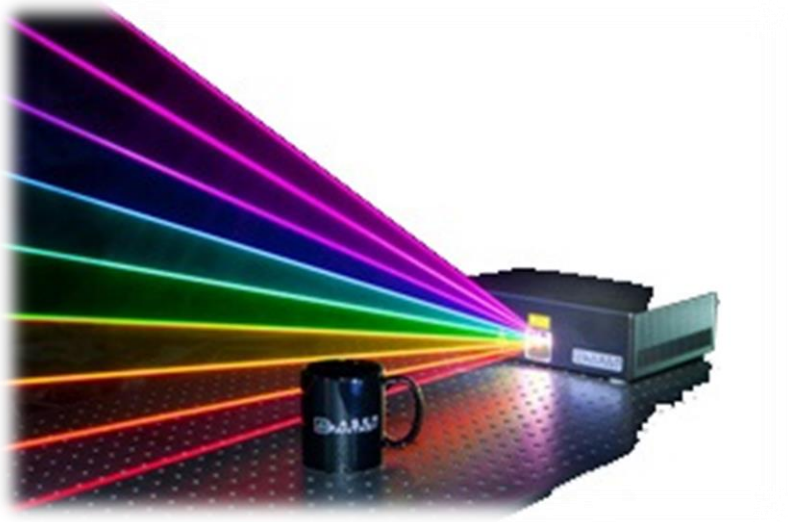
جامعة الانبار

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء



محاضرات

الليزر

لطلبة قسم الفيزياء المرحلة الرابعة

إعداد

د. رائد خضر سلمان الفهداوي

قسم الفيزياء/ كلية التربية للعلوم الصرفة

العام الدراسي

2016 -2015

مفردات المنهج

ـ مفاهيم عامة

- الليزر- الميزر- المفهوم والخواص- اساس العمل

ـ مفاهيم فيزيائية اساسية في عمل الليزر

- الامتصاص- الانبعاث الذاتي والمحفز- التوزيع العكسي (المعكوس)

ـ الضخ في اجهزة الليزر

- ماهو الضخ؟- طرق الضخ (الضوئي، الكهربائي و الكيميائي)- منظومات الضخ (الثلاثية، الرباعية)- شروط عمل الضخ

ـ مكونات اجهزة توليد الليزر

-انواع الليزرات

- الصلب- السائل- الغازي- شبه الموصل- الكيميائي

ـ استعمالات الليزر

- الصناعة- الطب- الاتصالات البصرية- قياس المساحات والابعاد والتوجيه- الانارة- التحفيز في المفاعلات النووية

مصادر المحاضرات:

1. الكتاب المنهجي المعتمد: " فيزياء الليزر وبعض التطبيقات العملية"، سهام عفيف قندلا.
2. مباديء الليزر- سعود اللحياني- صفحة التحميل
http://www.kutub.info/library/book/12469
3. Basics of Laser Physics.، من باحث الكتب في موقع قوقل .Google Books. رابط الكتاب.
https://books.google.iq/books?id=dpVDTLPySTQC&printsec=frontcover&dq=LASER+books&hl=ar&sa=X&ved=0ahUKEwjx3MKa6IPLAhWzbZoKHV6wAxAQ6AEIJzAB
4. بالاضافة الى مقالات مختلفة من الانترنيت سيتم الاشارة اليها عند المرور بها.

محاضرة 1- مفهوم الليزر والميزر

1. مفهوم الليزر والميزر

اشتقت كلمة الليزر في اللغة الانكليزية من الاحرف الأولى للمبدأ الذي يتم بواسطته توليد الليزر وهي

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LASER

وترجمتها هو الضوء المكبر (او المضخم) بواسطة الانبعاث المحفز للاشعاع الكهرومغناطيسي.

والليزر هو جهاز Device يستخدم لانتاج حزمة ضوئية رفيعة جدًا وذات شدة عالية. وبعض الأحزمة رفيعة لدرجة أنها قادرة على ثقب مائتي حفرة فوق نقطة في حجم رأس الدبوس. وبسبب إمكانية تبئير (تركيز) أشعة الليزر إلى هذا الحد من الدقة فإن هذه الأشعة تكون قوية جدًا. فبعض الأحزمة، على سبيل المثال، تستطيع اختراق الماس، وهو أصلب مادة في الطبيعة، وبعضها تستطيع إحداث تفاعل نووي صغير. ويمكن أيضًا نقل حزمة الليزر إلى مسافات بعيدة دون أن تفقد قوتها، حيث وصلت بعض الأحزمة إلى القمر.

اما الميزر فهو مختصر الكلمات التالية

Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

MASER

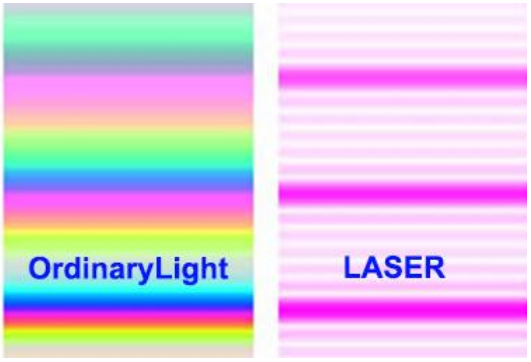
وترجمته هو تضخيم الموجات الميكروية بالانبعاث المحفز للاشعاع

وكما يظهر من الاسم فهو جهاز مشابه لمبدأ عمل الليزر الا انه يستخدم لتضخيم الموجات الدقيقة بدل الضوء المرئي.

2. خواص الليزر

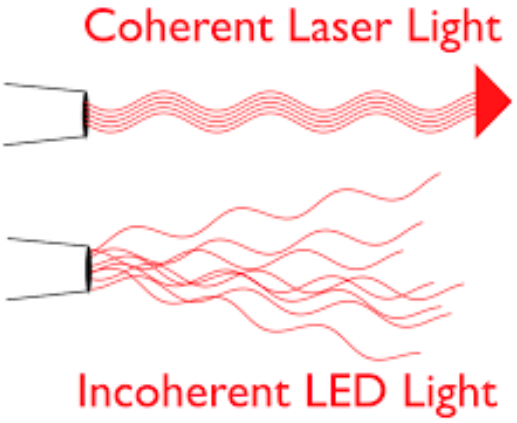
يمتاز الليزر بأربعة ميزات اساسية هي:

1. **احادية الطول الموجي (Monochromaticity)** (احادية التردد), وتعني ان شعاع الليزر له طول موجي واحد فقط أي تردد منفرد. لاحظ الشكل1-1.



شكل 1-1. الفرق بين احادية الطول الموجي لليزر والضوء العادي متعدد الاطوال الموجية

2. **التشاكه (Coherency)**, ويعني ان الفرق بين أي نقطتين على موجة شعاع الليزر يكون ثابت عند حركة الشعاع زمانيا ومكانيا.يعتبر الليزر المصدر الضوئي الوحيد الذي يمتلك صفة التشاكه مقارنة بالمصادر التقليدية الاخرى. كما في الشكل ادناه



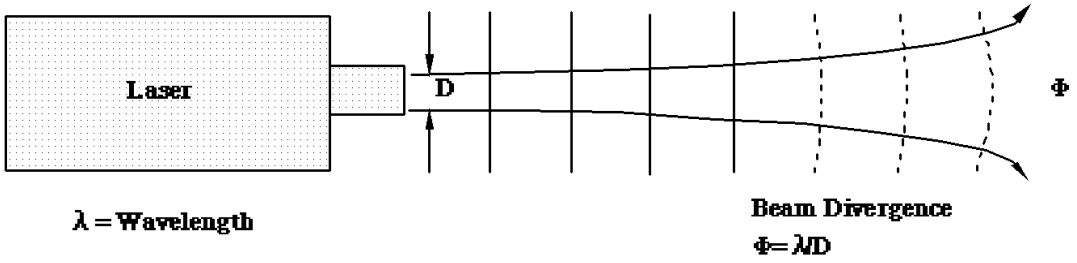
شكل 1-1. الفرق بين ضوء الليزر المتشاكه والضوء العادي الصادر من ثنائي باعث للضوء غير المتشاكه

3. **الاتجاهية (Directionality)**,وهي انتشار الحزمة باتجاه واحد ولمسافات طويلة جدا دون انفراجها عن محورها (أو انفراج قليل جدا لا يتجاوز بضعة سنتمترات لكل كيلومتر).

لضوء مثالي التشاكه، تنتشر حزمته ببقة قطرها D ستكون زاوية انفراج حزمته θ_d بسبب الحيود من قانون براغ

$$\theta_d = \beta \lambda / D$$

حيث λ هي الطول الموجي لحزمة الليزر، β معامل قيمته في مدى العدد 1 ويعتمد على نوع توزيع السعة للضوء المستخدم وقطر حزمته. الزاوية θ_d تسمى ايضاً انفراج الحيود المقيد.



مثال/ اوجد زاوية الانفراج لليزر طول موجته $1.06*10^{-3}$mm وقطر حزمته 3mm ومعامل انتشاره β=1.1.

الحل/

$$\theta_d = \frac{1.1 * 1.06 * 10^{-3}}{3} = 3.89 * 10^{-4}$$

4. **السطوع (Brightness)**,وهو ان كثافة قدرة شعاع الليزر في وحدة المساحة تكون عالية جدا. تسمى كثافة قدرة شعاع الليزر في وحدة المساحة بالشدة Intensity.

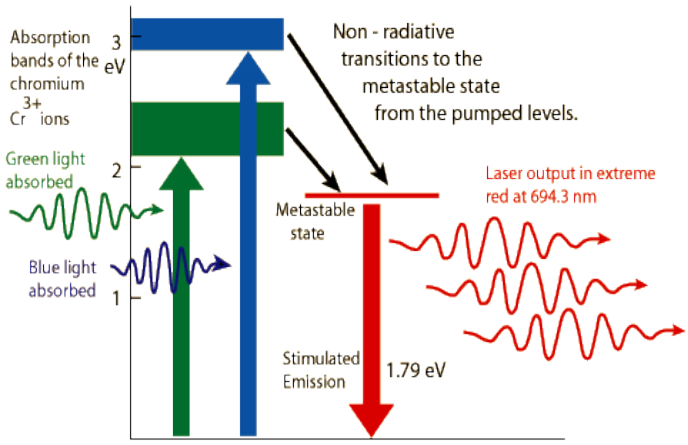
قانون السطوع Brightness (B)

$$B = \frac{power\ emitted\ (P)}{Area\ (A) \times Solid\ angle\ (\Omega)}$$

3. مبدأ عمل الليزر

قام أينشتاين في عام 1917م بدراسة تفاعل الأمواج الكهرومغناطيسية أو ما يسمى اختصارا بالإشعاع **(Radiation)** مع ذرات المادة ووجد أن هناك ثلاثة أنواع من التفاعلات وهي أولا الامتصاص**(Absorption)** وفيها تقوم ذرات المادة بامتصاص فوتونات الإشعاع المسلط عليها وتعمل طاقة الإشعاع الممتص على رفع الإلكترونات من مدارات منخفضة الطاقة إلى مدارات عالية الطاقة وتصبح الذرات في حالة الإثارة **(excited state)**. ولا يتم امتصاص الفوتونات من قبل المادة إلا إذا كانت

