الفصل الخامس

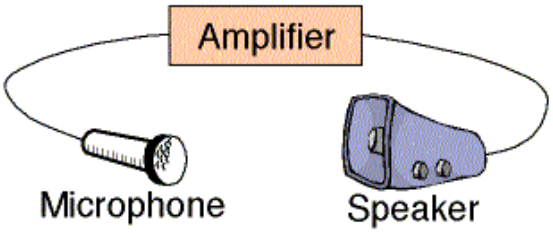
المرنان و التغذية العكسية البصرية
Resonator and Optical Feedback

1-5 مقدمة Introduction

يعمل الليزر مثل أي متذبذب الكتروني، وفكرة المتذبذب هو جهاز ينتج ذبذبات بدون وجود مؤثر خارجي، ولشرح ذلك نستخدم مثال جهاز مكبر الصوت والذي يتكون من ميكرفون microphone و سماعة speaker يوصل بينهما جهاز تكبير amplifier كما في الشكل (26) التالي:

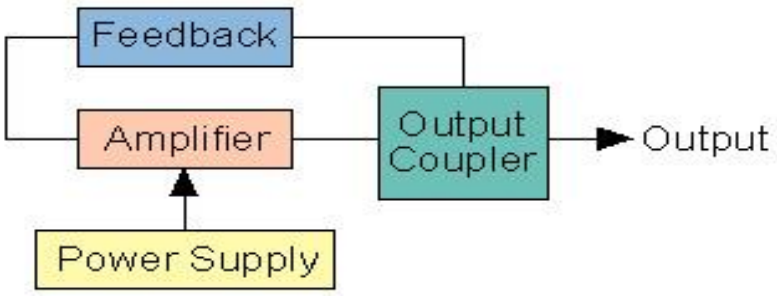
شكل (26): ميكرفون و سماعة يوصل بينهما جهاز تكبير

عندما يكون الميكرفون موضوعاً امام السماعة كدائرة مغلقة كما في الشكل (26) فإننا نسمع صفير متصل من السماعة وذلك بدون الحاجة إلى مصدر صوت خارجي.



شكل (27): الميكرفون أمام السماعة و بينهما جهاز تكبير

وهذه فكرة التغذية العكسية حيث أن الاشارة الصوتية الداخلية الصادرة من السماعة (noise) تلتقط بواسطة الميكرفون ومن ثم يتم تكبيرها بواسطة المكبر ويعاد بثها من خلال الميكرفون وتتكرر العملية كما يوضحه المخطط في الشكل (28), إلى أن يتم تكبير الصوت ويصدر على شكل صفير متصل.



شكل (28): مخطط لعملية التكبير

2-5 التغذية العكسية البصرية Optical Feedback

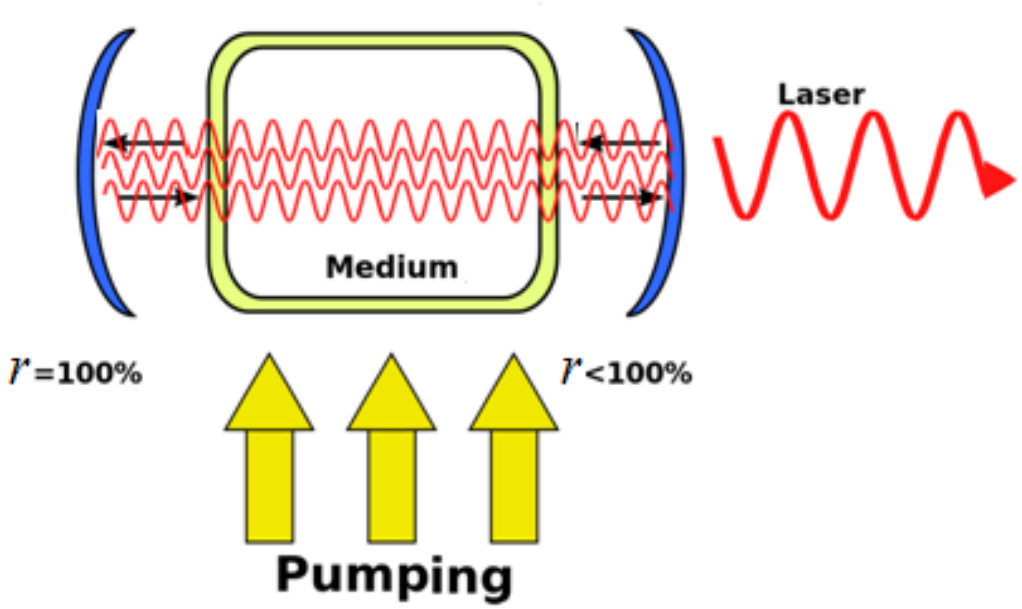
وبنفس الفكرة يعمل متذبذب الليزر حيث يتم إعادة جزء من الفوتونات المكبرة بواسطة عملية الانبعاث المحفز باستخدام مرايا ليتم تكبيرها.

