



الفصل الأول

تفاعل الأشعاع مع المادة

تمهيد لبعض المفاهيم الأساسية

الليزر : LASER : كلمة مأخوذة من عبارة

"Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation."

أي تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المحفز للإشعاع .

يعتبر الليزر واحد من أنجح الحلول ، ويعرف بـ "حل يبحث عن مشكلة". وهو تطبيق أساسي في مختلف المجالات المدنية والعسكرية. حيث يستخدم في الطب والصناعة والاتصالات بالألياف البصرية وتكنولوجيا المعلومات والالكترونيات الاستهلاكية.

نتيجة للتطور العلمي والتكنولوجي السريع الذي شهدناه في مختلف مجالات الحياة البشرية ، والذي أدى إلى ظهور تحديات ومشاكل جديدة نتيجة لهذا التطور ، أصبح من الضروري إيجاد حلول علمية وعملية متقدمة لحل تلك المشاكل والتحديات.

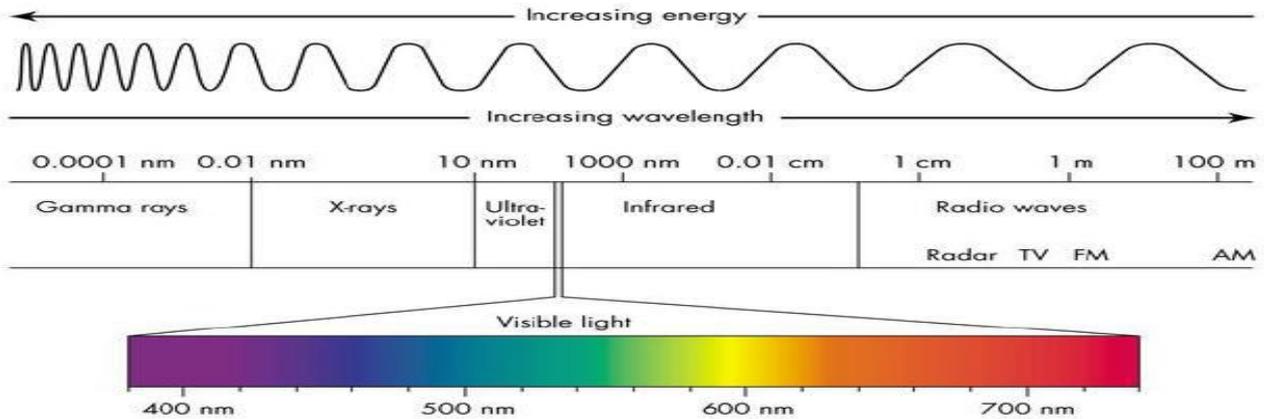


قام ثيودور ميمان بتشغيل أول ليزر في 16 مايو 1960 في مختبر هيوز للأبحاث في كاليفورنيا ، من خلال إضاءة مصباح فلاش عالي الطاقة على قضيب ياقوت ذات أسطح مغطاة بالفضة.

الليزر هو إشعاع كهرومغناطيسي تتساوى فوتوناته في التردد وتتطابق في جبهة الموجة ، حيث تتداخل موجات الفوتونات بشكل بناء في حزمة ذات طاقة عالية مع تماسك (تشاكه) زمني ومكاني وبزاوية انقراج صغيرة جداً. يمكن ترتيب شعاع الليزر الناتج في موجات مستمرة أو نبضات ذات تردد عال ومدة نبض قصيرة جداً. HK حجم بقعة حزمة الليزر تتراوح من عُشر قطر شعرة الإنسان إلى قطر مبنى كبير جداً.

طيف اشعة الليزر والأطوال الموجية

يعتمد لون شعاع الليزر على طول الموجة ، والذي يمكن تغييره بدقة حيث تتراوح الأطوال الموجية التي يمكن الحصول عليها من أشعة الميكروويف (1.25 سم تسمى ميزر) ، والأشعة تحت الحمراء ، والضوء المرئي ، والأشعة فوق البنفسجية ، ثم الأشعة السينية، كما هو موضح في الشكل (1-1).



شكل 1-1 طيف الاشعاع الكهرومغناطيسي

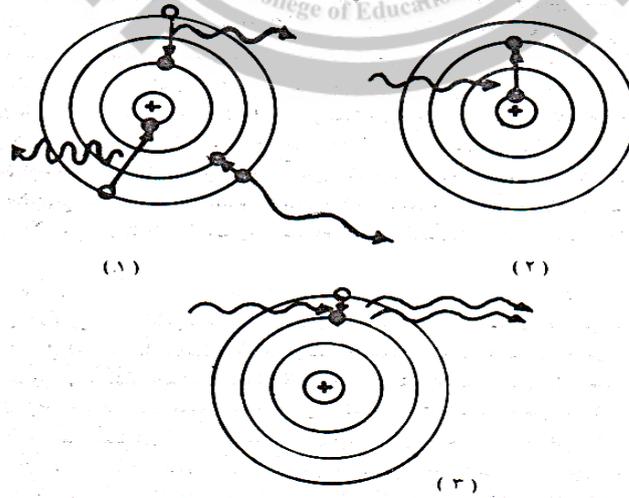


Region	Wavelength λ nm $1nm = 10^{-9} m$	Frequency $f = c/\lambda$ Hz	Energy $1 eV = 1.6 \times 10^{-19} J$ eV(per photon)
Radio	$> 10^8$	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Microwave	$10^8 - 10^5$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infrared	$10^5 - 700$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Visible	700 - 400	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	2 - 3
Ultraviolet	400 - 1	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
X ray	1 - 0.01	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Gamma (γ) ray	< 0.01	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

بنفسجي	نيلي	ازرق	اخضر	اصفر	برتقالي	احمر
400	440	470	530	580	620	700

Table (1-1): The wavelength and energy for several spectrum regions

وضع العالم اينشتاين في بداية القرن العشرين الاساس النظري لعملية انتاج اشعة الليزر ولكن الاستفاده بتطبيقه عمليا لم يأتي الا بعد اربعين عام ، حيث ان الليزر ناتج من عملية الانبعاث المحفز لذرات او جزيئات وسط معين و يبين الشكل 2-1 : (1): ان الذرة او الجزيئة المثيجه تبعث تلقائيا (بدون موثر خارجي) اشعاعا كهرومغناطيسيا عشوائي في الاتجاه والطور من اجل العوده الى وضع الاستقرار الذي تكون فيه طاقة الذرة اقل ما يمكن أي ان الكترون الذرة في مستوى الطاقه الارضي لايفقد ولا يمتص طاقه عند دورانه في هذا المدار تكفي لارتقائه الى مستوى أعلى.



شكل 2-1 : (1) عملية الانبعاث الذاتي العشوائي (2) عملية امتصاص لفوتون ساقط (3) عملية الانبعاث المحفز



ولكي تكون الذرة مهيجة لا بد ان تمتص مقدارا من الطاقة على شكل شعاع كهرومغناطيسي (فوتونات) ينتقل فيه الكترون الذرة من مستوى طاقة اوطأ (المستوى الارضي) الى مستوى اعلى بالطاقة وتسمى تلك **بعملية الامتصاص** لاحظ الشكل 1-2 : (2). وهناك طرق مختلفة لتحريض او لاثارة الالكترتون في الذرة كالتصادم المتكرر نتيجة زيادة درجة حرارة الغاز مثلا ، وتدعى طرق التحريض هذه بطريقة الضخ (أي ضخ ذرات المادة من المستويات الواطئة لها عموما الى المستويات الاعلى منها) ومعظم هذه الطرق مستخدمة في عمل انبعاث اشعة الليزر. وعندما تكون الذرة متهيجة فاتها ستحاول العودة الى موضع الاستقرار عن طريق انتقال الالكترتون من مستوى طاقه عالي الى مستوى طاقه واطى يصاحبها انبعاث طاقه (فوتونات) لاحظ الشكل 1-2 : (3) تدعى تلك **بعملية الانبعاث** وهي على نوعين :

1- انبعاث تلقائي :

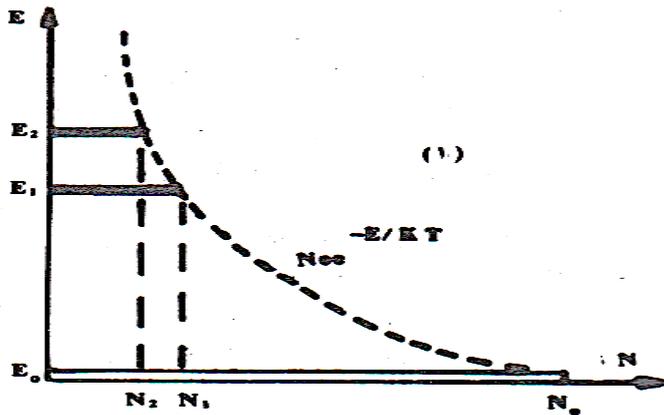
هو الانبعاث الذي يحصل عندما تنتقل الذرة من مستوى طاقه عالي الى مستوى طاقه واطى بصوره تلقائي وبدون مؤثر خارجي ونتيجة للانتقال التلقائي هذا فإن الذرة ستبعث فوتون ذو طاقه مساويه لفرق الطاقه بين المستويين. ان جميع مصادر الضوء التقليديه كمصباح بخار الصوديوم، أو بخار الزئبق تعمل على اساس الانبعاث التلقائي.

2- الانبعاث المحفز

يتم هذا الانبعاث عن طريق تحفيز الذرة وهي في المستوى المتهيج لكي تنتقل الى مستوى طاقة اوطأ ويتم ذلك بواسطة اصطدام هذه الذرة بفوتون له طاقه مساوية تماما الى فرق الطاقة بين المستويين مما يؤدي الى انبعاث فوتون ثان له نفس التردد ونفس الطور للفوتون المحفز. وسنتطرق لاحقا بشيء من التفصيل الى هذين الانبعاثين وصفاتهما . وعموما ان احتمالية حدوث الانبعاث المحفز في وسط ذري او جزيئي في حالة التوازن تكون ضعيفة حيث ان الصعوبه في حالة الموجات المرئية تقع في تأهيل المستوى الذي سيحفز ومع تطور فكرة التأهيل العكسي وتقنية تنفيذه اصبح بالامكان تطبيق فكرة الانبعاث المحفز في مدى الضوء المرئي والحصول على الليزر.

دالة التوزيع لبولتزمان

عندما يكون النظام الذري او الجزيئي لوسط معين في حالة توازن ثرموداينميكي ، مثلا غاز بدرجة حرارة T فان ذرات الوسط (او جزيئاته) تتوزع على مستويات الطاقة وفق دالة توزيع معينة تدعى دالة التوزيع لبولتزمان حيث تتناقص عدد الجزيئات المتواجدة في وحدة الحجم في مستوى ما (يدعى بتأهيل المستوى N) مع الزيادة في طاقة المستوى وكما موضح في الشكل 1-3 . فكلما كانت فاصلة الطاقة بين مستويين اكبر (طول الموجة لها تكون اصغر $E = hv = hc/\lambda$) كلما كان الفرق في تأهيل المستويين اكبر . لمثل هذه الاوساط وفي درجة حرارة الغرفة يمكن اعتبار جميع ذرات الوسط (او جزيئاته) تقريبا في المستوى الارضي (E_0 اوطأ مستوى للطاقة) وان المستويات الاعلى منه تكون شبه فارغة .

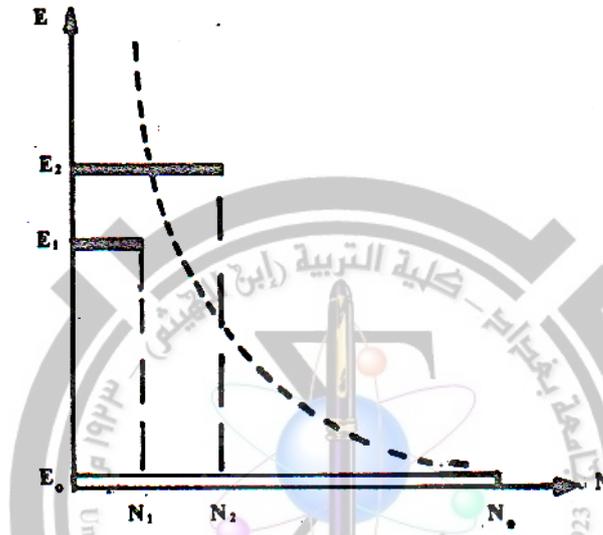


شكل 1-3 التأهيل الطبيعي لمستويات الطاقة حسب بولتزمان



التأهيل العكسي

في الاوساط التي يكون فيها فاصل الطاقة بين مستويات ذراتها او جزيئاتها كبير نسبيا (طول الموجة يقع في المدى المرئي) يكون تأهيل المستوى الاعلى صغير واحتمالية حدوث عملية الانبعاث المحفز واطنة . ولتنشيط هذه العملية بين مستويين للطاقة يجب ضخ الطاقة الى النظام بشكل يجعل تأهيل المستوى الاعلى اكثر من المستوى الاوطأ منه . اي الأخلال بحالة التوازن وبالتالي يتحقق التأهيل العكسي بين المستويين كما في الشكل 1-4. فإذا تم تسليط شعاع كهرومغناطيسي بتردد يناسب فرق الطاقة بين هذين المستويين ستبدأ عملية الانبعاث المحفز وسيتضخم الاشعاع الساقط وعندها لا يمكن تطبيق قوانين الاتزان الثرموداينميكي على هذا النظام .



شكل 1-4 التأهيل العكسي

المرنان البصري

تجويف رنيني الغرض منه تقوية التذبذب وتغذيته والعمل على ديمومته وهو جزء ضروري في جهاز الليزر حيث يوضع الوسط الليزري في داخله . حيث ان ارتداد الاشعة ذهابا وايابا (بسب المرايا المكونة له) يؤدي الى تكوين الموجات الواقفة التي تمنح فرصة تزويد الوسط نفسه بنفسه (التغذية الاسترجاعية) بالفوتونات المطلوبة لعملية الانبعاث المحفز . ولمرنان الليزر تصاميم معينة غير مغلقة وسنتطرق لانواعه ومميزات كل نوع لاحقا .



خصائص شعاع الليزر

1. النقاوة الطيفية *spectral purity* او صفة احادية الطول الموجي
2. التشاكه *Coherence*
3. الاتجاهية *Directionality*
4. السطوع *Luminance*
5. نبضي شديد القصر
6. ذو شدة عالية

Black Body Radiation أشعاع الجسم الاسود

الجسم الاسود عبارة عن تجويف مملوء بوسط عازل متجانس الصفات وجدرانه التي عند درجة حرارة معينة T سوف تبعث اشعاع كهرومغناطيسي باستمرار كما انها تستلم ما يسقط عليها من اشعاع كهرومغناطيسي فاذا تساوى معدل الانبعاث مع معدل الامتصاص يتحقق شرط التوازن عند اي موضع داخل التجويف او عند جدرانه ويطلق على اشعاع هذا التجويف باشعاع الجسم الاسود . معامل الامتصاصية A يعطى بالعلاقة

$$\text{Absorption coefficient } (A) = \text{absorption rate } (a) / \text{emission rate } (e)$$

For black body $A=1$ because $a = e$

يمتاز سطح الجسم الاسود بما يلي :

1. يمتص جميع الاشعة الساقطة عليه
2. يبعث اشعاع بأقصى شدة وبجميع الاتجاهات والاطوال الموجية

تم تطوير نظرية توزيع الطاقة لإشعاع الجسم الأسود من قبل العالم بلانك وظهرت لأول مرة في عام 1901. حيث أفترض بلانك أن الطاقة يمكن أن تمتص أو تنبعث فقط في وحدات منفصلة أو فوتونات محملة بالطاقة

$$E = hv$$

The constant of proportionality is $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

وقد اوضح بلانك أن شدة الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود تعطى بواسطة دالة بلانك B_λ Planck function

$$B_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

where c_1 and c_2 are constants



$$c_1 = 2\pi hc^2 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ Wm}^{-2} \quad \text{and} \quad c_2 = hc/k = 1.44 \times 10^{-2} \text{ mK}$$

وعند رسم B_λ كدالة ذات طول موجي على مقياس خطي ، فإن الطيف الناتج من الشدة أحادية اللون يظهر المنحني الموضح في الشكل ادناه

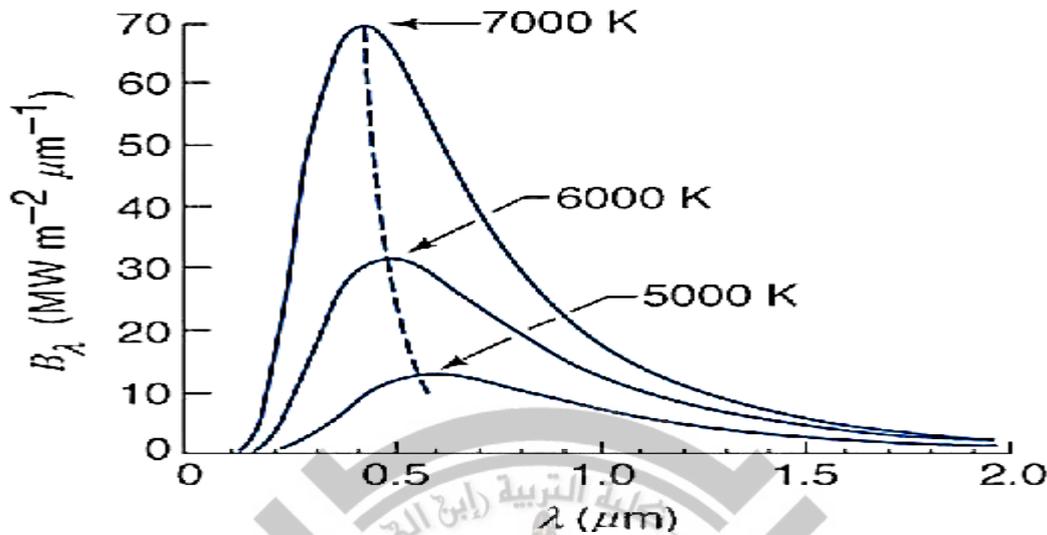


Fig 1-2: Blackbody emission (the Planck function) for absolute temperatures as indicated, plotted as a function of wavelength on a linear scale.

✚ The Wien's Displacement Law

Differentiating Planck's function and setting the derivative equal to zero yields the wavelength of peak emission for a blackbody at temperature T

$$\lambda_m = \frac{0.0029}{T}$$

Where λ_m is expressed in meter and T in degrees kelvin.

Example 1 : Use Wien's displacement to compute the "color temperature" of the sun, if the wavelength of maximum solar emission is observed to be approximately $0.475 \mu\text{m}$.

Solution:

$$\lambda_m = \frac{0.0029}{T} \quad T = \frac{0.0029}{\lambda_m} = \frac{0.0029}{0.475 \times 10^{-6}} = 6105 \text{ K}$$

✚ The Stefan-Boltzmann Law

The blackbody flux density (intensity) obtained by integrating the Planck function B_λ over all wavelengths, is given by



$$I = P/A = \sigma T^4$$

where σ is a constant equal to $5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, P power and A area

Example 2:

A heater filament has a radius of 2 mm and a length of 200 mm. If its surface temperature is 2000 K what is the net radiated power??

Solution:

Radiated heat from object of temperature T into surroundings with temperature T_0 is given by

$$F = I = P/A = \sigma T^4$$

• Surface area of cylinder is given by

$$A = 2 \pi r l = 2 \times 3.14 \times (2 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 0.2 \text{ m} = 2.51 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$P = (5.67 \times 10^{-8})(2.5 \times 10^{-3})(2000)^4 = 2.27 \text{ kW}$$

حساب كثافة طاقة اشعاع الجسم الاسود ρ عند التوازن

ان كثافة طاقة اشعاع الجسم الاسود ρ عند التوازن تمثل مقدار الطاقة الموجودة في وحدة الحجم من التجويف ويعبر عنها بدلالة المجال الكهربائي $E(t)$ والمجال المغناطيسي $H(t)$ وتعطى بالعلاقة الآتية :

$$\rho = \frac{1}{2} \epsilon E^2(t) + \frac{1}{2} \mu H^2(t)$$

حيث ان ϵ : السماحية الكهربائية μ : النفوذية المغناطيسية للوسط الذي يملأ التجويف .

ان طاقة اشعاع الجسم الاسود هي دالة للتردد ، اي ان طاقة الأشعاع الكهرومغناطيسي تتوزع على قيم مختلفة للتردد ويعرف هذا بتوزيع الطاقة الطيفي ρ_v ويمثل المقدار $\rho_v dv$ كثافة طاقة الاشعاع في مدى تردد محصور بين v و $v+ dv$ وعليه تكون العلاقة بين ρ_v و ρ كالآتي :

$$\rho = \int_0^x \rho_v dv$$

س / برهن ان دالة التوزيع الطيفي دالة عامة تعتمد فقط على تردد ودرجة حرارة التجويف ولا تعتمد على شكله او طبيعته جدرانه ؟

البرهان:

بأستعمال مباديء الثرموداينميك نفرض :

1. وجود تجويفين وبشكلين مختلفين
2. درجة حرارة جدران كل منهما T وتبقى هذه الدرجة منتظمة لكل منهما حيث يرتبط الاثنان بمنظم لدرجة الحرارة وليكن بدرجة T

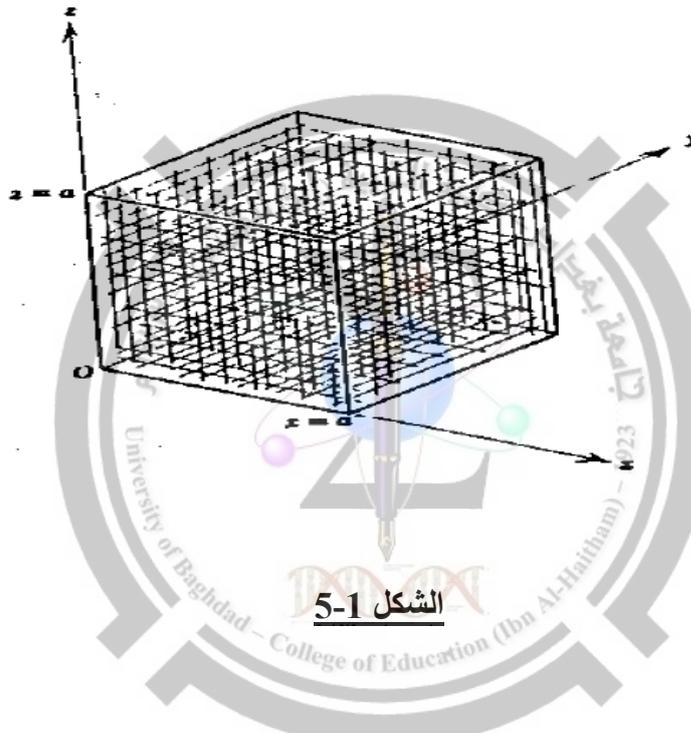


3. ان كثافة الطاقة لتردد معين ν للتجويف الاول هي ρ_{ν} وللتجويف الثاني ρ_{ν} فإذا كانت ρ_{ν} اكبر او اصغر من ρ_{ν} فذلك يعني وجود جريان للطاقة الكهرومغناطيسية من احدهما للآخر وذلك يخالف القانون الثاني للثرموداينمك وما دام التجويفين بدرجة حرارة واحدة فيجب ان تكون $\rho_{\nu} = \rho_{\nu}$ وكذلك تكون لجميع الترددات

س/ ما هو شكل دالة التوزيع الطيفي للدالة $\rho(\nu, T)$ ؟

ج/ استنادا لفرضية الضوء الكمي للعالم بلانك تم اشتقاق هذه الدالة ولما كانت الدالة ρ_{ν} لا تعتمد على شكل التجويف ولا على طبيعة المادة العازلة بداخله ، سنفرض :

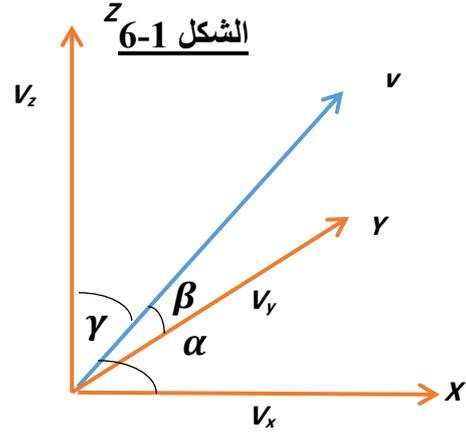
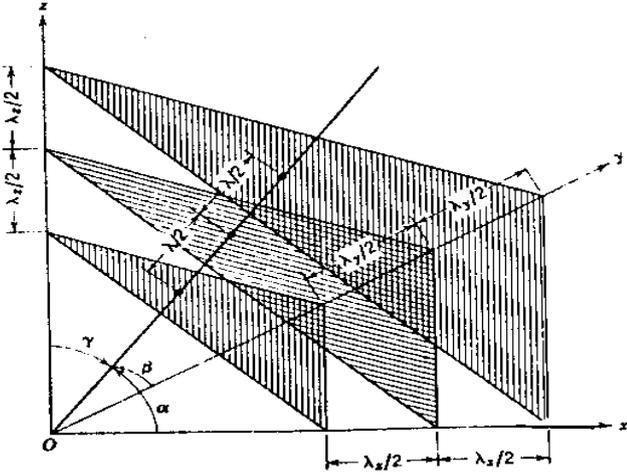
1- وجود تجويف بشكل مكعب طول ضلعه a كما في شكل 5-1 ذو جدران موصلة ومملوءة بانتظام بمادة عازلة



الشكل 5-1

2- لحساب ρ_{ν} نبدأ بحساب توزيع المجال الكهرومغناطيسي للموجات الواقفة المتواجدة داخل التجويف والتي تحدث نتيجة لانعكاسات المتتالية عن الجدران ويمكن تحليل هذا التذبذب الى ثلاثة مركبات باتجاه الاحداثيات المتعامدة والتي تقع على امتدادها الأضلاع الثلاثة للتجويف ولتأخذ مثلا المركبة باتجاه المحور x فالموجة الواقفة بهذا الاتجاه تشكل عقدة عند كل جدار مقابل ، اي عند الموضع $x=0$ والموضع $x=a$ وكذلك الحال للمركبتين باتجاه y, z وبهذا يكون التذبذب بصيغ تحدد طول الموجة او التردد .

3- وجود شعاع طول موجته λ بتردد ν يسير باتجاه تحدده ثلاث زوايا هي α, β, γ يصنع مساره مع الاحداثيات الثلاثة على التوالي كما في الشكل 6-1 . وهذا الاشعاع يمثل موجة واقفة ما دامت مركباته الثلاثة موجات واقفة .



$$v = c/\lambda$$

$$\cos \alpha = \frac{v_x}{v} \rightarrow v_x = v \cos \alpha \rightarrow \frac{c}{\lambda_x} = \frac{c}{\lambda} \cos \alpha \quad \therefore \lambda_x = \frac{\lambda}{\cos \alpha}$$

$$\cos \beta = \frac{v_y}{v} \rightarrow v_y = v \cos \beta \rightarrow \frac{c}{\lambda_y} = \frac{c}{\lambda} \cos \beta \quad \therefore \lambda_y = \frac{\lambda}{\cos \beta}$$

$$\cos \gamma = \frac{v_z}{v} \rightarrow v_z = v \cos \gamma \rightarrow \frac{c}{\lambda_z} = \frac{c}{\lambda} \cos \gamma \quad \therefore \lambda_z = \frac{\lambda}{\cos \gamma}$$

ولما كانت المسافة بين عقدتين متتاليتين للشعاع تساوي $\lambda/2$ وبالتالي نكون موقع العقد للمركبات الثلاث كالاتي :

$$\frac{\lambda_y}{2} = \frac{\lambda}{2 \cos \beta}, \quad \frac{\lambda_z}{2} = \frac{\lambda}{2 \cos \gamma} \quad \dots \dots \dots (I) \quad \frac{\lambda_x}{2} = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha}$$

ولحساب توزيع المجال الكهرومغناطيسي للموجات الواقعة المتواجدة داخل التجويف نركز على مركبة المجال الكهربائي في الاشعاع الكهرومغناطيسي حيث تكون:

$$E(x, t) = A \sin \left(\frac{2\pi x}{\lambda_x} \right) \sin (2\pi vt)$$

$$E(y, t) = B \sin \left(\frac{2\pi y}{\lambda_y} \right) \sin (2\pi vt)$$

$$E(z, t) = C \sin \left(\frac{2\pi z}{\lambda_z} \right) \sin (2\pi vt)$$

حيث ان A, B, C تمثل سعة الموجة باتجاه المحاور الثلاث

ان المقدار $\sin \left(\frac{2\pi x}{\lambda_x} \right)$ يتلاشى للقيم $0, 1, 2, 3, \dots$ لذا تكون المسافة بين عقدة واخرى $\Delta x = \frac{\lambda_x}{2}$

وبالمثل تكون الحالة للمركبتين الاخرتين باتجاه z, y . ان المركبات الثلاث تحقق شرط حدوث العقدة عند الموضع $x=0, y=0, z=0$ ولجعل تلك المعادلات تحقق ايضا شرط حدوث العقدة عند الموضع $x=-a, y=a, z=a$ نجعل:



$$\frac{2x}{\lambda_x} = n_x \quad \text{where } n_x = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\frac{2y}{\lambda_y} = n_y \quad \text{where } n_y = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\frac{2z}{\lambda_z} = n_z \quad \text{where } n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$$

وبتعويض معادلة 1 بالمعادلة الاخير نحصل

$$\frac{2a}{\lambda} \cos \beta = n_y, \quad \frac{2a}{\lambda} \cos \gamma = n_z \frac{2a}{\lambda} \cos \alpha = n_x$$

وبالتربيع للطرفين وجمع المركبات نحصل :

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = \frac{4a^2}{\lambda^2} (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma)$$

ولكن $(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma) = 1$

$$\therefore \frac{2a}{\lambda} = (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)^{1/2}$$

حيث تأخذ كل من n_x, n_y, n_z جميع القيم العددية الممكنة وتصف هذه المعادلة الحدود الممكنة للتذبذب داخل التجويف اي تحديد الطول الموجي للموجات الكهرومغناطيسية التي يحتويها التجويف ويمكن كتابتها بدلالة التردد

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2a} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$



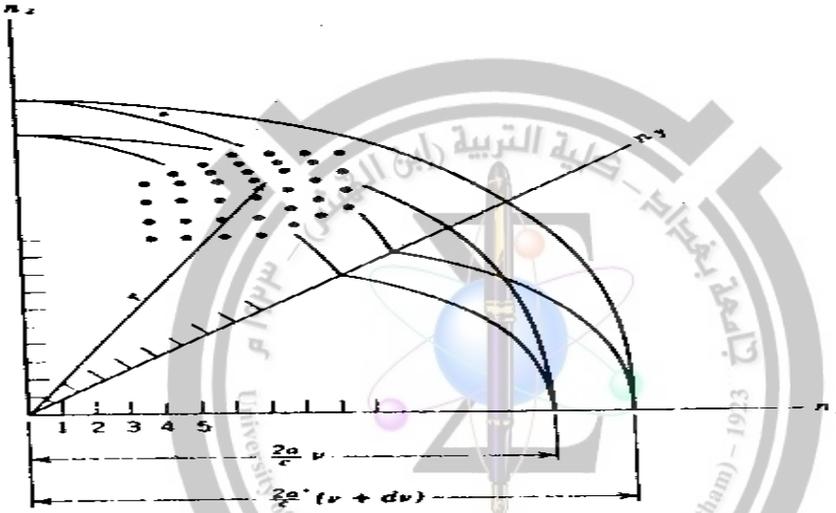
حساب عدد الترددات (صيغ التذبذب) لمدى معين من التردد وليكن dv الواقعة بين v و $v+dv$

