٣-٣) استقرارية المرنان Resonator Stability

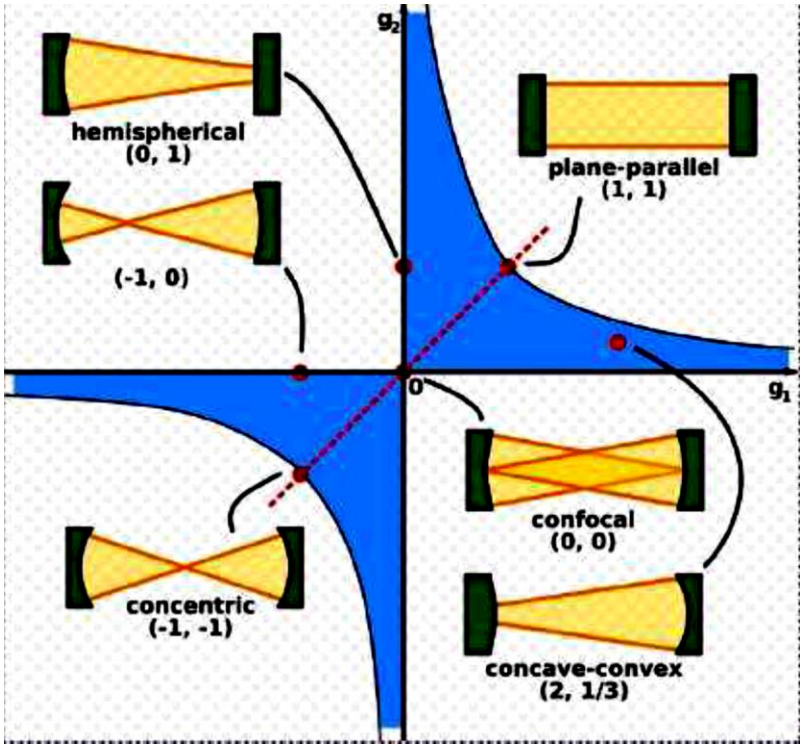
ان المرنان الكروي بصورة عامة يحوي مرآتين كرويتين ويكون نصف قطر تكور المرآة موجباً اذا كانت المرآة مقعرة وسالباً اذا كانت محدبة، وهذا يؤثر على عدد صيغ التذبذب والتردد والسعة وبذلك قد يكون المرنان مستقراً او غير مستقر. في حالة المرنان المستقر يكون تقعر المرآتين بشكل يحفظ فيه الضوء متمركزاً بالقرب من محور المرنان، اما في حالة المرنان غير المستقر فإن اشعة الضوء تواصل حركتها بعيداً عن محور المرنان فينتج عنها خسارة. ان شرط استقرارية المرنان هو:

$$0 \leq g_1 g_1 \leq 1 \quad \text{..... (3-2)}$$

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \quad \text{..... (3-3)}$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \quad \text{..... (3-4)}$$

يمكن تمثيل شرط استقرار المرنان بمخطط يعرف بمخطط الاستقرار يكون فيه g_2 دالة لـ g_1 ويحدد فيه منحنيي الحدود عندما ($g_1g_2 = 1$) فالمناطق المظللة تحقق شرط الاستقرار (تخضع لمرنان مستقر) والمناطق غير المظللة تخضع لمرنان غير مستقر اي انها لا تحقق شرط الاستقرار. اما الخط المستقيم المنقط والذي يصنع زاوية مقدارها (45°) مع محوري g_1 و g_2 فيمثل المرنانات التي لمرآتي كل منها نصفي قطرين متساويين.



شكل (٣-٩): مخطط الاستقرار للمرنان

❖ **مثال:** حدد استقرارية مرنان كروي نصف قطر تكور مرآتيه R اذا كانت المسافة بينهما L تساوي: (R/2)، (R)، (2R).

الحل:

$$g_1g_2 = (1-\frac{L}{R_1})(1-\frac{L}{R_2}) \quad , \quad 0 \le g_1g_1 \le 1$$

1) $g_1g_2 = \left(1-\frac{2R}{R}\right)\left(1-\frac{2R}{R}\right) = (1-2)(1-2) = 1 \longrightarrow$ المرنان مستقر حدياً

2) $g_1g_2 = \left(1-\frac{R}{R}\right)\left(1-\frac{R}{R}\right) = (1-1)(1-1) = 0 \longrightarrow$ المرنان مستقر حدياً

3) $g_1g_2 = \left(1-\frac{R}{2R}\right)\left(1-\frac{R}{2R}\right) = (1-0.5)(1-0.5) = 0.25 \longrightarrow$ المرنان مستقر