طاقتها تزيد عن فرق الطاقة بين مدارات الإلكترونات لذرات تلك المادة ولذا تكون المواد شفافة لجميع الإشعاعات التي تقل ترددتها عن قيم محددة تتحدد من التركيب الذري لتلك المواد كما هو الحال مع الزجاج. أما التفاعل الثاني فهو الانبعاث التلقائي **(Spontaneous Emission)** وفيها تقوم الذرات المثارة بإشعاع موجات كهرومغناطيسية نتيجة نزول الإلكترونات من المدارات عالية الطاقة إلى المدارات منخفضة الطاقة. إن الإشعاع التلقائي الصادر عن المادة المثارة يسمى إشعاعا غير مترابط **(Noncoherent radiation)** وذلك لأن الإلكترونات تنزل من تلقاء نفسها وبطريقة عشوائية بين



مدارات الذرة المختلفة ولذلك فإن هذا الإشعاع يحتوي على عدد كبير جدا من الترددات وتعتمد مصادر الضوء العادية على ظاهرة الانبعاث التلقائي في عملها. أما التفاعل الثالث فهو الانبعاث المستحث او المحفز **(Stimulated Emission)** وفيها تقوم الذرات المثارة بإشعاع موجات كهرومغناطيسية نتيجة نزول الإلكترونات من المدارات عالية الطاقة إلى المدارات منخفضة الطاقة ولكن ليس بطريقة تلقائية وعشوائية كما في الانبعاث التلقائي بل نتيجة لحثها بإشعاع له تردد محدد. إن الإشعاع المستحث الصادر عن المادة المثارة يسمى إشعاع متشاكه **(Coherent)** وذلك لأن الموجات الكهرومغناطيسية الناتجة عن نزول الإلكترونات لها تردد **(Frequency)** وطور **(Phase)** يساويان تماما تردد وطور الأمواج التي قامت بحث الإلكترونات على الإشعاع ولذلك فإن هذا الإشعاع له تردد واحد من الناحية النظرية. ويمكن حساب تردد الإشعاع المنبعث من المادة من خلال تقسيم فرق الطاقة بين المدارين الذي انتقل بينهما الإلكترون بثابت بلانك.

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

4. شروط توليد الليزر:

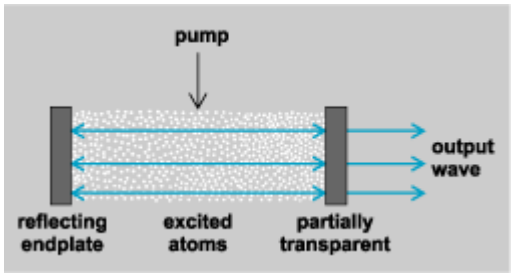
إن المبدأ الرئيسي الذي يقوم عليه عمل الليزر هو ظاهرة الانبعاث المستحث المذكورة آنفاً آنفا وهناك شروط ثلاثة تلزم لكي يولد الليزر ضوءا مترابطا من خلال هذه الظاهرة.

الشرط الأول– التوزيع العكسي (Population inversion): وهو توفر ما يسمى بالتوزيع العكسي (المقلوب) (**Population inversion**) للإلكترونات في ذرات المادة التي ستولد الضوء والذي يعني أن عدد الإلكترونات في الحالة المثارة يجب أن يكون أعلى منها في الحالة غير المثارة.

الشرط الثاني– الوسط الفعال (active medium): ان شرط حدوث التوزيع العكسي هو وجود مايسمى بالوسط الفعال والذي هو عبارة عن بلورة من مادة صلبة يتم ادخال ايونات فعالة فيها لغرض توليد الليزر. من أكثر بلورات الليزر الشائعة هي الياقوت (Ruby) والنيدميوم_ياك (Nd:YAG) والنيدميوم_زجاج (Nd:Glass) والالكسندرايت (Alexandrite) والتيتانيوم_ ياقوت (Ti: Sapphire). كما يعتبر ليزر اشباه الموصلات من ليزرات الحالة الصلبة ولكنه لا يستخدم بلورة وانما تراكيب من اشباه الموصلات ويتم ضخها بواسطة التيار الكهربائي. ويشترط في مواد الوسط الفعال ان يكون عدد المدارات في حزمة التوصيل فيها (**conduction band**) ثلاثة أو أكثر وبحيث يوجد مدار شبه مستقر (**metastable**) بين المدار منخفض الطاقة والمدار عالي الطاقة.

الشرط الثالث– توفر مصدر ضخ: اما الشرط الثالث فهو توفر مصدر يقوم بضخ الإلكترونات (**Pumping**) من المدارات منخفضة الطاقة (غير المثارة) إلى المدارات عالية الطاقة (المثارة) وذلك للحصول على التوزيع المقلوب للإلكترونات.

الشرط الرابع– التغذية الراجعة الموجبة: أما الشرط الرابع فهو وجود نظام تغذية راجعة موجبة (**Positive feedback**) لكي يعمل الليزر كمذبذب (**Oscillator**) يقوم بتوليد تردد الضوء المطلوب وغالبا ما يتم استخدام المرايا (**Mirrors**) للحصول على هذه التغذية الراجعة. وعلى هذا فإن الليزر يعمل من خلال ضخ الإلكترونات باستخدام مصدر ضخ خارجي كالضوء أو التيار الكهربائي من المدار الأدنى إلى المدار الأعلى ومن ثم تهبط الإلكترونات المثارة من خلال الانبعاث التلقائي من المدار الأعلى إلى المدار شبه المستقر (**metastable state**) والذي يقع بين المدارين الأدنى والأعلى حيث تبدأ الإلكترونات بالتراكم في هذا المدار لتنتج التوزيع المقلوب المنشود. وإذا ما مر فوتون ضوئي بتردد محدد على المادة وهي في وضع التوزيع المقلوب فإنه سيحث بعض الإلكترونات الموجودة في المدار شبه المستقر للنزول إلى المدار الأدنى منتجة عددا من الفوتونات الضوئية لها نفس تردد وطور واتجاه الفوتون الذي قام بحثها أي أن الضوء المتولد سيكون له تردد واحد أي أنه أحادي اللون وذلك من الناحية النظرية. وتستخدم



المرايا لعكس بعض الفوتونات المتولدة لتمر من خلال ذرات المادة الفعالة لتوليد مزيدا من الفوتونات التي لها نفس الخصائص. وعادة ما تكون أحد المرايا ذات معامل انعكاس يقرب من الواحد وذلك لتعكس جميع الضوء الساقط عليها بينما يكون معامل انعكاس المرآة الثانية أقل من واحد وذلك لتسمح لجزء من الضوء المتولد للخروج منها لاستخدامه في التطبيقات المختلفة. وبما أن الفوتونات المستحثة لها نفس تردد الفوتونات التي قامت بحثها وتسير بنفس اتجاه سيرها فإن ضوء الليزر الناتج سيكون أحادي اللون تقريبا ويسير باتجاه واحد وذلك على العكس من طبيعة ضوء المصادر الأخرى. ويخرج الضوء المتولد من الليزر في العادة إما على شكل نبضات (**pulsed laser**) أو على شكل موجة مستمرة (**continuous wave laser**) والذي يتحدد من التركيب الذري للمادة الفعالة ونوع وكمية الضخ المستخدم وكذلك طريقة تركيب الليزر.

5. اجزاء الليزر

ومما ورد آنفا نستنتج انه لتوليد الليزر يتطلب جهاز يتألف من ثلاثة أجزاء رئيسية، هي 1- مصدر الطاقة 2- مادة تسمى الوسط الفعال 3- تركيب يغلف الوسط الفعال يسمى الفجوة البصرية. ويؤدي مصدر الطاقة وظيفة توفير التيار الكهربائي أو الضوء أو أي شكل آخر من أشكال الطاقة. وتمتص ذرات الوسط الفعال الطاقة، وتخزنها لفترة، ثم تطلقها في شكل ضوء. ويحفز بعض هذا الضوء ذرات أخرى لإطلاق طاقتها، ويعوَّض هذا الضوء بإضافة مزيد من الضوء إلى الضوء الحافز، حيث تعكس مرآتان مثبتتان على طرفي الفجوة البصرية الضوء مرة أخرى إلى الوسط الفعّال، ويسبب الضوء المنعكس انطلاق الضوء من مزيد من الذرات وبذلك يقوى الضوء، ويبرز جزء منه من الليزر ويبرز جزء منه من الليزر في شكل حزمة رفيعة. وبعض الأحزمة ترى بالعين المجردة، بينما تتكون أحزمة أخرى من أشكال غير مرئية من الإشعاع.

واجب بيتي/

1. ماذا يسمى التركيب المؤلف من المرايا المستخدم لمضاعفة الفوتونات داخل جهاز الليزر؟
2. بين كيف يتم قياس شدة الليزر من خلال معرفة قدرة جهازه بالواط.

نهاية المحاضرة

محاضرة2- مفاهيم اساسية في عمل الليزر

في المحاضرة السابقة تم التطرق الى مفاهيم عامة تخص موضوع الليزر وكيفية توليده وخواصه. في هذه المحاضرة سيتم تفصيل تلك المفاهيم بصورة اعمق واكثر تفصيلاً.

تفاعل الاشعاع مع المادة:

عند سقوط اشعة ضوئية على سطح معدن فإن طاقة الفوتون الساقط على سطح معدن بتردد (ν) تتناسب طردياً مع تردده، وبالتالي $E=h\nu$. هذه الطاقة لاحقاً تعطى الى الكترون ذرة المعدن المعرض للفوتون ليكتسب الالكترون طاقة كافية لتخليصه من القوة المقيدة له على سطح المعدن، والتي تسمى دالة الشغلφ. وفي هذه الحالة يكتسب الالكترون طاقة حركية مقدارها $\frac{1}{2}mv^2$ ليكون مقدار الطاقة الكلية للانبعاث الكهروضوئي هو:

$$E = h\nu = \phi + \frac{1}{2}mv^2$$

مثال/ ليزر ايون غاز الارغون له طول موجي (λ=488 nm) يسقط على سطح معدن ذو دالة شغل (φ=2.2eV). احسب الطاقة الحركية العظمى للانبعاث الكهروضوئي.

الحل/

$$E = h\nu = \phi + \frac{1}{2}mv^2$$

حيث m كتلة الالكترون ($9.109x10^{-31}kg$) وυ سرعته.

اذاً طاقة الفوتون الساقط هي:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{6.626 \times 10^{-34}\, J.s \times 2.998 \times 10^{8} ms^{-1}}{488 \times 10^{-9}} = 4.07 \times 10^{-19}$$

دالة الشغل هي:

$$\phi = 2.2\ eV = 2.2 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.52 \times 10^{-19}\, J$$

لذلك سيكون مقدار الطاقة الحركية العظمى للانبعاث الكهروفوتوني (كهروضوئي) هو :

$$(4.07 - 3.52) \times 10^{-19} = 0.55 \times 10^{-19} J = 0.34\ eV$$

معادلات انشتاين للامتصاص والانبعاث الضوئي:

بين انشتاين ان العمليات الثلاثة (الامتصاص، الانبعاث الذاتي والانبعاث المحفز) للاشعاع تكون مترابطة رياضياً فيما بينها، بحيث ان الانتقالات الى الاعلى ($E_1 \rightarrow E_2$) يجب ان تساوي الانتقالات الى الاسفل ($E_2 \rightarrow E_1$) للنظام الذري في حالة التوازن الحراري. وكما مر في المحاضرة السابقة ان تردد الفوتون المنبعث نتيجة هبوط الذرة من مستوى طاقة اعلى الى مستوى طاقة اقل هو:

$$\nu_{21} = (E_2 - E_1)/h \quad \ldots\ldots (2.1)$$

اذا كان لدينا N_1 من الذرات في مستوى طاقة E_1 ، فسيكون معدل الامتصاص المحفز هو:

$$N_1 \rho_\nu B_{12} \quad \ldots\ldots (2.2)$$

حيث ρ_ν كثافة الطاقة للفوتون الممتص ($\rho_\nu = nh\nu$) (n عدد الفوتونات لوحدة الحجم). B_{12} معامل ثابت لزوج معين من مستويات الطاقة.