ترتيب المرايا في منظومة الليزر يدعى بالمرنان Resonator الذي له دور كبير في تحديد كفاءة و أستقرارية منظومة الليزر و هو يعتمد على نصف قطر تكور المرأتين و المسافة بينهما.

- مركز تكور المرآة: و هو مركز الكرة التي تكون المرآة جزء منها, أو التي قطعت منها المرآة.
- نصف قطر تكور المرآة : هى المسافة بين مركز تكور المرآة و أي نقطة علىً سطحها.
- البعد البؤري : و هو المسافة بين البؤرة و قطب المرآة.

1-2-5 المرنان البصري Optical Resonator

المرنان البصري هو مجموعة من المرايا المرصوفة خارج الوسط الفعال الليزري ليزود الليزر بتغذية البصرية خلفية. تقوم المرايا بعكس الفوتونات المتولدة في الوسط لتنعكس ملايين المرات في الثانية ذهابا وإيابا بين المرآة الخلفية التي تكون عاكسة للضوء بنسبة 100% والمرآة الأمامية تكون نفاذيتها أقل من 100%. كما في الشكل (29) التالي:

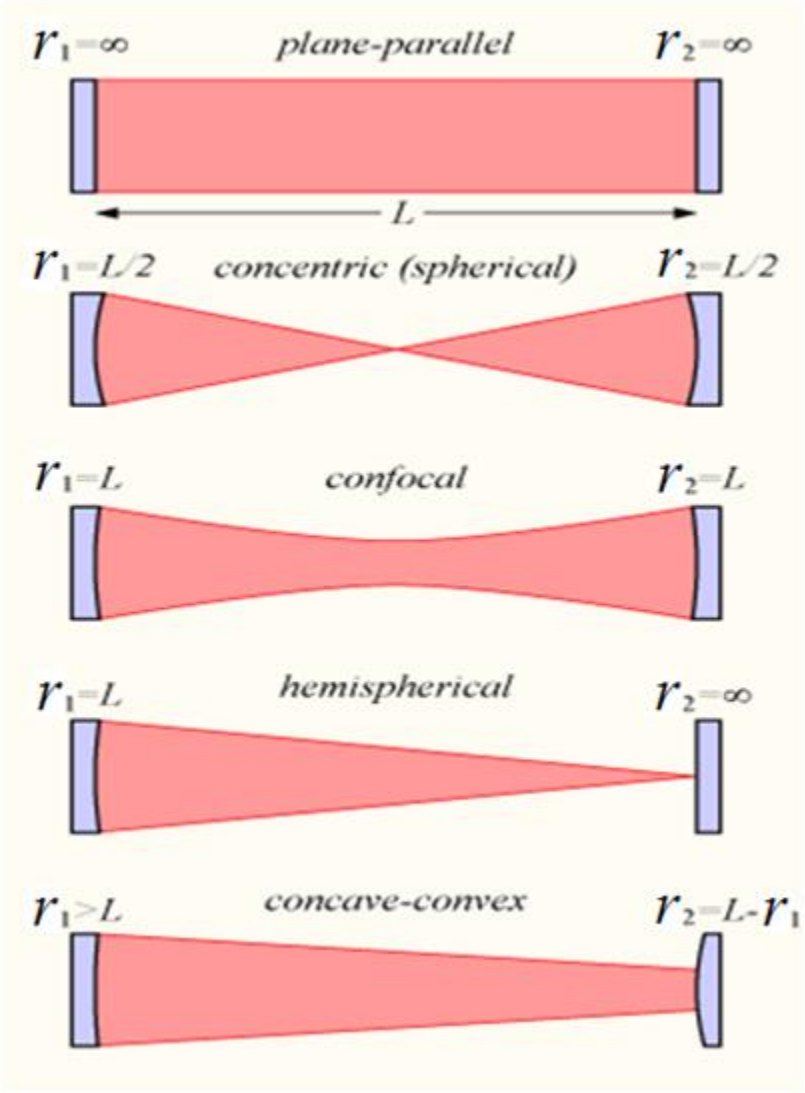


شكل (29): عمل مرنان تجويف الليزر

حركة الفوتونات داخل المرنان تعمل على تداخلها وتوحيد طورها الموجي فتتضاعف. تشكل المرايا بترتيب الذي يكفل تنظيم الشعاع وتسليطه صوب نقطة واحدة و ذلك لرفع شدة الليزر و تقليل الخسارة. يتأتى ذلك بتحديد تقعر المرآة المقعرة وبعدها البؤري