**جامعـــــــة قاصدي مربـــــاح ورقـــــــــلة**

كليـــة الرياضيات وعـــلوم المـادة

قســـــم علـــوم المـــادة

مذكرة: ماستر أكادمي

المجال: علوم المادة

فرع : فيزياء

تخصص: فيزياء المواد

**من إعداد الطالبة : شرفـاوي مـــروة**

**الموضوع:**

# تعيين بعض الخصائص المرونية و الطيفية لزجاج مطعم بالهولميوم ($Ho^{+3}$)

**نوقشت علنا:2015/05/27**

**أمام لجنة المناقشة المكونة من:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| أ.د عيادي كمال الدين | أستاذ التعليم العالي | جامعة ورقلة | رئيسا |
| أ.مامانو عبد اللطيف | أستاذ مساعد (أ) | جامعة ورقلة | ممتحنا |
| أ.بن طويلة عمر | أستاذ مساعد (أ) | جامعة ورقلة | مقررا |

السنة الجامعية: 2015/2014

# شكر و عرفــان

**«رَبِّ أَوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَى وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ وَأَدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادِكَ الصَّالِحِين»**

نشكر الله عز و جل أن وفقنا إلى هذا،

نشكر الوالدين الكريمين،

أتقدم بعظيم الشكر و التقدير إلى أستاذي الفاضل **بن طويلة عمر** الذي طالما حرص على دقة و جودة البحث العلمي و على مجهوداته الكبيرة التي بذلها؛ وقد أشرف على هذه المذكرة وتعهدها بالمتابعة والتوجيه،و أيضا دعمه لي بالنصح والتشجيع.

والشكر موصول إلى أعضاء لجنة المناقشة الأستاذ الدكتور **عيادي كمال الدين** و الأستاذ **مامانو عبد اللطيف** على قبولهم مناقشة هذا العمل و جهودهم المبذولة لتقييم هذا البحث. جعلكم الله نبراسا متلألئا ينير درب طالبي العلم في المسار الصحيح.

و يطيب لي أن أتقدم بخالص الشكر و التقدير الى أساتذتي بتخصص ماستر فيزياء المواد **بن مبروك لزهر، بوكراع عمار، داودي باحمد، محمدي لزهر،** على تكوينهم و مرافقتهم لنا طيلة المسار الجامعي، كما لا أنسى **نعيمة** بإدارة قسم علوم المادة.

وواجب الوفاء يلزمني تقدير وافر الشكر إلى زملاء الدراسة سنة ثانية ماستر فيزياء المواد دفعة2015

**منال، مريم، مسعودة، وردة، مسعودة، ربيعة، يمينة، حمزة.**

# الاهداء

إلى قـــــــــــــرة عيـــونــــــــــــي

أمــــــــي وأبــــــي حفظهــــــما الله

إلى إخـــوتــــــــــي و أخواتـــــــــي

إلى كل عائلـــــــة شرفـــــــــاوي

إلى صديقـــــــــــــاتي العزيـــــــزات

أهدي هذا الجهـــــــــد المتواضــــــع.

مـــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــــروة...

# فهرس المحتويات


إهداء ..... I

الشكر و العرفان ..... II

فهرس المحتويات ..... III

فهرس الأشكال ..... VII

فهرس الجداول ..... IX

مقدمة عامة ..... XII


## الفصل الاول: الزجـــاج


1.I. مقدمـــــــــة ..... 1

2.I. لمحة تاريخية عن الزجاج ..... 1

3.I.حالات المادة ..... 2

4.I. تعريف الزجاج ..... 3

5.I. الحالة الزجاجية ..... 3

6.I.بنية الزجاج ..... 3

1.6.I بنية الزجاج البسيط ..... 4

2.6.I.بنية الزجاج المركب ..... 5

7.I.أنواع الزجاج ..... 6

1.7.I.الزجاج الأكسيدي ..... 6

2.7.I.الزجاج الهالوجيني ..... 6

3.7.I.الزجاج الكالكوجيني ..... 7

I.8.خصائص الزجاج ..... 8
I.8.1. الخواص الضوئية ..... 8
I.8.2. الخواص الحرارية ..... 9
I.8.3.الخواص الكهربائية ..... 10
I.8.4.الخواص الميكانيكية ..... 10
I.9.خلاصة ..... 11

## الفصل الثاني: دراسة الخصائص المرونية للزجاج

II.1.المقدمـــــــة ..... 12
II.2.نظريـــــــة المرونـــــــــــة ..... 12
II .1.2.وصف خصائص المرونة من المواد الصلبة ..... 12
II.2.2.المعاملات المرونيـــــــــة ..... 15
II.3.الخصائص المرنة للجسم الصلب ..... 16
II.4.الاختبارات الميكانيكية ..... 17
II.4.1.الاختبار الاتلافي ..... 17
II.4.2.الاختبار اللااتلافي ..... 18
II.4.2.1. اختبارات الأمواج فوق الصوتية..... 18
II.5.الطرق التجريبية لتعيين المعاملات المرونية للزجاج..... 19
II.5.1.طريقة الأمواج فوق الصوتية ..... 19