❖ **مثال:** احسب استقرارية المرنانات الآتية:

1) L=1.5 m, R_1=3 m, R_2=2 m
2) L=1 m, R_1=0.5 m, R_2=2 m
3) L=1 m, R_1=3 m, R_2= -2 m

الحل:

1) $g_1g_2 = \left(1-\frac{1.5}{3}\right)\left(1-\frac{1.5}{2}\right) = (1-0.5)(1-0.75) = 0.125 \longrightarrow$ المرنان مستقر

2) $g_1g_2 = \left(1-\frac{1}{0.5}\right)\left(1-\frac{1}{2}\right) = (1-2)(1-0.5) = -0.5 \longrightarrow$ المرنان غير مستقر

3) $g_1g_2 = \left(1-\frac{1}{3}\right)\left(1-\frac{1}{-2}\right) = \left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{3}{2}\right) = 1 \longrightarrow$ المرنان مستقر حدياً

٣-٤) عرض خط الانبعاث Emission Linewidth

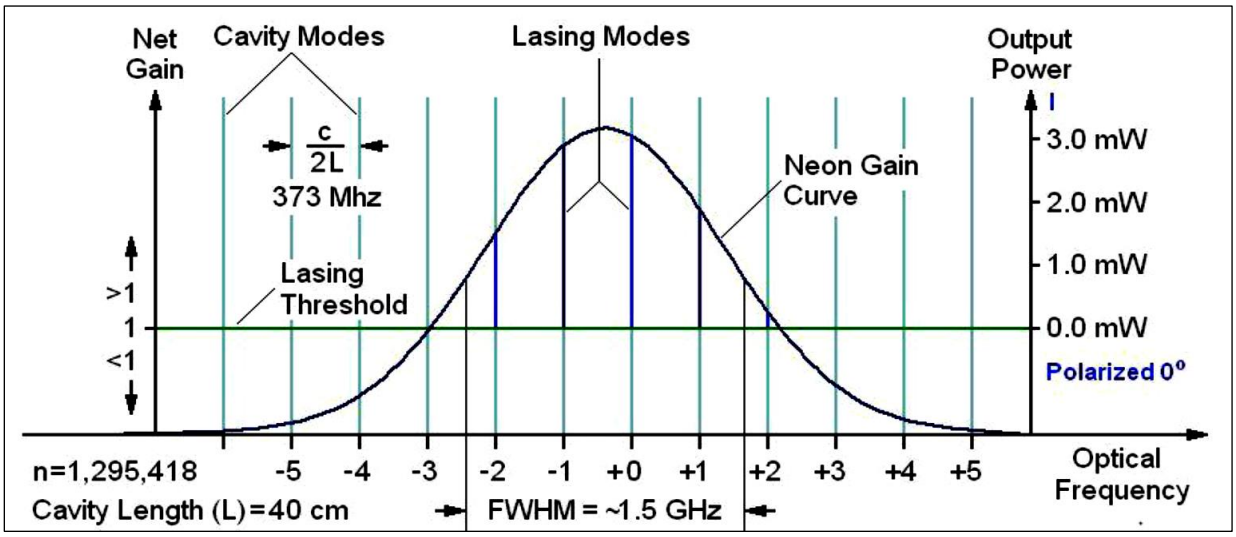
تمتاز أشعة الليزر بأنها أحادية الطول الموجي أي أن عرض الحزمة الترددية (Δv) لها يكون ضيق جداً. من الناحية النظرية فإن عرض خط الانبعاث يساوي جزء صغير من الهيرتز (*Hz*)، ولكن من الناحية العلمية يتوسع عرض خط الانبعاث لشعاع الليزر بشكل كبير لأسباب عديدة وبالتالي تحتوي حزمة الليزر على عدد كبير من الترددات ويسمى شعاع الليزر في هذه الحالة متعدد الأنماط الطولية. يعرف عرض خط الانبعاث (Δv) لشعاع الليزر بأنه استجابة ذرات الوسط الفعال للمجال الكهرومغناطيسي، فهو مجموعة الأطوال الموجية او الترددات المتولدة نتيجة حدوث الانبعاث المحفز وتوليد الليزر، ويكون أقل ما يمكن (نظرياً يساوي 1) في حالة الليزر ولكنه عملياً يكون متسع قليلاً. هناك سببين لتوسيع عرض خط الانبعاث هما:

١) الاتساع المتجانس Homogeneous Broadening: واسبابه هي كل من الاتساع التصادمي والاتساع الطبيعي.

٢) الاتساع غير المتجانس Inhomogeneous Broadening: واسبابه هي كل من الايونات الشائبة في البلورات واتساع دوبلر.

