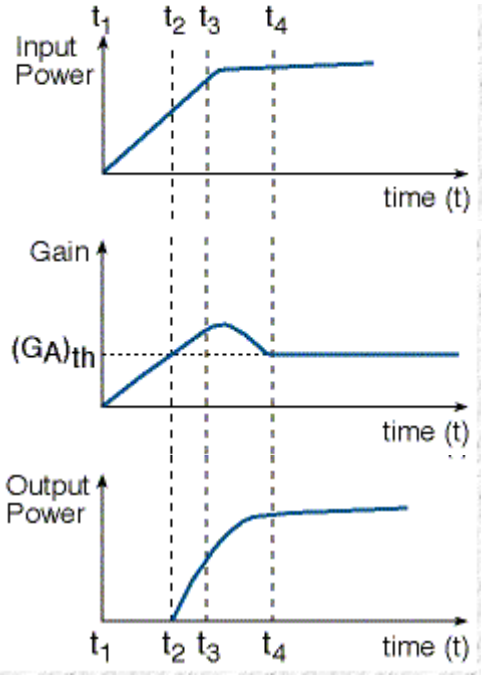
و هذا يعني أن قدرة الخرج تتناسب طرديا مع قدرة الضخ داخل تجويف الليزر. يوضح الشكل (43) التالي علاقة كلا من قدرة الضخ و الربح و قدرة الليزر كدالة في الزمن

في وقت t_1 يتم تنشيط آلية الإثارة. ونتيجة لذلك، فإن ربح الوسط الفعال و ربح الحلقة سيزيد.

في وقت t_2 ربح الوسط الفعال مساو لربح العتبة، و ربح رحلة الذهاب و الأياب يساوي 1. يبدأ فعل الليزر، و قدرة الخرج بداية الليزر ستزيد.

في وقت t_3 قدرة الدخل تصل إلى حالة المستقرة (قدرة دخل ثابتة). ربح الوسط الفعال أعلى قليلا من العتبة ، ربح رحلة ذهاب وإياب أعلى قليلا من "1".

قدرة الخرج الليزر في ارتفاع مستمر حتى t_4 ، عندما تصل قيمته الحالة مستقرة. فأن ربح الوسط الفعال هو مساو ربح العتبة، و الربح يساوي "1"



شكل (43): علاقة الضخ و الربح و قدرة الليزر كدالة في الزمن

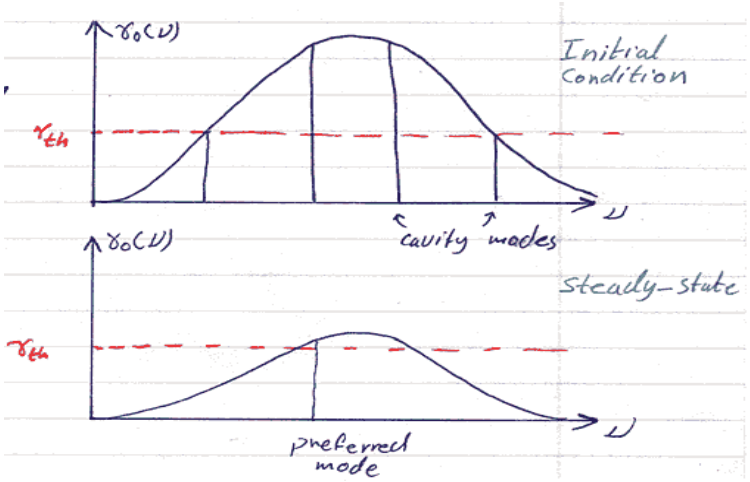
8-3 أشباع الربح في االليزر المتجانس Gain Saturation in Homogeneously Laser

عندما يعمل الليزر بالنمط المستمر (ليزر CW) و هو الفعل الليزري عند الحالة المستقرة، حيث الربح (G) يكون دائما "1". في هذه الحالة، فإن قيمة الربح لكل نمط ليزر طولي ينخفض من قيمة

ربح الإشارة الصغيرة الى ربح العتبة G_{th} ، و الذي يساوي ربح الأشباع. زيادة الضخ يسبب زيادة في قدرة خرج الليزر و النظام سيستقر على قدرة أعلى عندما صافي الربح سيكون مساويا لربح العتبة.

ربح الوسط الفعال يعتمد على أنقلاب التعداد، و العرض لشكل خط الليزر. و هذا الربح متأثر بعمل الليزر نفسه، حيث يغير فعل الليزر شروط انقلاب التعداد. الانبعاث المحفز سيقلل من تعداد مستوى الليزر العلوي، و يقلل من أنقلاب التعداد. وبالتالي، يتم تقليل الربح حتى يزيد الضخ من تعداد المستوى العلوي مرة أخرى.

