الفصل السابع

أنقلاب التعداد, ربح و خسائر الذهاب و الأياب
Population Inversion , gain and losses of Round trip

1-7 المقدمة Introduction

انقلاب التعداد شرط رئيسي لعملية الانبعاث المحتث Stimulated Emission اللازم لتكبير الضوء، وانقلاب التعداد هو توزيع للذرات على مستويات الطاقة مختلف على التوزيع في حالة الاتزان الحراري Thermal Equilibrium الخاضع لاحصائيات قانون بولتزمان ولتوضيح فكرة انقلاب التعداد سوف نقوم بشرح مختصر للتوزيع في حالة الاتزان الحراري.

2-9 توازن حراري Thermal Equilibrium

نحن نعلم من الديناميكا الحرارية أن مجموعة من الذرات عند درجة حرارة T [^{o}K] في حالة التوازن الحراري مع محيطها، توزع بحيث في كل مستوى الطاقة هناك في المتوسط عدد معين من الذرات. ويطلق على عدد من ذرات (N_i) في مستوى طاقة معين (E_i) بالتعداد Population Number .

تحدد معادلة بولتزمان Boltzmann equation العلاقة بين التعداد لمستوى طاقة معين ودرجة الحرارة:

$$N_i = const. \times \exp(\frac{-E_i}{kT})$$

N_i = التعداد = Population عدد الذرات في وحدة الحجم لمستوى طاقة معين E_i .

k = ثابت بولتزمان Boltzmann constant $k = 1.38^{*}10^{-23}$ [Joule/^{0}K]

E_i = طاقة المستوى i , على فرض أن $E_i > E_{i-1}$

Const = ثابت التناسب. و هو ليس بمهم عندما ننظر تعداد مستوى مقارنة مع التعداد في مستوى آخر.

T = درجة الحرارة بدرجة الكلفن [^{o}K] (درجة الحرارة المطلقة) (Absolute Temperature) .

وتظهر المعادلة بولتزمان اعتماد عدد السكان (N_i) على مستوى الطاقة (E_i) في درجة حرارة T.

من هذه المعادلة نلاحظ ما يلي:

1. مع ارتفاع درجة الحرارة، ارتفاع التعداد.
2. كلما ارتفع مستوى الطاقة، انخفاض التعداد.

الاتزان الحراري

عند درجات الحرارة المنخفضة تكون كل الذرات في المستوى الأرضي وبزيادة درجة الحرارة تثار الذرات الى مستويات طاقة اعلى وهذا خاضع لقانون بولتزمان الاحصائي عند الاتزان الحراري.

3-9 التعداد النسبي Relative Population

التعداد النسبي (N_2 / N_1) لاثنين من مستويات الطاقة E_2 مقارنة بـ E_1 هو:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{const.\times \exp(-\frac{E_2}{kT})}{const.\times \exp(-\frac{E_1}{kT})}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp(-\frac{E_2 - E_1}{kT})$$

تم حذف ثابت التناسب (const) من خلال تقسيم التعدادين.

من العلاقة هناك عدة الاستنتاجات :

1. لا تعتمد العلاقة بين عدد السكان (N_2 / N_1) على قيم مستويات الطاقة E_1 و E_2، ولكن فقط على الفرق بينهما: E_2- E_1.

2. لفرق طاقة معين، كلما ارتفعت درجة الحرارة، كلما كبر التعداد النسبي.
3. يتراوح التعداد النسبي بين 0 و 1.

يبين الشكل (12) في الفصل الثاني تعداد كل مستوى الطاقة في حالة التوازن الحراري.