وبالمثل في حالة وجود N_2 من الذرات في مستوى طاقة E_2 ، فسيكون معدل الانبعاث المحفز هو:

$$N_2 \rho_\nu B_{21} \quad \ldots\ldots (2.3)$$

حيث B_{21} ثابت لزوج مستويات الطاقة المتضمنة للانبعاث.

معدل الانبعاث التلقائي يعتمد على المعدل الزمني لبقاء الذرة في حالة التهيج τ_{21} (في المستوي المتهيج E_2).

معدل الانبعاث الذاتي

$$N_2 A_{21} \quad \ldots\ldots (2.4)$$

حيث الثوابت A_{21} و B_{21} تسمى معاملات انشتاين، والعلاقات التي تربط بين هذه المعاملات للنظام الذري في حالة التوازن الحراري هي:

$$N_1\rho_\nu B_{12} = N_2\rho_\nu B_{21} + N_2 A_{21} \ \ldots\ldots (2.5)$$

ومنها يكون:

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}/B_{21}}{(B_{12}N_1/B_{21}N_2) - 1} \ \ldots\ldots (2.6)$$

العدد N_j من الذرات في المستوي j (او ما يسمى بالتأهيل) لمستويات طاقة مختلفة E_i لنظام في حالة توازن حراري يعطى بواسطة توزيع بولتزمان الاحصائي.

$$N_j = N_o \frac{\exp(-E_j/KT)}{\sum_i \exp(-E_i/KT)} \ \ldots\ldots (2.7)$$

حيث N_o العدد الكلي للذرات و E_j هي الطاقة للمستوى j. ومن المعادلة اعلاه، يكون معدل التأهيل N_1 و N_2 في المستويات E_1 و E_2 هو:

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp[(E_2 - E_1)/KT)] \ \ldots\ldots (2.8)$$

وبتعويض معادلة (2.8) في معادلة (2.5) واستخدام معادلة (2.1) نحصل على :

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}/B_{21}}{(B_{12}/B_{21}\exp(h\nu/KT) - 1} \ \ldots\ldots (2.9)$$

وبما ان النظام الذري في حالة توازن، فإن الإشعاع الذري يجب ان يكون مماثل لاشعاع الجسم الأسود، والذي يمكن ان يوصف بواسطة المعادلة التالية:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{C^3}(\frac{1}{\exp(h\nu/KT) - 1} \ \ldots\ldots (2.10)$$

وبمقارنة معادلة (2.9) مع (2.10) نحصل على :

$$B_{12} = B_{21} \ \ldots\ldots\ldots (2.11)$$

$$A_{21} = \frac{B_{21}8\pi h\nu^3}{C^3} \ \ldots\ldots\ldots (2.12)$$

وهذه المعادلتين الأخيرتين تعرفان بمعادلات انشتاين. ومن معادلة (2.12) نلاحظ ان النسبة بين الانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز يمكن حسابها لزوج من مستويات الطاقة في حالة التوازن الحراري مع الاشعاع. وهذه النسبة R تعطى بالمعادلة الآتية:

$$R = \frac{N_2 A_{21}}{N_2 B_{21} \rho_\nu} = \frac{8\pi h\nu^3}{\rho_\nu C^3} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

وبتعويض قيمة ρ_ν من معادلة (2.8) نحصل على:

$$R = \exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - 1 \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

لذلك فتحت شروط التوازن الحراري، معدل الانبعاث التلقائي يكون اكثر احتمالية من معدل الانبعاث المحفز. لذا فللحصول على ليزر، يجب تحقيق تخطي التوازن الحراري، اي ان تكون كثافة التأهيل في المستوى الاعلى للطاقة تزيد عنها في مستوى الطاقة الاقل. وهذا هو مايسمى بالتأهيل العكسي.

Quiz/

Calculate the maximum value of the work function of a photocathode which could be used in a photomultiplier to detect green line of the HeNe laser of wavelength of 543.5 nm.

Solution/

The maximum value of the work function of such a photocathode is when the incident photon impart its energy to a single electron giving it only amount of energy ϕ, the work function. i.e.

$$E = h\nu = \phi + \frac{1}{2}m\upsilon^2 = \phi_{max}$$

The maximum work function then is:

$$\phi_{max} = \frac{hC}{\lambda} = \frac{6.626 \times 10^{-34} J.s \times 2.998 \times 10^{8} m.s}{543.5 \times 10^{-19}} = 3.66 \times 10^{-19} J \quad or \quad 2.29\ eV$$

اسئلة خارجية محلولة:

In Young's experiment for interference, the separation of neighboring bright fringes is approximately $\lambda D/d$, where λ is the wavelength of the light used, D the distance from light sources to screen and d is the separation of the sources. Given that the sources are 2mm apart and the screen is 0.85 m apart from the sources, find the fringe spacing for the red line of a HeNe laser ($\lambda = 632.8$ nm).

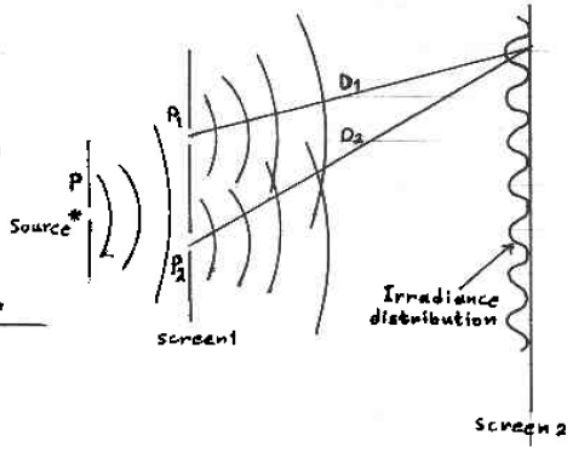
Solution:

The separation of neighboring bright fringes is

$$L = \frac{\lambda D}{d}$$

$$= \frac{632.8 \times 10^{-9} m \times 0.85\ m}{2 \times 10^{-3} m}$$

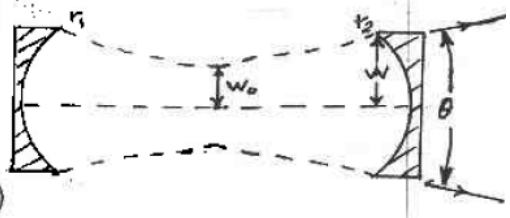
$$= 0.27\ mm$$



5 Calculate the Gaussion beam divergence of HeNe laser ($\lambda = 633$ nm) which has a confocal cavity with a minimum beam radius (waist) $W_o = 0.22$ mm.

Solution:

The laser beam divergence is given by



$$\theta_{confocal} = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi W_o}\right)$$

$$= \sin^{-1}\left(\frac{633 \times 10^{-9}\ m}{\pi \times 2.2 \times 10^{-4}\ m}\right)$$

$$= 0.916 \text{ mrad}$$

$$(\text{rad} = \frac{180}{\pi} \text{degree})$$

$$= 0.052^\circ$$

6 Calculate the beam divergences in a semiconductor (GaAs) laser ($\lambda = 900$ nm) whose active region has cross-sectional dimensions of 3 μm x 10 μm, perpendicular to the plane of the junction.

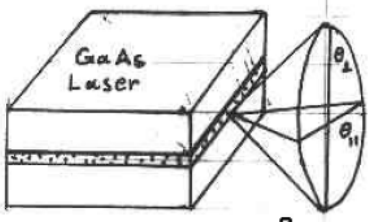
Solution:

An aperture of dimension d gives rise to an angular divergence given by

$$\theta = \sin^{-1}(k\lambda/d),$$

wher k is a number of order unity (k=1).

therefore,



Beam divergences

$$\theta_\perp = \sin^{-1}\left(\frac{900 \times 10^{-9}\ m}{3 \times 10^{-6}\ m}\right) = 0.3 \text{ rad} = 17^\circ$$

$$\theta_{||} = \sin^{-1}\left(\frac{900 \times 10^{-9}\ m}{10 \times 10^{-6}\ m}\right) = 0.09 \text{ rad} = 5.2^\circ$$

1.7 Compare the coherence lengths of conventional and laser radiation sources. If the radiation emitted from a low-pressure Sodium lamp with a typical linewidth of Sodium D lines (both lines taken together) at $\lambda = 589\ \mu m$ is 5.1×10^{11} Hz, and if the laser radiation at $\lambda = 633$ nm emitted from a HeNe laser operating in a single mode with linewidth of 1MHz.

Solution:

The coherence time ($t_c = L_c/c$) is the time taken for a source to emit a wavelength of length L_c - where c is the velocity of light.

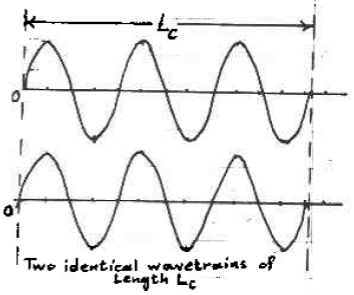
The coherence time is related to the linewidth of the emission ($\Delta\nu$) via the equation

$$t_c = \frac{1}{\Delta\nu}$$

$$t_c = \frac{1}{5.1 \times 10^{11}\ Hz} = 2 \times 10^{-12}\ s$$

then, $L_c = C t_c = 3 \times 10^8\ ms^{-1} \times 2 \times 10^{-12}\ s$

$= 6 \times 10^{-4}\ m = 0.6\ mm$



Two identical wavetrains of length L_c

We may contrast these values with those applicable to the HeNe laser. If the laser is operating in a single mode stabilized to 1MHz, then, the coherence time is,

$$t_c = \frac{1}{1 \times 10^6\ Hz} = 1 \times 10^{-6}\ s$$

then, $L_c = 3 \times 10^8\ ms^{-1} \times 10^{-6}\ s = 300m$

Now if the HeNe laser is operating in many modes, with linewidth is about 1500 MHz, giving a coherence length of

$$L_c = 3 \times 10^8\ ms^{-1} \times \frac{1}{1500 \times 10^6\ s^{-1}} = 0.2\ m$$

then, the coherence length is some 1500 times less.

1.8 Calculate the brightness of a laser beam from a HeNe laser with an output of 5 mW, and a beam divergence of 5.2×10^{-5} rad. If the radius of the laser spot is 0.3 mm.

Solution:

Brightness is defined as the power emitted per unit area per unit solid angle.

The beam divergence 5.2×10^{-5} rad corresponds to a solid angle of $(\pi \times \theta^2)$.

$$\Omega = \pi\theta^2 = \pi(5.2 \times 10^{-5})^2 = 8.5 \times 10^{-9}\ Sr.$$

The laser spot are is $(\pi \times r^2)$,

$$A = \pi r^2 = \pi(0.3 \times 10^{-3}\ m)^2 = 2.8 \times 10^{-7}\ m.$$

The brightness of the laser beam is,

$$B = \frac{P}{A \times \Omega} = \frac{5 \times 10^{-3}\ W}{(2.8 \times 10^{-7} m^2)(8.5 \times 10^{-9} Sr)} = 2 \times 10^{12}\ W m^{-2} sr^{-1}.$$

For comparison purposes the brightness of the sun is a mere $1.3 \times 10^6\ W m^{-2} sr^{-1}$.