في الشكل (44) الموضح أدناه نلاحظ ثلاثة أنماط اهتزازية تحت منحنى الحصيلة يتحقق عندها شرط أن الربح اكبر من أو يساوي الخسارة. وحيث أن شعاع الليزر يتولد نتيجة لعملية الانبعاث المحفز Stimulated Emission , والتي بدورها تقلل من فارق التعداد وهذا سيؤدي بمنحنى الربح إلى النقصان حتى يصل إلى حد الحالة الحرجة Threshold Condition. أما بالنسبة للأنماط الاهتزازية الثلاثة فهي لكل منها تردد خاص وبنقصان منحنى الربح يختل شرط الحصول على ليزر لبعض منها حتى لا يبقى إلا نمط اهتزازي واحد Single Mode Laser.



شكل (44): علاقة الضخ و الربح و قدرة الليزر كدالة في الزمن

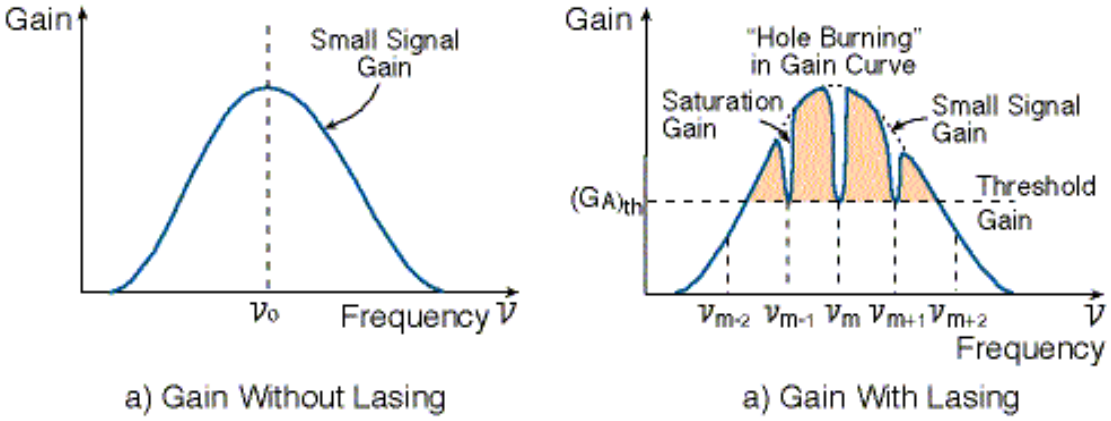
ملاحظة:

1. ربح الأشباع للوسط الفعال يساوي ربح العتبة G_{th}.
2. ليزر الأتساع المتجانس ينبغي أن يعمل تلقائيا في نمط واحد مرة واحدة يتم الوصول إلى حالة مستقرة.

8-4 أشباع الربح في الليزر غير المتجانس

Gain saturation in non-homogeneously laser

في حالة الليزر ذو الاتساع غير المتجانس فإن الامر يكون مختلف تماماً لأنه يمكن التمييز بين مجموعة من الذرات ومجموعة اخرى من ناحية التردد المنبعث تحت منحنى الربح، وعليه لإن انتاج الليزر يؤدي إلى نقصان الربح فقط عند الترددات التي يحدث عندها الليزر فقط أي عند الانماط الاهتزازية التي يتحقق عندها شرط الربح اكبر من الخسارة. وهذا سوف يحدث ما يسمى Hole Burning كما هو في الشكل (45) ادناه.



شكل (45): (a) الربح من غير الفعل الليزري (b) الربح بوجود الفعل الليزري

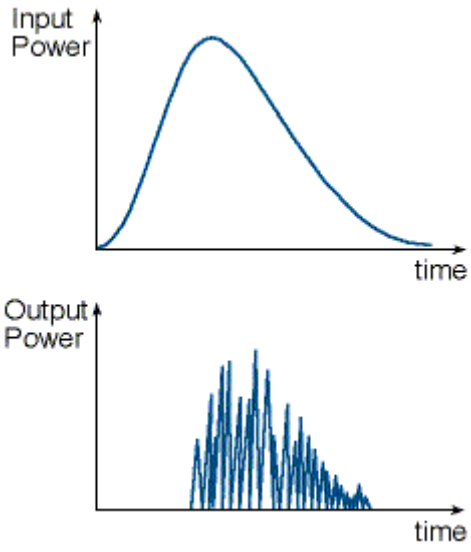
في قيمة ربح الاشباع أنخفاظات لكل نمط ليزري، من ربح الإشارة الصغيرة إلى زيادة ربح العتبة G_{th} و تسمى هذه العملية " حرق حفرة " "Hole Burning" في منحنى الربح.