سؤال:

أحسب نسبة التعداد (N_1، N_2) لمستويي الطاقة E_2 و E_1 وعندما تكون المادة في درجة حرارة 35 K أعلى من درجة حرارة الغرفة ، و الفرق بين مستويي الطاقة هو 0.2 [eV] . ما هو الطول الموجي (λ) للفوتون الذي سينبعث من الانتقال من E_2 إلى E_1؟

(راجع المثال في الفصل الثاني)

4-7 أنقلاب التعداد Population Inversion

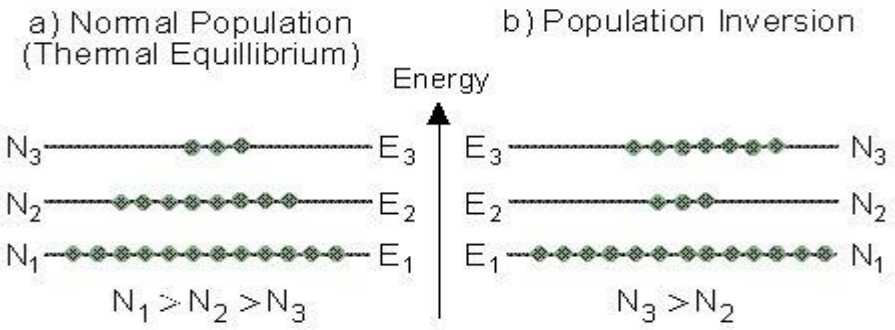
رأينا في معادلة بولتزمان Bolzman للتوازن الحراري أنها تبين لنا ما يلي:

$$N_1 > N_2 > N_3$$

وهكذا، فإن تعداد مستويات الطاقة الأعلى أقل من تعداد من هو أقل منها. ويسمى هذا الوضع " التعداد الطبيعي" "Normal Population". في هذه الحالة للتعداد الطبيعي فأن الفوتون الساقط على المادة سيتم أمتصاصه، و سيرفع ذرة الى مستوى اعلى.

عن طريق وضع طاقة في نظام الذرات، يمكننا تحقيق حالة من "أنقلاب التعداد""Population Inversion". في قلب التعداد، واحد على الأقل من مستويات الطاقة الأعلى سيصبح لديه المزيد من الذرات من مستوى طاقة أقل.

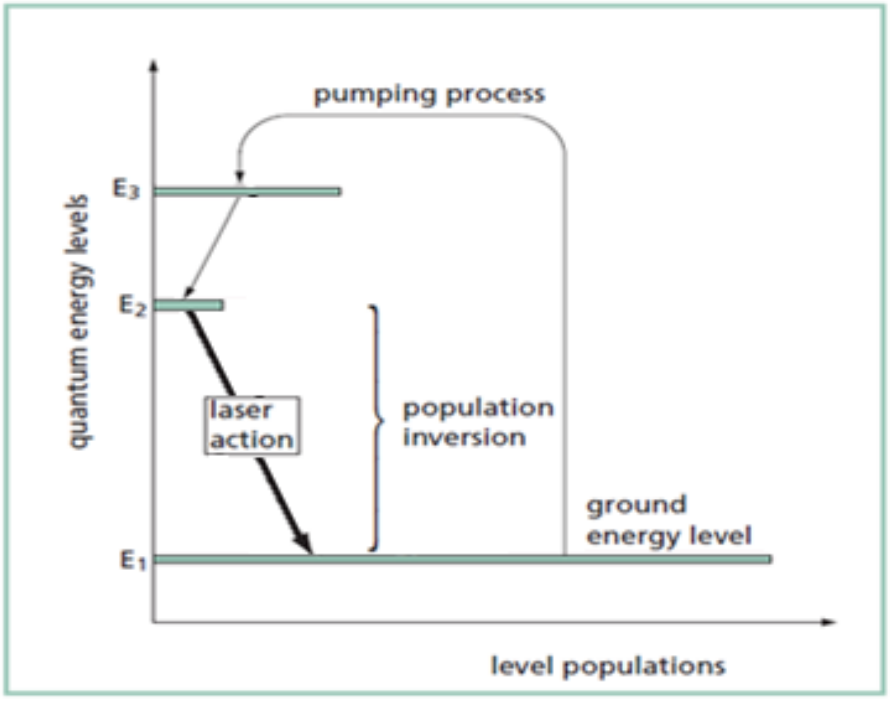
كمثال في الشكل (38) أدناه, في حالة أنقلاب التعداد هناك المزيد من ذرات (N_3) في أعلى مستوى الطاقة (E_3)، مقارنة بعدد من الذرات (N_2) في مستوى الطاقة الأدنى (E_2). تسمى العملية التي تعمل على زيادة عدد الذرات المثارة "الضخ" "Pumping" كما موضح في الشكل التالي .