نفرض شبكة مكعبة الشكل يمكن وصف كل نقطة من نقاطها بمجموعة الاعداد n_x, n_y, n_z كما في الشكل 7-1. حيث ان كل نقطة من نقاط الشبكة تناظر ترددا مسموحا مقداره $N_v dv$ ومساويا للمقدار $N_r dr$ وهو عدد النقاط الواقعة في قشرة كروية نصف قطرها r وسمكها dr حيث ان البعد r يعطى بالعلاقة الاتية :

$$r = (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)^{1/2} \quad (3) \dots\dots\dots$$

وبتعويض معادلة (2) في معادلة (3) نحصل

$$r = \frac{2av}{c}$$



$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \rightarrow dV = 4\pi r^2 dr \quad \text{حجم القشرة الكروية}$$

حيث ان المقدار $N_r dr$ يساوي حجم القشرة الكروية مضروبا في الكثافة العددية لنقاط الشبكة

$$N_r dr = \frac{1}{8} dV = \frac{1}{2} \pi r^2 dr = \frac{1}{2} \pi \left(\frac{2av}{c}\right)^2 \left(\frac{2a}{c} dv\right) = \frac{4 \pi a^3 v^2 dv}{c^3}$$

ونظرا لوجود موجتين مستقلتين تناظران حالتي الاستقطاب الدائري للاشعاع الكهرومغناطيسي لذا يضاعف الناتج اعلاه عند حساب الترددات المسموحة الواقعة في مدى التردد المعطى وبهذا تكون :

$$N_v dv = \frac{8 \pi a^3 v^2 dv}{c^3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ان هذا العدد من صيغ التذبذب لا يعتمد على شكل التجويف لذا يمكن الاستعاضة عن a^3 بحجم التجويف V

$$N_v dN_v = \frac{8 \pi V v^2 dv}{c^3} \quad \dots\dots\dots (5)$$



حساب معدل الطاقة المرافقة لموجة واقفة تتذبذب بصيغة ترددها ν

اولا : حسابات رالي - جينز (المعالجة الكلاسيكية)

حسب الفيزياء التقليدية ، يمكن ان تتخذ طاقة الموجة اي قيمة تتراوح بين الصفر واللانهاية ، والقيمة الحقيقية تتناسب مع مربع متوسط سعة الموجة ولكن عندما يحوي الجهاز على عدد كبير من الموجات الواقفة وهو اشعاع في حالة توازن حراري مع بعضه البعض بدرجة حرارة T فان جهازا كهذا وحسب النظرية التقليدية للميكانيك الاحصائي يكون خاضعا لاحتمالية توزيع معين للطاقة تعطى شكل دالة التوزيع لها بدلالة درجة الحرارة كما يعين معدل الطاقة باستخدام احتمالية التوزيع لبولتزمان وتكون الاحتمالية dp لتردد معين لتجويف تقع طاقة الاشعاع فيها بين المقدار E و $E+dE$ على النحو الاتي :

$$dp = C e^{-E/kT} dE$$

حيث C مقدار ثابت ، K ثابت بولتزمان .. عند استخدام هذه المعادلة يكون معدل الطاقة \bar{E} لتردد صيغة تذبذب معينة :

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{\infty} E e^{-E/kT} dE}{\int_0^{\infty} e^{-E/kT} dE}$$

وبحل التكامل ينتج

$$\dots\dots\dots (6) \bar{E} = kT$$

وبهذا تكون كثافة الطاقة في مدى تردد محصور بين ν و $\nu+d\nu$ لطيف اشعاع الجسم الاسود ولتجويف بدرجة حرارة T هي حاصل ضرب معدل الطاقة لصيغة تذبذب واحدة معادلة (6) وعدد صيغ التذبذب المتواجد معادلة (5) في هذا المدى مقسوما على حجم التجويف اي ان

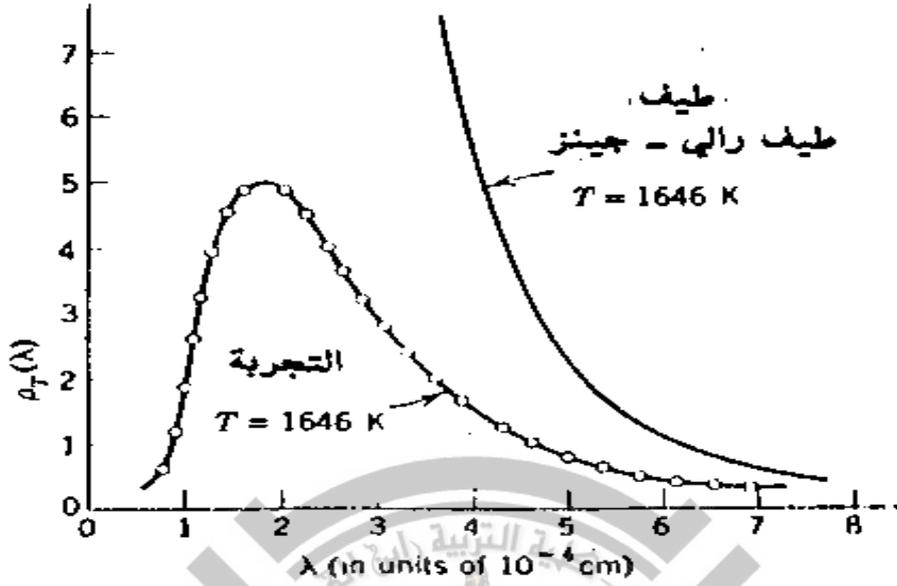
$$\rho_{\nu}(T, \nu) d\nu = \frac{8 \pi \nu^2}{c^3} KT d\nu$$

ويمكن كتابتها بعد التقريب بدلالة طول الموجة حيث تمثل التوزيع الطيفي لاشعاع الجسم الاسود حسب حسابات رالي - جينز وكما باتي

$$\rho_{\lambda}(T, \lambda) d\lambda = \frac{8 \pi}{\lambda^4} KT d\lambda$$



ويوضح الشكل 1-8 مقارنة بين طيف رالي- جينز والنتائج التجريبية وكما يتضح عدم انطباق الحسابات النظرية مع الحسابات التجريبية عند الاطوال الموجية القصيرة اي عند الطاقات العالية للاشعاع .



ثانيا : حسابات بلانك (للمعالجة الكمية)

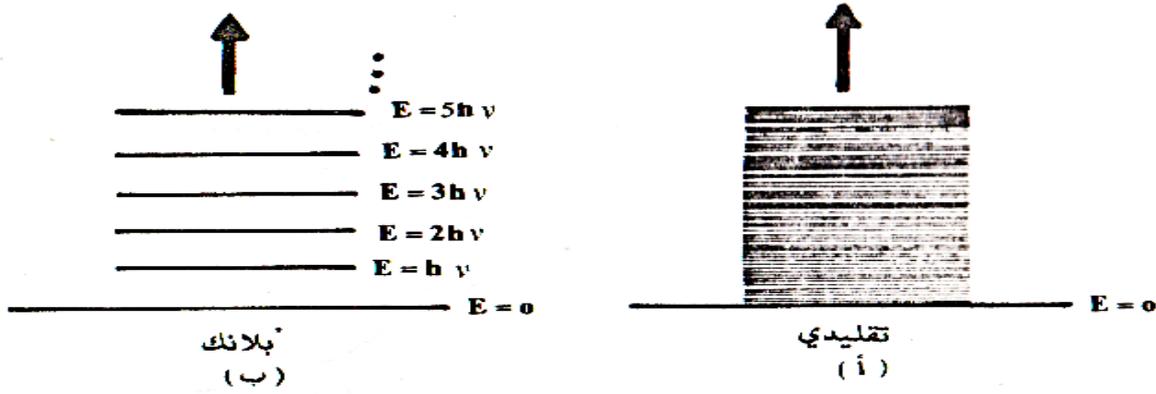
بقيت مسألة التوزيع الطيفي لاشعاع الجسم الاسود غير محلولة حتى بداية القرن العشرين حين ادخل بلانك فرضية الضوء الكمي التي تنص على ان طاقة التردد لتجويف اشعاع كهرومغناطيسي لا يمكن ان تأخذ اي قيمة كيفما اتفق كما في معادلة $E = kT$ بل ان الطاقة يجب ان تأخذ قيما معينة محددة ويجب ان تكون هذه القيم مضاعفات عددية لكمية اساسية تتناسب مع تردد صيغة التذبذب للاشعاع . بمعنى اخر ، فرض بلانك ان طاقة التذبذب E لصيغة معينة بتردد ν تعطى بالعلاقة:

$$(7) E = nh\nu$$

حيث $n = 0, 1, 2, \dots$: ثابت بلانك ويساوي $6.625 \times 10^{-34} \text{ j.s}$

ان في مضمون هذه الفرضية تحديد لكيفية التعامل مع داخل التجويف وجدرانه ، اي ان التعامل مع اشعاع الجسم الاسود يتم على اساس التعامل مع دفعات او كمات من الطاقة مقدار كل كم يساوي $h\nu$ ويطلق على

الكم (فوتون) كما في شكل (1-9)



مقارنة بين الطاقة التي يمكن ان يتخذها مدبب يتذبذب بحركة توافقية بسيطة.
(أ) : حسب الميكانيك التقليدي (ب) حسب فرضية « بلاانك » .

شكل (9-1)

وفقا لهذه الفرضية يكون معدل الطاقة لصيغة معينة من التذبذب على النحو الاتي :

$$\bar{E} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n h \nu e^{-nh\nu/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nh\nu/kT}}$$

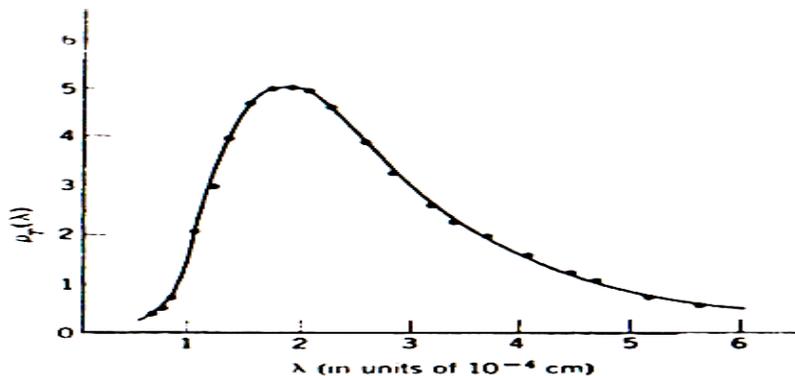
$$\dots\dots (8) \bar{E} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$\rho_\nu(T, \nu) d\nu = \frac{8 \pi h \nu^3 / c^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

وبدلالة طول الموجة وبعد التقريب نحصل

$$\rho_\lambda(T, \lambda) d\lambda = \frac{8 \pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1} d\lambda$$

هذا يمثل التوزيع الطيفي لاشعاع الجسم الاسود كما وجده بلاانك والذي هو في توافق تام مع القيم التجريبية كما هو واضح في شكل (10-1)



شكل (10-1)



ان معدل عدد الفوتونات \bar{q} يعطى بالعلاقة الاتية

$$\bar{q} = \frac{\bar{E}}{h\nu} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

ان العلاقة بين كثافة الطاقة ρ والشدة I

$$\rho = \frac{4}{c} I$$

spontaneous emission الأنبعاث الذاتي

نفرض ان هناك نظام ذري ذو مستويين للطاقة بحيث $E_2 > E_1$ كما في الشكل (11-1) وللسهولة نفرض ان E_1 هو المستوى الأرضي لذرة المادة ، وان الذرة في البداية تقع في المستوى (2) وبسبب كون طاقة المستوى (2) اكبر من المستوى (1) فالذرة طبيعيا (تلقائيا) تحاول الاضمحلال الى المستوى (1) وبهذا تحرر طاقة بمقدار $E_2 - E_1$ على شكل (فوتونات) موجة كهرومغناطيسية . هذه الظاهرة تدعى بالانبعاث الذاتي ، وتردد الموجة يعبر عنها بدلالة قانون بلانك اي

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

واذا فرضنا ان وحدة الحجم تحوي عدد من الذرات N_2 في المستوى (2) في الزمن t سيكون معدل الاضمحلال $\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{sp}$ متناسبا مع العدد N_2 اي ان :

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{sp} = -AN_2$$

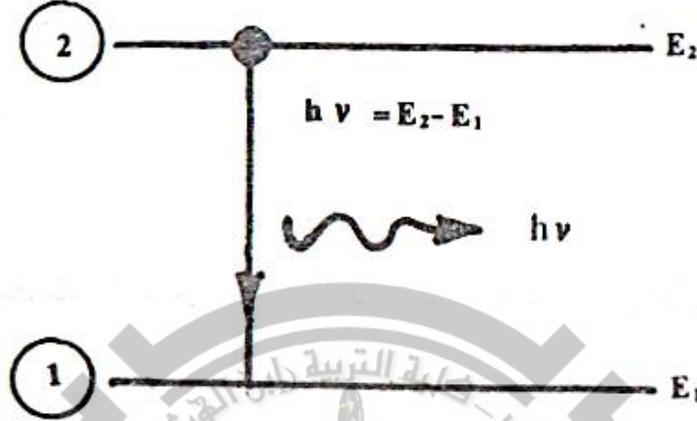
حيث A : احتمالية الانبعاث الذاتي (معامل أينشتاين) ويساوي مقلوب لزمان بقاء الذرة في المستوى المتتهيج (متوسط زمن عمر الانبعاث الذاتي τ_{sp}) اي ان :

$$A = \frac{1}{\tau_{sp}} \quad \text{وحداته } \text{sec}^{-1}$$



ان الانبعاث الذاتي على نوعين هما :

- 1- الاضمحلال المشع يصاحبه انبعاث موجة كهرومغناطيسية
- 2- الاضمحلال غير المشع لا يصاحبه انبعاث موجة كهرومغناطيسية . حيث تخسر الذرة فرق الطاقة بين المستويين عن طريق اصطدامها بما حولها من ذرات او جزيئات مماثلة او مخالفة او عن طريق اصطدامها بجدران الأناء الذي يحويها . ويعتمد الفقدان على طبيعة المادة وحالتها وكذلك طبيعة المادة التي تتبادل معها الطاقة لذلك تكون عملية الاضمحلال غير المشع معقدة ومتشعبة.



الانبعاث المُحفز *stimulated emission*

نفرض ان الذرة موجودة ايضا في المستوى (2) ولكن هذه المرة بحضور اشعاع كهرومغناطيسي متواجد في الوسط وبتردد ν بحيث ان $h\nu$ يساوي تماما $E_2 - E_1$ الفرق بين طاقتي المستويين (1) و (2) . عند توفر هذا الشرط اي عندما يكون تردد الموجات الساقطة مساوي لتردد الانتقال الذري فهناك احتمالية محدودة لهذا الاشعاع ان يحفز الذرة التي هي في المستوى (2) ويجبرها على الانتقال الى المستوى الأوطأ (1) وفي هذه الحالة يتحرر فرق الطاقة $E_2 - E_1$ للذرة المنتقلة على شكل موجات كهرومغناطيسية تضاف الى الموجة الساقطة وتتحد صفاتها معا بشكل خاص لاحظ الشكل (1-12) . ففي هذه الحالة وبسبب كون عملية الانبعاث المحفز عملية اضطرارية من قبل الموجة الساقطة فالموجة المنبعثة من اي ذرة محفزة في المستوى (2) تكون متحدة في الطور مع الموجة الساقطة وبنفس اتجاهها . ويمثل ذلك الفرق بين الانبعاث المحفز والانبعاث الذاتي يحصل بصورة تلقائية بمجرد وجود الذرة في حالة متهيجة فالذرة المضمحلة تبعث اشعاعا كهرومغناطيسيا لا يكون له علاقة طور محددة بتلك التي تبعثه ذرة اخرى متواجدة في المستوى ذاته كما ان هذا الاشعاع قد ينتقل باي اتجاه في الفضاء .

واذا فرضنا ان وحدة الحجم تحوي عدد من الذرات N_2 في المستوى (2) في الزمن t سيكون معدل الانتقال $\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{st}$ نتيجة الانبعاث المحفز :

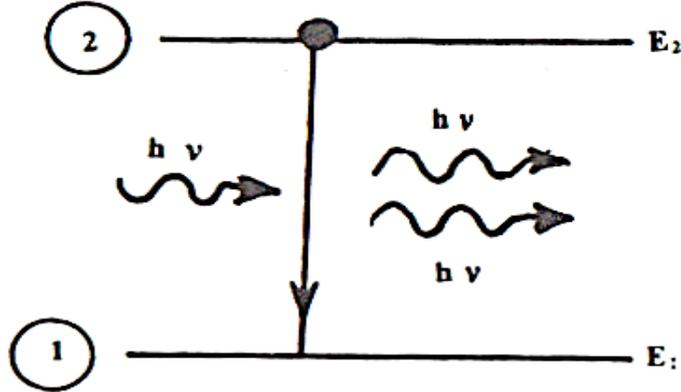
$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{st} = -W_{21}N_2$$

حيث W_{21} : احتمالية الانتقال المحفز وكما هو الحال للمعامل A يكون للمعامل W وحدات sec^{-1} ولكن المقدار W لا يماثل المقدار A من ناحية كون W لا يعتمد فقط على الانتقال المحدد بين المستويين (1) و (2) وانما يعتمد ايضا على شدة الأشعاع الكهرومغناطيسي الساقط . ولموجة كهرومغناطيسية مستوية يكون :

$$W_{21} = \sigma_{21} F$$



حيث يمثل المقدار F التدفق الفوتوني للموجة الساقطة اما ثابت التناسب σ_{21} فهو كمية لها ابعاد المساحة وتدعى بمقطع الانبعاث المحفز وتعتمد فقط على صفات الانتقال المعطى .



الشكل (12-1) الانبعاث المحفز

الامتصاص Absorption

لنفرض الان ان الذرة متواجدة في المستوى الأوطأ الأرضي للطاقة (المستوى 1) فانها ستبقى هناك ما لم تتعرض الى محرض خارجي . فعند تعرض الوسط الى اشعاع كهرومغناطيسي ذي تردد ν بحيث ان $h\nu$ يساوي تماما الفرق بين طاقتي المستويين (1) و (2) . عند توفر هذا الشرط اي عندما يكون تردد الموجات الساقطة مساوي لتردد الانتقال الذري فهناك احتمالية محدودة للذرة للارتقاء الى المستوى الاعلى (2) اذ تغذي الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة الذرة بمقدار فرق الطاقة $E_2 - E_1$ الذي تحتاجه لأتمام عملية الانتقال وتدعى بعملية الامتصاص لاحظ الشكل (13-1)

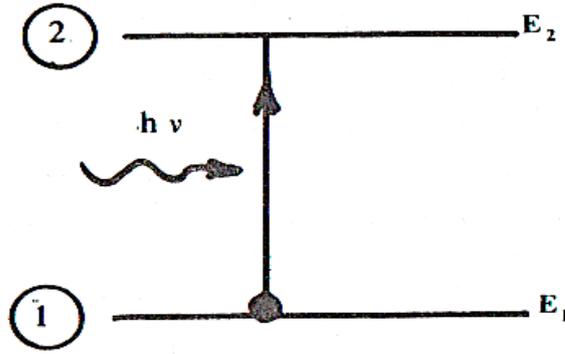
واذا فرضنا ان وحدة الحجم تحوي عدد من الذرات N_1 في المستوى (1) في الزمن t سيكون معدل

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_{ab} = -W_{12}N_1 \quad \text{الامتصاص} \quad \left(\frac{dN_1}{dt}\right)_{ab}$$

حيث W_{12} : احتمالية الامتصاص وحداته sec^{-1} وتعتمد ايضا على شدة الأشعاع الكهرومغناطيسي الساقط وكذلك على الانتقال الذري بين المستويين المعنيين . ولموجة كهرومغناطيسية مستوية يكون :

$$W_{12} = \sigma_{12} F$$

حيث يمثل المقدار F التدفق الفوتوني للموجة الساقطة اما ثابت التناسب σ_{12} فهو كمية لها ابعاد المساحة وتدعى بمقطع الامتصاص وتعتمد فقط على صفات الانتقال المعطى .



الشكل (13-1) عملية الامتصاص

ان مقطعي الامتصاص والانبعاث المحفز متساويان $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ وهذا يعني تساوي احتمالية عمليتي الامتصاص والانبعاث المحفز $W_{12} = W_{21}$ عند تواجد الذرة في اشعاع كهرومغناطيسي مناسب وهي نتيجة توصل اليها اينشتاين لذلك يمكن الاكتفاء بكتابة الرمز σ وكذلك الرمز W ليشير الى مقطع الانتقال او احتماليته على التوالي كما يمكن القول ان عملية الانبعاث المحفز هي عملية امتصاص سالبة (او باتجاه معاكس).

معدل الامتصاص ومعدل الانبعاث المحفز

يعتبر النظام الذري نظاما مكمما يمكن وصفه حسب الميكانيك الكمي في حين يعامل المجال الكهرومغناطيسي للموجة الساقطة بطريقة تقليدية اي باستخدام معادلات ماكسويل . فاذا كان لدينا نظاما ذريا ذو مستويين للطاقة ونفرض بأن الذرة متواجدة في الزمن $t=0$ في الحالة الأرضية المستوى (1) وبحضور مجال مغناطيسي يسقط بكثافة طاقة ρ وبتردد احادي ν (اي تردد زاوي $\omega = 2\pi\nu$) . ان وجود المجال يمثل اضطرابا للذرة وهو اضطراب معتمد على الزمن ويؤدي الى حدوث احتمالية لتواجد الذرة في حالة نهائية تختلف عن وضعها الابتدائي عندما تكون الطاقة التي يحملها الاضطراب مساويا الى فرق الطاقة لحالتي الذرة .

ان الذرة وهي في المستوى الابتدائي (1) تكتسب طاقة اضافية \hat{H} نتيجة الفعل المتبادل بينها وبين الموجة الكهرومغناطيسية فمثلا قد تكتسب الذرة هذه الطاقة نتيجة للفعل المتبادل بين عزم ثنائي القطب الكهربائي للذرة μ_e والمجال الكهربائي E للموجة الساقطة اي ان $\hat{H} = \vec{\mu}_e + \vec{E}$ كذلك قد يحدث الانتقال نتيجة اكتساب الذرة لطاقة نتيجة الفعل المتبادل لعزم ثنائي القطب المغناطيسي للذرة μ_m مع المجال المغناطيسي B للموجة الكهرومغناطيسية الساقطة .

ولوصف الفعل المتبادل يتطلب الميكانيك الكمي ادخال هاملتون \hat{H} (معادلة تصف حركة نظام مكون من جسيمات وتعطي طاقته كدالة لموضع الجسيمات و وزخم حركتها) حينئذ يكون هاملتون الذرة الكلي :

$$H = H_0 + \hat{H}$$

حيث ان H_0 هو هاملتون الذرة في حالة غياب المجال الكهرومغناطيسي الخارجي (ذرة غير مضطربة) .



يمكن دراسة التغير الزمني لدالة الموجة ψ للذرة من معادلة شرودنجر المعتمدة على الزمن اي :

$$H\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

$$\text{where } \hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \text{and } i = \sqrt{-1}$$

لحل هذه المعادلة بدلالة ψ يتم ادخال الدالة الذاتية غير المضطربة لكل من المستويين (1) و(2) وهما على التوالي :

$$\text{and } \psi_2 = \mu_2 e^{-iE_2 t/\hbar} \psi_1 = \mu_1 e^{-iE_1 t/\hbar}$$

بشرط ان تحقق كل من μ_1 , μ_2 معادلة شرودنجر غير المعتمدة على الزمن اي ان :

$$\text{where } j=1,2,\dots H_0 \mu_j = E_j \mu_j$$

اما عندما تكون الذرة تحت تأثير الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة فتكون دالة الموجة للذرة كالآتي :

$$\psi = a_1(t)\psi_1 + a_2(t)\psi_2$$

حيث تكون a_1 , a_2 اعداد معقدة معتمدة على الزمن

كذلك فان المعاملات $|a_1|^2$, $|a_2|^2$ تعطي الاحتمالية في الزمن t لتواجد الذرة في المستوى (1) و (2) على التوالي ومرتبطين بالعلاقة :

$$|a_1|^2 + |a_2|^2 = 1$$

لذا عند احتساب احتمالية الانتقال W_{12} يجب حساب الكمية $|a_1(t)|^2$ او المقدار $|a_2(t)|^2$ حيث ان :

$$W_{12} = \frac{|a_2(t)|^2}{t}$$

يمكن حساب المقدار W_{12} في حالة كون الفعل المتبادل والمسبب للانتقال الذري يأتي نتيجة الفعل المتبادل بين المجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية الساقطة وعزم ثنائي القطب الكهربائي للذرة والمتمثل بالمعادلة :

$$\dot{H} = e\vec{E}(\vec{r}, t) \cdot \vec{r}$$

حيث e شحنة الألكترون المنتقل ، \vec{r} المتجه الذي يحدد الموقع ، $\vec{E}(\vec{r}, t)$ المجال الكهربائي في الموضع \vec{r}

ان طول الموجة الساقطة اكبر بكثير مقارنة بالابعاد الذرية ضمن المدى المرئي للطيف الكهرومغناطيسي فمثلا طول الموجة للضوء الاصفر 500 نانومتر بينما الابعاد الذرية تكون بحدود 0.1 نانومتر وعندها يمكن التوصل للتعبير الآتي :

$$W_{12} = \frac{\pi}{3 n^2 \epsilon_0 \hbar^2} |\mu_{21}|^2 \rho g(\Delta\omega)$$

حيث n : معامل الانكسار للنظام الذري و ϵ_0 سماحية الفراغ و μ_{21} : عنصر مصفوفة عزم ثنائي القطب الكهربائي حيث تكون :

$$\mu_{21} = e \int \mu_2 \vec{r} \mu_1 dV$$

حيث V الحجم ، $|\mu_{21}|$ مقدار المتجه $\vec{\mu}_{21}$ وهو متجه يحدد موضع الذرة بالنسبة لأتجاه المجال الكهربائي للموجة الكهربائية الساقطة .

بينما المقدار $g(\Delta\omega)$ دالة شكل الخط الطيفي بينما $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ يمثل مدى التردد الذي تتعرض اليه الذرة مع الزمن حيث ان الذرة لا تتعرض لأشعة احادية الموجة بتردد واحد يساوي ω_0 بل بتوزيع طيفي معين يعطى بالدالة $g(\Delta\omega)$ وان هذه الدالة معيارية للمقدار 1 وشكلها يعتمد على الظاهرة التي تسبب تعريض الخط الطيفي. وغالبا ما يعبر عن هذا الشكل بدالة لورنتز انظر شكل (1-14).

ويمكن كتابة معادلة W_{12} (احتمالية الامتصاص) بدلالة شدة الأشعاع الكهرومغناطيسي الساقط I وسرعة

$$I = \frac{\rho c_0}{n} C_0 \text{ الضوء في الفراغ}$$

$$W_{12} = \frac{\pi}{3 n \epsilon_0 c_0 \hbar^2} |\mu_{21}|^2 I g(\Delta\omega)$$

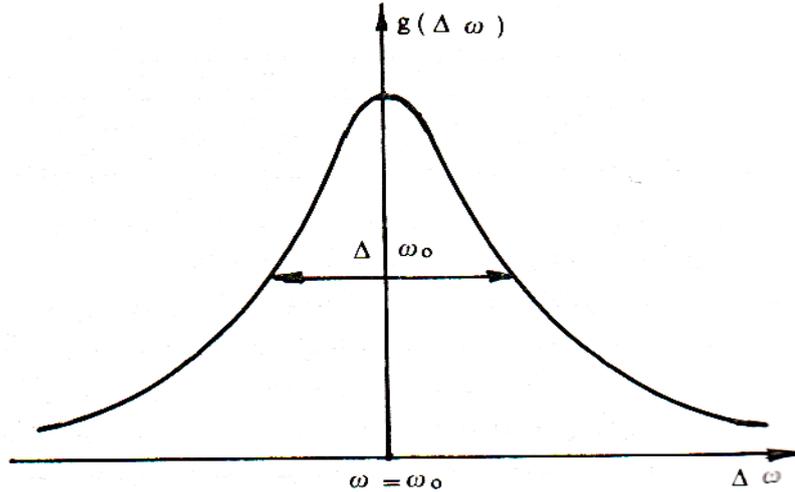
وبنفس طريقة اشتقاق احتمالية الانبعاث المحفز W_{12} وهذا يتضمن كون $|\mu_{21}| = |\mu_{12}|$ اي ان :

$$W_{12} = W_{21} = W$$

اي ان احتمالية الانبعاث المحفز تساوي احتمالية الامتصاص وبالتالي فان الاحتمالية تصبح :

$$W = \frac{\pi}{3 n^2 \epsilon_0 \hbar^2} |\mu|^2 \rho g(\Delta\omega)$$

$$W = \frac{\pi}{3 n \epsilon_0 c_0 \hbar^2} |\mu|^2 I g(\Delta\omega)$$



شكل (14-1): منحنى لورنتز حيث $\Delta\omega_0$ عرض المنحنى عند منتصف الشدة $\omega = \omega_0$

الانتقالات المسموحة والممنوعة



يتبين من معادلة الاحتمالية ان المقدار W يساوي صفر عندما تكون $|\mu|$ تساوي صفر وهذا يحدث عندما تكون الدالتين μ_1 و μ_2

كلاهما متناظرتين او كلاهما ذي تناظر عكسي (يقال للدالة $\mu(\vec{r})$ بانها متناظرة عندما يكون $\mu(\vec{r}) = \mu(-\vec{r})$ او ان لها تناظر عكسي عندما يكون $\mu(\vec{r}) = -\mu(-\vec{r})$).

ولكن متى تكون الدوال الموجية $\mu(\vec{r})$ متناظرة او ذات تناظر عكسي. ان هذا يحدث عندما يكون الهاملتون $H_0(\vec{r})$ للنظام الذري غير متغير عند الانقلاب اي ان الهاملتون $H_0(\vec{r})$ للذرة لا تتغير اشارته عند التعويض عن المتجه (\vec{r}) بالمتجه $(-\vec{r})$

$$H_0(\vec{r}) = H_0(-\vec{r})$$

وهذا يؤدي الى

$$\mu_n(\vec{r}) = \pm \mu_n(-\vec{r})$$

هذا يعني عندما يكون الهاملتون $H_0(\vec{r})$ متناظرا كانت الدوال الذاتية متناظرة او ذات تناظر عكسي وعندها يقال ان الدوال الذاتية لها تماثل، وهذا التماثل يكون اما:

1. تماثل فردي: في حالة لها تناظر عكسي بسبب انقلاب الاشارة عندما يكون $\mu(\vec{r}) = -\mu(-\vec{r})$.
2. تماثل زوجي: في حالة لها تناظر بسبب عدم انقلاب الاشارة عندما يكون $\mu(\vec{r}) = \mu(-\vec{r})$.



وبهذا يمكن القول بأن انتقالات ثنائي القطب الكهربائي تحصل فقط بين حالات الذرة او مستويات الطاقة لها ذي التماثل المضاد (اي انتقالات التماثل الفردي - الزوجي وبالعكس ايضا) ويدعى ذلك بشرط قاعدة الانتقاء والتي تحدد حدوث مثل هذه الانتقالات . فاذا كان المقدار w يساوي صفر قيل ان الانتقال ممنوع لثنائي القطب الكهربائي . لكن هذا لا يعني ان الذرة لا تستطيع الانتقال من حالة الى اخرى بسبب تأثير الأشعاع الكهرومغناطيسي الساقط فقد يحدث انتقالا نتيجة الفعل المتبادل لثنائي القطب المغناطيسي او نتيجة الفعل المتبادل لرباعي القطب الكهربائي فقاعدة الانتقاء لثنائي القطب المغناطيسي تسمح بالانتقال بين الحالات التي لها تماثل متشابه (زوجي وزوجي او بين فردي وفردي) في حين ان مثل هذه الانتقالات ممنوعة حسب قاعدة الانتقاء لثنائي القطب الكهربائي والعكس صحيح .

