

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء

رقم الترتيب:.....  
رقم التسلسل:.....



مذكرة: ماستر أكاديمي

مجال : علوم المادة

فرع : فيزياء

تخصص: فيزياء إشعاعات، كاشف وبصريات إلكترونية

من إعداد الطالبة: زيتوني إكرام

الموضوع:

## نمذجة ليزر الثوليوم في الزجاج

نوقشت يوم: 2017/05/25

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

رئيسا	أستاذ تعليم عالي جامعة ورقلة	عيادي كمال الدين
مناقشا	أستاذ مساعد بجامعة ورقلة	مامانو عبد اللطيف
مقررا مساعدا	أستاذة جامعة ورقلة	بن كريمة يمينة
مقررا	أستاذ محاضر بجامعة ورقلة	عمر بن طويلة

الموسم الجامعي: 2016- 2017

# الإهداء

إلى القدوة الأولى..

إلى من كلله لله بالهيبة والوقار، و علمني العطاء بدون انتظار..

إلى من أحمل اسمه بكل افتخار، أرجو من الله أن يمدّ في عمرك لترى ثماراً قد حان قطافها بعد طول انتظار، وستبقى كلماتك نجوماً

أهتدي بها اليوم و في الغد وإلى الأبد..أبي العزيز..حفظه الله..أسأل الله أن يوفقني لبره..

إلى اللوحة الفنية، المستوحاة من لؤلؤة ربانية..التي لا يجيد رسمها لا بيكاسو ولا ليوناردو دافينشي..

إلى الكلمة التي تحمل في طياتها جُل معاني الحب و الحنان..

إلى من كان دعاؤها سرّ نجاحي و حناها بلسم جراحي، إلى أغلى الأحبة..أمي العزيزة..حفظها الله ..أسأل الله أن يوفقني لبرها..

إلى رياحين حياتي \* إخوتي الغوالي \* وأخص بالذكر نصفي الثاني أختي التوأم إشراق...رعاهم الله ذخرا لي ..

إلى البراعم المفعمة بالبراءة..بلقيس،لوجين،حذيفة، صانكم الله من كل بلاء...

إلى عائلتي الثانية ..كل أسرة أساتذة مدرسة الريحان بورقلة و كل طاقم العاملين عليها و على رأسهم مديرها الأستاذ الحبيب

مشري..طيبهم الله بروح و ريحان و جعلهم من رياحين الجنة.. زاد تألقهم و فعلهم الخيري ..

إلى أستاذي الفاضل \* بن طويلة عمر \* له مني خالص الشناء و الشكر على كل ما قدمه لي في مراحل دراستي...وقفه الله ..

إلى الأخوات الاتي لم تلدهم أمي ..ومن تحلو بالإخاء و تميزوا بالوفاء سُدعت برفقتهم في مشوار الدراسة ..أدامهم الله رونقا

لحياتي..

\*إلى هؤلاء جميعاً أهدي هذا العمل\*

زيتوني

إخاء

## شكر و تقدير

الحمد لله ، أتمّ الحمد وأوقاه .. حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه كما يُحِبُّ ربنا ويرضى ، يارب لك الحمد كما ينبغي لجلال وجهك

وعظيم سلطانك فأنت المعلم الأكرم " الذي علم بالقلم علم الإنسان ما لم يعلم "

و أفضل الصلاة و السلام، الأتمنّ الأكملاّن، على خير الوزي ونبي الهدى، سيدنا وحبيبنا محمد صلى الله عليه وسلم.

أما بعد:

فإن من تمام شكري نعمة الله عليّ ، في هذه المذكرة، يطيب لي أن أتقدم بجزيل الشكر و التقدير إلى يد الإنعام والإكرام ، التي

امتدت إليّ : تعليماً وتفهماً ، تدريساً وتأسيساً، توضيحاً وتصحيحاً، بفضل إشرافه وتوجيهه، في عطاءٍ مبذول وجهدٍ موصولٍ،

وتواضعٍ جم .. إلى مشرفي الدكتور الفاضل: بن طويلة عمر أسأل الله أن يجزيه عني خير الجزاء، وأن يبارك في عمره وعلمه في جميع

الأوقات، مع رفيع الدرجات، في هذه الحياة، وفي روضات الجنات.. وفقه الله ودام تألقه..

كما أعطفُ ببناء الشكران و العرفان ؛ إلى الأستاذ الفاضل الدكتور : بن مبروك لزهري لقبوله تقييم هذا العمل و لرئاسة اللجنة،

زاده الله فيض علم لا يغيض مدداً ولا ينقص أبداً . وفقه الله و دام تألقه..

كما أتقدم بخالص الشكر و التقدير و صادق الامتنان للأستاذ مامانو عبد اللطيف لقبوله مناقشة هذا العمل و تشجّم مشاق

تسديده و توجيهه و تصويبه تحكيماً وتقويماً في بصرٍ و سدادٍ و نصحٍ و إرشادٍ . وفقه الله و دام تألقه..

كما لا يفوتني جزيل الشكر فيما أسجل، و جليل الأجر فيما أسأل، أسدى إليّ النصح و التوجيه ، أخص بالذكر الأستاذة

الفاضلة بن كريمة يمينة أسأل الله أن يبارك في أعمالها و يحقق آمالها و يُفسيح آجالها . وفقه الله ودام تألقها..

كما أتوجه بخالص الشكر العميق والثناء إلى جميع أساتذتنا الأفاضل في جامعة قاصدي مرياح بورقلة وأخص بالذكر كلية

الرياضيات و علوم المادة قسم الفيزياء . و كل من ساندني بدعواته الصادقة، وتمنياته المخلصة ..

"أشكركم جميعاً فجزاكم الله عني خير الجزاء.. و أتمنى من الله عز وجل أن يجعل ذلك في موازين حسناتكم"

الصفحة	فهرس المحتويات
I	الإهداء
II	شكر وتقدير
III	فهرس المحتويات
III	فهرس الأشكال
III	فهرس الجداول
III	الترميز
1	مقدمة عامة
الفصل الأول: عموميات حول الليزر	
3	1.1. مقدمة
4	2.1. نبذة تاريخية
6	3.1. المكونات الأساسية لجهاز الليزر
6	1.3.1. الوسط الفعال (وسط التضخيم)
7	2.3.1. المرنان الليزري
8	3.3.1. مصدر الضوء (تقنيات الضخ)
8	1.3.3.1. تقنية الضخ الضوئي
9	2.3.3.1. تقنية الضخ الكهربائي
9	3.3.3.1. تقنية الضخ الكيميائي
9	4.1. المنظومات الليزرية
11	5.1. شروط الإنبعاث الليزري
11	1.5.1. الإنبعاث المحفّز (الاصدار المحفّز)
13	2.5.1. التعداد المعكوس
13	3.5.1. التضخيم الضوئي
14	6.1. شرط عتبة الليزر
16	7.1. أنواع الليزر
16	1.7.1. ليزرات الحالة الصلبة
16	2.7.1. ليزرات الحالة الغازية
17	3.7.1. ليزرات الحالة السائلة
18	8.1. التعداد المعكوس في إسكان الذرات
19	9.1. علاقات أينشتاين الرياضية
22	10.1. عرض الخط الطيفي (عرض النطاق) الليزري
24	11.1. تطبيقات الليزر (مجالات إستخدام الليزر)

26	12.I. خلاصة
	مراجع الفصل الأول
	الفصل الثاني: الدراسة الطيفية لأيونات العناصر الترابية النادرة
27	1.II. مقدمة
27	2.II. العناصر الترابية النادرة
29	3.II. الثوليوم (thulium)
29	1.2.II. تاريخ الثوليوم (thulium)
29	2.2.II. تعريف عنصر الثوليوم (Tm)
30	1.2.2.II. الخصائص الفيزيائية و الكيميائية لعنصر الثوليوم (Tm)
31	3.II. مطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة
31	1.3.II. التوزيع الإلكتروني للعناصر الترابية النادرة $TR^{+3}$ و لأيوناتها $TR^{+3}$
32	2.3.II. الأعداد الكمية
32	3.3.II. الرموز الطيفية
34	4.3.II. الرموز الطيفية للعناصر الترابية النادرة
36	5.3.II. مستويات الطاقة للعناصر الترابية النادرة
38	4.II. تفاعل أيونات العناصر الترابية النادرة مع الضوء
38	1.4.II. قواعد الإنتقاء
39	2.4.II. الانتقالات الإلكترونية
39	1.2.4.II. الانتقالات الإشعاعية (الآليات الإشعاعية)
44	2.2.4.II. الآليات غير الإشعاعية
46	5.II. المردودية الكمية
46	6.II. نقل الطاقة
49	7.II. خلاصة
	مراجع الفصل الثاني
	الفصل الثالث: نمذجة ليزر الثوليوم في الزجاج
50	1.III. مقدمة
50	2.III. المضيقات
51	3.III. ليزر الثوليوم
51	1.3.III. ليزرات الليف البصري المطعم بالعناصر الترابية النادرة (doped optical fiber lasers (Rare – earth)

51	III.1.1.3. (Thulium – doped optical fiber laser) (TDFL) ليّزر الليف البصري المطعم بالثوليوم
51	III.4. أطوال أمواج الضّخ و الإصدار لأيون الثوليوم
53	III.5. دراسات سابقة
56	III.6. النمذجة العددية لليّزر الثوليوم
56	III.6.1. معادلات التعداد
57	III.6.2. معادلات الاستطاعة
57	III.6.3. معادلات التعداد
59	III.7. الحل العددي لمعادلات انقلاب التعداد
60	III.8. تحديد استطاعة العتبة لحدوث مفعول الليّزر
61	III.9. التغيّر الزمني للفرق في التعداد بدلالة استطاعة الضخ
62	III.10. تغيّر الربح بدلالة استطاعة الضخ
62	III.11. خلاصة
مراجع الفصل الثالث	
63	خلاصة عامة
الملحق	
ملخص	

## فهرس الأشكال

الصفحة	العنوان	رقم الشكل
7	توضع المرآتان (المرنان)	1.I
8	مكونات ليزر الياقوت	2.I
10	نظام ذو ثلاث مستويات طاقة	3.I
11	نظام ذو أربعة مستويات طاقة	4.I
12	إنتقال الإلكترون من $E_1$ إلى $E_2$	5.I
12	إنتقال الإلكترون من $E_2$ إلى $E_1$	6.I
13	التعداد المعكوس	7.I
13	عملية التضخيم الضوئي	8.I
15	شرط عتبة الليزر	9.I
24	(a) منحنى الإنتقال بين مستويات الطاقة $E_1$ و $E_2$ ، (b) منحنى إصدار بين مستويات الطاقة $E_1$ و $E_2$	10.I
28	موقع اللانثانيدات في الجدول الدوري	1.II
37	تحلل مستويات الطاقة تحت تأثير التفاعلات المختلفة	2.II
38	مخطط مستويات الطاقة لأيون الترابي النادر $Tm^{+3}$	3.II
40	الآليات الرئيسية للتفاعل إشعاع- مادة	4.II
40	ظاهرة الامتصاص	5.II
42	ظاهرة الانبعاث التلقائي	6.II
43	ظاهرة الانبعاث المحفّز	7.II
45	الآليات الإشعاعية و غير الإشعاعية	8.II
47	نقل الطاقة الرنيني مع العودة إلى الحالة الأساسية	9.II
47	نقل طاقة رنيني كيني	10.II
48	نقل الطاقة بواسطة الفونونات	11.II
49	عملية التحويل العلوي ل: (أ) فوتونين، (ب) أيونين	12.II
52	مخطط مستويات الطاقة لأيون الثوليوم عند أطوال أمواج الضّخ و الإصدار وفق المرجع	1.III
53	مخطط مستويات الطاقة لأيون الثوليوم عند أطوال أمواج ضّخ مختلفة	2.III
55	مخطط مستويات الطاقة لأيون الثوليوم $Tm^{+3}$	3.III
56	مخطط مستويات الطاقة لأيون الثوليوم $Tm^{+3}$ في زجاج فيليوري	4.III
58	منظومة ليزر ذو ثلاثة مستويات طاقة	5.III
60	تغيّر كثافات التعداد بدلالة الزمن من أجل قيم استطاعة مساوية	6.III

61	التغيّر الزمني للفرق في التعداد بدلالة استطاعة الضخ	6.III
62	التغيّر الزمني للفرق في التعداد بدلالة استطاعة الضخ	7.III



## فهرس الجداول

الصفحة	العنوان	رقم الجدول
32	الأعداد الكمية للإلكترون	1.II
35	الرمز الطيفي للمستوى الأساسي للعناصر الترابية النادرة	2.II
59	قيم الوسائط التي استعملت في برنامج الماتلاب	1.III

## الترميز

الرمز	معناه
E	طاقة المستوى
I	شدة الحزمة الضوئية
L	طول المرنان
$\gamma$	معامل الريح.
	الخسائر الكلية في المنظومة.
R	معامل الإنعكاس.
G	الريح الكلي.
	قيمة التوالد في مستوي الطاقة $E_i$ .
	ثابت بولتزمان.
T	درجة الحرارة.
N	تعداد الفوتونات لوحدة الحجم.
	ثابت أينشتاين للامتصاص.
	كثافة طاقة الفوتونات المسلطة على المنظومة عند التردد $U$ .
	المقطع الفعال للامتصاص.
	المقطع الفعال للاصدار.
F	تدفق الفوتونات.
	ثابت أينشتاين للاصدار المحفّز.
	احتمال الامتصاص.
	احتمال الاصدار المحفّز.
	ثابت أينشتاين للانبعاث التلقائي.
H	ثابت بلانك.
	التردد.
C	سرعة انتشار الضوء في الفراغ.
L	العزم الزاوي المداري الكلي.
S	العزم الزاوي اللفي (المغزلي) الكلي.
J	العزم الحركي الكلي.
$\Psi$	دالة موجية مرتبطة بالذرة.
H	هاملتون التفاعل.
Ze	شحنة النواة

هاملتون الأيون الحر.	
هاملتون التشكيل حسب تقريب "الحقل المركزي" .	
شحنة الإلكترون.	E
كتلة الإلكترون.	$m_e$
تفاعل كولوم بين الإلكترونات في الطبقة.	
التفاعل بين اللف الذاتي والعزم الزاوي المداري لكل إلكترون.	
مُعاملات الازدواج سبين - مدار.	
نسبة التفرع للإنتقال من m إلى j.	
احتمال حدوث استرخاء مُتعدد الفونون.	
احتمال الانتقال.	
الفرق في الطاقة بين مُستويات المرحلة الانتقالية.	
عدد الفونونات.	P
عدد بوز ( Bose ) .	$n(v)$
مدة الحياة الإشعاعية.	
مدة الحياة الغير إشعاعية.	
مدة الحياة المقاسة تجريبيا.	
المردودية.	H
ثوابت موجبة مميزة للشبكة البلورية.	$B , \alpha (v)$
تعداد المستوي رقم 1.	

# خطة العمل

## مقدمة عامة

### القسم الأول: الجزء النظري

الفصل الأول: عموميات حول الليزر

الفصل الثاني: الدراسة الطيفية لأيونات العناصر الترابية النادرة

### القسم الثاني: الجزء التجريبي

الفصل الثالث: نمذجة ليزر الثوليوم في الزجاج

## خاتمة عامة

## مقدمة عامة

الليزر هو عبارة عن شعاع ضوئي يملك العديد من الخصائص التي يختلف بها عن الضوء العادي، حيث أنه يتميز بأعوار قوية مترابطة تتميز بتواتر موحّد إضافة إلى توازي الحزم التي يتكون منها هذا الشعاع فيكون لدينا عندها شعاع قوي يحمل طاقة لا يمكن مقارنتها بالطاقة الضوئية العادية.

هناك العديد من أنواع الليزر التي يمكن إستخدامها في عدة مجالات مثل (مجال الإتصالات) ألا و هي ليزرات الزجاج المطعم بأيونات العناصر الترابية النادرة، حيث أشتهرت هذه الأخيرة بإظهارها إنبعثات محفزة في حالة إضافتها إلى مادة زجاجية أو أي مادة صلبة بلورية و هذا ما يعرف بالتطعيم، و على الرغم من أنها ليست الأيونات الوحيدة التي يمكن استخدامها في الأوساط الفعالة لليزر الصلبة مثل: ليزر الثولوم. ليزرات الزجاج المطعم بأيونات العناصر الترابية النادرة أوسع شهرة نظرا لتميز هذه الأيونات بانتقالات ضوئية على مجال واسع من الأطوال الموجية الذي يمتدّ من الأشعة فوق البنفسجية إلى ما تحت الحمراء، كما أنها تمتلك مستويات طاوية غير مستقرة و التي تسهل إنقلاب التعداد و بالتالي حصول مفعول الليزر. من بين أيونات العناصر الترابية النادرة نجد أيون الثولوم  $Tm^{+3}$  الذي يميّز بالإصدار الليزري عند الطول الموجي  $2\mu m$  و الذي له تطبيقات مهمة في العديد من المجالات: الطبية (الجراحة...)، العسكرية (تتبع مسار الصواريخ و القذائف...).

تمكن الباحثون من تطعيم الألياف الزجاجية ببعض أيونات العناصر الترابية النادرة مثل  $Tm^{+3}$  للحصول على مضخمات ذات كسب مرتفع، كما تمكن من إستعمالها كوسط فعال لإنتاج ليزرات الليف البصري، و من هذه الليزر ليزر الليف البصري المطعم بالثولوم (TDFL).

الهدف من هذا العمل هو نمذجة ليزر الثولوم في الزجاج و نأخذ ليزر الليف البصري المطعم بالثولوم (TDFL) كمثال نُقيم عليه دراستنا هذه، وذلك من خلال الحل العددي للمعادلات التفاضلية الواصفة لتعداد المستويات الطاقوية لأيون الثولوم. قسمت هذه المذكرة إلى ثلاثة فصول و هي:

نتطرق في الفصل الأول الذي بعنوان: "عموميات حول الليزر" إلى دراسة نظرية لفيزياء الليزر و أنواعه و تطبيقاته المختلفة. نقوم في الفصل الثاني المعنون ب: "الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة"، و فيه نسلط الضوء على أحد العناصر الترابية النادرة و هو عنصر الثولوم حيث نُحدد من خلاله توزيعه الإلكتروني و من ثم رموزه الطيفية، و بعدها تحديد مستويات طاقته.

أما الفصل الثالث فسيشتمل جوهر الموضوع و الذي بعنوان: "نمذجة ليزر الثوليوم في الزجاج"، هذه النمذجة تتم بالحل العددي لمعادلات تعداد المستويات الطاقوية لأيون الثوليوم و ذلك بإستعمال برنامج الماتلاب، لإستخراج النتائج المطلوبة و من ثم مناقشتها.

ختمنا كل ذلك بملخصة أوجزنا فيها أهم النتائج التي تحصلنا عليها مع تقديم بعض الأفاق المستقبلية لمواصلة البحث في هذا الموضوع.

# الفصل الأول

عموميات حول الليزر

## 1.1 المقدمة

الليزر، و هو نوع من أنواع الضوء، يمتلك العديد من المميزات التي جعلته منذ اكتشافه في عام 1960 يدخل في الكثير من تطبيقات التكنولوجيات الجديدة. هناك عدة أنواع من أجهزة الليزر المتاحة اليوم و التي تعمل على أطوال موجية مختلفة وتستخدم في العديد من المجالات، مثل نقل المعلومات (الاتصالات عبر الألياف الضوئية ، ... )، و الطب (طب العيون، طب الأسنان ... )، و الصناعة (لحام وقطع المواد، و المعالجة السطحية،...)، فعلى سبيل المثال، ترتبط تطورات الإنترنت الحالية بقوة مع تطور تكنولوجيا الليزر، فضلا عن مختلف وسائط الاتصال، مثل أجهزة الكمبيوتر، أجهزة العرض، الهواتف المحمولة، و الألواح الإلكترونية... الخ.

الليزرات هي أجهزة تُولد أو تُضخَّم الشعاعات ذات الترددات الواقعة في المجال تحت الأحمر (Infrared) أو فوق البنفسجي (ultraviolet) من الأمواج الكهرومغناطيسية [1]. فكلمة ليزر (Laser) هي لفظة مُشتقة من الأحرف الأولى لفكرة عمل الليزر، و هي اختصار للجمله التالية:

### “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”

و التي تعني "تضخيم الضوء بواسطة انبعاث الإشعاع المحفَّز"، و هو عبارة عن حزمة ضوئية مُركزة و منتظمة ذات فوتونات تَشترك في تردددها و تتطابق بحيث تُحدث التداخل البناء بين موجاتها لتتحول إلى نبضة ضوئية ذات طاقة عالية نسبياً، و شديدة التماسك زمانياً و مكانياً ذات زاوية انقراج صغيرة جداً، كما له خصائص مُميزة لا توجد في الضوء ال ذي تُصدره بقية المصادر الضوئية الأخرى و لعلَّ أهمها [2]:

- **الاتجاهية:** هي سمة من سمات ضوء الليزر، حيث يملك هذا الأخير حزم ضوئية مُتوازية تنتشر جميعها في اتجاه واحد، و يكون بذلك التشتت معدوماً، مما يجعلها تنتقل لمسافات بعيدة جداً مع فقدان طفيف للطاقة، بينما الضوء يملك حُزماً تتباعد كلما ابتعدنا عن المصدر، حيث أنَّ جميع المصادر العادية للضوء تُصدر الضوء في جميع الاتجاهات، مما يسبب فقدان في طاقته.



- **أحادية اللون:** إنَّ ضوء الليزر هو ضوء أحادي اللون، لأن جميع موجاته لها التواتر نفسه تقريبا ضمن مجال طيفي ضيق جداً، مما يسبب إصدار ضوء على درجة عالية من النقاء الطيفي و هذا يُعطي لون محدد لضوء الليزر
  - **الشدة:** يتميز شعاع الليزر بشدة عالية و مركزة في حزمة ذات قطر ضيق يبلغ تقريبا 1مليمتر و يمكن تعريضها أو تركيزها في بقعة صغيرة باستخدام بعض الأجهزة البصرية مثل (العدسات).
  - **ترابط الأشعة:** أي أنَّ الفوتونات كلَّها في نفس الطور، مما يجعل شدة ضوء الليزر كبيرة فلا تُلاشي الفوتونات الضوئية بعضها البعض نتيجة لاختلاف الطور بينها.
- سوف نتطرق في هذا الفصل إلى دراسة عامة حول الليزر، و التي تعد أساسيات فيزياء الليزر، حيث لا بد من معرفتها قبل الخوض في موضوع نمذجة ليزر التوليم في الزجاج.

## 2.I. نبذة تاريخية

في عام (1908) أعلن العالم الفيزيائي ألبرت آينشتاين (Albert Einstein) عن نظرية "كمية الضوء" التي شكلت الأساس لتطوير تكنولوجيا الليزر، حيث قام بدراسة التفاعلات بين الإشعاعات الكهرومغناطيسية و ذرات المادة، و تنبأ بأنَّ الإلكترونات تستطيع أن تُطلق نوعاً خاصاً من الضوء، و الذي عُرف بنظرية الليزر التي ظهرت في بدايات القرن الميلادي الماضي بإسهامات آينشتاين العلمية فكان هو أول من أشار لوجود الليزر في عام (1917) و وضع الأساس النظري لعملية الانبعاث المحفَّز (stimulated emission) [3-4].

