الفصل السادس

أنماط الليزر
Laser Modes

1-6 مقدمة Introduction

علمنا من ما سابق أنه للحصول على الليزر نستخدم التغذية العكسية بواسطة المرايا وذلك لتكبير الشعاع الضوئي خلال مروره بالوسط المشع لليزر، لهذه المرايا دور في التأثير على الاشعاع الكهرومغناطيسي داخل المكبر حيث ينتج نوعين من الانماط تعرف بالانماط الطولية Longitudinal Modes والنماط المستعرضة Transverse Modes .

الانماط الطولية هي فقط ترددات محددة ممكنة داخل تجويف الليزر البصري ، وفقا لشرط موجة واقفة standing wave condition .

الانماط العرضية يتم إنشائها في المقطع العرضي للحزمة، عموديا على المحور البصري لليزر.

2-6 الأنماط الطولية (الأنماط المحورية) Longitudinal modes (Axial Modes)

باستخدام مقياس تداخل فابري بيرو Fabry-Perot واحد يمكن أن نلاحظ أن خرج شعاع الليزر يتكون من عدد من مركبات تردد منفصلة. ومن المعروف أن هذه الأنماط تعرف بالأنماط الطولية أو الأنماط المحورية. يتم إنشاء هذه الأنماط داخل مرنان البصرية بين اثنين من المرايا.

إن السبب في تكون هذه الانماط يعود إلى تكون أمواج واقفة Standing Wave بين المرآتين. وكما نعلم أن الأمواج الموقوفة تتكون نتيجة لتداخل موجتين لهما التردد نفسه وتنتشران في اتجاهين متعاكسين في المسافة بين المرآتين. وكمثال على هذه الأمواج الوتر الموسيقي في الجيتار.

6-2-1 الموجات الواقفة في الليزر Standing Waves in a Laser

التجويف البصري في ليزر يتم إنشائه بواسطة اثنين من المرايا على طرفي الليزر. هذه المرايا تخدم هدفين:

1. أنها تزيد من طول مسار الشعاع داخل الوسط الفعال، من خلال جعل الشعاع يمر من خلاله عدة مرات.
2. أنها تحدد الشروط الحدودية للمجالات الكهرومغناطيسية داخل تجويف الليزر.

و يسمى المحور الذي يصل بين مراكز هذه المرايا و يكون عمودي عليهما بالمحور البصري Optical Axis لليزر. يتم إخراج حزمة الليزر من الليزر في اتجاه المحور البصري. الموجة الكهرومغناطيسية التي تتحرك داخل تجويف الليزر من اليمين إلى اليسار، والتي ستعكسها المرآة اليسرى، وتنتقل إلى اليمين حتى تنعكس من المرآة اليمنى، وهلم جرا.

وبالتالي، موجتين من نفس التردد والسعة تتحرك في اتجاهين متعاكسين، الذي هو شرط لخلق موجة الواقفة Standing Wave.

6-2-2 شروط الموجات الوافقة Conditions for Standing Waves

الموجات الوافقة يجب أن تحقق الشرط:

$$\frac{2}{\lambda_q} L = q \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

L طول التجويف البصري Length of the Optical Cavity .

λ_q الطول الموجي للنمط معين داخل تجويف الليزر.

q عدد الأنماط، وهو مساو لعدد من أنصاف الموجات داخل تجويف بصري. ويتضمن النمط الأول نصف الطول الموجي، والنمط الثاني نصفين (طول موجي واحد).

في الواقع عدد من الأنماط (q) في معظم الليزر هو كبير جدا. على سبيل المثال إذا كان الطول الموجي المركزي هو 500 nm و فصل المرآة هو 25 cm فأن q يحتوي على قيمة 1000000، حيث q يمكن أن يكون أي عدد صحيح، فهناك العديد من الأطوال الموجية الممكنة ضمن مرنان أداة الليزر.

مثال 1

طول تجويف بصري 25 cm , أحسب الترددات ν_m وموجات λ_m من الأنماط التالية:.