س / اثبت ان احتمالية حدوث الانتقال نتيجة الفعل المتبادل لثنائي القطب الكهربائي w_e اكبر بكثير من الاحتمالية لنظيره المغناطيسي w_m ؟

ج/ اذا فرضنا بأن شدة الاشعاع الكهرومغناطيسي الساقط والواقع في مدى الضوء المرئي متساويا في كلتا الحالتين فيمكن تمثيل النسبة بين احتماليتي الانتقال بصورة تقريبية كالاتي :

$$\frac{w_e}{w_m} = \left(\frac{e a E_0}{\beta B_0} \right)^2 = \left(\frac{e a c}{\beta} \right)^2 = \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.05 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^8}{9.27 \times 10^{-24}} \right)^2 \approx 67000$$

حيث e شحنة الالكترون ، a نصف قطر الذرة ، c سرعة الضوء ، β بورماكنيتيون ويساوي 9.27×10^{-24} امبير ام

$$E_0 = B_0 c \quad \text{حيث } E_0 \text{ و } B_0 \text{ سعتا المجال الكهربائي والمغناطيسي على التوالي}$$

ويتبين من خلال ما تقدم ان احتمالية حدوث الانتقال نتيجة الفعل المتبادل لثنائي القطب الكهربائي اكبر بكثير من الاحتمالية لنظيره المغناطيسي وهذا يعود الى ان طاقة التعامل المتبادل عبر ثنائي القطب الكهربائي اكبر بكثير من طاقة التعامل المتبادل عبر ثنائي القطب المغناطيسي.

مقاطع الانتقال ومعاملات الامتصاص والكسب



لموجة كهرومغناطيسية مستوية منتظمة الشدة I فان احتمالية الانتقال تتناسب طرديا مع التدفق الفوتوني له F اي ان :

$$\sigma = \frac{W}{F} = \frac{\frac{\pi}{3 n \epsilon_0 c_0 \hbar^2} |\mu|^2 I g(\Delta\omega)}{\frac{I}{\hbar\omega}}$$

$$F = \frac{I}{\hbar\omega} \quad (\omega \text{ يمثل التردد الزاوي})$$



$$W = \frac{\pi}{3 n \epsilon_0 c_0 \hbar^2} |\mu|^2 I g(\Delta\omega)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{3 n \epsilon_0 c_0 \hbar} |\mu|^2 \omega g(\Delta\omega)$$

ويبدو واضحا من المعادلة ان مقطع الامتصاص σ يعتمد على المادة وكذلك على تردد الموجة الساقطة . كذلك يكون مقطع الانتقال للانبعاث المحفز يساوي مقطع الانتقال للامتصاص .

ويرتبط مقطع الامتصاص σ مع معامل الامتصاص α بالعلاقة التالية :

$$\alpha = \sigma (N_1 - N_2)$$

فاذا كان تاهيل المستوى الأوطأ N_1 اكبر من تاهيل المستوى الأعلى N_2 فان المقدار α مقدار موجب . وبالتعويض عن σ

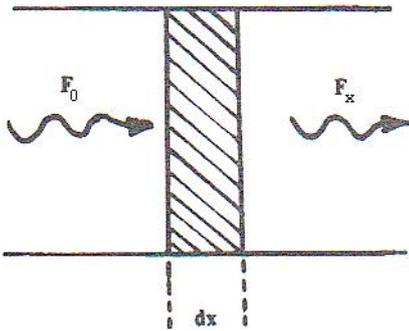
$$\alpha = \frac{\pi}{3 n \epsilon_0 c_0 \hbar} |\mu|^2 \omega (N_1 - N_2) g(\Delta\omega)$$

وبهذا الشكل ، يعتمد المعامل الجديد α على تاهيل المستويين لذرات المادة وهذه الكمية تبدو اكثر ملائمة لوصف الفعل المتبادل بين الاشعاع الكهرومغناطيسي الساقط وذرات المتعاملة معه وخاصة في الحالة التي يتغير فيها تاهيل المستويين مع الزمن كما هو الحال مع الليزر .

في حالة الليزر يكون $(N_1 < N_2)$ وبالتالي سيكون معامل الامتصاص سالب وفي هذه الحالة تتضخم الموجة الساقطة بدلا من ان تضعف نتيجة الامتصاص من قبل الوسط ، وذلك يدعى بمعامل الكسب G وهو كمية موجبة اي

عند سقوط سيل فوتوني F على وسط متجانس باتجاه x فان التغير في هذا التدفق dF نتيجة عبوره مسافة dx في الوسط يمكن التعبير عنه بالمعادلة

$$dF = -\alpha F dx$$



$$\int_{F_0}^{F_x} \frac{dF}{F} = -\alpha \int_0^x dx$$

$$\ln \frac{F_x}{F_0} = -\alpha x$$

حيث ان F_0 التدفق الساقط و F_x التدفق بعد قطعه مسافة x

شكل 15-1



$$F_x = F_0 e^{-\alpha x}$$

وبدلالة الشدة I للاشعاع وحسب العلاقة $F = \frac{I}{\hbar\omega}$ فان المعادلة تصبح

$$I_x = I_0 e^{-\alpha x}$$

حسابات اينشتاين للمعاملات الاحتمالية



لما كان انبعاث الخط الطيفي لانتقال معين لا يعتمد فقط على تأهيل المستوي الاعلى بل ايضا على احتمالية حدوث هذا الانتقال .

افترض اينشتاين وجود مادة في تجويف للاشعاع الكهرومغناطيسي حيث تكون جدران التجويف بدرجة حرارة منتظمة (T) وعند حصول التوازن الحراري ينتشر الاشعاع الكهرومغناطيسي خلال التجويف فيصيب المادة المغمورة فيه ويكون لهذا الاشعاع توزيع طيفي كثافته ρ_v . وعلى افتراض وجود مستويين لطاقة ذرات المادة (شكل 1-16) وتأهيل هذين المستويين N_1 و N_2 ذرة لكل متر مكعب على التوالي فاحتمالية حدوث العمليات الثلاث (الأمتصاص ، الانبعاث الذاتي ، الانبعاث المحفز) بين هذين المستويين تكون بالشكل الاتي :

1- الانبعاث الذاتي

ويحدث من المستوي 2 الى المستوي 1 باحتمالية مقدارها A_{21} ذرة لكل ثانية وبانبعاث طاقة تساوي $h\nu_{12}$ وان عدد مثل هذه الانتقالات في الثانية الواحدة وفي المتر المكعب من المادة يساوي ($A_{21} N_2$)

2- الأمتصاص

ويحدث نتيجة وجود مادة في وسط اشعاع كهرومغناطيسي وبكثافة ρ_{v12} حيث ان ذرة المادة في المستوي 1 قد تمتص هذا الاشعاع وتقفز الى المستوي 2 بأحتمالية تساوي w_{12} ذرة لكل ثانية حيث ان :

$$W_{12} = B_{12} \rho_{v12}$$

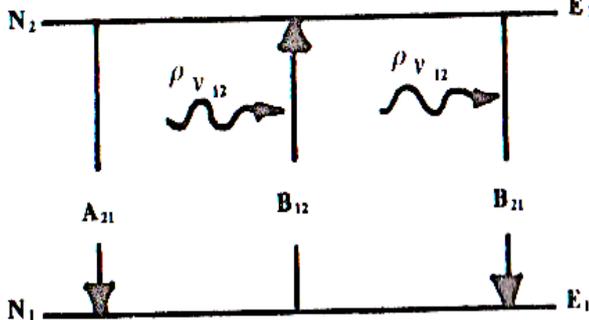
حيث المقدار B_{12} ثابت ويدعى بمعامل B - لأينشتاين . اما عدد الانتقالات من المستوي 1 الى المستوي 2 في الثانية الواحدة وللمتر المكعب من المادة ف يساوي ($W_{12} N_1$)

3- الانبعاث المحفز

ويحدث ايضا نتيجة وجود مادة في وسط اشعاع كهرومغناطيسي وبكثافة ρ_{v12} حيث ان ذرة المادة في المستوي 2 قد تتحفز بسبب الاشعاع وتقفز الى المستوي 1 بأحتمالية تساوي w_{21} ذرة لكل ثانية حيث ان :

$$W_{21} = B_{21} \rho_{v12}$$

حيث المقدار B_{21} ثابت ويدعى بمعامل B - لأينشتاين . اما عدد الانتقالات من المستوي 2 الى المستوي 1 في الثانية الواحدة وللمتر المكعب من المادة ف يساوي ($E_1 W_{21} N_2$)



(شكل 1-16)



ولما كانت المادة في حالة توازن ثرموديناميكي فان عدد الانتقالات نحو الأسفل يجب ان يعادل عدد الانتقالات نحو الأعلى اي ان

$$B_{12} N_1 \rho_{v12} = A_{21} N_2 + B_{21} N_2 \rho_{v12}$$

بترتيب الحدود والقسمة على N_2

$$\rho_{v12} = \frac{A_{21} N_2}{B_{12} N_1 - B_{21} N_2} = \frac{A_{21}}{B_{12} \frac{N_1}{N_2} - B_{21}}$$

وباستخدام احصائية بولتزمان لحالة التوازن الثرموديناميكي يكون توزيع ذرات المادة على مستويات الطاقة :

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-hv/kT}$$

$$\rho_{v12} = \frac{A_{21}}{B_{12} e^{hv/kT} - B_{21}}$$

ولكن احتمالية حدوث عملية امتصاص المادة لأشعاع الجسم الأسود مكافئة تماما لأحتمالية حدوث عملية الانبعاث المحفز لذلك

$$B_{12} = B_{21} = B \quad \text{and} \quad A_{21} = A$$

$$\rho_v = \frac{8 \pi h v^3 / c^3}{e^{hv/kT} - 1} \quad \text{معادلة بلانك}$$

$$\frac{8 \pi h v^3 / c^3}{e^{hv/kT} - 1} = \frac{A}{B e^{hv/kT} - B} = \frac{A}{B(e^{hv/kT} - 1)}$$

$$\frac{A}{B} = \frac{8 \pi h v^3}{c^3}$$

استنتاجات

1- عندما $hv \gg kT$ يمكن اهمال 1 في مقام في معادلة بلانك والذي يناظر المقدار B_{21} (اي يمثل الانتقال المحفز) ان هذا الشرط يتحقق لانتقالات طيفية تردداتها واقعة في النطاق المرئي وكذلك تحت البنفسجي باستثناء درجات الحرارة العالية اي ان عملية الانبعاث المحفز تصبح مهمة بالنسبة للانبعاث الذاتي الا اننا يمكن ان نلغي هذا الشرط ونجعل عملية الانبعاث المحفز هي المهيمنة عن طريق الاخلال بحالة التوازن الثرموديناميكي واحداث ظروف غير طبيعية لا تخضع فيها نسبة تأهيل مستويات الطاقة لأحصائية بولتزمان اي خلق تأهيل عكسي لتنشيط عملية الانبعاث المحفز وهو شرط اساسي للحصول على الليزر .

2- عندما $hv \leq kT$

ان هذا الشرط يتحقق لانتقالات طيفية تردداتها واقعة في نطاق الاشعة تحت الحمراء او الاشعة المايكروية في درجات الحرارة الاعتيادية ولا يمكننا اهمال عملية الانبعاث المحفز . حيث ان تأهيل المستوي N_2 حسب احصائية بولتزمان يكون مقاربا N_1 اي الانتقالات نحو الاعلى تساوي الانتقالات نحو الاسفل فضلا عن ان A يتناسب عكسيا مع الطول الموجي وبالتالي يكون الانبعاث المحفز اكبر بكثير من الانبعاث الذاتي للموجات الطويلة لوسط يتواجد فيه اشعاع كهرومغناطيسي ذو شدة عالية ويمثل ذلك سر اكتشاف اشعة الميزر قبل الليزر.



ميكانيكية تعريض الخط الطيفي

عند سقوط اشعاع على ذرة معينة فانها سوف تتعامل معه ليس بطول موجي واحد او تردد واحد بل بتوزيع طيفي يعطى

بالدالة $g(\Delta\omega)$. وكذلك عندما تنتقل الذرة من مستوى طاقة الى مستوى طاقة اخر لا تبعث او تمتص طول موجة او تردد واحد بل نطاق ضيق من الترددات توصف عادة بدالة تعطي شكل الخط الطيفي للانبعاث او الامتصاص. ان شكل الخط الطيفي واسباب تعريضه لا يختلف سواء كان ناتجا من انبعاث او امتصاص.

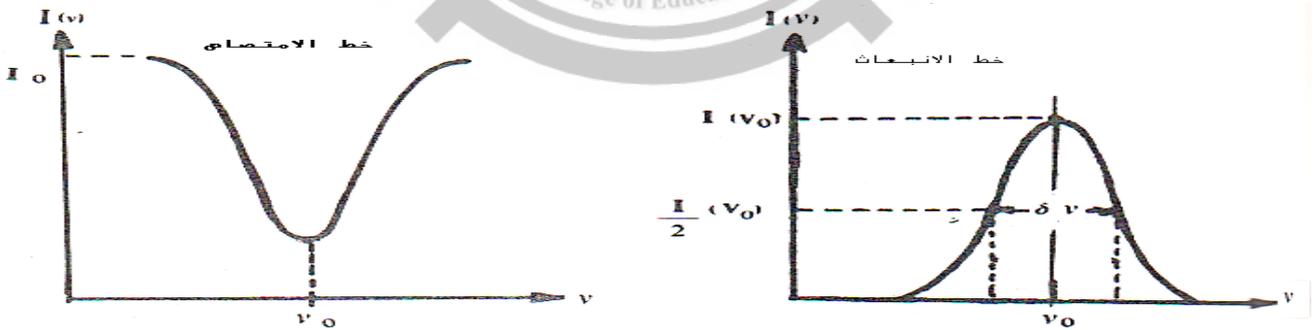
ويمكن ان نصنف تعريض الخط الطيفي الى شكلين رئيسيين هما :

- 1- التعريض المتجانس
ويكون فيه تعريض خط الانتقال لكل ذرة من ذرات المادة بنفس الكيفية وبشكل متماثل. اي ان لجميعها نفس التردد الذي تتمركز حوله وهو تردد الخط الطيفي نفسه.
- 2- التعريض غير المتجانس
وفيه يتوزع التردد للانتقال على مدى ضيق من الترددات وبهذا تعطي ذرات الجهاز باجمعها خطا طيفيا بعرض معين من دون ان يعاني خط الانتقال لكل ذرة على انفراد اي تعريض.

وسندرج ادناه ثلاث عمليات مختلفة تسبب تعريض الخط الطيفي وتشكل نماذج لهذين الشكلين من التعريض ، حيث تعطي تلك العمليات مجتمعة خطا طيفيا بشكل معين وبعرض محدد يتمركز حول تردد الانتقال ν_0 والذي يدعى بالتردد الرنيني للخط الطيفي . حيث يعين عرض الخط الطيفي عادة بعرض الشكل في الموضع الذي تهبط

$$I = \frac{1}{2} I_0$$

فيه شدة الانتقال الى النصف اي $I = \frac{1}{2} I_0$ ويدعى هذا المدى ($\Delta\nu_0$) بعرض الخط الكلي عند منتصف الشدة (FWHM) (full width at half maximum) كما هو واضح في الشكل (17-1) والذي يوضح شدة الخط الطيفي كدالة للتردد نتيجة عمليتي الانبعاث والامتصاص



الشكل (17-1)

التعريض الطبيعي natural broadening

ان الخط الطيفي للانبعاث التقائي يعاني بطبيعته تعريضا متجانسا نتيجة زمن العمر المحدود لمستويي الطاقة τ_1 , τ_2 ذات العلاقة بعملية الانتقال والذين يحدث بينهما الانتقال فمستوى الطاقة لا يمكن ان يتخذ قيمة محددة من الطاقة (E_2)



مثلا) ولكن في الواقع له توزيع ضيق للطاقة يتمركز حول هذه القيمة ويوصف عادة بالمقدار ΔE ، وحسب مبدأ اللادقة تكون :

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$$

$$\Delta E \approx \frac{\hbar}{\Delta t}$$

حيث المقدار Δt يمثل الاحتمالية في الوقت لأيجاد الذرة في مستوى الطاقة E وتقاس هذه الاحتمالية بمتوسط

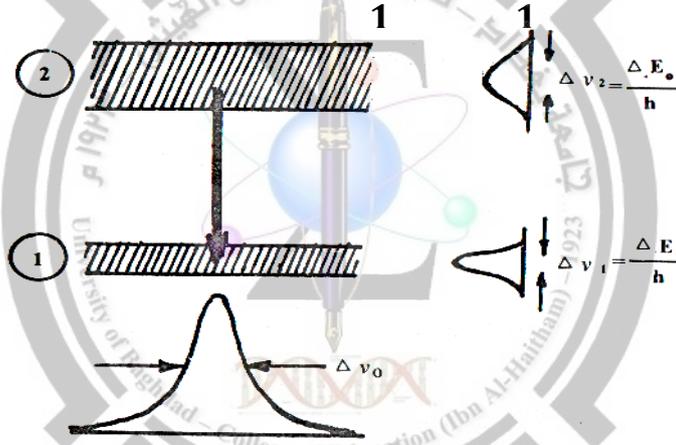
زمن عمر ذلك المستوي τ . اما التردد $\Delta \nu$ المرافق لتوزيع الطاقة ΔE لمستوى الطاقة E

$$\Delta E = h \Delta \nu$$

$$\therefore \frac{h}{2\pi \Delta t} = h \Delta \nu \therefore \frac{\hbar}{\Delta t} = h \Delta \nu \quad \text{but} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta \nu_0 = \frac{1}{2\pi \tau}$$

تمثل $\Delta \nu_0$ عرض الخط الكلي عند منتصف الشدة (FWHM) كما هو واضح في الشكل (18-1) حيث يكون التعريض الطبيعي للخط الطيفي ذو التردد ν_0 والحاصل بين مستويي الطاقة E_2 و E_1 كالآتي :



الشكل (18-1)

اما شكل الدالة التي تعبر عن شكل الخط الطيفي الناتج بسبب هذا النوع من التعريض فهي دالة لورنتز والتوزيع اللورنتزي ويعطى بالدالة

$$g(\nu - \Delta \nu_0)_L = \frac{\Delta \nu_0}{2\pi} \left[(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta \nu_0}{2} \right)^2 \right]^{-1}$$

وبذلك تكون قيمة الدالة عند القمة اي عند الموضع $\nu = \nu_0$ كالآتي

$$g(0) = \frac{2}{\pi \Delta \nu_0}$$

ان هذا التعريض وارد لكل خط طيفي وقد يكون اقل اهمية من بعض اشكال التعريض الاخرى



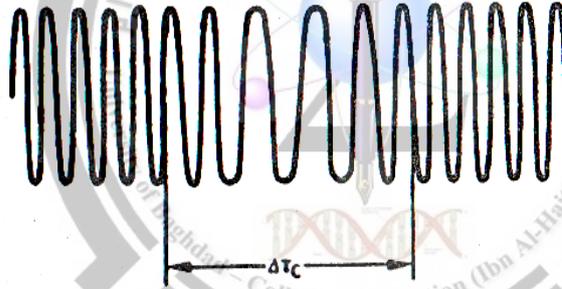
مثال : لو اخذنا خط النيون الاحمر ذو الطول الموجي 632.8 nm (والوارد في ليزر هيليوم-نيون) والحاصل بين مستويي الطاقة $3s_2$ ($\tau_2 = 19.6 \text{ n sec}$) و $3p_4$ ($\tau_1 = 18.7 \text{ n sec}$) فان التعريض الطبيعي لهذا الخط يكون :

$$\Delta v_0 = \frac{1}{2\pi \tau_1} + \frac{1}{2\pi \tau_2} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 18.7 \times 10^{-9}} + \frac{1}{2 \times 3.14 \times 19.6 \times 10^{-9}} = 16.6 \text{ MHz}$$

تعريض التصادم collision broadening

هو تعريض متجانس للخط الطيفي سببه تعرض الذرة المشعة او الممتصة للتصادم مع ما جاورها من الجزيئات والذرات . فمثلا في حالة الغاز تتصادم الذرة مع ذرات او جزيئات اخرى مماثلة او مغايرة لها كذلك مع جسيمات متعادلة او مشحونة وحتى مع جدران الاناء الذي يحويها. ان عملية التصادم والتي يكون زمنها قصير جدا تؤثر على الأشعاع وتحدث فيه تغيرا فجائيا في الطور (لاحظ شكل (19-1)) مما يسبب تعريضا للخط الطيفي ويعتمد مقداره على الزمن ما بين تصادمين τ_c اما شكل الخط الطيفي الناتج عن ذرات المادة والتي تعاني من عملية التصادم فيعطى بدالة لورنتز حيث يكون عرض الخط عند منتصف الشدة.

$$\Delta v_0 = \frac{1}{\pi \tau_c}$$



شكل (19-1) تصرف موجة الا

الكهرومغناطيسي خلال زمن التصادم

ويمكن حساب المقدار τ_c من النظر

الانطلاق اي ان

معدل المسار الحر ومعدل

$$\tau_c \cong \frac{(mkT)^{1/2}}{(8\pi)^{1/2} Pd^2}$$

حيث P ضغط الغاز و d قطر الجزيئة او الذرة و T درجة الحرارة المطلقة و m كتلة الجزيئة

مثال : في ليزر هيليوم-نيون حيث يكون ضغط الغاز عادة 0.67 ملي بار واذا اخذنا قيمة d لذرة النيون حوالي 2.7×10^{-10} متر ففي درجة حرارة الغرفة تكون $\tau_c = 0.5 \times 10^{-6}$ ثانية بهذا يكون عرض الخط عند منتصف الشدة :

$$\Delta v_0 = \frac{1}{\pi \tau_c} = 0.64 \text{ MHz}$$

ومن الواضح ان المقدار τ_c يتناسب عكسيا مع الضغط ولذلك يزداد تعريض الخط بازياد ضغط الغاز اي مع

زيادة تردد التصادم كذلك نسبب عملية التصادم في كثير من الاحيان ازاحة لتردد الخط الطيفي نحو جهة الاحمر (الاطول موجة) او نحو جهة الأزرق (الأقصر موجة)



تعريض دوبلر Doppler broadening

هو تعريض غير متجانس للخط الطيفي حيث تتوزع الترددات للانبعاث على نطاق ضيق يتمركز حول قيمة ν_0 المحددة بفرق الطاقة بين المستويين ذات العلاقة. ان تعريض دوبلر للخط الطيفي سببه الحركة العشوائية للذرة التي تكون حركتها باتجاه موافق او مغاير لاتجاه الأشعاع الكهرومغناطيسي وبهذا يكون التردد الذي تتعرض له الذرة اكثر او اقل من ν_0 وحسب ظاهرة دوبلر تكون :

$$\nu_0 = \nu \left(1 \mp \frac{V}{c}\right)$$

حيث تمثل V انطلاق الذرة و c سرعة الضوء

اما شكل الخط الطيفي $g(\nu - \nu_0)_G$ فيوصف بدالة كاوس (لاحظ شكل 1-20) ويعبر عنها بالدالة

$$g(\nu - \nu_0)_G = \frac{2}{\Delta\nu_0} \left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)^{1/2} \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_0/2}\right)^2 \right]$$

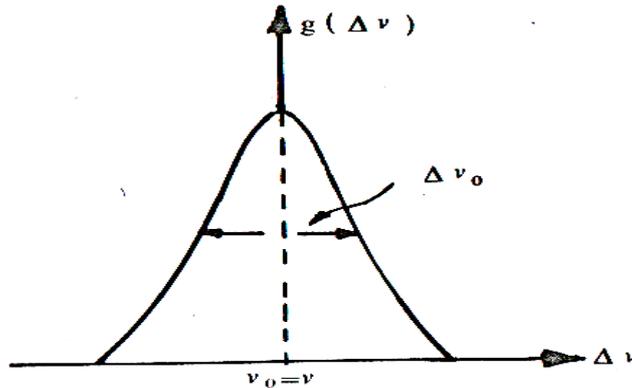
$$\Delta\nu_0 = \frac{2\nu_0}{c} \left(\frac{2kT}{m} \ln 2\right)^{1/2}$$

حيث تمثل T درجة الحرارة المطلقة للوسط k ثابت بولتزمان m كتلة الذرة او الجزيئة .

ولما كان المقدار $\left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2}$ يساوي المقدار $\left(\frac{2RT}{M}\right)^{1/2}$ حيث R الثابت العام للغاز M الوزن الجزيئي لدقيقة الوسط وكلاهما يعبر عن السرعة الأكثر احتمالية لدقائق الوسط V_p لذا

$$\Delta\nu_0 = \frac{2\nu_0 V_p}{c} (\ln 2)^{1/2}$$

$$\Delta\nu_0 = 7.16 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M}}$$



شكل (1-20) منحنى كاوس حيث $\Delta\nu_0$ يمثل عرض المنحنى عند منتصف الشدة



مثال : اذا حسبنا تأثير هذه العملية في تعريض خط طيفي لغاز النيون الذي هو بدرجة حرارة الغرفة ولانتقال الليزر المعروف بطول الموجة 632.8 نانومتر لوجدنا ان تعريض دوبلر لهذا الخط

$$\Delta v_0 = 1.3 \text{ GHz}$$

فلو قارنا هذه القيمة بتلك الناتجة عن التعريض الطبيعي للخط الطيفي ذاته وكذلك الناتجة عن تعريض التصادم له لوجدنا بان تعريض دوبلر هو المهيمن . ويغدو هذا مهما في درجات الحرارة الواطئة (تبريد الغاز) بينما يهيمن تعريض التصادم في ضرف الضغط العالي للغاز (مثلا في ليزر CO₂ حيث يكون الضغط في حدود 1 جو)

الأشباع

هو حالة تخص وجود ذرات الوسط في مجال كهرومغناطيسي ذو شدة عالية وتردد مناسب . نفرض وجود مستويين للطاقة لذرات مادة في مجال كهرومغناطيسي ذو شدة I وتردد $\omega = \omega_0$ وعموما يكون تأثير هذا المجال على ذرات الوسط ان يجعل تاهيل مستويي الطاقة لها بمقدار متساوي اذ يكون تاهيل المستوى الأوطأ N_1 عادة اكثر من تاهيل المستوى الأعلى N_2 وبهذا تكون عملية الأمتصاص $W N_1$ للانتقال باتجاه الأعلى هو اشد من عملية الانبعاث المحفز $W N_2$ للانتقال باتجاه الأسفل . ان محاولة جعل تاهيل مستويي الطاقة للذرة بشكل متساوي تحت تأثير مجال كهرومغناطيسي عالي الشدة هو ما نطلق عليه بالأشباع . فلو فرضنا بان للذرة مستويين للطاقة فقط لاحظ شكل (1-21) . اي ان العدد الكلي لذرات المادة الموجودة في وحدة الحجم N_t

$$N_t = N_1 + N_2$$

اما الفرق بين تاهيل مستويين الطاقة

$$\Delta N = N_1 - N_2$$

حيث $N_1 > N_2$

ويمكن التعبير عن ΔN بدلالة N_t

$$N = \frac{N_t}{1+2W\tau}$$

حيث يعتمد فرق التاهيل بين مستويي الطاقة على خواص ذرات المادة (متوسط زمن العمر τ للمستوى الأعلى وعلى احتمالية الانتقال W) ، اي على شدة الأشباع الساقط I . فعند زيادة I تزداد W وتقل ΔN وعندما تغدو $W\tau \gg 1$ فان ΔN تقترب من الصفر وبهذا تكون $N_1 \approx N_2$ وتساوي تقريبا $\frac{N_t}{2}$ وعندها نحصل على حالة الأشباع بعدها لا يمكن جعل $N_1 < N_2$ بأية حال من الأحوال ومهما زادت شدة الشعاع الساقط .

اما شدة الأشباع اللازم لحدوث الأشباع I_s فيمكن ان نتوصل بالتعبير عنها بالعلاقة الآتية :

$$I_s = \frac{h\omega}{2\sigma\tau}$$



يمثل المقدار σ مقطع الأمتصاص للانتقال .

ان شدة الأشعاع الساقط I_s تعتمد على المادة وكذلك على تردد الشعاع الساقط

أنقسام مستوى الطاقة

في ما تقدم تعاملنا مع مستوى الطاقة للذرة للسهولة وكأنه مستوى واحد غير منقسم على ذاته ، ولكن وحسب الفيزياء الذرية والأطياف الذرية فان هناك انقسام لمستوى الطاقة ولمعرفة تأثير هذا الانقسام نفرض لدينا ذرة بمستويين للطاقة E_1 و E_2 وان منقسمين الى عدد g_1 و g_2 على التوالي من التواردات (المستويات الثانوية) وان N_1 تمثل تأهيل مستوى الطاقة 1 بكافة تواردته وبافتراض انها جميعا ذات تأهيل متساوي لذا يكون تأهيل احدها i مثلا كالاتي :

$$N_{1i} = N_1/g_1$$

كذلك نستطيع ان نتعامل مع اي انتقال يحدث بين احد تواردات المستوى 2 (j مثلا) الى احد تواردات المستوى 1 (i مثلا) ويرمز له بالانتقال ji كما هو مبين في الشكل (1-22). اما فيما يخص بعض الصفات التي تحدد الانتقال بين المستويين 1 و 2 عموما فيمكن التعبير عنها كما يلي

$$W = \sum_{i=1}^{g_1} \sum_{j=1}^{g_2} W_{ij} = \sum_{i=1}^{g_1} \sum_{j=1}^{g_2} W_{ji}$$

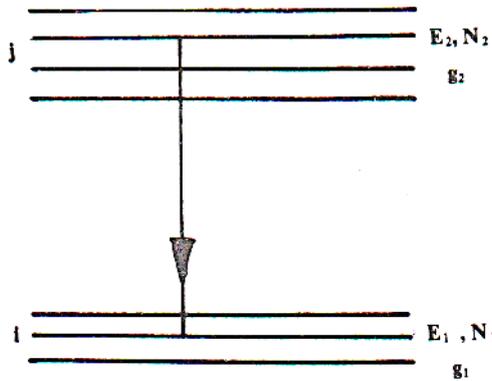
احتمالية الانتقال

$$\sigma_{12} = \frac{W}{g_1 F}$$

امتصاص

$$\sigma_{21} = \frac{W}{g_2 F}$$

انبعاث



شكل (1- 22)

ومن ذلك نستنتج $\sigma_{12} g_1 = \sigma_{21} g_2$

$$\alpha = \sigma_{12} \left(N_1 - N_2 \frac{g_1}{g_2} \right) \quad \text{معامل الأمتصاص}$$

$$G = \sigma_{21} \left(N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1} \right) \quad \text{معامل الكسب}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-(E_2-E_1)/kT} \quad \text{النسبة بين تاهيل المستويين في حالة التوازن}$$

كذلك العلاقة بين معاملات الانتقال B لايشتاين $g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$

يدعى المقدار g بالوزن الاحصائي للمستوى وتعبّر عن حالة الانقسام له ويعتمد على الاعداد الكمية L و S و J وليس على العدد الكمي M . فمستوى الطاقة ذو العدد الكمي J له انقسام بمقدار $(2J+1)$ في حالة عدم وجود مجال خارجي اي ان g يكون $(2J+1)$

مستويات الطاقة للجزيئة

الجزيئة عبارة عن تركيب متين مترابط مكون من ذرتين او اكثر متشابهة او مختلفة . وتتألف الطاقة الكلية للجزيء من :

- 1- طاقة الألكترونات E_e : تحتل المدارات الاخيرة غير المشبعة . وتقع الانتقالات بين مستوياتها في مدى يتراوح بين الموجات تحت الحمراء القريبة ممتدة الى المدى المرئي وكذلك الموجات فوق البنفسجية
- 2- طاقة اهتزازية E_v : وتقع الانتقالات بين مستوياتها في مدى الموجات تحت الحمراء
- 3- طاقة دورانية E_r : وتقع الانتقالات بين مستوياتها في مدى الموجات المايكروية
- 4- طاقة الحركة العشوائية E_t

وعند دراسة الطيف الجزيئي يؤخذ عادة بأنواع الطاقات الثلاثة الأولى لانها جميعا خاضعة لقوانين الكم في حين لا تكون الطاقة الحركية الانتقالية على العموم مكمّاة.