II.5.1.1.نظرية القياس بالموجات فوق الصوتية ..... 20

II.6.خلاصة ..... 22

## الفصل الثالث: دراســـة مطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة

III.1. مقدمـــــــــــــــــــــة ..... 23

III.2. العناصر الترابية النادرة ..... 23

III.3. مطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة ..... 25

III.3.1. الأعداد الكمية ..... 25

III.3.2. الرموز الطيفية ..... 25

III.3.3. مستويات الطاقة ..... 26

III.3.4. قواعد الانتقاء ..... 28

III.4. تفاعل الإشعاع مع ايونات العناصر الترابية النادرة ..... 29

III.4.1. آليات إشعاعية ..... 29

III.4.2. الآليات غير إشعاعية ..... 34

III.5. المردودية الكمية ..... 35

III.6. المادة المضيفة للعناصر الترابية النادرة ..... 36

III.7. ذوبانية العناصر الترابية النادرة ..... 36

III.8. التضخيم الضوئي و الليزر ..... 37
III.8.1. التضخيم الضوئي ..... 37
III.8.2. الليزر ..... 37
III.8.2.1. التوزيع العكوس ..... 38
III.8.2.2. الربح ..... 39
III.8.2.3. الية الضخ ..... 40
III.9. خلاصة ..... 42

## الفصل الرابع: تحديد الخصائص المرونية و الوسائط الطيفية للزجاج

## 79 NaPO3 – 10 SrF2 – 10ZnF2– HoF3

IV.1.مقدمـــــــــــــة ..... 43
IV .2. تركيبة الزجاج المدروس ..... 43
IV.3. تعيين الخصائص المرونية للعينة المدروسة ..... 44
IV.4. تعيين الخصائص الطيفية للعينة المدروسة ..... 45
IV.4.1.طيف الامتصاص ..... 45
IV.4. 2. نظرية جود–اوفلت ..... 46
IV.4.2. 1. قوى الانتقال و قوى الاهتزاز..... 46
IV.4.2. 2. حساب قوى الانتقال..... 47

IV.2.4. 3.قوى الاهتزاز التجريبية ..... 48
IV.5. المراحل المختلفة للحساب..... 49
IV .6. النتائج و المناقشة ..... 51
IV .7. خلاصة ..... 58

# فهرس الأشكال


| رقم الشكل | العنوان | الصفحة |
|---|---|---|
| **1.I** | تمثيل مبسط: (**a**)مادةبلورية – (**b**)مادةلابلورية | 2 |
| **2.I** | ظاهرة الانتقال الزجاجي | 3 |
| **3.I** | مجال استقرار متعددات الوجوه تبعا لقيمة النسبة بين نصفي قطري الشاردتين السالبة و الموجبة ( $R_C$ /$R_A$) | 5 |
| **4.I** | مجال شفافية مختلف انواع الزجاج | 7 |
| **1.II** | يوضح الاختبارات الاتلافية | 17 |
| **2.II** | يوضح الرسوم التوضيحية التخطيطي لطريقة الموجات فوق الصوتية | 19 |
| **1.III** | موقع العناصر الترابية في الجدول الدوري | 24 |
| **2.III** | مخطط يوضح رفع التطابق لمستويات الطاقة لايون الهولميوم $Ho^{+3}$ | 28 |
| **3.III** | مخطط لمستويات الطاقة للايون الترابي النادر $Ho^{+3}$ | 28 |
| **4.III** | يوضح اليات تفاعل اشعاع مع المادة | 33 |
| **5.III** | رسم تخطيطي لمبدأ المضخم الضوئي | 37 |
| **6.III** | مبدا عمل جهاز الليزر | 38 |
| **7.III** | نظام ذو ثلاث مستويات طاقية | 40 |
| **8.III** | نظام ذو اربع مستويات طاقية | 41 |
| **1.IV** | العينة المدروسة | 44 |
| **2.IV** | طيف الامتصاص للزجاج الهالوجينو–فوسفاتي المطعم بالهولميوم $HO^{+3}$ | 52 |
| **3.IV** | يوضح العلاقة بين مدة الحياة والمقطع الفعّال التكاملي | 57 |


*

# فهرس الجداول


| رقم الجدول | العنوان | الصفحة |
|---|---|---|
| 1.III | التشكيل الالكتروني للهولميوم $Ho^{+3}$ | 24 |
| 1.IV | الكتل المولية و المعامل المولي للمركب NPSZH1 | 43 |
| 2.IV | يعطي المعاملات المرونية لمختلف أنواع الزجاج | 44 |
| 3.IV | الاطوال الموجية و التردد ومعامل الامتصاص و المقاطع الفعال للامتصاص للانتقالات العشرة لأيون الهوليوم $Ho^{+3}$ في الزجاجNPSZH1 | 52 |
| 4.IV | يوضح مقارنة لقيم قوى الاهتزاز المحسوبة مع قيم قوى الاهتزاز التجريبية | 53 |
| 5.IV | يوضح قيم وسائط جود اوفلت $\Omega_{2,4,6}$ ($10^{-20}\,cm^2$) لبعض انوع الزجاج المطعم بالهوليوم $Ho^{+3}$ | 54 |
| 6.IV | يوضح قوى الانتقال و احتمالية الانتقال الاشعاعية و نسبة التفرع و مدة الحياة الاشعاعية و المقطع الفعال التكاملي للانتقالات لأيون الهوليوم $HO^{+3}$ في الزجاج NPSZH1 | 56 |
| 7.IV | يوضح مقارنة لقيم $A_{rad}$ ,β, Σ, τ للانتقال $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ لأيون الهوليوم $Ho^{+3}$ في المركب (79 $NaPO_3$ _ 10 $SrF_2$ _ 10$ZnF_2$_ $HoF_3$) مع انواع اخرى من الزجاج | 57 |