و في عام (1940) اقترح العالم السوفييتي فابريكانت (Fabrikant) تضخيم الأشعة عن طريق السيزيوم [3]. كما تمكن الفيزيائي الأمريكي ويلييس لامب (Willis Lamb) (1947) عمليا من إثبات وجود ظاهرة الإصدار المحفَّز (Stimulated Emission) و التي تُعتبر شرطا أساسياً للحصول على أشعة الليزر [3].

و في عام (1954) تمكن الفيزيائي الأمريكي تشارلز تاونس (Charles H. Townes) و جماعته من تضخيم أشعة الميكروويف (microwave) باستخدام الانبعاث المحفز، فقد اختار الترددات المعتمَد استخدامهما في الرادارات، حيث حصل على شعاع الميزر (Maser) و ذلك في مختبرات "بيل"، و هو اختصاراً للأحرف الأولى للكلمات التالية:

“Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation”

و التي تعني "تضخيم الموجات الدقيقة باستخدام انبعاث الإشعاع المحفّز"، و قد كان الهدف الأساس من بناء جهاز الميزر هو استخدامه كمكبر قليل الضوضاء و كمولد إشارة عالي الدقة، و فيما بعد تم تطوير الميزر من خلال دراسات تمت على الضوء المرئي و الأشعة تحت الحمراء، و قد تم إطلاق كلمة الليزر على أول جهاز لتضخيم الضوء المرئي و غير المرئي [4].

كما تمكّن كل من العالمين الفيزيائيين باسوف وبروكوروف (Prokhorov and Basov) (1957) من تصميم ميزرات أخرى مُعتمدين على ظاهرة الضخ البصري، و تم استخدام هذه الميزرات تطبيقياً في علم الفلك الراديوي و في أجهزة الرادارات [4]. بينما في عام (1958) تمكّن كل من العالم تاونس (Townes) الذي كان له شرف الأسبقية في بناء جهاز الميزر و العالم سكارلو (Schawlow) من بناء أسس فكرة الليزر باستخدام وسط فعال بين مرآتين عاكستين، إلا أنّ هذين العالمين لم يتمكنوا من بناء جهاز ليزر مُتكامل وذلك لعدم قدرتهما على اختيار المادة الفعّالة ووسائل الضخ المناسبة للحصول على الليزر [4,2]. كما أنّ في سنة (1960)، ومن مختبرات بحوث هيوز للولايات المتحدة الأمريكية، انطلق أول شعاع ليزر في العالم من الجهاز الذي صمّمه ميمان (maiman) حيث استخدم بلورة الياقوت الصّلبة كوسطٍ فعالٍ و تُغطّي الفضة طرفي هذه البلورة عليها ضوء غامر من مصباح أنبوبي زجاجي يُحيط بها في هيّج ذراتها، لينبعث منها و ميض فينتشر إلى طرفيها ليصطدم بالفضة التي عكّسته كالمرآة فترتّ ذهاباً و إياباً، فيتهدد قوته و تركيزه، و ينطلق بذلك شعاع لامع من الضوء الأحمر. وقبل نهاية عام (1960) تمكن الفيزيائي الإيراني علي جافان (Ali Gavan) و الأمريكي وليام بينيت (William Bennett) في مختبرات بيل من إنجاز و تشغيل ليزر الهليوم - النيون (He-Ne) الغازي، فأعطى إشعاعاً مُستمرّاً و ليس نبضياً كما هو الحال في ليزر الياقوت [4].

في عام (1962) تمكن المهندس الأمريكي روبرت هول (Robert Hall) من تصنيع ليزر أشباه الموصلات

(Semiconductors laser) الذي يتميز بصغر حجمه [2-3]. و في عام (1963) لحقها ابتكار ليزرات سائلة

وليزرات كيماوية [4].

### 3.I. المكونات الأساسية لجهاز الليزر

جهاز الليزر عبارة عن مصدر للضوء، يعمل على تجميع و تركيز و تقوية الإشعاعات الضوئية، التي تتولد داخل الجهاز، على شكل حزمة ضوئية رقيقة جداً في اتجاه واحد مركّز، كما تستطيع قطع مسافات لانهائية في خط مستقيم ، و تتميز بازدتدج شدتها، ويقوي بعضها البعض عند الانطلاق[5]. كما يُمكننا تكوين ليزر باستخدام أجهزة معينة تحوي عدّة عناصر أساسية وهي:

#### 1.3.I. الوسط الفعّال (وسط التضخيم)

يحتوي هذا الوسط على المادة التي تكون إمّا في الحالة الصلبة أو السائلة أو الغازية، و تحتوي هذه المادة على الذرات أو الجزيئات التي يكون لها مخطط مستويات طاقة مناسبة، بحيث توجد حالة شبه مُستقرة توافق انتقالاً مسموحاً بين مسويين طاقيين و لكنه بطيء مقارنة مع الانتقالات الأخرى، و هذا يُتيح تجميع عدد كبير من الذرات المثارة في تلك الحالة مُحَقَّقة توزيعاً معكوساً في الإسكان و مُناسبا للإصدار المحفز[3-4].

- **المادة الفعالة في الحالة الصلبة:** تتكون من زجاج أو من مادة بلورية مُضيفه، و التي تُطعم بأيونات مثل: أيونات النودميوم (Nd) أو الأربيوم (Er) أو الثوليوم (Tm) أو أيونات أخرى. و مُعظم المواد التي يتم تطعيم البلورات بها هي مواد من العناصر الترابية النادرة، فنجد البلورات الصلبة مثل (الياقوت الصناعي و عقيق الألمنيوم)[2-3].
- **المادة الفعالة في الحالة السائلة:** كالأصبغ العضوية التي هي عبارة عن صبغات كيميائية مُذابة في الماء و من أشهر أنواع الصبغات المستخدمة هو الرودمين (Rhodamin)[2].
- **المادة الفعالة في الحالة الغازية:** هي عبارة عن خليط من غاز ثاني أكسيد الكربون و الهيليوم و النتروجين، [2،4].
- **المادة الفعالة عبارة عن مواد نصف ناقلة Semiconductors** مثل أرسنيك الجاليوم [3].  
(Ga-As)

### 2.3.I. المرنان الليزري

يعتبر المرنان الليزري من المكونات الأساسية لأجهزة الليزر و يتكون من مرآتين مُتقابلتين، بحيث تكون مُستويتان أو مُقعرتان وموضوعتان على التوازي، لِيُزود الليزر بتغذية ضوئية خلفية و يتم وضع المادة الفعالة بين هاتين المرآتين كما يجب التأكد من تحقق شرط التوازي بشكل دقيق، لأنَّ أيَّ إخلال في هذا الشرط يقلل من طاقة أشعة الليزر، فيقوم المرنان بعكس الفوتونات المتولدة في الوسط لتنعكس ملايين المرات في الثانية ذهاباً و إياباً بين المرآتين، ماراً في كل جولة خلال الوسط الفعّال لتحفيز أعداد كبيرة من الذرات المثارة لكي تبعث هذه الأخيرة فوتونات جديدة أخرى للحصول على حزمة ليزرية [5]، و في العادة يُستخدم إمّا:

**\*المرنان الخارجي:** و هو مرآتان مُتوازيتان في نهاية الأنبوب الحاوي للمادة الفعّالة، و تكون الانعكاسات المتعددة بينهما هي الأساس في عملية التضخيم الضوئي كما في الليزر الغازية [2].

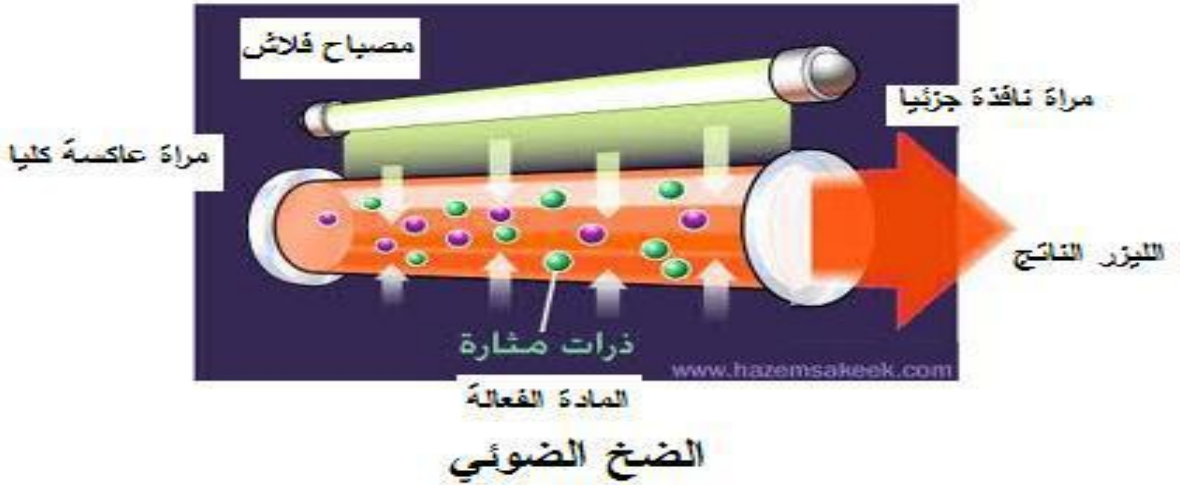
**\*المرنان الداخلي:** و يتمثل في طلاء نهايات المادة الفعّالة لتعمل عمل المرآة، و عادة تكون إحدى النهايات عبارة عن عدسة سطحها الداخلي مطلي بمادة عاكسة جزئياً فخرج الليزر من خلالها ، و في كلتا الحالتين يجب أن تكون إحدى المرآتين عاكسة كلياً للفوتونات الضوئية بنسبة 100 % و الأخرى نافذة جزئياً حيث تتراوح نفاذيتها من (1% إلى 99 %) لكي يتسنى لشعاع الليزر الخروج خارج المرنان [4] .



الشكل (1.I): توضع المرآتان (المرنان) [5]

### 3.3.I. مصدر الضوء (تقنيات الضخ)

يتم تحقيق إثارة الذرات المستقرة في الوسط الفعال بتقدم طاقة ضاخّة لتنتقل إلى المستويات المثيجه و يتحقق بذلك التوزيع العكسي المناسب الذي يضمن توليد الليزر. و هناك ثلاث تقنيات للضخ و هي: تقنية الضخ الضوئي و الضخ الكهربائي و الضخ الكيميائي [5].



الشكل (2.1): مكونات ليزر الياقوت [2].

### 1.3.3.I. تقنية الضخ الضوئي

تُستخدم تقنية الضخ الضوئي في الليزر الصلبة (كليزر الياقوت و ليزر الثوليوم) أو الليزر السائلة مثل (ليزر الصبغة) و يُستخدم في هذه التقنية مصابيح و مبيضة شدة استضاءتها تكون عالية لإثارة الوسط الفعال، حيث أنّ جدران المصابيح الوميضية تُصنع من مادة الكوارتز و تملأ بغازات معينة كغاز الزينون والنتروجين و النيون، و يُستخدم الضخ الضوئي للحصول على ليزرات تقع ضمن المنطقة المرئية أو تحت الحمراء القريبة من الطيف الكهرومغناطيسي، كما توجد تقنية أخرى للضخ الضوئي حيث يُستخدم فيها شعاع ليزر مُعين ليقوم هذا الشعاع بضخ الوسط الفعال لتحقيق التوزيع العكسي و الحصول على ليزر ذي طول موجي يختلف عن الطول الموجي لشعاع الليزر الضاخ [1،5].

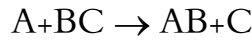
**2.3.3.I. تقنية الضخ الكهربائي**

تُستخدم تقنية الضخ الكهربائي لإثارة ذرات أو جزيئات الوسط الفعّال لتحقيق التوزيع العكسي، و يكون الوسط الفعّال عبارة عن غاز أو خليط من الغازات يُوضع داخل أنبوبة التفريغ الكهربائي، حيث يوجد في طرفي هذه الأنبوبة قطبين كهربائيين أحدهما يمثل الأنود و الآخر يُمثل الكاثود. فعند غلق الدارة الكهربائية تنتقل الإلكترونات خلال الخليط الغازي من الكاثود إلى الأنود، حيث تصطدم هذه الإلكترونات بذرات أو جزيئات الغاز مما يؤدي إلى إثارتها و انتقالها من المستوى المستقر إلى المستويات المثيعة الليزرية و بالتالي الحصول على شعاع ليزر. و يقتصر الضخ الكهربائي فقط على الليزر الغازية و ليزرات أشباه الموصلات [5-6].

**3.3.3.I. تقنية الضخ الكيميائي**

عند تفاعل أي مادتين كيميائيتين تنتج مادة جديدة و التي تكون في حالة تهيّج، و يُمكن تمثيل هذا التفاعل بالمعادلة

التالية:



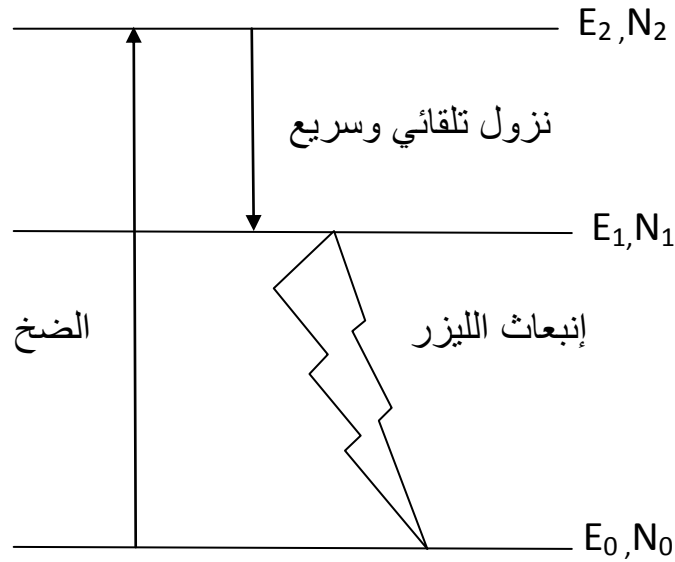
حيث أنّ هذه الطاقة المتحررة نتيجة هذا التفاعل سُمّكن الجزيئة الجديدة  $AB$  أو الذرة المتحررة  $C$  من أن تكون في حالة اهتزاز و تهيّج، و هذه الحالة المثيعة الناتجة عن هذا التفاعل الكيميائي من شأنها أن تحدث التوزيع العكسي في الذرات أو الجزيئات للحصول على الليزر [4].

**4.I. المنظومات الليزرية**

يُمكن تصنيف المنظومات الليزرية نسبة إلى مستويات طاقة الوسط الفعّال، إلى منظومتين و هما:

\*منظومة ثلاثية المستوى

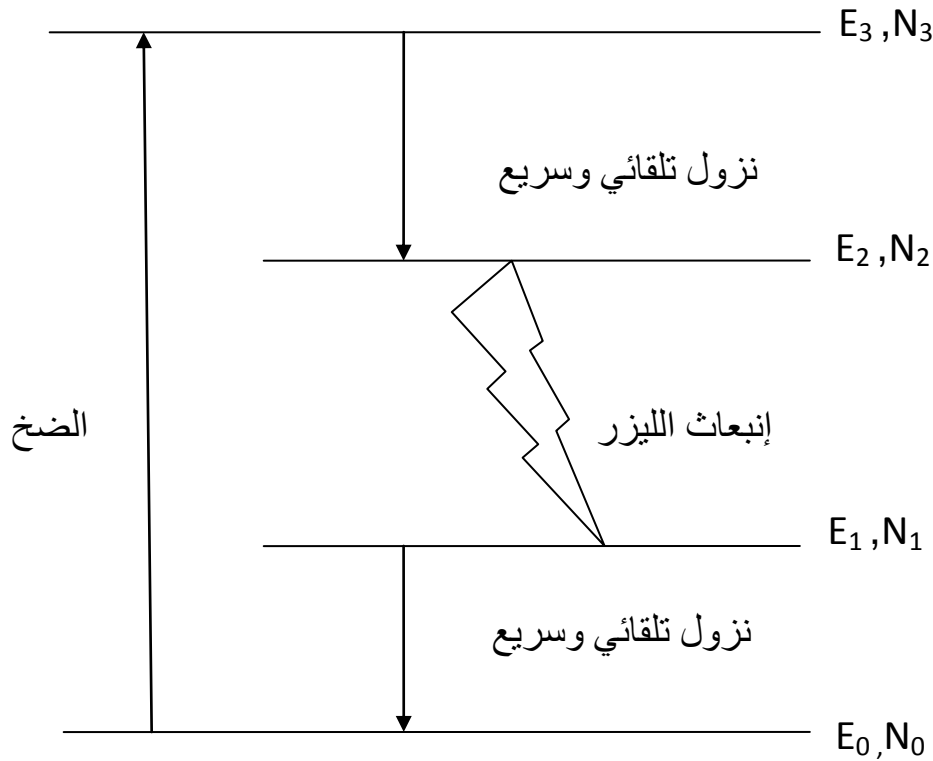
يعتمد توليد الليزر في المنظومة ثلاثية المستوى على انتقال ذرات الوسط الفعّال بين ثلاثة مستويات للطاقة، المستوى الأرضي الذي يمثل المستوى الليزري السفلي و المستوى المتهيج الذي يُمثل المستوى الليزري العلوي و المستوى الشبه مُستقر. فعندما تكون مُعظم الذرات موجودة في المستوى المُستقر  $E_0$ ، يعني ذلك أنّ الوسط الفعّال في حالة استقرار، أما عند تهيجه بواسطة إحدى طرق الضخ المناسبة، فإنّ هذه الذرات تنتقل إلى المستوى المتهيج  $E_2$ ، و لضمان توليد الليزر ينبغي أن تكون طاقة الضخ كافية لتحقيق التوزيع المعكوس، لكن سرعان ما تنتقل بشكل تلقائي و سريع جداً إلى حالة الاستقرار (المستوى  $E_1$ ) و يتحول فرق الطاقة بين المستوى  $E_1$  و  $E_2$  إلى طاقة حرارية فتبقى فترة زمنية أطول في المستوى  $E_1$  و ذلك لطول فترة حياة المستوى  $E_1$  و يكون عدد الذرات في المستوى  $N_1$  أكبر من عدد الذرات في المستوى  $N_2$ ، بينما إذا كان عدد الذرات في المستوى  $N_1$  أكبر من نصف عدد الذرات الكلي في الوسط الفعّال يكون بذلك قد تحقّق التوزيع المعكوس، و تكون الذرات مُهيأة لحدوث الإنبعاثات المحرّضة و بالتالي تبعث فوتونات ذات تردد و طور و اتجاه واحد و التي تُمثل شعاع الليزر بين المستويين ( $E_0$  و  $E_1$ ) [4-6].



الشكل (3.1): نظام ذو ثلاث مستويات طاقة.

### \* منظومة رباعية المستوى

تتميز المنظومة رباعية المستوى بسهولة الحصول على التوزيع العكسي باستعمال طاقة ضخ قليلة مقارنة بالمنظومة ثلاثية المستوى، و يعود سبب ذلك إلى وجود مُستوى إضافي  $E_1$  في هذه المنظومة و يكون فارغاً في أغلب الأحيان، حيث يقع فوق المستوى المستقر  $E_0$  مباشرة. فعند إثارة المادة الفعّالة تنتقل الذرات إلى مُستوى الطاقة  $E_3$  و سرعان ما تنزل هذه الذرات تلقائياً إلى المستوى  $E_2$  و بمقارنة هذا الأخير مع المستوى  $E_1$  يتحقق التوزيع العكسي، و عند انتقال الذرات الموجودة في المستوى  $E_2$  إلى المستوى  $E_1$  تنبعث فوتونات الليزر، لكن سرعان ما تهبط هذه الذرات تلقائياً من المستوى  $E_1$  إلى مستوى الاستقرار  $E_0$  [6-4].



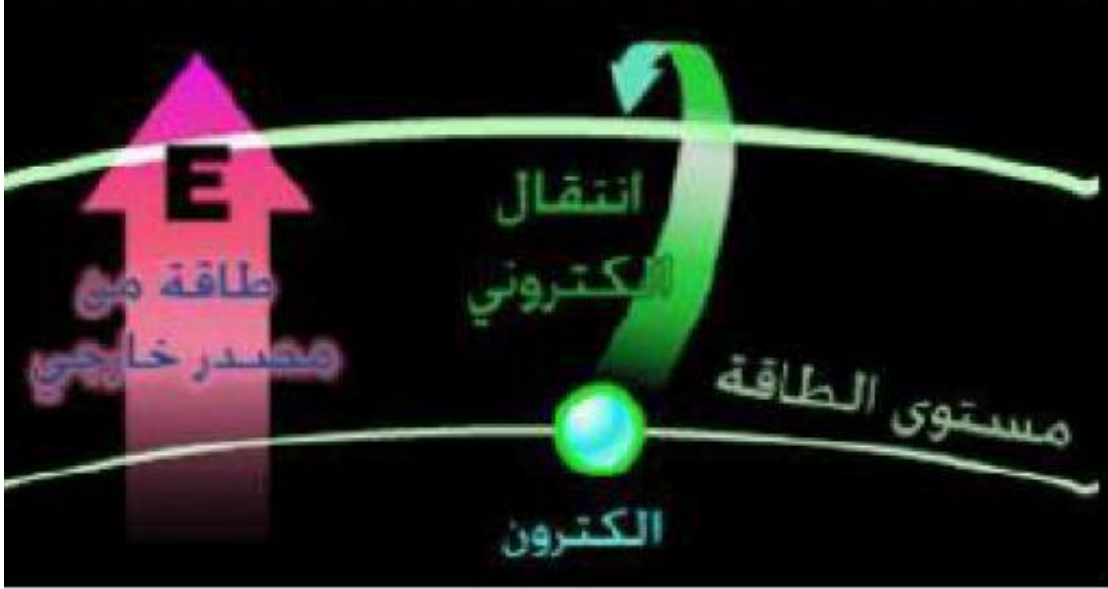
الشكل (4.I): نظام ذو أربع مُستويات طاقة.

### 5.I. شروط الانبعاث الليزري

#### 1.5.I. الانبعاث المُحفّز (الاصدار المُحفّز)



مُعظَم الذرات في الظروف الطبيعية تكون إلكتروناتها في مُستوى طاقة مُنخفض، حيث تكون مُستقرة و لكن بعضها يكون في حالة تهيح أي أنّ إلكتروناتها في مُستوى طاقة أعلى، فتقوم هذه الذرات بالتخلص من الطاقة الزائدة لتعود إلكتروناتها إلى المستوى المنخفض و تُرسل الطاقة على شكل فوتونات مُبعثرة و غير مُترابطة، كما أنّها قليلة جداً بسبب قلة عدد الذرات المثيجة [2-3]



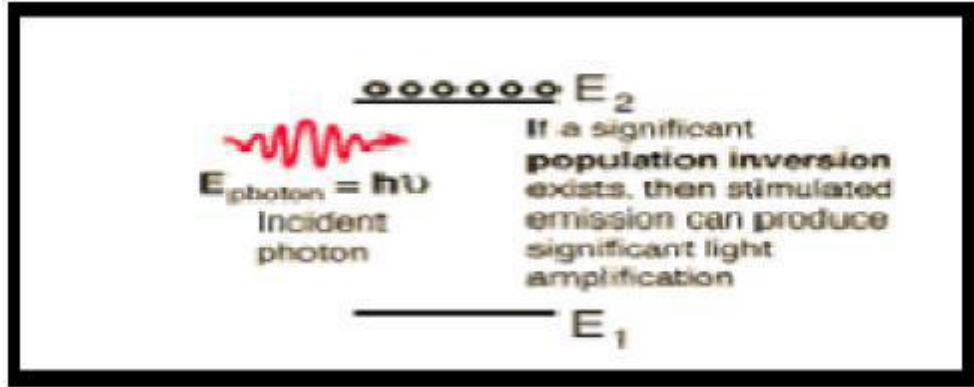
الشكل (5.I): انتقال الإلكترون من  $E_1$  إلى  $E_2$  [2].