8-5 الليزر النبضي Pulsed Laser

يتم ضخ الليزر النبضي بكثافة عالية لفترة قصيرة من الزمن. ونتيجة لذلك، فإن ربح الوسط الفعال ، و ربح التجويف يصل أعلى بكثير من ليزر الموجة المستمرة ، وبالتالي فإن قدرة الخرج تكون أعلى.

- شكل النبض خرج ليزر الياقوت النابضي Pulse Shape Out of a Pulsed Ruby Laser

يصف الشكل (46) التالي شكل نبضة واحدة من ليزر الياقوت، بالمقارنة مع نبضة الضخ من مصباح ومضي.

نعلم ان الضوء الصادر من المصباح الومضي هنا يستخدم كوسيلة لأحداث أنقلاب التعداد في بلورة الياقوت والشكل المقابل يوضح العلاقة بين شدة إضاءة الفلاش مع الزمن.	
بالمقابل نلاحظ في الشكل الخاص بتغير شدة الليزر مع الزمن أن الشدة تتغير بين قيمة عظمى وصفر في خلال فترة بقاء ضوء المصباح الومضي وهذا ما يعرف بظاهرة التنبيض Case Spiking . لاحظ هنا ان الليزر يبدأ بعدة فترة زمنية محددة من بدأ المصباح الومضي وهذه الفترة الزمنية لازمة للوسط ليصل إلى حالة الربح أكبر من الخسارة.	

شكل (46): مقارنة نبضة واحدة من ليزر الياقوت مع نبض الضخ من مصباح الومضي

طول نبضة الليزر الخارجة حوالي 1 ميلي ثانية ، وتتألف من مئات أو آلاف من النبضات الصغيرة. كل من النبضات الصغيرة تدعى نتوء spike ، و الآخيرة هي بحدود ميكروثانية. تظهر الطفرات عشوائيا في الزمن، وتختلف عن بعضها البعض في طول و السعة.

6-8 شرح لحالة النتوءات Explanation of the Case Spiking

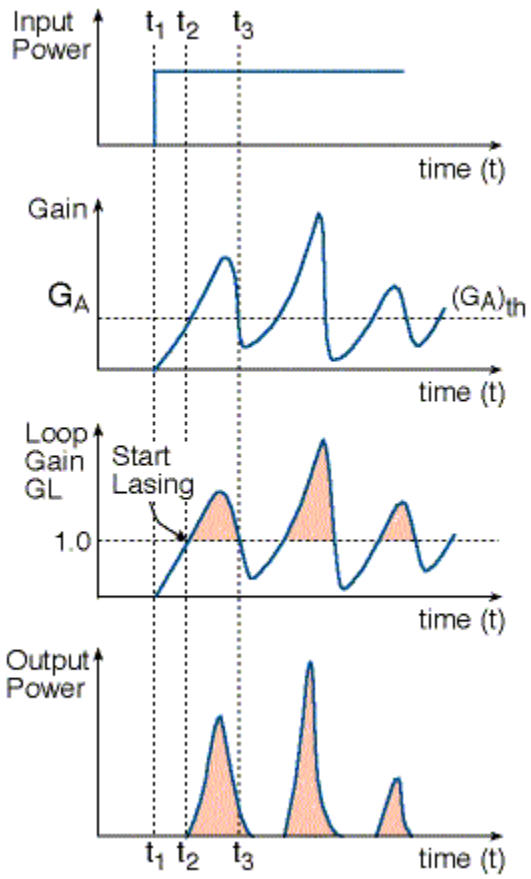
عرض الخط لشعاع ليزرات الحالة الصلبة أكثر من (3×10^{10} Hz) 30 GHz. كل خط لديه الكثير من الأنماط الطولية في ذلك العرض.

لكل من هذه الأنماط الحالات في الشكل (47) التالي:

بدءا من الوقت t_1 ، فإن زيادة السريعة في ربح الوسط الفعال و ربح التجويف نتيجة الضخ القوي المستمر.

في الوقت t_2 ، يصل ربح الوسط الفعال إلى قيمة العتبة، و ربح التجويف يصل إلى "1" - يبدأ الليزر. ربح الوسط الفعال و ربح الوسط الفعال يستمر في الارتفاع حيث قدرة الخرج لم تصل إلى قيمة الأشباع التي تتسبب في "حرق حفرة" في منحنى الربح.

حتى الوقت t_3 ، ارتفاع قيمة ربح الحلقة تسبب نبض حادة من أشعة الليزر. وهكذا، يهبط ربح الوسط الفعال أقل من قيمة العتبة. عندما ربح الحلقة أقل من "1"، يتوقف فعل الليزر، و تبدأ العملية برمتها مرة أخرى طالما يستمر الضخ



شكل (47): الربح و قدرة الخرج في ليزر الحالة الصلبة النبضي

يبدأ كل نمط ليزر طولي في وقت مختلف، مع فوتون مختلف. هناك منافسة بين الأنماط الطولية على القدرة الداخلة الى الوسط الفعال. و هكذا، تصبح الطبيعة العشوائية للطفرات: كل طفرة لديها ذروة قدرة خاصة بها و مدتها الخاصة.