Note: Brightness values as high as $10^{21}\ W m^{-2} sr^{-1}$ have been achieved using an Nd: glass laser followed by optical amplifiers.

1.9 Consider a 1 mW HeNe laser ($\lambda = 633$ nm) with a focusing lens of F number equal 1. Determine the power per unit area of the focusing laser beam.

Solution:

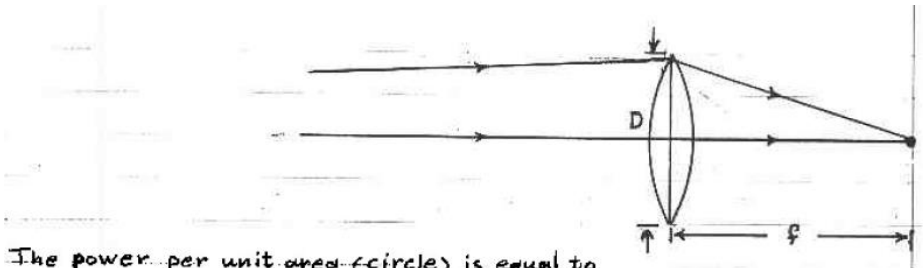
All laser beams posses a small degree of divergence. The Gaussian laser beam will diverge (spread) at comparatively large distances from the laser output. A sutiable focusing (converging) lens inserted into the diverging beam reverses the situation, that is to produce a converging beam that is focused at distance nearly equal to f, (the focal length of the lens).

The focused beam radius is given by

$r_s = \frac{2}{\pi}\lambda F$,

where F is known as the F number of the lens and is given by $F = f/D$,

where f and D are the focal length and diameter of the lens.



The power per unit area (circle) is equal to

$$\frac{P}{A} = \frac{P}{\pi r_s^2} = \frac{P}{\pi(\frac{2}{\pi}\lambda F)^2} = \frac{\pi P}{4\lambda^2 F^2}$$

$$= \frac{3.14 \times (1 \times 10^{-3}\ W)}{4 \times (633 \times 10^{-9} m)^2 \times (1)^2} = 2 \times 10^9\ W m^{-2}$$

2.1 Calculate the ratio of the rates of spontaneous and stimulated emission (R) for the light emitted by an electric discharge in a gas such as Neon in the Helium-Neon (HeNe) laser. If the discharge temperature is 370 K for the red line produced by this laser, which has a frequency of $\nu = 4.74 \times 10^{14}$ Hz.

Solution:

The ratio of the rates of spontaneous and stimulated emission is given by the Eq;

$$R = \frac{N_2 A_{21}}{N_2 B_{21} \rho_\nu}$$

Where, A_{21}, B_{21} are constant called Einstein coefficients and the relationship between them is,

$$A_{21} = B_{21} \frac{8\pi h \nu^3}{c^3},$$

N_2, is the atoms per unit volume in energy level E_2, and

ρ_ν, is the energy density of such photons and can be described by the Eq;

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \left(\frac{1}{\exp(h\nu/KT) - 1} \right)$$

Substituting for, A_{21} and ρ_ν Eqs, in the ratio Eq., then gives

$$R = \exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - 1$$

$$R \simeq \exp\left(\frac{6.63 \times 10^{-34}\ J.s \times 4.74 \times 10^{14}\ s^{-1}}{1.38 \times 10^{-23}\ J.K^{-1} \times 370\ K} \right)$$

$$R \simeq e^{61.5}$$

$$R \simeq 5 \times 10^{26}$$

2.2 In a material at 300 k two energy levels have a wavelength separation of 1 μm. Determine

(a) the ratio of upper to lower level population densities when the material is in thermal equilibrium.

(b) the effective temperature when the levels are equally populated.

(c) the effective temperature when the upper level is twice as densely populated as the lower.

Solution:

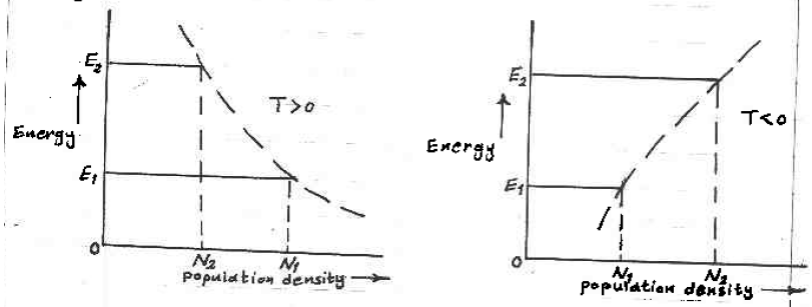
At normal room temperature, the lower energy level N_1 in a material is more densely populated than a higher energy level N_2 according to the Boltzmann equation as

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{e^{-E_1/kT}}{e^{-E_2/kT}} = e^{(E_2 - E_1)/kT}$$

or

$$T = \frac{(E_2 - E_1)}{k \ln (N_1 / N_2)}$$

and Since $E_2 > E_1$ and $N_1 > N_2$, the temperature is positive as illustrated in Fig.



However, it is possible under certain conditions to make $N_2 > N_1$ with $E_2 > E_1$. This is known as population inversion and from the expression for T above, it will be seen that T has a negative value and the effect is therefore equivalent to a negative temperature. This is illustrated in Fig.

(a) $$\frac{N_2}{N_1} = \frac{e^{-E_2/kT}}{e^{-E_1/kT}}$$

and for transitions between energy levels $\lambda = hc/(E_2 - E_1)$. Hence

$$\frac{(E_2 - E_1)}{kT} = \frac{hc}{\lambda kT} = \frac{6.626 \times 10^{-34}\ J\,s \times 3 \times 10^{8}\ m\,s^{-1}}{10^{-6}\ m \times 1.38 \times 10^{-23}\ J\,K^{-1} \times 300\ K} = 48.01$$

with $$N_2/N_1 = e^{-48.01} \simeq 10^{-21}$$

(b) $$N_2/N_1 = e^{-(E_2 - E_1)/kT} = 1$$

or $$\frac{-(E_2 - E_1)}{kT} = \ln 1 = 0$$

and $$T \longrightarrow \pm \infty$$

(c) $$N_2/N_1 = e^{-(E_2 - E_1)/kT} = 2$$

or $$\frac{-(E_2 - E_1)}{kT} = 0.693$$

with $$T = \frac{-6.626 \times 10^{-34}\ J\,s \times 3 \times 10^{8}\ m\,s^{-1}}{10^{-6}\ m \times 1.38 \times 10^{-23}\ J\,K^{-1} \times 0.693} \simeq -21000\ K$$

2.3 For a system in thermal equilibrium calculate the temperature at which the rates of spontaneous and stimulated emission are equal for a wavelength of 10 μm, and the wavelength at which these rates are equal at temperature of 4000 K.

Solution:

At $\lambda = 10\ \mu m$ and $R = 1$

$R \simeq \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) = 1$, then solve for T, to get $T = 2018\ K$

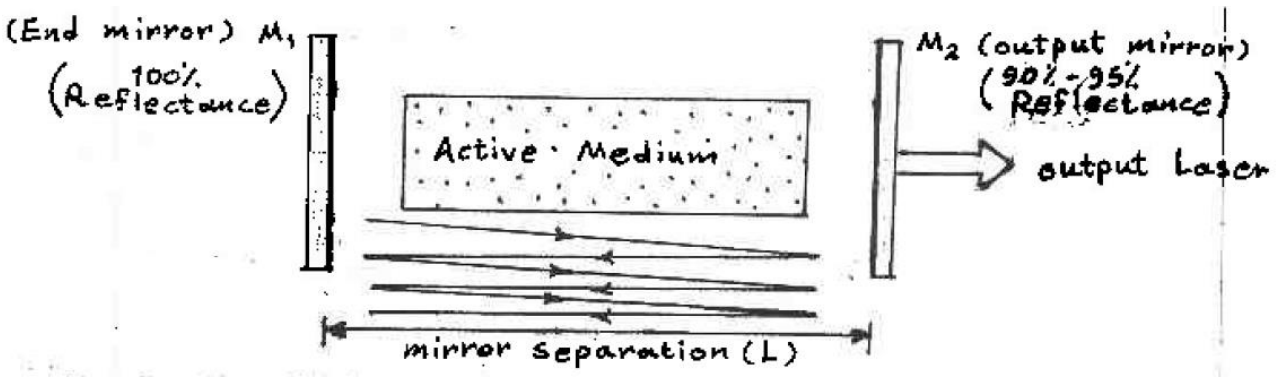
For $T = 4000\ K$ and $R = 1$

$R \simeq \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) = 1$, then solve fo λ, to get $\lambda = 5.2\ \mu m$

20

محاضرة3- المرنان الضوئي Optical Resonator

المرنان الضوئي جهاز يلعب دوراً مهماً في عملية توليد الليزر، وهو يـالف من مجموعة من المرايا المرصوصة داخل الوسط الليزري ليزود الليزر بـتغذية ضوئية خلفية. تقوم المرايا بعكس الفوتونات المتولدة في الوسط لتنعكس عدد من ملايين من المرات في الثانية ذهاباً واياباً بين المرآة الخلفية التي تكون عاكسة للضوء بنسبة 100% والمرآة الأمامية تتراوح نفاذيتها بين (5%-1%). يسمى المرنان ايضاً بالفجوة الضوئية Optical cavity. الغرض الرئيسي من استخدام المرنان هو ان معدل كسب الضخ Pumping gain من الوسط الفعال يكون قليل عادة، لذلك يكون مقدار التكبير (التضخيم) للشعاع الضوئي المار خلال الوسط اقل ما يكون. لذا فإن وضع الوسط الفعال بين مرآتين سوف يزيد من انعكاسات الضوء وبالتالي زيادة كمية الاشعاع الضوئي لوحدة الزمن وبالتالي زيادة مقدار التضخيم لمئات المرات مما يزيد الكسب وبالتالي يعمل على توليد الليزر. الشكل 3-1 ادناه يمثل تركيب المرنان.