الشكل (6.I): انتقال الإلكترون من  $E_2$  إلى  $E_1$  [2].

### 2.5.I. التعداد المعكوس

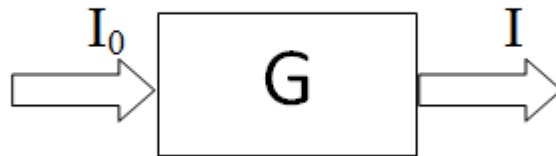
من أجل انبعاث أشعة ليزر يتطلب عدد كبير من الفوتونات و يتحقق ذلك بزيادة عدد الذرات المثيجة من خلال مصدر طاقة خارجي، حيث يُصبح عدد الذرات المثيجة أكبر من عدد الذرات المستقرة فنستطيع القول بأنه حصل انقلاب في التعداد و هو ما يُسمى بالتعداد المعكوس [2].



الشكل (7.I): التعداد المعكوس [2].

### 3.5.I. التضخيم الضوئي

عندما تُعطي مجموعة من الذرات طاقة لتُصبح في وضع التهيج فإن انبعاث فوتون من أحد هذه الذرات بسبب عودة إلكتروناتها إلى مُستوى الطاقة الأرضي سيعطي هذا الأخير طاقة للذرات الأخرى فتنتقل إلكتروناتها إلى مُستوى طاقة أعلى، فتُصدر بذلك فوتونات أخرى للتخلص من هذه الطاقة فيزيد عدد الفوتونات الناتجة بشكل كبير [2-3].



الشكل (8.I): عملية التضخيم الضوئي.

## 6.1. شرط عتبة الليزر

يُعرف شرط العتبة بأنه الحالة التي يستقر فيها تذبذب الفوتونات ويتعادل ربح الوسط الفعّال ( و هو الزيادة في شدة الضوء خلال مروره في الوسط الليزري) مع خسائر المرنان، و لضمان توليد الليزر يجب أن يكون التوزيع العكسي بدرجة كافية بحيث يُصبح ربح الوسط الفعّال أكبر من جميع خسائر المرنان، و فيما يلي أهم الخسائر التي تحدث في منظومة الليزر [3-6]:

- 1) الخسائر الناجمة من الظواهر الفيزيائية في المرايا كالنفوذية و الحيود و الامتصاص واستطارة لبعض الفوتونات (أي ضياعها)، إذ لا تكون المرايا المستخدمة مثالية مهما بلغت مراحل تصميمها و تصنيعها من الدقة [4].
- 2) حدوث امتصاص في الوسط الفعّال بسبب وجود مُستويات طاقة إضافية مع المستويات الليزرية المختارة في ذرات و جزيئات الوسط الفعّال، إذ لا يوجد هناك نظام مثالي مكوّن من ثلاثة أو أربعة مُستويات فقط [5].
- 3) الخسائر الناجمة من التشتت التي تحدث داخل الوسط الفعّال، بسبب عدم التجانس البصري إذ لا يُمكن الحصول على وسط خالي من العيوب و يُمكن ملاحظة هذه الخسائر في الليزر الصلبة أكثر من بقية أنواع الليزر [5].
- 4) إنّ انبعاث الفوتونات في الوسط الفعّال باتجاهات مختلفة يؤدي إلى الاستفادة فقط من الفوتونات التي تسير في اتجاه أفقي على امتداد المادة الفعّالة، لغرض السهولة يُمكن التعبير عن مُجمل الخسائر الناجمة عن منظومة الليزر باستثناء خسائر نفوذية المرآة الأمامية الخاصة بخرج الليزر بمعامل واحد (  $\gamma$  ) و يُمكن إيجاد شرط العتبة و ذلك بدراسة تغير شدة الإشعاع داخل المرنان خلال دورة كاملة، عند انتقال حزمة الضوء الابتدائية من المرآة الأمامية إلى الخلفية تزداد شدة الحزمة من  $I_0$  إلى  $I$  كما في المعادلة التالية [5]:

$$I = I_0 e^{(\gamma-\alpha)L} \quad (1.1)$$

حيث:

$L$ : يمثل طول المرنان.

$\gamma$ : معامل الربح.

$\alpha$ : الخسائر الكلية في المنظومة.

و عند سقوط الحزمة الضوئية على المرآة الخلفية التي معامل انعكاسها يُساوي  $R_2$  فإن شدة الحزمة سَتُصبح كما يلي:

$$I = I_0 R_2 e^{(\gamma-\alpha)L} \quad (2.1)$$

و بعد رجوع الحزمة وسقوطها على المرآة الأمامية التي مُعامل انعكاسها  $R_1$  تكون الحزمة الضوئية قد أكملت دورة كاملة و تُصبح

الشدة النهائية للضوء كما يلي:

$$I = I_0 R_1 R_2 e^{2(\gamma-\alpha)L} \quad (3.I)$$

و يُعبر عن الريح الكليّ الحاصل في المنظومة الليزرية، خلال دورة كاملة بالمعادلة التالية:

$$G = \frac{\text{الشدة النهائية للضوء}}{\text{الشدة الابتدائية للضوء}} = \frac{I_0 R_1 R_2 e^{2(\gamma-\alpha)L}}{I_0} \quad (4.I)$$

$$G = R_1 R_2 e^{2(\gamma-\alpha)L} \quad (5.I)$$

فإذا كانت قيمة الريح الكليّ  $G$  خلال دورة واحدة تُساوي واحدا فإن عملية التذبذب سوف تستمر، بحيث يُمكن الحصول على

شعاع الليزر، أما إذا كان ( $G < 1$ ) فإن التذبذب سوف يتلاشى و يضمحل الشعاع بحيث يتعذر الحصول على الليزر، لذا

يمكن اعتبار ( $G = 1$ ) شرطاً للعتبة كما يلي:

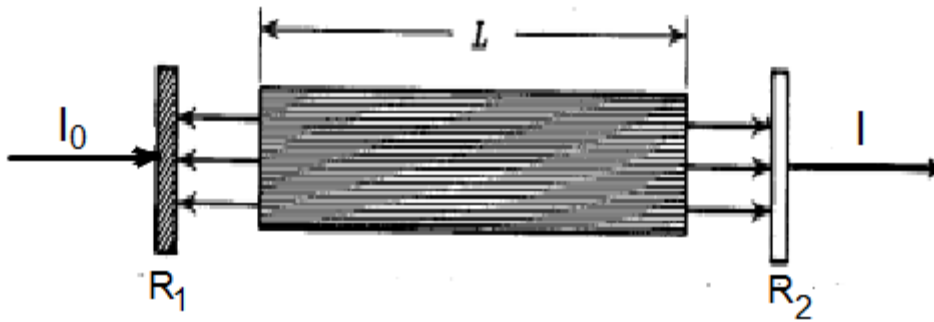
$$G = R_1 R_2 e^{2(\gamma_{th}-\alpha)L} = 1 \quad (6.I)$$

$$\gamma_{th} = \alpha + \frac{1}{2L} \text{Ln} \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (7.I)$$

فلحد الأول من هذه المعادلة يُمثل الخسائر الكليّة في المنظومة ( $\alpha$ ) بينما يُمثل الحد الثاني منها الخرج الليزري، كما يُلاحظ أنّ الريح

الكليّ خلال دورة كاملة يعتمد أسياً على ربح الوسط الفعّال ( $\gamma$ ) الذي بدوره يعتمد على الانعكاس السكاني و نوع الوسط

الفعّال المستخدم.



الشكل (9.I): شرط عتبة الليزر [6].

## 7.I. أنواع الليزر

هناك أنواع مختلفة من أشعة الليزر، تختلف في طولها الموجي، و بالتالي حتما في بعض خواصها، و أهم أنواع الليزر المعروفة حتى الآن هي:

### 1.7.I. ليزرات الحالة الصلبة

يُقصد بليزر المواد الصلبة عادة هي تلك الليزر التي تكون فيها المواد الفعالة عبارة عن أيونات شائبة داخل بلورات أيونية. و الأيون يكون عادة أحد العناصر الانتقالية من الجدول الدوري ( مثل أيونات الفلز الانتقالي و من أبرزها  $Cr^{3+}$  أو أيونات العناصر الترابية النادرة و من أبرزها  $Tm^{3+}$  )، حيث تتميز هذه الليزر بقدرات خرج عالية و تكون أطوالها الموجية في منطقة تحت الحمراء [1].

يتكون ليزر الحالة الصلبة من الوسط الفعال و مصدر الضخ:

#### ○ الوسط الفعال

هو عبارة عن بلورة من مادة صلبة يتم إدخال أيونات فعالة فيها لغرض توليد الليزر، و من أكثر بلورات الليزر الشائعة هي الياقوت (Ruby) و النيديميوم-ياك (Nd:YAG) و النيديميوم-زجاج (Nd:Glass) و الألكسندرايت (Alexandrite) و التيتانيوم-زفير (Ti:Sapphire) كما يعتبر ليزر أشباه الموصلات من ليزرات الحالة الصلبة و لكنه لا يستخدم بلورة و إنما تراكيب من أشباه الموصلات و يتم ضخها بواسطة التيار الكهربائي [7].

#### ○ مصدر الضخ

يُستخدم في الغالب المصباح الوميضي (Flash Lamp) إذ يتم تسليط جهد كهربائي بين طرفي المصباح الوميضي فينتج أشعة ضوئية تمتصها بلورة الوسط الفعال لتتهيج و يُمكن أن يتم ضخ بلورة الوسط الفعال باستخدام شعاع ليزر آخر مثل ليزر أشباه الموصلات. هذه الطريقة تكون ذات كفاءة أعلى من طريقة الضخ بالمصباح الوميضي [7].

### 2.7.I. ليزرات الحالة الغازية

يتراوح مدى طول موجة ليزرات الحالة الغازية بين الأشعة فوق البنفسجية و الضوء المرئي و الأشعة تحت الحمراء.

فلليزر الغازي يتكون من الوسط الفعال و مصدر الضخ [3,7]:

### ○ الوسط الفعّال

هو عبارة عن أنبوب من الزجاج أو السيراميك يحتوي على غاز واحد مثل: ليزرات الأركون أو الزينون أو الهيدروجين أو النيتروجين أو خليط من غازين مثل ليزرات الهيليوم-نيون أو فلوريد الهيدروجين أو كلوريد الزينون أو خليط أكثر من غازين مثل ليزرات (CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He). كما لا يُمكن ضخ الليزر الغازي باستخدام المصباح الوميضي لأن نطاق الامتصاص للغاز يكون ضيقاً جداً.

### ○ مصدر الضخ

هو عبارة عن جهاز قدرة كهربائية يقوم بتحويل القدرة الكهربائية إلى قطبين كهربائيين في الأنبوب (الأنود و الكاثود) الذي يحتوي على الغاز (أو الغازات)، فيحدث التفريغ الكهربائي للغاز (توليد البلازما) و يتولد الليزر.

## 3.7.I. ليزرات الحالة السائلة ( ليزر الصبغة )

يتراوح مدى طول موجة ليزرات الحالة السائلة في المنطقة تحت الحمراء، و يتكون ليزر الصبغة من الوسط الفعّال و مصدر الضخ [7-8]:

### ○ الوسط الفعّال

هو عبارة عن صبغة عضوية مُذابة في محلول مناسب مثل الماء أو الكحول الأيثيلي أو غيرها.

### ○ مصدر الضخ

يُستخدم المصباح الوميضي (Flash Lamp) كما في ليزرات الحالة الصلبة. و يُمكن أن يتم ضخ الوسط الفعّال باستخدام شعاع ليزر آخر مثل ليزر بخار النحاس (Cu-vapor Laser)، و هذه الطريقة تكون ذات كفاءة أعلى من طريقة الضخ بالمصباح الوميضي.

### 8.1. التعداد المعكوس في إسكان الذرات

في حالة التوازن الحراري و تحت الظروف الاعتيادية، يَخضع عدد الذرات في مُستويات الذرة إلى توزيع بولتزمان و مفاده أنَّ النظام (الذرة) الذي يحتوي مجموعة من المستويات للطاقة، فإنَّ عدد الذرات في كل مُستوى تتحكم فيه درجة الحرارة و فرق الطاقة عن المستوى الأرضي، فكلما زادت درجة الحرارة كَلَّمَا كانت هناك فرصة للذرة لاحتلال مُستوى أعلى من المستوى الأرضي، و كلما قلَّ فرق الطاقة بين المستوى المتهيج و المستوى الأرضي فإن احتمالية وجود ذرة في المستوى المتهيج تزداد، كما تقل عند زيادة فرق الطاقة.

ففي الظروف الاعتيادية و تحت شرط التوازن الحراري يكون عدد الذرات في المستوى المثار أقل من ما هو موجود في المستوى الأرضي و ذلك حسب قانون بولتزمان الذي يُحدِّد توزيع الذرات في مُستويات الطاقة للوسط ، كما يُحدِّد النسبة بين العددين وتكون كالتالي[5]:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(\frac{-\Delta E}{K_B T}\right) \quad (8.1)$$

حيث:

$N_2$  : تعداد المستوي الأعلى رقم 2 الذي طاقته  $E_2$ .

$N_1$  : تعداد المستوى الأرضي رقم 1 الذي طاقته  $E_1$ .

$g_i = 2j_i + 1$  : قيمة التوالد في مستوي الطاقة  $E_i$ .

$\Delta E$  : فرق الطاقة بين المستويين  $E_2$  و  $E_1$  ،  $\Delta E = E_2 - E_1$

$K_B$  : ثابت بولتزمان.

$T$  : درجة الحرارة.

وتبعاً له يكون عدد الذرات في مُستويات الطاقة الدنيا أكبر من عدد الذرات في مُستويات الطاقة الأعلى أي أن  $N_1 > N_2$  ،

وهذا يعني احتمالية حدوث الإصدار المحفز أقل بكثير من حدوث الامتصاص و بالتالي لا يحدث الإصدار المحفز.

لكي نحصل على الإصدار المحفز الذي هو ضروري للحصول على الليزر، يجب أن نحصل على عدد الذرات في المستوى المثار أكثر

من عدد الذرات في المستوى الأرضي و ذلك بتوفير طاقة تصبُّ في الوسط بهدف تقليل عدد الذرات في المستوى الأدنى  $N_1$

وزيادة عددها في المستوى الأعلى  $N_2$ ، و هذا ما يُسمى بالتوزيع المعكوس في إسكان الذرات (الانعكاس السكاني). إذن الانعكاس السكاني هو الحالة التي يكون فيها عدد الذرات أو (الجزئيات) في المستوى المثار أكثر من عدد الذرات في المستوى الأدنى أي أن:  $N_2 > N_1$  [8].

### 9.I. علاقات أينشتاين الرياضية

وضع العالم أينشتاين العلاقات الرياضية التي تصف عملية تفاعل الضوء مع الوسط الفعّال المتوازن حرارياً و يتضمن هذا التفاعل ثلاث ظواهر فيزيائية و هي الامتصاص و الإصدار التلقائي و الإصدار المحفّز، فعندما يكون الوسط الفعّال متوازناً حرارياً فإن مُعدّل انتقال الذرات من المستوى الأرضي  $E_1$  إلى المستوى المثار (المتهيّج)  $E_2$  يجب أن يكون مُساوياً لمعدل هبوط الذرات من المستوى  $E_2$  إلى  $E_1$  و إذا كان عدد الذرات لوحدة الحجم في المستوى المثار (المتهيّج) الأول يُساوي  $N_1$  فإن مُعدّل انتقال الذرات من هذا المستوى إلى المستوى المثار الثاني  $E_2$  يتناسب مع كل من عدد الذرات  $N_1$  و عدد الفوتونات المسلّطة على المادة الفعّالة و هذا عندما يكون تردد الفوتونات  $\nu$  [5]:

$$\rho_\nu = N h \nu \quad (9.I)$$

حيث:

$N$  : تعداد الفوتونات لوحدة الحجم.

$\rho_\nu$  : كثافة طاقة الفوتونات المسلّطة على المنظومة عند التردد  $\nu$ .

إنّ مُعدّل انتقال الذرات من المستوى المثار الأول  $E_1$  إلى المستوى المثار الثاني  $E_2$  (الإمتصاص) يكون كما يلي:

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12} \rho_\nu N_1 \quad (10.I)$$

حيث  $B_{12}$  : هو ثابت التناسب و يُدعى ثابت أينشتاين للإمتصاص ( الرقم 12 يشير إلى حدوث الانتقال من  $E_1$  إلى  $E_2$  )

$B_{12} \rho_\nu$  : احتمال الامتصاص في وحدة الزمن  $(S^{-1})$  :  $W_{12}$



$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1 \quad (11.I)$$

$$W_{12} = \sigma_{12} F \quad (12.I)$$

$$F = \frac{I_\nu}{h\nu} \quad (13.I)$$

حيث:

$\sigma_{12}$ : المقطع الفعال للامتصاص ( $cm^2$ ).

$I_\nu$ : شدة الإشعاع الوارد ( $\frac{W}{cm^2}$ ).

$F$ : يمثل تدفق الفوتونات أو عدد الفوتونات الواردة في وحدة الحجم .

و إذا كان عدد الذرات في المستوى المثار  $E_2$  هو  $N_2$  فإن مُعدل الانتقال الذرات من المستوى  $E_2$  إلى المستوى  $E_1$  الذي

يمثل (الإصدار المحفّز) يكون كما يلي:

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}\rho_\nu N_2 \quad (14.I)$$

حيث:

$B_{21}$ : مُثل ثابت أينشتاين الإصدار المحفّز (الرقم 21 يشير إلى حدوث الانتقال  $E_2$  من إلى  $E_1$ ).

$B_{21}\rho_\nu$ : احتمال الإصدار المحفّز في وحدة الزمن ( $S^{-1}$ ):  $W_{21}$

$$W_{21} = \sigma_{21} F \quad (15.I)$$

حيث:

$\sigma_{21}$ : المقطع الفعال للإصدار المحفّز.

$F$ : يمثل تدفق الفوتونات أو عدد الفوتونات الواردة في وحدة الحجم.

معدل انتقال الذرات من المستوى  $E_2$  إلى المستوى  $E_1$  الذي يمثل (الانبعاث التلقائي) كما يلي :

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 \quad (16.1)$$

$A_{21}$ : ثابت أنشتاين للانبعاث التلقائي.

لقد افترض أينشتاين وجود احتمال لحدوث الانبعاث التلقائي مع الإصدار المحفز كما يلي :

معدل الانبعاث الكلي = معدل الإصدار المحفز + معدل الانبعاث التلقائي

$$B_{21}\rho_\nu N_2 = A_{21}N_2 \quad \text{معدل الانبعاث الكلي}$$

عندما يكون الوسط الفعّال متوازناً حرارياً أي أنّ الطاقة الكلية للوسط الفعّال يجب أن تبقى ثابتة، و إنّ معدل انتقال الذرات نحو

الأعلى (الامتصاص) يجب أن يكون مُساوياً لمعدل هبوطها إلى الأسفل (الإصدار المحفز + الانبعاث التلقائي).

$$B_{12}\rho_\nu N_1 = B_{21}\rho_\nu N_2 + A_{21}N_2 \quad (17.I)$$

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}N_2}{N_1 B_{12} - N_2 B_{21}} \quad (18.I)$$

بالقسمة على  $N_2$  نحصل على:

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}}{\frac{N_1}{N_2} B_{12} - B_{21}} \quad (19.I)$$

إذا كان الوسط الفعّال متوازناً حرارياً، يكون التوزيع الذري في مستويات الطاقة خاضعاً لتوزيع بولتزمان [5] :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left[-\frac{h\nu}{K_B T}\right] = \frac{g_2}{g_1} \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{K_B T}\right] \quad (20.I)$$

و بفرض أن مستويات الطاقة كانت غير مُنحلة، نعوض مُعادلة بولتزمان (20.I) في المعادلة (19.I) نجد :

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}}{\frac{g_1}{g_2} \left[ \exp\left(\frac{h\nu}{K_B T}\right) \right] B_{12} - B_{21}} \quad (21.I)$$

و يُمكن اعتبار أية منظومة ذرية متوازنة حرارياً جسماً أسوداً مشعاً خاضعاً لعبارة الكثافة الطيفية لإشعاع الجسم الأسود التي وجدها بلانك (1900) و هي كالتالي [5]:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left[ \frac{1}{\left[ \exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) \right] - 1} \right] \quad (22.1)$$

وبمقارنة المعادلتين (21.1) و (22.1) نحصل على:

$$g_{1B_{12}} = g_{2B_{21}} \quad (23.1)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (24.1)$$

تدعى هاتين المعادلتين بمعادلتى أينشتاين اللتان قادتاها إلى فكرة الإصدار المحفز.

النسبة بين مُعدل الانبعاث التلقائي و الإصدار المحفَّز تحت شرط التوازن الحراري  $R$  تمثل بالمعادلة التالية:

$$R = \frac{A_{21}}{\rho_\nu B} \quad (25.1)$$

و بتعويض المعادلة (21.1) في المعادلة (25.1) نجد:

$$R = \left[ \exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) \right] - 1 \quad (26.1)$$

لأجل الحصول على تضخيم للضوء، يجب زيادة الإصدار المحفز إلى الانبعاث التلقائي أي تقليل  $R$  و يتم ذلك بزيادة الإصدار المحفَّز أي زيادة عدد الفوتونات الساقطة على المادة الفعّالة، و زيادة عدد الذرات  $N_2$  في المستوى  $E_2$  و ذلك بتحقيق الانعكاس السكاني، الذي يعتبر شرطاً أساسياً من شروط توليد الليزر [5].

## 10.I. عرض الخط الطيفي (عرض النطاق) الليزري

من الناحية النظرية تكون طاقة جميع الذرات أو الجزيئات في أي مُستوى معين مُتساوية، أي أنّ هذه الذرات أو الجزيئات

تتمكن من التفاعل مع ضوء أحادي اللون (التردد) فقط، و هذا يعني أن الضوء المنبعث من المستويات الطاقة النظرية يكون ذا

طول موجي واحد، و يكون الطيف المنبعث خطأ واحداً أما من الناحية العملية فإن الأمر يختلف تماماً حيث تكون مستويات الطاقة الحقيقية عريضة نسبياً أي أن الضوء المنبعث من المستويات الطاقة الحقيقية يكون منتشرًا في مدى معين من الأطوال الموجية و على شكل غوسي (Gauss) و يُمكن ملاحظة وجود هذا التوسع أو الانتشار في خرج الليزر بشكل واضح عند رسم العلاقة بين شدة الشعاع المنبعث و التردد للحصول على منحنى كاوسي (Gauss) حيث يُمكن وصف هذه العلاقة بواسطة دالة رياضية تُعرّف بدالة الخط الطيفي.