7-8 تعديل خرج الليزر Modifying the laser output

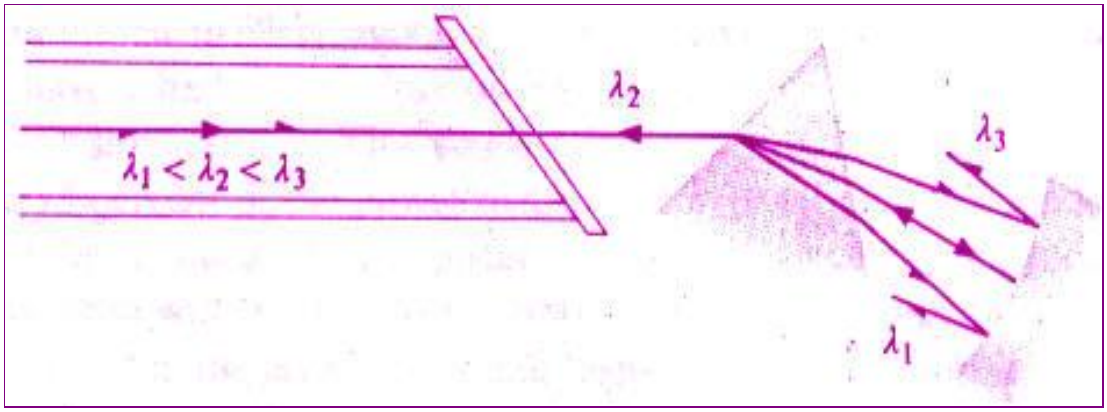
فيما سبق درسنا فكرة عمل الليزر والعوامل الأساسية التي بدونها لا يمكن الحصول على شعاع ليزر. سنقوم بالقاء الضوء على الطرق والأساليب المتبعة لتسخير شعاع الليزر للتطبيقات العملية. على سبيل المثال يستخدم الليزر لقطع المعادن واللحام وهذا يتطلب زيادة طاقة شعاع الليزر أو الحصول

على شعاع ليزر يعمل بنمط محوري واحد لتطبيقات الدراسات الطيفية أو الاتصالات. وهذا سيكون موضح من خلال العناوين الأربعة التالية:

- اختيار خطوط انبعاث الليزر Selection of the laser emission lines
- العمل بالنمط المنفرد Single-mode operation
- ضبط معامل النوعية Q-Switching
- قفل النمط Mode Locking

1-7-8 اختيار خطوط انبعاث الليزر Selection of the Laser Emission Lines

نعلم أن الليزر ينتج من انتقال الذرات المثارة من مستويات الطاقة الأعلى إلى مستويات الطاقة الأقل وذلك إذا تحققت الشروط المطلوبة ليكون الربح أكبر من الخسارة. وهذا قد يتحقق في المادة المنتجة لليزر لأكثر من تردد . هنا نحن لا نتحدث عن الأنماط المحورية تحت منحنى الربح ولكن المقصود طول موجة ضوء الليزر أو أكثر مختلفين ولكل منهما تردد خاص ومنحنى الربح. وكلا من هذه الأطوال الموجية سوف تكبر وتنتج ليزر عند أكثر من تردد في الوقت نفسه.



شكل (48): تكبير الطول الموجي λ_2 باستخدام الموشور

لغرض أختيار أحد الأطوال الموجية يتم استخدام موشور Prism بين المادة المنتجة لليزر والمرآة حيث أن لكل تردد زاوية انكسار خاصة حسب قانون سنيل Snell's Law وبضبط وضع الموشور بحيث يكون الطول الموجي المراد تكبيره للحصول على ليزر عندما يسقط بزاوية قائمة على المرآة وبالتالي

ينعكس على نفسه ليعود إلى المادة و يكبر، بينما الترددات الأخرى تنعكس خارج المادة المضخمة ولا تنتج ليزر .كما يمكن استخدام محزز الحيود Diffraction Grating أو مرشحات Filters .

2-7-8 العمل بالنمط - المنفرد Single-mode operation

يكون الضوء الناتج من ليزر يعمل عند نمط محوري أحادي اقرب ما يكون إلى المصدر الضوئي أحادي اللون. حيث أننا درسنا فيما مضى موضوع اتساع الخط الطيفي نتيجة لعوامل متعددة وبهذا فإن الضوء أحادي اللون يكون له اتساع محدود، وهذا الاتساع يحدد مدى دقة مصطلح أحادي اللون Monochromaticity. واقل اتساع يمكن الحصول عليه من ليزر يعمل بنمط منفرد Single mode operation.