# مقدمـــــة عـــــامة

يعتبر الزجاج من المواد المهمة في عالمنا،حيث أخذ اهتماما كبيرا خاصة في المجال العلمي والتقني و هو أكثر مادة استعملت في شتى المجالات منذ زمن قديم، فتم استخدامه في صناعة الأواني المفيدة والمواد الزخرفية ومواد الزينة بما في ذلك المجوهرات. الزجاج يعتبر أساس العديد من الصناعات في مختلف المجالات وقد ظهرت بشكل واسع في الحياة المعاصرة فهو يستخدم في مختلف التركيبات الضوئية والطبية والعلمية والصناعية[1].

في وقتنا الحالي وبسبب التغيير والتعديل في التركيب الكيميائي وفي عمليات التشكيل أصبح للزجاج تكنولوجيا عالية جعلت منه منتجا لا يمكن الاستغناء عنه في أي مجال، فالزجاج هو ذلك الجسم الصلب الذي يختص بعدد من السمات المميزة التي تأتي من خصوصية بنيته و لا تجتمع في غيره من المواد، و لا تزال الأبحاث تنشط للتعمق في فهم بنية الزجاج و سلوكه الترموديناميكي و خواصه البصرية[1].

و يتم استخدام الزجاج في التركيبات الضوئية، التي هي عبارة عن زجاج مطعم بكميات من أيونات العناصر الترابية النادرة التي تتميز بعدد من الخصائص البصرية المهمة ، و تستخدم كوسط فعال في العديد من المواد الصلبة نظرا لانتقالاتها الضوئية العديدة في المجال المرئي و الأشعة تحت الحمراء[2].

الهدف من هذه المذكرة هو تعيين الخصائص الطيفية والمرونية لزجاج مطعم بالهوليميوم $HO^{3+}$ ذي التركيب NPSZH1 وذلك بالاعتماد على طريقة الأمواج فوق الصوتية لتحديد الخصائص المرونية و كذلك على نموذج**جود اوفلت "Judd–Ofelt"** لحساب مختلف الوسائط الطيفية.

نظمنا هذه الدراسة في أربع فصول:

**الفصل الأول:** يضم عموميات حول الزجاج، بنيته و أهم خواصه.

**الفصل الثاني:** يهدف إلى دراسة الخصائص المرونية للزجاج و تحديد المعاملات المرونية

**الفصل الثالث:** الخصائص الطيفية لايونات العناصر الترابية النادرة، حيث نقوم بإعطاء المفاهيم الأساسية لمطيافية ايونات العناصر الترابية النادرة

**الفصل الرابع:** تحديد الخصائص المرونية و الوسائط الطيفية للزجاج NPSZH1 ، و هو الفصل الذي يلم بجوهر الموضوع. باستعمال طريقة الأمواج فوق الصوتية سنقوم بتحديد المعاملات المرونية ( معامل يونغ، نسبة بواسون، درجة حرارة ديباي...) ، وأيضا تحديد الوسائط الطيفية (احتمالية الانتقال الإشعاعي، مدة الحياة، المقطع الفعال للامتصاص...) باستعمال برنامج جود اوفلت "Judd-Ofelt". و ثم مقارنة النتائج بدراسات أخرى منشورة.

## 1.I. مقدمـة

الزجاج استخدم من طرف الإنسان منذ ألاف السنين، يعد من المواد المهمة و القديمة حيث أخذ اهتماما كبيرا في المجال العلمي والتقني لفترة طويلة، و يستخدم في صناعة الأدوات الحادة مثل السكاكين و الفؤوس و السهام، بنيته مميزة أخذت اهتمام الكثير من العلماء، و هو أكثر المواد فائدة في العالم، حيث يستخدم في التضخيم الضوئي إلا أن تطبيق العلم لتحسين الزجاج و العمل على تطويره أخذ وقت طويل حيث تعمل التطبيقات الجديدة على تحسين بنية الزجاج. و يظهر أن للزجاج مستقبل عظيم. فنذكر في هذا الفصل أساسيات الزجاج و أنواعه و خصائصه و سلوكه.

## 2.I. لمحة تاريخية عن الزجاج

يعود تاريخ صناعة الزجاج إلى عام 2000 قبل الميلاد. ومنذ ذلك الحين، دخل الزجاج في أغراض عديدة من حياة الإنسان اليومية. فتم استخدامه في صناعة الأواني المفيدة والمواد الزخرفية ومواد الزينة بما في ذلك المجوهرات.كما كان له تطبيقاته الصناعية والمعمارية. ولقد كانت أقدم المواد الزجاجية عبارة عن خرزات حيث لم يتم التوصل إلى الآنية المجوفة حتى عام 1500 قبل الميلاد .