وضبط المسافة بين المرآتين. على هذا الاساس، لا يجبذ استعمال المرايا المسطحة لانها تعكس الشعاع على سطح وليس على نقطة كما هو مرغوب. كذلك تصمم المرايا بحيث توفر كفاءة عالية. فازدياد معامل الكفاءة يضّيق عرض الحزامة الطيفي ما يتيح عكس الأشعة الليزرية ضمن تلك الحزامة الضوئية عدة مرات دون توهين.

يتم تصميم التجويف بحيث يبقى الشعاع بالكامل داخل مرايا التجويف. فيرمز إلى نصف قطر تكور المراتين بـ r_1 و r_2 و يرمز بـ L للمسافة بين المرأتين. هناك خمسة أنواع مختلفة من تجاويف

البصرية ثنائية المرآيا المستقرة، كما هي مبين في الشكل(30). هذه الأنواع من المرنانات تختلف في مقدار تكور المرايا (التي يحددها نصف قطر دائرة انحناء المرآة) و المسافة بين المرايا (طول تجويف), و كما هو مبين من الشكل (30).



شكل (30): أنواع المرنان

و هذه الأنواع هي:

- مستوية متوازية $r_1 = r_2 = \infty$

- متحدة المركز (كروية) $r_1 + r_2 = L$
- متحدة البؤرة $r_1 + r_2 = 2L$
- نصف كروية $r_1 = L \quad , \quad r_2 = \infty$
- مقعرة – محدبة $r_1 \gg L \quad , \quad r_2 = L - r_1$

هناك صيغة حسابية بسيطة تشير إلى ما إذا كان تجويف مستقر أو غير مستقر بشكل مبسط، من خلال الحكم عليه من الشرط:

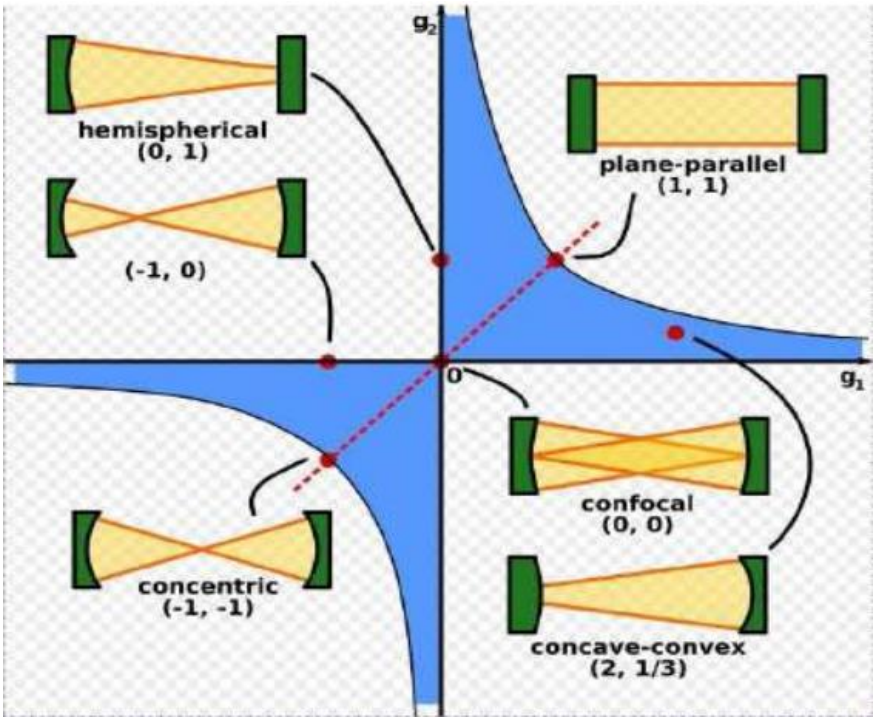
$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث أن

$$g_1 = 1 - \frac{L}{r_1} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{r_2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

أن التجويف مصنوع من اثنين من المرايا الكروية يكون مستقر إذا كان يحقق الشرط (1). من خلال المخطط البياني في الشكل (31) نلاحظ مناطق الاستقرار للتجاويف. إذا كان g_1 و g_2 يتقاطعان ضمن المنطقة المظللة في الرسم البياني، فأن التجويف يكون مستقرا.



شكل (31): الأستقرارية لمختلف أنواع المرنانات

مثال:

حدد أستقرارية مرنانات التجاويف التالية:

1) $L = 1.5\,m \;,\; r_1 = 3\,m \;,\; r_2 = 2\,m$

2) $L = 1.0\,m \;,\; r_1 = 0.5\,m \;,\; r_2 = 2\,m$

3) $L = 1.0\,m \;,\; r_1 = 3\,m \;,\; r_2 = -2\,m$

الحل :

شرط أستقرارية مرنان تجويف الليزر تعطى بالعلاقة التالية:

$$0 \le g_1 g_2 \le 1$$

$$g_1 = \left(1 - \frac{L}{r_1}\right) \quad \text{and} \quad g_2 = \left(1 - \frac{L}{r_2}\right)$$

1) . من شرط الأستقرارية

$$g_1 g_2 = (1\text{-}1.5/3)(1\text{-}1.5/2) = (1\text{-}0.5)(1\text{-}0.75) = (0.5)(0.25) = 0.125$$

و بما أن

$$0 < 0.125 < 1$$

أذا مرنان التجويف هو مستقر

2) .

$$g_1g_2 = (1-1/0.5)(1-1/2) = (1-2)(0.5) = (-1)(0.5) = -0.5$$

$$g_1g_2 = -0.5 < 0$$

أي أن مرنان التجويف غير مستقر

3) .

$$g_1g_2 = (1-1/3)(1-1/-2) = (1-2)(0.5) = (2/3)(3/2) = 1$$

$$g_1g_2 = 1 ,$$

المرنان ذو أستقرار حرج (هامشي marginally)

2-2-5 أنماط المرنان : Resonator Modes

يعكس المرنان الشعاع الليزري على نمطين اثنين، النمط الطولي و النمط المستعرض .نمط الانعكاس الطولي يتفاوت في التردد بينما يتفاوت النمط العرضي في التردد والشدة الليزرية.