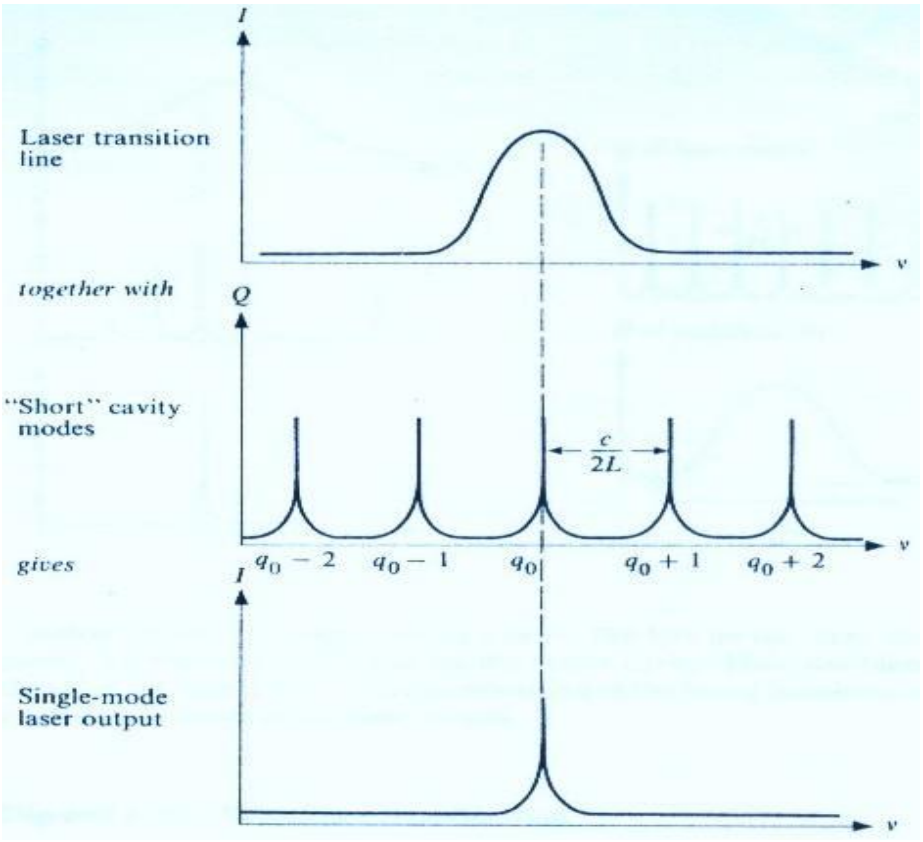
سؤال : كيف يمكن الحصول على ليزر النمط المنفرد Single mode laser ؟

تعتمد فكرة الحصول على ليزر يعمل بنمط محوري وحيد على زيادة المسافة بين الأنماط المحورية المتجاورة إلى مسافة تصل على الأقل مساوية لاتساع منحنى الحصيلة. وبهذا يكون النمط المحوري q_0 هو النمط المتحقق عنده شرط الربح أكبر من الخسارة بينما الأنماط الأخرى q_{0-1} أو q_{0+1} تقع خارج منحنى الربح كما يلاحظ في الشكل (49).

المسافة بين نمطين محوريين تعطى بالعلاقة c/2L وبهذا يعني انه كلما قل L طول المضخم كلما زادت المسافة بين النمطين المحوريين. فإذا ما صمم المضخم بحيث يكون طوله يحقق الشرط

$$\frac{c}{2L} \geq \Delta\nu$$

لهذه الطريقة اثر على تقليل مادة المضخم وبالتالي طاقة الليزر ولكن تستخدم في تطبيقات تكون بحاجة إلى اقرب ما يكون للتردد أحادي اللون.