ويعتبر الصناع الآسيويون هم أول من أرسى صناعة الزجاج ، ومنهم انتقلت الصناعة إلى مصر حيث ترجع أول آنية زجاجية إلى حكم تحتمس الثالث (1504-1450 قبل الميلاد). وقد ظلت صناعة الزجاج منتعشة في مصر حتى حوالي عام1200 قبل الميلاد ثم توقفت فعليا لعدة قرون من الزمان. وفي القرن التاسع قبل الميلاد، ظهرت كل من سوريا والعراق كمراكز لصناعة الزجاج ، وامتدت الصناعة عبر منطقة البحر المتوسط. وفي العصر الإغريقي، و عرفت مصر بالدور الرئيسي في تزويد القصور الملكية بالزجاج الفخم. وفي القرن الأول قبل الميلاد، تم التوصل إلى عملية نفخ الزجاج في سواحل فينيقيا. وفي العصر الروماني، كانت صناعة الزجاج منتشرة في مناطق متعددة من الإمبراطورية الرومانية

وعرف علماء المسلمين البلور وهو الزجاج الممتاز الذي يحتوي على نسب مختلفة من أكاسيد الرصاص، وصنعوه بإتقان، وما زال يستعمل في صناعة الأقداح والأواني والثريات، وكذلك في صناعة الخواتم وأدوات الزينة وكثير من الأدوات المنزلية. وصنعوا منه نظارات العيون، ومن العالم الإسلامي انتقلت صناعة الزجاج إلى أوروبا ، وقد تجمعت أسرار هذه الصناعة مع

الفنيين، واحتُكرت صناعة الزجاج في أوروبا حتى القرن السابع عشر عندما علمت فرنسا بالتقنيات المطلوبة وأسرارها، وانتقلت إليها صناعة الزجاج وأصبحت أهم مراكزها في العالم

وشهدت الفترة الممتدة بين 1950م1960م ازدهارا حقيقيا لعلم التزجيج مقارنة بما عرفه علم التعدين (المعادن) قبله بعشرات السنين، خلال العشريات الأخيرة، صنف الزجاج ضمن المواد ذات التطبيقات الدقيقة، عالية التخصص، في التقنيات الالكترونية أو البصرية (LASER)،وقد شهد حاليا مجالا جديدا واعدا بعد ضبط واستعمال النواقل الفوتونية في مجال الاتصالات، كما عرف سريعا بأن الزجاج يمكن اعتباره كوسط حقيقي لتفاعلات شتى، وهكذا استمر الزجاج في جلب حلول أصيلة لهذه التقنيات الجديدة[1].

## I.3.حالات المادة

يمكن تصنيف حالات المادة في الطبيعة إلى أربعة حالات: سائلة، غازية، بلازمية و صلبة.

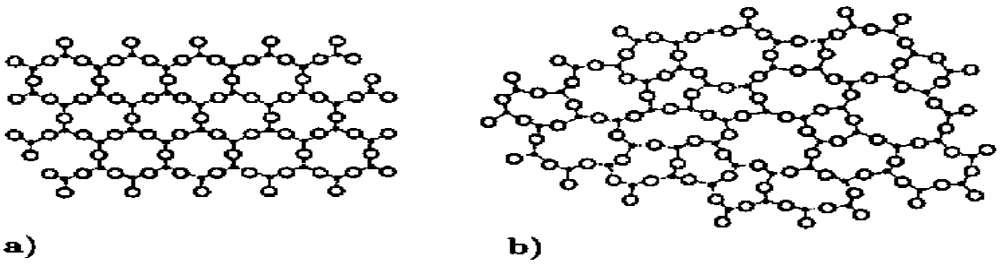
و تنقسم الحالة الصلبة إلى قسمين أساسين[2]:

- **المواد الصلبة البلورية:**

المواد الصلبة البلورية تكون ذراتها منتظمة بشكل دوري و تتميز بترتيب ذري منتظم طويل المدى[2].

- **المواد الصلبة غير البلورية:**

تكون ذرتها بشكل عشوائي و تتميز بترتيب ذري قصير المدى و تضم كل من المواد عديمة البنية (Amorphe) [2] .