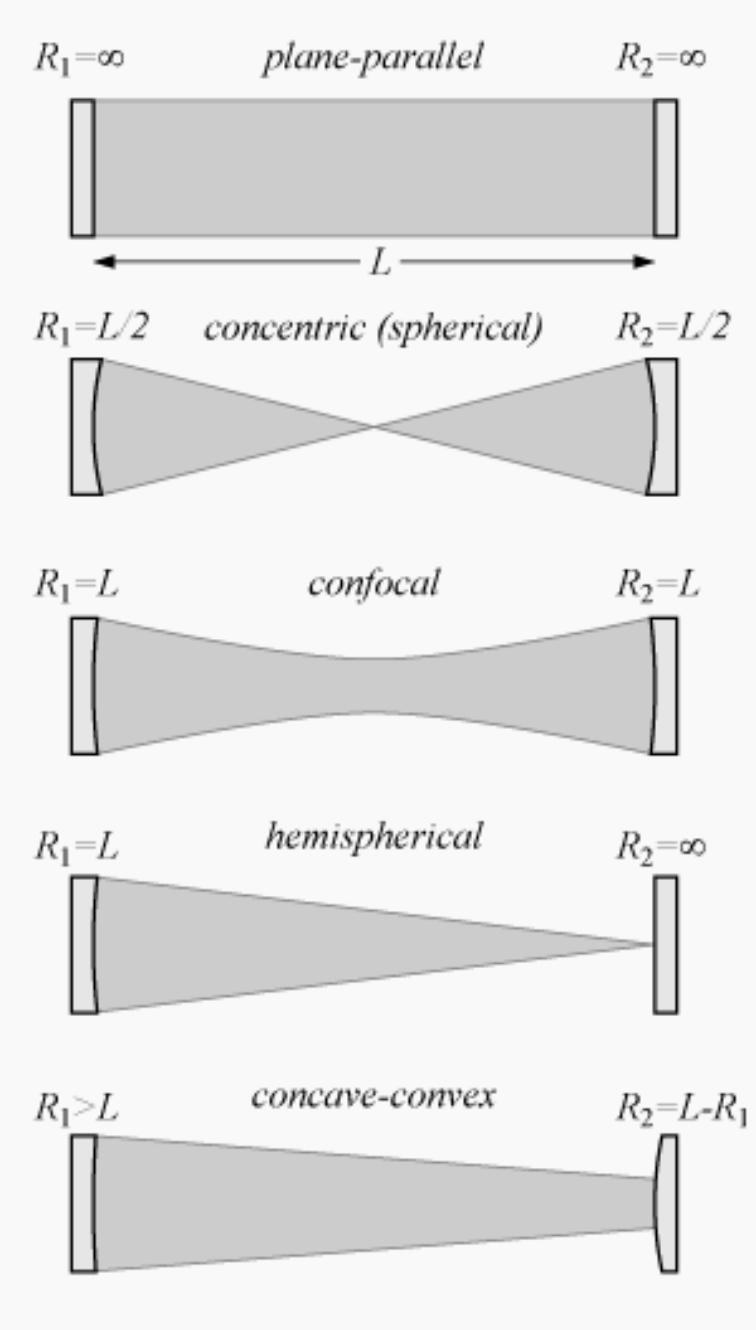


شكل 3-1 تركيب المرنان

انواع المرنان

تتعدد تشكيلات المرنان تبعاً لطبيعة التطبيق المستخدم فيه جهاز الليزر وكفاءته. فالمرنان في ابسط اشكاله يتألف من مرآتين مستويتين متوازيتين تسمى (مرنان فاري بيروت) وهو المبين في الشكل (3-1) اعلاه.

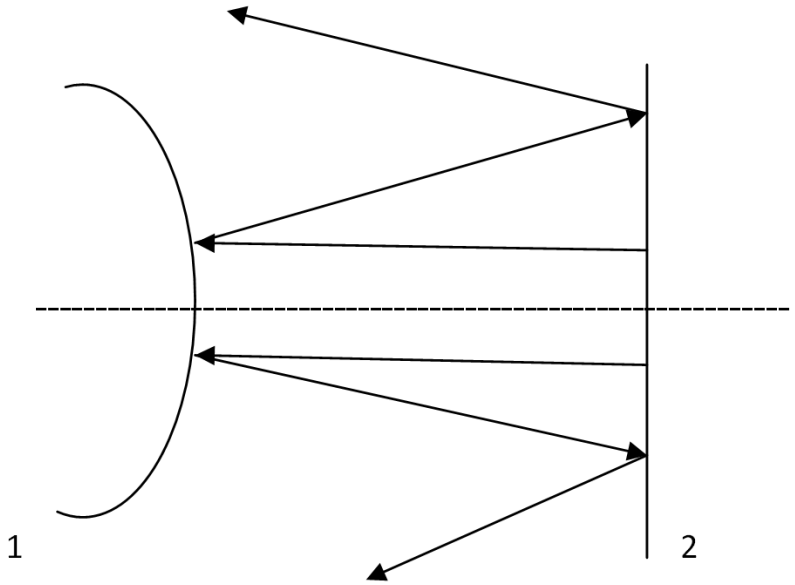
فعلى سبيل المثال اذا استبدلت المرآتان المستويتان بمرآتين كرويتين مقعرتين مفصولة بمسافة قريبة جداً الى نصف قطر التكور للمرآتين، فسوف نحصل على المرنان **متحد البؤرة**. نقاط اتحاد البؤرة تكون تقريباً كلاهما واقعة على محور مركز التكور بين المرآتين. اذا تم استبدال احدى المرآتين الكرويتين بمرآة مستوية، فإن الفجوة (المرنان) في مثل هذه الحالة تسمى بالفجوة نصف الكروية، او نصف متحدة المركز. كلا النوعين الاخيرين من تشكيلات المرنان تمثل طريقة اسهل للتركيب وانتاج الليزر مما في المرايا المستوية. فجوات الليزر يمكن ان تكون مستقرة، شبه مستقرة او غير مستقرة اعتماداً على قابلية الشعاع للانعكاس بالقرب من المحور البصري نسبياً. الشكل (3-2) يوضح انواع فجوات الليزر (تراكيب المرنان).



شكل (3-2) التراكيب المختلفة للمرنان

استقرارية المرنان :

ان المرنان الكروي بصورة عامة يحوي مرآتين كرويتين اما ان تكون R نصف قطر تكور المرآة موجباً للمرآة المقعرة وسالباً للمحدبة وصفراً للمستوية وهذا ما يؤثر على خسارة الحيود وعدد صيغ التذبذب وترددها وسعتها وبذلك يكون المرنان أما مستقر والذي يكون فيه تقعر المرآتين بشكل يحفظ فيه الضوء متمركزاً بالقرب من محور المرنان , أما المرنان غير المستقر ففيه تكون أشعة الضوء تواصل حركتها بعيداً عن محور المرنان فينتج عنها خسارة والشكل رقم (3-3) لمرنان غير مستقر .



شكل (3-3) مخطط مبسط للمرنان غير المستقر

ان استقرارية المرنان تخضع للمقادير R_1,R_2,L والشرط هو :

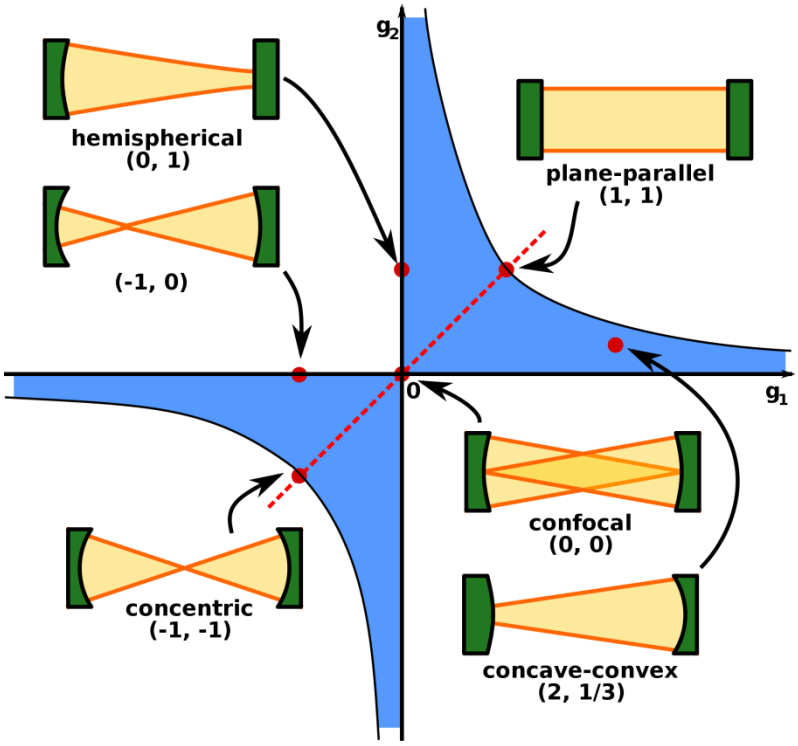
$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad \ldots\ldots(3-1)$$

اذ ان g_1

$$g_1 = 1 - L/R_1 \quad \ldots\ldots(3-2)$$

$$g_2 = 1 + L/R_2 \quad \ldots\ldots(3-3)$$

ويمكن تمثيل شرط الأستقرار بمخطط يعرف بمخطط الأستقرار كما يوضحه الشكل (3-4) , تكون فيه g_1 على محور السينات و g_2 على محور الصادات , ثم نرسم منحنيي الحدود $g_1g_2 = 1$ والمناطق المظللة تحقق الشرط (تخضع لمرنان مستقر) وخارج المنطقة المظللة تخضع لمرنان غير مستقر . أما الخط المستقيم المنقط والذي يصنع زاوية مقدارها (45^o) مع محوري (g_1) و (g_2) فيمثل أعداد المرنان التي تملك مرآتيهما نصف قطر تكور متساوي , ويظهر الشكل انواع المرنان وموقع نقاط الاستقرار العظمى لكل نوع .



شكل (3-4) مخطط الاستقرار للمرنان

مثال/ ابحث استقرارية مرنان كروي ذا مرآتين بنصف قطر تكور (R) احداهما مقعرة والأخرى محدبة , اذا كانت المسافة بينهما (L) كالآتي : 1. L=2R 2. L=R 3. L=R/2

الحل/

1. $g_1g_2=(1-L/R_1)(1+L/R_2)= (1-2R/R)\ (1+2R/R)= -3$

$$\therefore g_1g_2 < 0$$

فالمرنان غير مستقر

2. $g_1g_2=(1-L/R_1)(1+L/R_2)= (1-R/R)(1+R/R)=0$

المرنان مستقر حدياً

3. $g_1g_2=(1-R/2R)(1+R/2R) =(1/2)(3/2)=3/4$

المرنان مستقر

اسئلة ومسائل

1:/ مرنان يتألف من مرآة محدبة نصف قطرها R_1 يساوي متر ومرآة مقعرة نصف قطرها R_2 يساوي 1.5 m , ما هو مدى القيم التي يمكن أن تتخذها المسافة بين المرآتين ليبقى هذا المرنان مستقراً ؟

2 :/أعطيت لك مرآتين بنصفي قطري تكور $r_1=50cm$ و $r_2=100\ cm$, احسب المسافات بين المرآتين والتي تعطي استقراراً حدياً للمرنان وما هو مدى المسافة بين المرآتين لكي يكون المرنان مستقراً.

3 :/ ما الفرق بين التشاكه الفضائي والزمني ؟ ومت يكون التشاكه تاماً ؟

4 :/ اثبت بالمعادلات ان الليزر أسطع من الشمس .

5 :/ أي صفة لليزر تحدد استخدامه في قياس بعد القمر عن الأرض ؟ كيف؟

6:/ شعاع ليزر ايون الاركون ذو الطول الموجي (488nm) سقط على سطح مادة تمتلك دالة شغل مقدارها (2.2Ev).احسب اعظم طاقة حركية للالكترونات المنبعثة؟

نهاية المحاضرة

عامل الجودة (النوعية) للمرنان

عامل النوعية للمرنان يعرف بأنه قابلية الفجوة المرنان (الفجوة البصرية) على خزن الطاقة الكهرومغناطيسية بداخله.