شكل (49): أختيار العمل بالنمط المنفرد

3-7-8 ضبط معامل النوعية Q-Switching

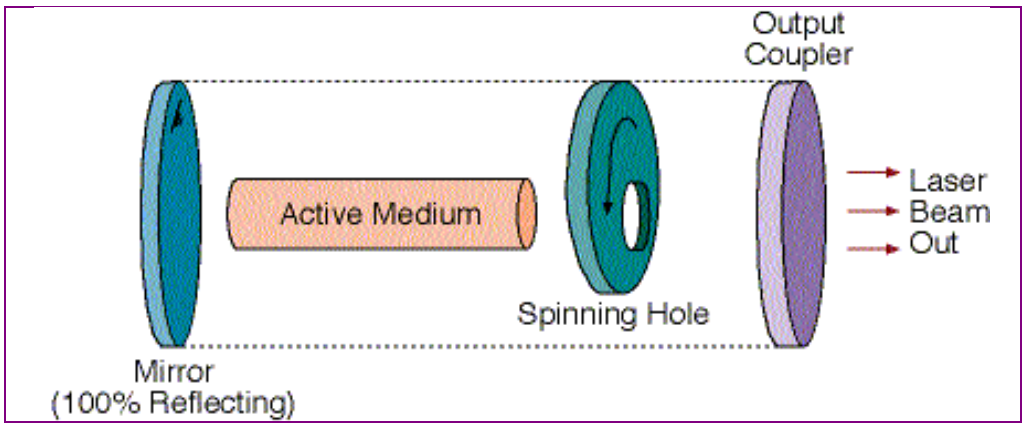
تحتاج العديد من التطبيقات إلى طاقة عالية لليزر مثل التطبيقات الصناعية لليزر كاللحام والقطع ولزيادة طاقة الليزر نستخدم عدة طرق للحصول على ضبط معامل النوعية Q-Switching حيث يتم التحكم في توقيت عملية الانبعاث المحفز عن طريق التحكم في مستوى الخسارة بالنسبة للربح. كيف؟؟

مما سبق لاحظنا أن نبضة الليزر المنبعثة من ليزر الياقوت Ruby laser تحتوي على نتوءات Spikes وهذا يعود إلى توالي حدوث الانبعاث المحفز والضخ لقلب التعداد خلال عملية الإثارة بواسطة Flash lamp و التي تستمر لفترة زمنية تصل إلى مايكروثانية microseconds فإذا ما تم إيقاف الانبعاث المحفز خلال فترة الضخ الضوئي لزيادة الربح يمكن الحصول على نبضة ليزر في فترة زمنية تصل إلى نانوثانية Nanoseconds.

فكرة ضبط معامل النوعية Q-Switching

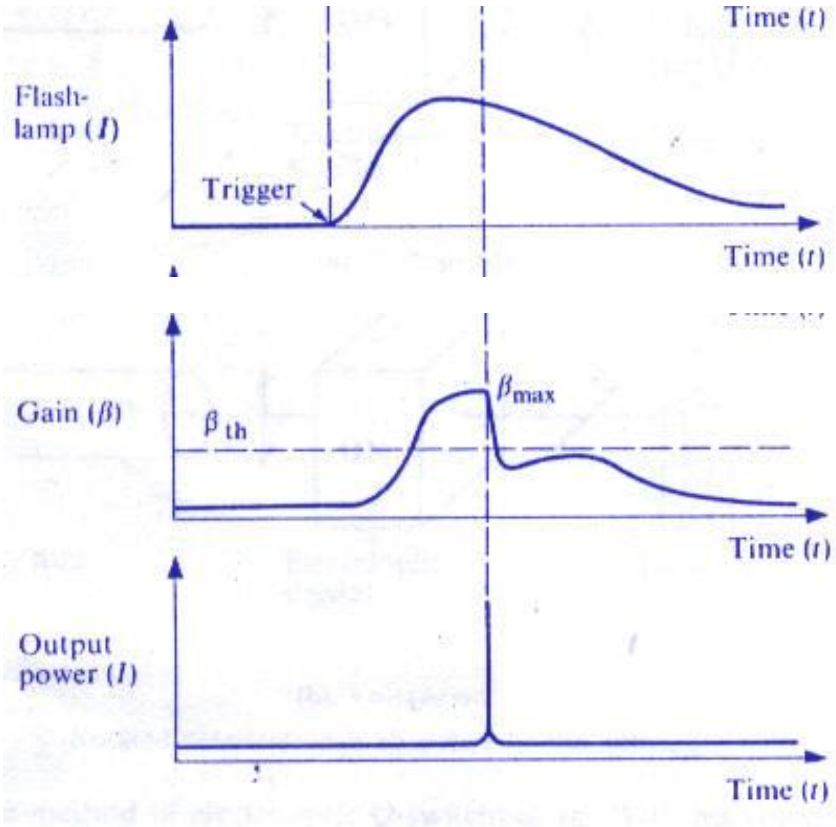
تعتمد فكرة الضبط معامل النوعية Q-Switching على إيقاف مؤقت لليزر من خلال التحكم في مستوى الخسارة خلال عملية الضخ حتى يتم زيادة تعداد مستوى الليزر إلى اكبر قيمة ممكنة وهذا يعني زيادة الربح إلى قيمة اكبر بكثير من القيمة الحرجة. ثم نقوم بتقليل مستوى الخسارة إلى القيمة الأساسية وهذا سيؤدي إلى أن يكون الربح أكبر بكثير من حالة العتبة Threshold فتحدث عملية الانبعاث المحفز في فترة زمنية قصيرة تنتج عنه نبضة ليزر ذات طاقة عالية.

