٣-٧) التوزيع العكسي وشرط العتبة Reverse Population & Threshold Condition

للحصول على ربح عالي في عملية الانبعاث المحفز فإنه من الضروري العمل على تقليص كافة مسببات الخسارة في جهاز الليزر. احدى هذه المسببات هي الامتصاص لمرايا المرنان، ولتقليص مثل هذه الخسارة تستخدم طلاءات عازلة ذات قدرة امتصاص عالية لإكساء المرايا بطبقات عديدة بدلاً من الطلاء المعدني. ان هذه الطبقات تُرسب بالتعاقب على المادة الأساس (الزجاجية) وبسبب الاختلاف في الطور عند موضع تلامس اي طبقتين تكون جميع الاشعة المنعكسة بطور واحد وتتداخل بشكل بناء، تستخدم عادةً أكثر من عشرين طبقة للحصول على انعكاسية تقرب من (99.9%) ولانعكاسية أقل يكون عدد الطبقات أقل. ترجع الخسارة الكلية في جهاز الليزر الى عوامل مختلفة بالرغم من التباين في مقاديرها لاختلاف أنواع الليزر الا انها تبدو مشتركة في معظمها واهمها:

- **الخسائر في الوسط الفعال:** نتيجة امتصاص الوسط لنطاق عريض من طاقة الضخ فتحدث انتقالات لا علاقة لها بانتقال الليزر، اضافة الى الخسائر الناتجة عن الإستطارة بسبب فقدان التجانس البصري (كما في ليزرات الحالة الصلبة).
- **النفاذية في مرايا المرنان:** ان نفاذية احدى المرآتين ضروري لأنه يمثل نافذة نتاج الليزر، بالإضافة الى خسائر الامتصاص والإستطارة والحيود.

يعبر معامل الكسب عن الزيادة في الشدة الضوئية و قيمة هذا المعامل تتعلق بالفرق بين عدد الذرات في الحالة المثارة وعددها في الحالة الطبيعية، بالإضافة إلى المتغيرات الأخرى للوسط.

نفرض أن γ يمثل الخسارة التي تعمل على تقليل معامل الربح G إلى المقدار $(G - \gamma)$، فلحساب مقدار التغير في شدة الاشعاع نتيجة دورة واحدة له داخل المرنان (ذهاباً وايابا) نفرض وسطاً يملأ الفجوة ما بين المرآتين (M_1,M_2) واللتان لهما قدرة انعكاسية (R_1,R_2) على التوالي وانهما على مسافة (L) فيما بينهما فإن

$$I = I_\circ e^{-\alpha L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3\text{-}7)$$

حيث تمثل كل من (I) و(I_0) شدتي الاشعاع النافذ والساقط على التوالي، ويمثل (α) معامل الامتصاص او معامل توهين المادة للإشعاع. وبعد الانعكاس عن المرآة M_2 فإن الشدة ستصبح:

$$I = R_2 I_\circ e^{(G-\gamma)L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3\text{-}8)$$

وبعد دورة كاملة ستكون:

$$I = R_1 R_2 I_\circ e^{(G-\gamma)2L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3\text{-}9)$$

لذا فان مقدار الربح بعد دورة كاملة (Γ) يعبر عنه بالنسبة بين الشدة النهائية والشدة الابتدائية، أي ان:

$$\Gamma = \frac{I}{I_\circ} = R_1 R_2 e^{(G-\gamma)2L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3\text{-}10)$$

- إذا كان الربح أكبر من واحد، فأن الشعاع يتذبذب وينمو (نحصل على التضخيم).

- في حالة كون الربح أقل من واحد فأن التذبذب لا يستمر ويتلاشى ولا نحصل على التضخيم (لا يوجد شعاع ليزر).
- إذا كان الربح مساوياً للواحد عندها يدعى بمعامل ربح العتبة، لذا يمكن كتابة شرط العتبة على النحو الآتي:

$$R_1R_2e^{(G_{th}-\gamma)2L}=1 \quad \text{..... (3-11)}$$

$$G_{th}=\gamma+\frac{1}{2L}ln\frac{1}{R_1R_2} \quad \text{..... (3-12)}$$

لجهاز ليزر يعمل بموجة مستمرة فإن قيمة معامل الربح عند العتبة G_{th} تساوي القيمة نفسها في حالة الاستقرار، γ يمثل الخسارة في الوسط الفعال، والحد الثاني يمثل الخسارة في تصميم المرنان والتي تتضمن التسرب النافع لنتاج الليزر. وبدلالة التأهيل العكسي فإن:

$$G=\sigma(N_2-N_1) \quad \text{..... (3-13)}$$

$$\sigma=\frac{Bnhvg_{(v)}}{c} \quad \text{..... (3-14)}$$

حيث ان $g_{(v)}$ تمثل دالة شكل الخط الطيفي. وعند العتبة يكون للتأهيل قيمة حرجة:

$$N_c=(N_2-N_1)_c=\frac{G_{th}c}{B_{21}nhvg_{(v)}} \quad \text{..... (3-15)}$$

٣-٨) عامل الجودة (النوعية) للمرنان Quality Factor of Resonator

يعرف عامل النوعية للمرنان بأنه قابلية المرنان على خزن الطاقة الكهرومغناطيسية بداخله، ويمثل النسبة بين الطاقة المخزونة والطاقة المتبددة خلال دورة واحدة:

$$\text{عامل النوعية}=\frac{2\pi\times\text{الطاقة المخزونة}}{\text{الطاقة المتبددة}}$$

فالمرنان يكون ذو عامل نوعية عالي عندما يخزن الطاقة بصورة جيدة، بينما لا يفعل المرنان ذو عامل النوعية الواطئ ذلك. إضافة الى ذلك يرافق عامل النوعية العالي خط طيفي ضيق ويرافق عامل النوعية الواطئ خط طيفي عريض نسبياً. اما الصيغة الرياضية لعامل النوعية فتتمثل بأنها النسبة بين تردد شعاع الليزر (v) وعرض خط الانبعاث (Δv) أي ان:

$$Q=\frac{v}{\Delta v}=\frac{4\pi vL}{c(1-R_1R_2)} \quad \text{..... (3-16)}$$

كما يعتمد عامل النوعية على التردد الرنيني ν_0 والمعدل الزمني للقدرة الضائعة P' لكل دورة (ذهاب وايياب شعاع الليزر) وزمن الدورة T.

$$Q = \frac{2\pi\nu_\circ T}{P'} \quad \text{..... (3-17)}$$

❖ **مثال:** احسب عامل النوعية لمنظومة ليزر بطول موجي (632.8 nm) ذات مرآة امامية انعكاسيتها (95 %). وطول المرنان (1 m) ثم احسب عرض خط الانبعاث ($\Delta\nu$).

الحل:

R1 = 100 %

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} = \frac{4\pi\nu L}{c(1-R_1R_2)}$$

$$Q = \frac{4\pi\times1}{632.8\times10^{-9}(1-1\times0.95)} = 3.99\times10^8$$

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} \rightarrow \Delta\nu = \frac{\nu}{Q} = \frac{\frac{c}{\lambda}}{Q} = \frac{\frac{3\times10^8}{632.8\times10^{-9}}}{3.99\times10^8} = 1.18\ MHz$$

❖ **مثال:** مرنان ليزري فيه (R_1 = 99 %) و(R_2 = 99 %) والمسافة بين المرآتين (0.5 m)، احسب عرض خط الانبعاث لشعاع الليزر.

الحل:

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} = \frac{4\pi\nu L}{c(1-R_1R_2)}$$

$$\Delta\nu = \frac{c(1-R_1R_2)}{4\pi L} = \frac{3\times10^8(1-0.99\times0.99)}{4\pi\times0.5} = 0.95\ MHz$$

❖ **مثال:** اذا كان عامل النوعية لمرنان ليزر طوله (1 m) هو (1.85×10^6)، احسب عدد الانماط الطولية في خط الانبعاث، علماً ان الطول الموجي لليزر (1.06 µm).

الحل:

$$\delta = \frac{c}{2L} = \frac{3\times10^8}{2\times1} = 1.5 \times 10^8\ Hz$$

$$\Delta\nu = \frac{\nu}{Q} \rightarrow \Delta\nu = \frac{\frac{c}{\lambda}}{Q} = \frac{3\times10^8}{1.85\times10^6\times1.06\times10^{-6}} = 1.5298 \times 10^8\ Hz$$

$$N_m = \frac{2L}{c}\Delta\nu \rightarrow N_m = \frac{2\times1}{3\times10^8} \times 1.5298 \times 10^8 \approx 1\ mode$$

اي ان المنظومة تعمل بنمط طولي منفرد.