٣-٥) انماط المرنان Resonator Patterns

يعبر عن انماط المرنان بصيغ تذبذب المرنان والتي تمثل شكل وكيفية توزيع شدة المجال الكهرومغناطيسي في أي موضع داخل وخارج المرنان، ويعتمد على شكل وأبعاد المرآتين والمسافة بينهما.



شكل (٣-١٠): صيغ التذبذب الطولية ضمن منحني الانبعاث في الليزر

تستخدم التغذية العكسية للحصول على الليزر وذلك بواسطة المرايا لتضخيم الشعاع الضوئي خلال مروره بالوسط المشع لليزر، ولهذه المرايا دور في التأثير على الاشعاع الكهرومغناطيسي داخل المضخم حيث ينتج نوعين من الانماط وهي الانماط الطولية والانماط المستعرضة.

٣) الانماط الطولية Longitudinal Modes:

وتسمى ايضاً بالأنماط المحورية **Axial Modes** هي توزيعات المجال الكهرومغناطيسي لموجة الليزر بشكل موازي للمحور البصري للمرنان. ان سبب تكون هذه الانماط يعود الى تكون موجات واقفة **Standing Waves** بين المرآتين تتكون نتيجة لتراكب موجتين متشاكهتين وتنتشران باتجاهين متعاكسين. تعطى المسافة الفاصلة بين نمطين طوليين متعاقبين (والتي تسمى بالفاصلة الترددية) بالعلاقة:

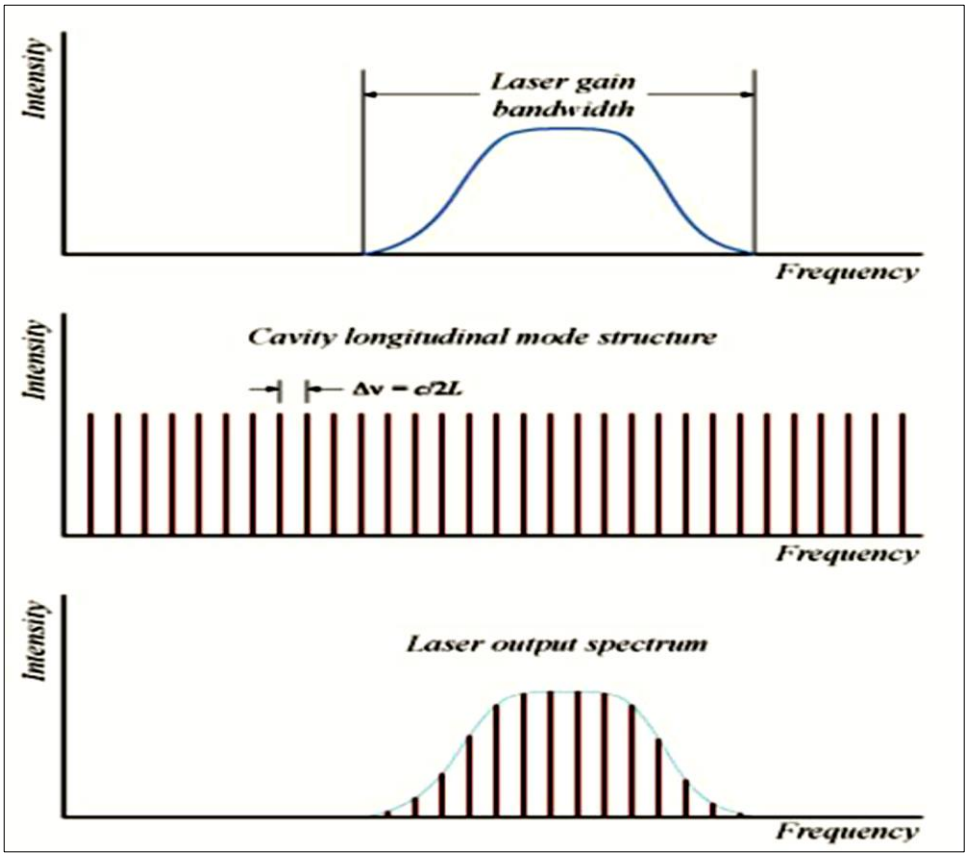
$$\delta = \frac{c}{2L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3\text{-}5)$$

وتحسب الانماط الطولية من المعادلة الاتية:

$$N_m = \frac{2L}{\lambda} = \frac{2L}{c}\Delta\nu \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3\text{-}6)$$

ان عدد صيغ التذبذب الطولية يعتمد على عرض الخط الطيفي وعلى طول المرنان، فكلما زاد طول المرنان كلما قلت الفاصلة الترددية بين صيغتين متعاقبتين وهذا يؤدي الى تذبذب عدد اكبر من الصيغ ضمن خط انبعاث الليزر. هنالك إجراءات يتم اتخاذها لغرض تقليل عدد الأنماط الطولية لشعاع الليزر وهي:

- تبريد الوسط الفعال.
- التحكم بطول المرنان.
- استخدام تقنية ضابط عامل النوعية.