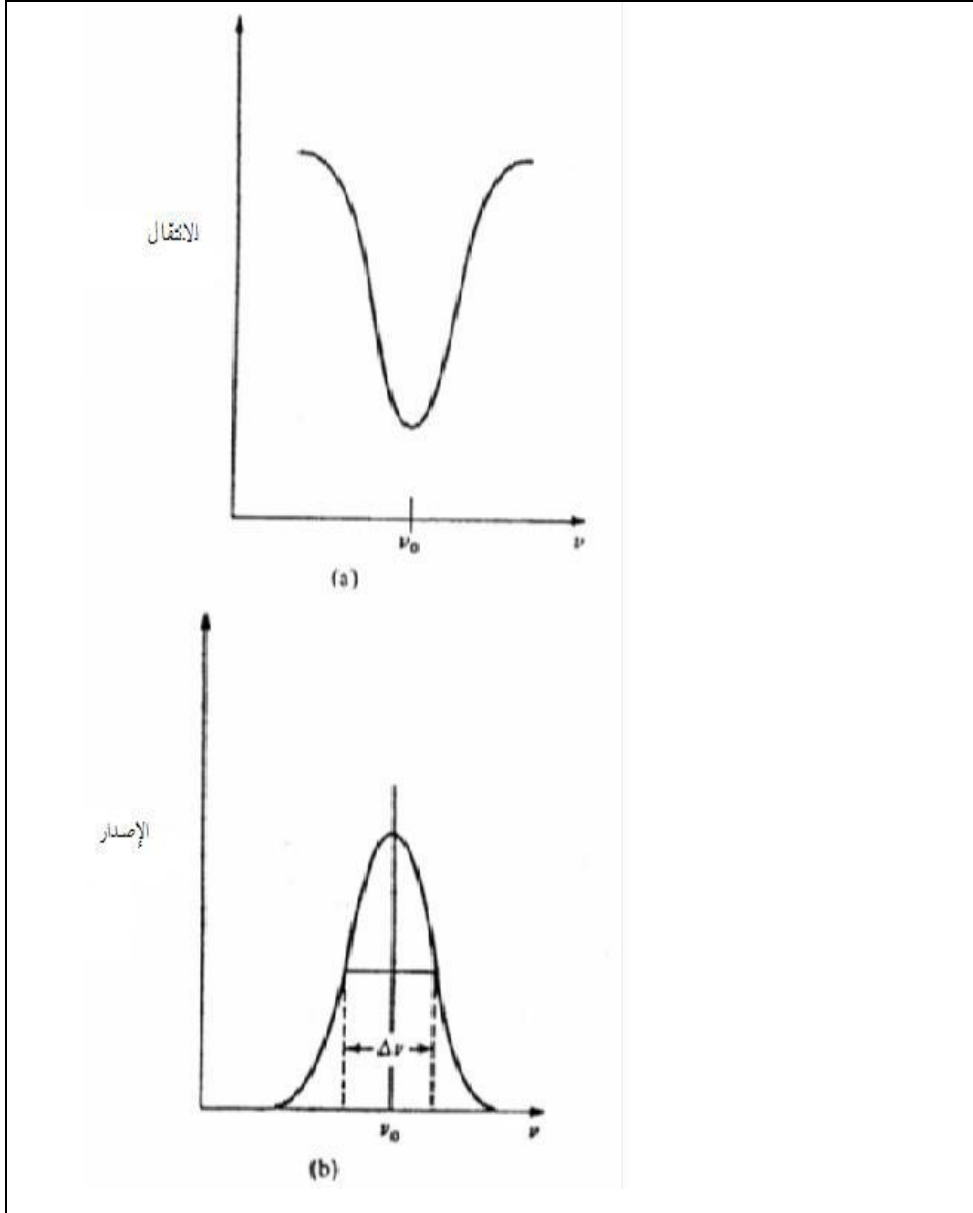
كما يُمكن أيضاً التعبير عن احتمال انتقال الذرات أو الجزيئات بين مستويات الطاقة الحقيقية لانبعاث فوتونات ذات تردد يتراوح بين  $v$  و  $v + dv$  بدالة رياضية  $g(v)dv$  و يُمكن كتابة هذه الدالة بالشكل التالي [5]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(v)dv = 1 \quad (27.1)$$

و هذا يعني أن الفوتون الساقط بطاقة مقدارها  $h\nu$  ليس بالضرورة أن يُحفّز على انبعاث فوتون آخر مُساوي له في الطاقة، و إنما يوجد احتمال أن تكون طاقة الفوتون المنبعث بين  $h\nu$  و  $h(v + dv)$ ، حيث يُعبر على هذه الاحتمالية بالدالة  $g(v)dv$ .

إن أسباب حدوث التوسُّع في دالة الخط الطيفي لشعاع الليزر تعود إلى آليتين رئيسيتين و هما :

- 1) التوسع الحاصل بسبب التأثير الدوبلري و يُعرف بالتوسع الدوبلري.
- 2) التوسع الحاصل بسبب الاصطدام بين الذرات أو الجزيئات و يُعرف بالتوسع التصادمي.



الشكل (10.I): (a) منحنى الانتقال بين مستويات الطاقة  $E_1$  و  $E_2$ ، (b) منحنى إصدار بين مستويات الطاقة

$E_1$  و  $E_2$  [9].

## 11.I. تطبيقات الليزر (مجالات استخدام الليزر)

يُستخدم الليزر في تطبيقات عديدة جداً و في مختلف مجالات الحياة و هذا منذ بدء اختراعه بسبب خصائص ضوئه المميزة، وعادة ما تُعتمد هذه التطبيقات على خاصية واحدة أو أكثر من خصائص ضوء الليزر، و لذلك نجد أن لكل تطبيق يوجد أنواع معينة من الليزر التي تناسبه و من أهم تطبيقات الليزر [2،7-8]:

## ➤ مجال الصناعة

يُستعمل في هذا المجال الليزر النبضي الذي يوفر حزمًا ذات طاقة عالية و يُستخدم في نطاق واسع:

\* يستخدم في قطع المعادن الصلبة.

\* وفي لحام المعادن.

## ➤ مجال الطب

تعددت استخدامات الليزر في مجال الطب واتسعت فنجد:

أنها استخدمت في طب العيون و طب الأسنان و إزالة الأورام السرطانية و العمليات الجراحية الدقيقة.....إلخ.

## ➤ المجال العسكري (التوجيه و التتبع و تقدي المدى)

يُستخدم ليزر  $CO_2$  وليزر Nd:YAG في مقدرات المدى الليزرية و هي منظومات تقوم بتقدير مدى الأهداف

كالتائرات و الصواريخ و الأهداف العسكرية المختلفة. كما يُستخدم ليزر He-Ne و ليزرات أشباه الموصلات، التي تعمل

في المنطقة المرئية من الأطوال الموجية (خاصة الحمراء) في توجيه الأسلحة و تحسين دقة الإصابة و القنصات، و كذلك في عملية

توجيه و تتبع مسار الصواريخ و القذائف.

## ➤ مجال الفضاء و الإتصالات

حيث أصبح بإمكان بث و إرسال مغات البرامج التلفزيونية في اللحظة ذاتها و بشكل يُغطي احتياجات جميع سكان

الأرض و كل هذا يتم باستخدام شعاع ليزر وحيد استطاعته متوسطة و قطره لا يتجاوز سنتيمترا واحدا، كما يُستخدم لقياس

المسافات بدقة خاصة أبعاد الأجسام الفضائية، فبعض من هذه التطبيقات تحتاج لأطوال موجات محددة حيث لا يمكنها العمل

على أطوال الموجات الأخرى كما في جراحة العيون، و بعضها يحتاج لعرض شعاع دقيق كما في مجال الاتصالات و أخرى

عريض و هكذا لبقية المواصفات.

## 12.I. الخلاصة

حاولنا الإمام في هذا الفصل دراسة عامة حول الليزر، الذي يعتمد على ظاهرة الإصدار المحفز و ذلك بتحقيق الانعكاس السكاني للذرات عن طريق طاقة خارجية تؤثر بما على المادة الفعالة تسمى "مصدر الضخ" ، كما أشرنا إلى أنواع مختلفة من الليزر من بينها : ليزرات الحالة الصلبة و ليزرات الحالة الغازية و أيضا ليزرات الحالة السائلة، و قد تم اختيار في هذه الدراسة ليزر الثوليوم الذي يُعتبر من ليزرات الحالة الصلبة، و بما أن الثوليوم هو عنصر من العناصر الترابية النادرة، لذا سندرس في الفصل الموالي مطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة.

### مراجع الفصل الأول:

- [1] د. محمد كوسا، "فيزياء الليزر وتطبيقاته"، كلية العلوم، منشورات جامعة دمشق، 2005-2006.
- [2] د. سعود بن حميد اللحياي، "الليزر وتطبيقاته"، كلية العلوم، جامعة أم القرى. <http://uqu.edu.sa/page/ar/110330>
- [3] H. haken, "Laser light dynamics", Sadhana, volume 2, Institute for Theories Physical, North Holland 1985.
- [4] صالح مصطفى الأتروشي ورياض وديع يوسف، "الليزر أسس واستخدامات"، كلية الهندسة، جامعة دهوك، دار دجلة، الطبعة الأولى 1426هـ-2008م.
- [5] د. يوسف مولود حسن ود. صالح مصطفى الأتروشي، "تقنيات الليزر وإستخدامه"، كلية الهندسة، جامعة دهوك، دار دجلة، الطبعة الأولى 2008م.
- [6] بيلا آ. لينكيل، "الليزرات"، جامعة سان فرناندو، جامعة كاليفورنيا، ترجمة فاروق عبودي قيصر، كلية العلوم، دار الكتب للطباعة و النشر، جامعة الموصل 1403هـ-1984م.
- [7] عدي عطا حمادي، "أساسيات الليزر وتقنياته"، 1425هـ-2004م.
- [8] د. فالح حسن الأحمدى ود. عصام جورج شماني، "الليزر وتطبيقاته".
- [9] Sébastien Forget, "Les Lasers et leurs application", Laboratoire de physique des Lasers, Université Paris-Nord, 2005.



# الفصل الثاني

الدراسة الطيفية لأيونات العناصر

الترايية النادرة

## 1.II. المقدمة

تُعتبر العناصر الترابية النادرة من الفلزات الانتقالية الداخلية التي تقع أسفل الجدول الدوري . هذه العناصر لم تكن تسفحى اهتمام العلماء، إلا قلة منهم، ثم تضافرت الجهود تدريجياً، و ازداد توجّه الأنظار إلى هذه الأتربة لسبر أغوار عناصرها على الصعيد التجريبي بُغية فصل بعضها عن بعض من جهة، و تبيّن خواصها الفيزيائية و الكيميائية من جهة أخرى[1].

تتميز هذه العناصر بخصائص مهمة، و تُستخدم أيوناتها كوسيلة نشطة و وسط فعّال في العديد من المواد المضيفة الصلبة نظراً لانتقالاتها الضوئية العديدة ضمن المجال المرئي و تحت الأحمر، كما أنّها تمتلك مستويات طاقة غير مُستقرة و التي تُسهّل انعكاس السكان[2].

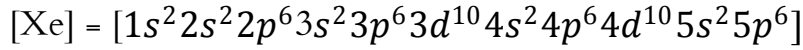
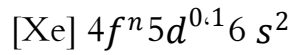
في هذا الفصل، سنقوم بالتطرق إلى بعض الخصائص الطيفية التي تتميز بها العناصر الترابية النادرة ، و سنُسلط الضوء على أحد عناصرها المهمّة و هو عُنصر الثوليوم، و سنقدّم بعض خصائصه الفيزيائية و الكيميائية و نقوم بتعدي رموزه الطيفية و مستويات طاقته.

## 2.II. العناصر الترابية النادرة

العناصر الترابية النادرة أو الفلزات الأرضية النادرة هي عبارة عن أكاسيد مُتشابهة جداً لسلسلة من العناصر المعدنية تضم سبعة عشر عُنصراً كيميائياً في أسفل الجدول الدوري حسب تعريف الإتحاد الدولي للكيمياء البحثية و التطبيقية IUPAC و هي 15 عنصراً بعد أن تمّت إضافة عُنصر (اللانثانيوم)  $Z = 57$  إلى  $Z = 71$  ( اللوتيتيوم ) في مجموعة اللانثانيدات، بالإضافة إلى العنصرين سكانيديوم (Scandium) و الإيتريوم (Yttrium)، كما أُعتبر هذين الأخيرين من العناصر الترابية النادرة و ذلك بعد اكتشاف تكوينه الذي له نفس تكوين اللانثانيدات و لها خصائص كيميائية مُتشابهة، و ذلك يرجع لوجود الطبقة 4f بمداراتها الفرعية السبعة التي تتسع إلى 14 إلكترون، و إمكانية انتقال الإلكترونات فيها، و هذه الطبقة مسؤولة عن الخصائص البصرية لأيونات العناصر الترابية النادرة، حيث أن الانتقالات بين مستويات الطاقة التي لديها التشكيل 4f غير المكتمل يُولّد أطوالاً موجية انطلاقاً من الأشعة فوق البنفسجية إلى غاية الأشعة تحت الحمراء[3-4].

سُميت العناصر الترابية النادرة بهذا الاسم لندرة وجودها و بسبب قلة الأمكن التي كانت تُستخرج منها سابقاً، حيث يصعب فصلها بسب تقارب حجمها الذري، كما تُعرف أيضا بسلسلة اللانثانيدات نسبة إلى أول عناصرها في السلسلة و هو عنصر اللانثانيم (La) ، تتكون هذه السلسلة من عناصر مُتتالية يكون فيها المدار f ممتلئا جزئيا أو كليا بالإلكترونات (غير مشبع) بالإضافة إلى المدار d أيضا و الذي يكون هو الآخر غير مُشبع. هذه العناصر متواجدة أكثر على شكل أيونات ثلاثية التكافؤ  $TR^{3+}$  ، حيث أن المدار f ليس نشطاً كيميائياً مُقارنة بالمدارات s و p و d [5].

و يُعطي التوزيع الإلكتروني للعناصر الترابية النادرة من الشكل [6,4] :



حيث:

n يتراوح بين 0 لللانثانيم إلى 14 للوتيتيوم .

1 H	2 He																	18 Ar	19 Kr	36 Xe	54 Rn
3 Li	4 Be											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar				
11 Na	12 Mg											29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57 Lu	58 Hf	59 Ta	60 W	61 Re	62 Os	63 Ir	64 Pt	65 Au	66 Hg	67 Tl	68 Pb	69 Bi	70 Po	71 At	72 Rn				
87 Fr	88 Ra	89 Lr	90 Rf	91 Db	92 Sg	93 Bh	94 Hs	95 Mt	96 Uun	97 Uuu	98 Uub	99 Uuq									
		Terre Rares																			
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb						
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No						

الشكل (1.II): موقع اللانثانيدات في الجدول الدوري [6].

**3.II. الثوليوم (thulium)****1.3.II. تاريخ الثوليوم**

أُكتُشِفَ عنصر الثوليوم (thulium) في عام (1879) و ذلك من قِبَل الكيميائي السويدي بير تيودور كليف (Per Teodor Cleve) خلال البحث عن الشوائب في أكاسيد العناصر الأرضية النادرة الأخرى ، فكانت هذه هي نفس طريقة كارل جوستاف موساندر (Carl Gustaf Mosander) الذي اكتشف بعض عناصر المجموعة في وقت سابق و ذلك عن طريق إزالة جميع الملوثات المعروفة من أكسيد الإيريوم الثلاثي ( $Er_2O_3$ ) ، و بدأ كليف (Cleve) بإزالة كل تركيزات الأكسجين، و بعد عمليات إضافية تحصل على مادتين جديدتين واحدة بُنِيَتِ اللون و الأخرى خضراء، فللمادة البنية عبارة عن أكسيد لعنصر الهولميوم (holmium) حيث أطلق عليها كليف اسم هولميا (holmia)، أمّا المادة الخضراء فهي أكسيد لعنصر غير معروف و قد سماه كليف أكسيد الثوليا (thulia)، فلثوليوم هو عنصر جاء بعد كلمة ثول (Thule)، فقد كان الرمز الذري للثوليوم في المرة الأولى (Tu) و لكن تم تغييره و أصبح رمزه بعد ذلك (Tm). الثوليوم يحتل المرتبة الحادية و الستون من حيث ندرة وجوده في القشرة الأرضية ، كما يُمكن استخلاصه من خلال اختزال أكسيده ( $Tm_2O_3$ ) و يحضر بعملية التبادل الأيوني، لأنه لا يوجد إطلاقاً بصفة نقية في الطبيعة، و لكنّه يوجد بكميات صغيرة في بعض المعادن النادرة مثل إيوكزينايت و الجادولينايت، البلاسترودين، كما يوجد في أتربة الأنهار. و يُستخدم الثوليوم في مُوصلات فائقة درجات الحرارة العالية، و أيضاً في إمداد الطاقة لأجهزة الأشعة السينية [7-8].

**2.3.II. تعريف عنصر الثوليوم (Tm)**

هو عُنصر كيميائي فلزي ذو لون رصاصي فضي، رمزه الذري Tm، و يعتبر من أندر العناصر الترابية النادرة، يقع ضمن سلسلة اللانثانيدات من الجدول الدوري، و هو العنصر الثالث عشر في سلسلة اللانثانيدات، حيث يوجد له خمسة نظائر هي على التوالي [9]:  $Tm^{167}$ ،  $Tm^{168}$ ،  $Tm^{169}$ ،  $Tm^{170}$ ،  $Tm^{171}$ .

### 1.2.3.II. الخصائص الفيزيائية و الكيميائية لعنصر الثوليوم (Tm)

لعنصر الثوليوم خصائص فيزيائية و كيميائية تميزه عن بقية العناصر الترابية النادرة الأخرى و هي [7،10] :

#### ✓ الخصائص الفيزيائية

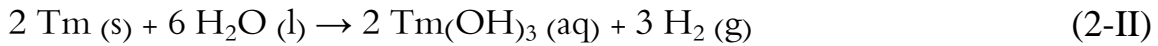
1. الثوليوم معدن نقي ذو لمعان و بريق معدني (عاكس للضوء).
2. يحترق عند تعرضه للهواء.
3. يتميز بأنه لين قابل للسحب و الطرق و التشكيل [11].
4. يتميز بدرجة انصهار عالية تقدر بـ  $1545^{\circ}\text{C}$ .
5. مُوصِّل جيد للحرارة و الكهرباء.
6. يحتوي الثوليوم على درجة سُمِّية تتراوح من متوسطة إلى كبيرة، فحجب التعامل معه بحذر، كما أنّ تراب الثوليوم قابل للاحتراق و الانفجار.

#### ✓ الخصائص الكيميائية

يتم حرق الثوليوم في درجة حرارة تقدر بـ  $150^{\circ}\text{C}$  لتشكيل أكسيد الثوليوم (III) وفقاً للمعادلة التالية [11]:

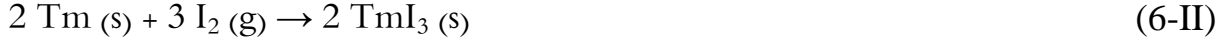


فلثوليوم ذو شحنة كهربائية تتفاعل ببطء مع الماء البارد و بسرعة جداً مع الماء الساخن لتكوين هيدروكسيد الثوليوم وفقاً للمعادلة التالية [12]:

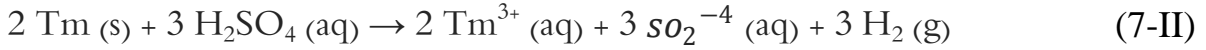


فنجد أنّ الثوليوم يتفاعل مع كل الهالوجينات و هذا التفاعل يكون قوي في درجة حرارة  $200^{\circ}\text{C}$  فما فوق وفقاً للتفاعلات التالية [13] :





كما يمكن أن يتفاعل الثوليوم مع حمض الكبريت المميه (سائل) وفقاً للمعادلة التالية [14] :



## 4.II. مطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة

### 1.4.II. التوزيع الإلكتروني للعناصر الترابية النادرة $TR^{+3}$ ولأيوناتها $TR^{+3}$

يكون التوزيع الإلكتروني للعناصر الترابية النادرة ضمن الطبقة  $4f$ ، لأن هذه الأخيرة هي المسؤولة على تشابه الصفات

الكيميائية لهذه العناصر، و نلاحظ أن الإلكترونات لا تتجه للملء المدار  $5d$  بل تتجه للملء المدار  $4f$  تدريجياً [15].

في المواد الصلبة، تأخذ العناصر الترابية النادرة الشكل الأيوني  $TR^{2+}$  ثنائي التكافؤ أي أن الذرة تفقد إلكتروناتها من الطبقة  $6s$ ،

و تأخذ أيضا الشكل الأيوني  $TR^{3+}$  ثلاثي التكافؤ، عند فقدانها للإلكترونين السابقين و إلكترونات آخر من الطبقة  $5d$ ، أما إذا

كانت لا تمتلك إلكترونات في الطبقة  $5d$  فيتوجب عليها فقدان من الطبقة  $4f$ ، حيث تعتبر الحالة ثلاثية التكافؤ لهذه

الأيونات هي الأكثر استقرارا [6، 16].

## II.2.4. الأعداد الكمية

لتحديد طاقة الإلكترون في الذرة يجب معرفة قيم الأعداد الكمية الأربعة التي تصفه و هي مجدولة كالتالي [17]:

الجدول (II.1): الأعداد الكمية للإلكترون.

الرمز	الإسم	القيمة	المعنى الفيزيائي
<b>n</b>	العدد الكمي الرئيسي	1,2,3,....	يُحدّد المدار الرئيسي للإلكترون و بالتالي طاقته، فهو عبارة عن عدد صحيح يتخذ أيّ قيمة صحيحة أكبر من الصفر
<b>L</b>	عدد الكم المداري	0,1,2,3....n-1	يُحدّد شكل المدار
<b>S</b>	عدد الكم المغزلي	$\frac{1}{2}$ وله اتجاهان $(+\frac{1}{2})$ أو $(-\frac{1}{2})$	تُحدّد الحركة المغزلية للإلكترون واتجاهه (دوران الإلكترون حول نفسه)
<b>m</b>	العدد الكمي المغناطيسي	0,±1,±2,....±1	يُحدّد تصرف المستويات الطاقية في وجود حقل مغناطيسي (عدد المدارات التي يتكون منها المستوى الفرعي)

## II.3.4. الرموز الطيفية

الذرات المعقدة التي تحتوي على أكثر من إلكترون لها عدّة مصادر للعزم الزاوي وتمثل ب:  $L S J$ ، وتُستخدَم الرموز

الطيفية لتمييز مستويات الطاقة في الحالات الذرية، إذ يُعطى الرمز الطيفي من الشكل  $L^2S+1J$  و ذلك بتحديد  $2S+1$ ، و العزم

الحركي المداري الكلي  $L$ ، بالإضافة إلى العزم الحركي السبيني الكلي للإلكترون  $S$ ، و العزم الحركي الكلي للإلكترون  $J$  [3-4]،

كما يُعرّف الازدواج  $L-S$ ، بازدواج راسيل - ساندر (Russell-Saunders) في هذا الازدواج يتم جمع العزم الزاوي

المداري و العزم اللفي للإلكترون بشكل مُنفصل لتشكيل العزم الزاوي الكلي [18].

- العزم الزاوي المداري الكلي  $L$  :

$$\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i \quad (8-II)$$

• العزم الزاوي اللفي ( المغزلي ) الكلي S :

$$\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i \quad (9-II)$$

العدد الكمي المداري  $L = 0, 1, 2, 3 \dots n-1$  يُمثل مُستويات الطاقة الفرعية و المتفرعة من المستويات الأساسية و تُصبح مُستويات الطاقة الأساسية هنا مُنشطرة، و توصف المستويات في هذه الحالة بأنها لا منطبقة و في الذرية و الأطياف توصف الأرقام الكمية السابقة كما هو الحال بالنسبة للدوال التي تصف إلكترونات واحداً [19].