شكل (38): مقارنة بين التعداد الطبيعي و أنقلاب التعداد

5-7 ليزر الثلاث مستويات Three Level Laser

الرسم التخطيطي لمستوى الطاقة لليزر الثلاث مستويات طاقة هو الشكل أدناه. مستويي الطاقة التي تحدث بينها فعل الليزر هي: مستوى طاقة الليزر المنخفض (E_1)، ومستوى الطاقة الليزر العلوي (E_2).



شكل (39): مخطط مستوى الطاقة في ليزر الثلاث لمستويات

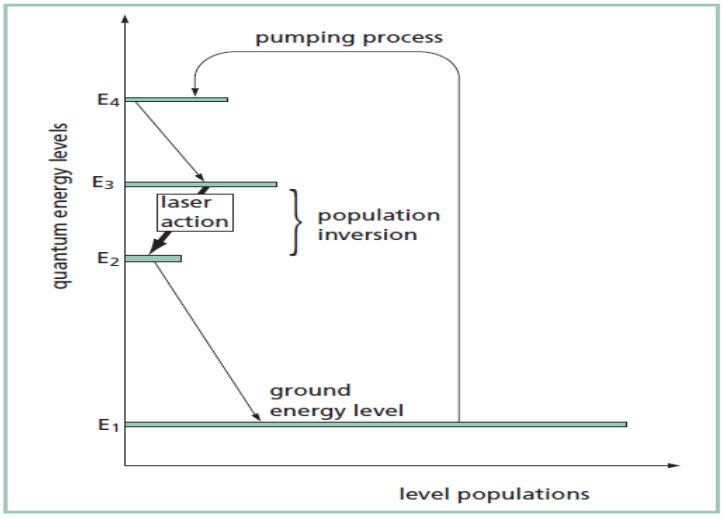
لتحقيق فعل الليزر , لا بد من ضخ الطاقة في النظام لخلق أنقلاب التعداد. بحيث أن الكثير من ذرات سيكون في مستوى الطاقة E_2 مقارنة بمستوى الأرضي (E_1). الذرات يتم ضخها من الحالة الأرضية (E_1) إلى مستوى الطاقة E_3. تبقى هناك بمتوسط زمن بحدود [sec] 10^{-8} و تنحل (عادة بانتقال غير الإشعاعي) إلى مستوى الطاقة العلوي المستقر E_2. بما أن عمر مستوى الطاقة العلوي المستقر (E_2) طويل نسبيا (بحدود [sec] 10^{-3}) ستبقى العديد من الذرات في هذا المستوى. إذا كان ضخ قوي بما فيه الكفاية، بحيث يتم ضخ أكثر من 50% من الذرات سيكون في مستوى الطاقة E_2، يحصل أنقلاب التعداد، ويمكن أن يحدث الليزر.

سؤال :

بما أن حالة ضخ عالية هي التي تحدد عملية ليزر الثلاث مستويات بالعملية النبضية.
لماذا تكون العملية المستمرة مستحيلة في ليزر المستويات الثلاث؟

6-7 ليزر الأربع مستويات Four Level Laser

الرسم التخطيطي الذي يوضح مستوى الطاقة لليزر المستويات الأربع في الشكل أدناه . مقارنة الرسم البياني يعادل ليزر الثلاث مستويات، هناك مستوى طاقة إضافي, هذا المستوى الاضافية لديه عمر قصير جدا.