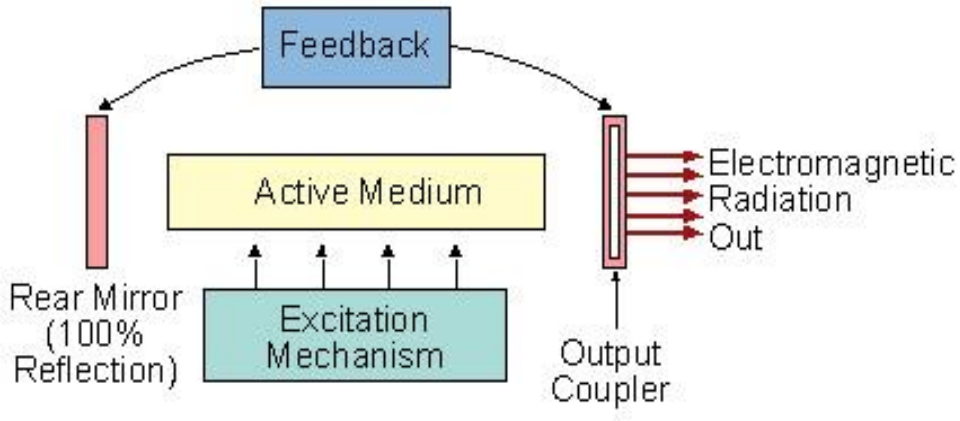
تعرف القدرة الخارجية لليزر بالعلاقة التالية:

القدرة الخارجية = نفاذية المراة × القدرة الداخلية (القدرة الكلية للفوتونات).

تتناسب قدرة الخرج الليزري مع نفاذية المراة الامامية، حيث كلما زادت النفاذية زاد الخرج الليزري، لكن من الناحية العلمية زيادة نفاذية المراة الامامية يؤدي إلى نقصان قدرة الخرج الليزري المحفزة وتقليل القدرة الكلية داخل المرنان، وهذا يؤدي إلى نقصان قدرة الخرج الليزري ومنه يجب اختيار نفاذية المراة الأمامية حسب نوعية الوسط الفعال.

3-5 عمل الليزر Lasing Operation

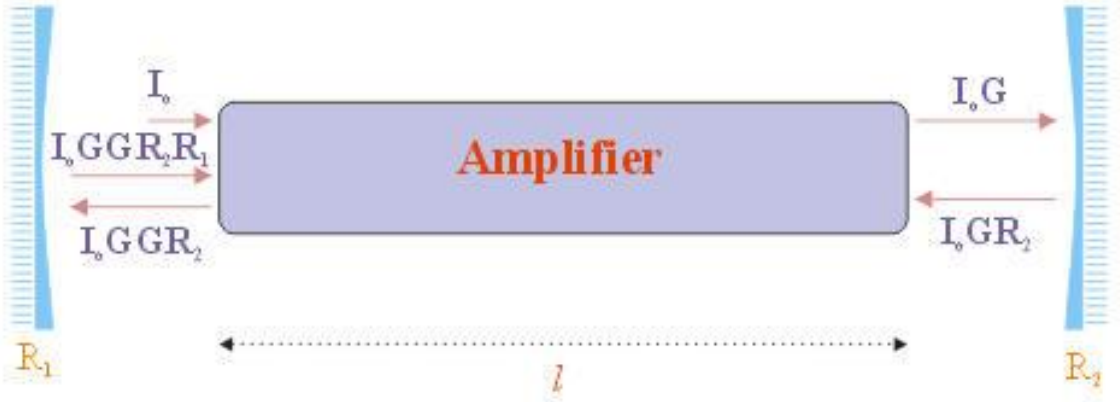
من الشكل (29) يمكن توضح فكرة عمل متذبذب الليزر و الذي يمكن أعادة رسمه بالشكل (32) التالي.



شكل (32): أساس عمل الاداة الليزرية

عندما تسقط فوتونات ذات شدة I_o خلال مادة وسط الليزر الفعال active medium فإنها تتكبر بمقدار G وتصبح شدة الاشعة I_oG و باستخدام مرأة ذو أنعكاسية R_2 فإن جزء من الاشعة ينعكس بمقدار R_2 وتصبح شدة الاشعة I_oGR_2, تعمل المرأة على إعادة الاشعة للمكبر مرة أخرى لتتكبر

الأشعة بمقدار G مرة أخرى وتخرج I_oGR_2G لتسقط على المرأة الأخرى ذو أنعكاسية R_1 و تكون شدة الاشعة عند انعكاسها $I_oGR_2GR_1$. وهذا مايحدث للاشعة عند دخولها للمكبر خلال دورة تكبير واحدة ويكون التكبير المكتسب بمقدار GG و الفقد في الاشعة يكون ناتج عن R_1R_2 , و كما هو موضح في الشكل (33).