في درجة حرارة الغرفة 300 كلفن تكون E_e و E_v اكبر بكثير من kT وهذا يعني ان الجزيئة في حالة التوازن تأخذ اوطاً مستوى للتذبذب للحالة الالكترونية الارضية



مسائل الفصل الأول

س1/ احسب معدل عدد الفوتونات لكل صيغة تذبذب عند التردد 4×10^{14} هرتز لجسم اسود بدرجة حرارة الغرفة 300 كلفن حسب فرضية بلانك؟

$$\bar{q} = \frac{\bar{E}}{h\nu} = \frac{1}{\frac{h\nu}{e^{kT}} - 1} = \frac{1}{(e^{6.625 \times 10^{-34} \times 4 \times 10^{14} / 1.38 \times 10^{-23} \times 300}) - 1} = 160 \times 10^{-30} \text{ photon}$$

اذن الجسم الاسود بدرجة حرارة الغرفة يكون اشعاعه ضئيل جدا في مدى الضوء المرئي

س2/ برهن ان $R = \frac{A}{\rho B} = \frac{h\nu}{e^{kT}} - 1$ (حيث R تمثل النسبة بين معدل الانبعاث التلقائي ومعدل الانبعاث المحفز) ثم

جد :

1. قيمة المقدار R لمصباح تنكستن يعمل بدرجة حرارة 2000 كلفن وذات تردد انبعاث مقداره 5×10^{14} هرتز
2. قيمة المقدار R للضوء الاصفر (5900 انكستروم) درجة حرارة الغرفة 300 كلفن
3. بأي درجة حرارة يكون معدل الانبعاث المحفز مساويا لمعدل الانبعاث التلقائي للضوء الاصفر (5900 انكستروم)
4. ما هو طول الموجة التي يكون فيها $R = 1$ بدرجة حرارة الغرفة

$$\rho_v = \frac{8 \pi h \nu^3 / c^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

معادلة بلانك

$$\frac{A}{B} = \frac{8 \pi h \nu^3}{c^3}$$

$$R = \frac{A}{\rho B} = \frac{A}{B} \times \frac{1}{\rho} = \frac{8 \pi h \nu^3}{c^3} \times \frac{1}{\frac{8 \pi h \nu^3 / c^3}{e^{h\nu/kT} - 1}} = e^{h\nu/kT} - 1$$

$$R = e^{h\nu/kT} - 1 = (e^{6.625 \times 10^{-34} \times 5 \times 10^{14} / 1.38 \times 10^{-23} \times 2000}) - 1 = 1.63 \times 10^5 \quad .1$$

وهذه النتيجة تبين هيمنة الانبعاث التلقائي

$$R = e^{hc/kT\lambda} - 1 = (e^{6.625 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 5900 \times 10^{-10}}) - 1 = 2.25 \times 10^5 \quad .2$$

$$R = 1 = e^{hc/kT\lambda} - 1 \rightarrow 2 = e^{\frac{hc}{kT\lambda}} \rightarrow \ln 2 = \frac{hc}{kT\lambda} \rightarrow T = \frac{hc}{k\lambda \ln 2} = .3$$

$$6.625 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 1.38 \times 10^{-23} \times 5900 \times 10^{-10} \times 0.693 = 3.5 \times 10^4 K$$

$$R = 1 = e^{hc/kT\lambda} - 1 \rightarrow 2 = e^{\frac{hc}{kT\lambda}} \rightarrow \ln 2 = \frac{hc}{kT\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{hc}{kT \ln 2} = .4$$

$$6.625 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 0.693 = 6.9 \times 10^{-5} m$$



س3 / إذا كانت $\rho_v = \rho g(\Delta v)$ اوجد مقطع الامتصاص σ ومعامل الأمتصاص α ومعامل الكسب G بدلالة $g(\Delta\omega)$

$$\rho_v = \rho g(\Delta v)$$

$$W = B \rho_v = B \rho g(\Delta v) \dots\dots (1)$$

$$I = \frac{\rho c}{n}$$

$$F = \frac{I}{\hbar\omega} = \frac{\frac{\rho c}{n}}{\frac{h}{2\pi} 2\pi\nu} = \frac{\rho c}{nh\nu}$$

$$\sigma = \frac{W}{F} = \frac{B \rho g(\Delta v)}{\frac{\rho c}{nh\nu}} = \frac{Bn h\nu g(\Delta v)}{c}$$

$$\alpha = \sigma (N_1 - N_2) = \frac{Bn h\nu g(\Delta v)}{c} (N_1 - N_2)$$

$$G = \sigma (N_2 - N_1) = \frac{Bn h\nu g(\Delta v)}{c} (N_2 - N_1)$$

س4 / احسب النسبة بين تأهيل مستويين للطاقة بدرجة حرارة الغرفة 300 كلفن حسب احصائية بولتزمان اذا كان الطول الموجي للموجة الساقطة على هذا النظام هو 590 نانومتر؟ ثم جد الطاقة اللازمة لجعل هذه النسبة مساوية للنصف؟

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu}{kT}} = e^{-\frac{hc}{kT\lambda}} = \left(e^{-\frac{6.625 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 590 \times 10^{-9}} \right) = 81.401$$

$$\text{When } \frac{N_2}{N_1} = 1/2$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\frac{h\nu}{1.38 \times 10^{-23} \times 300}} = e^{-\frac{h\nu}{4.14 \times 10^{-21}}}$$

$$\ln 1 - \ln 2 = -\frac{h\nu}{4.14 \times 10^{-21}}$$

$$Jh\nu = 2.86 \times 10^{-21}$$

س5/ قارن بين تعريض التصادم وتعريض دوبلر للخط الطيفي لغاز النيون في درجة حرارة الغرفة 300 كلفن ولانتقال الليزر ذي الطول الموجي 632 نانومتر علما ان الوزن الجزيئي للنيون 18.6 و زمن التصادم 0.5×10^{-6} ثانية

$$\Delta v_0)_c = \frac{1}{\pi \tau_c} = \frac{1}{3.14 \times 0.5 \times 10^{-6}} = 0.64 \text{ MHz}$$

$$\Delta v_0)_D = 7.16 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{M}} = 7.16 \times 10^{-7} \frac{c}{\lambda} \sqrt{\frac{T}{M}} = 7.16 \times 10^{-7} \frac{3 \times 10^8}{632 \times 10^{-9}} \sqrt{\frac{300}{18.6}}$$

$$= 1.365 \text{ GHz}$$

$$\frac{\Delta v_0)_D}{\Delta v_0)_c} = \frac{1.365 \times 10^9}{0.64 \times 10^6} = 2.133 \times 10^3$$

$$\therefore \Delta v_0)_D \gg \Delta v_0)_c$$

اي تعريض دوبلر هو المهيمن

س6/ متى تختصر معادلة بلانك المكتملة للطاقة $\bar{E} = \frac{hv}{e^{-hv/kT} - 1}$ الى المعادلة التقليدية للطاقة $\bar{E} = kT$ عندما يكون الطول الموجي λ كبير وهذا معناه ان التردد ν صغير حسب العلاقة $\nu = c/\lambda$ وبالتالي المقدار hv يكون اصغر بكثير من kT

$$\bar{E} = \frac{hv}{e^{-hv/kT} - 1} = \frac{hv}{1 + \frac{1}{1!} \frac{hv}{kT} + \frac{1}{2!} \left(\frac{hv}{kT}\right)^2 + \dots - 1} = \frac{hv}{\frac{hv}{kT}} = kT$$

حيث ان المقدار hv صغير فيهمل المقدار $\left(\frac{hv}{kT}\right)^2$ (مفكوك تايلور للدالة الأسية ...)

س7/ فجوة حجمها 1 سم³ ، احسب عدد صيغ التذبذب فيها والواقعة في مدى موجي عرضه 10 نانومتر تتمركز حول موجة طولها 600 نانومتر

$$N_v dN_v = \frac{8 \pi V \nu^2 d\nu}{c^3} \rightarrow Nd\lambda = \frac{8 \pi V \frac{c^2}{\lambda^2} d\left(\frac{c}{\lambda}\right)}{c^3} = \frac{8 \pi V c^3 \frac{1}{\lambda^2} d\lambda}{c^3 \lambda^2} = \frac{8 \pi V d\lambda}{\lambda^4}$$

$$= \frac{8 \times 3.14 \times 1 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^{-9}}{(600 \times 10^{-9})^2} = 1.9 \times 10^{12} \text{ نمطا}$$



س8/ نابض حلزوني يحمل كتلة مقدارها 1 كغم وثابت النابض 20 ن/م يتذبذب بحركة توافقية بسيطة سعنتها 1 سم أ- إذا كانت طاقة النابض مكتمة (تخضع لمعادلة بلانك) فما هو العدد الكمي n للنابض ب- إذا تغير n بمقدار 1 فما هو التغير في طاقة النابض؟ ماذا تستنتج؟

$$E = \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} \times 20(0.01)^2 = 0.001 J$$

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2 \times 3.14} \sqrt{\frac{20}{1}} = 0.712 \text{ HZ}$$

$$E = nhv \quad \therefore n = \frac{E}{hv} = \frac{0.001}{6.625 \times 10^{-34} \times 0.712} = 2.11 \times 10^{30}$$

$$E = nhv = 1 \times 6.625 \times 10^{-34} \times 0.712 = 4.7 \times 10^{-34} J$$

وهذا يعني ان مقدار التغير في طاقة النابض صغير جدا (يمكن اهماله) اذا ما تغير العدد الكمي بمقدار 1 وبالتالي فان طاقة النابض اذا ما كتمت فان تغيرها ضئيل جدا وان مبدأ تكميم الطاقة يصح فقط في الذرات والجزيئات حيث يكون تأثيره واضح ويمكن قياسه

س9/ في التوزيع الطيفي للجسم الأسود (شكل 10-1) λ_m هي قيمة طول الموجة التي تعطي النهاية العظمى للدالة كما انها تحقق المعادلة $\lambda_m T = 2.9 \times 10^{-3} m.K$ (قانون فين للازاحة) احسب مقدار λ_m في درجة حرارة 6000 كلفن ، وما هو اللون المناظر لطول الموجة هذه ؟

$$\lambda_m(6000) = 2.9 \times 10^{-3} \quad \therefore \lambda_m = 4833 \times 10^{-10} m = 483.3 \text{ nm}$$

اللون المناظر لطول الموجة هو ازرق مخضر

بنفسجي	نيلي	ازرق	اخضر	اصفر	برتقالي	احمر
420	440	470	530	580	620	700

س10/ على افتراض ان خيط التنكستن لمصباح كهربائي يمثل الجسم الاسود احسب مقدار λ_m (قانون فين للازاحة) في درجة حرارة 2900 كلفن ، وما هو اللون المناظر لطول الموجة هذه ؟

$$\lambda_m(2900) = 2.9 \times 10^{-3} \quad \therefore \lambda_m = 1 \times 10^{-6} m = 1000 \text{ nm}$$

على الرغم من ان المصباح يعطي الضوء الابيض ولكن عند النهاية العظمى λ_m تقع ضمن منطقة الاشعة تحت الحمراء وذلك يفسر سبب الحرارة المنبعثة من المصباح



س11/ إذا تضاعفت شدة الضوء المارة مرة واحدة خلال وسط ليزري طوله 0.5 متر .1- احسب معامل الكسب على اعتبار ان الجهاز لا يتضمن خسارة . 2- اذا كانت الزيادة في شدة الاشعاع بمقدار 5% لنفس المسار فكم يكون معامل الكسب ؟

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-\alpha x} \rightarrow \frac{2I_0}{I_0} = e^{-\alpha(0.5)} \rightarrow \ln 2 = -0.5\alpha \rightarrow \alpha = -1.39 m^{-1} \quad - 1$$

$$G = -\alpha = 1.39 m^{-1}$$

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-\alpha x} \rightarrow \frac{1.05 I_0}{I_0} = e^{-\alpha(0.5)} \rightarrow \ln 1.05 = -0.5\alpha \rightarrow \alpha = -0.098 m^{-1} \quad - 2$$

$$G = -\alpha = 0.098 m^{-1}$$

س12/ ما مقدار التعريض الطبيعي للخط الطيفي للانبعاث الناتج عن ثنائي القطب الكهربائي ؟ علما ان $\tau = 10^{-8}$

$$\Delta v_0 = \frac{1}{2\pi \tau} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10^{-8}} = 15.9 \times 10^6 Hz$$

س 13 / احسب التعريض الكلي المتجانس للخط الطيفي $\lambda = 633 nm$ لخط النيون اذا علمت Δv للتعريض الطبيعي يساوي 20 ميكاهيرتز و Δv لتعريض التصادم 0.64 ميكاهيرتز ؟

$$\Delta v_t = \Delta v_0 + \Delta v_c = 20.64$$

شكل كاوسي لورنتزي

س14/ احسب تعريض دوبلر للخط الطيفي $\lambda = 10.6 \mu m$ لجزيئة CO_2 في درجة حرارة 400 كلفن . علما ان تعريض التصادم لهذا الانتقال في ليزر CO_2 حوالي 0.5 ميكاهرتز / تور ، احسب ضغط CO_2 الذي يعطي تعريض مماثل لتعريض دوبلر علما ان الوزن الجزيئي له 44.01؟

$$\Delta v_{(D)} = 7.16 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{M}} = 7.16 \times 10^{-7} \frac{c}{\lambda} \sqrt{\frac{T}{M}} = 7.16 \times 10^{-7} \frac{3 \times 10^8}{10.6 \times 10^{-6}} \sqrt{\frac{400}{44.01}}$$

$$= 1.365 GHz$$



مثال: ما هي درجة الحرارة اللازمة لحدوث الفعل الليزري وتوليد الليزر؟

الحل:

نفرض أن الطول الموجي لشعاع الليزر الناتج هو $\lambda = 0.55 \mu m$ فيكون التردد ν كالآتي:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{0.55 \times 10^{-6}} = 5.45 \times 10^{14} Hz$$

والآن نطبق قانون بولتزمان لتوزيع الذرات والجزيئات

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{KT}\right) \Rightarrow 1.1 = \exp\left(-\frac{6.63 \times 10^{-34} J.s \times 5.45 \times 10^{14} Hz}{KT}\right)$$

$$\ln(1.1) = \frac{6.63 \times 10^{-34} J.s \times 5.45 \times 10^{14} Hz}{KT}$$

$$T = \frac{6.63 \times 10^{-34} J.s \times 5.45 \times 10^{14} Hz}{\ln(1.1) \times 1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}}$$

$$T = 2.7475 \times 10^3 K$$



الفصل الثاني

الميزر والليزر

الميزر : MASER : كلمة مأخوذة من عبارة Microwave Amplification By Stimulated Emission Of Radiation أي تضخيم الموجات المايكروية بواسطة الانبعاث المحفز للإشعاع .

في البداية، تمكن العالم تاونس وطلابه من الحصول على الميزر بين عامي 1954 حيث لاحظ ان جزيئات الامونيا تمتص اشعة ذات طول موجة 1.25 سم ولتطبيق فكرة الانبعاث المحفز بين اثنين من مستوياتها لغرض تكبير الموجة واحراز التأهيل العكسي قام بفصل جزيئات الامونيا ذات الطاقة العالية والمتواجدة في المستوى الاعلى بالحركة باتجاه معين عن تلك المتواجدة في المستوى الأوطأ بالحركة بالاتجاه الاخر وذلك باستخدام مجال كهربائي غير متجانس من خلال ترتيب معين لأقطاب المجال ، ثم جعل تلك الجزيئات تتجه الى مرنان لغرض تكبير الاشارة ضمن تردد مناسب وباستمرار ضخ الجزيئات المحرصة الى المرنان نحصل على الميزر .

وبظهور ميزر الامونيا طرحت طرق اخرى كثيرة بهدف الحصول على التأهيل العكسي تختلف عن طريقة فصل الجزيئات ومن هذه الطرق الضخ البصري وبينما كانت تقنية الميزر في طريقها الى الرسوخ كانت الرغبة شديدة لتوسيع نطاق تطبيق تقنية الانبعاث المحفز ليشمل طيف الاشعة تحت الحمراء والاشعة المرئية وبالتالي الحصول على ما يسمى بالميزر البصري والذي يحتاج تصنيعه اجراء تحويلات مهمة والتغلب على الكثير من الصعوبات والمشاكل ومنها :

1- تكون الفروق في مستويات الطاقة اللازمة لتوليد اشعة مرئية كبيرة مقارنة بالمقدار KT غي درجة حرارة الغرفة بينما تكون فروق الطاقة في حالة الميزر صغيرة مقارنة بالمقدار KT ذلك يؤدي الى ضرورة البحث عن اساليب اخرى لتأهيل المستوى المتهيج للطاقة والمطلوب تحفيزه وبالتالي يكون معدل ضخ الطاقة لجهاز الليزر اعلى بكثير مما عليه في الميزر .

2- في نطاق الاشعة المرئية يكون الانبعاث التلقائي A هو المهيمن على عملية الانبعاث المحفز B وذلك لوجود العامل v^3 في المعادلة ادناه والمطلوب في حالة الليزر تقليص الانبعاث التلقائي والعمل على تقوية الانبعاث المحفز .

$$\frac{A}{B} = \frac{8 \pi h v^3}{c^3}$$

3- سهولة تصميم المرنان في حالة الميزر بحيث يناسب طول الموجة المايكروية (حوالي 1.25 سم) وتسمح فقط باحتواء صيغة تذبذب واحدة . اما في حالة التطبيق في نطاق الطيف المرئي يكون طول الموجة صغير جدا (متوسط طول الموجة حوالي 0.00005 سم) وبالتالي فان اي تصميم يمكن تحقيقه عمليا سيسمح بتواجد عدد كبير من صيغ التذبذب تقع ضمن النطاق الترددي وتلك الصيغ تضعف عمل الليزر وتؤثر على استقراريته.

4- في مدى الموجات المايكروية ولعملية الانبعاث المحفز يمكن انجاز الضخ البصري باستخدام اشعة صادرة من مولدات اشارة يمكن موائفة ترددها مع التردد المطلوب بينما لم تكن تتوفر وقتها مصادر ضوئية تعمل بنفس الطريقة وبقدرة عالية قبل ظهور مصادر الليزر ذاتها .

لقد كان واضحا لدى العالمان تاونس وشافلوف بان الشرط الضروري لنجاح الميزر البصري هو توجيه معظم طاقة الاشعاع المرئي الى عدد قليل جدا من صيغ التذبذب. لهذا اقترحا بان تحول جميع صيغ التذبذب داخل التجويف عدا القليل منها الى صيغ مبددة للطاقة لكي نحجب التذبذبات المرافقة لها . ولقد ادى هذا الاستنتاج الى فكرة استخدام



مقياس التداخل للباحثين فابري- بيرو ليعمل كمرنان الذي هو عبارة عن تركيب نصف مفتوح بمرآتين متعاكستين متقابلتين يوضع الوسط الفعال بينهما وهو يمثل الان التصميم القياسي لمرنان اجهزة الليزر .

وقد شيد الأمريكي ثيودور مايمان أول ليزر في عام 1960م في مختبرات بحوث هيوز في الولايات المتحدة الامريكية والذي اعتمد في انجازه على ما نشره تاونس وبعد عدة ايام فقط . حيث استخدم مايمان الياقوت الوردي كوسط فعال لأول ميزر بصري (سمي فيما بعد بالليزر) بخطة ضخ تتضمن ثلاث مستويات لتوليد التأهيل العكسي مستخدما مصباح ومضي من الزينون للتشجيع . بعد ذلك في عام 1960 تم الحصول على الليزر بخطة ضخ من اربع مستويات ويعتبر ايضا من ليزرات الحالة الصلبة . ثم اعلن جافال ومجموعة بحثه على نجاح تشغيل ليزر حالة الغاز (ليزر هيليوم -نيون) بطريقة الضخ الكهربائي حيث يكون الليزر الناتج منه ثابت الشدة (مستمر) وليس نبضي كما هو الحال في ليزر الياقوت .

اما تقنية ليزر شبه الموصل فبدأت في عام 1962 حيث تتم عملية الاثارة في مادة شبه الموصل باستخدام مجال كهربائي بحيث يمكن الحصول على الليزر من الملتقى (منطقة التقاء سطحي البلوريتين n و p) . بينما تم اكتشاف ليزر الحالة السائلة والليزر الكيماوي في اوائل عام 1963 .

اساسيات عمل الليزر

لكي تعمل اجهزة الليزر يجب ان يتوفر لها ثلاث شروط اساسية وهي :

1- وجود الوسط الفعال

وهو القاعدة الاساس لعمل الليزر ويتمثل بنظام ذو عدد كبير من الذرات او الجزيئات او الايونات والتي تبعث طيفا يقع جزء منه في المدى المرئي من الاشعاع الكهرومغناطيسي .

2- تحقيق التأهيل العكسي

وهو شرط ضروري لجعل عملية الانبعاث المحفز نشطة عن طريق استخدام طرق ضخ معينة تنفذ وفق مخططات خاصة تناسب مستويات الطاقة لذرات الوسط الفعال .

3- التغذية الأسترجاعية

وهو شرط ضروري لكي يأخذ الاشعاع تذبذبه الصحيح للحصول على حزمة من الاشعة ذات درجة عالية من صفة الاتجاهية وصفه التشاكة . ويمكن تحقيقه باستخدام المرنان .

4- شرط العتبة :

وهو شرط مهم لعمل كل من الليزر والميزر ولا بد من تحقيق متطلبات هذا الشرط لتبدأ عملية التكبير في الوسط الفعال ومن ثم عملية التذبذب في المرنان .



التأهيل العكسي وشرط العتبة

ان الربح ومعامل الكسب في عملية الانبعاث المحفز يعتبر مقدار صغيرا لذا يستوجب تقليص كافة مسببات الخسارة في جهاز الليزر ومنها الخسارة الناتجة من امتصاص مرايا المرنان وتقليصها تستخدم طلاءات عازلة ذي قدرة انعكاس عالية لأكساء المرايا وبطبقات عديدة بدلا من الطلاء المعدني ، ان هذه الطبقات المتعاقبة ذات سمك $\frac{\lambda}{4}$ ومعاملات انكسار متعاقبة (عالي ثم واطيء) ترسب بالتعاقب على مادة الاساس الزجاجية وبسبب الاختلاف في الطور والذي يحدث عند موضع تلامس اي طبقتين تكون جميع الاشعة المنعكسة بطور واحد وتتداخل بشكل بناء. تستخدم عادة اكثر من عشرين طبقة للحصول على انعكاسية تقرب من 99.9%

الخسارة الكلية في جهاز الليزر

هناك عدة عوامل تسبب خسارة في جهاز الليزر وعلى الرغم من تباين مقاديرها لاختلاف انواع الليزر الا انها تشترك في معظمها واهمها :

1- النفوذ من مرايا المرنان حيث تصنع مرآتي المرنان بحيث تكون احدها ذات انعكاس كلي والاخرى ذات انعكاس جزئي وهي المرآة التي يخرج منها الليزر ، كذلك هناك خسارات اخرى في المرايا ناتجة من الامتصاص والتطير والحيود.

2- الخسارة في الوسط الفعال لليزر بسبب حدوث انتقالات اخرى لا علاقة لها بانتقال الليزر ويحدث ذلك نتيجة امتصاص الوسط لنطاق عريض من طاقة الضخ اضافة للخسارة الناجمة من التطير بسبب فقدان الوسط الفعال للتجانس البصري وهذه الخسارة توجد بشكل خاص في ليزر الحالة الصلبة .

ان جميع انواع الخسائر عدا خسائر النفوذ في المرايا يشار لها بالمقدار γ ، بالتالي سيتقلص معامل الكسب G الى $(G - \gamma)$ ولحساب الربح عند العتبة سنحسب مقدار التغير في شدة الاشعاع نتيجة رحلة واحدة له داخل المرنان ، وعلى افتراض ان الوسط يملئ الفسحة بين المرآتين M_1 , M_2 واللتين لهما قدرة انعكاسية R_1 , R_2 على التوالي وانهما على مسافة l بينهما :

$$I = I_0 e^{(G-\gamma)l}$$

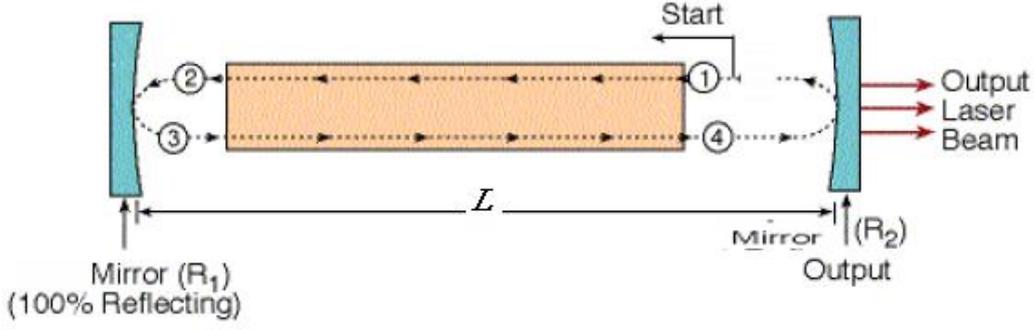
وان هذه الشدة بعد انعكاسها عن المرآة M_2 ستصبح

$$I = R_2 I_0 e^{(G-\gamma)l}$$

وبعد رحلة كاملة تصبح الشدة

$$I = R_1 R_2 I_0 e^{2l(G-\gamma)}$$

لذلك فان مقدار الربح Γ وبعد رحلة كاملة يعبر عنه $\Gamma = \frac{I}{I_0} = R_1 R_2 e^{2l(G-\gamma)}$



فإذا كان الربح اكبر من واحد عند التردد المطلوب

شكل (1-2)

فإذا كان الربح اكبر من واحد عند التردد المطلوب فان التضخيم ينمو وكذلك التذبذب . اما في حالة كون الربح اقل من واحد فان التذبذب يتلاشى لذا يمكن كتابة شرط العتبة على النحو التالي :

$$R_1 R_2 e^{2l(G_{th}-\gamma)} = 1$$

حيث تمثل G_{th} معامل كسب العتبة ويساوي

$$G_{th} = \gamma + \frac{1}{2l} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$

يمثل الحد الاول من المعادلة اعلاه الخسارة في الوسط الفعال (خسارة الحجم) ويمثل الحد الثاني الخسارة في تصميم المرنان ($R_1 R_2, l$) وهذه الخسارة تتضمن التسرب النافع لنتاج الليزر .

ولجهاز ليزر يعمل بموجة مستمرة cW فان قيمة معامل الكسب عند العتبة G_{th} تساوي القيمة نفسها في حالة الاستقرار وغالبا ما يطلق عليها بمعامل كسب الاشباع G_s ولهذه الحالات يكون الربح مساويا الى مجموع الخسارة في جهاز الليزر .

ان الخسارة بدلالة التأهيل العكسي يمكن التعبير عنه بالمقدار N وكالاتي

$$N = \frac{G}{\sigma} = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right)$$

$$W = B \rho_v = B \rho g (\Delta v)$$

$$I = \frac{\rho c}{n}$$



$$F = \frac{I}{\hbar\omega} = \frac{\frac{\rho c}{n}}{\frac{h}{2\pi} 2\pi\nu} = \frac{\rho c}{nh\nu}$$

$$\sigma = \frac{W}{F} = \frac{B \rho g(\Delta\nu)}{\frac{\rho c}{nh\nu}} = \frac{Bn h\nu g(\Delta\nu)}{c} = \frac{Bn h\nu g(\Delta\nu)}{c}$$

$$N = \frac{G}{\sigma} = \frac{G}{\frac{Bn h\nu g(\Delta\nu)}{c}} = \frac{Gc}{Bn h\nu g(\Delta\nu)}$$

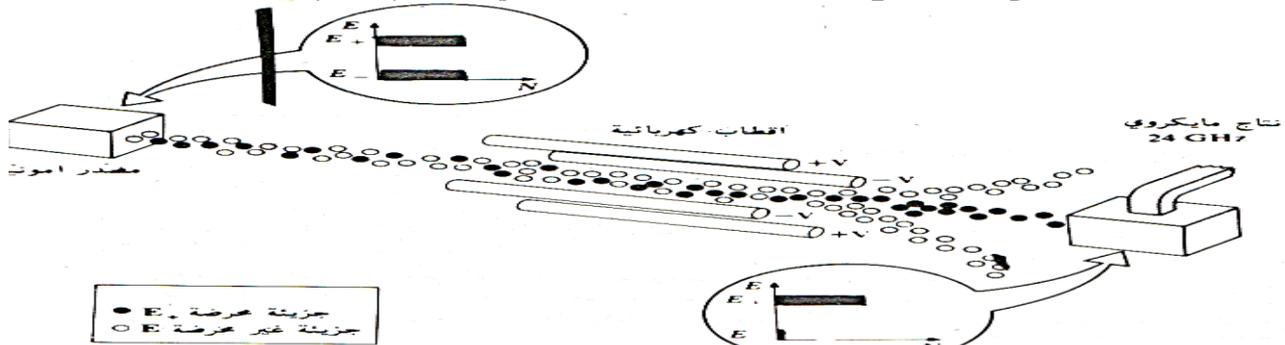
عند العتبة يكون للتأهيل العكسي قيمة حرجة اي ان :

$$N_c = \frac{G}{\sigma} = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right)_c = \frac{G_{th} c}{Bn h\nu g(\Delta\nu)}$$

خط الضخ

الغرض من الضخ هو تحقيق التأهيل العكسي بمقدار يتجاوز القيمة الحرجة لمستويين بحيث يؤدي الى انتاج اشعاع يتضخم عن طريق الانبعاث المحفز وذلك لا يمكن تحقيقه باستخدام نظام ذري مكون من مستويين فقط للطاقة (خطة ضخ ذو مستويين) وذلك بسبب تولد حالة الاشباع عند استخدام شعاع كهرومغناطيسي شديد ذو تردد مناسب حيث يتساوى تأهيل المستويين ويصبح الوسط شفافا للاشعاع .

ولكن لا بد من الاشارة الى نظام المستويين الذي استخدم في ميزر الامونيا والذي تحقق عن طريق الفصل الفيزيائي في بين حالتي الجزيئة وبالتالي الاختلاف في استجابة جزيئات الامونيا ذات الطاقة العالية والمتواجدة في المستوى الاعلى بالحركة باتجاه معين عن تلك المتواجدة في المستوى الأوطأ بالحركة بالاتجاه الاخر وذلك باستخدام مجال كهربائي غير متجانس من خلال ترتيب معين لأقطاب المجال ثم جعل تلك الجزيئات تتجه الى مرنان لغرض تكبير الاشارة ضمن تردد مناسب وباستمرار ضخ الجزيئات المحرصة الى المرنان نحصل على الميزر حيث ان التأهيل العكسي في الميزر لا يتحقق الا عن طريق عملية الفصل بين الجزيئات ولا يمكن تحقيقه فقط بضخ جزيئات الامونيا باشعاع كهرومغناطيسي شديد ذو تردد 24 كيكاهيرتز اذ سرعان ما يصل وسط غاز الامونيا الى حالة الاشباع ويتساوى عندها تأهيل المستوى الاعلى للانتقال مع تأهيل المستوى الأسفل كما في الشكل (2-2) .



