

جامعة قاصدي مرباح، ورقلة-الجزائر

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء



مذكرة ماستر أكاديمي

المجال: علوم المادة

شعبة: فيزياء

تخصص: فيزياء الاشعاع

مقدمة من طرف الطالبة:

إيمان راشدي

بعنوان:

تحديد الخواص الطيفية وأداء الليزر لوجاج فليورفوسفاتي مطعم بالتوليوم

نوقشت بتاريخ : 2022/06/08 أمام اللجنة المكونة من السادة:

رئيسا	أستاذ تعليم عال، جامعة قاصدي مرباح ورقلة	لزهر بن مبروك
مناقشا	أستاذ مساعد "أ"، جامعة قاصدي مرباح ورقلة	إبراهيم غربي
مدعوا	أستاذ مساعد "أ"، جامعة قاصدي مرباح ورقلة	بوعنان رابح
مشرفا ومقررا	أستاذ محاضر "أ"، جامعة قاصدي مرباح ورقلة	عمر بن طويلة

السنة الجامعية 2022/2021

الإهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى:

من حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم إلى القلب الكبير **أبي الغالي**

أطال الله في عمره ورزقه الصحة وعافية وأحسن عمله وأجزل له الخير والمغفرة

وإلى من أخص الله الجنة تحت قدميها وإلى من كان دعائها سر نجاحي وتفوقي

وحنانها بلسم جراحي إلى قرة عيني وفؤادي **أمي الغالية**

أطال الله في عمرها وأعاني على برها ورزقني رضاها وأجزل لها الخير والمغفرة

وإلى القلوب الطاهرة الرقيقة والنفوس البريئة إلى رياحين حياتي **أخواتي**

وإلى من حول الفشل إلى نجاح مبهر فكم أخطأت فقومني بأحسن أسلوب

وكم أحسنت فكان لي مشجعا وأتقنت فكان لي محفزا

أستاذي الفاضل **عمر بن طويلة** أطال الله في عمره

وإلى أصدقائنا وكل رفقاء الدراسة أدامهم الله رونقا لحياتنا.

وإلى كل من غضب عندما لم يجد اسمه مكتوب على الورقة فاسمه في القلب محفوظ.

اهدي لكم هذا العمل سائلة المولى عز وجل أن يرزقكم بالخيرات ويمدكم بالصحة والعافية.

إيمان راشدي

الشكر والعرفان

(رَبِّ اشْرَحْ لِي صَدْرِي * وَيَسِّرْ لِي أَمْرِي * وَاحْلُلْ عُقْدَةً مِّن لِّسَانِي * يَفْقَهُوا قَوْلِي) سورة طه، الآيات: 25-28

الشكر والحمد لله ما دمت حيا، والصلاة والسلام على سيدنا محمد نبيا (صلى الله عليه وسلم)

أتقدم بالشكر والتقدير لكل من مد لي يد العون وساعدني في انجاز هذا العمل المتواضع وفاء وتقديرا، أخص بجزيل الشكر والامتنان إلى الأستاذ المشرف عمر بن طويلة على ما بذله من جهد طيب، من خلال إشرافه على هذه المذكرة، والذي لم يبخل علي بوقته وعلمه لإتمام هذا الجهد المتواضع، والشكر موصول الى رئيس اللجنة والأستاذ المناقش.

كما أتقدم بالشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة الموقرين: الأستاذ لزهري مبروك، والأستاذ إبراهيم غربي، والأستاذ راجح بوحنان، فلهم مني جزيل الشكر على ما أولوه من جهد ووقت في سبيل تمحيص هذا العمل.

وإلى كل من وقف على المنابر وأعطى من حصيلة فكره لينير دربنا إلى الأساتذة الكرام كل باسمه.

فجزى الله عني الجميع خيرا الجزاء وجعلها في ميزان حسناتهم يوم القيامة.

إيمان راشدي

قائمة المحتويات

الصفحة	المحتويات
III	الإهداء
IV	الشكر والعرفان
V	قائمة المحتويات
IX	قائمة الجداول
IX	قائمة الأشكال
XI	قائمة الترميز
أ	المقدمة العامة
الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة	
1	I-1 المقدمة
1	I-2 العناصر الترابية النادرة
3	I-3 التوزيع الإلكتروني للعناصر الترابية النادرة وايوناتها
3	I-3-1 التوزيع الإلكتروني للعناصر الترابية النادرة
3	I-3-2 التوزيع الإلكتروني لأيونات العناصر الترابية النادرة
3	I-4 مطيافية العناصر الترابية النادرة
3	I-4-1 الأعداد الكمية
7	I-4-2 الرموز الطيفية
4	I-4-3 الرموز الطيفية لأيون الثوليوم
6	I-4-4 مستويات الطاقة
8	I-4-5 قواعد الانتقال
8	I-5 تفاعل الإشعاع مع أيونات العناصر الترابية النادرة
8	I-5-1 الانتقالات الإشعاعية
13	I-5-2 الانتقالات غير الإشعاعية
14	I-6 الإتساع الطيفي
14	I-6-1 التعريض الطبيعي
16	I-6-2 تعريض دوبلر
17	I-6-3 تعريض التصادمات
17	I-7 نقل الطاقة
17	I-7-1 نقل الطاقة الرنيني
18	I-7-2 نقل الطاقة بمساعدة الفوتونات
19	I-7-3 نقل الطاقة بالتحويل العلوي
20	I-7-4 المردودية الكمية
21	I-8 خلاصة الفصل الأول

22	مراجع الفصل الأول
الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة	
23	II - 1 المقدمة
23	II2 - الليزر والتضخيم الضوئي
23	II - 2-1 خصائص شعاع الليزر
24	II - 2-2 مكونات جهاز الليزر
25	II - 2-3 أنواع الليزر
26	II - 2-3-1 ليزرات الحالة الصلبة
26	II - 2-3-2 ليزرات الحالة السائلة
26	II - 2-3-3 ليزرات الحالة الغازية
27	II - 2-4 شروط انبعاث الليزر
27	II - 2-4-1 الانبعاث المحفز
27	II - 2-4-2 التعداد العكوس
27	II - 2-4-3 التضخيم الضوئي
28	II - 2-5 الريح
29	II - 2-6 المنظومة الليزرية
29	II - 2-6-1 نظام ثلاثي المستويات
30	II - 2-6-2 نظام رباعي المستويات
31	II - 3 الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة
31	II - 3-1 بنية الزجاج
31	II - 3-1-1 البنية البسيطة للزجاج
31	II - 3-1-2 البنية المركبة للزجاج
31	II - 3-2 خواص الزجاج
32	II - 3-2-1 الخصائص الضوئية
33	II - 3-2-2 الخصائص الكهربائية
33	II - 3-2-3 الخصائص الحرارية
34	II - 3-2-4 الخصائص الميكانيكية
34	II - 3-2-5 الاستقرار الكيميائي
35	II - 3-3 أنواع الزجاج
36	II - 3-4 المادة المضيفة للعناصر الترابية النادرة
36	II - 3-5 ذوبانية العناصر الترابية النادرة
37	II - 3-6 التأثير على خصائص الإستضاءة
37	II - 3-6-1 تركيز الاطفاء الذاتي
37	II - 3-6-2 تفاعل مع الفوتونات

38	II -3-6-3 تفاعل أيون-أيون
38	II -3-6-4 تفاعل OH-
38	II -4 نظرية جود . أوفلت
38	II -4-1 لمحة تاريخية عن نظرية جود . أوفلت
38	II -4-2 طيف الامتصاص
39	II -4-3 قوى الانتقال وقوى الاهتزاز
40	II -4-4 حساب قوى الانتقال
41	II -4-5 قوى الاهتزاز التجريبية
41	II -4-6 احتمالية الانتقالات الإشعاعية
42	II -4-7 المقطع الفعال التكاملي للانبعاث
42	II -4-8 جودة التعديل
42	II -4-9 أهمية حساب معاملات جود- أوفلت والوسائط الطيفية
43	II -4-10 مراحل حساب وسائط جود -أوفلت
45	خلاصة الفصل الثاني
46	مراجع الفصل الثاني
الفصل الثالث: تحديد الخواص الطيفية وأداء الليزر في زجاج فليورفوسفاتي مطعم بالثوليوم	
48	III-1 المقدمة
48	III-2 المقطع الفعال للإصدار
49	III-3 حساب المقطع الفعال للريح
49	III-4 معامل الريح
49	III-5 النتائج والمناقشة
49	III-5 وسائط جود - أوفلت
49	III-5-1 تعيين الوسائط الطيفية لأيون الثوليوم في زجاج فليور-وفوسفاتي
53	III-5-2 حساب المقاطع الفعالة للإصدار
56	III-6 خلاصة الفصل الثالث
57	مراجع الفصل الثالث
58	الخاتمة العامة

قائمة الجداول

الرقم	عنوان الجدول	الصفحة
1-III	قربنة الانكسار وسمك العينة والكتل المولية و الحجمية للعينات المدروسة	49
2-III	الأطوال الموجية والتردد وقوى الاهتزاز للانتقالات الخمسة لايون الثوليوم في الزجاج المدروس	51
3-III	وسائط جود-أوفلت ($\Omega_1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $t=2, 4, 6$) ومعامل الجودة الطيفي (Ω_4/Ω_6) لأيون Tm^{3+} في الزجاج المدروس وأنواع أخرى	52
4-III	احتمالية الانتقال الإشعاعي (A_{rad}) ونسبة التفرع (β) وفترة الحياة الإشعاعية (τ_{rad}) من أجل الانتقال $3F_4 \rightarrow 3H_6$ لأيون Tm^{3+} في الزجاج المدروس وأنواع أخرى	53

قائمة الأشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
1-I	موقع اللانثانيدات في الجدول الدوري	2
2-I	توالد مستويات الطاقة تحت تأثير تفاعلات مختلفة	7
3-I	مخطط مستويات الطاقة للعناصر الترابية	7
4-I	الانتقالات الإشعاعية بين مستويات الطاقة	9
5-I	عملية امتصاص فوتون	9
6-I	عملية الانبعاث التلقائي	10
7-I	عملية الإصدار المحثوث	11
8-I	عملية الاسترخاء	13
9-I	خط إصدار مستويات الطاقة المتسعة	15
10-I	اتساع الطيف الناتج عن التعريض الطبيعي	16
11-I	اتساع الناتج عن تعريض دوبلر	17
12-I	نقل الطاقة الرنيني	18
13-I	نقل الطاقة الرنيني الكيفي	18
14-I	نقل الطاقة عن طريق انبعاث الفوتونات	19
15-I	نقل الطاقة عن طريق امتصاص الفوتونات	19
16-I	عملية التحويل العلوي للفوتونين	20
17-I	عملية التحويل العلوي لأيونين	20
1-II	مكونات جهاز الليزر	24
2-II	الضخ الضوئي	24
3-II	المرنان الليزري	25
4-II	التعداد العكوس	27
5-II	عملية التضخيم الضوئي	28
6-II	نظام ذو ثلاث مستويات	30
7-II	نظام ذو أربعة مستويات	30

36	مجال الشفافية لأنواع الزجاج	8-II
50	طيف امتصاص الثوليوم للزجاج المدرس	1-III
54	المقطع الفعال الامتصاص وإصدار لايون الثوليوم عند الانتقال $3F4 \rightarrow 3H6$	2- III
55	المقطع الفعال للريح للعينه المدرسه عند الانتقال $3F4 \rightarrow 3H6$	3- III
55	معامل للريح للعينه المدرسه عند الانتقال $3F4 \rightarrow 3H6$	4- III

قائمة الترميز

الرمز	الدلالة او المعنى
n	العدد الكمي الرئيسي .
l	العزم الزاوي المداري للإلكترون
s	العدد الكمي لللف للإلكترون
S_z	إسقاط اللف الذاتي للإلكترون
m	العدد الكمي المغناطيسي
m_l	إسقاط عزم الزاوي المداري للإلكترون على طول المحور Z
L	العزم الزاوي المداري الكلي
S	العزم اللفي الكلي
J	العزم الزاوي الكلي
H	هاملتون التفاعل .
Ψ	دالة موجية مرتبطة بالذرة
$H_{\text{champ cristallin}}$	تفاعل هاملتون للإلكترونات الطيفية مع مجال كهروستاتيكي بسبب البيئة البلورية
$H_{\text{ion libre}}$	هاملتون لأيون الحر
$H_{\text{champ central}}$	هاملتون الحقل المركزي
$H_{\text{correctif}}$	هاملتون الكهروستاتيكي التصحيحي
$H_{\text{spin-orbite}}$	التفاعل بين اللف الذاتي والعزم الزاوي المدار لكل إلكترون
$P(v)$	كثافة الطاقة لكل وحدة من سطح الحزمة الإشعاعية
B_{12}	معامل الامتصاص لأينشتاين
W_{12}	احتمال الامتصاص
$I(u)$	شدة الإشعاع عند التردد
σ_{α}	مقطع الفعّال للامتصاص
I_0	شدة اشعاع الضوء الثاني .
$\alpha(\lambda)$	معامل الامتصاص
N_2	عدد إلكترونات المستوي E_2
A_{21}	احتمالية الانبعاث التلقائي من المستوي E_2 الى المستوي E_1 .
t_{rad}	يمثل مدة حياة مستوي المثار .
B_{21}	معامل اينشتاين للانبعاث المحفز
W_{21}	احتمالية انبعاث المحفز
σ_e	المقطع الفعّال للانبعاث المحفز
L_p	شدة الحزمة الساقطة
T	درجة الحرارة
k	ثابت بولتزمان.

درجة التوالد في مستوى الطاقة E_i .	g_i
عدد الفونونات	ρ
عدد بوز (Bose)	$n(u)$
ثابت زمني مميز يعبر عن مدة الحياة غير المشعة	t_{nr}
تعريض دوبلر	$\Delta\omega_D$
تردد المنبعث	ω_0
الكتل الذرية	m
دالة التوزيع المنظمة	$g(v)$
معامل الريح	$Y(u)$
ثابت بلانك	h
الريح	G
طول العينة التي يجتازها الضوء.	L
معامل الحجز	Γ
قريبة انكسار الزجاج	n
سرعة انتشار الضوء في الفراغ .	c
سرعة انتشار الضوء في الزجاج	C_v
معامل تشتت الزجاج .	D_v
طول العينة .	x
معامل اللزوجة	η
معامل التمدد الحراري الخطي	$\alpha_{\Delta t}$
المجال الحراري المعتبر	Δt
معامل تمدد حتمي	β
هو مدة حياة الاستضاءة عند انعدام التركيز.	τ_0
تركيز الإطفاء الذاتي.	Q
هو تركيز التطعيم	ρ
لكثافة الضوئية	DO
هو تركيز الايونات المسؤولة عن الامتصاص	N_0
قوة الانتقال لثنائي القطب الكهربائي	$S_{ed}(J,J')$
قوة الانتقال لثنائي القطب المغناطيسي	$S_{md}(J,J')$
الطول الموجي المتوسط الانتقال .	λ_p
كتلة الإلكترون .	m_e

المقدمة العامة

المقدمة العامة

لقد تم اكتشاف الزجاج منذ آلاف السنين وهو من المواد ذات الأهمية الكبيرة في حياتنا اليومية، ولذلك أصبح محل أبحاث الكثيرين، وهذا من أجل فهم بنيته وسلوكه وخواصه بهدف تحسين أدائه وتطويره إلى أنواع المختلفة، ويصنف الزجاج ضمن المواد ذات التطبيقات الدقيقة عالية التخصص في التقنيات الإلكترونية أو البصرية، كما عرف بإمكانية اعتباره كوسيط حقيقي لتفاعلات عديدة، فالزجاج يتم تنشيطه بإضافة بكميات صغيرة من أيونات الأرضية النادرة (TR) وهذا ما يسمى بالتطعيم.

الأيونات الأرضية النادرة تتميز بالعديد من الخصائص البصرية في مجموعة واسعة من الأطوال الموجية من الأشعة فوق البنفسجية إلى الأشعة تحت الحمراء، إضافة إلى ذلك فإنها تمتلك مستويات الطاقة متبدل الاستقرار التي تسهل انعكاس السكان، وبخصوص أنها محفزة في حالة مزجها في مادة زجاجية، ويعد تحسين الخصائص البصرية للمواد المضيفة مهم جدا قبل تطبيقه في الأجهزة البصرية ولهذا يعتبر التحليل الطيفي من ضمن التقنيات المهمة لشرح خصائص الامتصاص والانبعاث للمواد المطعمة بأيونات العناصر الترابية النادرة، وتختلف الخصائص الطيفية لأيونات TR⁺³ بشكل كبير من مضيف إلى مضيف، كما هو الحال مع اختلاف تركيزها في المضيف .

في السنوات الأخيرة، جذب الليزر الذي يعمل عند الأشعة تحت الحمراء المتوسطة، عند الطول الموجي $2\mu\text{m}$ تحديداً، الكثير من الاهتمام نظراً لتطبيقاته المحتملة في العديد من المجالات، مثل الكشف عن التلوث الجوي، والاستشعار عن بعد، والجراحة الطبية ورادارات الليزر الآمن للعين. حتى الآن، يمكن تحقيق انبعاثات ليزر عند $2\mu\text{m}$ في بعض أيونات العناصر الترابية النادرة، مثل أيونات الثولوم Tm^{3+} والهولميوم Ho^{3+} . تمت دراسة الزجاج المطعم بالثولوم على نطاق واسع كمواد محتملة لليزر الأشعة تحت الحمراء ($1.8\mu\text{m}$)، والليزر الأزرق (450nm) ومضخات الألياف الضوئية (TDFAs) للنطاق S ($1530-1460\text{nm}$).

تلعب الدراسات الطيفية دوراً بارزاً في توصيف الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة وكذلك لفهم بعض الظواهر والتفاعلات الأساسية بين الإشعاع والمادة. من بين المواد الزجاجية المختلفة، يوفر زجاج الفلوروفوسفات مزايا كبيرة، حيث يتم تحضيره بسهولة عن طريق إدخال هاليدات معدنية مختارة (الفلورايد في حالتنا) في زجاج متعدد الفوسفات.

جذب الزجاج الفليوروفوسفاتي اهتمامًا كبيرًا نظرًا لشفافيتها العالية ونقطة انصهارها المنخفضة وسهولة تشكيلها وخصائصها الفعالة من حيث التكلفة، حيث يمتلك هذا الزجاج طاقة فونون منخفضة مقارنةً بزجاج الفوسفات وطريقة تصنيع أقل تعقيدًا من زجاج الفلوريد، كما يمكن أن يتمتع باستقرار كيميائي وحراري يمثّلان حلاً وسطاً بين زجاج الفلورايد النقي وزجاج الفوسفات النقي، وخاصةً أخرى مهمة وهي أن هذا الزجاج يقبل تركيزًا عاليًا من أيونات العناصر الترابية النادرة التي يمكن أن تحسن أو تحفز الخصائص البصرية لهذه المواد.

الهدف من هذه المذكرة تحديد الخصائص الطيفية لزجاج فليوروفوسفاتي مُطعم بالثوليوم، وذلك انطلاقًا من أطيف الامتصاص والاعتماد على نظرية جود-أوفلت، ودراسة ملاءمة هذه الخصائص لأداء الليزر.

هيكل الدراسة:

الفصل الأول: 'الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة' تطرقنا إلى بعض المفاهيم الأساسية لمطيافية أيونات العناصر الترابية من حيث التوزيع الإلكتروني و الأيوني وقمنا بالتركيز على عنصر الثوليوم من حيث توزيعه الإلكتروني و رموزه الطيفية ومستويات طاقته .

الفصل الثاني: 'الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة' تحدثنا عن فيزياء الليزر وبعض المفاهيم الأساسية الخاصة بها، وعن كيفية عمل الليزر، كما قمنا بتسليط الضوء على بنية الزجاج وأهم أنواعه وخصائصه . وتطرقنا كذلك في هذا الفصل الى عرض نظرية جود - أوفلت .

الفصل الثالث: 'تحديد الخواص الطيفية و أداء الليزر في الزجاج الفليوروفوسفاتي المطعم بالثوليوم'

الفصل الأول

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

I-1- المقدمة

إن العناصر الترابية النادرة تقع أسفل الجدول الدوري وهي من الفلزات الانتقالية الداخلية، هذه العناصر لم تكن تستدعي اهتمام العلماء إلا قلة منهم، ثم ازداد تدريجياً توجه الأنظار إلى هذه الأتربة لسير أغوار عناصرها على الصعيد التجريبي بغية فصل بعضها عن بعض من جهة، و تبيان خواصها الفيزيائية والكيميائية من جهة أخرى. [1]

تتميز هذه العناصر بخصائص مهمة تعتمد بشكل كبير جداً على بنية المادة المضيفة، حيث تُستخدم أيونات الأرض النادرة كوسط فعال في العديد من المصفوفات الصلبة بفضل انتقالاتها الإشعاعية العديدة في الأشعة تحت الحمراء المرئية والقريبة. [2]

في هذا الفصل، نتطرق إلى دراسة العناصر الترابية النادرة وأيوناتها، حيث سنتعرض إلى أصل مستويات طاقة هذه الأيونات في وسط صلب، ثم نقدم الآليات المختلفة لتفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي معها، وكذا عمليات الاتساع الطيفي ونقل الطاقة.