1) q =1 2) q = 10 3) q = 100 4) $q = 10^6$

الحل

	$\lambda_q = \frac{2L}{q}$	$\nu_q = q\frac{C}{2L}$
1	$\lambda_1 = 2\cdot\frac{0.25}{1} = 0.5$	$\nu_1 = 6*10^8$ Hz موجات راديوية
2	$\lambda_{10} = 2\cdot\frac{0.25}{10} = 0.05$	$\nu_2 = 6*10^9$ Hz موجات الأتصالات القصيرة
3	$\lambda_{100} = 2\cdot\frac{0.25}{100} = 5\cdot10^{-3}$	$\nu_3 = 6*10^{10}$ Hz الموجات المايكروية
4	$\lambda_{10^6} = 2\cdot\frac{0.25}{10^{-7}} = 0.5\cdot10^{-6}$	$\nu_4 = 6*10^{14}$ [Hz] الضوء المرئي (الأخضر)

3-6 فاصلة الأنماط المحورية The separation between axial modes

أذا كان الانمط الأول هو q فأن

$$L = q\,\frac{\lambda_q}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

و رقم الانمط الثاني هو q+1 فأن

$$L = (q+1)\,\frac{\lambda_{q+1}}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

فمن أكثر ملاءمة للإشارة إلى الأنماط المحورية من خلال ترددتها (كما موضح في الشكل (44))

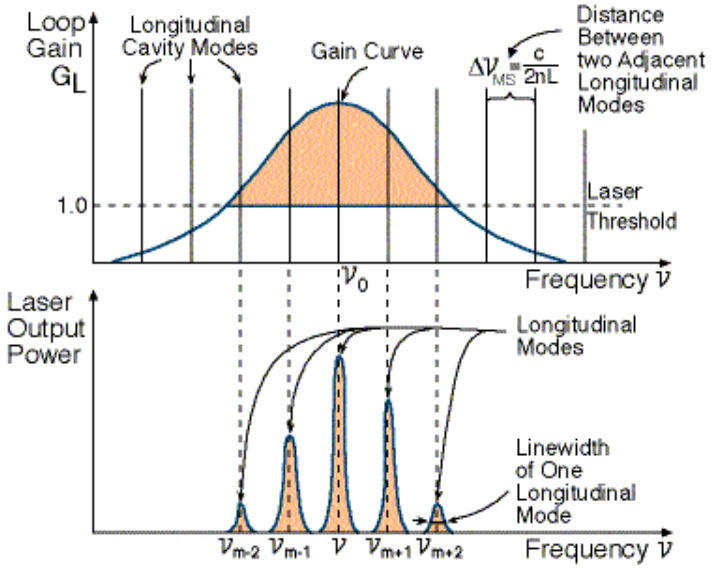
$$\nu_q = \frac{c}{\lambda_q} = q\,\frac{c}{2L} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

$$\nu_{q+1} = \frac{c}{\lambda_{q+1}} = (q+1)\,\frac{c}{2L} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

$$\nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L}(q+1-q) = \frac{c}{2L} \qquad \ldots\ldots \quad (6)$$

فاصلة الترددات المتجاورة يساوي c/2L أي أنها تعتمد فقط على المسافة بين المرأتين فقط.

لـ L = 25 cm فأن فاصلة الأنماط الطولية يساوي $6\text{x}10^{8}\ \text{sec}^{-1}$.



شكل (35): ربح الأشارة الصغيرة و الأنماط الطولية مقابل التردد

ملاحظات

تزداد عدد الأنماط تحت منحنى الحصيلة كلما زاد طول تجويف الليزرL وذلك لأن الفاصل بين الأنماط يقل بزيادة L .

فمن الواضح أن ليزر نمط منفرد Single Mode Laser يمكن الحصول عليه عن طريق تقصير طول التجويف، ذلك أنه نمط الطولي واحد فقط يبقى تحت منحني الربح مع GL>1.

عدد الأنماط التي يمكن أن تتذبذب تلك التي يتحقق عندها شرط الربح أكبر من او يساوي الخسارة كما هو واضح في المنطقة المضللة في الشكل (35) اعلاه.