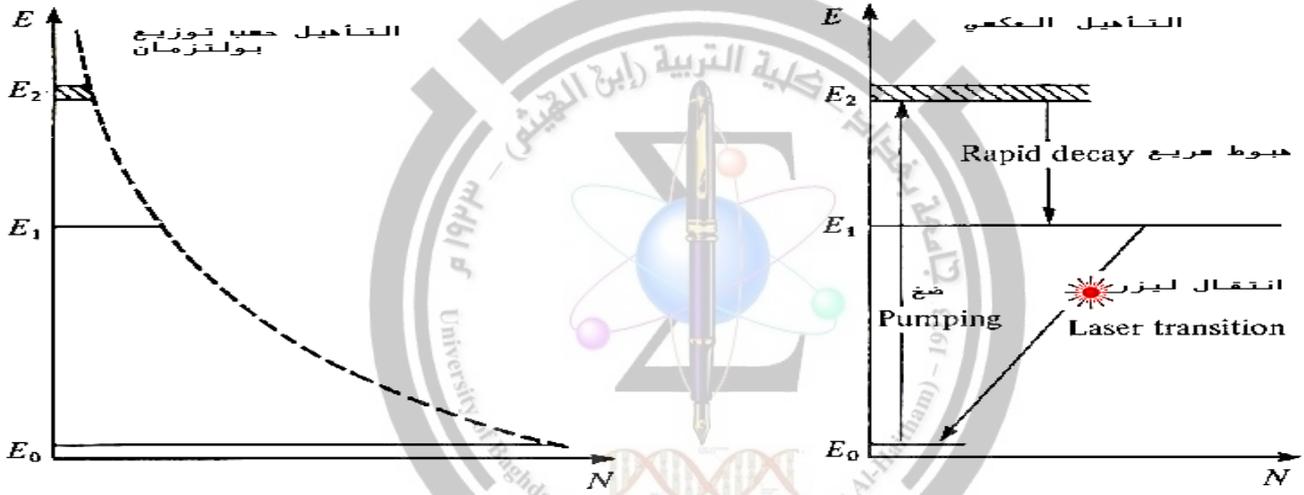
شكل 2-2



وبناء على ما تقدم لا يمكن انتاج ليزر الا باستخدام ثلاث او اربع مستويات للطاقة وعندها يسمى بليزر الثلاث مستويات او ليزر الاربعة مستويات معتمدين بذلك على عدد المستويات لتنفيذ عملية الضخ وتحقيق التأهيل العكسي لمستويي الطاقة ذات العلاقة بالانبعاث المحفز.

اولاً - خطة ضخ ذو ثلاث مستويات

تم اقتراحها من قبل العالم بلومبركن في جامعة هارفرد عام 1956 ، حيث يتم فيها رفع الذرات بالضخ بطريقة من المستوى الارضي E_0 الى المستوى E_2 والذي يجب ان يكون متوسط زمن عمره قصير جدا وبذلك سوف تهبط الذرات بسرعة الى المستوى E_1 الذي يكون متوسط زمن عمره طويل جدا وعند تحقق هذين الشرطين يمكننا تعبئة المستوى E_1 بالذرات عن طريق الضخ من المستوى الارضي E_0 وعبر المستوى E_2 (حدوث تأهيل عكسي) ويتولد اشعاع الليزر المطلوب عند الانتقال من المستوى E_1 الى المستوى الارضي E_0 كما في الشكل (2-3) . ومن امثله ليزر الياقوت .

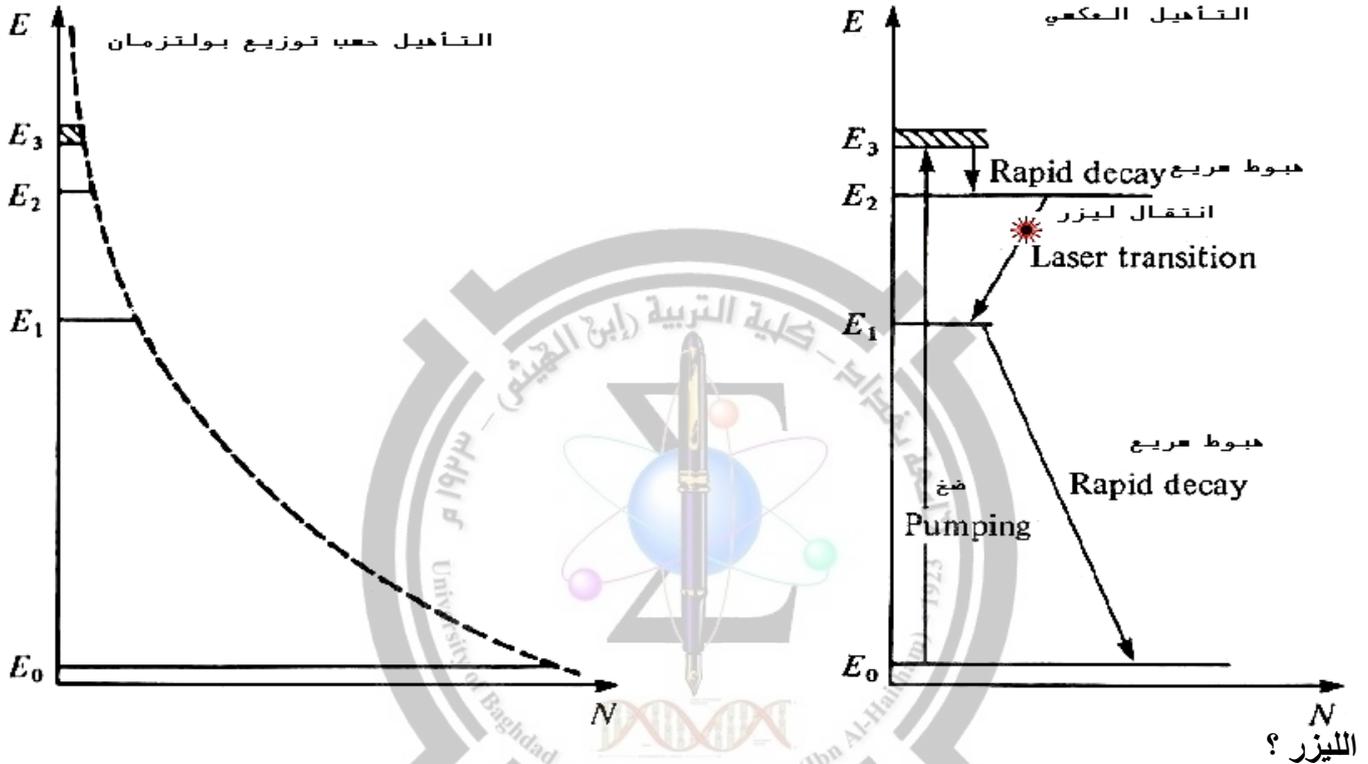


الشكل (2-3) : تأهيل مستويات الطاقة لنظام مكون من ثلاث مستويات



ثانياً - خطة ضخ ذو اربع مستويات

وفيها ترفع الذرات من المستوى الارضي E_0 الى المستوى E_3 والذي يجب ان يكون متوسط زمن عمره قصير جدا وبذلك سوف تهبط الذرات بسرعة الى المستوى E_2 الذي يكون متوسط زمن عمره طويل جدا وبالتالي يمكننا تعبئة المستوى E_2 بالذرات وحدث تاهيل عكسي بين المستوى E_2 و المستوى E_1 ويتولد اشعاع الليزر المطلوب عند الانتقال من المستوى E_2 الى المستوى E_1 بعدها يحصل هبوط سريع من المستوى E_1 الى المستوى الارضي E_0 كما في الشكل (2-4) . ومن امثله ليزر النديميوم - ياك.



ج/ ان التأهيل العكسي في خطة اربعة مستويات اسهل من خطة بثلاث مستويات اذ تكون قدرة الضخ في الاربعة مستويات اقل بسبب ان جميع الذرات تقريبا (N_1) تكون في الحالة الأرضية قبل الضخ حسب توزيع بولتزمان فعند استخدام خطة ضخ من ثلاث مستويات نبدأ برفع الذرات من المستوى الأرضي E_0 الى المستوى E_2 بعدها تهبط بسرعة الى المستوى E_1 لذا يبقى المستوى E_2 فارغ تقريبا وبالتالي يتحتم علينا رفع $1/2 N_1$ الى المستوى E_1 عبر المستوى E_2 لكي نساوي اولا تأهيله مع المستوى الارضي E_0 بعد هذا يكون وصول اي ذرة اضافية الى المستوى E_2 اشارة الى تحقيق التأهيل العكسي . بينما عند استخدام خطة ضخ ذي اربع مستويات وما دام المستوى E_1 فارغاً في البداية فان اي ذرة تصعد الى المستوى E_2 عن طريق المستوى E_3 ستحقق تأهيلاً عكسياً . وبناء على ما تقدم فمن المناسب اختيار الوسط الذي يعمل بمنظومة ضخ ذي اربع مستويات وهذا هو سبب استخدامها بكثرة .

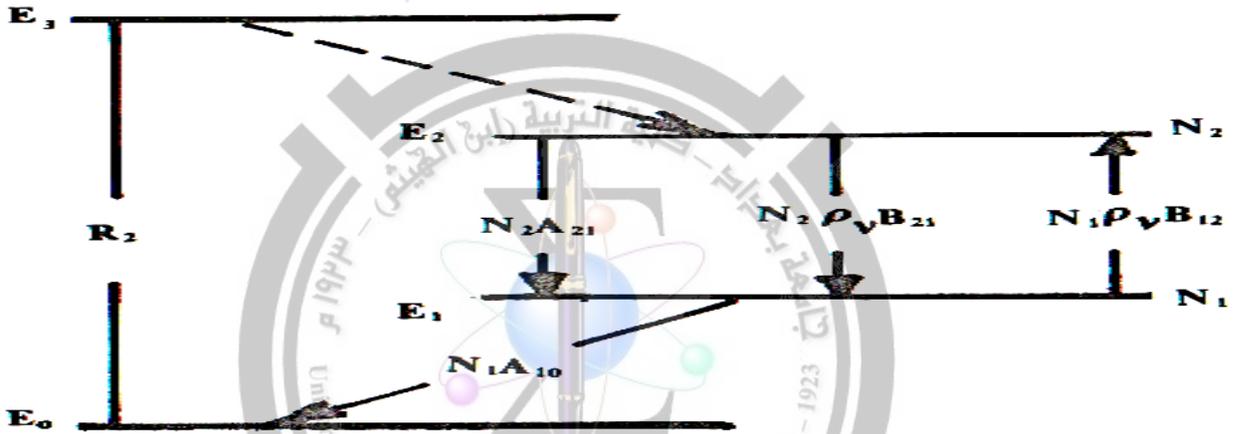


قدرة الضخ

لحساب قدرة الضخ اللازمة للوصول الى العتبة يجب حل المعادلات التي تعبر عن معدلات التغير في تاهيل مستويات الطاقة لوسط الليزر بدلالة عمليات الامتصاص والانبعاث ومعدل الضخ. لهذا سنستعين بمخطط ليزر ذي اربعة مستويات كما في الشكل (5-2) مع فرض ان طاقة المستوي E_1 اصغر بكثير من kT لذا فان تاهيل المستوي نتيجة سخونة الوسط بدرجة حرارة T يهمل كذلك نفرض ان الضخ انتقائي ويحدث فقط للمستوي E_3 وبمعدل R_2 لذا يكون معدل التغير في تاهيل المستويين الاول والثاني والذي يحدث بينهما الانتقال الليزري على النحو الاتي :

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

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



$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0$$

وبجمع المعادلتين ينتج :

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 = R_2 - N_2 A_{21} + N_1 \rho_\nu B_{12} - N_2 \rho_\nu B_{21}$$

$$\frac{dN_1}{dt} = 0 = N_2 A_{21} + N_2 \rho_\nu B_{21} - N_1 \rho_\nu B_{12} - N_1 A_{10}$$

بالجمع

$$0 = R_2 - N_1 A_{10}$$

$$N_1 = \frac{R_2}{A_{10}}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 = R_2 - N_2 A_{21} + N_1 \rho_\nu B_{12} - N_2 \rho_\nu B_{21}$$

$$N_2 (\rho_\nu B_{21} + A_{21}) = R_2 + N_1 \rho_\nu B_{12}$$

$$N_2 = \frac{R_2 + N_1 \rho_\nu B_{12}}{(\rho_\nu B_{21} + A_{21})}$$



وبالتعويض عن N_1 ينتج

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

$$N_2 - N_1 = \frac{R_2 \left(1 + \frac{\rho_v B_{12}}{A_{10}}\right)}{(\rho_v B_{21} + A_{21})} - \frac{R_2}{A_{10}}$$

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

$$= \frac{R_2 A_{10} + R_2 \rho_v B_{12} - R_2 \rho_v B_{21} - R_2 A_{21}}{A_{10}(\rho_v B_{21} + A_{21})} = \frac{R_2 (A_{10} - A_{21})}{A_{10}(\rho_v B_{21} + A_{21})}$$

$$\therefore N_2 - N_1 = R_2 \left[\frac{\left(1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}\right)}{(\rho_v B_{21} + A_{21})} \right]$$

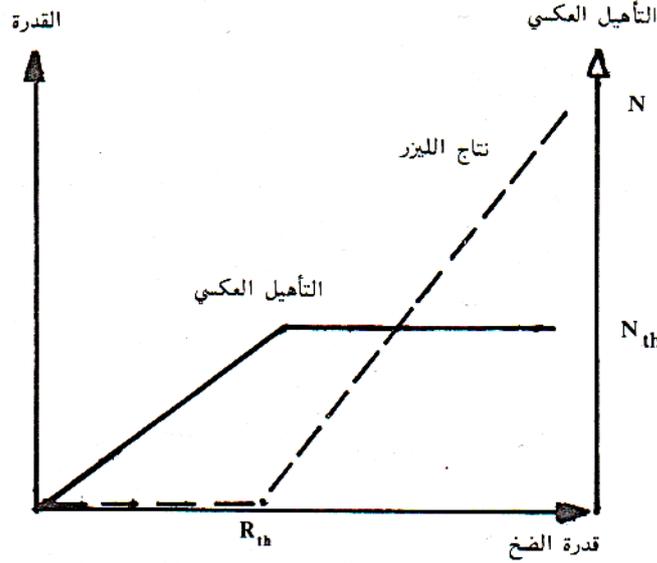
حيث ان $A_{10} = \frac{1}{\tau_1}$ و $A_{21} = \frac{1}{\tau_2}$

ولحدوث التأهيل العكسي يجب ان يكون A_{21} اصغر من A_{10} (كي لا تكون الاشارة سالبة بالبسط) وهذا الشرط يكافئ كون τ_2 اكبر من τ_1 اي ان المستوى الاعلى لانقال الليزر يكون له متوسط زمن عمر اكبر من المستوى الأوطأ وفي معظم انواع الليزر يكون τ_2 اكبر من τ_1 اي ان المقدار $\left(1 - \frac{A_{21}}{A_{10}}\right)$ يساوي تقريبا واحد ، وكذلك اذا كانت قدرة الضخ لا تكفي للوصول الى العتبة فان مقدار التأهيل العكسي الناتج لا يكفي لدعم التكبير في الوسط وفي هذه الحالة تهمل (ρ_v) لان طاقة الوسط تظهر على شكل انبعاث ذاتي اي ان :

$$\therefore N_2 - N_1 = \frac{R_2}{A_{21}}$$

$$N_{th} = N_2 - N_1 = \frac{R_{th}}{A_{21}} = R_{th} \tau_2 \quad \text{وعند العتبة تصبح}$$

ان التأهيل العكسي ينمو بصورة طردية ومع زيادة قدرة الضخ حتى وصول العتبة عندها تحصل حالة الأشباع فلا يمكن زيادة التأهيل العكسي مهما ازدادت قدرة الضخ والشكل (2-6) يوضح العلاقة بين هذه المقادير وعلاقتها ايضا بقدرة نتاج الليزر .



الشكل (6-2)

ان الطاقة التي نحتاجها لضخ ذرة واحدة الى المستوى (2) تساوي E_3 ولرفع العدد N_{th} المتواجد في وحدة الحجم نحتاج الى قدرة P_{th} وتعطى :

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

اذا ازدادت قدرة الضخ P عن مقدار P_{th} فان هذا يمكن ان يعمل على ازدياد مقدار $(\rho_v B_{21})$ لكن يبقى المقدار N_{th} ثابتا ومن المعادلة

$$N_{th} = N_2 - N_1 = R_2 \left[\frac{(1 - \frac{A_{21}}{A_{10}})}{(\rho_v B_{21} + A_{21})} \right]$$

وحيث ان $\frac{R_{th}}{A_{21}} = N_{th}$ وان $\frac{A_{21}}{A_{10}}$ يساوي تقريبا صفر

$$\frac{R_{th}}{A_{21}} = \frac{R_2}{(\rho_v B_{21} + A_{21})}$$

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

بينما قدرة انتاج الليزر W تعطى بالمعادلة

$$W = W_0 \left(\frac{P}{P_{th}} - 1 \right)$$

حيث W_0 مقدار ثابت

طرق الضخ

عملية الضخ هي العملية التي يتم فيها ارتقاء الذرات من المستوى الارضي E_0 الى المستوى E_2 في خطة ذي ثلاث مستويات او الى المستوى E_3 في خطة ذي اربعة مستويات. وتختلف ميكانيكية الضخ باختلاف طرقها وتعتمد على طبيعة المادة الفعالة. ومن انواعها الضخ البصري والكهربائي والكيميائي .



انواع طرق الضخ

اولا - الضخ البصري

وفيه يتم استخدام مصدر ذو قدرة عالية لتحريض الوسط الفعال الذي تقوم ذراته او ايوناته او جزيئاته بامتصاص هذه الطاقة فتساعد على الانتقال الى مستوى طاقة اعلى . وتستخدم هذه الطريقة في ليزر الحالة الصلبة (ليزر الياقوت او الينديميوم ياك) وايضا في ليزر الحالة السائلة (ليزر الصبغة) والتي يكون فيها الانبعاث والامتصاص على شكل نطاق (تعريض) وليس خط .

وتستخدم لغرض الضخ بهذه الطريقة مصابيح خاصة للحصول مثلا على ليزر نبضي *pulsed laser* نستخدم مصابيح ومضية كمصباح زينون *Xe* او كربتون *Kr* بضغط عالي يتراوح بين 450 و 1500 تور ($1 \text{ Tr} = 1 \text{ mm Hg} = 1/760 \text{ atm} = 133,3224 \text{ Pa}$) وللحصول على ليزر الموجة المستمرة نستخدم مصباح الكربتون بضغط عالي يتراوح بين 4000 و 8000 تور او مصباح تنكستن -يود

وتعتمد كفاءة الضخ باستخدام مصباح ومضي على اربعة عوامل :

- 1- كفاءة النقل η_t : وتمثل نقل الطاقة من المصباح الى المادة الفعالة وتعتمد على تصميم الجهاز البصري
 - 2- الكفاءة الاشعاعية η_r : وتمثل كفاءة تحويل الطاقة الكهربائية المجهزة للمصباح الى ضوء في مدى طول موجي يقع ضمن مدى الحزمة اللازمة للضخ في وسط الليزر
 - 3- كفاءة الامتصاص η_a : وتمثل الجزء الذي امتص فعليا في وسط الليزر من الاشعاع وتعتمد على خواص الوسط
 - 4- الكفاءة الكمية η_q : حيث ان الذرات التي تصعد عن طريق الضخ لا تهبط جميعها الى المستوى الاعلى لليزر والمطلوب تأهيله فبعض الذرات يهبط مباشرة الى المستوى الارضي او تهبط الى مستويات اخرى لا علاقة لها بالضخ. وتعتمد على خواص الوسط
- ان كفاءة الضخ η_p تمثل حاصل ضرب المقادير الاربعة اي ان :

$$\eta_p = \eta_t \eta_r \eta_a \eta_q$$

ان تحسين كفاءة الضخ تتمثل في تحسين الكفاءة الاشعاعية للمصباح عن طريق تحسين تقنية تصنيع المصباح بحيث يكون له طيف انبعاث يوافق طيف الامتصاص للوسط الفعال. كذلك قد يتم الضخ البصري باستخدام اشعة الليزر ذاتها باختيار ليزر ذو طول موجي معين للحصول على ليزر بطول موجي يختلف عن الليزر المستخدم وبالتالي توسيع نطاق الاطوال الموجية لليزر وتوفيرها

ثانيا - الضخ الكهربائي

تستخدم هذه الطريقة في ليزر الغاز وليزر شبه الموصل .

الاثارة في ليزر الغاز

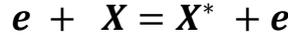
يحتاج وسط الغاز الى فرق جهد كهربائي مناسب لاجداث التفريغ الكهربائي عن طريق مرور تيار كهربائي خلاله وبهذا تكون الايونات والالكترونات السريعة وتكتسب هذه الجسيمات طاقة اضافية نتيجة تعجيلها من قبل المجال الكهربائي فتصطدم مع ذرات الغاز او جزيئاته مسببه تحريضها ويعد التصادم بين الالكترونات السريعة وذرات



أوجزيئات الغاز هو المصدر الرئيسي للاثارة داخل انبوب التفريغ . حيث تكون حركة الايونات اقل اهمية من حركة الالكترونات (بسبب الاختلاف الكبير في الكتلة) وبالتالي طاقة الالكترونات اكبر بكثير من تلك للايون .

عموما يتم الضخ في الغاز من خلال احدى عمليات الاثارة الآتية :

1- الأثارة المباشرة : حيث يتألف الغاز من نوع واحد من المكونات تتم عملية الأثارة عن طريق الألكترونات وفق معادلة التصادم الآتية

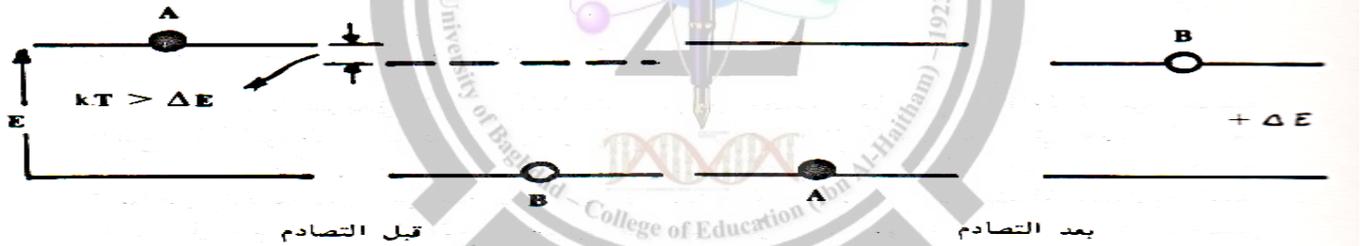


حيث X تمثل الذرة او الجزيئة في الحالة الارضية بينما X^* الذرة او الجزيئة في الحالة المحرصة

2- الأثارة غير المباشرة : حيث يتألف الغاز من نوعين من المكونات (خليط من A و B) ويتم التهيج نتيجة التصادم بين الجسيمات المختلفة (انتقال الطاقة الرنيني) فإذا فرضنا الجسيم A^* في الحالة المتهيجة والجسيم B في الحالة الارضية على فرض ان $\Delta E < KT$ فهناك احتمالية بان نجد الجسيم A في الحالة الأرضية و B^* بعد التصادم كما في الشكل (7-2) ويمكن تمثيله بالمعادلة الآتية



حيث يدل المقدار ΔE على الطاقة الممنوحة من قبل A وقد لا تساوي الطاقة الممتصة من قبل B ويظهر هذا الفرق موجبا او سالبا في الطاقة الحركية الانتقالية وعندما يكون ΔE يساوي صفر فمعنى ذلك انتقال تام للطاقة ويدعى بالانتقال الرنيني للطاقة ومن امثله ليزر هيليوم - نيون .



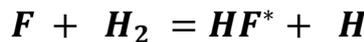
الشكل (7-2) تبادل الطاقة شبه الرنيني بين ذرتين بعملية تصادم

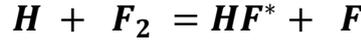
الأثارة في شبه الموصل

وتتم عن طريق تسليط فرق جهد كهربائي على البلورة يعمل مجاله الكهربائي على حقن الالكترونات والفجوات الى منطقة الملتقى واعادة الالتحام وانتاج الليزر .

ثالثا - الضخ الكيميائي

في هذه الطريقة لا نحتاج الى مصدر خارجي للطاقة فهو يتوفر ضمنا في المادة المستخدمة ، حيث ان ناتج التفاعل الكيميائي بين مكونات المادة المنتخبة يشكل المادة الفعالة المطلوبة لعمل الليزر في حين تعمل الطاقة المتحررة من التفاعل ذاته على اثارة هذه المادة وتحقيق التأهيل العكسي لها . مثال ذلك ليزر فلوريد الهيدروجين





حيث ان الجزيئة المتهيجة HF^* تشكل المادة الفعالة في الليزر الكيماوي ولها القابلية على انتاج الانبعاث المحفز .

مسائل الفصل الثاني

س1/ احسب قدرة الانعكاسية لمرآتي المرنان واللازمة لدعم تذبذب الليزر في مرنان طوله $(0.098 m)$ وله معامل كسب صافي $(1 m^{-1})$ بأفترض ان للمرآتين القدرة الانعكاسية ذاتها ؟

$$G_{th} = \gamma + \frac{1}{2l} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$

$$G_{th} - \gamma = 1 \quad \text{and} \quad R_1 = R_2 = R$$

$$G_{th} - \gamma = \frac{1}{2l} \ln \left(\frac{1}{R^2} \right)$$

$$1 = \frac{1}{2(0.1)} \ln \left(\frac{1}{R^2} \right) \quad \therefore R^2 = e^{-0.2} \quad \therefore R = 0.905$$

س2/ في ليزر النديميوم ياك يكون زمن عمر المستوى الأعلى $(\tau_2 = \mu 230 sec)$ وطول موجته $(1.06 \mu m)$ ومعامل انكسار الوسط $n=1.82$ علما ان $\Delta v = 3 \times 10^{12} Hz$ احسب قيمة التأهيل العكسي للحصول على معامل كسب صافي $(1 m^{-1})$ ؟

$$N = \frac{Gc}{Bn h v g(\Delta v)}$$

$$g(\Delta v) = \frac{1}{\Delta v} \quad \text{and} \quad v = \frac{c}{\lambda} \quad \text{and} \quad A = 1/\tau$$

$$\frac{A}{B} = \frac{8 \pi h v^3}{c^3} = \frac{8 \pi h}{\lambda^3} \quad \therefore B = \frac{\lambda^3}{8 \pi h \tau} = \frac{(1.06 \times 10^{-6})^3}{8 \times 3.14 \times 6.625 \times 10^{-34} \times 230 \times 10^{-6}}$$

$$B = 3.1 \times 10^{17} m^3 W^{-1} s^{-3}$$

$$N = \frac{Gc}{Bn h v g(\Delta v)} = \frac{G \lambda \Delta v}{Bn h} = \frac{1 \times 1.06 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{12}}{3.1 \times 10^{17} \times 1.82 \times 6.625 \times 10^{-34}} = 8.5 \times 10^{21} m^{-3}$$

س3/ احسب قدرة الضخ عند العتبة لليزر نديميوم ياك علما ان التأهيل العكسي الحرج $9 \times 10^{21} m^{-3}$ وان متوسط زمن عمر الانبعاث التلقائي $\tau_2 = 300 \mu sec$ وان طاقة المستوى الأعلى لليزر هي $(1.6 ev)$

$$wlm^3 P_{th} = \frac{E_3 N_{th}}{\tau_2} = \frac{1.6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 9 \times 10^{21}}{300 \times 10^{-6}} = 7.6 \times 10^6$$



الفصل الثالث

المرنان البصري Optical Resonator

المرنان هو تجويف رنيني ، يشكل مصدر التغذية الأسترجاعية في أجهزة الميزر والليزر وهو تصميم ضروري لدعم التكبير الحادث في الوسط الفعال نتيجة الانبعاث المحفز وكذلك توجيهه والمحافظة على صيغة أحادية الموجة لانبعاثه. ويتألف من مرأتين متقابلتين بحيث يتطابق محورهما البصري والمسافة بينهما بضع سينتترات والقدرة الانعكاسية لهما عالية جدا احدهما شفافة جزئيا يخرج الليزر منها.

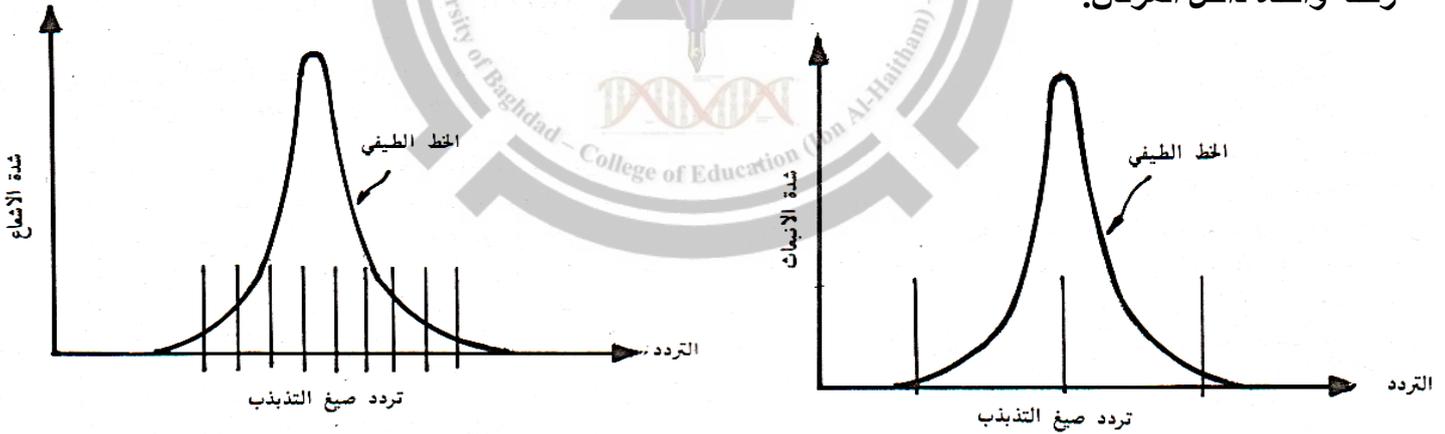
توضع المادة الفعالة في تجويف رنيني مناسب لتردد الاشعاع المنبعث بحيث يعمل هذا التجويف كمذبذب رنيني مكون ما يسمى بالموجات الواقفة وهذا ما استخدم فعلا في حالة الميزر حيث تم تصميم تجويف معدني ذي ابعاد وشكل يناسب طول الموجة المايكروية بحيث يسمح لتذبذب صيغة واحدة تطابق تردد الانبعاث المحفز للموجة شكل (1-3) . اما في حالة الليزر ونظرا لقصر موجته فان المسافة بين اي صيغتين للتذبذب صغيرة جدا وهذا يعني تواجد عدد كبير من صيغ التذبذب ضمن المنحني الذي يمثل غلاف الخط الطيفي للانبعاث شكل (2-3) لذلك يجب انتخاب صيغ قليلة منها عن طريق تجويف بشكل معين ولهذا السبب فان مرنان الليزر يختلف عن مرنان الميزر بنقطتين رئيسيتين هما :

1- مرنان الليزر يكون مفتوح اي لا توجد له جدران جانبية مسببة خسارة الحيود نتيجة فقدان جزء من الطاقة المتسربة من الجوانب.

2- ابعاد مرنان الليزر كبيرة جدا بالمقارنة بطول موجة الليزر.

س/ علل سبب استخدام مرنان مفتوح في مدى الاشعة المرئية ؟

ج/ في المرنان المفتوح تكون صيغة التذبذب القليلة والمنتخبة هي تلك المنتقلة باتجاه يوازي محور المرنان ، ورغم كونها خسارة لكن هذه الحالة تسمح باستمرار التذبذب للصيغ القليلة بينما بقية الصيغ تُفقد (تخرج من الجوانب) بعد رحلة واحدة داخل المرنان.