يتم تحديد قيم L بالحروف بدلاً من استخدام الأعداد كالآتي:

$$L = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, n-1$$

$$L = S, P, D, F, G, H, \dots$$

• العزم الحركي الكلي J :

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad (10-II)$$

$$| L - S | \leq J \leq | L + S | \quad \text{ومنه:}$$

$$j_1 = l_1 + s_1 \text{ و } j_2 = l_2 + s_2 \quad \text{حيث: } J = j_1 + j_2 \quad \text{[12]: يعطى}$$

### ❖ قواعد هوند (Hund rules):

تُعطي قواعد هوند كيفية توزيع الإلكترونات التي تنتمي إلى نفس الطبقة الإلكترونية داخل كل محط ذري بحيث يكون المستوى الأساسي يتميز بـ [18]:

- قيمة اللف الذاتي الكلي S يأخذ أكبر قيمة ممكنة.
- العزم المداري الكلي L تكون له أعلى قيمة مُتماشية و قيمة S ( أعلى قيمة لـ L).



- $J = J_{\min} = |L - S|$  من أجل طبقة مملوءة أقل من النصف.
- $J = J_{\max} = |L + S|$  من أجل طبقة مملوءة أكثر من النصف.

### ❖ مبدأ الإستبعاد لباولي (Pauli)

يُصعب باولي على أنه لا يُمكن للإلكترونين أو أكثر في نفس الذرة أن يأخذوا نفس الحالة الكمومية، أي نفس قيم الأعداد الكمية الأربعة والتي هي:  $(n, l, m, s)$ ، بينما يُمكن أن يشتركا في رقم واحد أو اثنين أو ثلاثة فقط [15].

### II.4.4. الرموز الطيفية لأيونات العناصر الترابية النادرة

نأخذ كمثال عنصر الثولوم (Tm)، فمن أجل أيون الثولوم يكون:  $Tm^{+3}$

التوزيع الإلكتروني للعنصر:  $[Xe] 4f^{13} 5d^0 6s^2$

التوزيع الإلكتروني للأيون:  $[Xe] 4f^{12}$

قيم  $L$  و  $S$  لهذا الأيون تكون:

$$L = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

$$S = 0, 1$$

و عند استخدام الأزواج  $L-S$  نجد الرموز الطيفية التالية:  $^1S_0, ^3P_{0,1,2}, ^1D_2, ^3F_{2,3,4}, ^1G_4, ^3H_{4,5,6}, ^1I_6$

انطلاقاً من قواعد هوند، نجد أنّ الرمز الطيفي للمستوى الأساسي لأيون الثولوم  $Tm^{+3}$  هو  $^3H_6$

يوضّح الجدول التالي الرموز الطيفية للمستوى الأساسي لأيونات العناصر الترابية النادرة [15].

الجدول (2.II): الرمز الطيفي للمستوى الأساسي للعناصر الترابية النادرة.

العنصر	الرمز الطيفي للمستوى الأساسي
La	$^1S_0$
Ce	$^1F_{5/2}$
Pr	$^3H_4$
Nd	$^4F_{9/2}$
Pm	$^5I_4$
Sm	$^6H_{5/2}$
Eu	$^7F_0$
Gd	$^8S_{7/2}$
Tb	$^7F_6$
Dy	$^1H_{15/2}$
Ho	$^5I_8$
Er	$^4I_{15/2}$
Tm	$^3H_6$
Yb	$^2F_{7/2}$
Lu	$^1S_0$

## 5.4.II. مستويات الطاقة للعناصر الترابية النادرة [15,3]

كُلُّ أيون من العناصر الترابية النادرة له شكل من الطاقة يتميز به، و من أجل تحديد وضع مستويات الطاقة له من الضروري حل مُعادلة شرودنجر:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H\Psi \quad (10-II)$$

$$E\Psi = H\Psi \quad (11-II)$$

حيث:

$H$ : هاملتون التفاعل.

$\Psi$ : دالة الموجة المرتبطة بالذرة.

$E$ : طاقة المستوي من أجل أيون حر موجود مع  $N$  إلكترون و نواة شحنتها  $(Ze)$ ، و بفرض كتلتها لا نهائية نستطيع كتابة الهاملتون للأيون الحر  $H_0$  على الشكل التالي:

$$H_0 = H_{conf} + H_{el} + H_{so} \quad (12-II)$$

$H_{conf}$ : هاملتون التشكيل حسب تقريب "الحقل المركزي" و يُمثل مجموع الطاقة الحركية الممكنة للإلكترونات حول النواة، كما يسمح لنا بالحصول على وضع طاقة التشكيلات الإلكترونية:

$$H_{conf} = \sum_{i=1}^N \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 - \frac{ze^2}{r_i} \right) \quad (13-II)$$

$H_{el}$ : يمثل تفاعل كولوم بين الإلكترونات في الطبقة (تنافر الإلكترونات فيما بينها)، هذا التفاعل يرفع التطابق في المستويات الإلكترونية للطبقة  $4f$  من خلال الرموز الطيفية  $^{2S+1}L_J$  و هي تعتمد على المسافة بين الإلكترونات  $i$  و  $j$ :

$$H_{el} = e^2 \sum_{i>j}^N \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \quad (14-II)$$

$H_{SO}$  : يمثل التفاعل بين اللف الذاتي و العزم الزاوي المداري لكل إلكترون ( تفاعل سبين- مدار)، فيعطي رفع التطابق

$$|L - S| \leq J \leq |L + S|$$

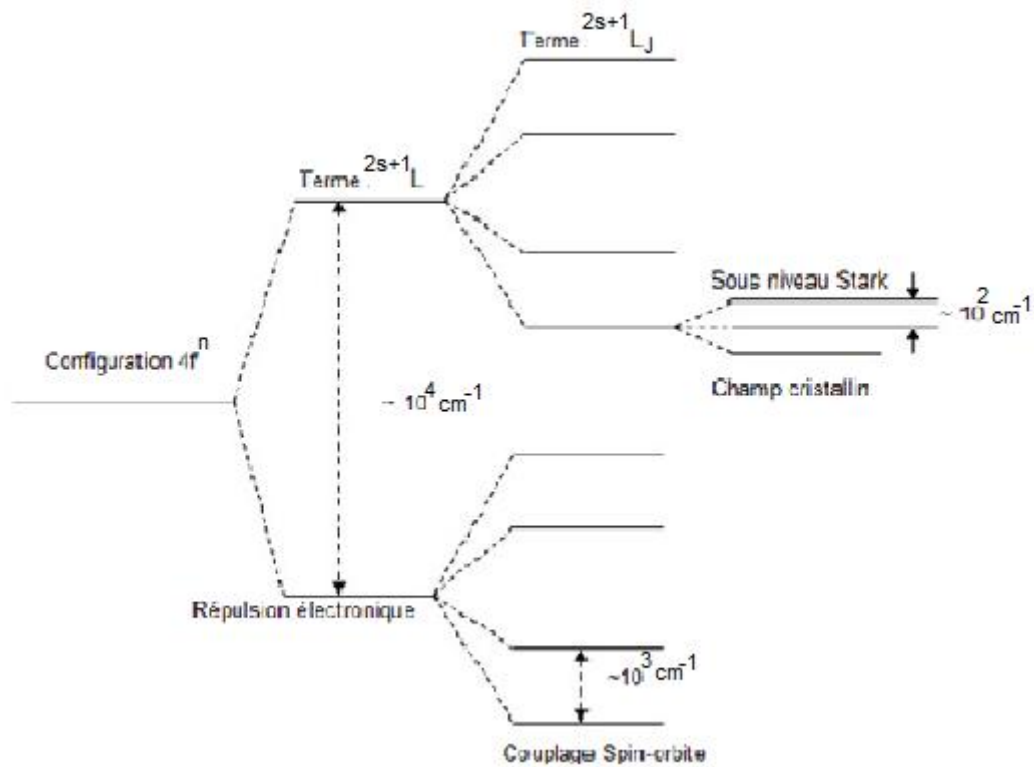
للمستويات الثانوية من خلال الرمز الطيفي  $^{2S+1}L_J$  و يُحدد العدد الكمي  $J$ ، و ذلك بـ  $|L - S|$  و  $|L + S|$  تعطى:

$$H_{SO} = \lambda_i \sum_i s_i l_i \quad (15-II)$$

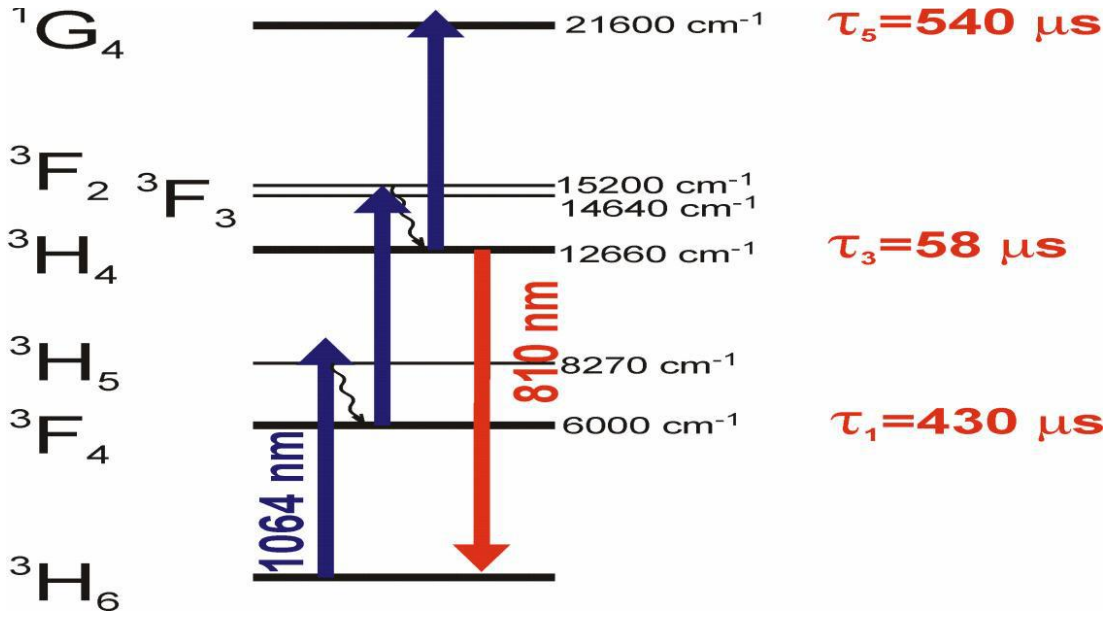
حيث:

$\lambda_i$  : معاملات الازدواج سبين - مدار.

يتم إدخال  $H_{SO}$  و  $H_{el}$  في نظرية الاضطراب، و يُطبق ذلك في حالة العناصر الترابية النادرة.



الشكل (2.II): تحليل مستويات الطاقة تحت تأثير التفاعلات المختلفة [6].



الشكل (3.II): مخطط مستويات الطاقة لأيون الترابي النادر  $Tm^{+3}$  [21].

## 5.II. تفاعل أيونات العناصر الترابية النادرة مع الضوء

### 1.5.II. قواعد الانتقاء

إن تفاعل أيونات العناصر الترابية النادرة في المادة المضيفة مع الإشعاع الكهرومغناطيسي ينج عنه انتقال الإلكترونات بين مستويات الطاقة وفقاً لقواعد الانتقاء وهي:

$$\Delta n = n_2 - n_1 \text{ كيفي}$$

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \pm 1$$

$$\Delta j = j_2 - j_1 = 0, \pm 1$$

تفاعل إلكترونات العناصر الترابية النادرة مع الحقل البلوري يؤدي إلى نوعين من الانتقالات [5]:

#### • انتقالات ثنائي القطب الكهربائي: الانتقالات المسموح بها تكون أكثر شدة. فحدوث انتقال من مستوى

إلى مستوى وجب توفر قواعد تعرف باسم قواعد لابورت (Régles de laporte):

$$\Delta s = 0 ; \Delta l = \pm 1 ; |\Delta L| \leq 2l ; |\Delta J| \leq 2l$$

هذه القواعد تدل على أنّ انتقالات ثنائي القطب الكهربائي بين المستويات التي لها نفس التكافؤ ممنوعة، و هذا ما يجعل كل الانتقالات داخل التشكيلات في الطبقة  $4f$  ممنوعة.

• **انتقالات ثنائي القطب المغناطيسي:** و هي أقل شدة بكثير من كثافة الانتقال لثنائي القطب الكهربائي،

فهي انتقالات مسموحة بين المستويات التي من نفس التكافؤ، بشرط تحقق القواعد التالية:

$$|\Delta J| = 0, \pm 1; |\Delta L| = 0, \pm 1; \Delta s = 0; \Delta l = 0$$

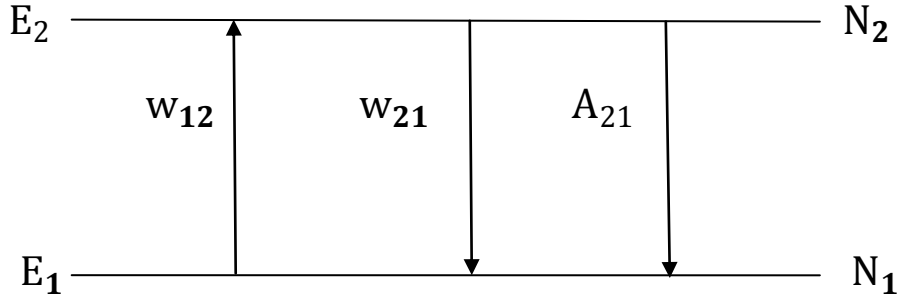
ففي المادة الزجاجية، يمكننا أن نلاحظ جميع الانتقالات [22].

## II.2.5. الانتقالات الإلكترونية

أثناء الانتشار في المواد، تتفاعل أيونات العناصر الترابية النادرة مع الإشعاع الوارد (الإشعاع الكهرومغناطيسي) حيث يؤدي هذا التفاعل إلى انتقال الأيونات بين مستويات الطاقة المختلفة، و يصنّف هذا الانتقال إلى صنفين: انتقالات إشعاعية، انتقالات غير إشعاعية [5].

### II.2.5.1. الانتقالات الإشعاعية (الآليات الإشعاعية)

عند تسليط شعاع كهرومغناطيسي على أيونات العناصر الترابية النادرة، فإنها تقوم بامتصاصه و يؤدي بذلك إلى انتقالها إلى مستويات طاقة أعلى. فلأيونات التي في مستوى الإثارة تقوم بالتخلص من الطاقة الزائدة بعودتها إلى مستوى الاستقرار، و تصدر هذه الطاقة على شكل فوتونات، كل هذه الظواهر لديها الخصائص المشتركة امتصاص أو إصدار فوتون. لذا تُعرف باسم الآليات الإشعاعية [3,5].



الشكل (4.II): الآليات الرئيسية للتفاعل إشعاع- مادة.

### • الامتصاص

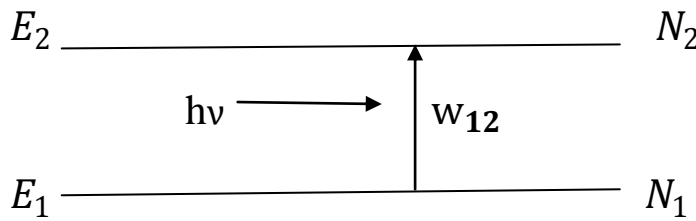
الامتصاص هو الآلية التي يمر بها الإلكترون من المستوي  $E_1$  إلى المستوي  $E_2$  وذلك بعد اكتسابه لطاقة كهرومغناطيسية،

فبعد امتصاص فوتونات الإشعاع المسلط على إلكترونات ذرات العناصر الترابية النادرة، تعمل طاقة الإشعاع على رفع هذه

إلكترونات من مدارات منخفضة إلى مدارات عالية الطاقة، وتُصبح الإلكترونات في حالة إثارة، ولا يتم امتصاص الفوتونات من

قبل المادة إلا إذا كانت طاقتها أكبر من الفرق الطاقي بين مدارات الإلكترونات لذرات تلك الماد [3,15,23]

$$\Delta E = h\nu = E_2 - E_1 \quad (16-II)$$



الشكل (5.II): ظاهرة الامتصاص.

ليكن  $N_1(t)$  و  $N_2(t)$  تعداد المستويين الطاقويين للحالة الأساسية و المثارة على الترتيب.

عدد الذرات في المستوى المثار  $N_2(t)$  يتغير خلال المدة الزمنية  $dt$  بالكمية:

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = W_{12}N_1(t) = B_{12}\rho(\nu)N_1(t) \quad (17-II)$$

و في نفس الوقت فإن عدد ذرات المستوى الأساسي  $N_1(t)$  يتناقص بالمقدار:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -W_{12}N_1(t) = -B_{12}\rho(\nu)N_1(t) \quad (18-II)$$

حيث:

$W_{12}$ : احتمالية الإثارة في وحدة الزمن.

$B_{12}$ : مُعامل أينشتاين و وحدته  $(m^3 \cdot s^{-2} \cdot J^{-1})$ .

$\rho(\nu)$ : كثافة الطاقة في وحدة المساحة لشعاع وارد و وحدته  $(J \cdot s \cdot m^{-3})$ .

### • الانبعاث التلقائي

إلكترونات ذرات العناصر الترابية النادرة المثارة (الغير مُستقرة) تعود إلى مدارات مُنخفضة الطاقة (الحالة الأساسية)، وذلك بانتقالها من المستوى  $E_2$  إلى المستوى  $E_1$  بصورة تلقائية، أي دون تأثيرات خارجية، فتصحر الطاقة في شكل إشعاع فوتوني غير مترابط و بطريقة عشوائية، لذلك فإن هذا الإشعاع يحتوي على عدد كبير جداً من الترددات. تُسمى فترة الحياة الإشعاعية التي تبقى فيها الأيونات في المستوى المثار بمتوسط العمر  $\tau$  لحالة الإثارة (وحدته الثانية s)، و هو يُعرّف بالعلاقة التالية [23,3]:

$$\tau_{rad} = \frac{1}{\sum_i A_{mj}} \quad (19-II)$$

$$\tau_{rad} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i \quad (20-II)$$

حيث:

$N_0$ : عدد الأيونات في الحالة المثارة في اللحظة  $t=0$ .

كما يتم تعريف نسبة التفرع للانتقال من  $m$  إلى  $j$  بالعلاقة:

$$\beta = \frac{A_{mj}}{\sum_j A_{mj}} = A_{mj} \tau_{rad} \quad (21-II)$$



خلال المدة الزمنية  $dt$  عدد الذرات في المستوى المثار  $N_2(t)$  يتغير بالمقدار:

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = - A_{21} N_2 \quad (22-II)$$

و في نفس الوقت فإن عدد ذرات المستوى الأساسي  $N_1(t)$  يرتفع بنفس المقدار:

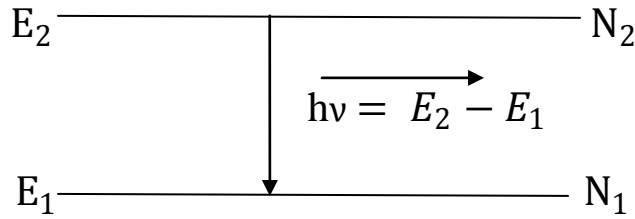
$$\frac{dN_1(t)}{dt} = A_{21} N_2 \quad (23-II)$$

حيث :

$A_{21}$  : احتمالية الانبعاث التلقائي لوحدة الزمن، و يُعرف بمعامل آينشتاين فيعطى بـ  $(s^{-1})$

و في حالة نظام مكون من مستويين يتم التعبير عن مدة الحياة الإشعاعية بـ:

$$\tau_{rad} = \frac{1}{A_{21}} \quad (24-II)$$



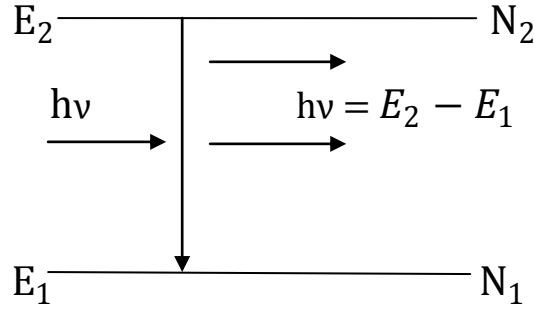
الشكل (6.II): ظاهرة الانبعاث التلقائي.

### • الانبعاث المحفز

تقوم إلكترونات ذرات العناصر الترابية النادرة المثارة بإشعاع موجات كهرومغناطيسية، نتيجة نزول الإلكترونات من مدارات عالية الطاقة إلى مدارات منخفضة الطاقة، ولكن ليس بطريقة تلقائية و عشوائية كما في الانبعاث التلقائي بل نتيجة

لحتمها بإشعاع له تردد محدد و يمتلك طاقة مُساوية إلى فرق الطاقة بين المستويين  $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$

فلإشعاع المحفّز الصادر عن المادة المثارة يُسمى إشعاعاً مترابطاً، و ذلك لأن الموجات الكهرومغناطيسية الناتجة عن نزول الإلكترونات لها تردد و طور يساويان تماماً تردد طور الأمواج التي قامت بتحفيز الإلكترونات على الإشعاع، و هذه العملية تمثل الأساس الفيزيائي لعمل الليزر [23].



الشكل (7.II): ظاهرة الانبعاث المحفّز.

خلال المدة الزمنية  $dt$  عدد الذرات في المستوى المثارة  $N_2(t)$  يتغير بالكمية :

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = -W_{21}N_2(t) = -B_{21}\rho(\nu)N_2(t) \quad (25-II)$$

و من أجل نظام ذو مستويين، وبافتراض الإشعاعات هي فقط التي تساهم في (الامتصاص، الانبعاث التلقائي، الانبعاث المحفّز) يُمكن كتابة:

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = W_{12}N_1 - (W_{21}+A_{21})N_2 = -\frac{dN_1(t)}{dt} \quad (26-II)$$

عند الاتزان يكون  $\frac{dN_i}{dt} = 0$  نجد:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{W_{12}}{(W_{21}+A_{21})} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{h\nu}{K_B T}\right) \quad (27-II)$$

## II.2.2.5. الأليات غير الإشعاعية

طاقة الانتقالات الإلكترونية بين الحالة المثارة و الحالة الأساسية أعلى بكثير من طاقة الفونونات، بحيث يوجد هناك تحولات غير إشعاعية أي أنّ الذرة يُمكن أن تنتقل من المستوى المثار  $E_2$  إلى المستوى الأساسي  $E_1$  دون إصدار فوتونات، هذا الإنتقال يُمكن أن يسبب إسترخاء غير مُشع للذرة، حيث يذهب هذا الفرق في الطاقة للانتقال بين المستويين على شكل اهتزازات ( فونونات ) و تكون طاقة ذبذبات الشبكة مُكمّمة، و عادة ما يُمثل انتقال إزاحة موجية في المدة بانتقال فونون واحد أو أكثر، بحيث نجد الاسترخاء غير الإشعاعي بواسطة الفونونات هو عملية مُتعددة الفونونات ( multiphonon )، فاحتمال حدوث استرخاء مُتعدد الفونون يتعلق بالفرق الطاقى بين مُستويات الانتقال و هذا من خلال المعادلة التالية [6،3]:

$$W_{MP} = W_0 [n(\nu) + 1]^p \quad (28-II)$$

حيث:

p : عدد الفونونات اللازمة لملء فرق الطاقة.