I-2- العناصر الترابية النادرة

العناصر الترابية النادرة ، التي يتراوح عددها الذري بين $Z = 57$ (اللانثانيوم) و $Z = 71$ (اللوتيسيوم)، تضم سبعة عشر عنصراً كيميائياً في أسفل الجدول الدوري حسب تعريف الإتحاد الدولي للكيمياء البحتة و التطبيقية (IUPAC) International Union of Pure and Applied Chemistry.

للعناصر الترابية النادرة خصائص كيميائية مُتشابهة، وذلك راجع الى وجود 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 مكتمل يُؤدّ أطوالاً موجيةً انطلاقاً من الأشعة فوق البنفسجية إلى غاية الأشعة تحت الحمراء [2][3].

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

وسميت العناصر الترابية أيضا اللانثانيدات نسبة إلى العنصر اللانثانوم. الشكل (I-1) يظهر موقع اللانثانيدات في الجدول الدوري.

IUPAC Periodic Table of the Elements

IUPAC Periodic Table of the Elements																	
1 H hydrogen 1.008 ± 0.002																	2 He helium 4.0026 ± 0.0001
3 Li lithium 6.94 ± 0.06	4 Be beryllium 9.0122 ± 0.0001	Key: atomic number Symbol name atomic standard atomic weight										5 B boron 10.81 ± 0.02	6 C carbon 12.011 ± 0.002	7 N nitrogen 14.007 ± 0.001	8 O oxygen 15.999 ± 0.001	9 F fluorine 18.998 ± 0.001	10 Ne neon 20.180 ± 0.001
11 Na sodium 22.990 ± 0.001	12 Mg magnesium 24.305 ± 0.002											13 Al aluminum 26.982 ± 0.001	14 Si silicon 28.085 ± 0.001	15 P phosphorus 30.974 ± 0.001	16 S sulfur 32.06 ± 0.02	17 Cl chlorine 35.45 ± 0.01	18 Ar argon 39.95 ± 0.16
19 K potassium 39.098 ± 0.001	20 Ca calcium 40.078 ± 0.004	21 Sc scandium 44.956 ± 0.001	22 Ti titanium 47.867 ± 0.001	23 V vanadium 50.942 ± 0.001	24 Cr chromium 51.996 ± 0.001	25 Mn manganese 54.938 ± 0.001	26 Fe iron 55.845 ± 0.002	27 Co cobalt 58.933 ± 0.001	28 Ni nickel 58.693 ± 0.001	29 Cu copper 63.546 ± 0.003	30 Zn zinc 65.38 ± 0.02	31 Ga gallium 69.723 ± 0.001	32 Ge germanium 72.630 ± 0.008	33 As arsenic 74.922 ± 0.001	34 Se selenium 78.971 ± 0.008	35 Br bromine 79.904 ± 0.003	36 Kr krypton 83.798 ± 0.002
37 Rb rubidium 85.468 ± 0.001	38 Sr strontium 87.62 ± 0.001	39 Y yttrium 88.906 ± 0.001	40 Zr zirconium 91.224 ± 0.001	41 Nb niobium 92.906 ± 0.001	42 Mo molybdenum 95.95 ± 0.01	43 Tc technetium [97]	44 Ru ruthenium 101.07 ± 0.02	45 Rh rhodium 102.91 ± 0.01	46 Pd palladium 106.42 ± 0.01	47 Ag silver 107.87 ± 0.01	48 Cd cadmium 112.41 ± 0.01	49 In indium 114.82 ± 0.01	50 Sn tin 118.71 ± 0.01	51 Sb antimony 121.76 ± 0.01	52 Te tellurium 127.60 ± 0.03	53 I iodine 126.90 ± 0.05	54 Xe xenon 131.29 ± 0.01
55 Cs caesium 132.91 ± 0.01	56 Ba barium 137.33 ± 0.01	57-71 lanthanoids	72 Hf hafnium 178.49 ± 0.01	73 Ta tantalum 180.95 ± 0.01	74 W tungsten 183.84 ± 0.01	75 Re rhenium 186.21 ± 0.01	76 Os osmium 190.23 ± 0.03	77 Ir iridium 192.22 ± 0.01	78 Pt platinum 195.08 ± 0.02	79 Au gold 196.97 ± 0.01	80 Hg mercury 200.59 ± 0.01	81 Tl thallium 204.38 ± 0.01	82 Pb lead 207.2 ± 1.1	83 Bi bismuth 208.98 ± 0.01	84 Po polonium [209]	85 At astatine [210]	86 Rn radon [222]
87 Fr francium [223]	88 Ra radium [226]	89-103 actinoids	104 Rf rutherfordium [261]	105 Db dubnium [262]	106 Sg seaborgium [263]	107 Bh bohrium [264]	108 Hs hassium [265]	109 Mt meitnerium [266]	110 Ds darmstadtium [267]	111 Rg roentgenium [268]	112 Cn copernicium [269]	113 Nh nihonium [270]	114 Fl flerovium [271]	115 Mc moscovium [272]	116 Lv livermorium [273]	117 Ts tennessine [274]	118 Og oganesson [274]
57 La lanthanum 138.91 ± 0.01	58 Ce cerium 140.12 ± 0.01	59 Pr praseodymium 140.91 ± 0.01	60 Nd neodymium 144.24 ± 0.01	61 Pm promethium [145]	62 Sm samarium 150.36 ± 0.02	63 Eu europium 151.96 ± 0.01	64 Gd gadolinium 157.25 ± 0.01	65 Tb terbium 158.93 ± 0.01	66 Dy dysprosium 162.50 ± 0.01	67 Ho holmium 164.93 ± 0.01	68 Er erbium 167.26 ± 0.01	69 Tm thulium 168.93 ± 0.01	70 Yb ytterbium 173.05 ± 0.02	71 Lu lutetium 174.97 ± 0.01			
89 Ac actinium [227]	90 Th thorium 232.04 ± 0.01	91 Pa protactinium 231.04 ± 0.01	92 U uranium 238.03 ± 0.01	93 Np neptunium [237]	94 Pu plutonium [244]	95 Am americium [243]	96 Cm curium [247]	97 Bk berkelium [247]	98 Cf californium [251]	99 Es einsteinium [252]	100 Fm fermium [257]	101 Md mendelevium [258]	102 No nobelium [259]	103 Lr lawrencium [262]			



For notes and updates to this table, see www.iupac.org. This version is dated 4 May 2022. Copyright © 2022 IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry.

الشكل I-1: موقع اللانثانيدات في الجدول الدوري [5]

تميز العناصر الترابية النادرة بخاصية الامتلاء التدريجي للطبقة الالكترونية 4f بينما الطبقات الخارجية الأخرى تكون ممتلئة مسبقا. في الحالة الأيونية، توجد هذه العناصر في المواد الصلب على شكل ثنائي التكافؤ أو ثلاثي التكافؤ [3]:

- الحالة ثنائية التكافؤ: تنتج عن فقدان إلكترونين في 6s
- الحالة ثلاثية التكافؤ: تتشكل هذه الحالة عندما تفقد الذرة، بالإضافة إلى إلكترونات 6s، إلكترون 5d إذا كانت تمتلك واحدا، وإلا فإنها تفقد إلكترون 4f.

يكون التوزيع الالكتروني للعناصر الترابية النادرة من الشكل: $[Xe]4f^n 5d^0 6s^2$ حيث n يتراوح من 0 للانثانوم إلى 14 للوتيسيوم.

I-3 التوزيع الإلكتروني للعناصر الترابية النادرة وأيوناتها

I-3-1 التوزيع الإلكتروني للعناصر الترابية النادرة

إن التوزيع الإلكتروني لذرات العناصر الترابية النادرة مهم في إبراز بعض الصفات الكيميائية والفيزيائية لها، إذ أنها تتميز بمبدأ المدارات $4f$ حيث تبدأ بعنصر اللانثانوم ببنية الكترونية خارجية متضمنة بنية عنصر الكزنيون: $La: [Xe]4f^0 5d^1 6s^2$ ($Xe: 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6$)، يليه مباشرة أربعة عشر عنصر. توحى البنية الإلكترونية لعنصر اللانثانوم أن التعبئة اللاحقة ستجرى بإضافة الإلكترونات إلى المدار d إلا أن ذلك لا يحدث، إذ تبدأ التعبئة في المدارات $4f$ بصورة متزايدة بالإلكترون واحد لكل عنصر بدءاً من السيريوم $Ce: [Xe]4f^1 5d^1 6s^2$ ، ولأن طاقة المدار $5d$ تساوي تقريباً طاقة المدار $4f$ يمكن أن يذهب إلكترون $5d^1$ إلى المدار $4f$ بحيث يمكن أن يأخذ السيريوم البنية: $Ce: [Xe]4f^2 5d^0 6s^2$ عوضاً عن البنية السابقة، ويحدث الشيء نفسه عند تعبئة بقية العناصر، ويستثنى عنصر الغادولينيوم $Gd(Z=64)$ الموسوم بالبنية نصف مشبعة الأكثر استقراراً $Gd: [Xe]4f^7 5d^1 6s^2$ وعنصر اللوتيسيوم $Lu(Z=71)$ ببنية مشبعة أكثر استقراراً: $[4]Lu: [Xe]4f^{14} 5d^1 6s^2$.

I-3-2 التوزيع الإلكتروني لأيونات العناصر الترابية النادرة

تملك أيونات العناصر الترابية النادرة عدداً من الخصائص البصرية والمغناطيسية التي تؤهلها لأن تدخل في العديد من الاستخدامات. تأخذ العناصر الترابية النادرة الشكل الأيوني TR^{+2} ثنائي التكافؤ أي أن الذرة تفقد إلكتروناتها من الطبقة $6s$ وتأخذ أيضاً الشكل الأيوني TR^{+3} ثلاثي التكافؤ، عند فقدانها للإلكترونين السابقين وإلكترون آخر من الطبقة $5d$ ، وأما إذا كانت لا تملك إلكترونات في الطبقة $5d$ فيتوجب عليها فقدان من الطبقة $4f$ حيث تعتبر الحالة ثلاثية التكافؤ لهذه الأيونات هي الأكثر استقراراً [6].

I-4-1 مطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة

I-4-1 الأعداد الكمية

تتميز كل ذرة بالأرقام الكمية (n, l, m) وهي معرفة كالتالي:

(n) : هو العدد الكمي الرئيسي حيث يأخذ القيم $n=1.2.3.4\dots$ ويحدد طاقة الذرة.

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

(l) : هو العزم الزاوي المداري للإلكترون يأخذ القيم $l=0,1,2,3,\dots$ ويحدد شكل المدار.

(s) : هو العدد الكمي لللف للإلكترون يأخذ قيمة $1/2$.

s_z : هو إسقاط اللف الذاتي للإلكترون ويأخذ قيمتين $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

(m) : هو العدد الكمي المغناطيسي يأخذ القيم $m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ يحدد سلوك مستويات الطاقة في وجود الحقل المغناطيسي.

m_l : هو إسقاط عزم الزاوي المداري للإلكترون على طول المحور z يمكن ان يأخذ القيم $2l+1$:

$$-l, -l + 1, \dots, 0, \dots, l - 1, l.$$

2-4-I الرموز الطيفية

يمكن وصف مستويات الطاقة المختلفة من خلال معرفة الهيكل الإلكتروني، الذي يتميز بالرمز الطيفي $^{2S+1}L_J$ و هو ما يعرف بازدواج راسيل - ساندر Russell-Saunders ، والذي يُعرّف بازدواج (L - S) ففيه يتم الجمع بين العزم الزاوي المداري L والعزم اللفي الإلكتروني S بشكل منفصل لتشكيل العزم الزاوي الكلي J [7-9].

✓ العزم الزاوي المداري الكلي L :

$$\vec{L} = \sum_i l_i \quad (8-I)$$

✓ العزم اللفي الكلي S :

$$\vec{S} = \sum_i s_i \quad (9-I)$$

تحدد قيم عدد الكمي L بالحروف بدلا من الأرقام حسب الجدول التالي:

0	1	2	3	4	5
S	P	d	f	G	H

✓ العزم الزاوي الكلي J :

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

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

حيث:

$$|L - S| \leq J \leq |L + S| \quad (11-I)$$

✓ ازدواج J_z :

$$j_i = s_i + l_i \quad (12-I)$$

✓ العزم الزاوي الكلي J :

$$J = \sum_i j_i \quad (13-I)$$

✓ قواعد هوند **Hond**:

- العزم اللفي الكلي S يأخذ أكبر قيمة .
- العزم الزاوي المداري الكلي L يأخذ أكبر قيمة له متماشيا مع S
- العزم الزاوي الكلي J
- من أجل طبقة مملوءة اقل من النصف , يأخذ $J = J_{\min} = |L - S|$.
- من أجل طبقة مملوءة أكبر من النصف يأخذ $J = J_{\max} = |L + S|$

✓ مبدأ الإستبعاد لباولي (Pauli)

ينص باولي على أنه لا يُمكن لإلكترونين أو أكثر في نفس الذرة أن يمتلكا نفس الحالة الكمومية، أي نفس قيم الأعداد الكمية الأربعة وهي (m.l.n.s) ، بينما يُمكن أن يشتركا في رقم واحد أو اثنين أو ثلاثة فقط [4]

I-4-3 الرموز الطيفية للأيون الثوليوم Tm^{+3} . [4]

التوزيع الإلكتروني للعنصر Tm : $[Xe] 4f^{13}5d^06s^2$

التوزيع الإلكتروني للأيون Tm^{+3} : $[Xe] 4f^{12}$

قيم L و S للأيون تكون

$$L=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (14-I)$$

$$S=0,1 \quad (15-I)$$

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

وعند 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 ان الرمز الطيفي للمستوى الاساسي الأيون Tm^{+3} هو 3H_6 [4]

4-4-I مستويات الطاقة [4]:

يتميز كل أيون من العناصر الترابية النادرة بمخطط طاقة معين، ومن أجل تحديد وضع مستويات الطاقة له يجب حل مُعادلة شرودينغر :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H\Psi \quad (16-I)$$

$$E\Psi = H\Psi \quad (17-I)$$

حيث :

H: هاملتون التفاعل .

Ψ : دالة موجية مرتبطة بالذرة

الهاملتوني H يمثل التفاعلات التي تخضع لها إلكترونات الأيون TR^{+3} ويكتب على الشكل:

$$H = H_{ion libre} + H_{champ cristallin} \quad (18-I)$$

بحيث :

$H_{champ cristallin}$: يمثل تفاعل هاملتون للإلكترونات الطيفية مع مجال كهروستاتيكي بسبب البيئة البلورية

$H_{ion libre}$: يمثل هاملتون الأيون الحر، و تكتب عبارته على النحو التالي :

$$H_{ion libre} = H_{champ central} + H_{correctif} + H_{spin_orbite} \quad (19-I)$$

حيث :

$H_{champ central}$: يمثل هاملتون الحقل المركزي وتكتب علاقته على الشكل التالي :

$$H_{champ central} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\vec{p}_i^2}{2m} + U(r_i) \right] \quad (20-I)$$

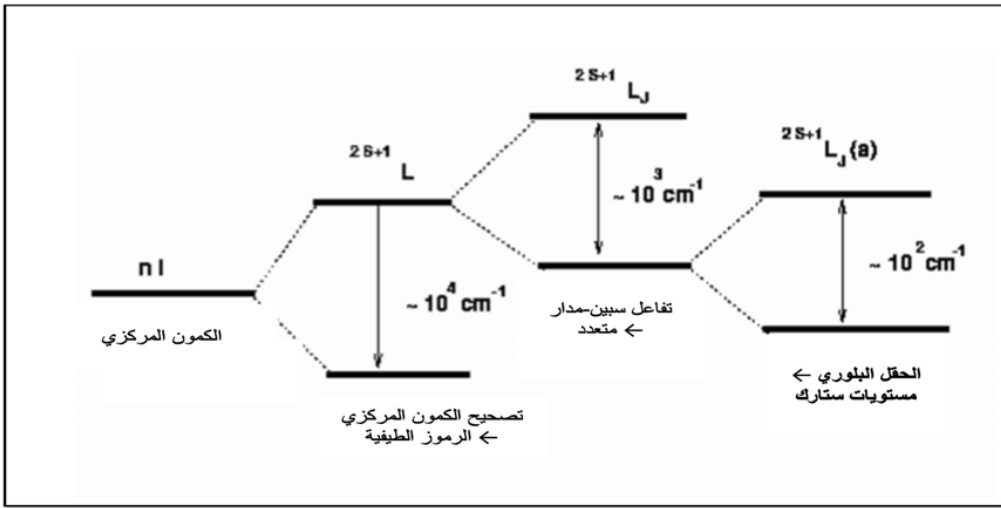
الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

$H_{correctif}$: يمثل هاملتون التصحيح الكهروستاتيكي، وتكتب علاقته على الشكل التالي:

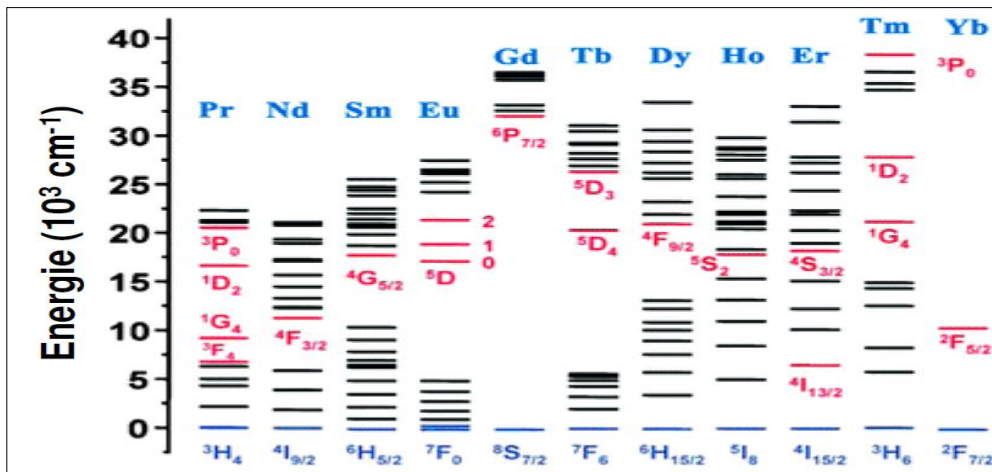
$$H_{correctif} = \sum_{i=1}^N \left[-\frac{Ze^2}{r_i} + U(r_i) \right] + \sum_{i>j} \frac{e^2}{r_{ij}} \quad (21-I)$$

H_{spin_orbite} : تمثل افتزان سبين - مدار ($spin - orbite$) ، التفاعل المغناطيسي بين العزم الزاوي المداري وعزم اللف للإلكترون، وتكتب علاقته على الشكل التالي:

$$H_{spin_orbite} = \sum_{i=1}^N \xi(r_i) \vec{l}_i \vec{s}_i \quad (22-I)$$



شكل I-2 : توالد مستويات الطاقة تحت تأثير التفاعلات المختلفة.



شكل I-3: مخطط مستويات الطاقة للعناصر الترابية

I-4-5 قواعد الإنتقال :

يؤثر مجال كهرومغناطيسي خارجي على العناصر الترابية النادرة فينتج عنه انتقالات إشعاعية بين المستويات المختلفة للطبقة $4f^n$ ، وتخضع هذه الأخيرة الى قواعد التالية :

❖ انتقالات ثنائي القطب الكهربائي :

للانتقال من مستوى إلى مستوى يجب أن تتحقق قواعد لابورت (Laporte) التالية :

$$\Delta l = \mp 1, \quad \Delta L \leq 2l, \quad \Delta S = 0, \quad \Delta J \leq 2l$$

وبالتالي يمكن للمرء أن يلاحظ انتقالات ممنوعة بسبب خلط مدارات $4f$ و $5d$ (ناجمة عن تأثير المجال البلوري) ولكن شدتها ستكون كذلك ضعيفة. تسمى هذه الانتقالات بالانتقالات ثنائية القطب الكهربائية.

❖ انتقالات ثنائي القطب المغناطيسي:

تسمح بالانتقال بين مستويات طبقة f والتي يجب أن تحقق الشروط التالية:

$$\Delta l = 0; \quad \Delta L = \mp 1, 0; \quad \Delta S = 0; \quad \Delta J = 0, \mp 1$$

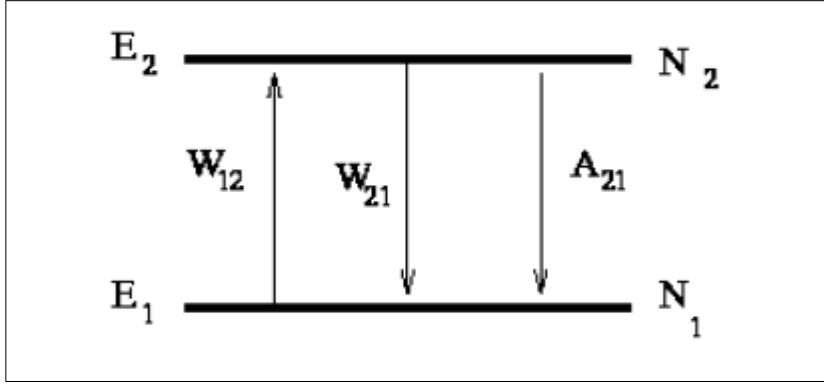
I-5 تفاعل الإشعاع مع أيونات العناصر الترابية النادرة:

إن ظاهرة التضخيم البصري تعني تفاعل أيونات العناصر الترابية النادرة مع الإشعاع الكهرومغناطيسي، فينتج عن ذلك نوعان من الانتقالات الإلكترونية بين مستويات طاقة الأيونات وهي : الانتقالات الإشعاعية وغير الإشعاعية. [4]

I-5-1 الانتقالات الإشعاعية :

عند تسليط إشعاع كهرومغناطيسي على أيونات العناصر الترابية، يمتصه الإلكترون لينتقل الى مستوى طاقة أعلى ويصبح في حالة مثارة، وسرعان ما يعود الإلكترون الى المستوى الأساسي أي حالة الاستقرار.