انواع المرنان

1- مرنان المرأتين المستويتين – المتوازيتين ((مرنان فابري-بيرو))

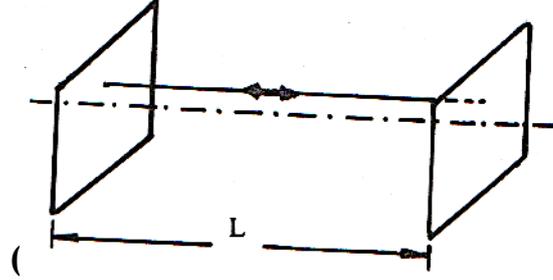
وهو يتألف من مرأتين مستويتين متقابلتين بشكل توازي أحدهما الأخرى وبالتالي يكون حساسا لأي خطأ بسيط في تطابق محوري المرأتين او المسافة بينهما يكون سببا في حيود معظم الاشعة وبالتالي زيادة الخسارة ولهذا السبب يكون التعامل مع المرايا المقعرة اسهل . ان طول المرنان يساوي عدد صحيح من أنصاف الطول الموجي :

$$L = n \lambda / 2$$



λ : طول موجة الليزر , L : طول المرنان , n : عدد صحيح . أما الترددات الرنينية فتكون :

$$v = n \left(\frac{c}{2L} \right)$$



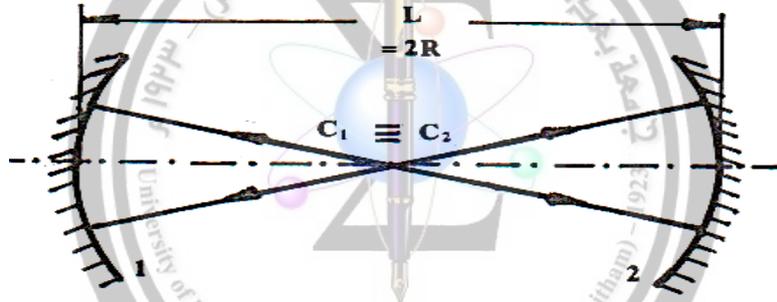
2- المرنان الكروي

للتغلب على خسارة حيود الأشعة في مرنان فابري - بيرو , تحذب المرأتين قليلاً ونحو الخارج , ويكون على هيئة أشكال مختلفة منها :

أ- المرنان الكروي - المتحد في المركز :

وفيه تكون المرأتان الكرويتان المقعرتان متساويتان في التكور , بحيث ينطبق مركز تكور الأولى على الثانية و المسافة بينهما

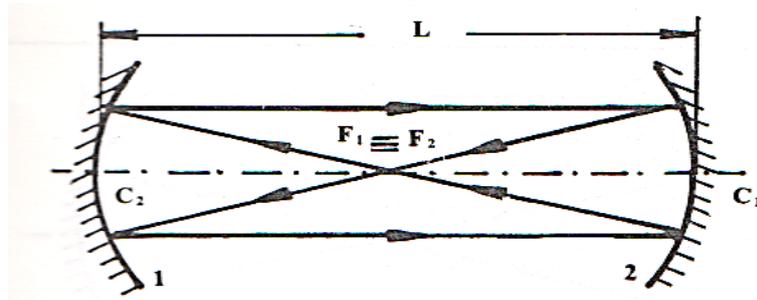
تساوي قطر أحدهما



شكل (3 - 4) : المرنان الكروي - المتحد في المركز .

ب- المرنان الكروي - المتحد في البؤرة

ويتألف أيضاً من مرأتين مقعرتين متساويتان في التكور وان المسافة الفاصلة بين المرأتين تساوي R اي ان بؤرة المرآة الأولى $F1$ تقع على بؤرة المرآة الثانية $F2$ وهذا يعني ان مركز تكور احدهما يقع على قطب المرآة الأخرى

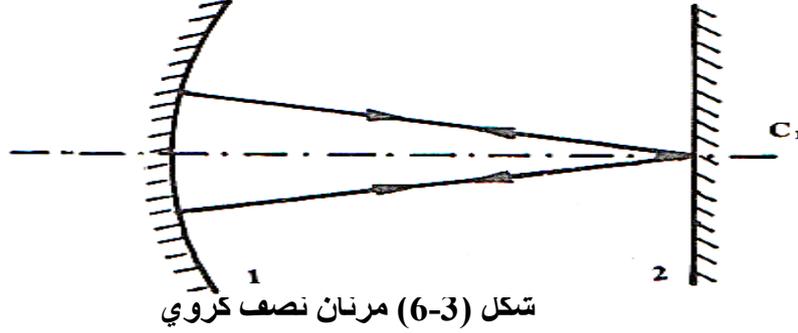


شكل (3-5)



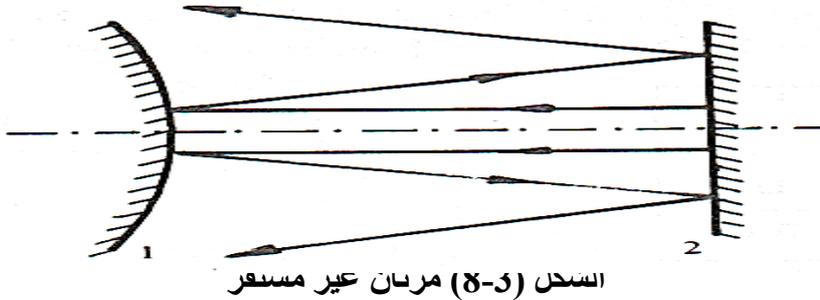
ج- المران الكروي - المستوي

ويتألف هذا المران من مرآة كروية مقعرة واخرى مستوية كما يوضحه الشكل (3-6) لمران نصف كروي حيث توضع المرآة المستوية في مركز المرآة المقعرة بينما يوضح الشكل (3-7) مران نصف بوري حيث توضع المرآة المستوية في بؤرة المرآة المقعرة



استقرارية المران

ان المران الكروي بصورة عامة يحوي مرأتين كرويتين اما ان تكون R نصف قطر تكور المرآة موجبا للمرآة المقعرة وسالبا للمحدبة وصفرا للمستوية وهذا ما يؤثر على خسارة الحيود وعدد صيغ التذبذب وترددها وسعتها وبذلك يكون المران اما مستقر والذي يكون فيه تقع المرأتين بشكل يحفظ فيه الشعاع متمركزا بالقرب من محور المران , أما المران غير المستقر ففيه تكون أشعة الضوء تواصل حركتها بعيداً عن محور المران فينتج عنها خسارة والشكل (3-8) لمران غير مستقر.



ان استقرارية المران تخضع للمقادير R_1, R_2, L والشرط هو : $0 < g_1 g_2 < 1$

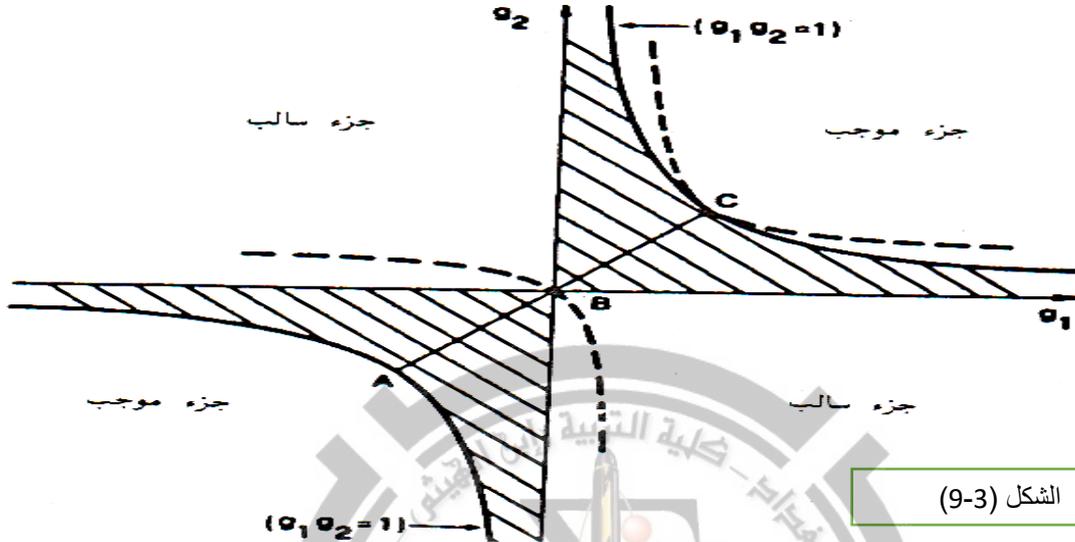
اذ ان g_1 و g_2

$$g_1 = 1 - (L / R_1)$$

$$g_2 = 1 - (L / R_2)$$



ويمكن تمثيل شرط الأستقرار بمخطط يعرف بمخطط الأستقرار كما يوضحه الشكل (9-3) , تكون فيه $g_1 l$ على محور السينات و g_2 على محور الصادات , ثم نرسم منحنيني الحدود $g_1 g_2 = 1$ والمناطق المظلمة تحقق الشرط (تخضع لمرنان مستقر) وخارج المنطقة المظلمة تخضع لمرنان غير مستقر . أما الخط المستقيم والذي يصنع زاوية مقدارها (45°) مع محوري (g_1) و (g_2) فيمثل أعداد المرنان التي تملك مرآتيهما نصف قطر تكور متساوي , إذ ان (A) تمثل مرنان متحد في المركز و (B) متحد في البؤرة و (C) ذو المرآتين المستويتين .



لحساب صيغ التذبذب في المرنان يجب حساب خسارة الحيود في المرآتين وكذلك يدخل شكل المرآتين وابعادهما بالإضافة الى المسافة بينهما في مثل هذه الحسابات .

أ- المرنان ذو المرآتين المستويتين – المتوازيتين

نفرض ان مرآتي المرنان مربعة الشكل وطول ضلعها $(2a)$ والمسافة بين المرآتين L فان ترددات الرنين تكون

$$v = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{n}{L} \right)^2 + \left(\frac{m}{2a} \right)^2 + \left(\frac{l}{2a} \right)^2 \right]^{1/2}$$

حيث ان n, m, l اعداد صحيحة

الصيغ الطولية للتذبذب

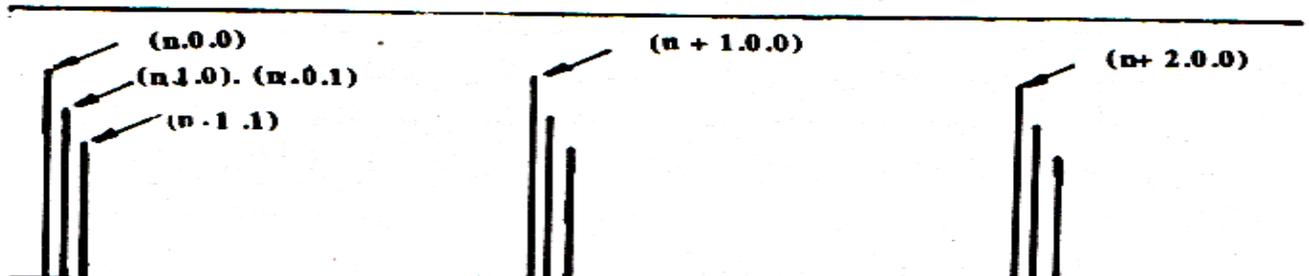
هي صيغ التذبذب التي يكون لها نفس المقادير m, l وتختلف بالمقدار n سوف تختلف فيما بينها فقط في كيفية توزيع المجالين الكهربائي والمغناطيسي على امتداد محور المرنان Z (اي طوليا) والفاصلة الترددية Δv_n بين صيغتين طوليتين متعاقبتين تختلفان بالمقدار n بمقدار واحد تكون بحدود بضع منات ميكاهيرتز تعطى بالمعادلة

$$\Delta v_n = \frac{c}{2L}$$

الصيغ المستعرضة للتذبذب

هي صيغ التذبذب التي يكون لها نفس المقادير n وتختلف بالمقدار m او المقدار l او كليهما سوف تختلف فيما بينها فقط في كيفية توزيع المجالين الكهربائي والمغناطيسي بالاتجاه المستعرض والفاصلة الترددية Δv_n بين صيغتين مستعرضتين متعاقبتين تختلفان بالمقدار m بمقدار واحد تكون بحدود بضع ميكاهيرتز وتعطى بالمعادلة

$$\Delta v_m = \frac{c L}{8 n a^2} \left(m + \frac{1}{2} \right)$$



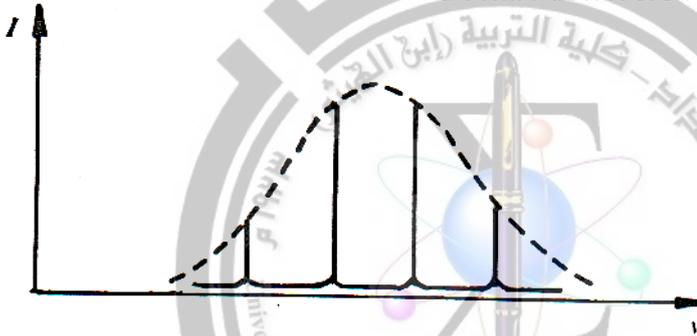


الشكل (3-10) يوضح صيغ التذبذب الرنينية لمرنان المرآتين المستويتين المتوازيتين

سؤال : كم صيغة تذبذب تقع ضمن خط الانتقال لليزر ؟

الجواب : ان عدد صيغ التذبذب الطولية تعتمد على :

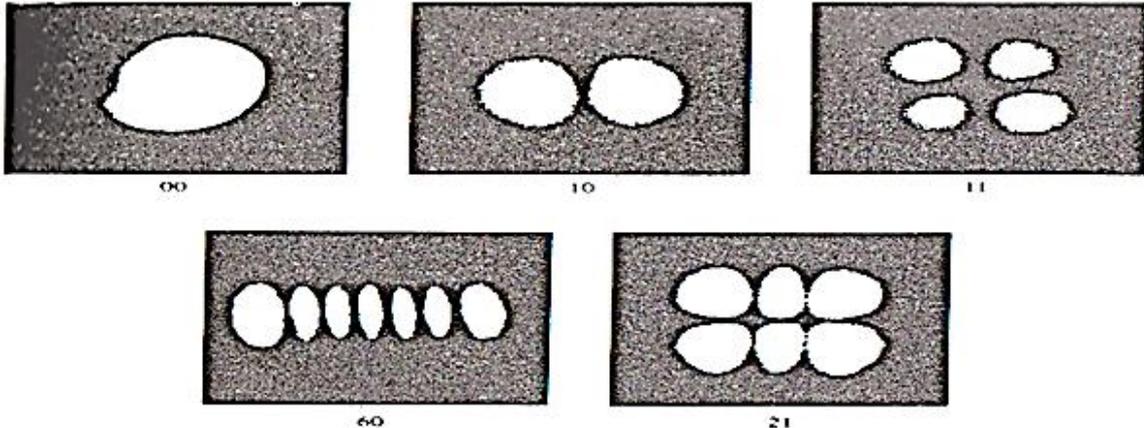
1. عرض الخط الطيفي
2. طول مرنان الليزر ، فكلما زاد طول المرنان كلما قلت الفاصلة الترددية بين اي صيغتين وهذا يؤدي الى تذبذب عدد اكبر من الصيغ ضمن خط الانتقال لليزر .



اما عدد صيغ التذبذب المستعرضة فتعتمد على

- 1- شكل المرآة
- 2- حجم المرآة

عندما تتواجد عدد من صيغ التذبذب في نتاج الليزر يقال عنه ليزر متعدد الصيغ ويمكن عمليا الحصول على تذبذب صيغة مستعرضة واحدة بادخال عوامل خسارة تعمل على اضمحلال الصيغ المستعرضة الاخرى وذلك يتم بوضع حاجز ذو فتحة دائرية يمكن التحكم بمقدارها لتعمل على المحور البصري للمرنان والغاية منها حجب جميع صيغ التذبذب عدا الصيغة المستعرضة TEM_{00} المطابقة للمحور البصري





ب - المرنان المتحد البؤرة

نفرض ان مرآتي المرنان مربعة الشكل وطول ضلعها $(2a)$ والمسافة بين المرآتين L اكبر بكثير من a ولحساب قدر البقعة $\omega(z)$ في الموضع Z بحيث ان مركز المرنان ليمثل نقطة الاصل $(Z=0)$ ستكون المعادلة :

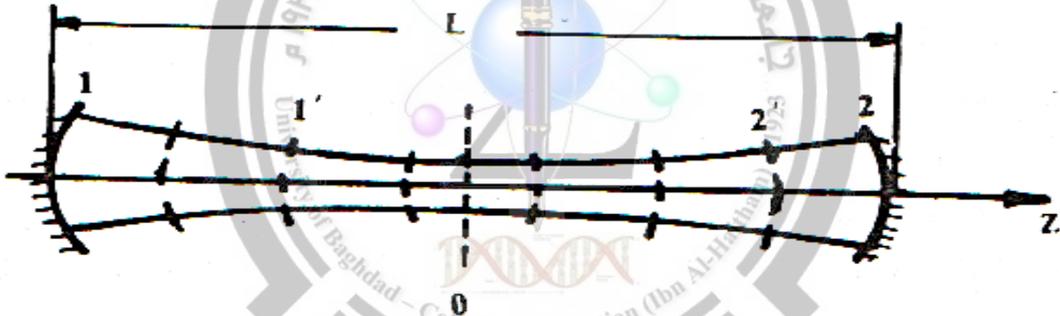
$$\omega(z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{2Z}{L} \right)^2 \right]^{1/2}$$

حيث ω_0 تمثل قدر البقعة عند مركز المرنان $Z=0$ وتعطى بالمعادلة

$$\omega_0 = \left[\frac{L\lambda}{2\pi} \right]^{1/2}$$

في الشكل (3-12) يلاحظ ان للحزمة خصر يكون في الموضع $Z=0$ في هذه الحالة يكون ω_0 يمثل قدر البقعة عند الخصر كذلك يمكن ملاحظة ان قدر البقعة عند المرآتين اي عند $z = \pm \frac{L}{2}$ يكون :

$$\omega = \left[\frac{L\lambda}{\pi} \right]^{1/2}$$



الشكل (3-12)

كذلك توصف حزمة الليزر بدلالة تكور جبهة الموجة ويعبر عن نصف قطر تكور جبهة الموجة عند موضع ما داخل المرنان على امتداد محوره Z بالمقدار $R(z)$ ويعطى بالمعادلة :

$$R(z) = Z \left[1 + \left(\frac{L}{2Z} \right)^2 \right]$$

- عند الموضع $Z=0$ فان $R(z) = \infty$ اي ان شكل جبهة الموجة مستوي
- عند الموضع $z = \pm \frac{L}{2}$ (اي عند المرآتين) فان $R(z) = L$ اي ان شكل جبهة الموجة كروي

عامل النوعية للمرنان *quality factor*

من اساسيات مناقشة عمل اي مرنان هو التعرض لمبدأ Q اي عامل النوعية ويعطى بالمعادلة الاتية :



$$Q = \frac{2\pi E_s}{E_l}$$

حيث E_s تمثل الطاقة المخزونة بينما E_l تمثل الطاقة المتبددة خلال دورة واحدة

ان التجويف الرنيني ذو عامل النوعية العالي يخزن الطاقة بصورة جيدة والعكس صحيح و يتراوح عامل النوعية لمرنان الليزر بين $10^5 - 10^8$.
اضافة لذلك يرافق عامل النوعية العالي الخط الطيفي الضيق نسبيا في حين يرافق عامل النوعية الواسع الخط الطيفي العريض نسبيا وهذه العلاقة بين Q وعرض الخط الطيفي يمكن التعبير عنها بالمعادلة

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu}$$

نظريا لو افترضنا ان الطاقة المتبددة تساوي صفر يكون لعامل النوعية قيمة لا نهائية ولكن عمليا لا بد من وجود خسارة وهذا يعني ان الخط الطيفي له تعريض بسيط وحاليا يمكن تقليص عرض الخط الطيفي لقيمة تقارب 1 هرتز.

اسئلة الفصل الثالث

س1/ حدد الاستقرارية للمرنان عندما يكون :

- 1- مرنان ذات مرأتين مستويتين متوازيتين (فابري -بيرو)
 - 2- مرنان كروي فيه ($L=10\text{ cm}$) ($r_1=5\text{ cm}$) ($r_2=20\text{ cm}$)
 - 3- مرنان كروي متحد البؤرة
- الجواب : ان استقرارية المرنان تخضع للمقادير R_1, R_2, L والشرط هو : $0 < g_1 g_2 < 1$

1- مرنان ذات مرأتين مستويتين متوازيتين (فابري -بيرو)

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} = 1 - \frac{L}{\infty} = 1$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} = 1 - \frac{L}{\infty} = 1$$

المرنان مستقر (على حدود منطقة الأستقرار) $g_1 g_2 = 1$

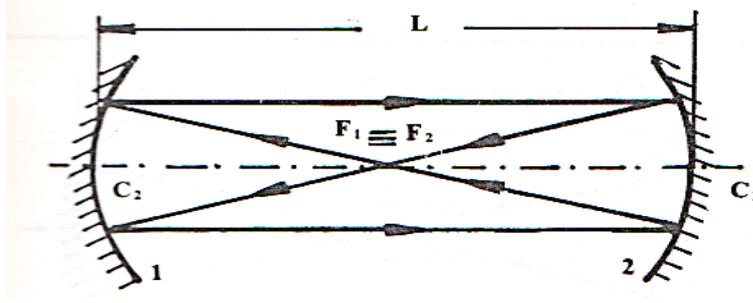
2- مرنان كروي فيه ($L=10\text{ cm}$) ($r_1=5\text{ cm}$) ($r_2=20\text{ cm}$)

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} = 1 - \frac{10}{5} = -1$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} = 1 - \frac{10}{20} = 0.5$$

المرنان غير مستقر $g_1 g_2 = -0.5$

3- مرنان كروي متحد البؤرة



$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} = 1 - \frac{L}{L} = 0$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} = 1 - \frac{L}{L} = 0$$

$$g_1 g_2 = 0 \quad \text{الممران مستقر (على حدود منطقة الأستقرار)}$$

س2/ برهن ان الفاصلة الترددية بين اي صيغتين طولية تكون مساوية لممران فابري بيرو يدعم صيغة التذبذب المستعرضة TEM_{00}

$$v = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{n}{L} \right)^2 + \left(\frac{m}{2a} \right)^2 + \left(\frac{l}{2a} \right)^2 \right]^{1/2}$$

بمقارنة TEM_{ml} مع TEM_{00} نجد $l=0$ ، $m=0$

$$v_n = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{n}{L} \right)^2 \right]^{1/2} = n \frac{c}{2L}$$

$$v_{n+1} = (n+1) \frac{c}{2L}$$

$$v_{n-1} = (n-1) \frac{c}{2L}$$

$$v_{n-1} = n \frac{c}{2L} - (n-1) \frac{c}{2L} = \frac{c}{2L} (n - n + 1) = \frac{c}{2L}$$

$$\Delta v_n = v_{n+1} - v_n = (n+1) \frac{c}{2L} - n \frac{c}{2L} = \frac{c}{2L} ((n+1) - n) = \frac{c}{2L}$$

وهذا يعني ان الفاصلة الترددية بين اي صيغتين طولية متتاليتين هو مقدار ثابت $\frac{c}{2L}$

س3/ احسب عدد الصيغ الطولية ضمن خط الانبعاث الليزري لممران فابري بيرو طولها lm ومعامل النوعية هو 1×10^6 يدعم صيغة التذبذب المستعرضة TEM_{00} علما ان طول موجة الليزر $1.06 \mu m$ ومعامل انكسار الوسط الفعال 1.5 .

$$Q = \frac{v}{\Delta v}$$

$$\Delta v = \frac{c}{Q \lambda} = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^6 \times 1.06 \times 10^{-6}} = 2.8 \times 10^8 \text{ Hz}$$



$$\Delta v_n = \frac{c}{2L} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1 \times 1.5} = 10^8 \text{ Hz}$$

$$N = \frac{\Delta v}{\Delta v_n} = \frac{2.8 \times 10^8}{10^8} \approx 3 \text{ mode}$$

س4/ ليزر CO_2 طول موجته $10.6 \mu m$ وانبعائه يكون بحزمة كاسية قطرها $2mm$ عند مرآة الخروج الليزري علما ان طول المرنان الكروي 10 cm احسب زاوية الانفراج وقدر حزمته عند مركز المرنان وعند المرآتين؟

$$\theta = k \frac{\lambda}{D} = 0.64 \frac{10.6 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^{-3} \text{ radian}$$

$$\omega_0 = \left[\frac{L\lambda}{2\pi} \right]^{1/2} = \left[\frac{10 \times 10^{-2} \times 10.6 \times 10^{-6}}{2 \times 3.14} \right]^{1/2} = 4.11 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\omega = \left[\frac{L\lambda}{\pi} \right]^{1/2} = \left[\frac{10 \times 10^{-2} \times 10.6 \times 10^{-6}}{3.14} \right]^{1/2} = 5.81 \times 10^{-4} \text{ m}$$

س5/ برهن ان مسافة التشاكة لأنبعاث الليزر هي $d = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$ وجد قيمتها اذا كان تعريض خط الانبعاث هو 450 MHz ؟

$$v = \frac{c}{\lambda} = c\lambda^{-1}$$

$$dv = -c\lambda^{-2} d\lambda \quad \text{الاشارة السالبة تدل ع التناسب العكسي}$$

$$\Delta v = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$$

$$d = \frac{c}{\Delta v} = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

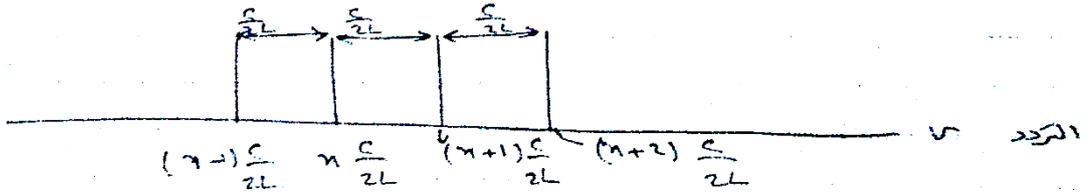
$$d = \frac{c}{\Delta v} = \frac{3 \times 10^8}{450 \times 10^6} = 0.6 \text{ m}$$

س6/ مرنان بصري طوله 0.1 m ومعامل انكسار الوسط يساوي 1.5 احسب الفاصلة الترددية واحسب عدد الصيغ المحورية في المرنان اذا كان اتساع الخط الطيفي 3 GHz (ارسم شكلا توضيحيا).

$$\Delta v_n = \frac{c}{2L} = \frac{3 \times 10^8}{2(0.1)} = 1.5 \times 10^9 \text{ Hz}$$



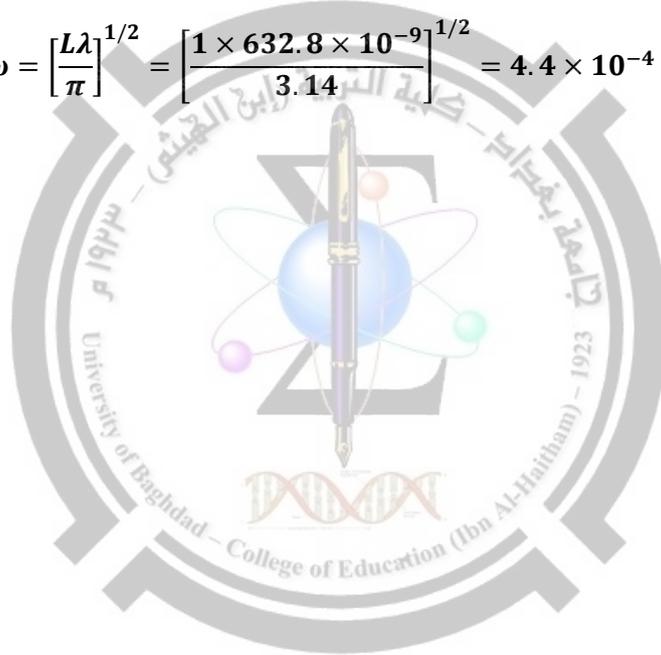
$$N = \frac{\Delta v}{\Delta v_n} = \frac{3 \times 10^9}{1.5 \times 10^9} = 2 \text{ mode}$$



س7/ مرنان متحد البؤرة طوله 1 m استخدم في ليزر هيليوم - نيون . احسب حجم البقعة في مركز المرنان وعند مرآتيه علما ان طول موجة الليزر تساوي 632.8 nm ؟

$$\omega_0 = \left[\frac{L\lambda}{2\pi} \right]^{1/2} = \left[\frac{1 \times 632.8 \times 10^{-9}}{2 \times 3.14} \right]^{1/2} = 3.17 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\omega = \left[\frac{L\lambda}{\pi} \right]^{1/2} = \left[\frac{1 \times 632.8 \times 10^{-9}}{3.14} \right]^{1/2} = 4.4 \times 10^{-4} \text{ m}$$





الفصل الرابع

البصريات اللاخطية Nonlinear optics

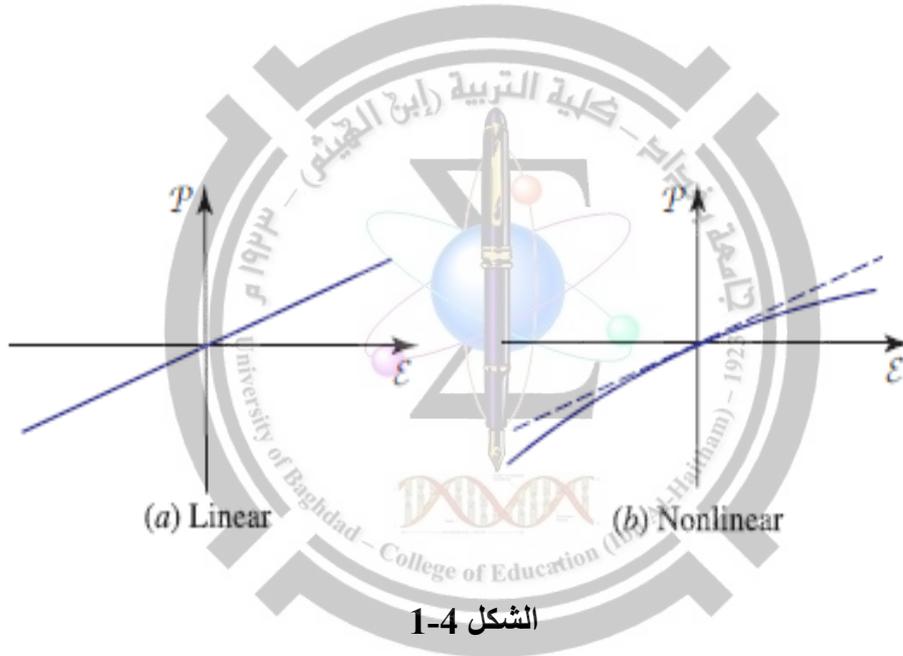
ان الأوساط الخطية تتميز بعلاقة خطية بين الاستقطاب P والمجال الكهربائي E وتكون العلاقة خطية عندما يكون المجال الكهربائي صغير وتخضع للعلاقة الآتية :

$$P = \epsilon_0 \chi E$$

حيث ϵ_0 سماحية الفراغ بينما χ تمثل القابلية الكهربائية للوسط dielectric susceptibility

بينما الأوساط اللاخطية تتميز بعلاقة لا خطية بين الاستقطاب P والمجال الكهربائي E وكما موضح في الشكل 1-4 ادناه . هذه الصفة اللاخطية تلاحظ فقط عند شدات عالية للضوء مثل الليزر اي يكون المجال الكهربائي بحدود

$$\frac{V}{m} 10^8 - 10^5$$



الشكل 1-4

وطبقا لشدة المجال الكهربائي E يمكن كتابة العلاقة بين الاستقطاب والمجال الكهربائي حسب سلسلة تايلور

$$P = a_1 E + \frac{1}{2} a_2 E^2 + \frac{1}{6} a_3 E^3 + \dots ,$$

المعاملات a_3, a_2, a_1 تمثل ثوابت مميزة للوسط .