للحصول على عدد الأنماط التي يمكن أن تكبر تحت منحنى الربح نقسم عرض حزمة الليزر Laser bandwidth على المسافة بين نمطين c/2L , بشرط يكون GL>1.

مثال 2

أذا كإنّ طولَ التجويف البصري في ليزرِ He-Ne هو 30 cm , و إنّ طولَ الموجة المنبعثة هو 0.6328 μm , إحسبْ:

1. الفرق في التردد بين الأنماط الطولية المجاورة.
2. عدد الأنماط الطولية المنبعثة في هذا الطول الموجي.
3. تردد الليزر.

الحل

1. معادلة الفرق في التردد هي نفسها بالنسبة للنمط الأساسي:

$$\Delta\nu = c/(2L) = 3*10^8\ [m/s]/(2*0.3\ m) = 0.5*10^9\ Hz = 0.5\ GHz$$

2. معادلة الطول الموجي للنمط من العلاقة (1):

$$\lambda_q = 2L/q$$

$$q = 2L/\lambda_q = 2^*0.3 \text{ m } /0.6328^*10^{-6} \text{ m } = 0.948^*10^6$$

وهو ما يعني أن الليزر يعمل على تردد و هو ما يقرب من مليون مرة من التردد الأساسي للتجويف.

3. يمكن حساب تردد الليزر بطريقتين:

أ) عن طريق ضرب عدد من الأنماط في الفقرة 2 بتردد النمط الأساسي:

$$\nu = q^*\Delta\nu = (0.948^*10^6)(0.5^*10^9 \text{ Hz }) = 4.74^*10^{14} \text{ Hz}$$

ب) بواسطة الحساب المباشر:

$$\nu = c/\lambda = 3^*10^8 \text{ m/s } / 0.6328^*10^{-6} \text{ m } = 4.74^*10^{14} \text{ Hz}$$

مثال 3

طول تجويف بصري في ليزر He-Ne هو 55 cm و أتساع منحنى الربح (عرض نطاق الليزر) هو 1.5 GHz . أوجد العدد التقريبي لأنماط الليزر الطولية.

الحل

المسافة بين الأنماط الطولية المجاورة هي:

$$\Delta\nu = c/(2L) = 3^*10^8 \text{ [m/s]}/(2^*0.55 \text{ [m]}) = 2.73^*10^8 \text{ m/s} = 0.273 \text{ GHz}$$

العدد التقريبي لأنماط الليزر الطولية:

N =Laser bandwidth /$\Delta\nu$ = 1.5 GHz/0.273 GHz = 5.5 ≈ 5

4-6 أهمية الأنماط البصرية الطولية في خرج الليزر

Importance of Longitudinal Optical Modes at the Output of Laser

يتم تحديد أهمية الأنماط الطولية لليزر من تطبيق معين لليزر.

1. في معظم التطبيقات عالية الطاقة لمعالجة المواد أو الجراحة الطبية، يتم استخدام الليزر كوسيلة لنقل الطاقة إلى الهدف. وبالتالي ليس هناك أهمية لأنماط الليزر الطولية.

2. في التطبيقات حيث يدخل الإشعاع الكهرومغناطيسي يكون مهم، مثل التصوير الثلاثي الأبعاد أو قياسات التداخل، الأنماط الطولية تكون مهمة جدا.

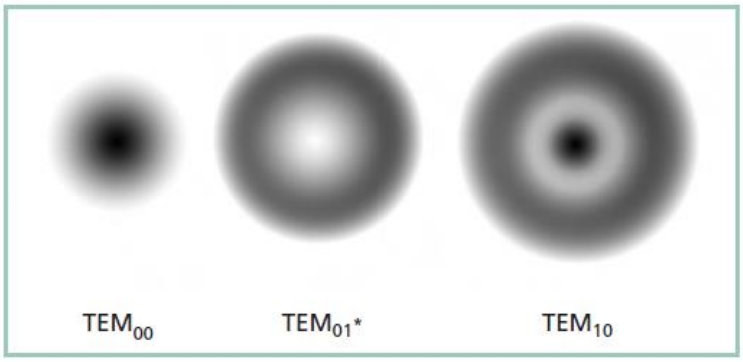
3. في التطبيقات الطيفية و التصوير الكيميائي، لا بد أن يكون الطول الموجي محددة جدا. ويتحقق هذا الطول الموجي من خلال تشغيل الليزر في نمط واحد، لذلك يجب التحكم في طول تجويف، مثل أن هذا النمط سوف يعمل تماما بالطول الموجي المطلوب. تركيب أنماط الليزر الطولية أمر بالغ الأهمية لهذه التطبيقات.