شكل (40): مخطط مستوى الطاقة في ليزر الأربع مستويات

عملية ضخ ليزر الأربع مستويات مماثلة لضخ ليزر الثلاث مستويات. ويتم ذلك عن طريق أحداث التعداد السريع لمستوى الليزر العلوي (E_3)، من خلال مستوى أعلى من الطاقة (E_4).
ميزة ليزر الأربع مستويات هي التعداد المنخفض لمستوى طاقة الليزر الأدنى (E_2).لخلق أنقلاب التعداد، ليست هناك حاجة إلى ضخ أكثر من 50% من الذرات إلى مستوى الليزر العلوي.تعداد مستوى الليزر الأسفل ($N_2(t)$) يتلاشى سريعا إلى الحالة الأرضية، لذلك من الناحية العملية يكون فارغا. وهكذا، فإن عملية الليزر المستمر لليزر الأربع مستويات ممكنة حتى لو تبقى 99% من الذرات في الحالة الأرضية .

مزايا ليزر المستويات الأربع بالمقارنة مع ليزر المستويات الثلاث :

- العتبة الليزرية ليزر الأربع مستويات أقل.
- كفاءة أعلى.
- معدل الضخ المطلوب أقل.
- العمل بالنمط المستمر ممكن.

ملاحظة:

- في ليزر الثلاث مستويات, مستوى الليزر السفلي هو الحالة الأرضية.
- في ليزر المستويات الرابع, مستوى الليزر السفلى يكون فوق الحالة الأرضية.

7-7 ربح و الخسائر Gain and Losses

لقد أصبح من المعلوم أن الحصيلة الناتجة عن دورة كاملة لليزر خلال المادة تتطلب حصول انقلاب التعداد كشرط اساسي لكي يستمر الحصول على فعل الليزر. لكن هناك أيضا فقد أو خسائر تكون ناتجة عن عدة عوامل تسبب في نقصان الربح. ولكي نحصل على ليزر فإن الربح لكل دورة يجب أن يكون على الاقل مساوي أو أكبر من الخسارة في كل دورة. في الفقرات التالية سنركز على العلاقة بين الربح والخسارة.

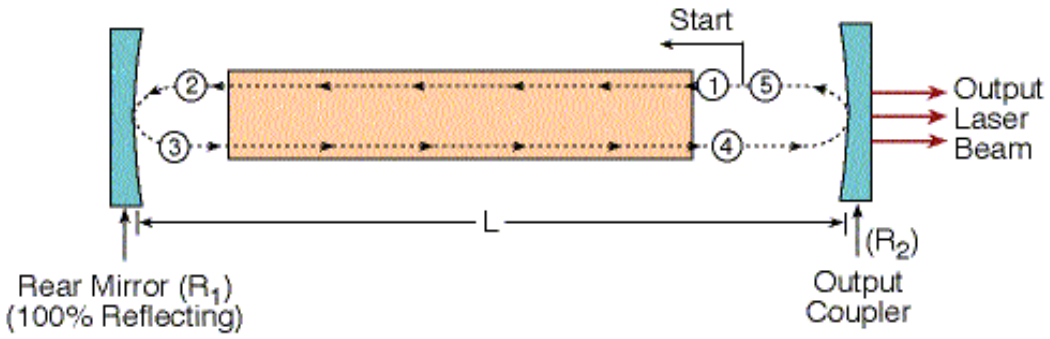
الخسائر في نظام ليزر تكون بسبب عدد من العمليات المختلفة هي:

1. النفاذ في المرايا
2. الامتصاص والتشتت بواسطة المرايا
3. الامتصاص في الوسط الليزري
4. خسائر الحيود عن المرايا

إن كل هذه الخسائر تسهم في الحد من معامل الربح الفعال .

8-7 ربح رحلة الذهاب و الإيابِ Round trip Gain (G)

الشكل (41) يوضح مسار الرحلة ذهابا وإيابا للحزمة خلال تجويف الليزر. و ينقسم المسار إلى أقسام مرقمة من 1 الى 5، في حين نقطة "5" هي نفسها النقطة "1".