عامل النوعية يتناسب مع نسبة الطاقة المخزونة داخل الموجة الواقفة والطاقة الضائعة من الموجة خلال مسار كامل للشعاع بين المرايا

عامل النوعية العالي يعني ان الطاقة تخزن بشكل افضل داخل الفجوة

اما اذا كان عامل النوعية واطئ فهذا يعني ان الطاقة تشع من الفجوة بصورة سريعة

كمثال على ذلك، عندما تكون كلتا المرآتين تمتلك انعكاسية عالية، فهذا معناه ان قيمة معامل النوعية عالية لهذا المرنان

اما عندما تكون مرايا المرنان واطئة الانعكاسية، فإن الاشعاع سوف يشع خلال هذه المرآة، ويكون معامل النوعية واطيء

عامل النوعية للمرنان البصري يعتمد على التردد الرنيني ν_o والمعدل الزمني للقدرة الضائعة I لكل رحلة ذهاب واياب للشعاع، وزمن الرحلة T_{rt}.

$$Q = \frac{2\pi\nu_o T_{rt}}{I}$$

محاضرة4- الضخ في منظومات الليزر

الضخ: هو عملية ضخ ذرات المادة من المستويات ذات الطاقة الواطئة الى المستويات الأعلى. وتعتمد طريقة الضخ للمنظومة على :-

1. طبيعة الوسط الفعال (صلب، سائل او غازي).
2. نمط التشغيل (مستمر او نبضي).
3. طبيعة عنصر الضخ (كهربائي، كيمياوي او ضوئي).
4. عرض نطاق (طيف) الامتصاص لشعاع الضخ من قبل الوسط الفعال الذي يجب ان يمتص الاشعاع بشكل جيد.

طرق الضخ:

هنالك طرق ضخ مختلفة تختلف باختلاف مصدر الطاقة اللازم لتوليد التأهيل العكسي لمستويات الطاقة او نطاقها للذرة او الجزيئة او الايون ضمن احدى خطط الضخ المستخدمة. فللحصول على انبعاث محفز في مدى الضوء المرئي لابد من توفير التأهيل العكسي لمستويي طاقة في الوسط الفعال المطلوب اثارته. ويتم هذا وفق خطة ضخ معينة لضخ االطاقة من مستوى طاقة واطئ الى مستوى طاقة اعلى. ومن اهم طرق الضخ :-

1. الضخ البصري:

ويستخدم مصدراً للموجات الكهرومغناطيسية (مصدر ضوئي) ذا قدرة عالية وهي الطريقة المعتمدة في ليزر الحالة الصلبة وليزر الحالة السائلة.

حيث يسلط ضوء ذو شدة عالية من مصباح يحتوي على غاز معين (غاز الزينون، الكربتون او النيتروجين) على المادة المراد تهيجها من مستوى طاقة الاوطأ الى الاعلى. ويعتمد استعمال نوع الغاز في المصباح على مستويات الطاقة المراد تهيجها ويوضع المصباح حول المادة الفعالة.

بالاضافة الى ماورد اعلاه، يمكن ان يتم الضخ البصري باستخدام ليزر ذو طول موجي معين للضخ للحصول على ليزر ذي طول موجي يختلف عن الليزر الضاخ، ومثال على ذلك ليزر الصبغة Dye laser (اذا ان ليزر الصبغة يضخ باستعمال ليزر الاركون ايون).

2. التفريغ الكهربائي:

وتتضمن استخدام الطاقة الكهربائية في عملية التفريغ الكهربائي في اكثر حالات ليزر الغاز كذلك يعتمد استخدام الجهد الكهربائي في ليزر أشباه الموصلات. تستعمل هذه الطريقة لتهيج الغازات اذ يوضع الغاز بين قطبين كهربائيين ويسلط جهد كهربائي عال عليه وعند انتقال الالكترونات من القطب الاول الى القطب الثاني تصطدم

بالذرات او الجزيئات المكونة للغاز مما يؤدي الى تهيج هذه الذرات ورفعها من المدارات السفلى الى المدارات العليا،والمثال على ذلك ليزر ثاني اوكسيد الكاربون.

3. الضخ الكيمياوي:

حيث يشكل التفاعل الكيمياوي بين مكونات الوسط الفعال اساس توفير الطاقة لتهيج الذرات في عمل الليزر الكيمياوي. فعند مزج مادتين كيميائيتين وتفاعلهما تتكون ماده جديدة في حالة متهيجة والمثال على ذلك ليزر فلوريد الهيدوجين .كما ان الضخ الكيمياوي يمكن ان يعمل بكفاءه عالية تصل الى 300%.

وعلى العموم يمكن ان تكون عملية ضخ الطاقة على شكل نبضات او بشكل مستمر بالاعتماد على

1. تقنية مصادر الاثارة الشديدة القدرة المتوفرة تجارياً.
2. مقدار الطاقة التي يتطلبها الوسط الفعال لبدء عملية الانبعاث المحفز حسب خطة الضخ التي تناسب ترتيب مستويات الطاقة لذراته.

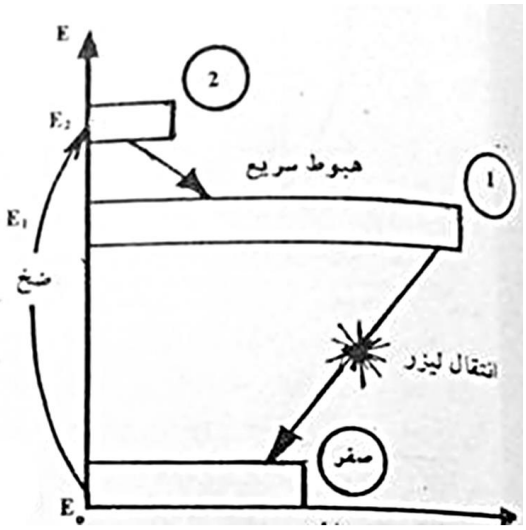
وان عملية الضخ باستخدام مصدر نبضي يؤدي الى كون نتاج الليزر نبضياً ايضاً. كما يمكن الحصول على نتاج ذي موجة مستمرة عند اجراء عملية ضخ الطاقة بصورة مستمرة.

خطط الضخ

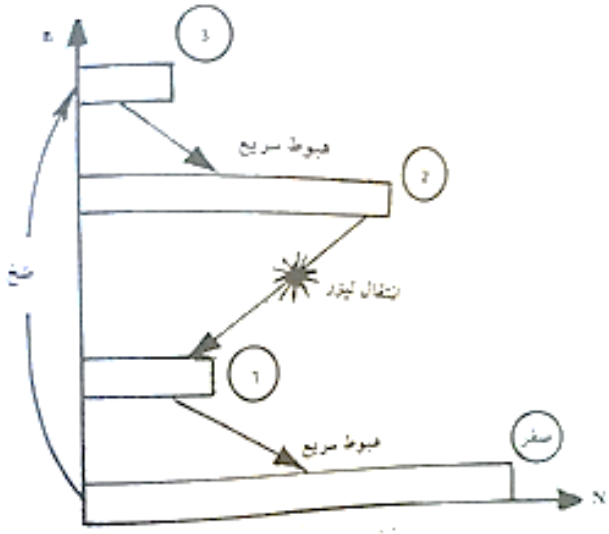
تتضمن خطط الضخ الكيفية التي يتم ضخ الذرات بموجبها من المستوى الاوطئ الى المستوى الاعلى للطاقة لتحقيق التأهيل العكسي.

لايمكن تحقيق التأهيل العكسي بمقدار يتجاوز القيمة الحرجة لمستويين ضمن هذا المخطط لتضخيم الاشعاع عن طريق الانبعاث المحفز، بواسطة نظام ذري ذو مستويين للطاقة فقط. لذلك تستخدم انظمة ضخ ذات ثلاثة او اربعة مستويات للطاقة لتوليد الليزر. والسبب الرئيسي هو ان استخدام مستويي طاقة فقط يولد حالة اشباع، والتي عندها يتساوى تأهيل المستويين ذات العلاقة ويصبح الوسط شفافاً للاشعاع المستخدم.

فإذا تم اختيار ثلاثة مستويات سمي الضخ ثلاث، وسمي الليزر ليزر ذو ثلاثة مستويات، انظر الشكل (4-1-أ)، ترفع الذرات من المستوى الارضي E_o الى E_1. وفيه يتم اختيار الوسط بحيث يكون $\tau_1 >> \tau_2$، وبالتالي عند وصول الذرات الى المستوى E_2 فإنها تهبط بسرعة إلى E_1. وبالتالي يتم تغذية E_1 من E_o عبر E_2 فيولد عندئذٍ الانتقال من E_1 الى E_o اشعاع الليزر المطلوب. ومن امثلة هذا النوع من الليزر ليزر الياقوت.



شكل (4-1-أ) خطة الضخ (التأهيل العكسي) لنظام ذي مستويات ثلاث.



شكل (4-1-ب) خطة الضخ (التأهيل العكسي) لنظام ذي اربعة مستويات.

اما في الضخ ذي الاربعة مستويات، فإن الذرات ترفع بالضخ من E_o إلى E_3 ، ويتم اختيار الوسط الفعال بحيث يهبط إلى E_2 وكذلك هبوطاً سريعاً من E_1 إلى E_o.

وبذلك يوفر تأهيلاً عكسياً بين المستوى E_2 كمستوى اعلى والمستوى E_1 كمستوى اوطأ، حيث يولد الانتقال بينهما اشعاع الليزر المطلوب، انظر الشكل (4-1-ب). مثال على هذا النوع من الضخ ليزر النديميوم.

س/ لماذا تستخدم خطة الضخ رباعية المستويات مع وجود خطة ضخ ثلاثية قادرة على تحقيق التأهيل العكسي، وايهما افضل الضخ الرباعي ام الضخ الثلاثي؟

ج/ ان التأهيل العكسي في خطة الضخ ذي الاربعة مستويات ينفذ بسهولة اكثر من استخدام خطة الضخ ذي الثلاثة مستويات. لأن القدرة المطلوبة في الضخ الرباعي اقل مما في الضخ الثلاثي.

س/ وضح فيزيائياً سبب تفضيل الضخ الرباعي على الضخ الثلاثي في توليد الليزر.

ج/ حسب توزيع بولتزمان تكون جميع الذرات تقريباً قبل الضخ في الحالة الارضية. فإذا فرضنا بأن N_t هي الكثافة العددية للوسط، فإن هذا العدد سيكون في الحالة الأرضية. عند استخدام ضخ ثلاثية المستويات، فعند الضخ من المستوى E_o الى المستوى E_1 عبر E_2 فإن الاخير يبقى فارغاً تقريباً بسبب سرعة هبوط الذرات منه الى المستوى E_1. ففي هذه الحالة يجب رفع نصف N_t الى المستوى E_1 عبر المستوى E_2 لكي يتساوى تأهيله مع المستوى الارضي E_o. بعد هذا يكون وصول اية ذرة اضافية إلى المستوى E_1 اشارة إلى تحقيق التأهيل العكسي.

س/ هل يمكن استخدام اكثر من اربعة مستويات للضخ؟

ج/ نعم يمكن.

اما عند استخدام خطة ضخ رباعية المستويات، فإذا كان المستوى E_1 فارغاً في البداية فإن اي ذرة تصعد الى المستوى E_2 عن طريق المستوى E_3 ستحقق تأهيلاً عكسياً.

قدرة الضخ

لحساب قدرة الضخ اللازمة للوصول الى العتبة يجب حل المعادلات التي تعبر عن معادلات التغير في تأهيل مستويات الطاقة لوسط الليزر. سيتم استخدام خطة الضخ ذات الاربعة مستويات لاشتقاق المعادلات.