حيث يمثل الحد الاول $a_1 E$ العلاقة الخطية عندما يكون المجال الكهربائي صغير ومن الواضح ان $a_1 = \epsilon_0 \chi$

بينما يمثل الحد الثاني $\frac{1}{2} a_2 E^2$ العلاقة اللاخطية من الدرجة الثانية والحد الثالث $\frac{1}{6} a_3 E^3$ يمثل العلاقة اللاخطية من الدرجة الثالثة وهكذا



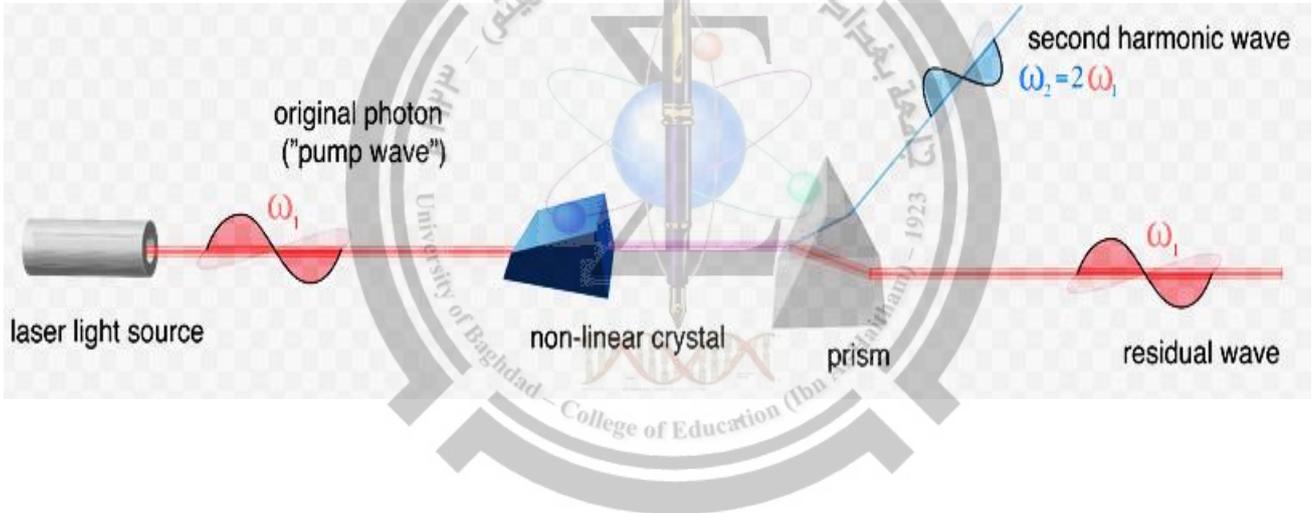
ويمكن كتابة المعادلة بالصيغة الآتية

$$P = \epsilon_0 x E + 2x_2 E^2 + 4x_3 E^3 + \dots ,$$

$$\text{Where } x_2 = \frac{1}{4} a_2 \quad \text{and} \quad x_3 = \frac{1}{24} a_3$$

توليد التوافقية الثانية Second harmonic generation

هي عملية بصرية لاختطية وتسمى بالتردد المزدوج وفيها تتأثر الفوتونات التي تمتلك نفس التردد اثناء مرورها خلال بلورة لاختطية لتكوين فوتونات جديدة ذات طاقة مضاعفة ($2E$) لذلك تكون مضاعفة التردد ($2w$) وطولها الموجي يساوي نصف الطول الموجي للفوتونات الاصلية .
تطور فرع البصريات اللاخطية نتيجة اكتشاف مبدأ ازدواج التردد وذلك بعد اختراع الليزر. حيث استخدم بتغيير لون شعاع الضوء، وتغيير شكله مكانيا وزمانيا مثال: إرسال الأشعة تحت الحمراء عبر بلورة معينة للحصول على الضوء الأخضر. وكذلك استخدم على نطاق واسع في الاتصالات .





الفصل الخامس

أنواع الليزر

صنفت انواع الليزر حسب المادة الفعالة المستخدمة وهي :

- 1- ليزر الحالة الصلبة
- 2- ليزر الحالة السائلة
- 3- ليزر الحالة الغازية
- 4- ليزر شبه الموصل
- 5- الليزر الكيماوي

وعلى الرغم من كون الوسط الفعال في ليزر شبه الموصل هو مادة بحالة صلبة الا ان جوهر عمل هذا النوع من الليزر يختلف تماما عن ليزر الحالة الصلبة وكذلك يختلف الليزر الكيماوي عن كل هذه الاصناف في ميكانيكية ضخ الطاقة اليه.

ليزر الحالة الصلبة

يكون الوسط الفعال فيه عبارة عن بلورة عازلة او قطعة زجاج لها خطوط طيفية حادة وهي مواد صلبة شفافة شديدة التماسك تقاوم الحرارة . وتعمل الايونات المطعمة والمتواجدة بنسب قليلة (0.01-0.1) في البلورات الايونية كوسط فعال . تكون مادة الليزر الصلبة على شكل قضيب (طوله 6 سم وقطر 6 ملم) صقل طرفاه ليصبحا على درجة عالية من النعومة والتوازي ويدعى بقضيب الليزر الذي يوضع بين مرآتين متقابلتين (او يطلى طرفاه ليشكلا مرآتي المرنان) ويضخ بصريا باستخدام مصباح ومضي والذي غالبا ما يكون ذو تصميم لولبي يحيط بقضيب الليزر

ان الانتقالات المستخدمة تتضمن مستويات تعود الى القشرة الداخلية غير المملوءة لهذه الايونات وبالتالي لا تتأثر بشدة بمجال البلورة مما يجعلها انتقالات حادة (اي ان قيمة σ عالية وقيمة τ لها طويلة نسبيا) بهذا يكون معدل الضخ عند العتبة واطيء نسبيا .

$$G = -\alpha = \sigma (N_2 - N_1)$$

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

ويكون نتاج الليزر نبضي في معظم الحالات بسبب كون الضخ البصري ومضي وطول موجة هذا النوع من الليزر يقع في المدى القريب من الاشعة تحت الحمراء (1- 2.6 مايكرومتر) . كذلك يمكن الحصول على ليزر مستمر باستخدام مصدر ضوئي ذو نتاج ثابت الطاقة في عملية الضخ.



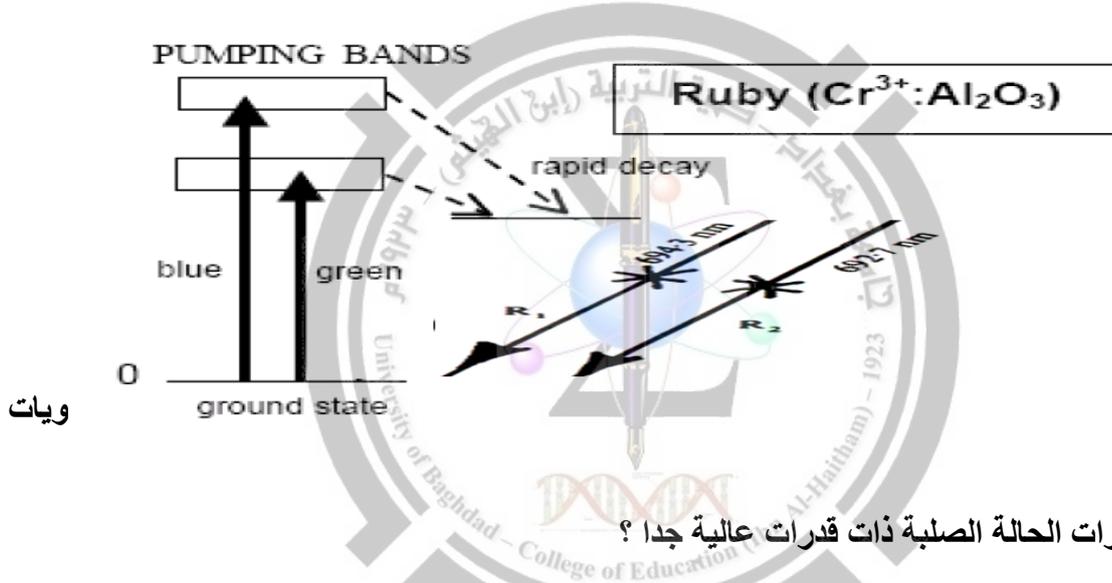
1. ليزر الياقوت

أكتشف عام 1960 والوسط الفعال هو بلورة الياقوت (*Ruby*) وهي عبارة عن أوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) المطعم بأيونات الكروم (Cr^{+3}) بنسبة تطعيم حوالي (5%) من الوزن الكلي بتركيز أيونات فعالة حوالي $10^{22} m^{-3}$. يكون لون البلورة أحمر وقطر بلورة الياقوت يتراوح ما بين (1-20 mm) وطولها (50 - 100 mm).

اما الاشعاع اللازم للضخ البصري فيقع في مدى الضوء الصادر من مصباح الزينون xe الومضي بضغط 600 ملي بار.

ويعمل بنظام المستويات الثلاثية (*Triple-Level System*) ويحتاج تبريد جيد جدا ونمط التشغيل نبضي والطول الموجي لشعاع الليزر الخارج (694.3 nm) الأقوى (و (692.9 nm) كذلك يمكن تشغيل ليزر الياقوت بموجة مستمرة *CW* اذا ما استخدم للضخ مصدر ضوئي ثابت الشدة مثل مصباح زئبقي بضغط عالي او باستخدام ليزر اخر.

ويستخدم ليزر الياقوت في تطبيقات عملية مثل التصوير المجسم وتجارب تعيين المدى



علل: تكون ليزرات الحالة الصلبة ذات قدرات عالية جدا ؟

جواب:

لأن تركيز الأيونات الفعالة التي تنتج الليزر يكون كبيرا $(10^{22}-10^{25})cm^{-3}$ وتسمى هذه نسبة التطعيم بينما يكون تركيز الأيونات الفعالة في أحسن الحالات $(10^{18}-10^{20})cm^{-3}$ في الحالة السائلة والغازية.

سؤال: ما هي الوظيفة الأساسية للبلورة التي تحتضن الأيونات الفعالة في ليزرات الحالة الصلبة؟

جواب: هنالك ثلاث وظائف أساسية للبلورة الحاضنة هي أنها تمثل وسط مستقر تتوزع فيه الأيونات الفعالة وهذا يحدد قدرة شعاع الليزر الخارج. كما أنها تحدد كثافة الأيونات الفعالة (نسبة التطعيم). وكذلك فإن نوع البلورة يؤثر على الطول الموجي لشعاع الليزر الخارج.

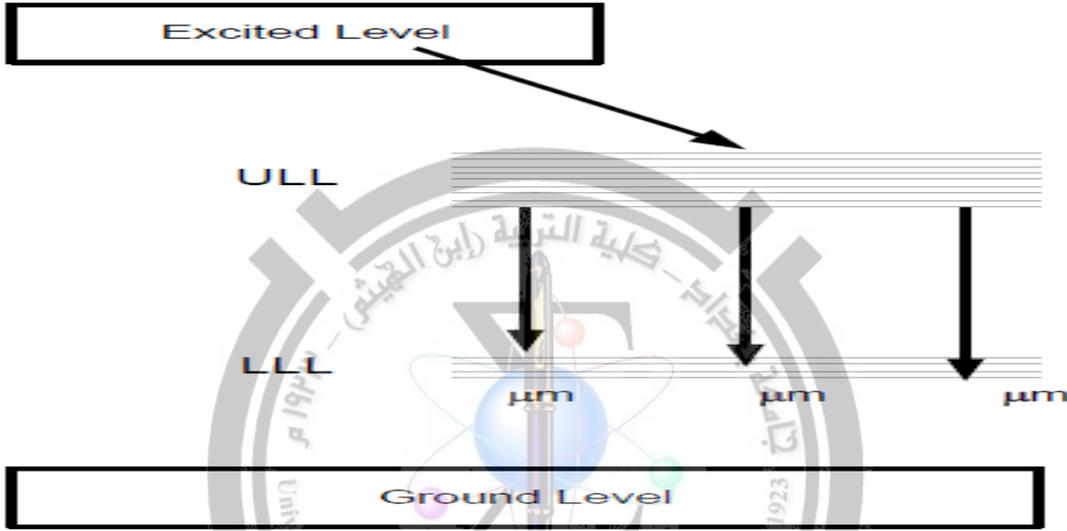


2. ليزر النيوديميوم

هو الليزر الأكثر شيوعاً لأنواع ليزر الحالة الصلبة ويعمل بخطة ضخ ذو اربع مستويات وهو على نوعين :

• ليزر النيوديميوم-ياك (*Neodymium:YAG*)

يعتبر واحد من أهم أنواع الليزر عموماً وقد اكتشف عام 1964 الوسط الفعال هو بلورة الياك (*YAG*) وهي عبارة عن أكسيد اليتريوم ألمنيوم ($Y_3Al_5O_{12}$) المطعم بأيونات النيوديميوم (Nd^{+3}) بنسبة تطعيم لا تتجاوز (1.5%) . يكون لون البلورة أرجواني يتم الضخ باستخدام المصباح الوميضي بكفاءة لا تتجاوز (1.5%) أو باستخدام ليزر أشباه الموصلات بكفاءة تصل إلى (70%) ويحتاج تبريد جيد ونمط العمل مستمر ونبضي. الأطوال الموجية لشعاع الليزر الخارج ثلاثة هي ($1.4\mu m$) و ($1.06\mu m$) الأقوى و ($0.9\mu m$) .
تمتاز بلورة الياك بمقاومة عالية ضد التلف وصلادة ضد الكسر ونوعية بصرية عالية.



الشكل 2-5

• ليزر النيوديميوم-زجاج (*Neodymium:Glass*)

الوسط الفعال هو الزجاج المطعم بأيونات النيوديميوم (Nd^{+3}) بنسبة تطعيم تصل إلى (6%) يكون لون البلورة أرجواني. وأبعاد البلورة من بضعة مايكرون الى طول 2 متر وقطر 8 سم .

ويتم الضخ باستخدام المصباح الوميضي بكفاءة لا تتجاوز (1.5%) أو باستخدام ليزر أشباه الموصلات بكفاءة تصل إلى (70%) ويعمل بنظام المستويات الرباعية وتحتاج تبريد جيد. ونمط العمل نبضي الأطوال الموجية لشعاع الليزر الخارج ثلاثة هي ($1.4\mu m$) و ($1.06\mu m$) الأقوى و ($0.9\mu m$) . ليزر النيوديميوم تطبيقات عديدة في تصنيع المعادن و تعيين المدى والجراحة الليزرية

ليزر الحالة السائلة (ليزر الصبغة) (*Dye Lasers*)

اكتشف عام 1965 و الوسط الفعال فيه عبارة عن صبغة عضوية (*Organic Dye*) مذابة في محلول مناسب مثل الماء أو الكحول الأثيلي وغيرها تكون جزيئة الصبغة كبيرة الحجم مقارنة بالجزيئات الصلبة والغازية. ويتضمن كل مستوى إلكتروني في جزيئة الصبغة عددا كبيرا من المستويات الدورانية والاهتزازية بحيث تصبح المستويات الإلكترونية عريضة نسبيا وعند انتقال جزيئة الصبغة المثيجة من مستوى إلكتروني عال إلى مستوى إلكتروني واطئ فإن الطول الموجي المنبعث يعتمد على فرق الطاقة بين المستويات الثانوية (الدورانية والاهتزازية) لكلا المستويين



الإلكترونيين وبذلك يمكن الحصول على شعاع الليزر بأطوال موجية متعددة بحيث يكون خط الطيف الليزري عريضاً ولتقليل عرض الخط الطيفي لنتاج ليزر الصبغة تستخدم المواشير ومحززات الحيود ضمن منظومة الليزر ويمكن توليف ليزر الصبغة للحصول على طول موجي واحد من حزمة الليزر ليتذبذب داخل المرنان ويشتت الأطوال الموجية الأخرى خارج المنظومة للحصول على شعاع الليزر بطول موجي واحد .
ويعمل بنمط مستمر ونبضي ومصدر الضخ يتم باستخدام المصباح الوميضي (*Flash Lamp*) كما في ليزرات الحالة الصلبة. يمكن أن يتم ضخ الوسط الفعال باستخدام شعاع ليزر آخر مثل ليزر بخار النحاس (*Cu-vapor Laser*) وهذه الطريقة تكون ذات كفاءة أعلى من طريقة الضخ بالمصباح الوميضي.

تستخدم ليزرات الصبغة الأبحاث العلمية كالدراسات الطيفية والكيميائية الضوئية وفصل النظائر الكيميائية وخاصة نظائر اليورانيوم.

تمتاز ليزرات الحالة السائلة بما يلي:

1. إمكانية الحصول على حزمة عريضة من الأطوال الموجية لليزر وهذا يسمى (*Tuning*) التنعيم
2. سهولة تكوين الوسط الفعال (إذابة الصبغة في المحلول)
3. إمكانية تغيير تركيز الصبغة بسهولة (تقليله بتخفيف المحلول أو زيادته بتركيز المحلول)
4. لا توجد عيوب بلورية
5. سهولة عملية التبريد من خلال تحريك المحلول

مساوئ ليزرات الحالة السائلة هي:

1. عدم الاستقرار بسبب حركة السائل
2. يمكن أن يسبب المذيب إلى منع توليد الليزر
3. تتأثر بالحرارة بشكل كبير جداً
4. تتحلل الصبغة عند تعرضها إلى الضوء

من أبرز أنواع ليزرات الصبغة:

1. ليزر الصبغة رودامين 6 G (*R6G*) ويبعث في المدى (570-610) nm
2. ليزر الصبغة رودامين B (*RB*) ويبعث في المدى (605-635) nm
3. ليزر صبغة الكومارين (*Coumarin*) ويبعث في المدى (400-575) nm
4. ليزر صبغة البوليميثان (*Polymethane*) ويبعث في المدى (710-950) nm



ليزر الحالة الغازية (Gas Lasers)

الوسط الفعال هو عبارة عن أنبوب من الزجاج أو السيراميك يحتوي على غاز واحد مثل ليزرات الأركون والزينون والهيدروجين والنيتروجين أو خليط من غازين مثل ليزرات الهيليوم-نيون وفلوريد الهيدروجين وكلوريد الزينون أو خليط من أكثر من غازين مثل ليزرات $CO_2:N_2:He$.

كما تقسم الليزرات الغازية إلى أنواع عديدة حسب آلية توليد الليزر إلى:

1. ليزرات الغازات المتعادلة مثل $(He-Ne)$ و $(He-Cd)$
2. ليزرات الغازات الأيونية مثل $(Ar+)$ و $(Kr+)$
3. ليزرات الغازات الجزيئية مثل (CO_2) و (KrF)

يكون تركيز الذرات أو الجزيئات حوالي $(10^{18}-10^{19})m^3$ لذلك يكون حجم منظومة الليزر الغازي أكبر من حجم منظومة ليزر الحالة الصلبة.

لا يمكن ضخ الليزر الغازي باستخدام المصباح الوميضي لأن نطاق الامتصاص للغاز يكون ضيقاً جداً وبالتالي عملية الضخ تكون غير كفوءة. ومصدر الضخ هو عبارة عن جهاز قدرة كهربائية يقوم بتحويل القدرة الكهربائية إلى قطبين كهربائيين في الأنبوب (الأنود والكاثود) الذي يحتوي على الغاز (أو الغازات) فيحدث التفريغ الكهربائي للغاز (توليد البلازما) ويتولد الليزر.

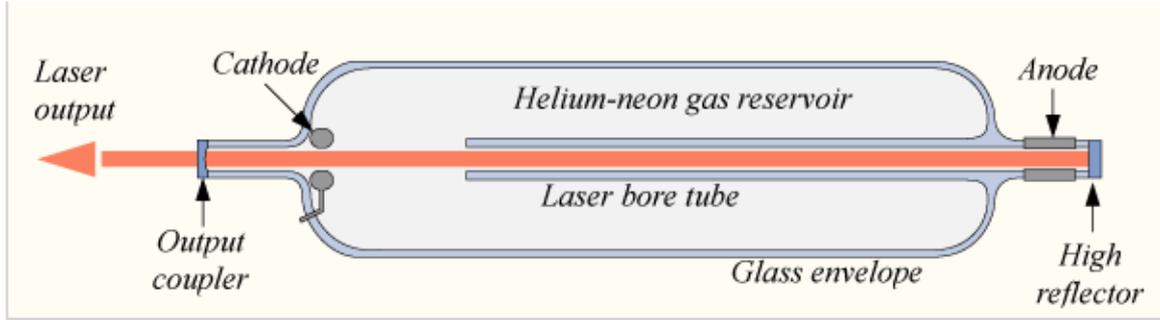
يمكن أن يتم تبريد أنبوب التفريغ الكهربائي من خلال مرور ماء أو هواء بارد حول الأنبوب أو من خلال ضخ الغازات (أو الغازات) بسرعة كبيرة إلى داخل أنبوب التفريغ. عادة تكون مرايا الليزر الغازي ملصوقة على أنبوب التفريغ كما يمكن فصلها عنه.

• ليزر الهيليوم-نيون (Helium-Neon)

هو عبارة عن نوع من ليزر الغاز يستخدم أنبوبة من زجاج الكوارتز والوسط الفعال خليط من غازي الهيليوم والنيون بنسبة 1:10 موضوعين في أنبوبة زجاجية طولها $(10-80)cm$ وقطرها $(2-10)mm$ تحت ضغط $(0.6 mm Hg)$ ومرأتان مستويتان متوازيتان ومتعامدتان على محور الأنبوبة إحداهما عاكسة والأخرى شبة منفذة بالإضافة إلى مجال كهربائي عالي التردد أو فرق جهد مستمر يسלט على الغاز داخل الأنبوبة لإحداث تفريغ كهربائي وإثارة ذرات الغاز يعتبر هذا الليزر مهماً لأنه قليل الكلفة وكثير الاستخدامات ويعمل بنمط مستمر (CW) وليس خطر عند الاستخدام الطول الموجي الخارج هو $(632.8nm)$ في المنطقة الحمراء

طريقة العمل

- 6- يعمل فرق الجهد على إثارة ذرات الهيليوم المثارة إلى مستويات طاقة أعلى
- 2- عند تصادم ذرات الهيليوم المثارة مع ذرات النيون غير المثارة تحدث إثارة لذرات النيون نتيجة تقارب قيم طاقه مستويات اثارتهما ويتحقق التأهيل المعكوس لذرات النيون حيث تتراكم في مستوى الإثارة شبه المستقر (فترة العمر له كبيرة نسبياً حوالي 0.001 ثانية)
- 3- تهبط بعض ذرات النيون تلقائياً إلى مستوى ادنى وتنتج فوتونات طاقتها تساوى الفرق بين طاقتي المستويين تقوم بحث ما بقي من ذرات النيون في المستوى شبه المستقر لكي يحدث انبعاث مستحث
- 4- تحدث انعكاسات متكررة تبادلية للفوتونات التي تتحرك موازية لمحور الأنبوبة على المرأتين في نهايتي الأنبوبة (التجويف الرنيني) فيحدث تضخيم لهذا الإشعاع
- 7- عندما تصل شدة الإشعاع إلى حد معين يخرج جزء منه من خلال المرآة العاكسة جزئياً على شكل شعاع ليزر ويبقى باقى الإشعاع داخل الأنبوبة لتستمر عملية الانبعاث وإنتاج الليزر
- 8- ذرات النيون تعود لنتثار بالتصادم مع ذرات الهيليوم التي بدورها تثار بفعل التفريغ الكهربائي داخل الأنبوبة وهكذا..



الشكل 3-5 مخطط لمنظومة ليزر الهيليوم-نيون

الاستخدامات

يستخدم في المختبرات العلمية واغراض الترصيف وقراءة الرموز وغيرها

• ليزر ايون الأركون Ar^+ (Argon Ion)

الوسط الفعال هو غاز الأركون المتأين وله طولين موجيين خارجين هما الأزرق 488 nm والأخضر المزرق 514.5

طول أنبوب التفريغ $(2-1)\text{ m}$ وتيار التفريغ الكهربائي بحدود 50 A وفولتية مقدارها (250 V) والتبريد يتم بواسطة الماء

يتم تأهيل المستوى الأعلى لانتقال الليزر بعملية تصادم متتاليتين مع الإلكترونات الناتجة من التفريغ الكهربائي فالتصادم الأول يؤين الذرة والثاني يحرض هذا الايون. يستخدم في التطبيقات الطبية وخاصة جراحة العيون وكذلك في ضخ ليزرات أخرى مثل ليزر الصبغة.

• ليزر ثنائي أوكسيد الكربون (CO_2 Laser)

الوسط الفعال هو عبارة عن خليط من غازات ثنائي أوكسيد الكربون (CO_2) والنيتروجين (N_2) والهيليوم (He) بنسب معينة يوضع الخليط في أنبوب زجاجي يحتوي قطبين كهربائيين (الكاثود والأنود) ويتم تسليط الجهد الكهربائي على خليط الغازات بين القطبين فيتولد الليزر من غاز CO_2 أما دور غاز النيتروجين فهو تحسين عملية الضخ (عملية انتقال الطاقة الرنيني) أما دور غاز He فهو تبريد غاز CO_2 ويمكن ان يعمل هذا الليزر بالنمط المستمر والنبضي وينتج قدرات عالية جدا. يستخدم هذا الليزر في مجالات كثيرة جدا في عمليات القطع واللحام والجراحة الطبية وتحديد المدى وهو أكثر أنواع الليزرات استخدام وتصل كفاءة هذا الليزر إلى حوالي (30%) وهي كفاءة عالية مقارنة بباقي أنواع الليزر. ويبحث مجموعة من الأطوال الموجية ما بين $(9.2 - 10.8)$ مايكرومتر ولكن الطول الموجي الأقوى هو $10.6\mu\text{m}$



هنالك ستة أنواع من هذا الليزر هي:

1. ليزر الجريان الطولي والتفريغ المحوري (*Longitudinal-Flow Discharge CO2 Laser*)
Axial-
2. ليزر الجريان السريع (*Fast Flow CO2 Laser*)
3. ليزر الأنبوب المختوم (*Sealed-off CO2 Laser*)
4. ليزر التهيج المستعرض للغاز (*TE CO2 Laser*)
5. ليزر التهيج المستعرض عند الضغط الجوي (*TEA CO2 Laser*)
6. ليزر الغاز الديناميكي (*Dynamic Gas CO2 Laser*)

• ليزر إكسايمر *excimer laser*

هو نوع من الليزر الغازي واسمه مشتق من المصطلح الإنجليزي *Excited Dimer* (تعني الجزيئات الثنائية المثارة) اكتشف عام 1970 ينتج أشعة فوق البنفسجية ويستخدم عادة في جراحة العيون وفي صناعة أشباه الموصلات .

ويستخدم ليزر الإكسايمر عادة مخلوطاً من غازين خاملين مثل الأرجون والكريبتون أو الزينون وغاز نشيط مثل الفلور أو الكلور. وعند الوصول إلى حالة مناسبة من الإثارة الكهربائية في مخلوط الغاز تتكون جزيئات وسطية تسمى إكسايمر وهي جزيئات لا تتكون إلا في حالة إثارة وبذلك تنتج ضوء الليزر الذي يكون في نطاق الأشعة فوق البنفسجية وله طول موجة محدد. ويحدد نوع الجزيء المستخدم طول الموجة لليزر إكسايمر. وتعباً للغازات المستخدمة في زجاجات بأسطوانة جهاز الليزر التي ينتج فيها الإكسايمر. ويجب تجديد مخلوط الغازات بين حين وآخر حيث أن خواص المخلوط تتغير بالاستخدام وأيضاً تتغير أثناء أوقات عدم الاستخدام،

ويمكن إنتاج ليزر إكسايمر في هيئة نبضات فقط ويبلغ زمن النبضة بين 4 و 40 نانو ثانية. ويبلغ معدل إنتاج النبضات في الليزر من هذا النوع حالياً عدة كيلو هيرتز على الأكثر. ويستخدم ليزر إكسايمر كثيراً في الصناعة حيث تبلغ طاقة النبضات نحو 1 و 2 جول.

ليزر أشباه الموصلات (*Semiconductor Laser*)

تم اكتشاف هذا النوع من الليزر عام 1961 وهو يعتبر من ليزرات الحالة الصلبة لأن الوسط الفعال عبارة عن مادة صلبة ولكنه ليس بلورة مطعمة بأيونات فعالة وإنما تركيب من مواد شبه موصلة مانحة (*n-type*) وقابلة (*p-type*) وتمثل حزمة التوصيل (*Conduction band*) مستوي الليزر العلوي وحزمة التكافؤ (*Valence Band*) مستوي الليزر السفلي ويتم الضخ من خلال تيار كهربائي يحرك الإلكترونات والفجوات ما بين هاتين الحزمتين. تعتبر مادة كاليوم - ارسنايد (*GaAs*) أكثر المواد شبه الموصلة التي تستخدم كقاعدة لتصنيع ليزرات أشباه الموصلات وهذا النوع من ليزرات أشباه الموصلات يبعث في المنطقة تحت الحمراء القريبة حول الطول الموجي 0.87 مايكرومتر.

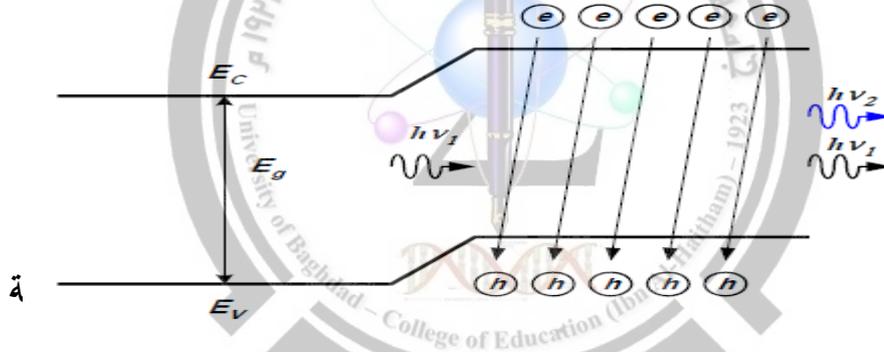


مميزات ليزرات أشباه الموصلات

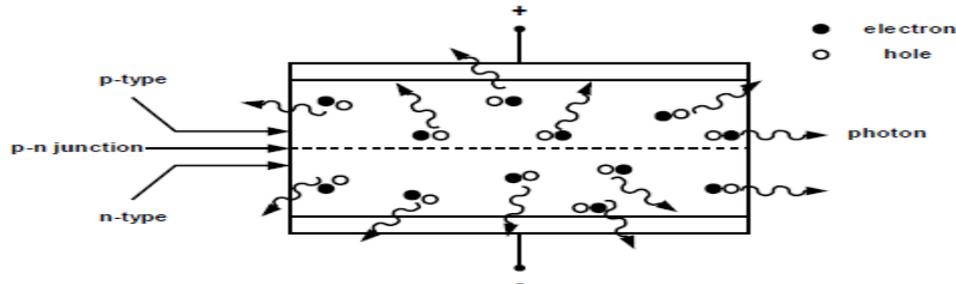
1. صغيرة الحجم
2. رخيصة الثمن
3. يتم ضخها مباشرة باستخدام التيار الكهربائي
4. كفاءتها عالية (تصل إلى 32%)
5. يمكن التحكم بشدة شعاع الليزر المنبعث من خلال التحكم بتيار الضخ الكهربائي
6. يمكن تنعيم الليزر الخارج أي الحصول على أطوال موجية محددة من نفس الجهاز.

• ليزرات ثنائي الوصلة (*p-n Junction Lasers*)

عند سقوط موجة ضوئية (فوتون) يمتلك طاقة أكبر من فجوة الطاقة (E_g) للمادة شبه الموصلة فإن الإلكترونات تتهيج وتصعد من المستوي الأرضي (حزمة التكافؤ) إلى المستوي المتهيج (حزمة التوصيل) وتترك وراءها فجوات . تبقى الإلكترونات في المستوي المتهيج فترة زمنية محددة تسمى فترة (*Level Lifetime*) عمر المستوي وتنزل بعد ذلك إلى المستوي الأرضي مرة أخرى وتتحد مع الفجوات وتبعث إشعاع. وهذه العملية تمثل الانبعاث التلقائي. إذا كانت الإلكترونات في المستوي المتهيج وسقط فوتون يمتلك طاقة تساوي فجوة الطاقة (E_g) فإن الإلكترونات تتحفز على النزول إلى المستوي الأرضي وتتحد مع الفجوات وتبعث إشعاع. وهذه العملية تمثل الانبعاث المحفز التي هي شرط توليد الليزر



هذا النوع من ليزرات أشباه الموصلات ذات الوصلة الثنائية تعمل في حالة الانحياز الأمامي (*Forward Bias*) أي أن الطرف الموجب لمصدر الفولتية يربط إلى الجزء الأمامي (*p-type*) والجزء السالب لمصدر الفولتية يربط إلى الجزء السالب لثنائي الوصلة (*n-type*) وإن الوصلة الثنائية تمثل المنطقة الفعالة التي يتولد فيها وينبعث منها الليزر كما هو واضح من الشكل



هذا النوع من ليزرات أشباه الموصلات يعمل بالنمط النبضي فقط لأنه يحتاج إلى تيار انحياز أمامي عالي وكذلك بسبب ارتفاع درجة حرارة التركيب الذي يتلف الليزر . ويعتمد الطول الموجي لشعاع الليزر على قيمة فجوة الطاقة للمادة شبه الوصلة .