$W_0$  : احتمال الانتقال.

$$W_0 = B e^{-\alpha \Delta E} \quad (29-II)$$

حيث:

$\Delta E$  : الفرق في الطاقة بين مُستويات المرحلة الانتقالية.

$\alpha (\nu)$  ،  $B (s^{-1})$  : ثوابت موجبة مميزة للشبكة و لا تتعلق بأيونات العناصر الترابية النادرة و لا بمستويات الطاقة المعتمرة

$n(\nu)$  : عدد بوز (Bose) حيث هذا الأخير:

$$n(\nu) = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kt}} - 1} \quad (30-II)$$

إنّ احتمالية الانتقال غير الإشعاعي تزداد بارتفاع درجة الحرارة و تتناقص مع زيادة فرق الطاقة و بالتالي يُؤدّي إلى انخفاض في مدة الحياة الإشعاعية، فتتناقص احتمالية الانتقال غير الإشعاعي بسرعة عندما يتزايد عدد الفونونات اللازم و ذلك حسب العلاقة التالية:

$$p = \Delta E/hv \quad (31-II)$$

و هي بالتالي تختلف من مادة إلى أخرى ، ذلك لأنّ أنماط الاهتزاز هي الأخرى تختلف من مادة إلى أخرى، و بشكل عام تأثير هذه التفاعلات يُؤدّي إلى تغيير الإسكان في المستويات، و يُمكن كتابة هذا التغير بسبب الانتقالات غير المشعة بالصيغة التالية:

$$\frac{dN_2}{dt} = - \frac{N_2}{\tau_{nr}} \quad (32-II)$$

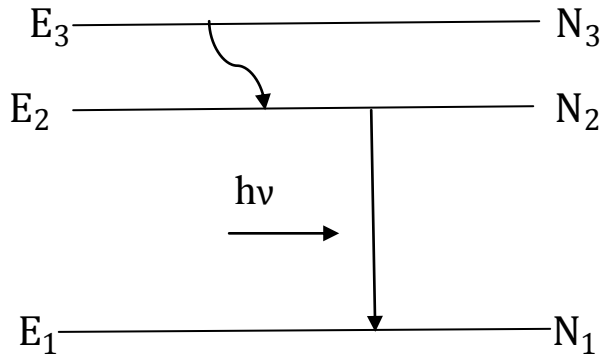
حيث:

$\tau_{nr}$  : ثابت زمني مميز يُعبر عن مدة الحياة غير المشعة و يُعطى بالعلاقة التالية:

$$\tau_{nr} = \frac{1}{W_{nr}} \quad (33-II)$$

و يُمكن تعريف مدة الحياة الإجمالية للانتقالات المشعة وغير المشعة بالعلاقة التالية:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (34-II)$$



الشكل (8.II): الآليات الإشعاعية و غير الإشعاعية.

## 6.II. المردودية الكمية

عند الأخذ بعين الاعتبار الآليات الإشعاعية و غير الإشعاعية، و التغيرات في المستوى المثار الثاني لنظام ذو مستويين يُمكن أن نكتب [3]:

$$\frac{dN_2}{dt} = - \frac{1}{\tau_{mes}} N_2 = - \left( \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{nr}} \right) N_2 \quad (35-II)$$

$N_2(t)$  تتغير أسياً بدلالة الزمن كالتالي:

$$N_2(t) = N_2(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{mes}}\right) \quad (36-II)$$

و تُعرف المردودية على أنها النسبة بين مدة الحياة المقاسة تجريبياً و مدة حياة الإشعاع في الحالة المثارة.

$$\eta = \frac{\tau_{mes}}{\tau_{rad}} \quad (37-II)$$

و للحصول على خصائص جيدة للمادة المضيفة، فمن الضروري تحقيق أقصر مدة حياة في المستوى المثار و ذلك لتقرب المردودية من القيمة 1.

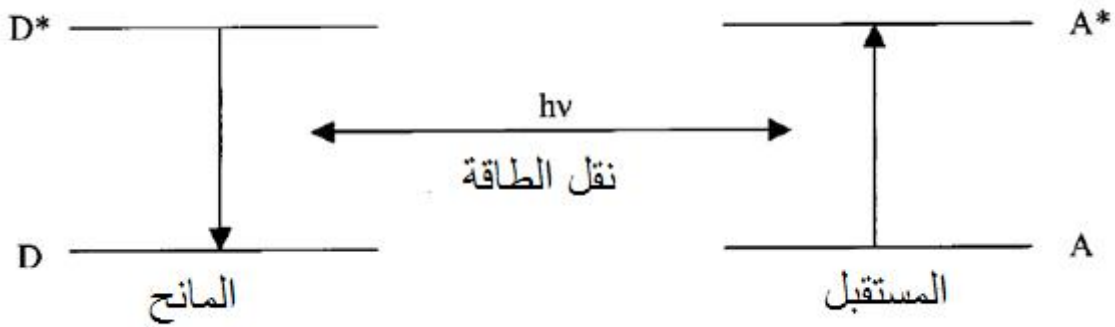
## 6.II. نقل الطاقة

إنّ احتمالية الانتقال غير الإشعاعي مُرتبطة بالاسترخاء مُتعدد الفونونات (Relaxation Multi phonons)

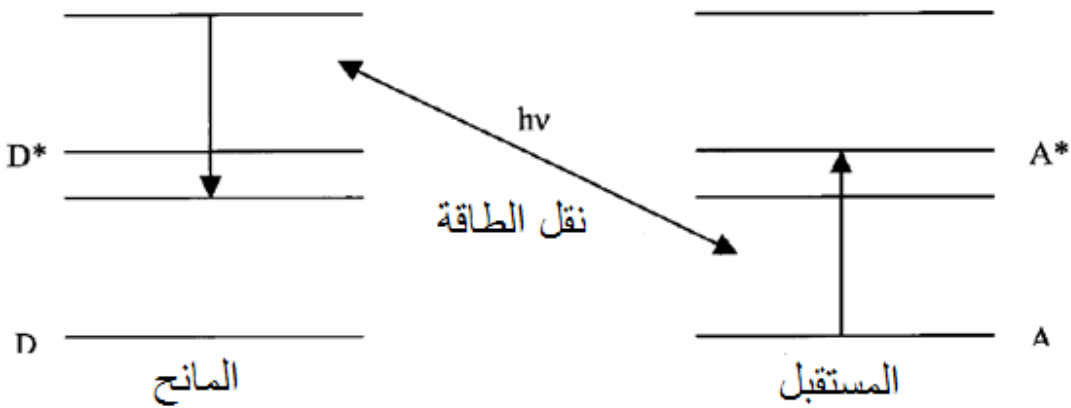
وينقل الطاقة بين مختلف الأيونات. آليات التفاعل هذه بين الأيونات المتجاورة هي دالة في المسافة الأيونية و التي تتناقص مع زيادة التركيز. أثناء عملية نقل الطاقة، الأيون المانح سيمنح الطاقة إلى الأيون المستقبل دون انبعاثات إشعاعية، كما أنّ نقل الطاقة يُمكن أن يحدث بين أيونات مُتطابقة أو غير متطابقة. توجد أنواع مختلفة من التفاعل بين الأيونات تؤدي إلى تفرغ المستوى المثار [5-6، 15].

➤ نقل الطاقة الرنيني (Resonant energy transfer)

في هذه الحالة نعتبر أيونين قريبين و متجاورين يمثلان في مستويات طاقة متماثلة ( الشكل 9.II). الأيون المانح D في الحالة المثارة يعود إلى المستوى الأساسي، المستوى الأقل طاقة ، تاركا طاقته  $h\nu$  للأيون المستقبل A، هذا الأخير يمتص هذه الطاقة و ينتقل من الحالة الأساسية إلى الحالة المثارة. هذه الطاقة يمكن أن تنتقل بين أيونات العناصر الأرضية النادرة القريبة جداً في هذه الحالة يتم فقدان الطاقة و لا يُجدي إلى انبعاث فوتون.



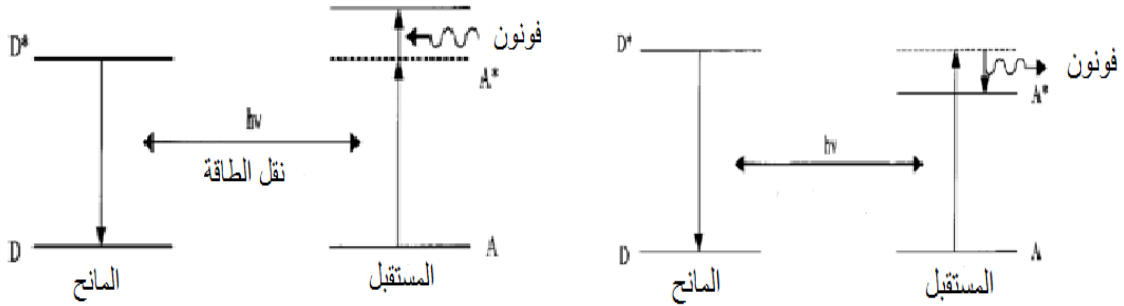
الشكل(9.II): نقل الطاقة الرنيني مع العودة إلى الحالة الأساسية.



الشكل (10.II): نقل طاقة رنيني كيميائي.

### ➤ نقل الطاقة بمساعدة الفونونات (Transfer of phonon-assisted energy)

في بعض الحالات لا يكون فرق الطاقة بين المستويات المشاركة في النقل هو نفسه (الشكل 11.II)، وبالتالي فإنّ نقل الطاقة لا يتضمّن نفس الحالات المثارة، ولكي يكون هناك انحفاظ كلي ل طاقة فإنه يجب أن يحدث إما امتصاص أو إصدار فونون، اعتمادا على ما إذا كانت طاقة الانتقال  $D \leftarrow D^*$  أكبر أو أقل من الانتقال  $A \leftarrow A^*$

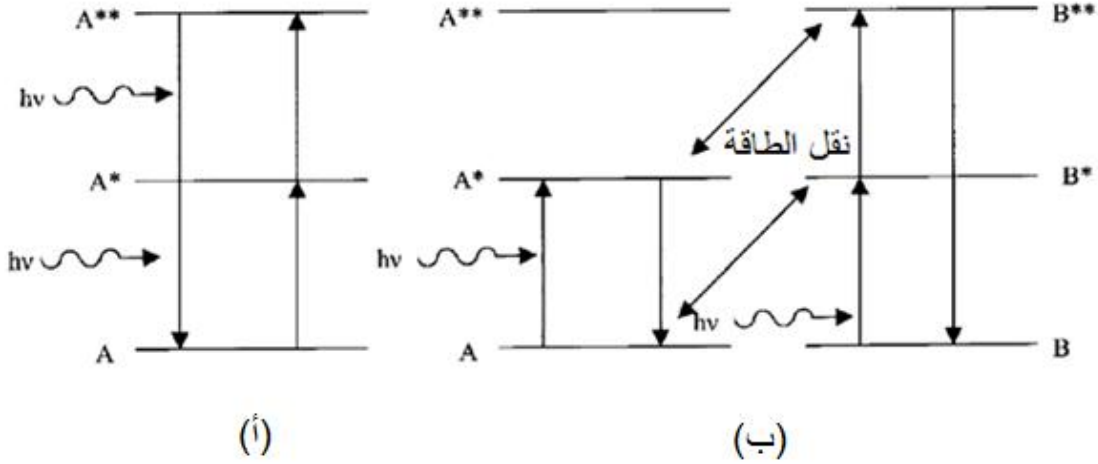


الشكل (11.II): نقل الطاقة بواسطة الفونونات.

### ➤ نقل الطاقة بالتحويل العلوي للتواترات (Energy transfer by up-conversion)

التحويل العلوي للتواترات (upconversion) هو عملية يؤدي خلالها انتقالان متتاليان لمستوى الأيون المانح إلى عبور الأيون المُستقبل إلى حالته المثارة بطاقة مساوية لضعف طاقة مستوى الأيون المانح. يُستخدم الفوتون الأول للوصول إلى الحالة المثارة الأولى  $A^*$  (بواسطة نقل طاقة رنيني، أو نقل الطاقة بمساعدة الفونونات)، ثم يقوم الفوتون الثاني بنقل أيون العناصر الترابية النادرة من الحالة  $A^* \leftarrow A^{**}$  (دائما، بواسطة نقل طاقة رنيني، أو نقل الطاقة بمساعدة الفونونات).

يمكن لعملية التحويل العلوي للتوا بتلت (upconversion) أن تجري بطريقتين مختلفتين: عن طريق امتصاص فوتونين اثنين بواسطة أيون واحد، وتسمى أيضا هذه العملية بعملية الامتصاص في الحالة المثارة، أو بواسطة الاسترخاءات المتقاطعة بين أيونين مثارين (انظر الشكل 12.II).



الشكل (12.II): عملية التحويل العلوي ل : (أ) فوتونين، (ب) أيونين.

## 7.II. خلاصة

فُمنّا في هذا الفصل بتسليط الضوء على المفاهيم الأساسية لمطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة من حيث التوزيع الإلكتروني و الأيونيني، و رأينا أن الطبقة  $4f$  مسؤولة على تشابه الصفات الكيميائية لهذه العناصر، و قد خصصنا عنصر الثوليوم كأحد عناصرها في دراستنا هذه، حيث فُمنّا بتحديد خصائصه الفيزيائية و الكيميائية و وضعنا رموزه الطيفية و من ثمّ تحديد مستويات طاقته. رأينا أيضا عند تفاعل أيونات العناصر الترابية النادرة مع الإشعاع الكهرومغناطيسي، فإنه يؤدي إلى نوعين من الآليات: الآليات الإشعاعية و التي تتحدث بثلاثة ظواهر أساسية: امتصاص، انبعاث تلقائي، انبعاث محفز للفوتونات، و آليات غير الإشعاعية ممكنة الحدوث أيضا، تُتميز هذه الآليات بوسائط طيفية مثل: المقطع الفعال للإمتصاص  $\sigma_a$  و المقطع الفعال للإنبعاث  $\sigma_e$  و أيضا فترة الحياة الإشعاعية و الغير إشعاعية  $\tau_{nr}$  و  $\tau_{rad}$  على الترتيب، هذه الوسائط مهمة في عملية نمذجة ليزر الثوليوم في الزجاج التي ستكون موضوع الفصل الموالي.



مراجع الفصل الثاني:

- [1] R. B. Heslop, P. L. Robinson, Chimie inorganique (Flammarion Sciences 1977).
- [2] Ying Tian, Liyan Zhang, Suyu Feng, Rongrong Xu, Lili Hu, Junjie Zhang, "2 $\mu$ m Emission of Ho<sup>+3</sup> -doped fluorophosphate glass sensitized by Yb<sup>+3</sup>", Optical Materials ,vol.32, pp 1508–1513, 2010.
- [3] O.Bentouila, "Etude de l'effet des terres rares dans les verres applications: lasers et amplificateurs optiques", mémoire de magister, Université de Ouargla, (2005).
- [4] A.Beggas, "Etat d'art des verres dopés aux ions terres rares (Application Amplificateur Optique)", mémoire de magister, Centre Universitaire d' El- Oued (2010).
- [5] Y.Jestin, "Verres fluorés à base de fluoroindates et fluorogallates pour l'implification optique: fibre à forte ouverture numérique, guides d'onde planaires et spectroscopie des ions de terre rare", thèse de doctorat, Université du Maine, (2002).
- [6] O. Maalej, "Verres et vitrocéramiques fluorés dopés terre rare et/ou métal de transition pour la conversion de l'énergie solaire", thèse de doctorat, Université du Maine, Université de sfax,(2015).
- [7] Los Alamos National Laboratory's Chemistry Division: Periodic Table - Thulium.
- [8] Krebs, Robert E, "The History and Use of Our Earth's Chemical Elements: A Reference Guide", 2006. ISBN 978-0-313-33438-2.
- [9] "Japan's Rare-Earth Jolt". Wall Street Journal. Retrieved 13 October 2010.

[10] Mary Elvira Weeks, The Discovery of the Elements XVI, Journal of chemical Education. October 1932, P1761,1762.

[11] Weast, Robert (1984). CRC, Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton, Florida: Chemical Rubber Company Publishing. pp. E110. ISBN 0-8493-0464-4.

[12] "Chemical reactions of Thulium". Webelements. Retrieved 2009-06-06.

[13] Patnaik, Pradyot (2003). Hand book of Inorganic Chemical Compounds. McGraw-Hill. p. 934. ISBN 0-07-049439-8.

[14] Jackson, M. (2000). "Magnetism of Rare Earth" (PDF). The IRM quarterly. 10 (3):1.

[15] V. Moizan, "Etude de l'amplification laser en bande II dans les fibres de verres chalcogénures", thèse de doctorat, Université de Rennes I, (2008).

[16] بيلا آ. لينكيل، "الليزرات"، جامعة سان فرناندو، جامعة كاليفورنيا، ترجمة فاروق عبودي قيصر، كلية العلوم، دار الكتب للطباعة و النشر، جامعة الموصل 1403هـ-1984م.

[17] Molecular Quantum Mechanics Parts I and II: An Introduction to QUANTUM CHEMISTRY (Volume 1), P.W. Atkins, Oxford University Press 1977, ISBN 0-19-855129-0.

[18] H.N. Russell, F.A. Saunders, News regularities in the spectra of the alkaline earth, The Astrophysical Journal, 61 (1925) 38-61.

[19] J. tennyson, Astronomical Spectroscopy, Imperial College Press London, 2005.

[20] Fartas, "Synthèse et étude spectroscopie que des matériaux solides dopes aux ions de terres rares, thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, (2004).

[21] Pavel Peterka, Ivan Kašík, Anirban Dhar, Bernard Dussardier, Wilfried Blanc. Thulium-doped silica fibers with enhanced 3H4 level lifetime : modelling the devices for 800–820 nm band. *SPIE Proceedings Series*, 2010, 7843, pp.78430A-1 - 78430A-9. [<hal-00561429>](#) .

[22] IonVasilief, Guides d'onde canaux amplificateurs en verres de fluorures dopées erbium: spectroscopie et amplification optique, Thèse Doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, (2003).

[23] د. محمد كوسا، "فيزياء الليزر وتطبيقاته"، كلية العلوم، منشورات جامعة دمشق، 2006-2005.

# الفصل الثالث

نمذجة ليزر التوليد في الزجاج

### 1.III. مقدمة

أدى اكتشاف الألياف البصرية إلى ثورة في عالم الاتصالات، حيث تمكن الباحثون من تطعيم الألياف الزجاجية ببعض أيونات العناصر الترابية النادرة ( $Tm^{+3}, Er^{+3}$ ) للحصول على مضخمات ذات كسب مرتفع، و لم يقتصر استعمال هذه الألياف على المضخمات فحسب بل تمكن الباحثون من استعمالها كوسط فعال لإنتاج ليزرات الليف البصري، و من هذه الليزرات ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم (TDFL) الذي اختير كمثال نموذجي في هذا الفصل، و على أساسه سيتم اقتراح نمذجة نظام ليزري مبسط يعمل وفق خطة ضخ معينة ومن ثم سنقوم بالحل العددي لهذا النظام البسيط ومناقشة نتائجه.

### 2.III. المضيفات

إنَّ أول استعمال للمضيفات مع العناصر الترابية النادرة كان عام (1961) من قبل الباحثين (L.F.Johnson and K.Nassau) في ليزر ( $Nd^{3+}:Cawo_4$ )، ومنذ ذلك الوقت أصبح شائعاً استعمال المضيفات البلورية أو الزجاجية (Crystal or Glass) في الكثير من التطبيقات مثل الرقائق المايكروية (Microchip) [1].  
يُمكن تجميع المضيفات الأكثر شيوعاً في الليزرات، التي يكون وسطها الفعّال مطعماً بعناصر الترابية النادرة إلى مجموعتين رئيسيتين هما [2]:

\* **مضيفات صلبة بلورية:** إذ أنَّ وسطها الفعّال يتكون من بلورة شفافة قد تكون مركبة من مواد عازلة مطعمة بأيونات مادة غريبة تحل محل بعض الأيونات الأصلية للبلورة [2-3].

\* **مضيفات زجاجية:** إذ يُعد الزجاج مضيفاً جيداً عملياً لأيونات العناصر الترابية النادرة بسبب خواصه البصرية، الحرارية، و الميكانيكية الممتازة، ومقارنة مع المضيفات الصلبة البلورية فلنجد المضيفات الزجاجية ذات كلفة واطئة في التصنيع كما لديها قدرة كبيرة لتخزين الطاقة، و كذلك تتوزع أيونات العناصر الترابية النادرة بانتظام في الزجاج، كما أن وجود عدم التناسق في تركيبه يجعله ذا حزمة امتصاص و انبعاث واسعة [1،4].

### 3.III. ليزر الثوليوم

كمثال نموذجي لمثل هذا النوع من الليزر نبدأ:

#### 1.3.III. ليزرات الليف البصري المطعم بالعناصر الترابية النادرة (Rare – earth doped optical fiber lasers)

الوسط الفعال في هذا النوع من الليزر عبارة عن ليف بصري، يطعم اللب الزجاجي (القلب) لهذا الليف بأحد عناصر الترابية النادرة مثل ( $Er^{3+}$ ،  $Yb^{3+}$ ،  $Tm^{3+}$ )، أما المضيفات شائعة الإستعمال في هذا النوع من الليزر هي زجاج (ZBLAN) أو زجاج (Silica).

يُعد ليزر الليف البصري بديلاً لنحج الليزر الحالة الصلبة في الكثير من التطبيقات الصناعية أو الطبية، لأنه محصن ضد التغيرات البيئية، و ذو قابلية عالية على تشتيت الحرارة المتولدة عند تشغيله، وقدرة خرجة مناسبة فعلاً لمثل هذه التطبيقات، وذو استقرار عالٍ نسبي عند طول موجي معين [2-3].

#### 1.1.3.III. ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم (Thulium – doped optical fiber laser) (TDFL)

إن أول ليزر ليف بصري مُطعم بالثوليوم، أُعلن عام (1988) من قبل (Southampton)، وهو عبارة عن ليف بصري أحادي النمط، لبه الزجاجي مطعم بالثوليوم. يُعد ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم ذو كفاءة جيدة مقارنة مع ليزرات الليف البصري الأخرى [5-6].

### 4.III. أطوال أمواج الضخ و الإصدار لأيون الثوليوم

استغل العديد من العناصر الترابية النادرة و نخص بالذكر عنصر الثوليوم  $Tm^{+3}$  في عدة دراسات تمت على ليزرات الألياف البصرية التي لها قابلية التشغيل على عدة أطوال موجية ممتدة إلى المستويات العليا. وهذه الأطوال الموجية مبينة كالتالي:

\* يقدر الطول الموجي الضخ بـ 1630nm و الذي يُضخ من المستوي ( ${}^3F_4$ )  $\rightarrow$  ( ${}^3H_6$ )، و يقدر الطول الموجي للإصدار الليزري بـ 1900nm من المستوي ( ${}^3H_6$ )  $\rightarrow$  ( ${}^3F_4$ ).

\* يقدر الطول الموجي الضخ بـ 1210nm و الذي يُضخ من المستوي ( ${}^3H_5$ )  $\rightarrow$  ( ${}^3H_6$ ).

\* يقدر الطول الموجي الضَّاخ بـ 790nm و الذي يُضخَّ من المستوي  $(^3H_4) \rightarrow (^3H_6)$ ، و يقدر الطول الموجي للإصدار الليزري بـ 800nm من المستوي  $(^3H_4) \rightarrow (^3H_6)$ .