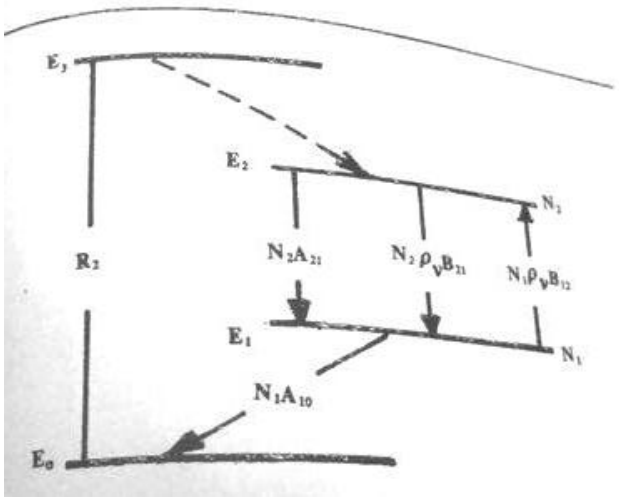
نفرض ان طاقة المستوى E_1 اقل بكثير من KT، لغرض اهمال تأثير زيادة درجة الحرارة على مقدار التأهيل. كذلك نفرض ان الضخ انتقائي ويحدث فقط للمستوى E_3 وبمعدل R_2، لذا يكون معدل التغير في تأهيل المستويين (1) و(2) والذي يحدث بينهما انتقال الليزر على النحو التالي:

$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - N_2 A_{21} + N_1 \rho_v B_{12} - N_2 \rho_v B_{21}$$

$$\frac{dN_1}{dt} = N_2 A_{21} + N_2 \rho_v B_{21} - N_1 \rho_v B_{12} - N_1 A_{10}$$

فإذا تم الضخ بمعدل ثابت فإن معدلات التغير اعلاه تساوي صفر.

اي ان $dN_1/dt = dN_2/dt = 0$. لذا فإن حل المعادلتين اعلاه للكميتين يعطي:



$$N_1 = R_2 / A_{10}$$

$$N_2 = R_2 \left(1 + \frac{\rho_v B_{21}}{A_{10}}\right) / (A_{21} + \rho_v B_{12})$$

لذا يكون الفرق بين تأهيل المستويين بالمقدار:

$$N_2 - N_1 = R_2 \left(\frac{1 - A_{21}/A_{10}}{A_{21} + \rho_\nu B_{21}} \right)$$

وهكذا يتبين وجوب ان يكون A_{21} اقل من A_{10} لتحقيق حدوث التأهيل العكسي، وهذا الشرط يكافئ كون τ_2 اكبر من τ_1، اي ان المستوى الاعلى لانتقال الليزر يكون متوسط زمن العمر له اكبر من المستوى الاوطأ، وهذا موجود في معظم انواع الليزر، اي ان:

$$1 \simeq \left(1 - \frac{A_{21}}{A_{10}} \right)$$

وعندما تكون قدرة الضخ غير كافية للوصول الى العتبة، فإن مقدار التأهيل العكسي الناتج لا يكفي لدعم التضخيم في الوسط، وبهذا يمكن اهمال المقدار ρ_ν (كثافة الطاقة) لأنها تظهر على شكل انبعاث ذاتي. وبالتالي يكون لدينا:

$$N_2 - N_1 \approx \frac{R_2}{A_{21}}$$

وعند العتبة تصح هذه المعادلة ايضاً فتكون

$$N_{th} = N_2 - N_1 \approx \frac{R_2}{A_{21}} = R_{th}\tau_2$$

$$R_{th} = \frac{N_{th}}{\tau_2}$$

ومن المعلوم ان التأهيل العكسي يزداد بزيادة قدرة الضخ حتى وصول العتبة، عندها تحصل حالة الاشباع فلا يمكن زيادة التأهيل العكسي مهما زيدت قدرة الضخ (انظر الشكل 4-2) . وبما ان الطاقة اللازمة لضخ ذرة واحدة الى المستوى (2) تساوي (E_3) ، فلرفع العدد N_{th} المتواجد في وحدة الحجم نحتاج الى قدرة P_{th} وهذه تعطى بالمقدار

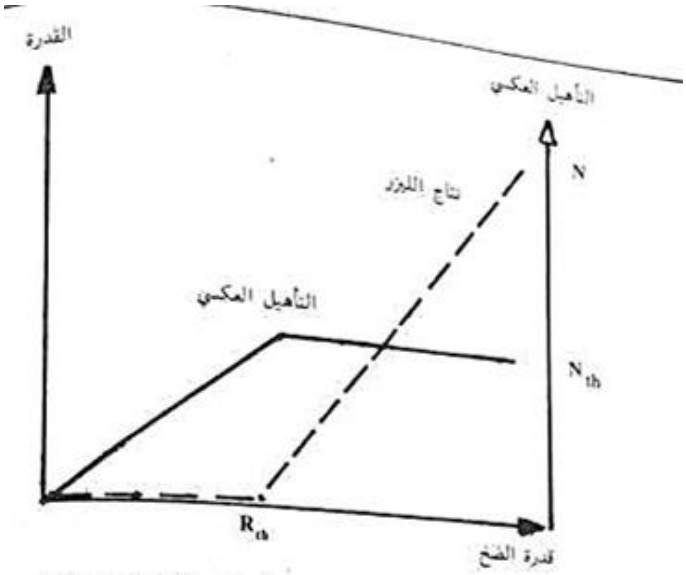
$$P_{th} = \frac{E_3 N_{th}}{\tau_2}$$

ولكن

$$N_{th} = \frac{G_{th}\,\lambda\,\Delta\nu}{B_{21} h n}$$

حيث: G_{th} الكسب عند العتبة، n معامل الانكسار للوسط. اما B_{21} فهو معامل انشتاين ويعطى بالعلاقة

$$B_{21} = \frac{\lambda^3}{8\pi\, h\, \tau_2}$$



$$P_{th} = \frac{E_3\, 8\pi\, \nu^2\, G_{th}\, \Delta\nu\, n^2}{c^2}$$

وفي مثل هذا الوضع يكون الربح الناتج عن التأهيل العكسي مساوياً الى الخسارة في الجهاز. فإذا ازدادت قدرة الضخ P عن المقدار P_{th} فإن هذا يمكن ان يؤدي الى زيادة في المقدار $\rho_\nu B_{21}$. ولكي يبقى المقدار N_{th} ثابتاً وبالاعتماد على العلاقة :

$$N_2 - N_1 = R_2 \left(\frac{1 - A_{21}/A_{10}}{A_{21} + \rho_\nu B_{21}} \right)$$

نحصل على :

$$N_{th} = R_2\left(\frac{1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}}{A_{21} + \rho_\nu\, B_{21}}\right)$$

$$= \frac{R_{th}}{A_{21}} = \frac{R_2}{A_{21} + \rho_\nu\, B_{21}}$$

وبهذا تكون

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}}{B_{21}}\left(\frac{R_2}{R_{th}} - 1\right)$$

وبما ان قدرة نتاج الليزر تتناسب طردياً مع ρ_ν المتوفرة في الوسط، وكذلك مع R_2، لذا يمكن التعبير عن قدرة نتاج الليزر W على النحو التالي:

$$W = W_o\left(\frac{P}{P_{th}} - 1\right)$$

حيث ان W_o مقدار ثابت.

س/ قارن بين الضخ الثلاثي والرباعي.

جـ/

نظام المستويات الثلاثية	نظام المستويات الرباعية
يتكون من ثلاث مستويات	يتكون من أربع مستويات
يتطلب ضخ نصف عدد الذرات من المستوي الأرضي إلى المستوي المتهيج للحصول على التوزيع المعكوس	يتطلب ضخ عدد قليل من الذرات من المستوي الأرضي إلى المستوي المتهيج للحصول على التوزيع المعكوس
المستوي الأرضي هو نفسه المستوي الليزري السفلي	المستوي الأرضي ليس هو المستوي الليزري السفلي
يحدث الفعل الليزري بين E_2 و E_1	يحدث الفعل الليزري بين E_3 و E_2
يحتاج إلى مصدر لطاقة ضخ عالية	لا يحتاج إلى مصدر لطاقة ضخ عالية
عمر المستوي E_3 صغير جداً	عمر المستوي E_3 صغير جداً
عمر المستوي E_2 طويل	عمر المستوي E_2 طويل نسبياً
يحدث انتقال سريع بين E_3 و E_2	يحدث انتقال سريع بين E_3 و E_2
قانون قدرة الليزر الخارجة هو: $P_L = h\nu(w_p\beta N_1 - A_{21}N_2)$	قانون قدرة الليزر الخارجة هو: $P_L = h\nu(P_2' - w_{21}\Delta N_c)$
أقل كفاءة من نظام المستويات الرباعية	أعلى كفاءة من نظام المستويات الثلاثية
تعتمد قدرة الليزر على: ١. تردد شعاع الليزر (ν) ٢. احتمالية الانتقال المحفز (w_p) ٣. كفاءة المستوي E_2 (β) ٤. احتمالية الانبعاث التلقائي A_{21} ٥. عدد الذرات في المستويين N_1 و N_2	تعتمد قدرة الليزر على: ١. تردد شعاع الليزر (ν) ٢. احتمالية الانتقال المحفز (w_p) ٣. معدل الضخ المؤثر (P'_2) ٤. الفرق في عدد الذرات في المستويين N_1 و N_2 (ΔN_c)
تحت شرط التوازن الحراري تكون N_2 قليلة جداً يمكن إهمالها	تحت شرط التوازن الحراري تكون N_1 و N_2 قليلة جداً يمكن إهمالها
لا يوجد انتقال بين المستوي E_2 والمستوي الأرضي	يوجد انتقال بين المستوي E_1 والمستوي الأرضي

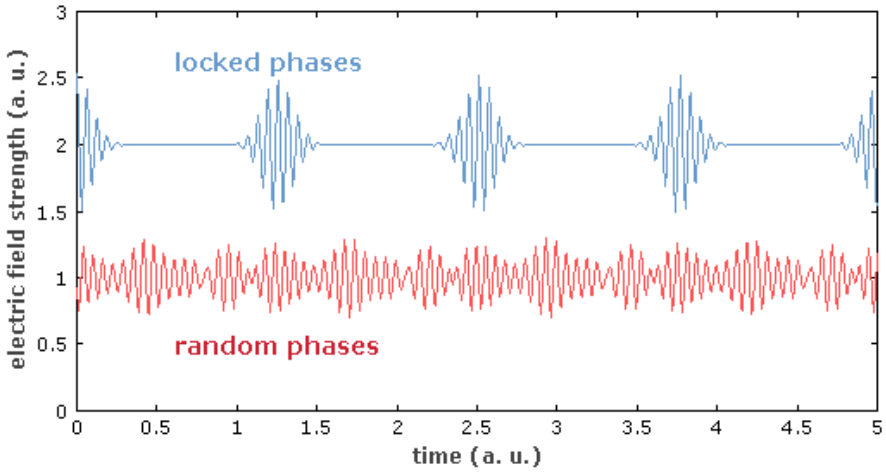
محاضرة5- تقنية اقفال الصيغة

تقنية اقفال الصيغة هي مجموعة من العمليات التقنية التي تستلزم للحصول على اشعة ليزر ذات نبضات عالية القدرة وعلى فترات زمنية قصيرة جداً (امد النبضة يتراوح في مدى البيكو ثانية بينما القدرة الناتجة تصل الى بضع جيكا واط GWatt)، بواسطة.