شكل (33): دورة واحدة لشعاع الليزر داخل المرنان

والشرط الاساسي ليصبح المتذبذب يعمل كمكبر للاشارة هو ان يكون الناتج النهائي بعد دورة واحدة أكبر أو يساوي الاشارة الاصلية I_0 أي أن،

$$I_0 G R_2 G R_1 \geq I_0 \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

$$G R_2 G R_1 \geq 1 \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

هذا هو شرط التذبذب ليصبح مكبر للضوء. أي أن الربح ذهابا و إيابا مرة واحدة هو ≤ 1
الربح نحصل عليه من العلاقة:

$$G(\nu) = e^{\gamma_0(\nu) l} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

بالتعويض عن G من العلاقة (6) في العلاقة (5) نحصل على:

$$R_1 R_2 e^{2\gamma_o(\nu) l} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

$$e^{2\gamma_0(\nu) l} \geq \frac{1}{R_1 R_2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

و هذه العلاقة يمكن كتابتها بالشكل التالي:

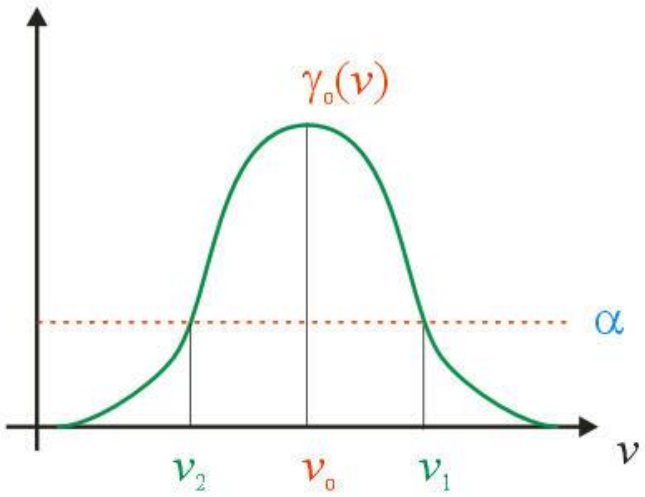
$$\gamma_o(\nu) \geq \frac{1}{2l} ln \frac{1}{R_1 R_2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

الطرف الأيسر من العلاقة السابقة تمثل الربح لكل وحدة طول Gain per unit length و الطرف الأيمن يمثل الخسائر لكل وحدة طول Losses per unit length.

لنفرض أن الرمز α يعبر عن مقدار الفقد في الاشارة لذا فإن:

$$\alpha = \frac{1}{2l} ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

نلاحظ أن الخسائر losses لا تعتمد على التردد وفي هذه الحالة يمكن تمثيل الخسارة على منحنى الربح Gain كدالة في التردد بخط مستقيم كما في الشكل (34)



شكل (34): منحنى الربح كدالة في التردد

لاحظ أنه ليس كل الترددات تحت منحني الربح Gain يمكن ان تنتج ليزر ولكن فقط تلك الترددات التي تحقق الشرط الذي ينص على ان الربح يجب أن يكون اكبر من أو يساوي الخسارة وهذا يتحقق في المدى الترددي ν_2- ν_1 كما موضح في الشكل (34) السابق.