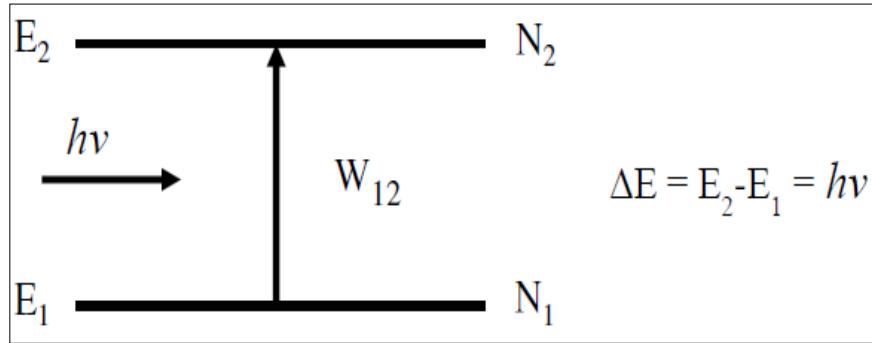
الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة



شكل I-4: الانتقالات الإشعاعية بين مستويين طاقيين

❖ الامتصاص :

تقوم أيونات العناصر الترابية النادرة بامتصاص الفوتونات المسلطة عليها، وتعمل طاقة الإشعاع الممتص على رفع الإلكترونات من مدار منخفض الطاقة إلى مدار عالي الطاقة، ولا تتم عملية الامتصاص من قبل الأيون إلا إذا كانت طاقة الإشعاع المسلط أكبر أو تساوي فرق الطاقة بين المدارات الإلكترونية لأيونات العناصر الترابية النادرة. [12]



شكل I-5: عملية امتصاص الفوتون.

افترض أينشتاين أن عدد الذرات التي تمر إلى الحالة المثارة يتناسب مع زمن التفاعل dt ومع عدد الذرات الموجودة في الحالة الأرضية فعبّر عن ذلك بالعلاقة التالية:

$$\frac{dN_2}{dt} = B_{12}\rho(\nu)N_1 = -\frac{dN_1}{dt} \quad (23-I)$$

حيث :

$\rho(\nu)$: كثافة الطاقة لكل وحدة من سطح الحزمة الإشعاعية وحدتها $(J.s.m^{-3})$

B_{12} : معامل الامتصاص لأينشتاين ، ويعطى بالعلاقة التالية :

$$W_{12} = B_{12}\rho(\nu) = \sigma_{\alpha}(\nu) \frac{I(\nu)}{h\nu} \quad (24-I)$$

حيث:

W_{12} : احتمالية الامتصاص

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

$I(\nu)$: شدة الإشعاع عند التردد وحدته $(w.m^2)$

σ_α : المقطع الفعال للامتصاص وحدته (m^2)

يعتمد التحديد التجريبي للمقطع فعال للامتصاص على قانون Beer-Lambert. يعطي هذا القانون الشدة

المرسلة $I (w.m^2)$ لحزمة الضوئية بطول موجة $\lambda(m)$ بعد مرورها عبر وسط ماص سمكه $L(cm)$:

$$I(\lambda) = I_0 e^{-\alpha(\lambda)l} = I_0 \times 10^{A\lambda} \quad (25-I)$$

حيث :

I_0 : شدة اشعاع الضوء الوارد.

$\alpha(\lambda)$: معامل الامتصاص، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A\lambda \times \ln 10}{l} \quad (26-I)$$

إذا اعتبرنا أن الامتصاص يحدث من الحالة الأساسية لمركز الامتصاص فإنه يتم استنتاج المقطع العرضي للامتصاص

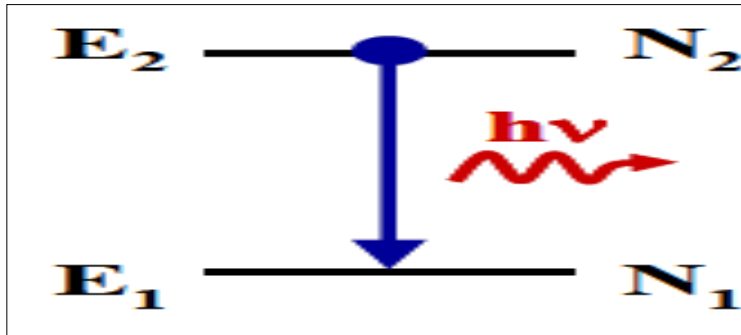
$\sigma_\alpha (cm^2)$ مباشرة من معامل الامتصاص من خلال العلاقة التالية:

$$\sigma_\alpha(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)}{N} \quad (27-I)$$

❖ الإصدار التلقائي:

هو عبارة عن إصدار إشعاع كهرومغناطيسي عند نزول الإلكترونات بشكل تلقائي من مستويات عالية الطاقة

(المستوى المثار) الى مستويات منخفضة الطاقة. [12]



شكل I-6: عملية الانبعاث التلقائي

يعطى معدل الانبعاث التلقائي بالمعادلة التالية: [13]

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 \quad (28-I)$$

حيث :

N_2 : عدد إلكترونات المستوي E2

A_{21} : احتمالية الانبعاث التلقائي من المستوي E2 الى المستوي E1. ويعطى بالعلاقة التالية :

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_{rad}} \quad (29-I)$$

حيث :

τ_{rad} : يمثل مدة حياة مستوي المثار .

لأيونات العناصر الترابية مستويات من الطاقة E_j ومستويات الطاقة المثارة E_m ، يحدث لها العديد من الانتقالات العفوية، وكل هذه الانتقالات تتميز باحتمالية الانبعاث التلقائي A_{mj} ، ومنه الاحتمال الكلي للإثارة هو مجموع كل هذه الاحتمالات [13]، إذن مدة حياة المستويات المثارة تكتب من الشكل:

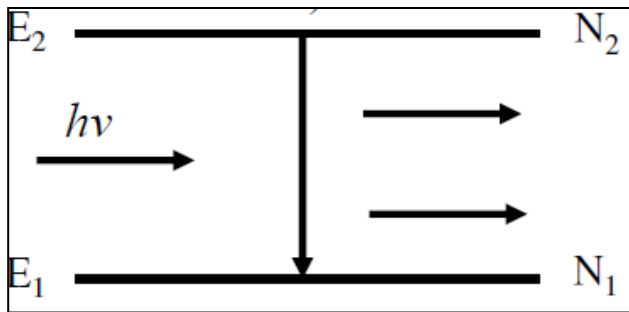
$$\tau_{rad} = \frac{1}{\sum_j A_{mj}} \quad (30-I)$$

نعرف نسبة التوصيل لانتقال $m \rightarrow j$ التي تعطى بالعلاقة التالية :

$$\beta = \frac{A_{mj}}{\sum_j A_{mj}} = A_{mj} \tau_{rad} \quad (31-I)$$

❖ الإصدار المحثوث :

هو عملية فقدان الطاقة من المادة على شكل ضوء تحت تأثير خارجي. وتتم هذه العملية نتيجة لحث الذرة بإشعاع له تردد محدد يسمح بنزول الإلكترونات من مدارات عالية الطاقة الى مدارات منخفضة الطاقة مصدرة إشعاعا يسمى بالإشعاع المترابط coherent وذلك لأنه ناتج عن إلكترونات لها تردد وطور يساوي تردد وطور إشعاع المحرض [13,12].



شكل I-7: عملية الإصدار المحثوث

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

وبافتراض ان هذه العملية مشابهة للامتصاص فإن معادلة التطور السكاني للمستويين تكتب من الشكل [4]:

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}\rho(\nu)N_2 = -\frac{dN_1}{dt} \quad (32-I)$$

حيث :

$$B_{21} : \text{معامل اينشتاين للانبعاث المحفز وحدته (} m^3 \cdot s^{-2} \cdot J^{-1} \text{)}$$

ويمكن كتابة احتمالية انبعاث المحفز W_{21} والمقطع الفعال للانبعاث المحفز σ_e كالتالي :

$$W_{21} = B_{21}\rho(\nu) = \sigma_e(\nu) \frac{I_p(\nu)}{h\nu} \quad (33-I)$$

حيث :

$$I_p : \text{شدة الحزمة الساقطة وحدته (} w \cdot m^{-2} \text{)}$$

بالنسبة لنظام ذو مستويين تكون الإثارة الإشعاعية:

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1(W_{21} + A_{21})N_2 = -\frac{dN_1}{dt} \quad (34-I)$$

في التوازن الترموديناميكي، يتم ربط نسبة الإسكان لمستويين بمعامل بولتزمان.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{KT}} \quad (35-I)$$

حيث:

$$g_i = 2J_i + 1 \text{ هو درجة التوالد في مستوى الطاقة } E_i.$$

T: درجة الحرارة

K: ثابت بولتزمان.

في حالة النظام ثابت $\frac{dN_i}{dt} = 0$ نجد:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{W_{12}}{W_{21} + A_{21}} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{KT}} \quad (36-I)$$

من هذه العلاقة، يمكننا التعبير عن $\rho(\nu)$ بكثافة الطاقة للحزمة في وحدة المساحة كالتالي:

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \times \frac{1}{\left(\frac{B_{12}g_1}{B_{21}g_2} e^{-\frac{h\nu}{KT}} - 1 \right)} \quad (37-I)$$

وفقا لقانون بلانك، لدينا :

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi n^3 \nu^2}{c^3} \times \frac{h\nu}{e^{-\frac{h\nu}{KT}} - 1} \quad (38-I)$$

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

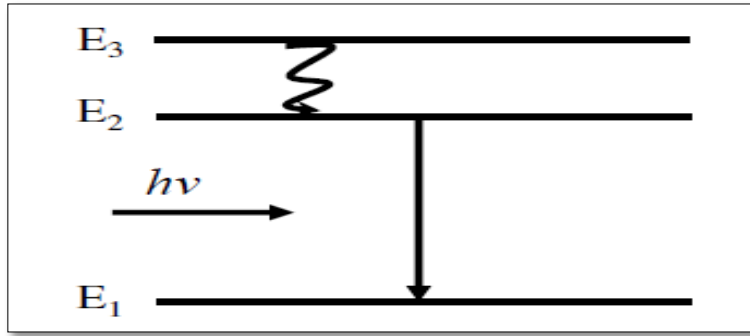
وبالمطابقة بين طرفي المعادلتين نجد:

$$B_{21}g_1 = B_{12}g_2 \quad (39-I)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi n^3 h\nu^3}{c^3} \quad (40-I)$$

2-5-I الانتقالات غير الإشعاعية :

يمكن لأيون أرضي نادر موجود في حالة مثارة أن ينفصل عن الإثارة عن طريق انبعاث الضوء وليس بطريقة إشعاعية، أي أنها تتم في الحالة التي تكون فيها الفرق بين مستويات الطاقة أكبر من الحد الأقصى لطاقة فوتون المادة، فإنه سيتم إنشاء العديد من الفوتونات في وقت واحد، وهذا ما يسمى بالاسترخاء المتعدد الفوتونات . [4]



شكل 8-I : عملية الاسترخاء

احتمال حدوث الاسترخاء المتعدد الفوتون يعبر عنه بالعلاقة التالية: [3]

$$W_{Mp} = W_0 [n(\nu) + 1]^p \quad (41-I)$$

حيث :

p : هو عدد الفونونات اللازمة لملء فرق الطاقة.

$n(\nu)$: هو عدد بوز (Bose) وتكتب علاقته من الشكل :

$$n(\nu) = \frac{1}{(e^{h\nu/kT} - 1)} \quad (42-I)$$

W_0 : هو احتمال الانتقال عند درجة حرارة $T=0$ كبحيث:

$$W_0 = B \cdot e^{-a\Delta E} \quad (43-I)$$

حيث :

ΔE : هي فرق الطاقة بين مستويات المرحلة الانتقالية.

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

a و B : هي ثوابت موجبة مميزة للمادة وحدته على التوالي (s^{-1}) (cm), لا تتعلق بالأيونات الترابية النادرة ولا بمستويات الطاقة المعتبرة.

يزداد احتمال الانتقال الغير إشعاعي مع زيادة درجة الحرارة وبالتالي يؤدي الى انخفاض مدة الحياة τ . ويتناقص احتمال الانتقال الغير اشعاعي مع زيادة فرق الطاقة ΔE .

عندما يكون عدد الفوتونات p اللازمة للانتقال اقل من 4 فإن احتمالية الانتقال الغير إشعاعي تتنافس مع العملية الإشعاعية بشكل عام تأثير هذه التفاعلات يؤدي إلى تغيير الإسكان في المستويات، إذ يمكن كتابة هذا التغير بسبب الانتقالات غير المشعة بالصيغة التالية: [3]

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_2}{\tau_{nr}} \quad (44-I)$$

بحيث :

τ_{nr} : ثابت زمني مميز يعبر عن مدة الحياة غير المشعة وتعطى عبارته كالتالي:

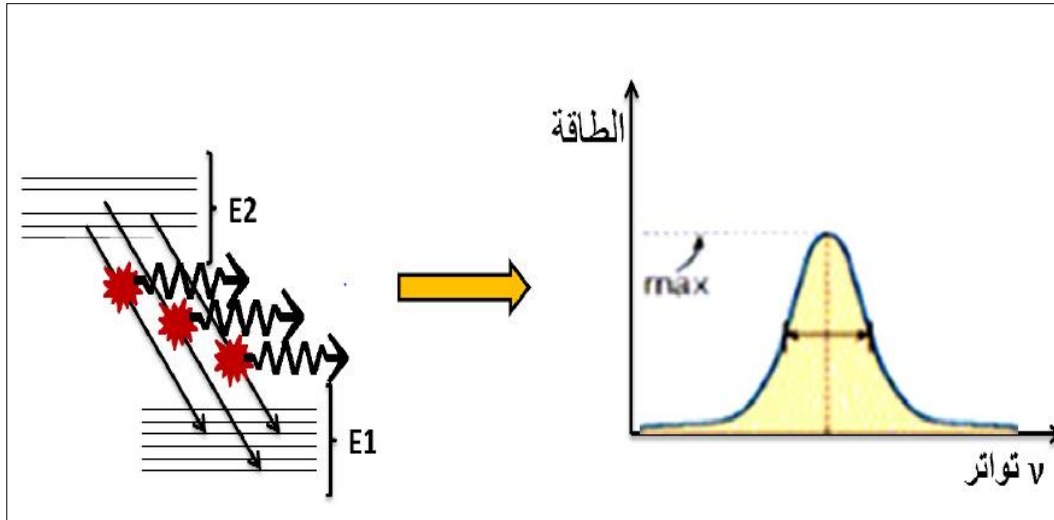
$$\tau_{nr} = \frac{1}{w_{nr}} \quad (45-I)$$

I-6 الاتساع الطيفي

في هذا الجزء سنقوم بدراسة الفعاليات المختلفة التي تؤدي الى توسع الخطوط الطيفية الناتجة عن عملية الامتصاص وعملية الاصدار للمادة، ونذكر منها :

I-6-1 التعريض الطبيعي : [14]

حسب مبدأ هيزنبرغ للشك فان الإلكترون في المستوى المثار E_2 يجب أن تبقى زمن لا نهائي حتى يكون الشك في تحديد مستوى الطاقة E_2 يساوي الصفر. ونعلم أنه إذا أثرت ذرة إلى مستوى طاقة ما فسوف تبقى فيه فترة زمنية محددة ثم تعود إلى المستوى الأساسي للطاقة وتطلق فوتونات. وهذا ما يؤدي الى تناقض مع مبدأ هيزنبرغ ، وللتغلب على هذا التناقض ، نفرض أن مستويات الطاقة لها اتساع وأن الذرات تتوزع باحتمالية أكبر، وهذا ما يوضح الشكل التالي :



شكل I-9: خط إصدار مستويات الطاقة المتسعة.

ويمكن تقدير إتساع الخط الطيفي نتيجة الإتساع الطبيعي لمستوي طاقة i بالمعادلة التالية :

$$\Delta v_i = \frac{1}{2\pi\tau_i} \quad (46-I)$$

فترة حياة المستوي المثار بدلالة معامل اينشتاين:

$$\tau = \frac{1}{A_{21}} \quad (47-I)$$

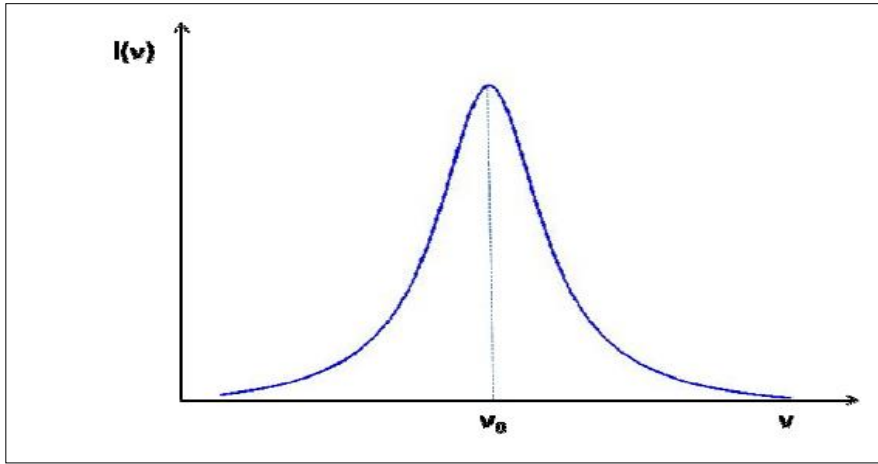
وبصفة عامة

$$\tau = \frac{1}{\sum A_{21}} \quad (48-I)$$

ويعطى شكل طيف الاتساع الطبيعي بواسطة دالة التابع $g(v)$

$$g(v) = \frac{\Delta v_n}{2\pi} \frac{1}{(v-v_0)^2 + (\Delta v_n/2)^2} \quad (49-I)$$

حيث نحصل على شكل لورانتز. [14]



شكل I-10: اتساع الطيف الناتج عن تعريض الطبيعي

I-6-2 تعريض دوبلر: [14]

في كثير من الأحيان يتم إمتصاص أو إنبعث الإشعاع من قبل الجسيمات (ذرة، أيون...) ، أثناء الحركة وبفعل تأثير دوبلر يختلف تردد الإشعاع المنبعث عن تردد المنبعث من الجسيم عند الراحة (الإختلاف بين تردد المرسل والمستقبل). يرتبط متوسط سرعة الجسيمات في التوازن الديناميكي الحراري بدرجة حرارة الوسط ومن ثم فإن التوسيع الناجم عن تأثير دوبلر الإحصائي يرتبط بتوزيع سرعة المرسل عند درجة الحرارة T وكتلة المرسل m. ويعطى تعريض نصف الإرتفاع (تعريض دوبلر) بالعلاقة التالية:

$$\Delta\omega_D = 7,16 \times 10^{-7} \times \omega_0 \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (50-I)$$

بحيث :

$\Delta\omega_D$: تعريض دوبلر وحدته (ev)

ω_0 : تردد المنبعث وحدته (ev)

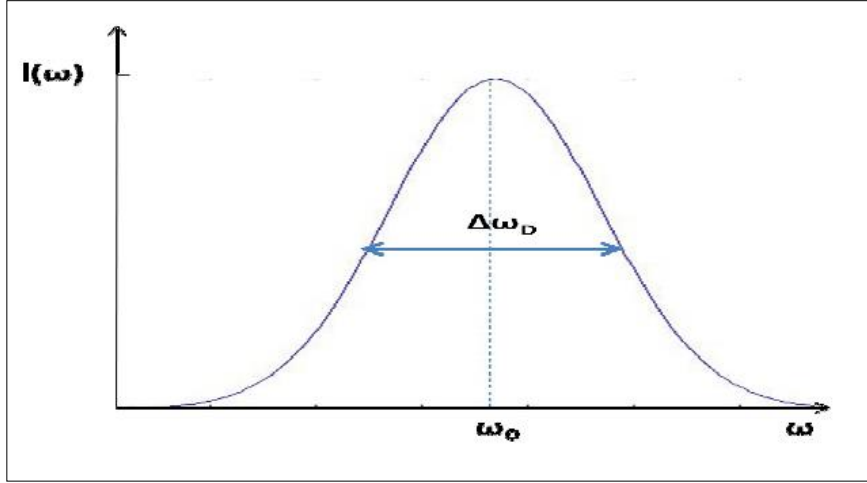
T : درجة الحرارة بالكلفن K

m : الكتلة الذرية بوحدة (u.m.a).