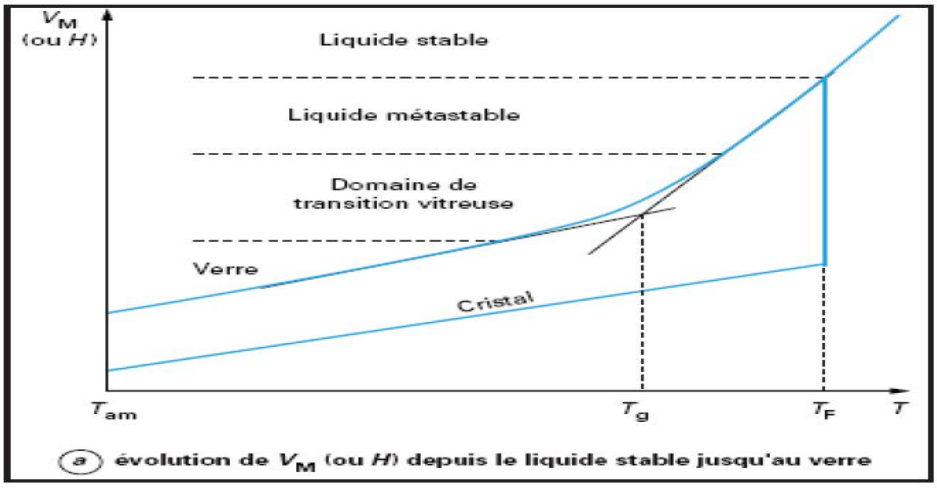

**الشكل(I.1)**:تمثيل مبسط: (**a**)مادةبلورية – (**b**)مادةلابلورية [3].

## I.4. تعريف الزجاج

الزجاج هو جسم صلب لا بلوري يتميز بظاهرة الانتقالات الزجاجية، و الحالة الفيزيائية الموافقة هي الحالة الزجاجية[4].

## I.5. الحالة الزجاجية

تتميز هذه الحالة بحدوث ظاهرة الانتقالات الزجاجية و التي يتم فيها الانتقال من الطور السائل اللزج إلى الطور الزجاجي. فعندما نقوم بتبريد سائل لزج زجاجي تبريدا سريعا و متواصل يحدث له تقلص تناقص في الحجم مع انخفاض درجة الحرارة حتى تصبح اقل من درجة حرارة الانصهار. فكلما انخفضت درجة الحرارة ارتفعت نسبة اللزوجة و يبدأ السائل في التصلب إلى أن يتحول إلى بلورة. و بمواصلة عملية التبريد و انخفاض درجة الحرارة يثبت الحجم و عندها تسمى درجة الحرارة بدرجة حرارة الانتقال الزجاجي Tg[5].




الشكل(2.I): ظاهرة الانتقال الزجاجي

## I.6.بنية الزجاج

وضعت عدة فرضيات من اجل دراسة بنية الزجاج و ذلك منذ بداية القرن العشرين من بينها النظرية البلورية التي طورت من طرف مجموعة من العلماء Lebedev ثم Valenkov ثم Porai-Koshitz و تنص هذه النظرية على أن الزجاج يتشكل من العديد من المجالات الذرية الصغيرة و المرتبة تسمى البلورات.

أما النظرية الثانية التي وضعت من طرف Zachariazen سنة 1932 " نموذج الشبكة العشوائية " تنص على أن عدم وجود مجالات ذرية مرتبة، بل تعتمد بنية الزجاج على طبيعة و نسبة الأكاسيد المكونة له[6].

و تنقسم بنية الزجاج إلى قسمين:

## I.1.6 بنية الزجاج البسيط:

يتكون الزجاج البسيط من نوع واحد من الأكاسيد و يكون ترتيب الجزيئات عشوائي و هو يمثل الشبكة العشوائية التي تأخذ أشكال متعددة الأوجه و هي[6]:

1 -الزجاج السليكاتي يتكون من جزيئات $SiO_2$

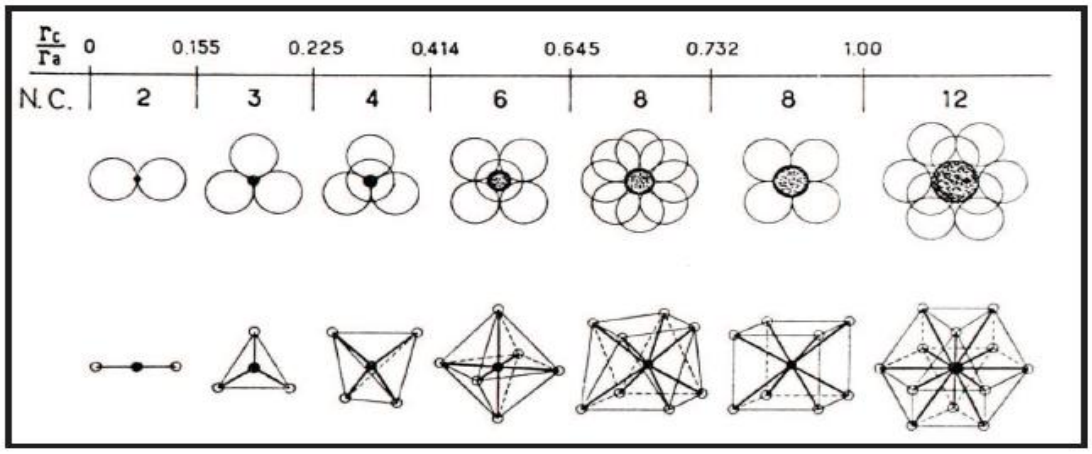
2 -الزجاج الفوسفاتي يتكون من جزيئات $P_2O_5$

3 -الزجاج البوراتي يتكون من جزيئات $B_2O_3$

- **نموذج غولد سميث Goldsmith:**

ثلاثة شوارد سالبة A ذات نصف قطر $R_A = 1$ تترابط مشكلة مثلث تتوسطها شاردة موجبة ذات نصف قطر $R_C = 0.155$ ، و تكتب الصيغة الكيميائية في هذه الحالة $CA_3$ و هو عبارة عن شكل ثلاثي السطوح و النسبة $R_C /R_A = 0.155$ اذا كان للشاردة السالبة نصف قطر كبير جدا، فان النسبة $R_C /R_A$ الموافقة لهذا النسق تكون في حدود $0.225$ و هي الحالة الأقرب إلى الاستقرار لهذه البنية و الصيغة الكيميائية الموافقة $CA_4$ وهي عبارة عن شكل رباعي السطوح، و في حالة النسبة $R_C /R_A = 0.414$ يكون الشكل عبارة عن ثماني أوجه.