من معلوماتنا السابقة عن دالة الربح Gain يمكن التعبير عنها بثابت مضروباً في دالة شكل الخط line shape function كما يلي:

$$\gamma_o(\nu) = Cg(\nu) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

وحيث ان أكبر قيمة للربح Gain تكون عند التردد ν_o

$$\gamma_o(\nu_o) = Cg(\nu_0) \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (12)$$

بقسمة المعادلتين (11) و (12) نحصل على

$$\gamma_o(\nu) = \gamma_o(\nu_o)\frac{g(\nu)}{g(\nu_o)} \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (13)$$

الأتساع المتجانس $g(\nu)$ يمكن الحصول عليه بواسطة العلاقة (16) في الفصل الخامس حيث

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2\pi\left[(\nu-\nu_o)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2\right]} \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (14)$$

$$g(\nu_o) = \frac{2}{\pi\Delta\nu} \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (15)$$

بالتعويض عن $g(\nu)$ و $g(\nu_o)$ في المعادلة (13) نحصل على

$$\gamma_o(\nu) = \gamma_o(\nu_o)\frac{\left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2}{(\nu-\nu_o)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2} \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (16)$$

وهذه المعادلة تعطي الربح Gain عند أي تردد بدلالة الربح عند التردد ν_o.

أي أنه لحصول فعل الليزر فأن الربح بتردد ν_o ينبغي أن يكون أكبر من الخسائر **α**.

$$\frac{\gamma_o(\nu_o)}{\alpha} > 1 \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (17)$$

سنقوم في الخطوات التالية بايجاد المدي الترددي لعرض حزمة الليزر Bandwidth for the laser الذي يتحقق فيه شرط الحصول على الليزر وعلاقته باتساع منحنى الربح $\Delta\nu$, فمن العلاقة (17) على فرض أن

$$\frac{\gamma_o(\nu_o)}{\alpha} = N \quad , \quad N > 1 \qquad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (18)$$

حيث أن N عدد صحيح يعبر عن النسبة بين مقدار الربح إلى مقدار الخسائر، و يكون مقدار الخسائر losses هو

$$\alpha = \frac{\gamma_o(\nu_o)}{N} \qquad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (19)$$

من الشكل (42) نلاحظ أن

$$\alpha = \gamma_o(\nu_1) \qquad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (20)$$

لذا فأن من العلاقة (16)

$$\gamma_o(\nu_1) = \gamma_o(\nu_o)\frac{\left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2}{(\nu_1 - \nu_o)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2} \qquad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (21)$$

من العلاقتين (18) و (20)

$$\alpha = \gamma_o(\nu_1) = \frac{1}{N}\,\gamma_o(\nu_o) \qquad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (22)$$

$$\frac{1}{N}\gamma_o(\nu_o) = \gamma_o(\nu_o)\frac{\left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2}{(\nu_1 - \nu_o)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2} \qquad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (23)$$

$$\nu_1 - \nu_o = \frac{\Delta\nu}{2}(N-1)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (24)$$

$$\nu_1 - \nu_2 = 2(\nu_1 - \nu_o) = \Delta\nu\,(N-1)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (25)$$

كما هو موضح في الشكل السابق فأن المدى الترددي لفعل الليزر هو

$$\nu_1 - \nu_2 = \Delta\nu\,(N-1)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (26)$$

4-5 المدى الترددي لفعل الليزر Bandwidth for the laser action

يمكن الحصول على ليزر لمستويين من الطاقة لهما منحنى ربح Gain في المدى الترددي الذي يعطى بالعلاقة $\nu_1 - \nu_2 = \Delta\nu\sqrt{(N-1)}$ أي أنه كلما كبرت قيمة N كلما كان الربح أكبر من الخسارة وهذا افضل لكفاءة الليزر وعندما تكون N=2 يكون المدى الترددي لليزر مساوياً لاتساع منحنى الربح $\Delta\nu$ وعندها يكون الربح ضعف قيمة الخسارة. أما عندما تكون N=1 يكون الربح يساوي الخسارة ويكون المدى الترددي في هذه الحالة مساوياً للصفر ν_2-ν_1 =0 . في حالة N اقل من 1 فإن المقدار تحت الجذر يصبح سالباً وهذا ليس له معنى فيزيائي ولا يمكن على الاطلاق الحصول على ليزر في هذه الحالة حيث تصبح الخسارة أكبر من الربح.