4. عندما تكون هناك حاجة كبيرة لطاقة نبضات قصيرة، يتم استخدام طريقة النمط Mode Locking . تؤدي هذه العملية الى التداخل البناء Constructive Interference بين جميع الأنماط داخل تجويف الليزر.

5-8 الأنماط المستعرضة Transverse modes

بدراسة توزيع شدة اشعة الليزر على مساحة المقطع عمودياً على المحور البصري لليزر Optical Axis Laser وجد أنها تأخذ أشكال مختلفة تعتمد على دقة موقع المرايا وأي تغير طفيف يؤدي إلى تغيير هذه الاشكال والتي تعرف بالأنماط المستعرضة Transversal Mode.

باسقاط شعاع ليزر على شاشة بيضاء بعد تكبيره بواسطة عدسة يمكن فحص الانماط المستعرضة لشعاع الليزر. والشكل (36) التالي يوضح مجموعة من هذه الأشكال حيث يبين اللون الاكبر شدة لليزر والمناطق البيضاء ينعدم فيها الليزر.



شكل (36): أنماط مرنان مترية المحور واطئة الرتبة Resonator Low-Order Axisymmetric Modes (التوزيع المستعرض للكثافةِ Transverse distribution of intensity)

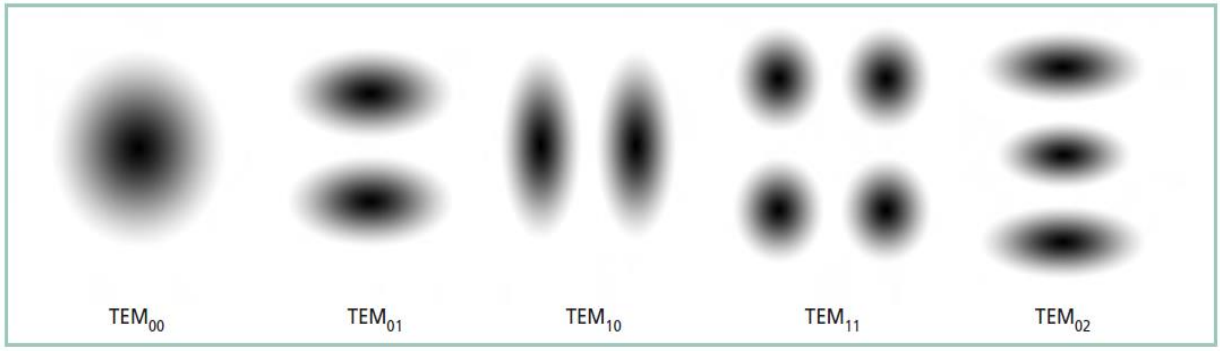
أن وجود محاذاة غير صحيحة قليلا في مرايا الليزر يؤدي الى أن يكون طول المسار داخل تجويف مختلف لأشعة"rays" مختلفة. بالتالي، فإن توزيع الكثافة ليس توزيع كاوسي Gaussian .

يتم وضع علامة لكل نمط عرضية (TEM) مع مؤشرين: TEM_{mn} حيث m ، n ، هي أرقام صحيحة. على افتراض تقدّم الحزمة هو في الاتجاه z :

m = عدد النقاط الإضاءة الصفرية (بين المناطق المضيئة) على طول محور x.

n = عدد النقاط الإضاءة الصفرية (بين المناطق المضيئة) على طول محور y.

كما يمكن توضيحها من خلال الشكل (37) التالي:



شكل (37): أنماط هيرميت- جاوس واطئة الرتبة Low-order Hermite-Gaussian modes