الشكل المقابل يوضح مجالات استقرار متعددات السطوح تبعا لقيمة النسبة بين نصفي قطري الشاردتين السالبة و الموجبة $R_C /R_A$ [7].




**الشكل (3.I):** مجال استقرار متعددات الوجوه تبعا لقيمة النسبة بين نصفي قطري الشاردتين السالبة و الموجبة $(R_C / R_A)$.

- **نموذج Zachariazen:**

وضح Zachariazen في نموذجه آن الأكاسيد المشكلة للزجاج يجب أن تخضع لمجموعة قواعد هي:

أ) عدد ذرات الأكسجين المحيطة بالشاردة السالبة A يجب أن يكون صغيرا.

ب) أي ذرة أكسجين لا يجب أن ترتبط بأكثر من شاردتين موجبتين.

ج) يمكن أن تشترك متعددات الأوجه في الرؤوس و لكن لا يمكن أن تكون لها أوجه مشتركة.

د) على الأقل ثلاثة رؤوس لكل متعدد أوجه تكون مشتركة مع متعددات سطوح أخرى[7].

## I.2.6.بنية الزجاج المركب

الزجاج المركب يتكون من أكسيدين فأكثر من الأكاسيد البسيطة و تصنف هذه الأكاسيد من حيث وظائفها في الشبكة الزجاجية إلى ما يلي[8]:

- **الأكاسيد المشكلة للبنية الزجاجية**

و هي الأكاسيد التي تشكل البنية القاعدية للشبكة الزجاجية و تتميز هذه الأكاسيد بطاقة ربط كبيرة و درجة حرارة ذوبان عالية جدا[8].

- **الأكاسيد المغيرة للبنية الزجاجية**

هي الأكاسيد المغيرة في الشبكة الزجاجية، حيث تضاف هذه الأكاسيد للتركيبة الأولية للزجاج و ذلك للحصول على خصائص فيزيوكيميائية، و هي أكاسيد قلوية أو قلوية ترابية[8].

- **الأكاسيد الوسيطية**

هي أكاسيد تقوم بالوظيفتين أكاسيد مشكلة و أكاسيد مغيرة منها($AL_2O_3$, PbO, ZnO, $TiO_2$) و تعمل هذه الأكاسيد على استقرار الشبكة الزجاجية بمنحها خاصية عدم التغير و الذوبان[8].

## I.7.أنواع الزجاج

تنقسم أنواع الزجاج إلى ثلاثة عائلات كبرى و هي الزجاج الأكسيديو الزجاج الهالوجيني و الزجاج الكالكوجيني [9].

### I.7.1.الزجاج الأكسيدي

يمثل هذا النوع من الزجاج اكبر عائلات الزجاج الصناعي و يتميز بخصائص ترموديناميكية ممتازة و بقاء كيميائي جيد و له استقرار حراري عالي و مقاومة عالية جدا للتآكل، يستعمل هذا النوع من الزجاج لصناعة الألياف الزجاجية البصرية و بعض أنواع زجاج اللحام مع المعادن و يستعمل في تطبيقات زجاج الليزر. و له عدة أنواع (زجاج اكسيد الجرمانيوم، زجاج أكسيد السيليسيوم، زجاج اكسيد البور، زجاج أكسيد الفوسفور)[9] .

