١-٤) مبدأ عمل الليزر Laser Working Principle

إن فكرة عمل (نظرية) الليزر تتعلق بنظام ذو عدد كبير من الذرات والجزيئات الفعالة حيث أن هذه الذرات تسلط عليها طاقة لكي تنتقل من المستوى الأرضي إلي المستويات العليا ويحدث هذا بامتصاص الذرات للطاقة فتقضي الذرات فترة زمنية تسمى زمن الإثارة (الزمن الذي تبقى فيه الذرات في المستويات العليا قبل الرجوع إلى المستوى الأرضي) ثم تنبعث فوتونات، وتتكرر هذه العملية عدة مرات للحصول على عدد كبير من الفوتونات التي تنتقل بين مرآتين إحداهما شبه مفضضة والأخرى عاكسة تماماً فنحصل على ضوء مركز له العديد من الخواص التي تميزه عن أي ضوء آخر. وهذا يعني ان الليزر يحدث نتيجة لعدة عمليات وهي الامتصاص والانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز والتوزيع المعكوس.

قام آينشتاين في عام 1917 بدراسة تفاعل الأمواج الكهرومغناطيسية أو ما يسمى اختصاراً بالإشعاع مع ذرات المادة ووجد أن هناك ثلاثة أنواع من التفاعلات وهي الامتصاص والانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز.

شكل (١-٤): مكونات الذرة

١) الامتصاص Absorption: وفيها تقوم ذرات المادة بامتصاص فوتونات الإشعاع المسلط عليها وتعمل طاقة الإشعاع الممتص على رفع الإلكترونات من مدارات منخفضة الطاقة E_1 إلى مدارات عالية الطاقة E_2 وتصبح الذرات في حالة إثارة، ولا يتم امتصاص الفوتونات من قبل المادة إلا إذا كانت طاقتها تزيد عن فرق الطاقة بين مدارات الإلكترونات لذرات تلك المادة ولذا تكون المواد شفافة لجميع الإشعاعات التي تقل ترددتها عن قيم محددة تتحدد من التركيب الذري لتلك المواد كما هو الحال مع الزجاج.

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}N_1\rho \ldots\ldots\ldots\ldots(1\text{-}1)$$

تمثل (dN_1/dt) معدل الامتصاص و B_{12} هي احتمالية الامتصاص من المستوي E_1 إلى المستوي E_2 وتمثل N_1 تأهيل المستوي E_1 بالذرات، ρ تمثل كثافة الطاقة.

شكل (١-٥): امتصاص الطاقة

٢) **الانبعاث التلقائي Spontaneous Emission:** الانبعاث بصورة عامة هو عملية انتقال (فقدان) الطاقة من المادة إلى المحيط فتقل طاقة ذرات أو جزيئات المادة وتهبط إلى مستويات طاقة أوطأ من الحالة التي كانت فيها.

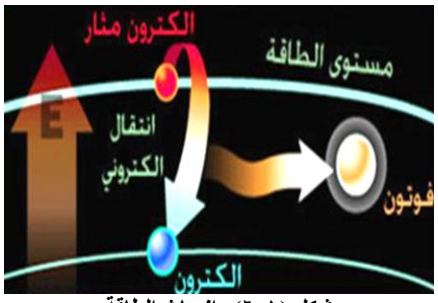
اما في الانبعاث التلقائي تقوم الذرات المثارة بإشعاع موجات كهرومغناطيسية نتيجة نزول الإلكترونات من المدارات عالية الطاقة إلى المدارات منخفضة الطاقة، ويسمى إشعاعاً غير مترابط وذلك لأن الإلكترونات تنزل من تلقاء نفسها وبطريقة عشوائية بين مدارات الذرة المختلفة ويحتوي هذا الإشعاع على عدد كبير جداً من الترددات. وتعتمد مصادر الضوء العادية على ظاهرة الانبعاث التلقائي في عملها. يعطى معدل الانبعاث التلقائي بالمعادلة الآتية:

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 \quad \text{.....(1-2)}$$

حيث ان dN_2/dt تمثل معدل الانبعاث التلقائي و A_{21} هي احتمالية الانبعاث التلقائي من المستوي E_2 إلى المستوي E_1 وتمثل N_2 تأهيل المستوي E_2 بالذرات، ويمكن حساب A_{21} من المعادلة الآتية:

$$A_{21} = \frac{1}{t_{spont}} \quad \text{.....(1-3)}$$

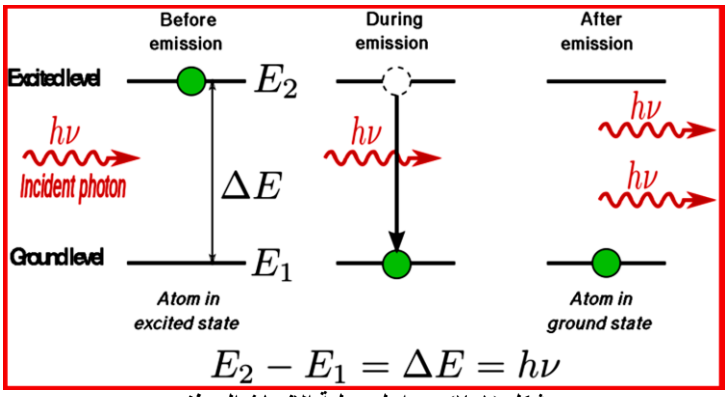
حيث ان t_{spont} يمثل عمر الانبعاث التلقائي وهو الفترة الزمنية التي يستغرقها حدوث الانبعاث التلقائي.



شكل (١-٦): انبعاث الطاقة

٣) **الانبعاث المحفز Stimulated Emission:** هو عملية فقدان الطاقة من المادة على شكل ضوء تحت تأثير خارجي، وهو أساس عمل الليزر. تقوم الذرات المثارة بإشعاع موجات كهرومغناطيسية نتيجة نزول الإلكترونات من المدارات عالية الطاقة إلى المدارات منخفضة الطاقة ولكن ليس بطريقة تلقائية وعشوائية كما في الانبعاث التلقائي بل نتيجة لتحفيزها (حثها) بإشعاع له تردد محدد. إن الإشعاع المحفز الصادر عن المادة المثارة يسمى إشعاع متشاكه وذلك لأن الموجات الكهرومغناطيسية الناتجة عن نزول الإلكترونات لها تردد وطور مساويان تماما لتردد وطور الموجات التي قامت بتحفيز الإلكترونات على الإشعاع ولذلك فإن هذا الإشعاع له تردد υ واحد من الناحية النظرية. ويمكن حساب تردد الإشعاع المنبعث من المادة من خلال تقسيم فرق الطاقة بين المدارين الذي انتقل بينهما الإلكترون على ثابت بلانك h.

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\upsilon \quad \text{.....(1-4)}$$



شكل (١-٧): مراحل عملية الانبعاث المحفز

يعطى معدل الانبعاث المحفز بالمعادلة الآتية:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{stim} = -B_{21}N_2\rho \text{ .....(1-5)}$$

حيث ان $(dN_2/dt)_{stim}$ تمثل معدل الانبعاث المحفز و B_{21} هي احتمالية الانبعاث المحفز من المستوي E_2 إلى المستوي E_1 وتمثل N_2 تأهيل المستوي E_2 بالذرات، ويمكن حساب النسبة $\hat{R}$ ما بين احتمالية الانبعاث التلقائي واحتمالية الانبعاث المحفز من المعادلة الآتية:

$$\hat{R} = e^{h\nu/KT} - 1 \text{ .....(1-6)}$$

حيث ان K يمثل ثابت بولتزمان ويساوي $(1.38\times10^{-23}$ J/K)، T تمثل درجة الحرارة بوحدة الكلفن. يزداد معدل الانبعاث المحفز كلما كان الطول الموجي للأشعة أو الموجة الكهرومغناطيسية طويلاً. لذلك فإن الحصول على الليزر في الأطوال الموجية الطويلة (تحت الحمراء) يكون أسهل من الأطوال الموجية القصيرة (المرئية وفوق البنفسجية). لا يمكن الحصول على الانبعاث المحفز بدون الانبعاث التلقائي حيث يمكن الحصول على فوتون له طاقة مساوية لفرق الطاقة بين مستوي الليزر العلوي ومستوي الليزر السفلي من الانبعاث التلقائي نفسه.