الليزر الكيميائي *Chemical laser*

في هذا النوع تكون المادة الفعالة الكيميائية بحالة صلبة او سائلة او بحالة بخار غاز . وتتكون جزيئة الوسط الفعال نتيجة التفاعل الكيميائي بين المواد المستخدمة وتؤدي الطاقة المتحررة من التفاعل الى تهيج هذه الجزيئات مسببه الانبعاث المحفز بين مستوياتها التذبذبية لذا يقع معظم الاشعاع في مدى الاشعة تحت الحمراء .

ان تركيب الجهاز يعتمد على نوع التفاعل ومواده الكيميائية و تشغيله لا يحتاج الى دوائر الكترونية معقدة ولا الى مصادر خارجية لضخ الطاقة الا انه يحتاج بشكل مستمر ضخ المواد اللازمة للتفاعل . ان الليزر الكيميائي يمكن ان ينتج نبضات ليزر بقدرة اعلى ما تنتجه الانواع الاخرى . استخدامات هذا النوع من الليزر تقع اغلبها في الاغراض العسكرية

انواع الليزر الكيميائي

- 1- ليزر فلوريد الهيدروجين HF
- 2- ليزر كلوريد الهيدروجين HCl
- 3- ليزر بروميد الهيدروجين HBr
- 4- ليزر فلوريد الديتريوم DF

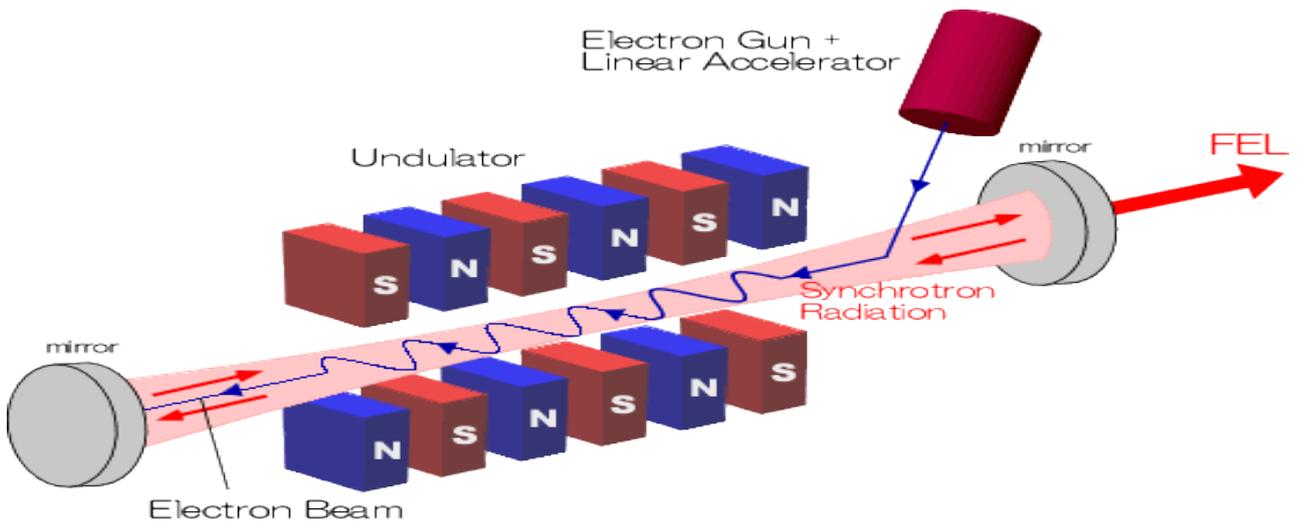
ليزر الالكترن الحر

أن الوسط الفعال في هذا النوع من الليزر عبارة عن شعاع الالكتروني، وهذه الالكترونات محررة تماماً من الذرات، وتتم بطريقة خاصة خلال مجال مغناطيسي للتحكم في مسارها.

ويعد ليزر الالكترونات الحرة، من الناحية النظرية، مصدر ضوء بالغ التكيف، إذ يمكن موافته لأي طول موجي مطلوب، وهو يعمل بقدرة عالية. أما الليزر الأخرى، فإنها تنتج الضوء عند أطوال موجية محددة، تتفق مع انتقالات الطاقة في أوساطها الليزرية.

يبين الشكل ادناه الرسم التخطيطي لتكوين ليزر الالكترن الحر ، حيث تنطلق الالكترونات من معجل خطي يقذف الالكترونات الحرة بطاقة 14 كيلو وات وتزداد سرعة شعاع الالكترونات حتى تصل إلى سرعة الضوء تقريبا ثم يتذبذب الشعاع خلال مذبذب بشكل دوري ليقطع مجال مغناطيسي ناتج من ترتيب مغناط بشكل أقطاب متناوبة ضمن تجويف الليزر على طول طريق الشعاع يدعى "المتمايل" (*undulator*) لكي يجبر الالكترونات على اتخاذ شكل جيبي اثناء مرورها فيه. ونتيجة لزيادة سرعة الالكترن وتذبذبه على طول المسار ينطلق الفوتون. وهكذا بالنسبة لبقية الالكترونات حيث تبدأ ببعث إشعاع متشابه يتم تغذيته وتكبيره بين مرآيا المرنان مما يؤدي إلى زيادة قوة الإشعاع ونتاج الليزر.

استعمل ليزر الالكترن الحر في المجال الطبي عام 1999 في الجراحة لازالة الانسجة النالفة في المخ ، وكذلك استعمل في المجال العسكري كسلاح ذو طاقة موجه ضد الصواريخ





الفصل السادس

تطبيقات الليزر

هناك عدد هائل من تطبيقات الليزر أهمها:

1. التطبيقات الصناعية (القطع والتثقيب واللحام والتصليد)
2. القياسات والفحص (قياس المسافات والترصيف البصري وكشف العيوب)
3. التطبيقات الطبية والبيولوجية (أمراض العين والجراحة والتجميل والاستئصال والتصوير الأحيائي)
4. التطبيقات العسكرية (التوجيه والتتبع وتقدير المدى)
5. التطبيقات التجارية (الأقلام الضوئية والطابعات الليزرية وقارئات الأقراص المدمجة)
6. الاتصالات البصرية

أولاً : التطبيقات الصناعية (Industrial Applications)

يعتمد استخدام الليزر في التطبيقات الصناعية بمجموعة من الأمور أهمها:

1. الطول الموجي لشعاع الليزر
2. طاقة أو قدرة شعاع الليزر (الطاقة في حالة الليزر النبضي والقدرة في حالة الليزر المستمر)
3. حجم شعاع الليزر
4. إنفراجية شعاع الليزر (يفضل أقل ما يمكن)
5. نمط شعاع الليزر (يفضل النمط الأساسي)
6. أبعاد منطقة المعالجة
7. امتصاصية المادة لشعاع الليزر
8. انعكاسية المادة لشعاع الليزر
9. التوصيلية الحرارية للمادة
10. سرعة حركة شعاع الليزر
11. الأجزاء البصرية المستخدمة
12. استخدام الغازات المساعدة

● محاسن استخدام الليزر في التطبيقات الصناعية :

1. عدم وجود تماس مباشر بين العينة ومنظومة الليزر ولذلك لا يوجد تلوث أو إجهادات ميكانيكية.
2. استخدام الليزر لا يؤثر على الخواص الفيزيائية للمادة لأن المنطقة التي تتأثر صغيرة جداً.
3. يمكن استخدام الليزر مع مواد مختلفة مثل المعادن والسيراميك والزجاج والخشب دون حدوث تلف للمادة.
4. إمكانية العمل في مواضع صعبة مثل الزوايا والانحناءات وغيرها



5. العمل يتم بسرعة عالية ودقيقة فمثلا يمكن إجراء عملية قطع المعادن بسرعة (10m/min) وهي أسرع عشر مرات من الطرائق التقليدية.
- 6 يمكن أن تكون عملية استخدام الليزر مبرمجة أوتوماتيكيا لغرض الدقة.
7. يمكن الحصول على قدرات عالية جدا .
8. شعاع الليزر لا يتلف نتيجة الاستخدام كما في حالة الآلات المستخدمة في (Arc Welding) وقوس اللحام (Cutters) الطرائق التقليدية كالمقاطع وغيرها (Drillers) .والمثقبات
9. لعمل بالليزر يتم بهدوء وبدون تلوث كما في الطرائق التقليدية

• مساوئ استخدام الليزر في التطبيقات الصناعية :

1. الكلفة التصنيعية والتشغيلية لمنظومة الليزر تكون عالية.
2. منظومة الليزر تحتاج إلى خبرة جيدة لتشغيلها وديمومة عملها.
3. مخاطر القدرة العالية.
4. تحتاج منظومة الليزر إلى سيطرة وتحكم دقيقين.

ثانيا : القياسات والفحص measurements and detection

يستخدم الليزر في قياس المسافات بدقة متناهية، سواء المسافات القصيرة أو الطويلة. وأشعة الليزر تستطيع قياس عشرة أمتار دون إحداث خطأ يتجاوز واحد على عشرة آلاف من المتر. كما استخدمت أشعة الليزر في تحديد بعد القمر عن الأرض. وقد تم ذلك في السبعينيات حيث وضع رواد الفضاء على القمر مرآة لعكس الليزر عند سقوطه عليها، وبعد ذلك وجه شعاع ليزر من الأرض إلى القمر وبانعكاسه على المرآة على سطح القمر وعودته إلى الأرض استطاع العلماء حساب بعد القمر عن الأرض بدقة لم يتوصلوا إليها من قبل. كذلك يمكن تستخدم أيضا في تحديد الأهداف بدقة بالغة جدا، حيث أن كان الهدف على مسافة 20 كم ووجهنا شعاع ليزر فسوف ينحصر مقطع الشعاع في دائرة ضوئية قطرها 7 سم فقط. وإذا أطلقت إلى القمر فسيكون قطر الدائرة المشكلة 3,2 كم فقط.

كما يستخدم الليزر في عمليات الترسيف البصري والتي تعني وضع مجموعة من الأشياء على استقامة واحدة كالجسور والطرق والأرصفة ونصب الماكينات والمصانع. كذلك يمكن استخدام الليزر في الكشف عن العيوب الموجودة داخل المادة من خلال تسليط الليزر ونقل صورة عن التركيب الداخلي ومعرفة إذا ما كانت هنالك عيوب في التركيب البلوري أم لا.

ثالثا : التطبيقات الطبية والبيولوجية (medical and biological applications)

يستخدم ليزر أيون الأركون لأخضر + Ar في عمليات معالجة انفصال الشبكية في العين ومعالجة الحول وكذلك معالجة تمزق الأنسجة داخل القرنية. كما يستخدم ليزر ثنائي أكسيد الكربون CO2 في إجراء الجراحة داخل جسم الإنسان في مناطق يصعب وصول يد الجراح إليها بالطرائق التقليدية مثل جدران القلب والجدار الداخلي للمريء والرئتين والجمجمة كما يستخدم الليزر في إزالة تخثر الدم داخل الأوعية الدموية وصمامات القلب.



يستخدم ليزر النيديميوم-ياك ($Nd:YAG$) في عمليات إزالة الأوشام ($Tattoos$) والعلامات الوراثية ($Moles$) في جلد الإنسان والتي هي عبارة عن تجمعات للأوعية الدموية في منطقة محدودة .

تستخدم الليزر التي تعمل في المنطقة فوق البنفسجية والأشعة السينية من الأطوال الموجية في تصوير الخلايا الحية دون إتلافها أو تدميرها حيث يتم امتصاص هذه الأطوال الموجية من قبل أنسجة هذه الخلايا

رابعاً : التطبيقات العسكرية (*military applications*)

انتشر استخدام الليزر في نظم التسليح المختلفة خلال السنوات الأخيرة انتشاراً خطيراً، وكان له أثر بالغ في زيادة فاعليتها، فأصبحت معدات الليزر تتداول من الجندي المشاة، حتى المقاتلات والقاذفات، بل وبدأت تدخل في نظم الحرب ضد الصواريخ الباليستية. توجد أسلحة الليزر حالياً في المراحل المبكرة ، حيث يجب إجراء الكثير من الأبحاث قبل ذلك حتى المستوى المطلوب. يمكن للسلاح المادي أن يدمر أي هدف عن طريق توصيل كميات من الطاقة ، حيث يمتص الهدف جزء منها ، مما يؤدي إلى ارتفاع كبير في درجة الحرارة وتدميره. يشتمل نظام سلاح الليزر على مصدر ليزر ، ومجموعة عدسات بصرية لتركيز الشعاع على المسافة المطلوبة ، وأدوات للكشف عن الهدف وتتبع الهدف . حيث إن إجراءات تتبع الهدف تتم باستخدام شعاع الليزر (مرآة التوجيه السريعة) ، كذلك يجب وجود نظام كمبيوتر للتحكم في المكونات المختلفة.

هناك عدد من الفوائد لأسلحة الليزر مقارنة بالأسلحة التقليدية :

- 1- تنتشر أشعة الليزر بسرعة الضوء. لذلك ، لا يوجد أي تأخير في وقت إطلاق السلاح على الهدف ، ان سرعة الضوء العالية تسمح بزيادة الدقة مع الحد الأدنى من أخطاء التصويب للهدف المتحرك.
- 2- تتبع الأهداف القادرة على المناورة يكون اسهل وذلك عن طريق تحريك المرآة ، حيث المرايا أقل وزناً من البندقية ويمكن نقلها بشكل أسرع.
- 3- لا يوجد أي أضرار جانبية على البيئة من استخدام أشعة الليزر مثل القنابل أو المواد الكيميائية الخطرة.
- 4- ذخيرة غير محدودة
- 5- التحكم في درجة تدمير الهدف من منخفضة المستوى إلى مستوى ضرر دائم عالي الطاقة.

من ناحية أخرى ، هناك عيوب لأسلحة الليزر، حيث تتطلب كميات هائلة من الطاقة ، نتيجة انعكاسية المادة المصنوع منها الهدف. وكذلك خسارة الناتجة من الغلاف الجوي يؤدي الى توهين شعاع الليزر ، مثل التشتت والامتصاص والاضطراب.

وتقع أنواع الليزر المستخدمة حالياً في نظم التسليح في حيز الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية والسينية، وإن كان النوع الأول، الذي يقع في حيز الضوء المرئي غير مستخدم حالياً على نطاق واسع؛ لأنه يقع في نطاق الضوء الأحمر مما يجعله سهل الاكتشاف. ومن الناحية الأخرى فإن الليزر الذي يقع في حيز الأشعة تحت الحمراء حديث الاستخدام في التطبيقات العسكرية، ويمتاز بالعمل في حيز الأشعة تحت الحمراء البعيدة، مما يحقق له قدرة على اختراق الضباب والدخان والأمطار، ويفضل كذلك استخدامه مع نظم الرؤية السلبية



بالاستشعار الحراري، نظراً لعمله في النطاق الموجي نفسه، فيمكنه بالتالي التعامل مع الأهداف نفسها التي ترى بالمنظار الحراري. وتتعدد مجالات الاستخدامات العسكرية لأشعة الليزر، ونلخص أهمها فيما يلي:

اولاً : جهاز رادار الليزر

تعرف أجهزة رادار الليزر باسم "الليدار" *LADAR*، وهي الحروف الأولى من عبارة *Laser Detection and Ranging*، وتعني "الكشف وقياس المدى بواسطة الليزر". وهذا النوع من الرادار يتميز بدقته العالية في كشف ومتابعة وتعيين الأهداف. وهنا تستخدم أشعة الليزر في الإرسال، بدلاً من الأشعة الرادارية، ويكون جهاز الاستقبال كهروضوئياً بدلاً من المستقبل الإلكتروني التقليدي في الرادار،

ويستخدم جهاز الليدار في قياس المدى من القواعد الأرضية أو من السفن أو من الطائرات والمركبات الفضائية. ويستخدم أيضاً في الاستشعار عن بعد، إذ تتم دراسة مكونات الغلاف الجوي وقياس بعض المكونات الكيماوية فيه. ويتكون جهاز رادار الليدار بوجه عام من:

1. مرسل
2. أجهزة ضوئية للإرسال.
3. مستقبل يتكون من أجهزة ضوئية لتجميع الأشعة المنعكسة من الهدف، ثم مرشح *Filter* ليقفل من تداخل الموجات الضوئية.

ثانياً: قياس المسافة

تعتمد نظرية تشغيل جهاز قياس المسافة بالليزر على إطلاق نبضة ليزر لكي تصل إلى هدف مرئي ضوئياً، فتعكس منه هذه النبضة إلى جهاز الاستقبال، وتقوم دوائر خاصة بحساب الزمن من لحظة الإطلاق حتى عودة النبضة، وبالتالي حساب مسافة الهدف، إذ أن سرعة انتشار الموجات الضوئية معلومة. وعلى هذا الأساس فإن الجهاز يتكون من:

- 1- تليسكوب للتصويب، حتى يتمكن المستخدم من تحديد الهدف المراد تقدير مسافته.
- 2- المرسل، وبه مصدر الليزر، وغالباً ما يستخدم الياج في الأغراض العسكرية.
- 3- المستقبل، وبه الكاشف *Detector*.

وتدخل معدات قياس المسافة بالطبع في أغلب النظم الميدانية، ابتداءً من الجندي الذي يحمل معدة مدمجة في نظارة الميدان، لقياس مسافة الهدف بدقة كبيرة، إلى نظم إدارة النيران لأطقم المدفعية، ونظم إدارة النيران للدبابات. وتكون الأخيرة بالطبع مرتبطة ومدمجة ضمن حاسب إدارة النيران.

وجدير بالذكر أن ليزر ثاني أكسيد الكربون له دور فعال في نظم تقدير المسافة، وإدارة نيران المدرعات، فقد بدأ إنتاج مقدرات مسافة بالليزر تستخدم ليزر ثاني أكسيد الكربون، بدلاً من ليزر "الياج"، لاستخدامه متكاملًا مع أجهزة الرؤية الليلية الحرارية، مما يسمح باستخدام الكاشف الحراري للرؤية الليلية والتصويب نفسه، وبالتالي فإن ذلك يقلل من تكلفة المعدة العسكرية المتكاملة. وتجري الدراسة الآن لاستخدام هذا الأسلوب مع قاذف الصاروخ المضاد للدبابات "تو" *TOW*، والدبابة الكورية طراز *XK-1*.

ويتميز ليزر ثاني أكسيد الكربون بأن درجة نفاذيته خلال السحب والدخان أفضل منها في الأنواع الأخرى، مثل الياج أو الياقوت. ويرجع ذلك إلى أن تأثير ذرات الغبار والدخان يزيد عكسياً مع الطول الموجي، فكلما قل الطول



الموجي كلما زادت درجة تشتت الشعاع. وحيث إن ليزر ثاني أكسيد الكربون طوله الموجي عالي نسبياً، فإنه لا يتأثر بالغبار والدخان، ولكن العامل المؤثر على انتشار موجات ليزر ثاني أكسيد الكربون هو نسبة بخار الماء في الهواء.

وقد تم تزويد أنظمة الأسلحة المضادة للدبابات، وأنظمة الصواريخ المضادة للطائرات من طراز "رولاند" *ROLAND*، بجهاز قاس المسافة بالليزر الذي يستخدم غاز ثاني أكسيد الكربون عند الطول الموجي 10.6 ميكرون. وتم دمج هذا الجهاز الليزري مع جهاز تصوير حراري يعمل في الطول الموجي 8-12 ميكرون.

وأنتجت كندا جهاز التصوير الليزري طراز *CLASS*، الذي يستخدم مع أسلحة الضرب المباشر، مثل القاذف "كارل جوستاف" عيار 84 مم، والقواذف عديمة الارتداد عيار 106 مم. ويتكون الجهاز من مقدر مسافة ليزري، غير ضار بالعين لمدى حتى 4000 متر، ونظام تكثيف للصورة من الجيل الثالث، وحاسب ذي قدرة على الاحتفاظ ببيانات عشرة أنواع من الذخيرة.

خامسا : التطبيقات التجارية (Marketing Applications)

يستخدم الليزر في مجال التسويق من خلال استخدام أقلام ليزرية تقوم بمسح المنتجات والتعرف على شفرة الإنتاج المثبتة عليها وهي تقنية سريعة ودقيقة في عمليات العد والتصنيف كما يستخدم ليزر أشباه الموصلات الأحمر في الطابعات الليزرية حيث يوفر الدقة والتركيز العاليين . كما أن الأقراص المدمجة (*Compact Discs*) (*CD*) هي أيضا تعتمد على الليزر في عملها حيث يستخدم ليزر *He-Ne* أو ليزر أشباه الموصلات الأحمر في عملية الكتابة والقراءة لهذه الأقراص.

سادسا : الاتصالات البصرية *Optical Communications*

من الممكن استخدام التضمين *Modulation* لشعاع الليزر لغرض حمل الإشارات الكهرومغناطيسية ونقلها من نقطة إلى نقطة أو نقاط أخرى بسرعة عالية ودقة متناهية حيث يبلغ النطاق الترددي لحزمة الليزر حوالي 10^{14} اما في حالة الإشارات الصوتية فان هذا الرقم يزداد اكثر وعليه فان قابلية اشعاع الليزر على نقل المعلومات اعلى بكثير جدا من الموجات الدقيقة أو الموجات الراديوية.

تتألف منظومة الاتصالات البصرية بشكل أساسي من ثلاثة أجزاء هي المصدر الضوئي (الليزر) والوسط الناقل (الجو أو الألياف البصرية) والكاشف الضوئي

وتتميز الاتصالات البصرية بما يلي:

1. سعة كبيرة لحمل الإشارات
2. خسائر قليلة
3. عدم التداخل فيما بين الإشارات
4. التوصيلات البينية تكون ذات سرعة عالية
5. إن خطوط النقل تكون متوازية



من أمثلة الاتصالات البصرية الحديثة هي:

1. شبكات الهاتف المتقدمة (الشبكات الضوئية)
2. الشبكة العالمية للمعلومات (*Internet*) والبريد الإلكتروني (*Email*)
3. مراكز الخدمة الهاتفية المركزية لمنظومات الهواتف النقالة (*Mobiles*)
4. شبكات المساحة المحدودة (*LAN*) لتناقل البيانات

سابعا : التصوير المجسم Holography

هو تشكيل خيال ثلاثي الأبعاد من صورة واحدة منفردة من دون استخدام عدسات للرؤية. والصورة الثلاثية الأبعاد صورة مجسمة *hologram* سجلت عليها أشكال لا يمكن إدراكها على هيئة شرائط وحلقات متناوبة بيضاء وسوداء لها طول وعرض. فإذا أضيئت هذه الأشكال بضوء ليزري وحيد طول الموجة يظهر بعدها الثالث، أي العمق، واضحا، ويبدو الخيال بأبعاده الثلاثية كما في حالة الجسم الأصلي المصور.

إن الخيال في الصورة الفوتوغرافية العادية ينتج فقط عن تغيرات شدة الضوء المنعكس عن الجسم المصور، أما التصوير الثلاثي الأبعاد فإنه يسجل إضافة إلى ذلك أطوار الأمواج المنعكسة، أو يسجل تراكب مقدمات الأمواج المنعكسة، التي تكون بأطوار مختلفة بعضها عن بعض. ولما كان الضوء الطبيعي يتألف من أمواج متعددة الأطوار، وهي أمواج ألوان الطيف، كانت أطوار الأمواج المنعكسة عن الجسم المصور والنتيجة عن حزمة ضوئية طبيعية تكون عشوائية تماما.

ويعد دينس غابور *Dennis Gabor* صاحب فكرة التصوير المجسم، وقد حصل على جائزة نوبل في الفيزياء عن هذا الاختراع عام 1971.

وجد غابور أن بالإمكان الاستفادة من القدرة العالية للمجهر الإلكتروني باستخدام حزمة من الإلكترونات لإنجاز صورة مجسمة لجسم ما، ثم فحص تلك الصورة المجسمة باستخدام أشعة من ضوء وحيد التواتر يمكن الحصول عليه بإسقاط شعاع ضوئي عبر ثقب صغير جداً. ولكن هذه التقنية كانت تؤدي إلى إنقاص شدة الضوء إلى درجة لا تكفي للتصوير المجسم. ولذلك تولدت لديه قناعة لسنوات طويلة، بأن هذا الموضوع له أهمية نظرية فقط، لكن انتشار أشعة الليزر في أواخر الستينات غير الوضع فجأة وأصبح بالإمكان تطبيق نظرية غابور عملياً.

فعندما يُنظر إلى جسم ما بالعين المجردة تُدرك على الفور أبعاده الثلاثة. وهناك أسباب ثلاثة للشعور بالعمق. منها تحريك الرأس حول الجسم الذي يُنظر إليه وتغيرات وضع الخيال في الدماغ. أما أهم هذه الأسباب فهو أن كل عين تنظر إلى الجسم بزواوية رؤية مختلفة عن العين الأخرى. ومن ثم سيتكون في كل عين خيال يختلف قليلاً عن الخيال المتشكل في العين الثانية، أي إن المسار الضوئي لأشعة كل خيال يختلف قليلاً عن المسار الضوئي للآخر، وينطبق هذان الخيالان على الشبكية، ويتولى الدماغ دمجهما معاً فيحدث الشعور بالبعد الثالث.

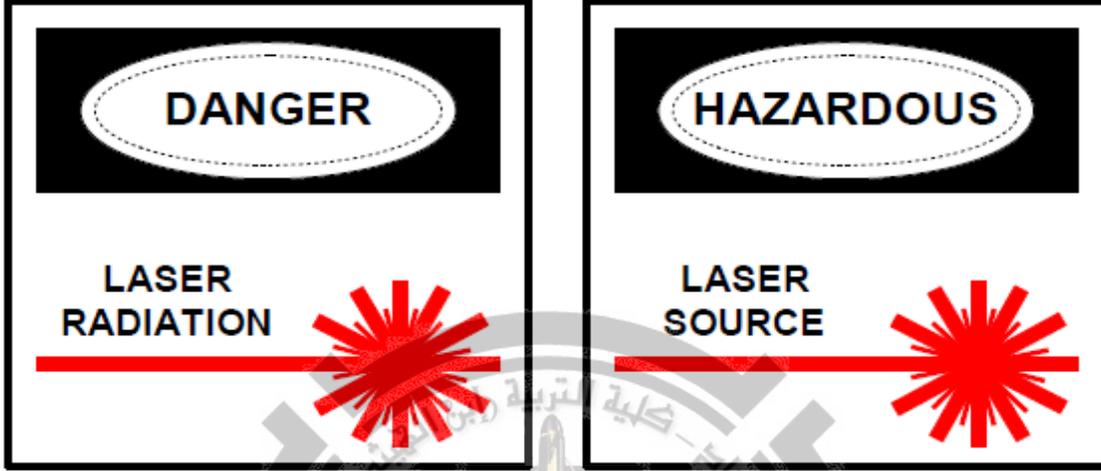
ولتحقيق الرؤية المجسمة الاصطناعية بين صورتين، لا بد من إعادة تركيب الخياليين المصورين *M1*، *M2* وصنع ما يسمى اللوحة المصورة الثلاثية الأبعاد، بحيث ينطبق الخيالان أحدهما على الآخر، وتكون العينان مكان مركزي التصوير *O1*، *O2* ونضع الصورتين متطابقتين كما في حالة التصوير الأصلية، وفي حالات خاصة يمكن تحقيق الرؤية المجسمة بالنظر بالمحاور العينية المتلاقية أو بالنظر بالمحاور المتوازية.



الفصل السابع

السلامة المهنية والأمان في مختبرات الليزر

العلامة المبينة أدناه تعني أن المكان فيه جهاز ليزر لذلك يجب أخذ الاحتياطات اللازمة لغرض السلامة المهنية والأمان عند العمل في هذا المكان.



تنقسم مصادر الخطر في مختبرات الليزر إلى ما يلي:

أولاً : مخاطر الإشعاع (*Radiation Hazards*):

أ. تأثير الإشعاع على العين في جميع الليزرات تسبب تلف القرنية أو تلف الشبكية مما قد يحدث عمى دائمى. كما أن الأطوال الموجية الأقصر هي الأكثر ضرراً.

ب. تأثير الإشعاع على الجلد وخاصة ليزرات CO_2 و $Nd:YAG$ و KrF أما الليزر المرئية (*Visible*) فيكون تأثيرها أقل إذا كانت قدرتها قليلة مثل ليزر $He-Ne$ وليزر أشباه الموصلات التجاري.

ثانياً : مخاطر القدرة الكهربائية: (*Electrical Power Hazards*)

وتتمثل بما يلي :

أ. تأثير القدرة الكهربائية العالية من جهاز القدرة (*Power Supply*)

ب. الصعقة الكهربائية من نقاط التوصيلات والكيبيلات

ثالثاً : مخاطر الانفجار: (*Explosion Hazards*)

أ. انفجار المصابيح الومضية في ليزرات الحالة الصلبة أو السائلة

ب. ا لمتسعات الكهربائية في معدات القدرة الكهربائية عموم ا

ج. المحاليل الكيميائية في ليزرات الحالة السائلة أو الليزرات الكيميائية

رابعاً : مخاطر التسمم: (*Poisoning Hazards*)

أ. المواد المذابة أو المذيبة في ليزرات الحالة السائلة (ليزر $R6G$ وليزر RB .)

ب. الأبخرة الناتجة في الليزرات الكيميائية (ليزر HF وليزر DF وليزرات بخار المعدن) ليزر بخار النحاس وليزر بخار الرصاص) وخاصة غاز أول أكسيد الكربون السام.

ج. استخدام النيتروجين السائل. (*Liquid Nitrogen*)



إرشادات وتعليمات العمل في مختبرات الليزر:



1. وضع علامات تحذير في الأماكن المعرضة لإشعاع الليزر.
2. يفضل ألا يشتغل شخص بمفرده في مختبر الليزر.
3. وضع مصباح تحذيري عند مدخل مختبر الليزر يضاء أوتوماتيكيا مع تشغيل جهاز الليزر لمنع دخول الأشخاص إلى المختبر بشكل مفاجئ.
4. تحديد اتجاه انتقال شعاع الليزر داخل المختبر بحيث لا يتعارض مع حركة الأشخاص داخل المختبر.
5. يجب أن تكون حزمة الليزر أقل من مستوى العين.
6. عدم وضع المأكولات وقتاني المشروبات في طريق شعاع الليزر لأنها يمكن أن تسبب انعكاس الشعاع باتجاه العين.
7. عمل أرضي (*Earth*) كهربائي جيد للمختبر بصورة عامة ولمجهز القدرة الكهربائية بصورة خاصة وعدم ترك أرضية المختبر رطبة وعدم وقوف الشخص الذي يشغل مجهز القدرة الكهربائية على صفائح معدنية أو مواد موصلة كهربائيا
8. وضع حواجز وعارضات أمام المواد القابلة للانفجار.
9. عدم التدخين في مختبر الليزر لأن الدخان يمكن أن يسبب تلف المواد البصرية مثل المرايا والعدسات.
10. يجب لبس النظارات الواقية (*Goggles*) الخاصة بكل نوع من أنواع الليزر ويجب إجراء فحص للعين كل ستة أشهر.
11. عند التعامل مع المواد الكيماوية والأصباغ والمحاليل فيجب لبس القفازات والنظارات الواقية.