الأتساع في الخط الطيفي نتيجة ظاهرة دوبلر يوافق دالة التابع $g(\omega - \omega_0)$ وتكتب كتالي :

$$g(\omega - \omega_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\Delta\omega_D} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\Delta\omega_D^2}} \quad (51-I)$$

شكل خط تعريض دوبلر هو شكل غوس (Gaussian).



شكل I-11: الاتساع الناتج عن تعريض دوبلر

I-6-3 تعريض التصادمات :

إن السبب الأساسي لتعريض خطوط الطيف هو الاضطراب الناجم عن الذرات وذلك بمختلف جزيئاتها المشحونة وغير مشحونة وفي هذه الحالة يحدث التعريض بواسطة التصادم حيث يمكن تقسيمه إلى ثلاث أقسام:

- ❖ تعريض فاندرفاز: ويكون ذلك بواسطة إضطراب جزيئات غير مشحونة مع مختلف أنواع ذرات المصدر.
- ❖ التعريض بالرنين: يكون ذلك بواسطة إضطراب جزيئات غير مشحونة (تفاعل ثنائي الأقطاب-ثنائي الأقطاب)
- ❖ تعريض ستارك: سببه تفاعل الجسيمات المشحونة (أيونات، إلكترونات) مع ذرات المصدر. ويتم التعبير عن هذا التفاعل بواسطة تأثير حقل ضعيف أيوني وإلكتروني مع ذرات المصدر الحقل E، يعمل على اضطراب مستويات الطاقة الذرية لتصل إلى أدنى المستويات، هذا الطرح يعمل على تحلل مستويات الطاقة الذرية إلى عدة مستويات.

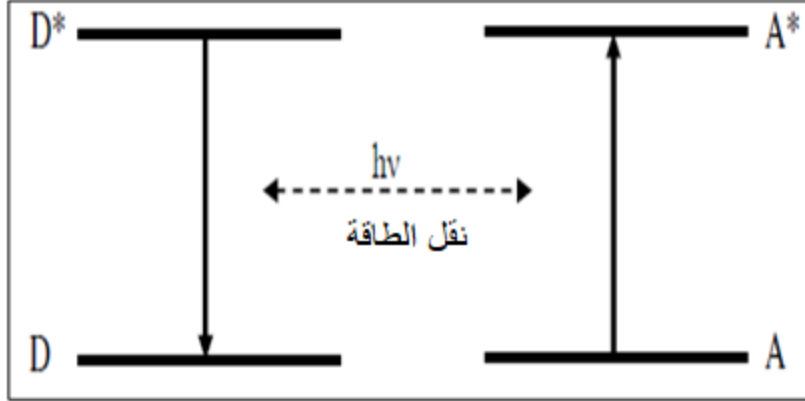
I-7-1 نقل الطاقة :

عندما يكون تركيز ايونات عناصر الترابية النادرة مرتفعا في المستوى المثار، يمكن ان تحدث تفاعلات بين هذه ايونات تحت تأثير القوى الكهروستاتيكية مما يؤدي الى عملية نقل الطاقة، وتعتمد هذه العملية على تحلي الايون المانح عن طاقته الى الايون المستقبل عن طريق إزالة الاثارة بدون إنبعاث إشعاعي. وقد تحدث عملية نقل الطاقة بين الايونات المختلفة او المتطابقة، وهناك انواع مختلفة من التفاعلات بين ايونات التي تؤدي الى افرغ المستوى المثار. [3][2]

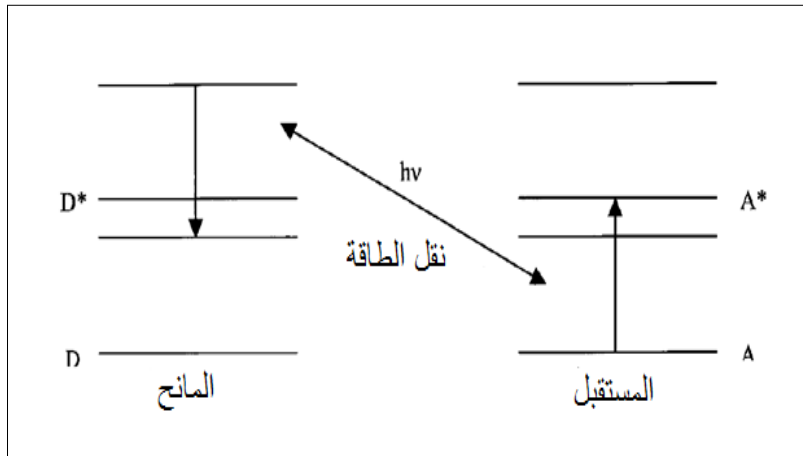
I-7-1-1 نقل الطاقة الرنيني (Transfert d'énergie résonan) :

الفصل الأول: الدراسة الطيفية للعناصر الترابية النادرة

في هذه حالة تتمتع الايونات المجاورة والقريبة بمستويات طاقة متقاربة , حيث ان الايون المانح D في حالة مثارة سوف ينتقل الى مستوى طاقة أقل من خلال تخليه عن طاقته الى الايون المستقبل A الذي هو في حالة اساسية فيمتص هذه الطاقة وينتقل الى الحالة المثارة .



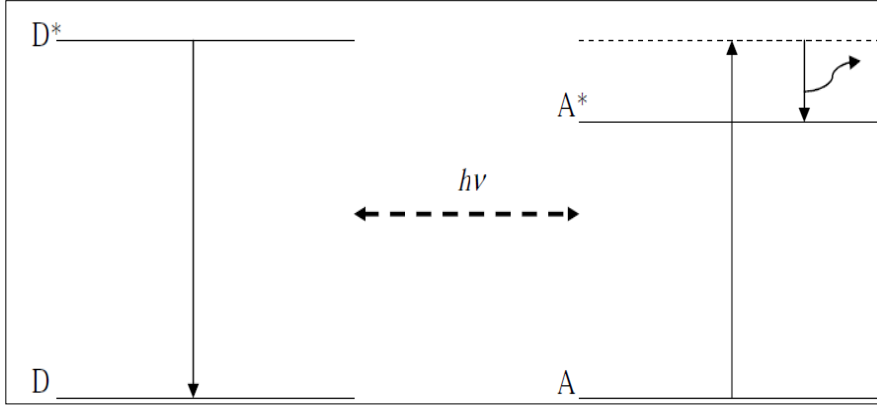
شكل I-12: نقل الطاقة الرنيني



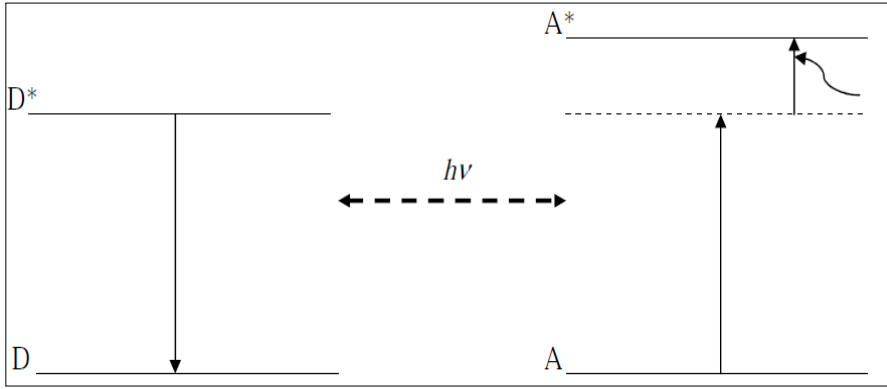
شكل I-13 : نقل طاقة رنيني كيفي.

I-7-2 نقل الطاقة بمساعدة الفونونات: Transfer d'énergie assisté de phonon

في هذه الحالة يكون فيها فرق الطاقة بين مستويات الطاقة المشاركة في النقل غير متطابق، لذلك لا يتضمن نقل الطاقة نفس الحالات المثارة، ولكي يحدث انحفاظ كلي في الطاقة يجب أن يكون هناك انبعاث أو امتصاص للفوتون، اعتمادا على فرق طاقة الانتقال $D \rightarrow D^*$ أعلى أو أقل من انتقال $A^* \rightarrow A$ [14] كما هو موضح في الشكل :



شكل 14-I: نقل الطاقة عن طريق انبعاث الفوتونات [14]



شكل 15-I: نقل الطاقة عن طريق امتصاص الفوتونات [14]

3-7-I نقل الطاقة بالتحويل العلوي (Transfert d'énergie par up conversion) :

وهي عملية يتم خلالها نقل الطاقة بين المانح والمستقبل الموجودان في الحالة المثارة، حيث يشارك فيها فوتونان، يُستخدم الفوتون الأول للانتقال من الحالة الأساسية A إلى الحالة المثارة A* عن طريق نقل الطاقة بمساعدة الفوتونات أو بواسطة نقل الطاقة الرنيني، وأما الفوتون الثاني فيستخدم الطريقة نفسها للانتقال من الحالة المثارة A* إلى الحالة A** [14]. ويمكن ان تتم عملية نقل الطاقة بالتحويل العلوي بطريقتين مختلفتين :

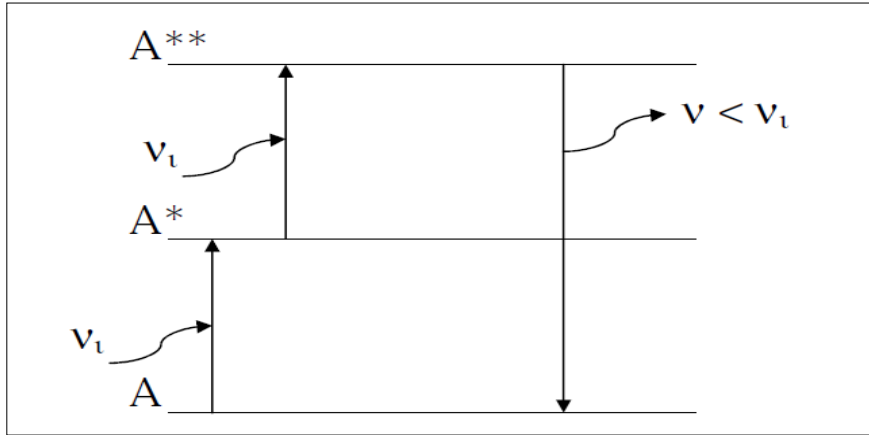
❖ الامتصاص في الحالة المثارة : يتم فيها امتصاص فوتونين من نفس الايون، مما يؤدي الى زيادة طاقة

المستوي المثار .

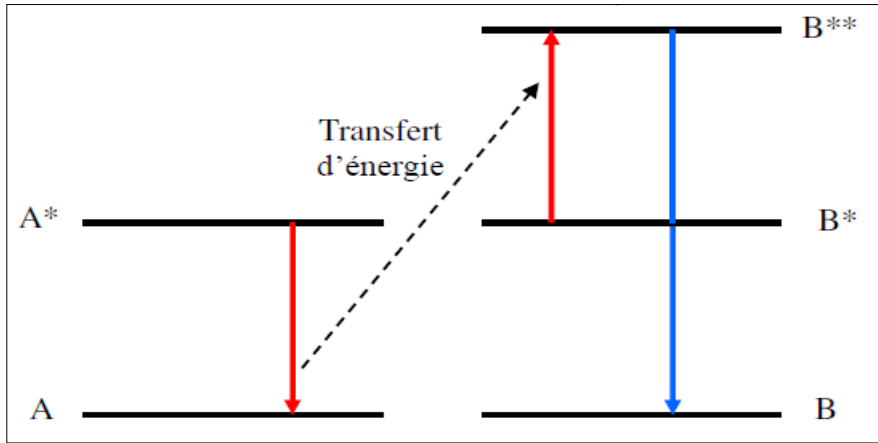
❖ اضافة الفوتونات عن طريق نقل الطاقة (APTE): يتم فيها تبادل ايونين في حالة مثارة طاقتهما فينتقل

الايون المانح من الحالة المثارة A* إلى الحالة الأساسية A, و اما الايون المستقبل فينتقل من الحالة المثارة

إلى الحالة B** .



شكل I-16: عملية التحويل العلوي لفوتونين [14]



شكل I-17: عملية التحويل العلوي لايونين

I-7-4 المردودية الكمية :

من خلال مراعاة العمليات الإشعاعية وغير الإشعاعية، والتغيرات في المستوى المثار الثاني لنظام به مستويين يمكن

كتابة العلاقة التالية: [3]

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{1}{\tau_{mes}} N_2 = -\left(\frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{nr}}\right) N_2 \quad (52-I)$$

وبالتالي فإن التطور الزمني لـ $N_2(t)$ يتبع القانون الأسي:

$$N_2(t) = N_2(0) \exp(-t/\tau_{mes}) \quad (53-I)$$

يتم تعريف المردودية الكمية على أنها النسبة بين عدد الفوتونات المنبعثة على عدد الذرات الابتدائية المثارة في المستوى الثاني،

هذه المردودية تكتب كالتالي:

$$\eta = \frac{\tau_{mes}}{\tau_{rad}} \quad (51-I)$$

لتحسين خصائص مادة نشطة، لنفس التركيبة ونفس الأبعاد المجهرية من المهم تحقيق أقصى قدر من مدة حياة المستوى المثار وذلك لتقترب المردودية الكمية من الواحد

I - 8 خلاصة الفصل الأول:

في هذا الفصل تحدثنا عن بعض المفاهيم الأساسية لطيفية ايونات العناصر الترابية من حيث التوزيع الإلكتروني والايوني لها، ورأينا ان الطبقة 4f هي المسؤولة عن تشابه الصفات الكيميائية لهذه العناصر، وقد اخترنا عنصر الثولوم Tm كأحد عناصرها في دراستنا هذه، حيث قمنا بتحديد رموزه الطيفية و من ثم تحديد مستويات الطاقة . ورأينا أنه عند التفاعل مع إشعاع كهرومغناطيسي، فإن الظواهر التي يمكن أن تحدث هي الامتصاص والانبعاث التلقائي و الانبعاث المحث للفوتونات والتي تتميز على التوالي بواسطة المقطع العرضي للامتصاص σ_{α} و مدة حياة مستوي المثار τ_{rad} والمقطع الفعال للانبعاث المحث σ_e . وهناك تفاعلات أخرى غير إشعاعية ممكنة الحدوث أيضا ومن شأنها أن تنقص من فترة حياة المستويات الطاقة.

كما تطرقنا إلى بعض عمليات الاتساع الطيفي وهي: الاتساع الطبيعي و اتساع دوبلر و الغتساع الناتج عن التصادمات . وقمنا بدراسة موجزة للفعاليات المختلفة التي تؤدي إلى توسيع الخطوط الطيفية مما يجعل الحديث عن بعض هذه الأسباب ونتائجها شيئا ضروريا.

وتعد أيونات العناصر الترابية النادرة عناصر منشطة عند إضافتها لمواد زجاجية، وذلك من أجل تطبيقات الليزر والمضخمات الضوئية، لهذا سندرس في الفصل اللاحق الزجاج المطعم بهذه العناصر.

مراجع الفصل الأول

- [1] R. B. Heslop, P. L. Robinson, Chimie inorganique (Flammarion Sciences 1977).
- [2] A. Beggas, "Etat d'art des verres dopés aux ions terres rares (Application Amplificateur Optique)", mémoire de magister, Centre Universitaire d' El- Oued (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] V. Moizan, Etude de l'amplification laser en bande II dans les fibres de verres chalcogénures, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, (2008).
- [5] <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>
- [6] بيلا آ لينكيل، "الليزرات"، جامعة سان فرناندو، جامعة كاليفورنيا، ترجمة فاروق عبودي قيصر، كلية العلوم، دار الكتب للطباعة والنشر، جامعة الموصل 1403 هـ 1984 م
- [7] مدخل آمنة. (دراسة طيفية لزجاج هالوجيني - فوسفاتي مطعم بالاريوم Er) مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرياح ورقلة 2014
- [8] J. tennyson, Astronomical Spectroscopy, Imperial College Press London ,2005
- [9] H.N. Russell, F.A. Saunders, News regularities in the spectra of the alkaline earth, The Astrophysical Journal, 61 (1925) 38–61
- [10] T. Wächtler, Conception of an integrated optical waveguide amplifier, Project report, Technische Universität Chemnitz, (2002).
- [11] W .Demtröder, Atoms Molecules and photons, Springer – Verlag , 2006, Berlin Heidelberg.
- [12] الليزر وتطبيقاتها الطبية: <https://books-library.net/files/books-library.online-01130308Me9T5.pdf>
- [13] عدي حمادي، (2004). أساسيات الليزر وتقنياته لطلبة الدبلوم الفني في الاتصالات. DOI: 10.13140/2.1.1603.0728.
- [14] Mohamed El Jouad , 'Modélisation et Spectroscopie des Vitrocéramiques Fluorées dopés par des Ions de Terres Rares pour Application en Amplification dans l'infrarouge, thèse de doctorat, Angers ,France ,(2010)

الفصل الثاني

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

II-1- المقدمة

الليزر هو مصدر لتوليد الضوء المرئي وغير مرئي والذي يتميز بمواصفات لا توجد في بقية مصادر الضوء الطبيعية والصناعية , وكلمة الليزر Laser هي اختصار للأحرف الأولى لكلمات الجملة الانجليزية :
(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
سنتطرق في هذا الفصل إلى عرض بعض المفاهيم الأساسية حول الليزر، وكذا حول الزجاج الذي يستعمل كوسط فعال في الليزر وذلك عندما يتم تطعيمه بأيونات العناصر الترابية النادرة، كما سنعرض خطوات الحساب التي تعتمد على نظرية جود – أوفلت والتي تستخدم من أجل تعيين الوسائط الطيفية المهمة لأداء الليزر.

II-2 الليزر و التضخيم الضوئي :

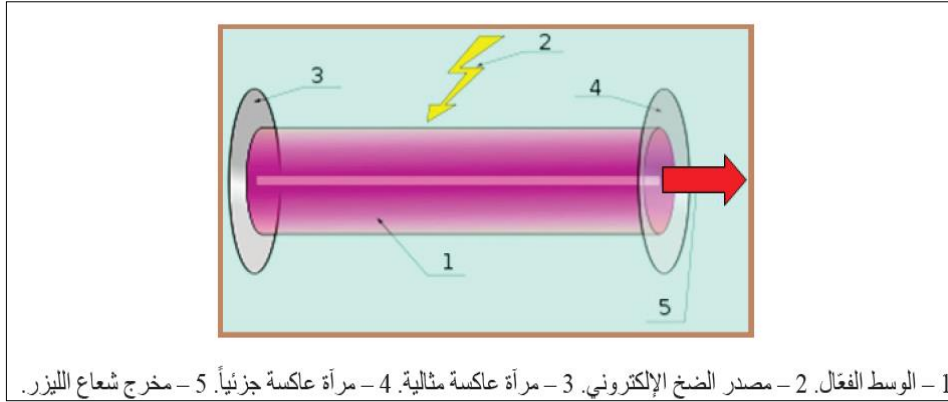
II-2-1 خصائص شعاع الليزر :

يتميز ضوء الليزر على بقية أنواع الضوء الصادر من مصادر طبيعية بعدة خصائص مهمة تؤهله لاستخدامه في كثير من التطبيقات ,ومن أهم هذه الخصائص نذكر :

- أحادي اللون (Monochromatic) : وتعني أنه يتكون من حزمة ضيق جدا من الترددات الضوئية , فهو يبدو للعين بلون واحد عالي النقاء [1]
- الاتجاهية (Directionality): وهي أن شعاع الليزر له زاوية انقراج صغيرة بحيث يمكنه أن يسير لمسافات طويلة دون أن تتشتت طاقته. وتتحدد زاوية (Coherence) وهي الليزر من عدة عوامل أهمها: عرض الشعاع عند خروجه من المصدر، وطول موجة الإشعاع , حيث أن زاوية الانقراج تتناسب عكسيا مع عرض الشعاع الابتدائي وطردياً مع طول الموجة أي أنها تقل مع زيادة عرض الشعاع وتنقص بزيادة طول موجة الإشعاع. [1]
- الترابط (Coherence) : وهي أن الترددات شعاع الليزر لها نفس الطور وكذلك نفس الاستقطاب [1]
- الشدة الضوئية (Light Intensity) : يتميز شعاع الليزر بشدة عالية ومركزة في حزمة ذات قطر ضيق لا يتجاوز الواحد مليمتر، بالإضافة إلى أننا نستطيع تركيزها في بقعة صغيرة تملك قدرة كثافة عالية. [2]

II-2-2 مكونات جهاز الليزر :

يتكون أي جهاز مولد لشعاع الليزر مما يلي



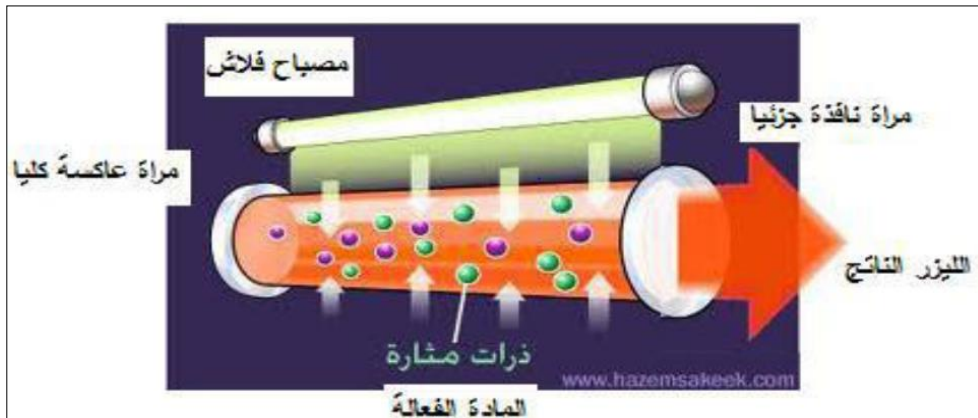
شكل II-1 : مكونات جهاز الليزر [1]

✓ الوسط الفعال : [1]

وهو الوسط الذي تتولد منه أشعة الليزر، وقد يتكون هذا الوسط من مادة صلبة مثل بلورة الياقوت المشوب بالكروم الصلب ، أو مادة سائلة مثل أكسجني كلور الفوسفور المشوب بالنيوديميوم، أو مادة غازية مثل مزيج هيليوم-نيون. وهذا الوسط له عدد من المستويات الطاقية تصلح لأن تتحقق بينها الانتقالات الثلاثة الضرورية (امتصاص ، انبعاث تلقائي ، انبعاث محفز)

✓ مصدر طاقة (الضخ)

ويساعد الضخ على تزويد أكبر قدر ممكن من الإلكترونات بالطاقة لتنتقل إلى مستويات الطاقة الأعلى فتصبح الذرات الوسط الفعال مثارة ، للحصول على ليزر وتسمى هذه العملية بالإنقلاب التعداد ، وتتنوع مصادر الطاقة المستخدمة في هذه العملية منها : طاقة كهربائية ، طاقة حرارية ، طاقة ضوئية وكيميائية . [1][2]



شكل II-2 : الضخ الضوئي [2]

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

✓ المرنان الليزري :

وهو عبارة عن مرآتين متقابلتين مستويتين أو كرويتين مقعرتين وتوضعان متقابلتان توضع بينهما المادة الفعالة والوجه العاكس لهما يكون نحو الداخل أي باتجاه المادة الفعالة. [1]

وفي العادة يستخدم :

○ **المرنان الخارجي** : وهو عبارة عن مرآتين متوازيتين في نهاية الأنبوب الحاوي للمادة الفعالة، وتكون الانعكاسات المتعددة بينهما هي الأساس في عملية التكبير الضوئي Amplification كما في الليزر الغازية. [2]

○ **مرنان داخلي** : ويتمثل في طلاء نهاية المادة الفعالة لتعمل عمل المرآة، كما في ليزر بلورات الياقوت وفي الليزر الصلبة بصفة عامة .