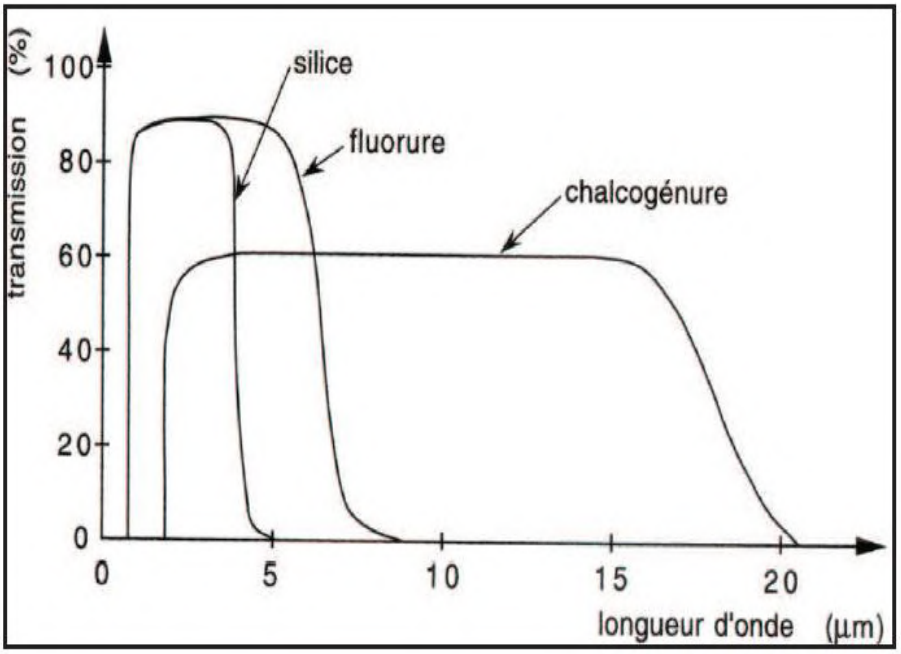
### I.7.2.الزجاج الهالوجيني

الزجاج الهالوجيني أساسه الأملاح (الفلورور، الكلورور، البرمور، اليودور)، اغلب أنواعه غير مستقرة كيميائيا ماعدا زجاج الفلورايد له خصائص ميكانيكية و كيميائية جيدة.

تشكل بعض مركبات الفلوريدات أنواع من الزجاج اللاعضوي و هي ذات أهمية تجارية نظرا لنفوذها للأشعة تحت الحمراء و لاستخدامها في الألياف البصرية للاتصالات[9].

### I.3.7.الزجاج الكالكوجيني

اكتشف هذا النوع من الزجاج سنة 1945، حيث يتم تشكيل هذا النوع من الزجاج من عناصر المجموعة $IV_a$ ممزوج بعناصر أخرى، كما تعد بعض العناصر الكالكوجينية (الكبريت و اللسيلينيوم)أساس الزجاج الكالكوجيني الذي يتميز بشفافيته الكبيرة للأشعة تحت الحمراء و استقراره الكيميائي كما تتميز جزيئاته بروابط كيميائية متكافئة [9].




**الشكل(I.4):** مجال شفافية مختلف أنواع الزجاج

## I.8.خصائص الزجاج

### I.8.1. الخواص الضوئية

- **الشفافية**

يمتاز الزجاج بشفافية صافية متجانسة، تمر من خلاله جميع الأشعة الضوئية من فوق البنفسجية إلى تحت الحمراء كما أن

له خاصية الاحتفاظ بالأشعة ذات التأثير الحراري، و تعرف الشفافية بقانونBeer Lambert[10] :

$$I = I_0 \exp(-\alpha X) \qquad (1.I)$$

I : شدة الإشعاع الصادر

$I_0$ : شدة الاشعاع الوارد

$X$: سمك عينة الزجاج

$\alpha$: معامل الامتصاص

- **قرينة الانكسار**

قرينة انكسار الزجاج n تعبر عن سرعة انتشار الضوء في الزجاج و هي النسبة بين سرعة الضوء $c$ في الفراغ و سرعة الضوء في الزجاج $v$ [10].

$$n = c/v \qquad (2.I)$$

سرعة الضوء في الفراغ هي نفسها مهما كان الطول الموجي، و هذا ليس في جميع المجالات الأخرى. و بالتالي فان قرينة الانكسار تعتمد على الطول الموجي، تتناقص قرينة الانكسار كلما زاد الطول الموجي $\lambda$ .

هذا الاختلاف يسمى التشتت و يعرف بالعلاقة التالية:

$$D = \frac{dN}{d_\lambda} \qquad (3.I)$$

## 2.8.I. الخواص الحرارية

- **اللزوجة**

تعد اللزوجة من أهم خصائص الزجاج، فهي عامل مهم في تشكيله، و تتعلق خاصة بدرجة الحرارة و التركيب الكيمياوي.

ترتبط اللزوجة بمقاومة السائل لاجهادات القص فكلما كانت اللزوجة عالية كانت اجهادات القص عالية[8].

يمكننا اعتبار الزجاج كسائل مثالي ترتبط لزوجته $\eta$ باجهاد القص $\sigma$ و سرعة التشوه الزاوي $\frac{d_y}{dt}$.

- **التوصيل الحراري**

يتميز الزجاج بتوصيل حراري ضعيف حيث يكون معدل سريان الحرارة في الزجاج أقل بكثير مقارنة بالمعادن، و الزجاج الذي له أكبر توصيل حراري هو الزجاج السيليكاتي[1].

- **التمدد الحراري**

عند ارتفاع درجة الحرارة ترتفع الطاقة الحرارية، مما يؤدي إلى زيادة سعة اهتزاز الجزيئات. و ينجم عن ارتفاع درجة الحرارة التمدد الحراري، الذي يعلمنا عن ردود فعل الزجاج للصدمات الحرارية[1].

- **البقاء الكيميائي**

هو مفهوم يعبر عن مدى مقاومة الزجاج للتآكل الناتج عن تعرضه للمحاليل المائية كالأحماض و رطوبة الجو و العوامل الكيميائية و يعتبر الزجاج السيليكاتي مقاوم كبير لهذه العوامل نظرا لقوة الروابط بين جزيئاته[1].

### I.3.8.الخواص الكهربائية

في الدرجات الحرارة العادية يكون الزجاج رديئ التوصيل للكهرباء و يعتبر في هذه الحالة من المواد العازلة، و تختلف مقاومة الزجاج للكهرباء باختلاف تراكيبه، و بارتفاع درجة الحرارة تقل مقاومة الزجاج للتيار الكهربائي،بل تزيد الرطوبة من قابلية التوصيل للتيار الكهربائي [10].