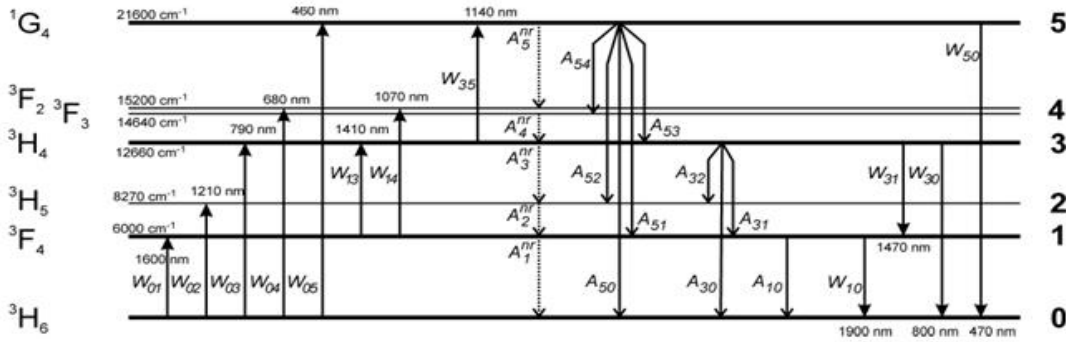
\* يقدر الطول الموجي الضَّاخ بـ 680nm و الذي يُضخَّ من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3F_{2,3})$ .

\* يقدر الطول الموجي الضَّاخ بـ 460nm و الذي يُضخَّ من المستوي  $(^1G_4) \rightarrow (^3H_6)$ ، و يقدر الطول الموجي للإصدار الليزري بـ 470nm من المستوي  $(^1G_4) \rightarrow (^3H_6)$ .

\* يقدر الطول الموجي الضَّاخ بـ 1410nm و الذي يُضخَّ من المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3H_4)$ ، و يقدر الطول الموجي للإصدار الليزري بـ 1470nm من المستوي  $(^3H_4) \rightarrow (^3F_4)$ .

\* يقدر الطول الموجي الضَّاخ بـ 1070nm و الذي يُضخَّ من المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3F_{2,3})$ .

\* يقدر الطول الموجي الضَّاخ بـ 1140nm و الذي يُضخَّ من المستوي  $(^3H_4) \rightarrow (^1G_4)$ .



الشكل (1.III): مخطط مستويات الطاقة لأيون الثوليم عند أطوال أمواج الضَّخ و الإصدار وفق المرجع [7].

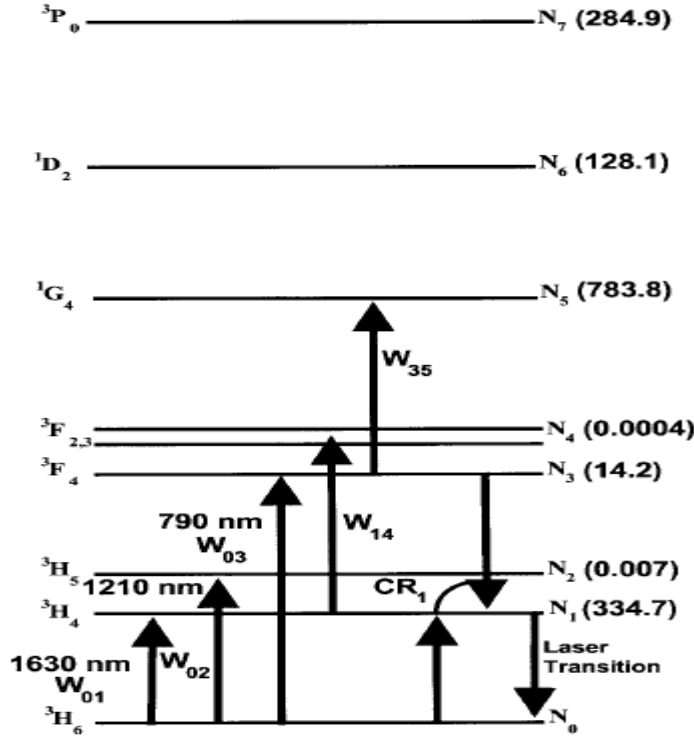
### 5.III. دراسات سابقة

هناك العديد من الدراسات السابقة نذكر منها على سبيل المثال لا الحصر مايلي:

دراسة ستيوارت وكينج [8]

قام ستوارت (Stuart D) و كينج (King) بنمذجة نظرية للثولوم المطعم في زجاج السيليكا لليف بصري والشكل

التالي يوضح مستويات طاقة أيون الثولوم  $Tm^{+3}$  لعدة أطوال موجية مضخة إلى المستويات العليا



الشكل (2.III): مخطط مستويات الطاقة لأيون الثولوم عند أطوال أمواج ضّخ مختلفة وفق المرجع [8]

وهي:

- \* الطول الموجي الضّاخ 1636 nm و الذي يُضخ من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3F_4)$  بنسبة  $w_{01}$ .
- \* الطول الموجي الضّاخ 1210 nm و الذي يُضخ من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3H_5)$  بنسبة  $w_{02}$ .
- \* الطول الموجي الضّاخ 790 nm و الذي يُضخ من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3H_4)$  بنسبة  $w_{03}$ .
- \* الطول الموجي الضّاخ 1070nm و الذي يُضخ من المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3F_{2,3})$  بنسبة  $w_{14}$ .
- \* الطول الموجي الضّاخ 1140nm و الذي يُضخ من المستوي  $(^3H_4) \rightarrow (^1G_4)$  بنسبة  $w_{35}$ .

كما يُوجد إصداراً ليزرياً بطول موجي يقدر بـ 2um من المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3H_6)$ .



و يوضح الشكل أيضا الإسترخاءات غير إشعاعية (Cross-Relaxation)  $CR_1$  من المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3H_4)$  و المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3H_6)$ .

حيث اعتمادا في نمذجتهما هذه على ثلاثة أنواع من الضخ و هي:

➤ **الضخ الأول:** و الذي يكون من المستوي  $(^3H_4) \rightarrow (^3H_6)$  بطول موجي يقدر بـ 790nm حيث قاما بنمذجة نظام ذي أربعة مستويات طاقة:

○ المستوى الأساسي  $(^3H_6)$  ذو التعداد  $N_0$  و الذي تضخ منه الذرات إلى المستوي  $(^3H_4)$  ذي التعداد  $N_3$  بنسبة  $w_{03}$  و بعدها تسترخي سريعا من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3F_4)$  بنسبة  $A_{10}$  في حين هناك إصداراً ليزريا يصدر بطول موجة 2 um، و إسترخاءات غير إشعاعية  $CR_1$  تصب في المستوي  $^3F_4$ ، و يوجد أيضا إسترخاء لبعض الذرات من المستوي  $(^3H_5) \rightarrow (^3H_4)$  بنسبة  $A_{32}$ .

➤ **الضخ الثاني:** و الذي يكون من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3F_4)$  بطول موجي يقدر بـ 1630nm حيث قاما بنمذجة نظام ذي مستويين طاقيين:

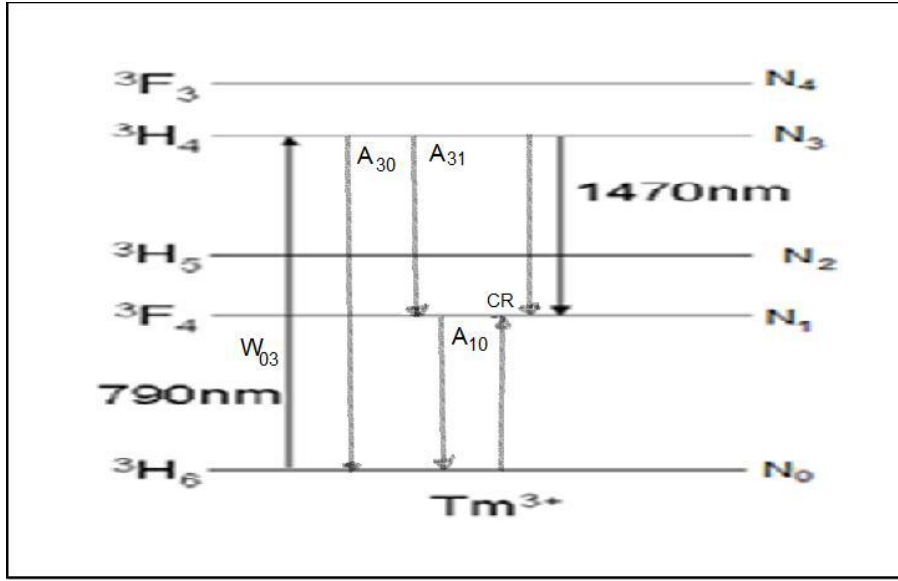
○ تُضخ الذرات التي في المستوي  $(^3H_6)$  مباشرة إلى المستوي  $(^3F_4)$  ذي التعداد  $N_1$  الذي يمتاز بفترة حياة طويلة تسمح بإملاء (تعمير) الذرات، في حين يتم الإصدار الليزري من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3F_4)$  بطول موجي يقدر بـ 2um.

➤ **الضخ الثالث:** و الذي يكون من المستوي  $(^3H_5) \rightarrow (^3H_6)$  بطول موجي يقدر بـ 1210nm حيث قاما بنمذجة نظام ذي ثلاثة مستويات طاقة:

○ تُضخ الذرات الموجودة في المستوي  $(^3H_6)$  إلى المستوي  $(^3H_5)$  ذي التعداد  $N_2$  بنسبة  $w_{02}$  و بعدها تسترخي سريعا من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3H_5)$  بنسبة 20. هناك إسترخاءات غير إشعاعية  $CR_1$  تصب في المستوي  $^3F_4$ ، في حين يوجد أيضا إسترخاء لبعض الذرات من المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3H_5)$  بنسبة  $A_{21}$ ، يتم الإصدار الليزري من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3F_4)$  بطول موجي يقدر بـ 2um في حين المستوي  $(^3F_4)$  يفرغ بعض الذرات سريعا بنسبة  $A_{10}$  في المستوي الأساسي  $(^3H_6)$ .

### دراسة ظاهير وغيبافي[9]

قام (Masaud Taher) و (Hrvoje Gebavi) بنمذجة ليزر الثوليوم المطعم في زجاج Tellurite وفق نظام ذي أربعة مستويات طاقة و التي تمثل مستويات الطاقة لأيون الثوليوم  $Tm^{+3}$  كما هو موضح في الشكل :

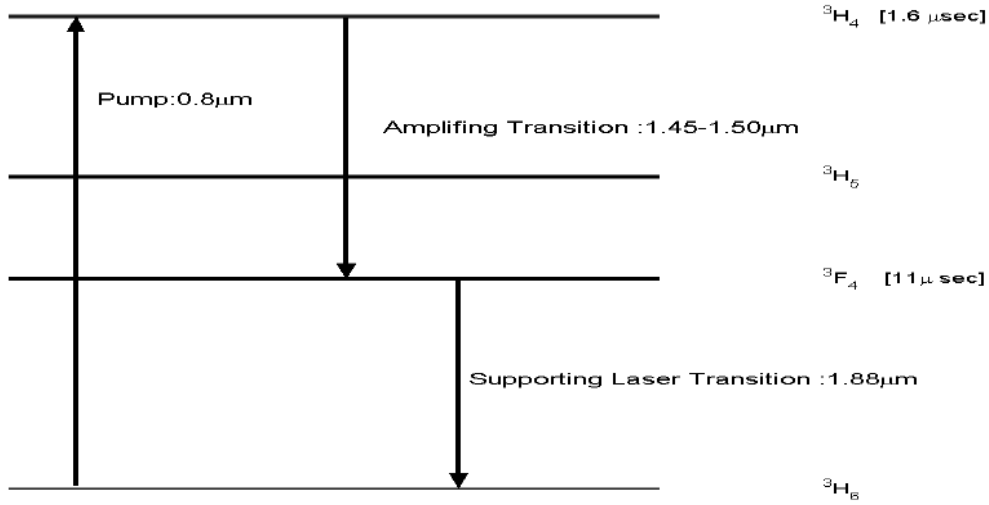


الشكل (3.III): مخطط مستويات الطاقة لأيون الثوليوم Tm<sup>3+</sup> [9].

يقوم الطول الموجي الضَّاح و الذي يقدر بـ 790nm بضخ الذرات التي في المستوى الأساسي (<sup>3</sup>H<sub>6</sub>) ذو التعداد N<sub>0</sub> إلى المستوى (<sup>3</sup>H<sub>4</sub>) ذي التعداد N<sub>3</sub> بنسبة W<sub>03</sub> و بعدها تسترخي سريعاً من المستوى (<sup>3</sup>H<sub>4</sub>) → (<sup>3</sup>H<sub>5</sub>) بنسبة A<sub>30</sub> كما يتم إسترخاءها من المستوى (<sup>3</sup>H<sub>4</sub>) → (<sup>3</sup>F<sub>4</sub>) بنسبة A<sub>31</sub> في حين هناك إصداراً ليزرياً يصدر بطول موجة تقدر بـ 1470 nm، و إسترخاءات غير إشعاعية CR تصب في المستوى <sup>3</sup>F<sub>4</sub>، ويوجد أيضاً إسترخاء لبعض الذرات من المستوى (<sup>3</sup>F<sub>4</sub>) → (<sup>3</sup>H<sub>6</sub>) بنسبة A<sub>10</sub>.

### دراسة تيسارين ولاينش [10]

قام (S Tessarin) و (M. Lynch) بنمذجة ليزر الثوليوم المطعم في زجاج ZBLAN لليف بصري، فكانت النمذجة لنظام ذي أربعة مستويات طاوية كما هو موضح في الشكل:



الشكل (4.III): مخطط مستويات الطاقة لأيون الثولوم  $Tm^{+3}$  في زجاج فيليوري [10].

يقوم الطول الموجي الضّاخ و الذي يقدر بـ  $790\text{nm}$  بضخ الذرات التي في المستوى الأساسي ( ${}^3H_6$ ) إلى ( ${}^3H_4$ ) كما يُوجد إصداراً ليزرياً بطول موجي يتراوح بين  $1.45\text{--}1.50\mu\text{m}$  من المستوي ( ${}^3F_4$ )  $\rightarrow$  ( ${}^3H_4$ ) وكذا يتم الإصدار الليزري من المستوي ( ${}^3H_6$ )  $\rightarrow$  ( ${}^3F_4$ ) بطول موجي يقدر بـ  $1.88\ \mu\text{m}$ .

### 6.III. النمذجة العددية لليزر الثولوم

من أجل دراسة وتفسير ديناميكية التعداد في نظام الليزر المختار، فإننا اقترحنا نموذجاً نظرياً مُبسّطاً مستندا على تحليل معادلات تطوّر كثافات التعداد لمختلف مستويات الطاقة ومعادلات تغيّر الاستطاعة. النموذج المقترح لا يأخذ في الحسبان عمليات نقل الطاقة من أجل التبسيط، وكذا نعتبر أنّ التغيّر في تعداد المستويات وفي الطاقة لا يتمّ إلا داخل مقطع صغير جداً من الليف البصري.

#### 1.6.III. معادلات التعداد

على ضوء مخطط الضخ ومستويات الطاقة فإننا يُمكن أن نبني نموذجاً لليزر، ولأجل هذا فإنه يجب صياغة وحل معادلات التطوّر الزمني والمكاني للتعداد الإلكتروني لكل مستوى طاقي مُعتبر في نفس الوقت مع حل معادلات تطوّر استطاعة الليزر.

بصورة عامة يُمكن كتابة معادلات تغيّر كثافة التعداد لمستوى طاقي  $i$  على الشكل التالي:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j R_{ji} N_j - \sum_j R_{ij} N_i + \sum_j W_{ji} N_j - \sum_j W_{ij} N_i + \sum_{j>i} A_{ji} N_j - \sum_{j<i} A_{ij} N_i$$

حيث:

$N_i$ : كثافة تعداد المستوى  $i$

$R_{ij} = \sigma_{ij} \frac{I_p}{h\nu_p}$ : نسبة الضخ من المستوى  $i$  إلى المستوى  $j$  عند طول موجة الضخ.

$W_{ij} = \sigma_{ij} \frac{I_s}{h\nu_s}$ : نسبة الضخ من المستوى  $i$  إلى المستوى  $j$  عند طول موجة الليزر.

$A_{ji}$ : نسبة الإصدار العفوي بين المستويين  $i$  و  $j$ .

### 2.6.III. معادلات الاستطاعة

$$\frac{dI_p}{dt} = (-\sigma_{12} \frac{I_p}{h\nu_p} N_2 + A_{21} N_2) h\nu_p \quad (1. III)$$

$$\frac{dI_s}{dt} = (\sigma_{21} \frac{I_s}{h\nu_s} N_2 + A_{21} N_2) h\nu_s \quad (2. III)$$

حيث:

$\sigma_{12}$ : المقطع الفعال للامتصاص من المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3H_6)$ .

$\sigma_{21}$ : المقطع الفعال للإصدار من المستوي  $(^3H_4) \rightarrow (^3F_6)$ .

$I_p$ : شدة الضخ

$I_s$ : شدة الإشارة

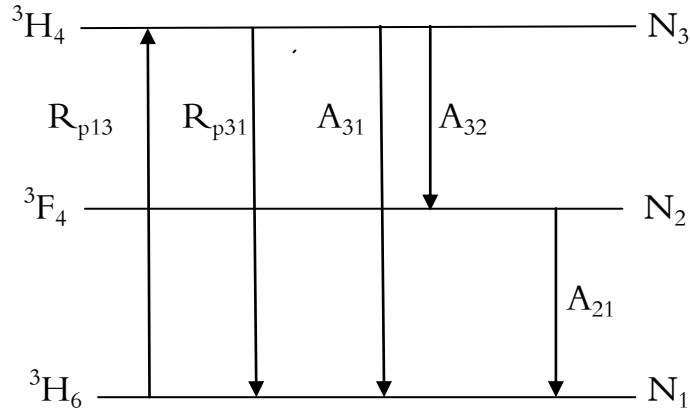
### 3.6.III. معادلات التعداد

نفترض في المعالجة النظرية نظاماً ليزرياً ذي ثلاثة مستويات طاقة، يهمل وفقاً لخطة الصّحّ الموضّحة في الشكل

(1.III). الطول الموجي الضاحّ الذي أُختير في هذه الدراسة يقدر بـ (790nm) و الذي يقوم بضخ الذرات بنسبة  $R_{p13}$

من المستوي  $(^3H_6) \leftarrow (^3H_4)$  في حين يتم نزولها بنسبة  $R_{p31}$  من المستوي  $(^3H_4) \leftarrow (^3H_6)$ . الذرات تنزل المثارة سريعا من المستوي  $(^3H_4) \leftarrow (^3F_4)$  بنسبة قدرها  $A_{32}$ ، وكذا من المستوي  $(^3H_4) \leftarrow (^3H_6)$  بنسبة قدرها  $A_{31}$ . تُصطاد هذه الذرات في المستوي  $(^3F_4)$  الذي يمتاز بفترة حياة طويلة تسمح بإملاء (تعمير) هذا المستوى، في حين هذا المستوي يُفْرغ بنسبة قدرها  $A_2$  إلى المستوى السفلي  $(^3H_6)$ . يتم حدوث الإصدار الليزري عند الطول الموجي  $2 \times 10^3 \text{ nm}$  من المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3H_6)$ .

يعطى مخطط منظومة ليزر ذو ثلاثة مستويات طاقة على الشكل التالي:



الشكل (5.III): منظومة ليزر ذو ثلاثة مستويات طاقة

تعطى معادلات تغير التعداد في هذه الحالة كما يلي:

$$\frac{dN_1}{dt} = (R_{p31}N_3 - R_{p13}N_1) + A_{21}N_2 + A_{31}N_3 \quad (3. \text{III})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = A_{31}N_3 - A_{21}N_2 \quad (4. \text{III})$$

$$\frac{dN_3}{dt} = (R_{p13}N_1 - R_{p31}N_3) - A_{21}N_2 \quad (5. \text{III})$$

حيث:

$$R_{p13} = \sigma_{13} \frac{I_p}{h\nu_p} \text{ نسبة الضخ للإنتقال من المستوي } (^3H_6) \rightarrow (^3H_4)$$

$$R_{p31} = \sigma_{31} \frac{I_p}{h\nu_p} \text{ نسبة الضخ للإنتقال من المستوي } (^3H_4) \rightarrow (^3H_6)$$

$$\tau_2 : \text{فترة حياة المستوي } ^3F_4$$

$$A_{31} : \text{نسبة العفوي للإنتقال من المستوي } (^3H_4) \rightarrow (^3H_6)$$

$A_{13}$ : نسبة العفوي للإنتقال من المستوي  $(^3H_6) \rightarrow (^3H_4)$ .

$A_{21}$ : نسبة العفوي للإنتقال من المستوي  $(^3F_4) \rightarrow (^3H_6)$ .

### 7.III. الحل العددي لمعادلات انقلاب التعداد

قمنا بحل المعادلات التفاضلية (معادلات التعداد) بواسطة برنامج الماتلاب (MATLAB) الذي يحتوي على مجموعة من الوظائف المتخصصة لحل مثل هذه المعادلات والتي تعرف بـ ode ومن بينها: ode15s، ode23، ode45، ode23t، ode23s، تختلف هذه الوظائف عن بعضها البعض في مدى دقتها و الجهد المتطلب من الكمبيوتر بذله عند إستخدامها وفي نوع المشكلة المطروحة للدراسة و بحسب نوع المشكلة تختلف دقة الوظيفة وسرعة عملها، لذلك يفضل إختيار النوع المناسب لحل المشكلة المناسبة.

Ode45: و هي عبارة عن نظام حل بخطوة واحدة أي أنها تحتاج عند حساب الحل في اللحظة  $t_n$  لمعرفة القيمة التي تسبقها مباشرة  $y(t_{n-1})$ .

Ode23: هذه الطريقة أكثر فعالية من سابقتها و هي أيضا طريقة وحيدة الخطوة. في عملنا هذا قمنا باستخدام الوظيفة ode23t لاستخراج النتائج .

يوضح الجدول التالي قيم الوسائط التي أستعملت في برنامج الماتلاب.