وفي كلا الحالتين يجب أن تكون إحدى المرآتين عاكسة كلياً للفوتونات الضوئية والأخرى تسمح بالنفاذ الجزئي لكي يتسنى لشعاع الليزر الخروج منها خارج المرنان [2]



شكل II-3: المرنان الليزري

II-2-3 أنواع الليزر:

يتحدد نوع الليزر ومواصفات الضوء الصادر عنه من حيث نوع المادة الفعالة ونوع مصدر الضخ، وهناك

أنواع كثيرة من الليزر نذكر منها : [1]

II-2-3-1 ليزرات الحالة الصلبة :

يتكون هذا النوع من الليزرات من جسم زجاجي أو بلوري مطعم بذرات مادة فعالة يكون على شكل أسطوانة، يوجد على أحد وجهي الاسطوانة مرآة عاكسة كلياً للأشعة و أما الوجه الآخر مرآة عاكسة جزئياً , ويحاط بهذه الاسطوانة مصدر للضوء عالي الشدة يعمل على تمرير الضوء داخل الأسطوانة لتعطي تردد ضوء الضخ المطلوب. [1][2] وهناك أنواع من الليزرات في الحالة الصلبة منها :

✓ **ليزر الياقوت** : يتكون من الياقوت النقي (CrAlO_3) الذي يحتوي على ذرات الكروميوم الفعالة وفي عملية الضخ يستخدم مصباح غاز الأكزيتون فيتولد ضوء احمر نقي [1].

✓ **ليزر ياج YAG** : هو ليزر وسطه الفعال عبارة عن جسم بلوري اصطناعي، وهو حجر الياج (Yttrium Aluminium Garnet (YAG) $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) يتم تطعيمه بعناصر فعالة تكون في الغالب من العناصر الأرضية النادرة لتعطي طيفاً واسعاً من الترددات مثل : الليزر الياج المطعم بالنيوديميوم (Nd - YAG laser) الذي يصدر تردد في مجال الأشعة تحت الحمراء القريبة، وليزر الياج المطعم بالإربيوم (Er - YAG laser) الذي يصدر تردد في مجال الأشعة تحت الحمراء البعيدة [1].

II-2-3-2 ليزرات الحالة السائلة :

هذا النوع من الليزرات يتكون وسطه الفعال من صبغات كيميائية عضوية مُذابة في الماء، مثل : الرودمين (Rhodamine G6) ، وأما عن عملية الضخ فنستعمل مصباح وميض يعطي تردد ضوء الضخ المطلوب [2][6].

II-2-3-3 ليزرات الحالة الغازية :

هذا النوع من الليزرات يتكون وسطه الفعال من غاز داخل أنبوب من الزجاج , وتتم عملية الضخ بجهاز كهربائية الذي يقوم بتحويل القدرة الكهربائية إلى قطبين كهربائيين (الأنود و الكاثود) في هذا الأنبوب فيحدث التفريغ الكهربائي للغاز وبهذه الطريقة يتولد الليزر. وهناك أنواع من الليزرات من هذا النوع نذكر منها: ليزرات الأركون , ليزرات نيتروجين , ليزرات الهيليوم - نيون و ليزرات كلوريد - الزينون . [3][6]

II-2-4 شروط انبعاث الليزر :

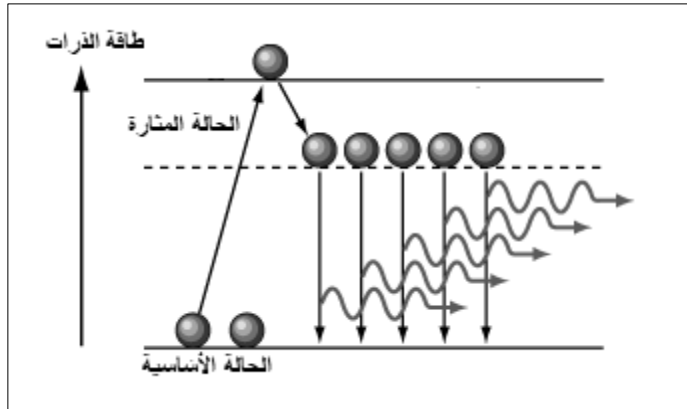
للحصول على أشعة الليزر يجب توفر الشروط الثلاثة :

II-2-4-1 الانبعاث المحفز :

لحدوث هذه العملية نحتاج أن نطبق على المادة الفعالة طاقة خارجية فتمتصها الكثرونات المادة الفعالة فتتفاعل معها ثم تحرر لنا الطاقة بشكل فوتونات. [1]

II-2-4-2 التعداد العكوس :

من اجل انبعاث أشعة الليزر نحتاج إلى عدد كبير من الفوتونات، ويحصل هذا إلا إذا كان عدد الإلكترونات في الحالة المثارة أكثر من عدد الإلكترونات في الحالة الأساسية وذلك باستخدام طاقة خارجية، وتسمى هذه الظاهرة بالتعداد العكوس. [2]

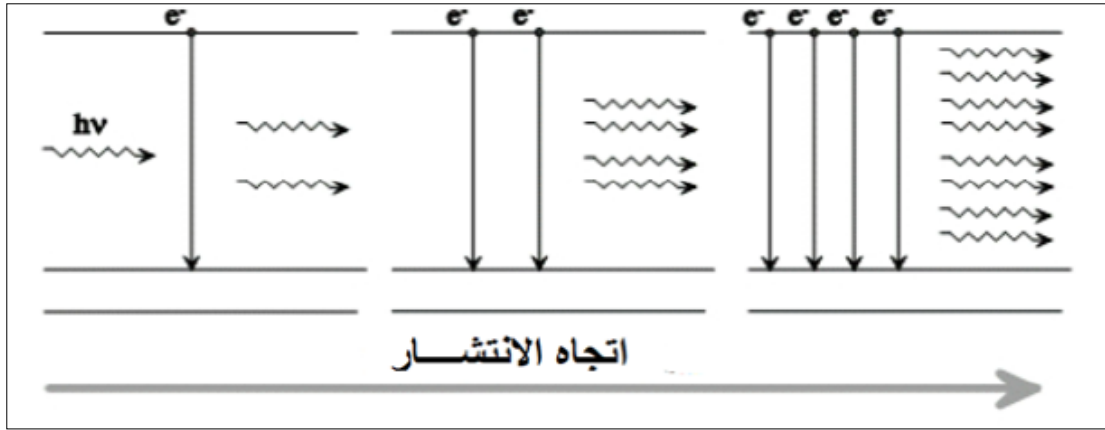


شكل II-4: التعداد العكوس

II-2-4-3 التضخيم الضوئي:

في هذا الشرط تكون الذرة في حالة إثارة بفعل طاقة خارجية ولرجوع إلى حالة الاستقرار فإنها تبعث فوتون لتنزل إلى مستوى الاستقرار، وهذا الفوتون بدوره يكون طاقة تمتصها الإلكترونات الأخرى لتنتقل إلى مستوى أعلى فتصدر بذلك فوتونات أخرى للتخلص من هذه الطاقة فيزيد عدد الفوتونات الناتجة بشكل كبير. [2][3]

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة



شكل II-5: عملية تضخيم الضوء [4]

II-1-5 الريح :

وجود موجة كهرومغناطيسية تنتشر في اتجاه OZ و التي يتركز توزيعها الطيفي للانتقال من المستوي N1 إلى المستوي N2 تعطي تغير في الشدة الضوئية I بدلالة اتجاه الانتشار OZ بالعلاقة التالية: [5]

$$\frac{dI_\nu}{dz} = (\delta_{21}N_2 - \delta_{12}N_1 - \alpha)I \quad (1-II)$$

استعملنا هذا التقريب الذي يعتبر أن كثافة التوزيع المعكوس للإسكان $\delta_{21}N_2 - \delta_{12}N_1$ تكون ثابتة في وسط التضخيم بمكاملة المعادلة السابقة نجد: [5]

$$I_\nu = I_\nu(0) \exp[(\gamma(\nu) - \alpha)X] \quad (2-II)$$

حيث :

$$\gamma(\nu) = \delta_{21}N_2 - \delta_{12}N_1$$

هي معامل الريح

إذا كانت $\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_0$ نجد التعبير البسيط التالي :

$$\gamma(\nu) = \delta_0 \Delta N \quad (3-II)$$

حيث: $\Delta N = N_2 - N_1$

الريح هو النسبة بين الشدة الخارجة والشدة الداخلة للوسط، ويعطى بالعلاقة التالية: [5]

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

$$G = \frac{I_v(L)}{I_v(0)} \quad (4- II)$$

حيث :

L : طول العينة التي يجتاها الضوء.

بما أن الضوء الواقع في الوسط الفعال ليس موزعا بالتساوي، وكذلك توزيع الأيونات النشطة في المادة ليست منتظمة أيضا، إذن يمكننا إدخال عامل الحجز Γ فيتم التعبير عن الريح بواسطة المعادلة التالية: [5]

$$G = \exp[(\Gamma \gamma(v) - \alpha)L] \quad (5- II)$$

وبالتالي من أجل زيادة الريح لا بد من: زيادة معامل الريح γ ، والتقليل من الضياعات α وكذلك عن طريق تركيز مرتفع أو عن طريق طول كبير للمضخم. ويتم الحصول على الريح بالدسيبل "decibels" من خلال العلاقة التالية :

$$G_{dB} = 10 \log(G) \quad (6- II)$$

بتعويض G بعبارته، نجد:

$$G_{dB} = 4.34[(\Gamma \gamma(v) - \alpha)L] \quad (7- II)$$

II-2-6 المنظومة الليزرية :

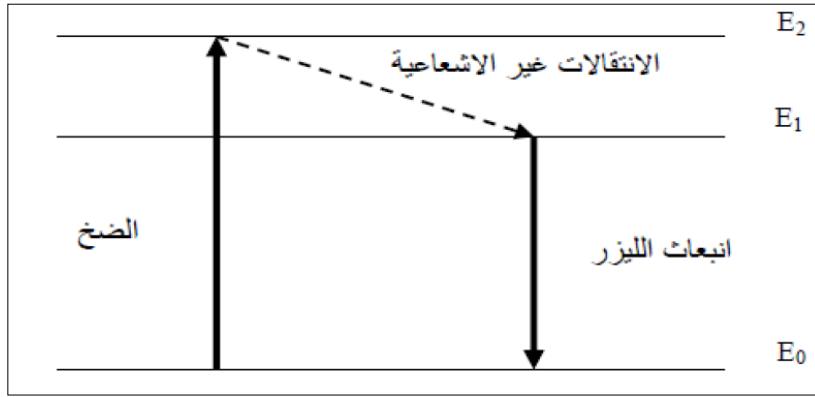
يُمكن تصنيف المنظومات الليزرية نسبة إلى مُستويات طاقة الوسط الفعال، إلى منظومتين وهما:

II-2-6-1 نظام ثلاثي المستويات :

يتكون هذا النظام من ثلاث مستويات ، المستوى الأرضي E0 الذي يمثل المستوي الليزري السفلي ومستوي الإثارة E2 الذي يمثل المستوي الليزري العلوي والمستوي E1 الذي يمثل مستوي شبه المستقر. [6] وفي حالة التوازن الحراري تكون أغلب الذرات في الحالة الأساسية، و بواسطة مصدر ضوئي تثار الذرات من المستوى الأساسي إلى المستوى الثالث بعد ذلك تنتقل الذرات سريعا إلى المستوى الثاني (المستوي شبه المستقر)، وتبقى فترة زمنية أطول في هذا المستوى مما يحقق عملية التوزيع العكسي، أي عدد الذرات في المستوى شبه المستقر أكبر من عدد الذرات في

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

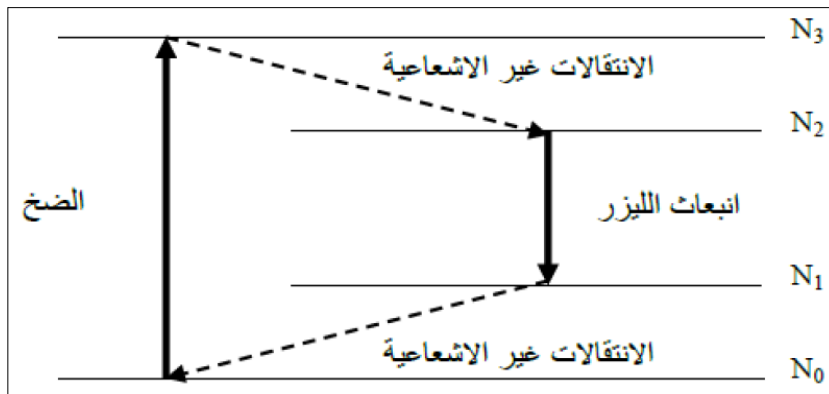
المستوي الأساسي، ومن هنا تكون الذرات مهيأة لحدوث الانبعاث المحرض، وبالتالي حدوث عملية تضخيم الإشارة ذات الطاقة الموافقة للفرق بين المستوي الشبه المستقر والمستوي الأساسي [7].



شكل II-6: نظام ذو ثلاث مستويات [8]

II-1-6-2 نظام رباعي المستويات [9]:

يتكون من أربع مستويات طاقة، المستوى الأرضي N_0 ، والمستوي الليزري السفلي N_1 ، والمستوي الإثارة N_2 والمستوي الليزري العلوي N_3 ، وفي حالة التوازن الحراري يكون عدد الذرات الموجودة في مستويين N_1 و N_2 قليل جدا، وبواسطة مصدر ضوئي يحصل ضخ من المستوى N_0 إلى مستوي N_3 الذي يملك عمرا قصيرا جدا مما يجعل انتقال الذرات إلى المستوي N_2 مسرعا جدا، وتبقى الذرات في مستوي N_2 مدة أطول مما يؤدي إلى توزيع عكسي للذرات، أي يكون عدد الذرات في مستوي N_2 أكبر من عدد الذرات في مستوي N_1 لكونه فراغا من البداية، وبما أن عمر المستوي N_1 قصير جدا فنه يسهل تفرغه، وبالتالي نحصل على فعل الليزر بين مستويين N_1 و N_2 .



شكل II-7: نظام ذو أربعة مستويات [8]

II-3 الزجاج المطعم بالعناصر الترابية :

الزجاج هو مادة صلبة غير متبلورة يتم الحصول عليها عن طريق تجميد السوائل فائقة التبريد [4][3]

II-3-1 بنية الزجاج :

لقد وضعت عدة فرضيات من أجل دراسة بنية الزجاج ومن بينها النظرية البلورية ومبدأها أن الزجاج يتشكل من مجموعة من المجالات الذرية الصغيرة والمرتبطة تدعى بالبلورات ، وأما النظرية الثانية التي وضعت من طرف زاكريازيان سنة 1932 م، والتي تنص على عدم وجود مجالات ذرية مرتب. تعتمد بنية الزجاج على طبيعة ونسبة الأكاسيد المكونة له [10].

II-3-1-1 البنية البسيطة للزجاج :

يتكون من نوع واحد من الأكاسيد حيث يكون للجزيئات ترتيب عشوائي ويمثل بالشبكة العشوائية تأخذ هذه الأخيرة أشكال متعددة الأوجه وهي: [2]

- الزجاج الفوسفاتي P_2O_5
- زجاج السيلكا المكون من جزيئ SiO_2
- الزجاج المكون من بلورات B_2O_3

II-3-1-2 البنية المركبة للزجاج :

هو زجاج الذي يتشكل من أكسيدين فأكثر ولقد صنفت هذه الأكاسيد من حيث وظائفها في الشبكة الزجاجية إلى ما يلي: [11]

- الأكاسيد المغيرة : والتي تكون صيغتها من الشكل $Li_2O.Na_2O.K_2O.AO_2$.
- الأكاسيد الوسيطة : وهي الأكاسيد التي صيغتها من الشكل $PbO.ZnO.Al_2O_3$
- الأكاسيد المشكلة للشبكة : وهي الأكاسيد التي صيغتها من الشكل $SiO_2.AO_2.B_2O_3.P_2O_5$

II-3-2 خواص الزجاج :

يتميز الزجاج بخمس خصائص و هي :

II-3-2-1 الخصائص الضوئية :

- قرينة الانكسار : هي النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ على سرعته في المادة، وفي حالة الزجاج تعطى قرينة الانكسار بالعلاقة التالية: [12]

$$n = \frac{c}{c_v} \quad (8- II)$$

حيث :

n : قرينة انكسار الزجاج.

c : سرعة انتشار الضوء في الفراغ .

c_v : سرعة انتشار الضوء في الزجاج .

ترتبط قرينة الانكسار الوسط بطول موجة الضوء الوارد (λ) ، ويسمى هذا الارتباط بالتشتت ، و يعتبر الزجاج من الأوساط المشتتة للضوء(المبددة للضوء)، ويمكن تعريف التشتت بالعلاقة التالية: [12]

$$D_v = \frac{dn}{d\lambda} \quad (9- II)$$

بجيث:

D_v : معامل تشتت الزجاج .

- الشفافية : هي مفهوم مرتبط بنفاذية الضوإشعاع،، بجيث إن كل نوع من أنواع الزجاج يمرر أشعة ضوئية معينة في مجالات محدودة من الطيف. [13]

وعندما يكون الزجاج ممتصا لنوع معين من لإشعاع ،فانه يتم تعريف معامل الامتصاص α بموجب قانون " Lambert " و " Beer " :

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (10- II)$$

حيث :

I : شدة الإضاءة النافذة .

I_0 : شدة الإضاءة الواردة .

α : معامل الامتصاص.

X : طول العينة .

II-3-2-2 الخصائص الكهربائية :

تتعلق الناقلية الكهربائية للزجاج بمكوناته وكذلك بدرجة الحرارة , حيث إن الزجاج يكون عازلا في درجات الحرارة العادية ويكون كذلك ناقل لتيار في درجات درجة الحرارة عالية , حيث انه يتولد التيار كهربائي في الزجاج من انتقال حاملات الشحنة (أيونات أو إلكترونات أو الفجوات الحرة) المتحررة من الذرات المعدنية والعناصر الانتقالية المتواجدة في الزجاج كشوائب , وكذلك الرطوبة تزيد من قابلية التوصيل للتيار الكهربائي للزجاج. [12]

II-3-2-3 الخصائص الحرارية :

- **توصيل حراري** : يتميز الزجاج بتوصيل حراري ضعيف حيث نجد معدل سريان الحرارة في الزجاج أقل مقارنة من بقية المعادن, أي انه مهما تغير تركيب الزجاج فإن التوصيل الحراري لن يتغير كثيرا.
- **الكثافة** : تعين الكثافة بحاصل قسمة الكتلة على الحجم فتقدر كثافة الزجاج 2.4 و الزجاج المتعادل 2.3 والزجاج الحراري 2.2. [12]
- **اللزوجة** : تتعلق لزوجة الزجاج بتركيبه الكيميائي ودرجة الحرارة انصهاره حيث تعد اللزوجة من أهم الخواص التي تتحكم بسلوك الزجاج أثناء مراحل الانصهار, و التشكيل والمعالجة الحرارية [12] ويعطى معامل η اللزوجة بالعلاقة التالية :

$$\eta = \tau / \frac{dy}{dt} \quad (11- II)$$

حيث :

τ : إجهاد القص وحدته (N/m² = Pa).