عندما تحدث عمليات الامتصاص والانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز سويةً فيمكن ان يعبر عنها مجموعةً بالمعادلة:

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}N_2\rho - A_{21}N_2 + B_{12}N_1\rho \text{ .....(1-7)}$$

ان كل من احتماليات الامتصاص والانبعاث (B_{12}, B_{21}, A_{21}) تمثل معاملات انيشتاين.

❖ **مثال:** احسب النسبة ما بين الانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز لمصباح تنجستن يعمل بدرجة حرارة (1727 ˚C) حيث أن الضوء المنبعث يكون مرئياً.

الحل: بما أن الضوء المنبعث يكون مرئياً، هذا يعني ان الطول الموجي يقع ما بين (400 – 700 nm) وسنأخذ قيمة متوسطة ما بين القيمتين:

$$\lambda = \frac{400+700}{2} = 550\ nm = 55 \times 10^{-8}\ m$$

$$\upsilon = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^{8}}{55\times10^{-8}} = 5.45 \times 10^{14} Hz$$

$$\hat{R} = exp\left(\frac{6.63\times10^{-34}(J.s)\times5.45\times10^{14}(Hz)}{1.38\times10^{-23}(\frac{J}{K})\times2000(K)}\right) - 1 = 4.85 \times 10^{5}$$

وهذا يعني أن الانبعاث التلقائي اكبر من الانبعاث المحفز، لذلك يكون الانبعاث المحفز في مصباح التنجستن مهملاً.

❖ **مثال:** جد الطول الموجي الذي يتساوى فيه معدل الانبعاث التلقائي مع الانبعاث المحفز في درجة حرارة الغرفة عند شرط التوازن الحراري.

الحل: بما ان ($\hat{R}$=1) و(T=25 ˚C) لذلك فإن:

$$e^{h\upsilon/KT} = 2$$

$$\frac{h\upsilon}{KT} = ln2$$

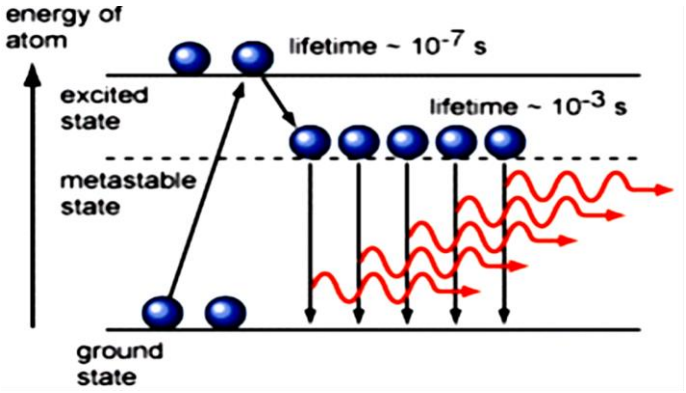
$$\lambda = \frac{c}{\upsilon} = \frac{3\times10^{8}(\frac{m}{s})\times6.36\times10^{-34}(J.s)}{1.38\times10^{-23}(\frac{J}{K})\times298(K)ln2} = 66.9 \times 10^{-6}\ m$$

١-٥) شروط توليد الليزر Laser Generation Conditions

هناك ثلاث شروط اساسية يجب توفرها لتوليد شعاع الليزر وهي:

١) **التوزيع المعكوس (المقلوب) Population Inversion:** اي توفر التأهيل (التوزيع) العكسي للإلكترونات في ذرات المادة التي ستولد الضوء والذي يعني أن عدد الإلكترونات في الحالة المثارة يجب أن يكون أعلى منها في الحالة غير المثارة، وهذا الشرط لا يتحقق إلا في مواد معينة تسمى الوسط الفعال التي يكون عدد المدارات في نطاق توصيلها ثلاثة أو أكثر وبحيث يوجد مدار شبه مستقر (metastable) بين المدار منخفض الطاقة والمدار عالي الطاقة. توجد شروط معينة كي يحدث ضمنها الانبعاث المحفز وهي توازي ما تنبأ به آينشتاين، فلو كان لدينا N ذرة ذات مستويين للطاقة (N_1 وE_1 في الحالة الاساسية و N_2 وE_2 في الحالة المثارة) فإن الانبعاث المحفز يتناسب مع عدد الذرات في المستوى العلوي. وللحصول على إصدار محفز كبير يجب ان يكون $N_2 > N_1$ أي يجب قلب التوزيع للإلكترونات، ويطلق عليه في حالة كون التحفيز خارجي اسم الضخ. يحسب توزيع الذرات والجزيئات بين المستويات من قانون بولتزمان كالآتي:

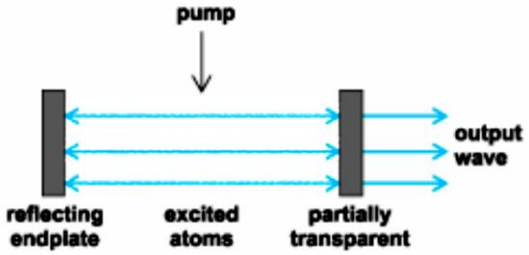
$$\frac{N_2}{N_1} = exp(-\frac{E_1-E_2}{KT}) \text{ .....(1-8)}$$



شكل (١-٨): التوزيع المعكوس

٢) **الضخ Pumping:** الشرط الثاني هو توفر مصدر لضخ الالكترونات من المدارات منخفضة الطاقة (غير المثارة) إلى المدارات عالية الطاقة (المثارة) وذلك للحصول على التوزيع المقلوب للإلكترونات.

٣) **التضخيم Amplification:** الشرط الثالث هو توفر نظام تغذية راجعة موجبة Positive Feedback لكي يعمل الليزر كمذبذب يقوم بتوليد تردد الضوء المطلوب وبالتالي تضخيمه وغالبا ما يتم استخدام المرايا لهذا الغرض. يقوم المرنان بعملية تضخيم و تكبير و تنمية الإشعاع المحفز بطريقة التغذية الخلفية، لأن التضخيم الناتج عن المادة الفعالة لوحده لا يكفي لانبثاق شعاع الليزر منها، كما أن الفوتونات الصادرة عنها تكون متناثرة في كل الاتجاهات، فيقوم المرنان بتجميع الفوتونات الصادرة نتيجة عمليات الانبعاث المحفز المتكررة كما وتجعل الفوتون المولد من خلال هذا الانبعاث ينعكس ليعود و يمر عبر المادة الفعالة و يقوم هو بدوره بانبعاث محفز لفوتون آخر.



شكل (١-٩): التغذية الراجعة الموجبة

وعلى هذا فإن الليزر يعمل من خلال ضخ الإلكترونات باستخدام مصدر ضخ خارجي كالضوء أو التيار الكهربائي من المدار الأدنى إلى المدار الأعلى ومن ثم تهبط الإلكترونات المثارة من خلال الانبعاث التلقائي من المدار الأعلى إلى المدار شبه المستقر والذي يقع بين المدارين الأدنى والأعلى حيث تبدأ الإلكترونات بالتراكم في هذا المدار لتنتج التوزيع المعكوس المطلوب. وإذا مر فوتون ضوئي بتردد محدد على المادة وهي في وضع التوزيع المعكوس فإنه سيحث بعض الإلكترونات الموجودة في المدار شبه المستقر للنزول إلى المدار الأدنى منتجةً عدداً من الفوتونات الضوئية لها نفس تردد وطور واتجاه

الفوتون الذي قام بتحفيزها. وتستخدم المرايا لعكس بعض الفوتونات المتولدة لتمر من خلال ذرات المادة الفعالة لتوليد مزيدا من الفوتونات التي لها نفس الخصائص.

❖ **مثال:** اذا كان فرق الطاقة بين المستويين E_1 و E_2 في وسط معين مساوياً لـ KT، فهل يمكن توليد الليزر؟

الحل:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = KT$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-1}$$

$$N_2 = 0.37 N_1$$

اي انه لن يتوفر شرط التوزيع المعكوس حيث ان $N_1 > N_2$ لذلك لا يمكن توليد الليزر.