شكل (41): مسار الرحلة ذهابا وإيابا للإشعاع خلال تجويف الليزر

من التعريف، يعطى ربح الذهاب و الإياب من خلال:

$$G = \frac{I_5}{I_1}$$

G = ربح الذهاب وإياب.

I_1 = كثافة الإشعاع في بداية الحلقة.

I_5 = كثافة الإشعاع في نهاية الحلقة.

بعد كل دورة عند النقطة =(1 أو 5) تستعيد الحزمة ذات المواصفات من شكل و طور.

9-7 الربح (G) بدون خسائر Gain (G) without Losses

من محاضرة (الفصل السابع) وجدنا أن الكثافة بعد رحلة الذهاب والإياب واحدة يعطى بالمعادلة

$$I_5 = R_1 \times R_2 \times G^2 \times I_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

حيث الربح (G) بوجود الخسائر و على فرض أن الخسائر تحدث موحدة على طول تجويف (L). بالتناظر مع صيغة لامبرت Lambert formula للخسائر، نحدد معامل الخسارة (α)، و يمكن أن نستخدمه لتعريف عامل الخسارة k :

$$k = \exp(-2\alpha L) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

k = عامل الخسارة Loss factor ، ويصف الجزء النسبي للإشعاع التي تبقى في تجويف بعد كل الخسائر في رحلة حلقة مستديرة داخل تجويف.

جميع الخسائر في رحلة الذهاب و الاياب داخل تجويف هي 1-k (دائما أقل من 1).

α = معامل الخسارة .

2L = طول المسار، وهو ضعف طول تجويف.

عند اضافة عامل الخسائر (k) إلى معادلة (1):

$$I_5 = R_1 \times R_2 \times G^2 \times I_1 \times k \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

من هذا نستطيع أن نحسب الربح لرحلة ذهاب و إياب:

$$G = \frac{I_5}{I_1} = R_1 \times R_2 \times G^2 \times k \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

أذا افترضنا توزيع موحد للمعامل الخسارة (α)، نحن الآن نحديد معامل الربح (γ)، و نفرض ربح الوسط الفعال (G_A) هو موحد على طول تجويف.

$$G_A = \exp(\gamma L) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

بتعويض العلاقتين (2) و (5) في علاقة ربح الحلقة (4) نجد:

$$G = R_1 \times R_2 \times \exp[2(\gamma - \alpha)L] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

- عندما يكون ربح الحلقة (G) هو أكبر من 1 (G> 1)، فإن شدة الشعاع تزداد بعد رحلة واحدة تمر من خلال وسط الليزر.
- عندما الربح حلقة (G) هو أقل من 1 (G <1)، فأن شدة الأشعاع ستنخفض بعد عودة احدة تمر من خلال الليزر, و بذلك سوف يضمحل تذبذب الليزر، و لن ينبعث شعاع.

هناك شرط العتبة للتضخيم، من أجل خلق التذبذب داخل الليزر. ربح العتبة هذا يتم تميزه بأضافة "th".

لليزر المستمر، شرط العتبة هو:

$$G_{th} = 1 = R_1 \times R_2 \times {G_A}^2 \times k$$
$$= R_1 \times R_2 \times \exp[2(\gamma - \alpha)L] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

مثال :

ربح الوسط الفعال في الليزر هو 1.05. و انعكاسية مرأتي الليزر هي: 0.999، و 0.95 . طول تجويف الليزر هو 30 cm. معامل الخسارة: $\alpha = 1.34\times10^{-4}$ cm . أحسب:

1. عامل الخسائر k , 2. ربح الرحلة ذهابا و أيابا G , 3. معامل الربح γ .

الحل :

1. عامل الخسائر k .

$$k = \exp(-2\alpha L) = \exp[-2(1.34\times10^{-4})\times30] = 0.992$$

2. ربح رحلة الذهاب و الأياب G .

$$G = R_1R_2G_A^{\,2}\ \ k = 0.999\times0.95\times1.052\times0.992 = 1.038$$

حيث $G_L > 1$ فهذا الليزر يعمل فوق العتبة.