$\frac{dy}{dt}$: سرعة التشوه الزاوي (سرعة القص).

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

- التمدد الحراري : إن تسخين مادة معينة يؤدي إلى زيادة طاقتها الحرارية، وبالتالي زيادة سعة اهتزازاتها الذرية فإذا كانت قوى الربط بين الذرات لا توافقية فإن هذه الاهتزازات تؤدي إلى زيادة في طول الروابط الذرية ومنه زيادة في حجم العينة، تسمى هذه الظاهرة بظاهرة التمدد الحراري [9] يتميز التمدد الحراري للمادة بمعامل متوسط لزيادة الطول مع درجة الحرارة يسمى معامل التمدد الحراري α ويعطى بالعلاقة التالية: [14]

$$\alpha_{\Delta t} = \frac{L \Delta L}{L_0 \Delta t} \quad (12- II)$$

حيث :

$\alpha_{\Delta t}$: معامل التمدد الحراري الخطي

$\frac{\Delta L}{L_0}$: الاستطالة النسبية لعينة بطول ابتدائي L_0

Δt : المجال الحراري المعتبر

ويتميز التمدد الحراري للمادة أيضا بمعامل متوسط لزيادة الحجم مع درجة الحرارة يسمى بمعامل

تمدد حجمي β ويعطى بالعلاقة التالية [14]: $\beta = 3\alpha$

II-3-2-4 الخصائص الميكانيكية :

- الصلادة : هي قدرة مقاومة الزجاج لعوامل الخدش والاحتكاك، تختلف صلادة الزجاج باختلاف تركيبه حيث تقدر صلادة الزجاج بنسب الأكاسيد المكونة له. [12]
- المتانة : تختلف متانة الزجاج باختلاف تركيبه، فمثلا تزداد المتانة بزيادة نسبة الأكاسيد المشكلة، وتضعف بالتسخين الطويل. [12]

II-3-2-5 الاستقرار الكيميائي :

هو قدرة الزجاج على مقاومة تأثير الأحماض مثل محاليل حمضية أو ملحية (قاعدية) وغيرها من العوامل الجوية الضارة والعوامل الكيميائية بشكل عام [14]

- تأثير المحاليل الحمضية:

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

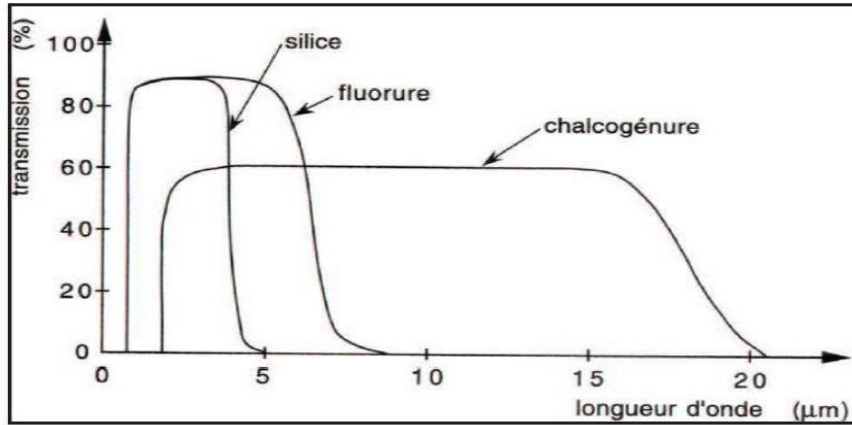
يعتبر الزجاج من المواد الحساسة للمحاليل الحمضية المائية؛ إذ يتم الهجوم الكيميائي عليه بألية التبادل الأيوني بين H^+ و H_3O^+ المتواجدة بالحمض وأيونات الأكاسيد المغيرة المتواجدة بالزجاج حيث يرتبط الهجوم الكيميائي بالطاقة اللازمة لاقتلاع أيون من فجوته الذرية داخل البنية الزجاجية من جهة و بالطاقة التي تحته على الحركة فيها من جهة أخرى [14]

- تأثير المحاليل الملحية : ويتأثر الزجاج أيضا بالمحاليل الملحية خاصة محاليل المعادن القلوية حيث يمكن أن يحدث الهجوم الكيميائي بالماء أو بخاره، ويتم ذلك بإحدى الآليتين السابقتين أي حالة المحلول الحمضي أو حالة المحاليل لقلوية، و ذلك مرتبط بطبيعة الزجاج ودرجة الحرارة [14]

II-3-3 أنواع الزجاج :

هناك ثلاثة أنواع لعائلات الزجاج و هو:

- الزجاج الأكسيدي: يتميز هذا النوع من الزجاج بخصائص ترموميكانيكية ممتازة، له شفافية للضوء المرئي تصل إلى $3-5 \mu m$ وقرينة انكساره ضعيفة نسبيا تتغير من (3-2) توجد عدة أنواع للزجاج الأكسيد أهمها : زجاج أكسيد الجرمانيوم، زجاج أكسيد السيليسيوم، زجاج أكسيد البور، زجاج أكسيد الفوسفور [15]
- الزجاج الكالوجينية : تتميز جزيئاته بروابط كيميائية متكافئة وقرنية انكسار خطي أكبر من 2 ويتميز كذلك باستقراره الكيميائي وشفافيته للأشعة تحت الحمراء لبعض التراكيب كما يستخدم نوافذ لهذه الأشعة، ويحتوي هذا الزجاج الكبريت والسيليونيوم والتي تعتبر أساس الزجاج الكالوجيني. [16]
- الزجاج الفلوريدي: يتميز هذا الزجاج بأنه نافذ للأشعة تحت الحمراء من خلال تركيبه المكون من خليط من فلوريدات الزركونيوم والباريوم و اللانتانيوم والألدنيوم والصوديوم، ويستخدم في الألياف البصرية للاتصالات وأيضا في عملية التضخيم الضوئي. [16]



شكل II-8: مجال الشفافية لأنواع الزجاج

II-3-4 المادة المضيفة للعناصر الترابية النادرة :

المواد المضيفة للعناصر الترابية تصنف إلى صنفين : مواد زجاجية ومواد صلبة بلورية , وهذه المواد يجب أن تتوفر فيها خصائص بصرية جيدة , وأيضاً خصائص ميكانيكية وحرارية مناسبة وهذا من اجل مقاومة ظروف عملية التطعيم , ويجب علينا أن نأخذ بعين الاعتبار حجم الذرات الايونات النشطة , والخصائص الطبيعية التي تتوافق مع ايونات المادة المضيفة , وكذلك مقارنة الفرق بين مستويات الطاقة للايونات النشطة وتردد الأقصى لاهتزاز الشبكة للمادة المضيفة , فعند إضافة الايونات النشطة بكميات كبيرة قد تؤثر على خصائص المادة المضيفة , لذا فان إضافتها للمواد الصلبة البلورية أو الزجاجية تكون بكميات صغيرة جداً لتفادي تلك التأثيرات الجانبية. [17]

الزجاج هو المضيف الجيد لأيونات العناصر الترابية النادرة لان له قابلية التكيف من ناحية الشكل والحجم وله خصائص بصرية جيدة, وكذلك وجود مرونة في تغيير بعض خواصه الفيزيائية , كما يمكن ضبط معامل التغير الحراري , لكي نحصل على فجوة بصرية مستقرة حرارياً, ويتميز أيضاً بمعامل ربح ثابت في أطوال موجية مختلفة, بسبب التعريض غير المتجانس لشريط الامتصاص والإصدار. [17]

II-3-5 ذوبانية العناصر الترابية النادرة :

عند تراكيز العالية تميل الايونات عناصر الترابية إلى تشكيل رواسب في معظم المواد الصلبة لذا فانه لا يجب إدراجها في المادة المضيفة بطريقة عشوائية , بل يجب أن تكون قابلة لذوبان في طور الصلب, كما أن الخصائص الطيفية لايونات العناصر الترابية النادرة تتأثر بشكل مباشر بالتفاعلات ايون - ايون وتفاعل ايون - مادة , ومن بين تفاعل ايون- مادة نذكر طاقة فوتون المادة المضيفة حيث أن كل نوع من الزجاج يمتلك طاقة فوتون خاصة به . [17]

II-3-6 التأثير على خصائص الاستضاءة :

مدة حياة الاستضاءة لأيونات العناصر الترابية النادرة نظريا تكون ما بين $(10^{-6} - 10^{-3})$ ، أما تجريبيا تكون القيم أقل من ذلك بكثير، إضافة إلى ذلك عدة مستويات لأيونات العناصر الترابية النادرة لا تتسبب في انبعاث فوتون بعد الإثارة، فقد تبين أن هناك الانتقالات غير المشعة تكون حساسة للمادة المضيفة، كل ذلك يؤدي إلى تقليل الاستضاءة . ومن أهم هذه التأثيرات نجد : [17]

II-3-6-1 تركيز الإطفاء الذاتي :

التراكيز العالية للأيونات النشطة تؤدي إلى إنخفاض مدة حياة الحالة المثارة، وهذا ما يقلل من كفاءة الاستضاءة وتسمى هذه العملية تركيز الإطفاء الذاتي . [17]

يمكن التعبير عن مدة حياة الاستضاءة بالعلاقة التالية :

$$\tau_{\text{abs}} = \frac{\tau_0}{1 + \left(\frac{\rho}{Q}\right)^P} \quad (13- II)$$

حيث :

τ_0 : هو مدة حياة الاستضاءة عند انعدام التركيز.

Q : و تركيز الإطفاء الذاتي.

ρ : هو تركيز التطعيم

P : أس نوعي، (في حال النيوديوم يساوي 2)

II-3-6-2 التفاعل مع الفوتونات :

إن نقل الطاقة لا يكون للأيونات المجاورة فقط بل يعطى جزء منها إلى فوتونات , وهذا ما يؤدي إلى فقدان الطاقة , وأما الاسترخاء الغير الإشعاعي بواسطة الفوتونات يحدث عندما تتوفر عدد من الفوتونات اللازمة من أجل عبور الفرق الطائي بين المستوى المثار والمستوى أدنى الذي يليه مما يؤثر على فترة الحياة للمستويات المثارة ويقلل من كفاءة و مردودية الانبعاثات. من أجل طاقات فوتون محصورة بين 0.1 و 0.25 من الطاقة الانتقالية، فإن مدة حياة الاستضاءة تتعلق بدرجة الحرارة . أما بالنسبة لطاقات الفوتونات الضعيفة، فإن الاسترخاء متعدد الفوتونات يكون ضئيلا . [17][13]

II-3-6-3 تفاعل ايون -ايون :

يحدث التحويل الطاقوي غير إشعاعي بين مستويات طاقة متقاربة لايونات خاصة, عند زيادة تركيز ايونات عناصر الترابية النادرة إما لنوعين أو أكثر, مما يؤدي إلى إنخفاض مدة حياة المستويات الطاقة مقارنة مع مدة حياة مستويات الطاقة لايون معزول . [17][13]

II-3-6-4 تفاعل OH^- :

عند وجود مجموعات داخل المادة فإنها تؤدي إلى انخفاض إسكان المستويات في الحالة المثارة، وبالتالي تتسبب في انطفاء الاستضاء، فتعرف هذه المجموعة بتأثيرها على انبعاث أشعة تحت الحمراء، إذ أن أنماطها الاهتزازية تقع في عصابة طاقة عريضة عن حوالي [17][13]

II-4-4 - نظرية جود - أوفلت Judd-Ofelt

أن الوسائط الطيفية المختلفة للعناصر الترابية ثلاثية التكافؤ في المضيفات يتم حسابها من خلال تطبيق نظرية جود-أوفلت، حيث أنها تعتمد هذه النظرية على دراسة عصابات الامتصاص للايون الترابي التي تكون فيها انتقالات ثنائي القطب المغناطيسي مهمة أمام انتقالات ثنائي القطب الكهربائي، وكذلك تحديد قوى الانتقال التي تمكننا من استنتاج معاملات جود - أوفلت . [18]

II-4-1 لمحة تاريخية عن نظرية جود -أوفلت :

قدمت نظرية جود-أوفلت من طرف كل من الأستاذ برايان جود من قسم الفيزياء و الفلك في جامعة بيركلي بكاليفورنيا الأمريكية و الأستاذ جورج أوفلت من جامعة جونز هربكنز بواشنطن الأمريكية سنة 1662، فأصبحت النظرية هي الأساس في مجال المطيافية البصرية، حيث استغلت في الكثير من الدراسات (حوالي 5000 مقال علمي) ووجهت الكثير من هذه الدراسات إلى التطبيقات المهمة للمواد المطعمة بالأتربة النادرة مثل الليزر و التضخيم الضوئي [19].

II-4-2 طيف الامتصاص :

يمكن حساب المقطع الفعال للامتصاص عند أطوال موجية مختلفة، و ذلك من خلال استخدام مطياف مزدوج الحزمة، وهذا الأخير يقوم بتسجيل أطيف الامتصاص عند مرور حزمة من الضوء الأبيض خلال موحد اللون لتحديد الطول الموجي ثم يتم فصلها إلى الحزمتين لهما نفس الشدة : الأولى حزمة مرجعية موافقة ل $I_0(\lambda)$ والحزمة الأخرى تمر من خلال العينة شدتها $I(\lambda)$. تعطى الكثافة الضوئية بالعلاقة التالية: [20]

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

$$DO = \log\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right) \quad (14- II)$$

شدة الضوء الممتصة تعتمد على معامل الامتصاص α وسمك العينة dl الذي يجتازه الشعاع:

$$\frac{dI}{I} = -\alpha \cdot dl \quad (15- II)$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha l) \quad (16- II)$$

وحدة معامل الامتصاص α تكون ب cm^{-1} ويعبر عنه بدلالة الكثافة الضوئية DO بالعلاقة التالية :

$$\alpha = \frac{\ln 10}{x} \cdot DO \quad (17- II)$$

ونستنتج المقطع الفعال للامتصاص:

$$\sigma_{ab} = \frac{a(\lambda)}{N_0} = \frac{2.3}{N_0 \cdot L} \cdot DO \quad (18- II)$$

حيث :

N_0 : هو تركيز الايونات المسؤولة عن الامتصاص

L : سمك العينة .

II-4-3 قوى الانتقال و قوى الاهتزاز :

قوى الانتقال بين عنصري ستارك يرمز لها ب $S(J, J')$ ويعرف بأنه عنصر المصفوفة لمربع مؤثر الانتقال لثنائي

القطب الكهربائي (DE) أو ثنائي القطب المغناطيسي (MD) :

$$S_{ed(J, J')} = |\langle J | DE | J' \rangle| \quad (19- II)$$

$$S_{md(J, J')} = |\langle J | DM | J' \rangle| \quad (20- II)$$

قوى الانتقال بين مستويين هي مجموع القوى الانتقالية بين مستويات ستارك:

$$S_{ed,md(J, J')} = \sum S_{ed,md(J, J')} \quad (21- II)$$

أما بالنسبة لقوى الاهتزاز تعرف بالعلاقة التالية: [21]

$$f(J, J') = \frac{8\pi^2 m_e c}{3h(2J+1)n^2 \lambda_p} [X_{ed} S_{ed(J, J')} + X_{md} S_{md(J, J')}] \quad (21- II)$$

حيث :

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

$X_{\text{md}} = n^3$ و $X_{\text{ed}} = \frac{n(n^2+2)^2}{9}$ هما تصحيحان للحقل المحلي حول أيونات العناصر الترابية النادرة .
 m_e : كتلة الإلكترون .

C : سرعة انتشار الضوء في الفراغ .

n : قرينة الانكسار .

h : ثابت بلانك

λ_p : الطول الموجي المتوسط الانتقال .

II-4-4 حساب قوى الانتقال:

تعرف قوى الانتقال التجريبية S_{md} بالعلاقة التالية :

$$(22- \text{II}) S_{\text{md}} = \left(\frac{h^2}{4\pi m_e c} \right) | \langle J || L + 2S || J' \rangle |^2$$

حيث :

$| \langle J || L + 2S || J' \rangle |$: مؤثر عنصر المصفوفة ، و يتعلق فقط بأيونات العناصر الترابية النادرة و الانتقال لدينا: [14]

$$J = J': \left\{ \begin{array}{l} | \langle J || L + 2S || J' \rangle | = g \hbar [J(J+1)(2J+1)]^{\frac{1}{2}} \\ g = 1 + \frac{J(J+1)+S(S+1)-L(L+1)}{2J(J+1)} \end{array} \right\} \quad (22- \text{II})$$

$$J = J - 1: | \langle J || L + 2S || J - 1 \rangle | = \hbar \left\{ \frac{(S+L+J+1)(S+L+1-J)(J+L+S)(J+L-S)}{4J} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (23- \text{II})$$

$$J = J + 1: | \langle J || L + 2S || J + 1 \rangle | = \hbar \left\{ \frac{(S+L+J+2)(S+L+1-L)(J+L-S)(L+S-J)}{4(J+1)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (24- \text{II})$$

وفقا لنظرية جود-أوفلت قوى الانتقال لثنائي القطب الكهربائي بين مستويين تعطى عن طريق المعادلة:

$$S_{\text{ed}}^{\text{calc}} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \Omega_k \left| \langle J' || U^{(k)} || J \rangle \right|^2 \quad (25- \text{II})$$

حيث :

Ω_k : معاملات تعكس تأثير المادة المضيفة على احتمالية الانتقالات الإشعاعية . وهي معروفة تحت اسم وسائط

جود-أوفلت. [22]

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

$U^{(k)}$: تمثل قيم المصفوفة لمكونات المؤثر التنسوري المختزل وهي قيم ثابتة مستقلة عن المادة المضيفة تتعلق بعنصر التطعيم [22].

II-4-5 قوى الاهتزاز التجريبية :

يمكن التعبير عن f_{mes} اعتمادا على معامل الامتصاص $\alpha(\lambda)$ عن طريق المعادلة التالية :

$$f_{mes} = \frac{m_e c^2}{\pi e^2 N} \int \frac{\alpha(\lambda) d\lambda}{\lambda^2} \quad (26- II)$$

حيث :

$$f_{mes} = f_{ed}^{mes} + f_{md}^{mes} \quad (27- II)$$

إذن:

$$f_{ed}^{mes}(J, J') = \frac{m_e c^2}{\pi e^2 N} \int_{J \rightarrow J'} \frac{\alpha(\lambda) d\lambda}{\lambda^2} - f_{md}^{mes} \quad (28- II)$$

ويكون لدينا :

$$S_{ed}^{mes}(J, J') = \frac{9n}{(n^2+2)^2} \left[\frac{3hc(2J+1)}{8\pi e^2 N} \int_{J \rightarrow J'} \frac{\alpha(\lambda) d\lambda}{\lambda^2} - S_{md}^{mes} \right] \quad (29- II)$$

تكون قوى الانتقال محصورة في المجال بين 10^{-6} و 10^{-8} للعناصر الترابية النادرة في المادة المضيفة الصلبة . [23]

II-4-6 احتمالية الانتقالات الإشعاعية

معرفة وسائط جود-أوفلت تسمح لنا بحساب احتمالية الانتقالات الإشعاعية من اجل الانتقال من الحالة الابتدائية J إلى الحالة النهائية J' والمعرفة بالعلاقة التالية :

$$A_{rad}(J, J') = \frac{64\pi^4}{3h(2J+1)\lambda^3} \left[\frac{n(n^2+n)^2}{9} \right] S_{ed} \quad (30- II)$$

حيث :

$\frac{n(n^2+n)^2}{9}$: هو التصحيح الحقل المحلي في الحالة الأساسية J والمثارة J'

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

ويمكن الحصول على نسبة التفريغ من احتمالية الانتقالات الإشعاعية A_{rad} وفق المعادلة التالية :

$$\beta = \frac{A_{rad}(J,J')}{\sum_{J'} A_{rad}(J,J')} \quad (31- II)$$

و من الممكن أيضا حساب مدة الحياة الإشعاعية في الحالة المثار J' بالعلاقة التالية :

$$\tau_{rad} = \frac{1}{\sum_{J'} A_{rad}(J,J')} \quad (32- II)$$

II-4-7 المقطع الفعال التكاملي للانبعاث :

يستعمل مقدار المقطع الفعال التكاملي للانبعاث بشكل خاص لتحديد امكانية حدوث مفعول الليزر في الزجاج ويمكن حسابه بالعلاقة التالية :

$$\Sigma = \frac{\lambda^2}{8\pi cn^2} A_{rad}(J,J') \quad (33- II)$$

إذا كانت قيمة المقطع الفعال التكاملي للانبعاث قريبة أو أكبر من $10^{-20} cm$ فان حدوث فعل الليزر ممكنة [24].