يوضح الشكل (50) فكرة التحكم بالخسارة حيث تم وضع قرص دائري به فتحة تدور بسرعة حول المحور البصري لليزر. فعندما تحجب الأشعة عن المرآة خلف القرص يتم زيادة التعداد وتكبير الربح وذلك لأن مستوى الخسارة يعد كبير جداً وعند وصول الفتحة في القرص في مستوى المحور الضوئي تصبح الخسارة في أدنى مستوى لها بينما لا يزال الربح في أعلى مستوى له وهذا سيؤدي إلى انبعاث نبضة ليزر في فترة زمنية قصيرة مما يعني قدرة عالية.



شكل (50): يعمل ضبط معامل النوعية -كالمفتاح الذي يمكن أن يكون مفتوح فجأة داخل تجويف الليزر

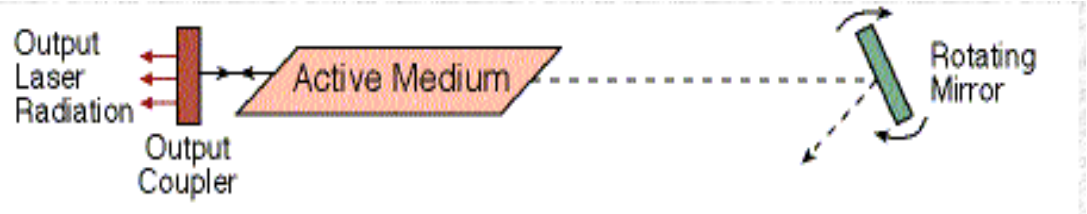
يوضح الشكل (51) التالي التغير الزمني في كلاً من المصباح الومضي المستخدم في أحداث انقلاب التعداد و منحى الربح ونبضة الليزر الناتجة.



(51): التغير الزمني في ضوء المصباح الومضي , منحى الربح و نبضة الليزر الناتجة.

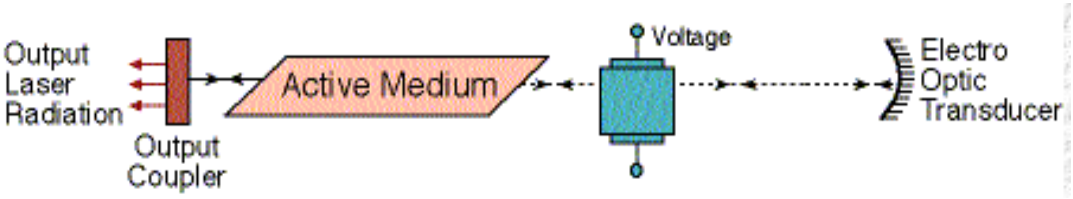
طرق مختلفة لضبط معامل النوعية Q-Switching

1. تدوير المرآة في نهاية التجويف البصري Turning mirror at the end of the optical cavity, فقط عندما تكون مرآة تواجه مرآة أخرى، يكون هناك ليزر.



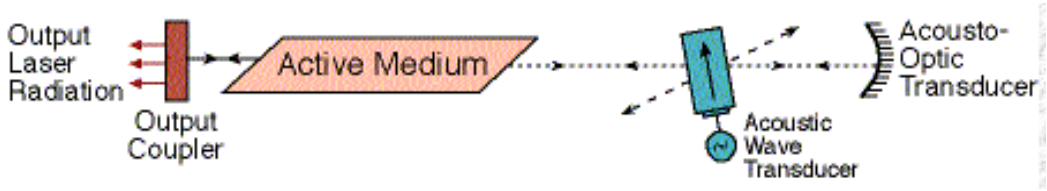
(52): ضبط معامل النوعية بأستخدام تدوير المرآة في نهاية التجويف البصري

2. محول كهربائي - بصري Electro-Optic transducer, تغيير الأرسال عن طريق جهاز بواسطة الجهد الكهربائي.