3. معامل الربح γ .

$$G = \exp(\gamma L)$$

$$ln\ G = \gamma L$$

$$\gamma = \frac{\ln G}{L} = \frac{\ln 1.05}{30} = 1.63 \times 10^{-3} \quad cm^{-1}$$

معامل الربح (γ) هو أكبر من معامل الخسارة (α)، كما هو متوقع.

مثال

ليزر الهيليوم نيون يعمل عند شرط العتبة و انعكاسية مرايا الجهاز هما: 0.999، و 0.97, طول الليزر هو 50 cm و ربح الوسط الفعال هو 1.02. أحسب:
1. عامل الخسائر k , 2. معامل الخسارة α .

الحل

بما أن الليزر يعمل في حالة العتبة، G = 1.
باستخدام هذه القيمة في ربح الذهاب و الإياب:

$$G = 1 = R_1R_2G_A^{\,2}k$$

1. عامل الخسائر k .

$$k = 1/(\ R_1R_2G_A^{\,2}) = 1/(0.999\times0.97\times1.02^{\,2}) = 0.9919$$

بما أن $G_L > 1$ فهذا الليزر يعمل فوق العتبة.

2. معامل الخسارة α.

هذا يحسب من عامل الخسائر

$$k = \exp(-2\alpha L)$$

$$ln\ k = -2\alpha L$$

$$\alpha = ln\ k/(-2L) = ln\ (0.9919)/(-100) = 8.13^{*}10^{-5}\ [cm^{-1}]$$

تنويه Attention

إذا كان عامل الخسائر أقل من 0.9919، فأن $G <1$، أي لن يتحقق شرط التذبذب.

مثال

انعكاسيتي مرأتي الليزر هي: 0.999، و0.95 جميع الخسائر في رحلة الذهاب و الإياب تساوي 0.6% . أحسب ربح الوسط الفعال.

الحل

من أجل أيجاد ربح الوسط الفعال G، يجب الحصول على عامل الخسائر k.

جميع الخسائر هي 1-k.

$$1-k = 0.006$$

$$k = 0.994$$

باستخدام هذه القيمة في ربح حلقة العتبة:

$$G_{th} = 1 = R_1R_2G_A^{\ 2}\ k$$

$$(G_A)_{th} = \frac{1}{\sqrt{R_1R_2k}} = \frac{1}{\sqrt{0.999 \times 0.95 \times 0.994}} = 1.03$$

يجب أن يكون ربح الوسط الفعال 1.03 على الأقل لخلق الخرج المستمر في هذا الليزر.

ملاحظات :

1. G = ربح الذهاب و الإياب ، يحدد ما إذا كان قدرة خرج الليزر سوف تزيد، تنقص، أو تبقى ثابتة. هذا يشمل كل الخسائر و التكبير و أن الحزمة لها ربح في رحلة ذهاب وإياب كاملة خلال الليزر هو

$$G_L = R_1 R_2 {G_A}^2 k \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

R_1، R_2 = انعكاسية مرايا الليزر.

G_A = ربح الوسط الفعال كنتيجة للانبعاث المحتث

$$G_A = \exp(\gamma L) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

γ معامل الربح.

L طول الوسط الفعال.

k عامل الخسائر البصرية في مسار رحلة الذهاب و الأياب في تجويف الليزر.

$$k = \exp(-2\alpha L) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

α معامل الخسارة

2. عندما G = 1، فأن الليزر يعمل في وضع الحالة المستقرة steady state ، وهذا يعني أن قدرة الخرج ثابتة. هذا هو شرط العتبة الليزرية، و ربح الوسط الفعال هو:

$$(G_A)_{th} = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 k}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

ربح رحلة الذهاب و الأياب هو

$$G_L = R_1 R_2 \exp[2(\gamma - \alpha)L] \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (12)$$