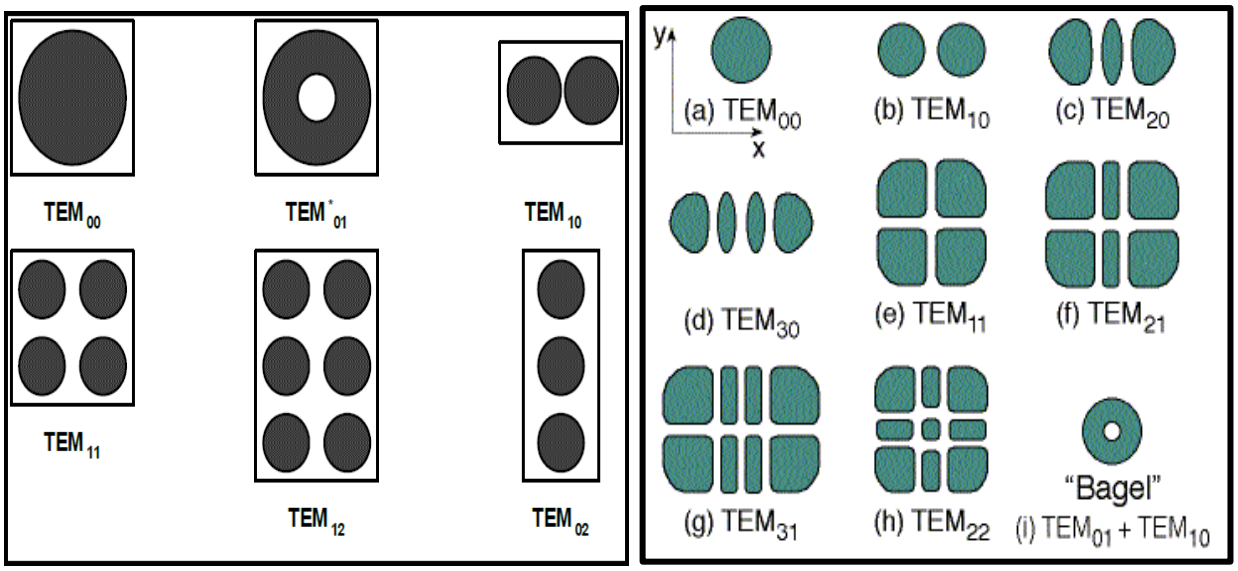


شكل (٣-١١): صيغ تذبذب طولية الانبعاث في الليزر

٤) الانماط المستعرضة Transverse Modes:

هي شكل توزيع شدة المجال الكهرومغناطيسي بشكل عمودي على اتجاه المحور البصري. بدراسة توزيع شدة اشعة الليزر على مساحة المقطع عمودياً على المحور الضوئي لليزر Optical axis laser وجد أنها تأخذ أشكال مختلفة تعتمد على دقة موقع المرايا، وان أي تغير طفيف يؤدي إلى تغيير هذه الاشكال والتي تعرف بالأنماط المستعرضة. بإسقاط شعاع ليزر على شاشة بيضاء بعد تكبيره بواسطة عدسة مفرقة يمكن فحص الانماط المستعرضة لشعاع الليزر. ان عدد صيغ التذبذب المستعرضة تعتمد على شكل المرآة وحجمها، فعندما يتواجد عدد منها في نتاج الليزر، يقال ان الليزر متعدد الصيغ.

تصف الانماط الكهرومغناطيسية المستعرضة Transverse Electromagnetic Modes (TEM) شكل توزيع الطاقة في المقطع العرضي للحزمة. يتم تمييز كل نمط مستعرض (TEM) بمعاملين فيكون TEM_{mn}، حيث ان (m,n) هي أعداد صحيحة، بافتراض تقدم الحزمة في اتجاه Z (m تمثل عدد نقاط الإضاءة الصفرية (بين المناطق المضيئة) على طول المحور X، n تمثل عدد نقاط الإضاءة الصفرية (بين المناطق المضيئة) على طول المحورY).