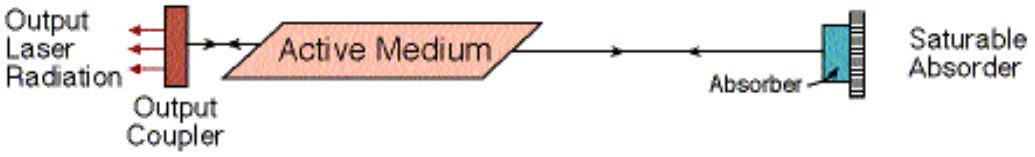
(53): ضبط معامل النوعية بأستخدام محول كهربائي - بصري

3. محول صوتي - البصري Acousto-Optic transducer, تغيير الأرسال عن طريق جهاز بواسطة إشارة صوتية



(54): ضبط معامل النوعية بأستخدام محول صوتي - البصري

4. أشباع الامتصاص Saturable absorber , يصبح الامتصاص شفافا عندما يصل إلى درجة الأشباع. وهي عادة ما تحصل في محلول الصبغة الذي يمنع عملية الليزر عن طريق الامتصاص. عند وصول الإشعاع عند مستوى معين، يصل الامتصاص الى حالة الأشباع، حيث لأنه لم يعد قادرا على الأمتصاص ، أي إنه سيصبح شفافا. في تلك اللحظة يمكن أن يحدث فعل الليزر ، و ينبعث كل الطاقة المخزنة داخل تجويف كنبضة واحدة.



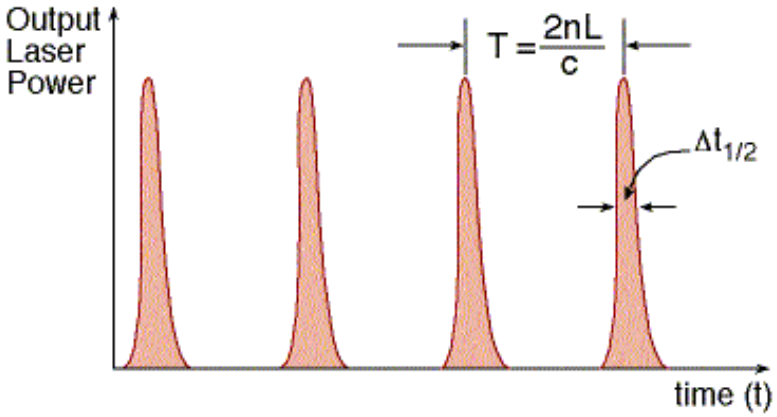
(55): ضبط معامل النوعية بأستخدام أشباع الامتصاص

8-8 قفل الأنماط Mode Locking

تأمين الأنماط البصرية الطولية داخل تجويف يتحقق من خلال قفل النمط النسبي لجميع الأنماط البصرية، مثل ذلك عند نقطة معينة يكون جميعا لديها الطور نفسه. عند هذه النقطة يحصل تداخل بناء بين جميع أنماط الليزر، والنتيجة هي نبضة واحدة، مع عرض ضيق جدا و قدرة ذروة عالية جدا ، والتي تنتشر بين مرأتي التجويف.

أنتشار هذه النبضة يتسبب في انتاج الليزر لتكون سلسلة منظمة من النبضات. يتراوح طول النبضة من (sec 10^{-12}) 1 psec , وتصل إلى (sec 10^{-9}) 1 nsec

في الشكل (56) التالي يمكن ملاحظة أشعة الليزر الناتجة من ليزر النمط المقفول mode locked laser .



(56): أشعة الليزر الناتج من ليزر النمط المغلق.

1-8-8 مفتاح قفل النمط البصري Mode Lock Optical Switch

عنصر قفل أنماط الليزر هو مفتاح بصري داخل تجويف. يفتح هذا المفتاح لفترة قصيرة جدا مساو لطول النبضة، و بعدها تنتهي بفترة من الزمن تساوي وقت رحلة ذهاب وإياب للنبضة داخل التجويف.

- موقع المفتاح بالقرب من أحدى مرايا النهاية.
- المفتاح يسمح بالمرور النبضة إلى المرآة و العودة، ثم تعطيل النبضات الأخرى من النمو.
- يفتح المفتاح مرة أخرى عندما تكون هذه النبضة معينة قد وصلت مرة أخرى من المرآة الأخرى.

هذا هو التحويل المتزامن synchronous switching الذي يراكم كل الطاقة في نبضة واحدة تتحرك ذهابا وإيابا بين مرايا التجويف.

و يتم تأمين قفل النمط بوجود مضمن صوتي – بصري Acousto-optical modulator ، ويتم تحديد وتيرة عملها من خلال الوقت الذي تستغرقه النبضة بين المرآتين.

2-8-8 زمن الفاصلة الزمنية (T) بين نمطين متجاورين.

Time Interval (T) between two Adjacent Pulses.

الفاصلة الزمنية (T) بين نمطين متجاورين هي فترة الرحلة لنبضة واحدة داخل تجويف خلال رحلة الذهاب و الإياب الكاملة:

$$T = \frac{2L}{c}$$

L = طول تجويف.

c = سرعة الضوء (داخل الوسط الفعال).

في ليزر ثنائي النمط المقفول، يمكن أن يكون طول نبضة بضعة بيكو ثانية (10^{-12} [s]) ، مع معدل التنبيض مئات جيجاهيرتز (10^{11} Hz).