في الليزر العادي (الغير مقفل الصيغة) يكون نتاج الليزر معرض لتقلبات عشوائية ، بسبب التباين الكبير في صيغ التذبذب للمرنان فيه، بعكس الليزر مقفل الصيغة والذي تكون فيه الانتقالات ذات ترددات منتظمة الاطوار. والشكل (5-1) يبين الفرق بين النوعين المذكورين، في الاعلى الانتقالات في الليزر مقفل الصيغة بينما الجزء الاسفر هو لليزر العادي (غير المقفل الصيغة)

تعطى شدة المجال الكهربائي بداخل المرنان يمكن ان تعطى بالمعادلة الاتية:

$$\vec{E}(r,t) = E_o\, \vec{\mu}(r)\, e^{i\omega t}$$



شكل (5-1) الفرق بين الانتقالات في الليزر المقفل الصيغة والليزر العادي

ولعدد (q) من صيغ التذبذب ستكون محصلة شدة المجال الكلية كدالة للزمن هي:

$$E(t) = \sum_{n=0}^{q-1} (E_o)_n \quad e^{i(2\pi\nu_n t + \delta_n)} \quad \ldots\ldots (5-1)$$

حيث تمثل $(E_o)_n$ سعة صيغة التذبذب (n)، ν_n ترددها و δ_n طورها.

فإذا فرضنا ان سعة التذبذب ثابتة لجميع الصيغ، ستكون شدة الضوء المنبعث هي:

$$I = qE_o^2 \quad \ldots\ldots(5-2)$$

وعند استخدام تقنية تعمل على الحفاظ على طور نسبي ثابت فيما بينها (اقفال في الطور) وليكن δ، اي ان $(\delta_n = \delta)$ ففي مثل هذه الحالة سيتميز الليزر بنوع من التكرار المنتظم، اي سيكون نتاج ذو شكل نبضي منتظم وبفاصلة بين نبضة واخرى ذات نبضة عالية كما في الشكل اعلاه (الجزء الاعلى). يسمى مثل هذه الترتيب (ليزر الصيغة المقفلة). وفق هذه التقنية تصبح معادلة (5-1) كالاتي:

$$E(t) = E_o\, e^{i\delta} \sum_{n=0}^{q-1} e^{2\pi\, i\, \nu_n t} \quad \ldots\ldots(5-3)$$

التردد ν_n لعدد n من الصيغ يمكن ان يكتب $(\nu - n\Delta\nu)$ حيث ν تمثل تردد اعلى صيغة للتذبذب داخل المرنان، و $\Delta\nu$ هي الفاصلة الترددية بين اي صيغتين متعاقبتين $\Delta\nu = \frac{C}{2L}$.

اذن معادلة (5-3) يمكن ان يعاد كتابتها كالاتي:

$$E(t) = E_o\, e^{i\delta} \sum_{n=0}^{q-1} e^{2\pi\, i\, (\nu - n\Delta\nu)t} \;=\; E_o\, e^{i(\delta + 2\pi\nu t)} \sum_{n=0}^{q-1} e^{-i\pi\, hct/L}$$

$$E(t) = E_o\, e^{i(\delta+2\pi\nu t)}(1 + e^{-i\Phi} + e^{-2i\Phi} + \cdots + e^{-i(q-1)\Phi} \ldots(5-4)$$

حيث ان:

$$\Phi = \frac{\pi ct}{L}$$

مجموع الحدود في المعادلة (5-4) يمثل مسلسلة عددية يمكن التعويض عن مجموعها بالمقدار $\frac{\sin\frac{q\Phi}{2}}{\sin\frac{\Phi}{2}}$. وبذلك تكتب المعادلة (5-4) على النحو التالي:

$$E(t) = E_o\, e^{i(\delta+2\pi\nu t)}\, \frac{\sin\frac{q\Phi}{2}}{\sin\frac{\Phi}{2}} \quad \ldots\ldots(5-5)$$

وتعطى شدة الضوء لنتاج الليزر بالمعادلة:

$$I(t) = E(t) \, . E^*(t)$$

وعليه تكون الشدة للصيغة المقفلة كالآتي:

$$I(t) = E_o^2 \; . \frac{\sin^2 \frac{q\Phi}{2}}{\sin^2 \frac{\Phi}{2}} \quad \dots\dots (5-6)$$

والمعادلة الاخيرة تعبر عن شكل الموجة الموضحة في الشكل (5-2-ب) حيث تكون دورية الموجة $(2\pi = \Delta\Phi)$ لشدة الضوء المنبعث I(t)، وفي زمن امده $t = \frac{2L}{c}$ ، وهو الزمن الذي يستغرقه الضوء لرحلة كاملة داخل المرنان. اما القيمة العظمى لشدة الضوء فيمكن الحصول عليها من المعادلة (5-6)، عندما يتحقق الشرط:

$$\frac{\sin^2 \frac{q\Phi}{2}}{\sin^2 \frac{\Phi}{2}} = q^2$$

اي عندما تأخذ Φ قيم صفر او مضاعفات صحيحة للمقدار π.

$$\therefore I(t)_{max} = E_o^2 \; q^2$$

اما القيم التي تؤدي الى المقدار الاقل للشدة او ان يكون مقدارها صفر فهي تحدث عندما يأخذ المقدار $q\frac{\Phi}{2}$ اعداداً صحيحة (لا تتضمن الصفر) للمقدار (π)، اي ان:

$$\Phi = 2p\frac{\pi}{q}$$

او

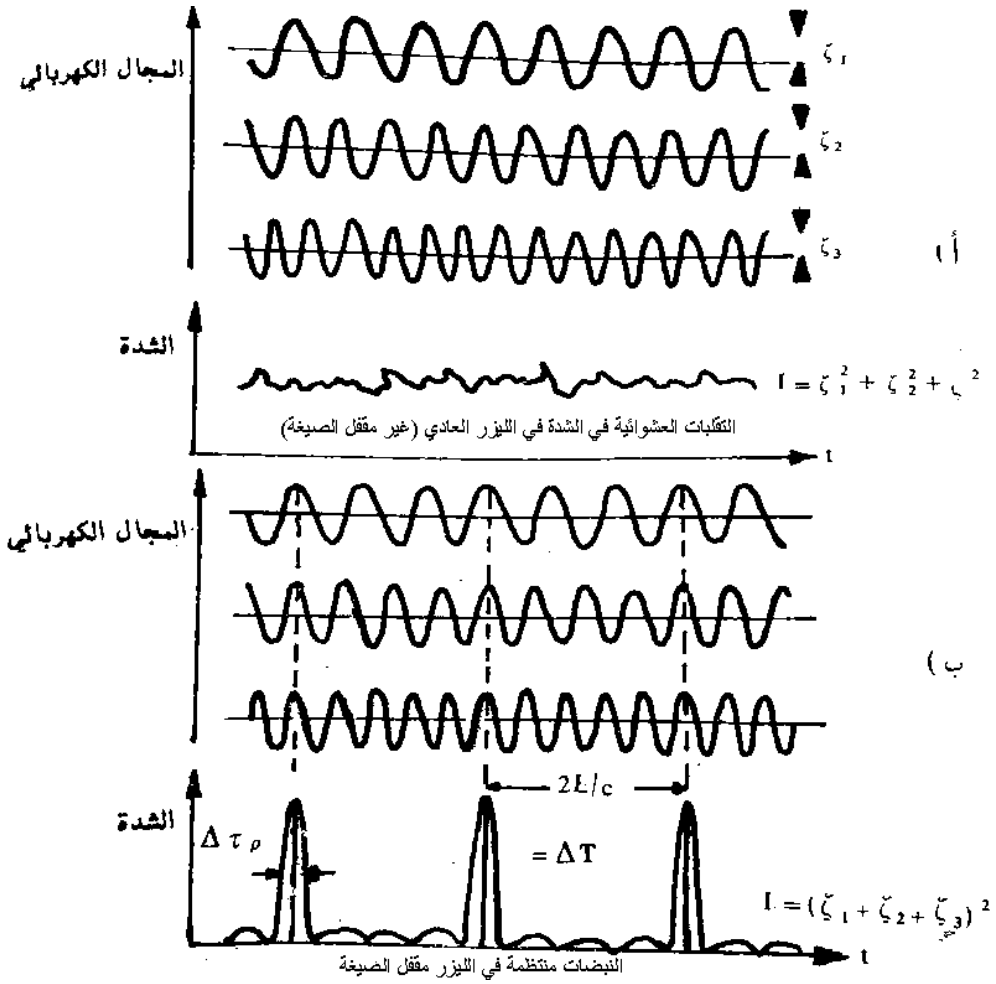
$$\mathrm{t} = \frac{1}{q}\frac{2L}{c}\, p \quad , \quad p = 1, 2, 3, 4, \dots$$

وبهذا يكون الزمن اللازم للوصول الى القمة او الزمن بين النهاية العظمى و الصغرى للشدة (p=1) هو:

$$t = \frac{1}{q}\frac{2L}{c} = \Delta\tau_p$$

ويسمى هذا الزمن بعرض النبضة كما موضح في الشكل (5-2). وهو يساوي تقريباً مقلوب عرض الخط الطيفي لنتاج الليزر.

$$\Delta\tau_p \approx \frac{1}{\Delta\nu}$$



شكل (5-2) (أ) التقلبات العشوائية الناتجة في الشدة في الليزر غير مقفل الصيغة، (ب) النبضات المنتظمة في الليزر مقفل الصيغة.

مما ورد اعلاه يتضح ان ليزر الصيغة المقفلة يتألف من نبضات متعاقبة زمن تكرارها ($\Delta t = \frac{2L}{c}$). اما القدرة لذروة النبضة فتزداد بمقدار (q) عن قدرة الليزر قبل اقفال صيغة التذبذب لليزر.

اما عدد صيغ التذبذب فيساوي النسبة بين الفاصلة الزمنية (Δt) وعرض النبضة الواحدة، اي ان:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau_p} = \frac{\frac{2L}{c}}{\left(\frac{2L}{c}\right)\left(\frac{1}{q}\right)} = q$$

وهذا يعني انه للحصول على قدرة عالية ونبضات قصيرة الأمد، يجب توفر شرطين اساسين اولهما توفر عدد كبير من صيغ التذبذب داخل المرنان، وهذا يعتمد على تعريض الخط الطيفي لانتقال الليزر وكذلك على طول مرنان الليزر. ام الشرط الثاني فهو اضطرار صيغ التذبذب للمحافظة على علاقة طور محدد ثابتة فيما بينها وهو يتحقق عن طريق احدى طريق اقفال الصيغة (اما اقفال الصيغة الفعال او عن طريق اقفال الصيغة المعترض) كما سيتوضح ادناه.

طرق اقفال الصيغة

اقفال الصيغة الفعال	اقفال الصيغة المعترض
1. هو اجبار صيغ التذبذب الطولية ان تتخذ من بعضها البعض طور نسبي ثابت مع الزمن.	1. هو استخدام وسط ماص لانجاز عملية اقفال الصيغة.
2. يتم بواسطة تضمين الخسارة او الربح بمقدار=c/2L	2. يتم بواسطة اختيار صبغة معينة يقل امتصاصها للاشعة الساقطة بزيادة شدة الضوء المسلط.
3. التضمين يتم باستخدام مضمنات كهروضوئية او سمعية-ضوئية كبوابات لاقفال الصيغة.	3. يتم انتخاب صبغة بحيث يقع تردد الليزر ضمن نطاق امتصاصها.

تمت المحاضرة

تمت محاضرات الليزر للكورس الثاني للسنة الدراسية 2015-2016 بعون الله