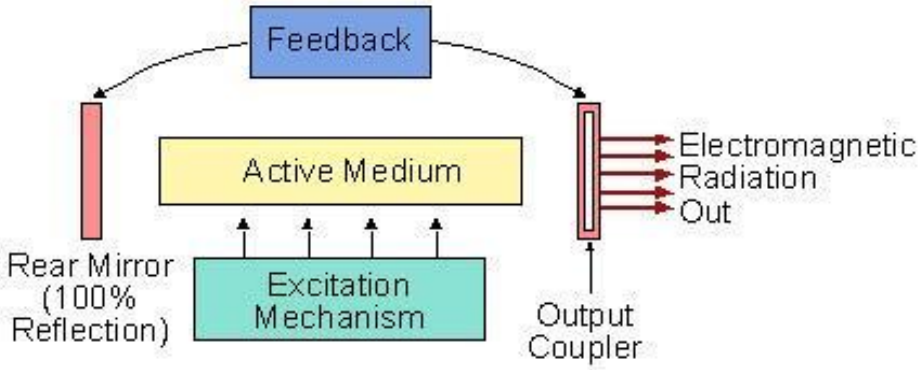


شكل (٣-١٢): الانماط الكهرومغناطيسية المستعرضة

يسمى النمط TEM_{00} بالنمط الأساس أو النمط الكاوسي، ويحتوي هذا النمط على حوالي (85%) من طاقة شعاع الليزر الناتج وهو دائري الشكل (منتظم) ويعتبر النمط الأكثر تفضيلاً في تشغيل منظومات الليزر بصورة عامة. يسمى النمط TEM^*_{01} بنمط الكعكة، وينتج هذا النمط بسبب وجود شوائب أو جسيمات على سطح المرآة أو داخل الوسط الفعال. يكون النمط ذو المرتبة الأعلى أكثر انفراجا من النمط الأقل مرتبة.

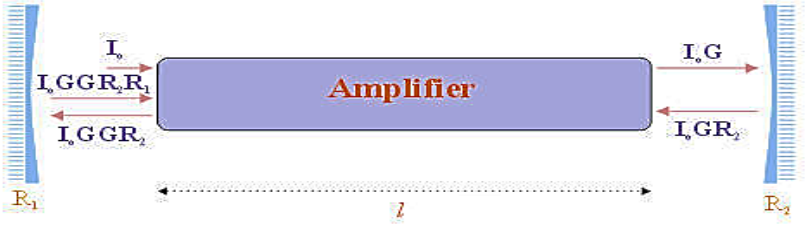
٣-٦) التغذية العكسية في الضوء Optical Feedback

يعمل الليزر مثل أي مذبذب الكتروني، والمذبذب هو جهاز ينتج ذبذبات بدون وجود مؤثر خارجي مثل اللاقطة والسماعة عندما تعمل بدائرة مغلقة حيث يكون بينهما مكبر، وبنفس الفكرة يعمل مذبذب الليزر، حيث يتم اعادة جزء من الفوتونات المكبرة بواسطة عملية الانبعاث المحفز باستخدام مرنان ليتم تكبيرها والحصول على صفة الاتجاهية.



شكل (٣-١٣): التغذية العكسية الضوئية

عندما تسقط فوتونات ذات شدة I_o خلال مادة مكبر الليزر فإنها تتكبر بمقدار G وتصبح شدة الاشعة I_oG، وباستخدام مرأة R_2 فإن جزء من الاشعة ينعكس بمقدار R_2 وتصبح شدة الاشعة I_oGR_2. تعمل المرأة على إعادة الاشعة للمكبر (المضخم) مرة أخرى لتتكبر الأشعة بمقدار G مرة أخرى وتخرج I_oGR_2G لتسقط على المرأة الأخرى R_1 وتكون شدة الاشعة عند انعكاسها $I_oGR_2GR_1$. وهذا ما يحدث للأشعة عند دخولها للمكبر خلال دورة تكبير واحدة ويكون التكبير المكتسب في المقدار GG والفقد في الاشعة يكون ناتج عن R_1R_2. أي أن الشرط الاساس ليعمل المذبذب كمكبر للإشارة هو ان يكون الناتج النهائي بعد دورة واحدة اكبر من الاشارة الاصلية I_o فيكون ($I_oGR_2GR_1 \geq Io$).



شكل (٣-١٤): التضخيم لدورة واحدة في المرنان

باعتبار أن ليس كل الفوتونات المتولدة تخرج من الوسط الفعال وإنما فقط جزء منها، فإنه تم وضع مصطلح يسمى الكسب Gain والذي هو نسبة الطاقة المستهلكة في التحفيز (كهربائية، ضوئية الخ) إلى الطاقة الخارجة من الوسط الفعال على شكل شعاع ليزر.