II-4-8 جودة التعديل:

جودة التعديل هي معامل يقيم مدى صحة هذه الوسائط و تتميز بالعلاقة التالية :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (f_{calc} - f_{mes})^2}{q-p}} \quad (34- II)$$

حيث :

q : هو عدد العصابات الطيفية المحللة.

p : عدد مجاهيل

II-4-9 أهمية حساب معاملات جود-أوفلت و الوسائط الطيفية

إن تحديد الوسائط الطيفية ومعاملات جود-أوفلت مهم للغاية لاختبار نوع الزجاج من اجل انجاز مركبات ضوئية أكثر فعالية , لان لها علاقة بتركيبية الزجاج أو المادة المضيفة و أيضا يمكن أن تعطينا معلومات عن الايون الذي يتم إضافته للزجاج , إذن هذه المعاملات والوسائط تتغير بتغير تركيب و بنية الزجاج المضيف و كذلك بتغير تركيز الايونات الترابية النادرة [25]

Ω_2 : تعبر عن مدى التكافئية الرابط بين الايون الترابي مع الجوار الأقرب

Ω_4, Ω_6 : تعبران عن مدى صلابة المادة المضيفة و ثابت العزل الكهربائي لهذه المواد , و أيضا لها علاقة بالانتقالات الاهتزازية لروابط بين الايونات الترابية النادرة و ذرات الجوار.

الفصل الثاني: الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة

Ω_4/Ω_6 : يسمى معامل الجودة الطيفية وهو معامل مهم جدا للتنبؤ بمدى فعالية الانتقالات الليزرية

المقطع الفعال التكامل Σ : يعتبر مؤشر على حدوث مفعول الليزر، حيث عندما تكون قيمته قريبة أو أكبر من $cm10^{-20}$ فهذا يعني إمكانية حدوث فعل الليزر.

RMS :معامل جودة التعديل، يقيم هذا المعامل مدى صحة هذه الوسائط

مدة حياة الإشعاع τ : تتعلق بالربح الليزري و تتناسب طردا معه .

II-4-10 مراحل حساب وسائط جود أوفلت :

نضع :

$$(35-II) S_{ed1} = \begin{pmatrix} S_{ed1} \\ \vdots \\ S_{edi} \\ \vdots \\ S_{edq} \end{pmatrix} \quad f_{ed} = \begin{pmatrix} f_{ed1} \\ \vdots \\ f_{edi} \\ \vdots \\ f_{edq} \end{pmatrix} \quad \Omega = \begin{pmatrix} \Omega_2 \\ \Omega_4 \\ \Omega_6 \end{pmatrix}$$

$$(36-II) A = \begin{pmatrix} \langle \|U^{(2)}\| \rangle_1^2 & \langle \|U^{(4)}\| \rangle_1^2 & \langle \|U^{(6)}\| \rangle_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \langle \|U^{(2)}\| \rangle_i^2 & \langle \|U^{(4)}\| \rangle_i^2 & \langle \|U^{(6)}\| \rangle_i^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \langle \|U^{(2)}\| \rangle_q^2 & \langle \|U^{(4)}\| \rangle_q^2 & \langle \|U^{(6)}\| \rangle_q^2 \end{pmatrix}$$

حيث :

$1, \dots, i, \dots, q$ تمثل الانتقالات .

أيضا :

$$C = \begin{pmatrix} C_1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & C_i & 0 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & 0 & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & C_q \end{pmatrix} = \xi \times \begin{pmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \lambda_i^{-1} & 0 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & 0 & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \lambda_q^{-1} \end{pmatrix} = \xi \times C' \quad (37-II)$$

حيث :

$$\xi = \frac{8\pi^2 m_e c (n^2 + 2)^2}{27 h n (2J + 1)} \quad (38-II)$$

ثم :

$$f_{ed} = C \times S_{ed} \quad (39-II)$$

و:

$$S_{ed} = A \times \Omega \quad (40- II)$$

قيم الوسائط Ω تعطى بمعادلة المصفوفة التالية :

$$\Omega_s = (A^T A)^{-1} A^T S_{ed} \quad (41- II)$$

$$f_{ed} = C \times S_{ed} \Rightarrow f_{ed} = C \times A \times \Omega = A' \times \Omega \quad (42- II)$$

$$A' = C \times A \quad (43- II)$$

و بالتالي :

$$\Omega_f = (A'^T A')^{-1} A'^T f_{ed} \quad (44- II)$$

يمكن تقييم الارتياح بين تعديلين باستخدام الصيغ التالية:

$$\Omega_s - \Omega_f = M_s [S_{ed}^{calc} - S_{ed}^{mes}] \quad (45- II)$$

$$\Omega_s - \Omega_f = \xi^{-1} M_f [f_{ed}^{calc} - f_{ed}^{mes}] \quad (46- II)$$

M_s و M_f هما مصفوفتا العبور وتعرفان بالعلاقتين :

$$M_s = (A^T C^2 A)^{-1} A^T C^2 \quad (47- II)$$

$$M_f = (A^T A)^{-1} A^T C'^{-1} \quad (48- II)$$

II -5 خلاصة الفصل الثاني:

في هذا الفصل تحدثنا عن بعض المفاهيم الأساسية الخاصة بالليزر، وبعض أنواعه وخصائصه، كما تطرقنا إلى مختلف أنواع المنظومات الليزرية (نظام ذو ثلاث مستويات، نظام ذو أربعة مستويات) والربح المتعلق بالشعاع الليزري الناتج. قمنا أيضا بتسليط الضوء على بنية الزجاج وأهم أنواعه وخصائصه، كما قمنا بعرض نظرية جود-أوفلت والتعريف بمدى أهميته، واستعرضنا مراحل الحساب ابتداء من طيف الامتصاص إلى الوسائط الطيفية التي تحدد خصائص المادة المضيفة للأيونات الترابية النادرة.

مراجع الفصل الثاني

- [1] الليزر وتطبيقاتها الطبية: <https://books-library.net/files/books-library.online-01130308Me9T5.pdf>
- [2] د.سعود بن حميد اللحياني، "الليزر وتطبيقاته"، كلية العلوم، جامعة أم القرى
- [3] H. haken, "Laser light dynamics", Sadhana, volume 2, Institute for Theories Physical, North Holland 1985.
- [4] A. Beggas, "Etat d'art des verres dopés aux ions terres rares (Application Amplificateur Optique)", mémoire de magister, centre universitaire D'Eloued, Algérie,
- [5] Jenny LE PERSON , Verre de sulfures :spectroscopie des ions de terres-rares, fibres microstructurées et nouvelles composition, thèse de doctorat, université de Rennes 1,(2004).
- [6] عدي حمادي، (2004). أساسيات الليزر وتقنياته لطلبة الدبلوم الفني في الاتصالات. DOI: 10.13140/2.1.1603.0728.
- [7] صالح مصطفى الأتروشي ورياض وديع يوسف، "الليزر أسس واستخدامات"، الطبعة الأولى، دار الدجلة -عمان، (2008)
- [8] معصرين . الفيزياء الكمومية ، كلية العلوم ، قسم الفيزياء / منشورات جامعة دمشق.
- [9] بيلا.آ لينكيل ،"الليزرات"، جامعة سان فرناندو ،جامعة كاليفورنيا،ترجمة فاروق عبودي قيصر، كلية العلوم ،دار الكتب للطباعة والنشر،جامعة الموصل 1403 هـ 1984 م
- [10] Mona al-Moadin, "Glass vessel possibly for chemistry" in Discover Islamic Art, Museum With No Frontiers, 2019.
- http://islamicart.museumwnf.org/database_item.php?id=object;ISL;sy;Mus01;15;en, Retrieved 06-06-2019
- [11] Adbeenour BOURZAMA " Etud de la Sur face de verre et du verre silanise par AFM dynamique et par spectroscopie laser :Application a l'écoulement d'un liquide".Mémoire de Magister ,Université Badji Mokhtar-Annaba.2009.
- [12] بوزيان عائشة وبوزيان إيمان، "الدراسة الطيفية لزجاج هالوجيني -فوسفاتي ثنائي التطعيم"، مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة قاصدي مرباح، ورقلة، الجزائر(. 2017)
- [13] Mohamed El Jouad , Modélisation et Spectroscopie des Vitrocéramiques Fluorées dopés par des Ions de Terres Rares pour Application en Amplification dans l'infrarouge, thèse de doctorat .Angers ,France ,(2010)
- [14] غوقالي ميروك، " نمذجة ومحاكاة ظاهرة التبادل الأيوني في الزجاج السيليكاتي القلوي تطبيق : تعيين بيان قرينة الانكسار لموجه بصري مستوي سطحي " ،مذكرة ماجستير،جامعة ورقلة. 2005

- [15] TIOUA Belkheir, «Etude spectroscopique des ions trivalents de terre rares dans les verres Sb₂O₃-M₂O » , mémoire de magister , centre universitaire EL-oude 2010.
- [16] Virginie MOIZAN, « Etude de l'amplification laser en bande II dans les fibres de verres chalcogénures », thèse de doctorat , université Rennes I ,2008
- [17] O.Bentouila, Etude de l'effet des terres rares dans les verres applications: lasers et amplificateurs optiques, mémoire de magister, Université de Ouargla, (2005)
- [18] BENTOUILA, O., AIADI, K. E., REHOUMA, F., & POULAIN, M. (2013). Spectroscopic studies of rare earth-doped halogeno-phosphate glasses. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 15(November-December 2013), 1204-1208.
- [19] K.Ouannes, « Etude structurale et spectroscopique des verres d'oxyde d'antimoine dopes par les ions Er³⁺ » These doctorat , Universite Biskra, (2015).
- [20] عبد المجيد البلخي، "كتاب الجدول الدوري كيمياء المعادن الانتقالية كيمياء اللاعضوية " ، الجزء الثالث ، جامعة دمشق 1993
- [21] I. Vasilief, "Guides d'onde canaux amplificateurs en verres de fluorures dopés erbium: spectroscopie et amplification optique." Lyon 1, 2003.
- [22] S. Bordais, "Etude des amplificateurs et lasers 1 µm de forte puissance à base de fibre double gaine dopée Ytterbium." Thèse Doctorat, Université de Rennes I, 2002
- [23] F. R. and K. E. A. O. Bentouila, "Determination of spectroscopic parameters of neodymium doped fluorophosphate glass." *Proceedings of the 5th National Seminar on Laser and its Applications (SENALAP'09) – Poster B3, Pages 219-225; Ouargla-Algeria; 16-17 December, 2009.*
- [24] W.-T. H. P. R. Watekar, S. Ju, "Optical properties of Ho-doped alumino – germano-silica glass optical fiber." *Journal of Non-Crystalline Solids*; vol. 354; pp 1453 – 1459, 2008.
- [25] P.R.Watekar , S.ju, Won-Taek Han ,Optical properties of Ho-dopedalumino-germano-silica glass opticalfiber , *journal of Non-crystalline Solide*, (2008).

الفصل الثالث

الفصل الثالث : تحديد الخواص الطيفية وأداء الليزر في زجاج فليورفوسفاتي مطعم بالثوليوم

III-1 المقدمة :

سنقوم في هذا الفصل بتحديد الوسائط الطيفية (المقطع الفعال للامتصاص واحتماليات الانتقالات الإشعاعية وفترة الحياة الإشعاعية ...) لأيون الثوليوم في عينة من زجاج الفليورو-فوسفاتي وذلك باستخدام نظرية جود-أوفلت من أجل معرفة مدى ملاءمة الزجاج المدروس لأداء الليزر.

III-2 المقطع الفعال للإصدار [1]:

يُمكن حساب المقطع الفعال للإصدار باستعمال طريقة McCumber التي تربط المقطع الفعال للامتصاص بالمقطع الفعال للإصدار، والتي تعطى بالعلاقة التالية [1]:

$$\sigma_{em} = \sigma_{ab} \frac{Z_l}{Z_u} \exp(\beta((E_{zl} - hv_0))) \quad (1- III)$$

حيث :

$$\beta = \frac{1}{KT} \quad (2- III)$$

σ_{ab} : مقطع الفعال للامتصاص .

σ_{em} : مقطع الفال للإصدار .

E_{zl} : طاقة الفوتون التي تتساوى فيها المقاطع الفعالة للامتصاص والإصدار

Z_l, Z_u : دوال التوزيع المتعلقة بكل مستوى تكتب علاقتهما من الشكل :

$$Z_u = \sum_{i=1}^{i_{max}} \exp(-\beta\Delta_{1i}) \quad (3- III)$$

$$Z_l = \sum_{j=1}^{j_{max}} \exp(-\beta\Delta_{2j}) \quad (4- III)$$

III-3 حساب المقطع الفعال للرياح [1] :

انطلاقاً من قيم المقاطع الفعالة للامتصاص وللإصدار يمكن حساب المقطع الفعال للرياح بواسطة العلاقة التالية:

$$G(\lambda) = P\sigma_{em}(\lambda) - (1 - P)\sigma_{ab}(\lambda) \quad (5- III)$$

حيث :

P : نسبة انقلاب التعداد وتكتب علاقته من الشكل:

$$P = \frac{N_1}{N_0} \quad (6- III)$$

III-4 معامل الرياح :

انطلاقاً من قيم المقطع الفعال للرياح يمكن حساب معامل الرياح بالعلاقة التالية :

$$\gamma(\lambda) = N[P\sigma_{em}(\lambda) - (1 - P)\sigma_{ab}(\lambda)] \quad (7- III)$$

III-5 النتائج والمناقشة

III-5-1 تعيين الوسائط الطيفية لأيون التوليوم في زجاج فليور-وفوسفاتي:

• تركيبة الزجاج المدروس:

الزجاج المدروس هو زجاج فليور وفوسفاتي مطعم بأيون التوليوم Tm^{3+} . بعض خصائص هذا الزجاج موجودة في الجدول (1-III).

الجدول (III-1): قرينة الانكسار وسمك العينة والكتل المولية و الحجمية للعينات المدروسة

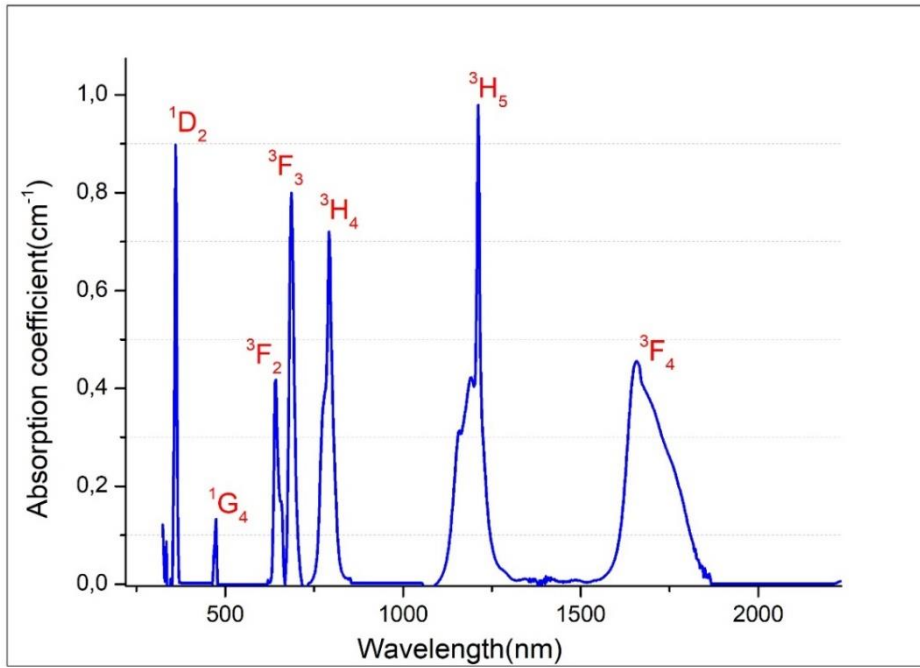
السمك (cm)	قرينة الانكسار	تركيز أيونات Tm^{3+} N_0 (cm^{-3})	الكتلة الحجمية P ($g. cm^{-3}$)
0.6453	1.498	1.62×10^{20}	2.928

• طيف الامتصاص:

طيف الامتصاص لأيون التوليوم Tm^{3+} سجل عند درجة حرارة الغرفة بواسطة مطياف مزدوج الحزمة، (Spectrophotométre UV-Vis Near IR CARY 5G brand) الذي يشتغل ما بين 200 - 3000 نانومتر ، المنحنى المسجل يعطي تغير الكثافة الضوئية (DO) بدلالة الطول الموجي في مجال طيف يواسع انطلاقا من UV(200nm) وصولا إلى ما تحت الحمراء القريبة (Near-Infrared)(300nm) و بدقة طيفية قدرها 2nm.

من طيف الامتصاص، يمكن حساب قوة الاهتزاز التجريبية f_{mes} اعتمادا على معامل الامتصاص $\alpha(\lambda)$ عن طريق المعادلة التالية :

$$f_{mes} = \frac{m_e c^2}{\pi e^2 N} \int \frac{\alpha(\lambda) d\lambda}{\lambda^2} \quad (11- III)$$



الشكل (III-1): طيف امتصاص التوليوم الزجاج المدروس للعينة 1.

يوضح الشكل (III-1) طيف الامتصاص لأيون Tm^{3+} في الزجاج المدروس في المجال الطيفي من 250 إلى 2000 نانومتر. الأطوال الموجية (بوحدة nm) الموافقة للانتقالات الملاحظة هي: 792، 1212، 1658،

686، 642، 474، 360. هذه الانتقالات ترجع إلى الامتصاص من المستوى الأساسي 3H_6 نحو المستويات: 3F_4 ، 3H_5 ، 3H_4 ، 3F_3 ، 3F_2 ، 1G_4 ، 1D_2 على الترتيب.

تم تقييم قوى الاهتزاز التجريبية لجميع هذه الانتقالات من أجل تطبيق نظرية جود-أوفلت Judd-Ofelt (انظر الفصل الثاني). الجدول (III-2) يوضح قيم قوى الاهتزاز التجريبية وقوى الاهتزاز المحسوبة بواسطة نظرية جود-أوفلت وكذا الانتقالات والأطوال الموجية الموافقة مع معامل جودة التعديل (RMS) الذي وُجدت قيمته مساوية ل: $0,833 \times 10^{-6}$.

جدول (III-2) : الأطوال الموجية والتردد و قوى الاهتزاز أيون الثوليوم في الزجاج المدروس

$3H_6 \rightarrow$	$\lambda(\text{nm})$	$F_{\text{exp}}(\times 10^{-6})$	$F_{\text{cal}}(\times 10^{-6})$
$3F_4$	1658	1,447	2,023
$3H_5$	1212	1,996	1,345
$3H_4$	792	2,329	1,771
$3F_3$	686	1,977	2,864
$3F_2$	642	1,128	0,472
$1G_4$	474	0,297	0,676
$1D_2$	360	3,601	3,009
RMS = $0,833 \times 10^{-6}$			

• وسائط جود-أوفلت:

قيم وسائط جود-أوفلت (Judd-Ofelt parameters) الموافقة لقوى الاهتزاز التجريبية والمحسوبة هي:

$$\Omega_6 = 1.055 \times 10^{-20} \text{ cm}^2, \Omega_4 = 2.774 \times 10^{-20} \text{ cm}^2, \Omega_2 = 1.392 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$$

الجدول (III-3) يقارن وسائط JO التي تم الحصول عليها للزجاج المدروس مع بعض أنواع الزجاج

الأخرى المطعمة بأيون Tm^{3+} .

تعتمد وسائط جود-أوفلت بشكل أساسي على تركيبة الزجاج المضيف. يمكن أن توفر هذه الوسائط

معلومات متنوعة فيما يتعلق بأيونات العناصر الترابية في بنية الزجاج. بشكل عام، يعتبر Ω_2 مؤشرًا على تكافؤية

الروابط بين أيونات العناصر الترابية النادرة والجوار الأقرب (تأثير قصير المدى)، وهو شديد الحساسية للتغيرات البنوية في المواد المضيفة، وغالبًا ما يرتبط أيضا بعدم التماثل (asymmetry) للبنية. وفقًا للدراسات السابقة ، تزداد Ω_2 مع زيادة التكافؤية وعدم التماثل في مواقع العناصر الترابية النادرة. توفر قيم Ω_4 و Ω_6 بعض المعلومات عن صلابة المواد المضيفة. وهي تعتمد على خصائص الوسط مثل الزوجية وثابت العزل الكهربائي (تأثيرات بعيدة المدى). كما أنها تتأثر بالانتقالات الاهتزازية لأيونات العناصر الترابية النادرة المرتبطة بالذرات المجاورة [1-3].

يمكن أن تُعزى القيمة الصغيرة للمعلمة Ω_2 للزجاج المدروس إلى درجة أقل من تكافؤية الروابط بين الأيون الترابي النادر والروابط المحيطة و/أو تناظر أكبر للبنية المحيطة بهذا الأيون الأرض النادرة مقارنة مع أنواع الزجاج التي شملتها المقارنة.