المرجع	الوحدة	القيمة	الوسائط
[9]	m	$7.9 \times 10^{-7}$	$\lambda_p$
[10]	$S^{-1}$	75.1	$A_3$
[10]	$S^{-1}$	123.8	$A_2$
[11]	$m^2$	$2.8 \times 10^{-25}$	$\sigma_{13}$
[11]	$m^2$	$1.274 \times 10^{-24}$	$\sigma_{31}$

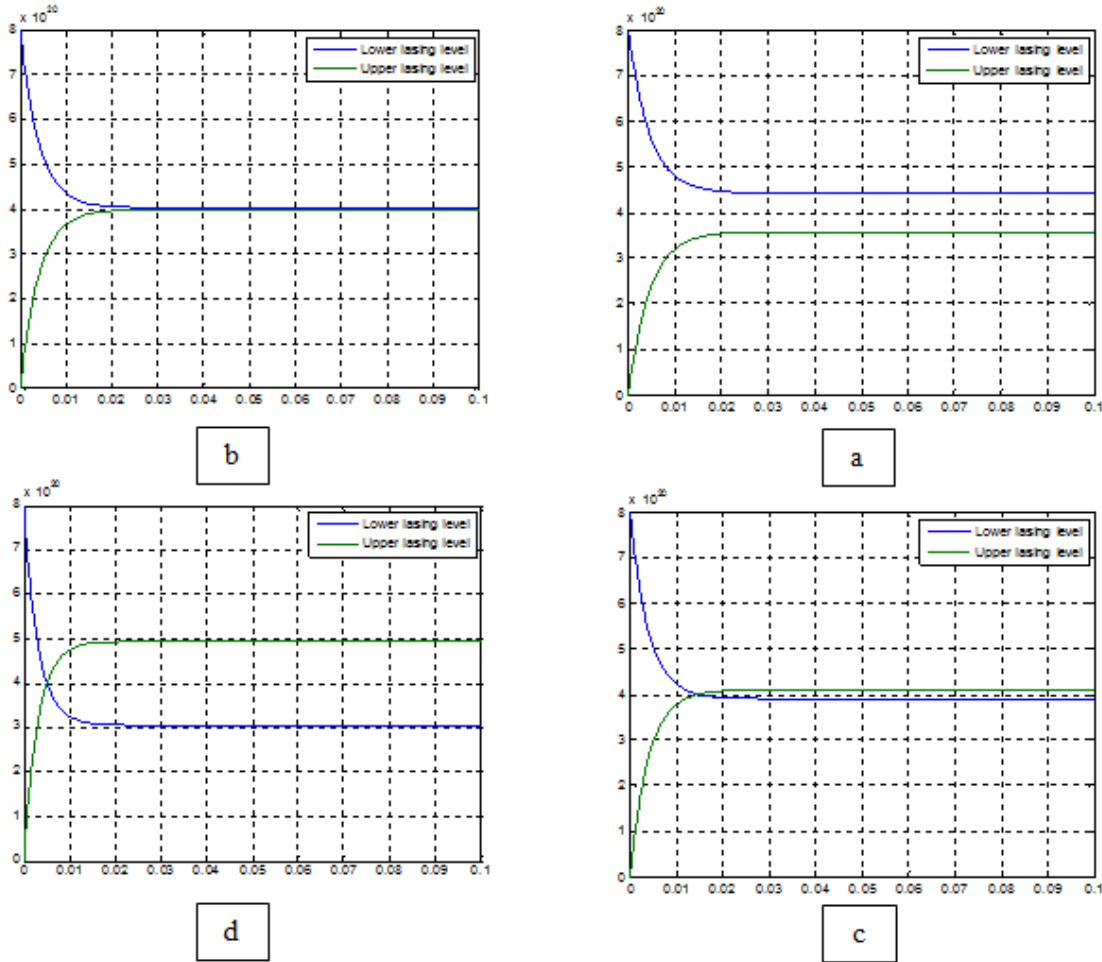
الجدول (1.III): قيم الوسائط التي أستعملت في برنامج الماتلاب.

إنّ دراسة النظام المقترح تؤول إلى دراسة نظام ذي مستويين طاقيين، وذلك اعتمادا على افتراض أنّ تعداد المستوى الثالث يؤول إلى الصفر، أي أنّ الضخ يتم مباشرة إلى المستوى الثاني. الاهتزاز الليزري يتم بين المستويين  $^3F_4$  و  $^3H_6$  ، وبواسطة الضخ عند الطول الموجي 790nm، يتم ضخ الذرات إلى المستوى الأعلى  $^3H_4$  ، وباعتبار أن فترة هذا المستوى صغيرة جدًا، فإن هذه الذرات تمرّ شبه أنيا إلى المستوى الأدنى  $^3F_4$  (يمثل هنا المستوى الأعلى لليزر) والذي فترة حياته كبيرة نسبيا ( في حدود 10ms) ممّا يؤدّي إلى بدء إملائه، في حين أنّ المستوى الأساسي  $^3H_6$  (يمثل هنا المستوى الأدنى لليزر) يتمّ تفريغه، وبما أنّ

فترة حياة هذا الأخير لانهائية (المستوى الأساسي)، فإن ذرات المستوى  $^3F_4$  تحبب عفويًا نحو المستوى الأساسي. للحصول على مفعول الليزر لا بد أن يتحقق شرط انقلاب التعداد، أي أن تعداد المستوى الثاني يكون أكبر من تعداد المستوى الأول لليزر، من أجل هذا فإن نسبة الضخ لا بد أن تكون معتبرة بما فيه الكفاية.

### 8.III. تحديد استطاعة العتبة لحدوث مفعول الليزر

كما ذكرنا في الفقرة السابقة، فإنه من أجل حدوث الليزر، لا بد أن يتحقق شرط انقلاب التعداد، والذي يعتمد على مقدار نسبة الضخ، هناك نسبة ضخ حدية (عتبة) موافقة لقيمة استطاعة ضخ العتبة والتي بعدها يبدأ الليزر في الاشتغال. لتحديد قيمة استطاعة العتبة في نموذجنا المقترح، قمنا بمحاكاة التطور الزمني لكثافات التعداد من أجل قيم مختلفة لنسب الضخ الشكل (6.III) يوضح تغيير كثافات التعداد بدلالة الزمن من أجل قيم مختلفة لنسب الضخ.



الشكل (6.III): تغيير كثافات التعداد بدلالة الزمن من أجل قيم استطاعة مساوية :

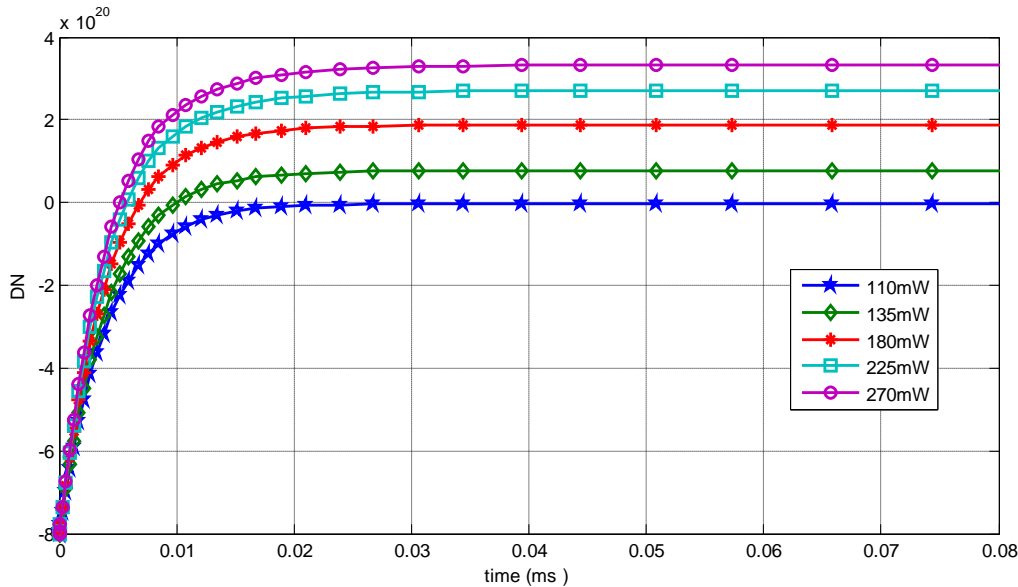
180mW (d)، 120mW (c)، 110mW (b)، 90mW (a)

نلاحظ من الشكل العام لجميع المنحنيات أنها تتميز بمنطقتين، المنطقة الأولى منطقة تزايد أو نقصان في التعداد، وهي موافقة لعملية إملء أو تفريغ المستويات تحت تأثير الضخ، ثم منطقة ثبات واستقرار (أو تشبع) وهي توافق الحالة المستقرة ( $\frac{dN_i}{dt} = 0$ ) إذ تأخذ فيها كثافات تعداد المستويين قيما ثابتا تحت تأثير الضخ المستمر.

كما نلاحظ أن القيمة الحدية للاستطاعة من أجل الحصول على مفعول الليزر (انقلاب تعداد) تكون في حدود (110mW) (الشكل (b))، إذ عند هذه القيمة تتساوى كثافتي التعداد للمستويين في النظام المستقر (في حالتنا هذه  $N_1 = N_2 \approx \frac{N_T}{2}$ ). إذن يجب انتقاء الضخ بحيث تكون الاستطاعة المُضخَّعة أكبر من هذه القيمة الحدية، إذ أنه عند الضخ باستطاعة أقل فإن تعداد المستوى الأساسي يكون دوماً أكبر من تعداد المستوى الأعلى ولا يحدث انقلاب تعداد كما هو موضح بالشكل (a). عند الضخ باستطاعة مساوية لاستطاعة العتبة فإن الفرق في التعداد يكون معدوماً ولا يوجد تضخيم، أما عند القيم الأعلى من قيمة استطاعة العتبة فإن تعداد المستوى الثاني ليزر يكون أكبر من تعداد المستوى الأول في الحالة المستقرة والفرق في التعداد يكون موجبا (الشكلين (c) و (d)).

### 9.III. التغير الزمني للفرق في التعداد بدلالة استطاعة الضخ

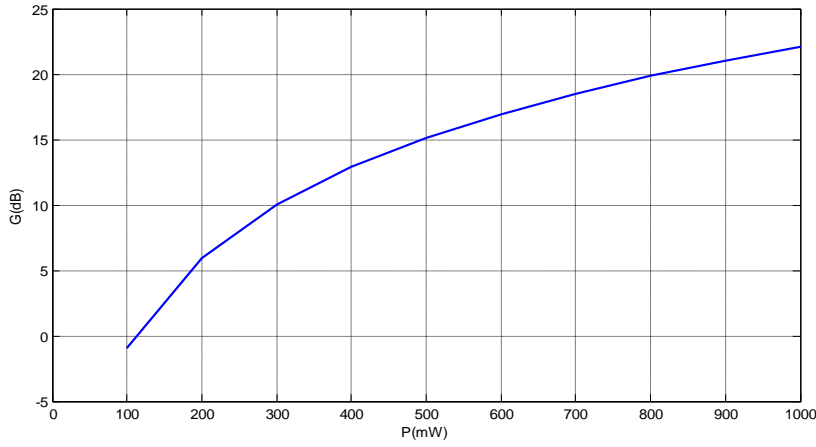
يبين الشكل التغير الزمني للفرق في التعداد بين مستويي الليزر المُعتبرين بدلالة تغير استطاعة الضخ، ونلاحظ تأثير الضخ على انقلاب التعداد، فكلما زادت قيمة استطاعة الضخ زادت قيمة الفرق في التعداد، أي زيادة تعداد المستوى الثاني ونقصان تعداد المستوى الأول.



الشكل (6.III): التغير الزمني للفرق في التعداد بدلالة استطاعة الضخ



### 10.III. تغيير الريح بدلالة استطاعة الضخ



الشكل (7.III): التغيير الزمني للريح بدلالة استطاعة الضخ

يبين الشكل تغيير الريح بدلالة استطاعة الضخ ، نلاحظ أنه كلما زادت قيمة استطاعة الضخ زادت قيمة ربح الليزر، حيث يكون الريح أكبر من 20dB في حدود 1000mW.

### خلاصة

بعد اقتراحنا لنموذج نظري يدرس نظاما ذي ثلاثة مستويات مستنديين على تحليل معادلات تطوّر كثافات التعداد لمختلف مستويات الطاقة، وانطلاقا من برنامج الماتلاب الذي أدخلت إليه معادلات تغيير التعداد من أجل قيم مختلفة لنسب الضخ، تمكنا من إيجاد النتائج التالية : تغيير كثافات التعداد بدلالة الزمن من أجل عدة قيم للاستطاعة و التغيير الزمني للفرق في التعداد بدلالة استطاعة الضخ، تغيير الريح بدلالة استطاعة الضخ . وبعد تحليل ومناقشة هذه النتائج توصلنا أنه من أجل حدوث الليزر، لابد من تحقق شرط انقلاب التعداد و الذي لا يتحقق إلا إذا كانت استطاعة الضخ أكبر من ال قيمة الحدية و التي حددت ب (110mW). كما رأينا أنه كلما زادت قيمة استطاعة الضخ زادت قيمة الفرق في التعداد ، كما أن الريح يكون يتزايد بتزايد استطاعة الضخ ويكن في حدود 20dB في حدود 1000mW.

مراجع الفصل الثالث:

- [1] R.Paschotta," Optical Fiber Technology" SPIE Field Guides Volume FG16, P (1-30), (2010).
- [2] S.D.Emami, S.W. Harun, F.Ab.Rahman, H.A.Abdul .Rashid, S.A.Dand, Z.A.Ghaniand and H.Ahmed, A theoretical study of Double – Pass Thulium – Doped Fiber Amplifiers" *Optik*, V (121), P (1257 –1262) (2010).
- [3] P.J.Suni, D.C.Hanna, R.M.Percival, I.R.Perry, R.G.Smart, J.E.Townsed and A.C.Tropper,"Lasing Characteristics of Ytterbium, thulium and other Rare Earth Doped Silica based Fibers",*SPIE*, V (1171), P (234–250) (1989).
- [4] J.L.Doualan, S.Girard, H.Haauin, J.L.Adam and J.Montagne,"Spectroscopic Properties and Laser Emission of Tm –Doped ZBLAN glass at 1.8 $\mu$ m" *Optical Materials*, V (24), P (563–574) (2003).
- [5] M.S.I.Sarker, "Two Micron Tm –Doped ZBLAN Double –clad Fiber Laser" M.S.Thesis, University of Adelaide, P (25–35), (2011).
- [6] V.Sudesh, T.S.Mccomb, R.A.Sims, L.Shah, M.Richardson, and J.Stryjewski."Latest Development in High –Power, Tunable, Cw, narrow line Thulium Fiber Laser for development of the ISTEf" ,*Proc of SPIE V(7325,73250B)* ,P(1–8) , (2009).
- [7] Pavel Peterka, Ivan Kasik, Anirban Dhar, Bernard Dussardier, Wilfried Blanc. Theoretical modeling of fiber laser at 810 nm based on thulium–doped silica fibers with enhanced 3H4 level lifetime. *Optics Express*, Optical Society of America, 2011, 19 (3), pp.2773. <10.1364/OE.19.002773>. <hal-00561410>
- [8] Stuart D. Jackson and Terence A. King: Theoretical Modeling of Tm–Doped Silica Fiber Lasers, *Journal of lightwave technology*. 17, N°. 5, Mai 1999.
- [9] I. Vasilief, "Guides d'onde canaux amplificateurs en verres de fluorures dopées erbium: spectroscopie et amplification optique", Thèse Doctorat, Université Claude Bernard – Lyon I, (2003).
- [10] S Tessarin, M. Lynch, J.F. Donegan and G. Mazé, Thulium doped ZBLAN fibre ring-cavity amplifier, *Proc. of SPIE Vol. 5825* (SPIE, Bellingham, WA, 2005) · 0277-786X/05/\$15 · doi: 10.1117/12.605174.

## مراجع الفصل الثالث

---

- [11] G. Keiser, "optical Fiber Communication" 3<sup>nd</sup> edition Mcgraw – Hill International editions Series in Electrical Engineering, P(19,21), (2000).
- [12] G.P.Agrawal, "Fiber Optic Communication Systems" 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons INC, P (31, 35), (1997).

## الخلاصة العامة

يتمحور هذا العمل حول نمذجة ليزر الثوليوم في الزجاج، من أجل ذلك قمنا في البداية بإعطاء حوصلة وجيزة تلخص فيها فيزياء الليزر من حيث تعريف الليزر، أنواعه و أيضا مختلف تطبيقاته المختلفة، بعدها تطرقنا في الفصل الثاني إلى دراسة مطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة و ركّزنا على عنصر الثوليوم، حيث قمنا بتحديد رموزه الطيفية وتحديد مستويات طاقته ، بعدها انتقلنا إلى الفصل الثالث و الذي يدرس نمذجة ليزر الثوليوم في الزجاج، هذه النمذجة تتم بالحل العددي لمعادلات تعداد المستويات الطاقوية لأيون الثوليوم، حيث اقترحنا نموذجا نظريا مُبسّطا مستندا على تحليل معادلات تطوّر كثافات التعداد لمختلف مستويات الطاقة لأيون الثوليوم، ومن هذا النموذج المقترح توصلنا إلى:

- ✓ تحديد استطاعة العتبة لحدوث مفعول الليزر حيث هناك نسبة ضخ حدّية (عتبة) موافقة لقيمة استطاعة الضخ العتبة والتي بعدها يبدأ الليزر في الاشتغال تقدر هذه القيمة ب(110mW).
- ✓ تمثيل التغيّر الزمني للفرق في التعداد بدلالة استطاعة الضخ فوجدنا أنه كلما زادت قيمة استطاعة الضخ زادت قيمة الفرق في التعداد وهذا ما يعطي مؤشر على حدوث مفعول الليزر.
- ✓ تغيّر الريح بدلالة استطاعة الضخ، أي كلما تزداد استطاعة الضخ يزداد ربح الليزر. نتائج هذا النموذج المقترح كانت مقبولة، حيث نطمح مستقبلا في تعديل وتطوير هذا النموذج بإدخال الحدود الواصفة لنقل الطاقة بين مختلف المستويات الطاقوية ونسب التفرّع والاسترخاءات غير الاشعاعية وكذا الضياعات وغيرها من الظواهر التي تؤثر وتساهم في ملء أو إفراغ هذه المستويات الطاقوية وبالتالي التأثير على خصائص الليزر. وكذا نطمح إلى دراسة تغيّر الاستطاعة الليزرية في الزمن وعلى طول الليف البصري. هذا النموذج معقّد جدا، ويشكّل موضوعا لدراسات قادمة.

بعض الثوابت الفيزيائية

الوحدة	القيمة	الرمز	الثابت
J.S	$6.626 \times 10^{-34}$	H	ثابت بلانك
Cb	$1.602 \times 10^{-19}$	E	شحنة الإلكترون
J.K <sup>-1</sup>	$1.381 \times 10^{-23}$		ثابت بولتزمان
Kg	$9.1 \times 10^{-31}$	m <sub>e</sub>	كتلة الإلكترون
m.s <sup>-1</sup>	$2.998 \times 10^8$	C	سرعة الضوء في الفراغ

الخواص الذرية لعنصر الثوليوم

الخواص الذرية لعنصر الثوليوم	
Tm ، 69 ، ثوليوم	لاسم، العدد الذري، الرمز الذري
لانثانيدات	السلسلة
	المظهر
رمادي فلزي	اللون
صلب	الطور
معدن	تصنيف العنصر
$168.93421 \text{ g.mol}^{-1}$	الكتلة الذرية
$9.32 \text{ g. cm}^{-3}$	الكثافة
$[\text{Xe}]4f^{13} 5d^0 6s^2$	التوزيع الإلكتروني
نظام بلوري سداسي	البنية البلورية

التوزيع الإلكتروني و الأيوني للعناصر الترابية النادرة و طاقة تأينها.

طاقة التأين kJ·mol <sup>-1</sup>	Ln <sup>3+</sup> التوزيع الأيوني	Ln التوزيع الإلكتروني	رمز العنصر	العنصر	العدد الذري Z
538.1	[Xe] 4f <sup>0</sup>	[Xe] 4f <sup>0</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	La	لانثانيوم	57
534.4	[Xe] 4f <sup>1</sup>	[Xe] 4f <sup>2</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Ce	سيريوم	58
527	[Xe] 4f <sup>2</sup>	[Xe] 4f <sup>3</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Pr	براسيوديميوم	59
533.1	[Xe] 4f <sup>3</sup>	[Xe] 4f <sup>4</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Nd	نيوديوم	60
540	[Xe] 4f <sup>4</sup>	[Xe] 4f <sup>5</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Pm	بروميثيوم	61
544.5	[Xe] 4f <sup>5</sup>	[Xe] 4f <sup>6</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Sm	ساماريوم	62
547.1	[Xe] 4f <sup>6</sup>	[Xe] 4f <sup>7</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Eu	يوروبيوم	63
593.4	[Xe] 4f <sup>7</sup>	[Xe] 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	Gd	جادولينيوم	64
565.8	[Xe] 4f <sup>8</sup>	[Xe] 4f <sup>9</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Tb	تربيوم	65
573	[Xe] 4f <sup>9</sup>	[Xe] 4f <sup>10</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Dy	ديسبروسيوم	66
581	[Xe] 4f <sup>10</sup>	[Xe] 4f <sup>11</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Ho	هولميوم	67
589.3	[Xe] 4f <sup>11</sup>	[Xe] 4f <sup>12</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Er	إيريوم	68
<b>596.7</b>	<b>[Xe] 4f<sup>12</sup></b>	<b>[Xe] 4f<sup>13</sup> 5d<sup>0</sup> 6s<sup>2</sup></b>	<b>Tm</b>	<b>ثوليوم</b>	<b>69</b>
603.4	[Xe] 4f <sup>13</sup>	[Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup>	Yb	إيتربيوم	70
523.5	[Xe] 4f <sup>14</sup>	[Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	Lu	لوتيتيوم	71

## ملخص

الهدف من هذا العمل نمذجة ليزر الثوليوم في الزجاج، من أجل هذا قمنا في البداية بدراسة عامة حول الليزر ثم تطرقنا إلى العناصر الترابية النادرة التي تُستعمل في تطعيم الزجاج للحصول على مفعول الليزر، كما أوردنا بعض الدراسات السابقة التي تناولت موضوع نمذجة الثوليوم في مختلف أنواع الزجاج وبمختلف أنواع الضخ والطول الموجي للإصدار. وفي الأخير اقترحنا نموذج مُبسط لليزر ذي ثلاثة مستويات، وقمنا بالحل العددي لمعادلات التغير الزمني للتعداد بدلالة استطاعة الضخ، ووجدنا أن قيمة استطاعة العتبة مساوية لـ  $110\text{mW}$ ، كما قمنا بدراسة تغيّر الفرق في التعداد والريح بدلالة استطاعة الضخ. نتائج هذا النموذج المبسط كانت مقبولة في حدود التقريبات المأخوذة، مما يُشجّع على دراسة أكثر تعقيدا بالأخذ بعين الاعتبار مختلف الظواهر المؤثرة على اشتغال الليزر.

الكلمات المفتاحية: نمذجة، ليزر الثوليوم، زجاج مطعم، أيونات ترابية نادرة.

## Résumé

L'objectif de ce travail modélisation d'un laser de thulium dans les verres, pour cela, une étude générale sur le laser à été réalisé, puis nous avons traité les éléments de terres rares utilisés dans le dopage du verre pour obtenir l'effet laser. Des études antérieures sur le sujet de la modélisation de thulium dans divers types de verre et les différents types de pompage et longueur d'onde à été cités. Enfin, on a proposé un modèle simplifié d'un laser de thulium à trois niveaux, et on a résoudre numériquement les équations de variation temporelle du population en fonction de puissance de pompage, et on a constaté que la valeur de la puissance de seuil est égale à  $110\text{mW}$ , on étudié la variation la différence de la population et le gain en fonction de la puissance de pompage. Les résultats de ce modèle simplifié sont acceptable dans les approximations prises en compte, ce qui encourage pour étudier un model plus complexe en prenant en compte des différents phénomènes affectant le fonctionnement du laser.

**Mots-clés:** modélisation, laser de thulium, verre dopé, les ions terres rares.

## Abstract

Aim of this work is the modeling of Thulium laser in glass. For this, a general study on the laser was performed. Then we discussed the rare earth elements which used in glass as dopants in aim to obtain the laser effect. Previous studies on modeling of laser thulium in different types of glass in different types of pumping and wavelength were cited. Finally, we proposed a simplified three-level model of thulium laser, and we solved numerically the temporal evolution of the population in function of puissance pump. We found that the threshold value is equal to  $110\text{mW}$ . The results of this simplified model were acceptable within the approximations taken, thus encouraging for a more complex study by taking into account the various phenomena affecting laser operation.

**Keywords:** modeling, tholium laser, doped glass, rare earth ions.