وفقًا لنظرية جاكوبس و ووير (Jacobs and Weber) [4]، شدة الإصدار للعناصر الترابية النادرة يمكن أن تُحدّد من خلال الوسائط Ω_4 و Ω_6 ، وذلك باستخدام ما يسمى بمعامل الجودة الطيفي (Ω_4/Ω_6). هذا المعامل مهم في التنبؤ بسلوك انتقالات الليزر المختلفة في مصفوفة معينة. من خلال الجدول (III-4)، وبناءً على قيم هذا المعامل، نلاحظ أن الزجاج محل الدراسة الحالية يبدو أفضل من الأنواع الأخرى التي شملتها المقارنة.

جدول (III-3) : وسائط جود-أوفلت ($\Omega_t \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, t=2, 4, 6) ومعامل الجودة الطيفي (Ω_4/Ω_6) لأيون Tm^{3+} في الزجاج المدروس وأنواع أخرى

المرجع	$\frac{\Omega_4}{\Omega_6}$	Ω_6	Ω_4	Ω_2	الزجاج
(العمل الحالي)	2.63	1.055	2.774	1.392	فليوروفوسفاتي
[3]	0.73	4.34	3.20	8.37	أوكسيدوفليوروبوراتي
[5]	2	1.16	2.32	5.28	فليوروفوسفاتي (NPBWT)
[6]	1.05	1.66	1.75	3.19	فليوروفوسفاتي (FP)

• تعيين الوسائط الطيفية:

انطلاقاً من قيم وسائط جود أوفلت، يمكن حساب مختلف الوسائط الطيفية : احتمال الانتقال الإشعاع $A_{rad}(J, J')$ ونسبة التفريغ β وفترة الحياة الإشعاعية τ_{rad} والمقطع الفعال التكاملي Σ . على عكس نسب التفرع، التي تعتمد بشكل ضعيف على المادة المضيفة، فإن احتمالية الانتقالات الإشعاعية والمقاطع الفعالة التكاملية للإصدار وفترات الحياة الإشعاعية تعتمد بشكل أكبر على المادة المضيفة .

من خلال الجدول (III-4) ومن أجل الانتقال $3F4 \rightarrow 3H6$ ، نلاحظ أن قيمة فترة الحياة الإشعاعية للزجاج محل الدراسة أكبر مقارنة مع الأنواع الأخرى محل المقارنة، مما يشير إلى إمكانية استخدام هذا الزجاج من أجل تطبيقات الليزر. ولكن يجب الإشارة إلى أنه لا يمكن تحديد الليزر على وجه التحديد إلا إذا تم أخذ المقطع الفعال للإصدار وفترة الحياة الإشعاعية بعين الاعتبار [1].

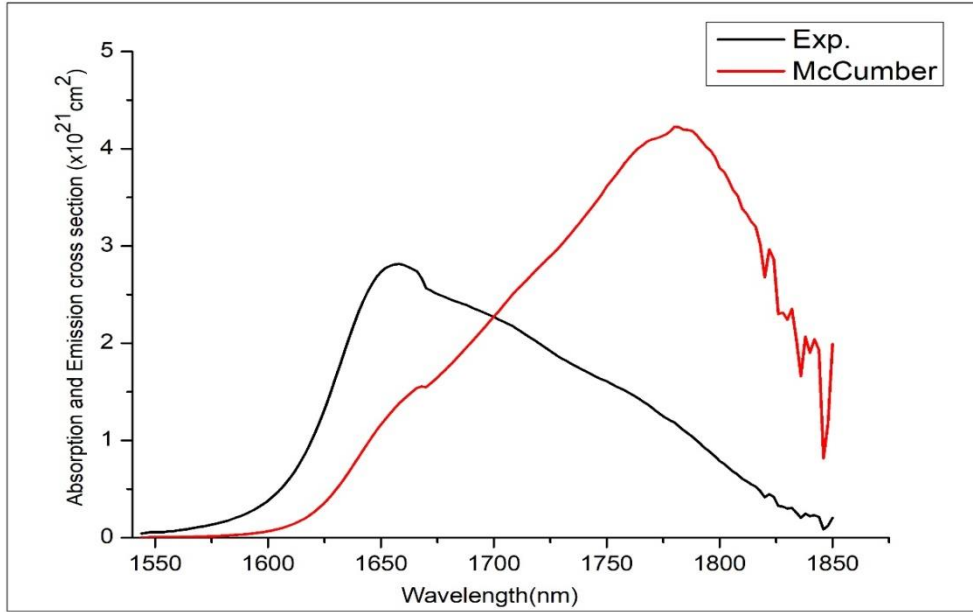
جدول (III 4) : احتمالية الانتقال الإشعاعي (A_{rad}) ونسبة التفرع (β) وفترة الحياة الإشعاعية (τ_{rad}) من أجل الانتقال $3F4 \rightarrow 3H6$ لأيون Tm^{3+} في الزجاج المدروس وأنواع أخرى

المرجع	$\tau_{rad}(ms)$	β	$A_{rad}(s^{-1})$	الزجاج
(العمل الحالي)	6.422	1	155.705	فليوروفوسفاتي
[3]	2.078	1	481	أوكسيدوفليوروبوراتي
[5]	4.028	1	248.24	فليوروفوسفاتي (NPBWT)
[6]	4.842	1	206.50	فليوروفوسفاتي (FP)

III-5-2 حساب المقاطع الفعالة للإصدار:

تلعب المقاطع الفعالة للامتصاص والاصدار دوراً حيوياً في الربح الضوئي الفعال وخرج الليزر للوسط الليزري الفعال (الزجاج المطعم في حالتنا هذه). القيم الأعلى لهذه المقاطع الفعالة تكون أفضل لإنتاج الليزر. باستخدام

طيف الامتصاص، يمكن حساب المقطع الفعال للامتصاص $\sigma_a(\lambda)$ لأيونات Tm^{3+} في عينة الزجاج المدروس ،
 أمّا المقطع الفعال للإصدار $\sigma_e(\lambda)$ المرافق فيتم تقييمه من $\sigma_a(\lambda)$ باستخدام نظرية ماك كومبر
 [7]McCumber. وجدنا قيم $\sigma_e(\lambda)$ و $\sigma_a(\lambda)$ مساوية لـ: $2,81 \times 10^{-21} \text{cm}^2$ و $4,22 \times 10^{-21} \text{cm}^2$
 على الترتيب. تم تمثيل $\sigma_e(\lambda)$ و $\sigma_a(\lambda)$ في الشكل (III-2).



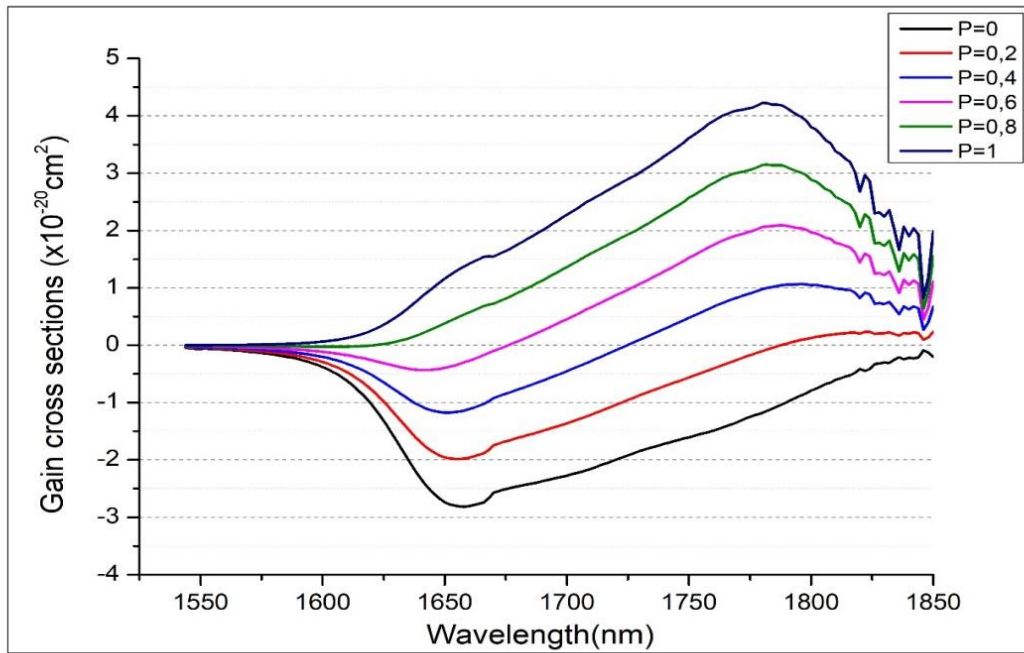
الشكل (III-2): المقطع الفعال الامتصاص وإصدار لايون التوليموم عند الانتقال $3F4 \rightarrow 3H6$

نلاحظ من خلال الشكل (III-2) أن هناك انزياح في المقطع الفعال للإصدار عن المقطع الفعال للامتصاص نحو الأطوال الموجية الكبيرة.

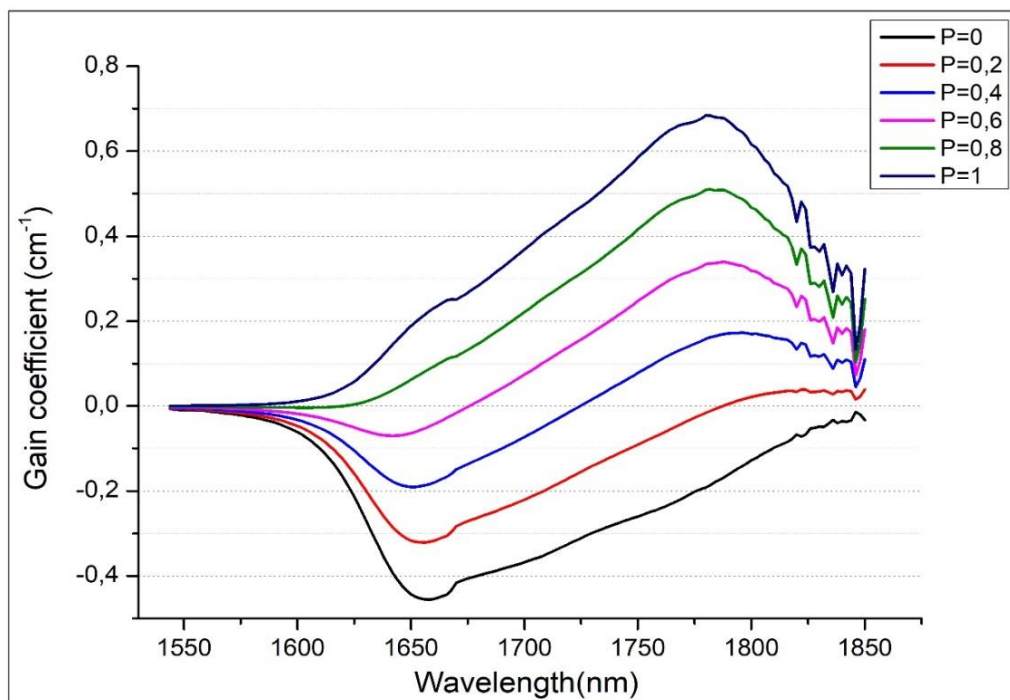
• المقطع الفعال للريح ومعامل الريح :

بالاعتماد على $\sigma_a(\lambda)$ و $\sigma_e(\lambda)$ المحسوبة، يمكن أن نجد المقطع الفعال للريح $G(\lambda)$ وكذا معامل
 الريح $\gamma(\lambda)$ وفق المعادلتين (III-5) و (III-7) على الترتيب، وذلك بافتراض أن الأيونات النشطة (Tm^{3+})
 تكون موجودة في المستوى الأساسي (3H_6) أو في المستوى الطاقوي المثار (3F_4).

الشكل (III-2) والشكل (III-3) يوضحان المقطع الفعال للريح ومعامل الريح على الترتيب للانتقال $3F4 \rightarrow 3H6$
 مع قيم مختلفة لـ "P" (مع زيادة قدرها 0.2) من 0 إلى 1.



الشكل (III-3) : المقطع الفعال للربح للعيينة المدروسة عند الانتقال $3F4 \rightarrow 3H6$



الشكل (III-4) : لمعامل للربح للعيينة المدروسة عند الانتقال $3F4 \rightarrow 3H6$

نلاحظ أنه بمجرد أن يكون التعداد في المستوى الليزري العلوي في حدود 20%، يكون $G(\lambda)$ و $\gamma(\lambda)$ موجبين، وهذا يمثل عتبة ليزر أقل لعمل الليزر. كما أنّ معامل الربح الأقصى قيمته تكون مساوية لـ 0,68 وذلك عند الطول الموجي 1782nm.

من جهة أخرى. نلاحظ أن معامل الربح ينزاح إلى طول موجي أعلى مع زيادة نسبة انقلاب التعداد، مما يعني أن الطول الموجي لليزر يتغيّر مع زيادة نسبة الضخ، هذا التغيّر قد يكون خاصية مميزة لنظام الليزر شبه ثلاثي المستويات [8].

تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن عتبة الزجاج المدروسة يمكن اختيارها كمادة ربح ليزرية.

III-6 خلاصة الفصل الثالث:

في هذا الفصل قمنا بدراسة طيف الامتصاص لأيون الثوليوم في زجاج الفليور-فوسفاتي وذلك بتحديد الانتقالات الالكترونية الممكنة ثم حساب قوة الاهتزاز لتوظيفها في حساب معاملات جود أوفلت واستنتاج الوسائط الطيفية (احتمالية الانتقال الإشعاعي , فترة الحياة الإشعاعي , نسبة التفرع والمقطع الفعال التكاملية للإصدار)، كما تمت مقارنة النتائج مع أعمال سابقة.

قمنا أيضا بحساب المقطع الفعال للإصدار انطلاقا من المقطع الفعال للامتصاص وذلك إسنادا على نظرية McCumber ، واستعملنا نتائجهما في حسابات المقطع الفعال للربح ومعامل الربح من أجل الانتقال الليزري $3F4 \rightarrow 3H6$. بينت النتائج أنه عندما يكون معدل إنقلاب التعداد أكبر من 0,2.

فإن المقطع الفعال للربح عند طول موجي 1671nm يصبح موجب، مما يجعل التنبؤ بقدرة الزجاج المطعم بالثوليوم في أن يكون مرشحا جيدا من أجل التطبيقات الضوئية.

مراجع الفصل الثالث

- [1] Bentouila, O., Aiadi, K. E., Rehouma, F., Poulain, M., & Benhbirech, F. (2019). Thermal stability and spectroscopic study of Ho³⁺/Yb³⁺ co-doped fluorophosphates glasses. *Journal of King Saud University-Science*, 31(4), 628-634.
- [2] Wang, X. (2008). Investigation of thermal stability and spectroscopic properties in Er³⁺/Yb³⁺ co-doped niobic tungsten tellurite glasses. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 70(1), 99-103.
- [3] Lim, K. S., Babu, P., Jayasankar, C. K., Lee, S. K., Pham, V. T., & Seo, H. J. (2004). Optical spectroscopy of thulium-doped oxyfluoroborate glass. *Journal of alloys and compounds*, 385(1-2), 12-18.
- [4] Jacobs, R., & Weber, M. (1976). Dependence of the 4 F 3/2 → 4 I 11/2 induced-emission cross section for Nd³⁺ on glass composition. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 12(2), 102-111.
- [5] Poirier, G., Jerez, V. A., de Araújo, C. B., Messaddeq, Y., Ribeiro, S. J., & Poulain, M. (2003). Optical spectroscopy and frequency upconversion properties of Tm³⁺ doped tungstate fluorophosphate glasses. *Journal of Applied Physics*, 93(3), 1493-1497.
- [6] Li, R., Tian, C., Tian, Y., Wei, T., Li, B., Jing, X., ... & Wang, F. (2015). Mid-infrared emission properties and energy transfer evaluation in Tm³⁺ doped fluorophosphate glasses. *Journal of Luminescence*, 162, 58-62.
- [7] McCumber, D. E. (1964). Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra. *Physical Review*, 136(4A), A954.
- [8] Zou, X., & Toratani, H. (1996). Spectroscopic properties and energy transfers in Tm³⁺ singly- and Tm³⁺ Ho³⁺ doubly-doped glasses. *Journal of non-crystalline solids*, 195(1-2), 113-124.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة

الهدف من هذا العمل هو دراسة زجاج فليوروفوسفاتي المطعم بالثوليوم Tm^{+3} من أجل تحديد الخواص الطيفية وأداء الليزر في هذا الزجاج. من أجل هذا، قمنا في البداية بالتطرق إلى بعض المفاهيم لمطيافية أيونات العناصر الترابية، ثم أعطينا لمحة عن فيزياء الليزر وبعض المفاهيم الأساسية الخاصة بها، وفي الخطوة الأخيرة قمنا بحساب الوسائط الطيفية المختلفة (احتمالية الانتقال الإشعاعي و فترة الحياة و المقطع الفعال للامتصاص) وذلك من خلال الاستعانة بنظرية جود أوفلت "Judd-Ofelt"، هذه الوسائط لها علاقة بتركيبية الزجاج و يمكننا أن نعطينا معلومات مهمة عن الايون الذي تمت إضافته للزجاج، وذلك من خلال تحديد وسائط جود أوفلت Ω_K التي تميز الثنائية (المادة مضيئة- أيون التطعيم)، و من خلال تحليل النتائج وجدنا أن ايون Tm^{+3} يشكل رابطة أقل تكافؤية مع الجوار الأقرب مقارنة مع بعض أنواع الزجاج الأخرى التي تمت عليها عملية المقارنة. معامل الجودة الطيفية (Ω_4/Ω_6) ، الذي يعبر عن شدة الانبعاث لأيونات العناصر الترابية النادرة، مهم جدا للتنبؤ بمدى فعالية الانتقالات الليزرية في المادة المعطاة، قيمة هذا المعامل وُجدت مساوية لـ 2.63، مما يدلّ على الزجاج محل الدراسة الحالية يبدو أفضل من الأنواع الأخرى التي شملتها المقارنة. قمنا أيضا بحساب المقطع الفعال التكاملي Σ وهو مؤشر على مدى حدوث مفعول الليزر، لكن لا يمكن التحقق من إمكانية حدوث الليزر إلا تجريبيا. كم تمكنا أيضا من حساب المقطع الفعال للإصدار انطلاقا من المقطع الفعال للامتصاص وذلك إسنادا على نظرية McCumber، واستعملنا نتائجهما في حسابات المقطع الفعال للربح ومعامل الربح من أجل الانتقال الليزري $3F_4 \rightarrow 3H_6$. بينت النتائج أنه عندما يكون معدل انقلاب التعداد أكبر من 0,2، فإن المقطع الفعال للربح عند الطول الموجي 1671nm يصبح موجبا، وأيضا لاحظنا أن معامل الربح ينزاح إلى الأطوال الموجية الأعلى مع زيادة نسبة انقلاب التعداد، مما يعني أن الطول الموجي لليزر يتغير مع زيادة نسبة الضخ، هذا التغير قد يكون خاصية مميزة لنظام الليزر شبه ثلاثي المستويات.

من خلال النتائج المتحصل عليها، تبين أن الوسائط الطيفية للزجاج المدروس قد تجعل منه مرشحا جيدا من

أجل التطبيقات الضوئية الفعالة مثل الليزر و المضخمات الضوئية.

الملخص:

يهدف هذا العمل إلى تحديد الخواص الطيفية وأداء الليزر في الزجاج فليور-فوسفاتي المطعم بالثوليوم قمنا في البداية بدراسة طيفية للعناصر الترابية النادرة ، ثم قدمنا بعض المفاهيم الأساسية حول الزجاج وكذا لمحة عن فيزياء الليزر , كما قمنا بحساب مختلف الوسائط الطيفية للعينات المدروسة مثل احتمالية الانتقال الإشعاعي ومدة الحياة الإشعاعية وذلك اعتماد على نظرية جود-أوفلت وبينت النتائج أن هذه العينة مرشحة جيدة من أجل الإصدار الليزري.

الكلمات المفتاحية: الزجاج، العناصر الترابية النادرة، الثوليوم، نظرية جود-أوفلت، الوسائط الطيفية

Abstract

The objective of this work is to determine the spectroscopic properties and laser performance in thulium-doped fluoro-phosphate glass. We first made a spectroscopic study of the rare earth ions, then we presented some basic notions on glass, as well as an overview of the physics of the laser, and we also calculated the different spectroscopic parameters of the studied samples, such as the radioactive transition probability and the radioactive lifetime, based on the Judd-Oflet theory. The results showed that this sample is a good candidate for laser emission.

Keywords: Glass, Rare earths, Thulium, Judd-Ofelt Theory, Spectroscopic parameters.

Résumé

Ce travail vise à déterminer les propriétés spectrales et les performances laser dans le verre fluorophosphate dopé au thulium. Nous avons d'abord fait une étude spectroscopique des ions terres rares, puis nous avons présenté quelques notions de base sur le verre, ainsi qu'un aperçu de la physique du laser, et nous avons également calculé Les différents paramètres spectroscopiques des échantillons étudiés, tels que la probabilité de transition radioactive et la durée de vie radioactive, sur la base de la théorie de Judd-Oflet. Les résultats ont montré que cet échantillon est un bon candidat à l'émission laser.

Mots-Clés : Verres, Terres rares, Thulium, Théorie de Judd-Ofelt, Paramètres spectroscopiques