### I .4.8.الخواص الميكانيكية

- **الصلادة**

و هي قدرة مقاومة الزجاج لعوامل الخدش و الاحتكاك ، و تختلف صلادة الزجاج باختلاف تركيبه. فالزجاج البوتاسيأكثر أنواع الزجاج صلادة فهو يقاوم عوامل الاحتكاك دائما، تقدر صلادة الزجاج بنسب الأكاسيد المكونة له[11].

- **المرونة**

و هي عودة الجسم إلى شكله الأصلي بعد زوال المؤثر عليه و تقدر مرونة الجسم بالثقل الذي يتحمله. و تزداد مرونة الزجاج بارتفاع درجة الحرارة[11].

- **المتانة**

تختلف متانة الزجاج باختلاف تركيبه فتزداد بزيادة نسبة السيليكا و كذلك ترفع الالومينا متانة الزجاج بينما نلاحظ أن متانة الزجاج تضعف بالتسخين الطويل[11].

## I.9.خلاصة

ذكرنا في هذا الفصل بعض المفاهيم الأساسية حول الزجاج، الزجاج هو جسم صلب لابلوري يتمتع بظاهرة الانتقال الزجاجي، فمن الممكن الحصول عليه بعدة مركبات بحيث يختلف نوع الزجاج باختلاف تركيبه، و قد بينا أنه هناك ثلاث عائلات كبرى للزجاج و هي الزجاج الأكسيدي، الهالوجيني، الكالكوجيني، كما تطرقنا في نهاية هذا الفصل الى بعض خصائص الزجاج مثل الخصائص الضوئية و الحرارية و الكهربائية و الميكانيكية.

و يناقش الفصل الثاني بعض الخصائص المرونية للزجاج محل الدراسة.

.

# الفصل الثـــــاني

# دراسة الخصائص المرونية للزجاج

## II.1.المقدمـــــــــة

علم المرونة هو أحد علوم ميكانيكا الأجسام المتصلة والذي يهتم بدراسة سلوك جزيئات المادة عندما يتم التأثير عليها بقوة خارجية سواء كانت هذه القوة سطحية أو حجمية. ولقد أصبح لعلم المرونة أهمية كبيرة نظراً لكثرة تطبيقاته في الحياة العملية وارتباطه ببعض العلوم الهامة الأخرى مثل هندسة المواد وعلوم النانو وتكنولوجيا النانو.

في بداية تطور نظرية المرونة كانت تهتم فقط بدراسة سلوك المواد وخصائصها، من ناحية الشكل والحجم والتغيرات التي تحدث لهما بعد زوال تأثير القوى المؤثرة والمسببة.

في عام 1678م كان العالم روبرت هوك (R. Hooke) هو أول من عرّف الجسم المرن وكلمة مرونةحيث وضع أول قانون يربط بين القوة المؤثرة على جسم مرن ومقدارالاستطالة (الانفعال) الذي حدث في الجسم، ثم قام كوشي(Cauchy) بإعطاء تصور رياضي للنظرية الخطية للمرونةلجسم معزول حرارياً.

و في هذا الفصل سوف نستعرض بعض الخصائص المرونية للزجاج محل الدراسة و نذكر أهم الطرق التجريبية لتعيين المعاملات المرونية.

## II.2.نظريـــــة المرونـــة

### II.2.1.وصف خصائص المرونة من المواد الصلبة

يوصف السلوك العياني لمادة صلبة عن طريق نظرية الحقل المستمر وهي نظرية المرونة، التي تصف طريقة التشوهات الصلبة عندما يتم تطبيق الضغوط الخارجية، و قابلية المادة على استعادة شكلها الأصلي بعد إزالة القوة المؤثرة والمسببة للتشوه|12|.فان الجسم الصلب يسلك شكل وحجم التغيرات إلى حد ما تحت تأثير الإجهاد المطبق ، وكل نقطة في الجسم الصلب هي في العامة غير متوضعة.و يعبر عن مؤثرالإجهاد لتشوهات صغيرةإذا كان( $x_1$ , $x_2$ ,$x_3$) $u_{ij}$، jهو عنصر النزوح عند النقاط ($x_1, x_2, x_3$)بـــــــــــــ|13|:

$$(1.\mathrm{II})\ u_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i}\right)$$

عندما يحدث تشوه، فان الجسم لن يكون في حالته الأصلية من التوازن، وبالتالي تنشأ القوى التي تسمى الضغوط الداخلية والتي تميل لعودة الجسم إلى حالة توازنه.

إذا كان تشوه الجسم صغير نوعا ما، فإنه يعود إلى حالته الأصلية عندما يتوقف تأثير القوى الخارجية، و تعرفهذه التشوهات بالتشوهات المرنة. أما التشوهات الكبيرة فانه عند إزالة القوى الخارجية لا يمكن للجسم أن يعود لشكله الكامل بعد التشويه، و هذه التشوهات هي البلاستيك.

هناك أنواع مختلفة من المعاملات حيث يعتمد نوع المعامل على نوع التشوه الذي تتعرض له المادة كالاستطالة والانحناء وغيرها. وتمثل المعاملات جميعها بإيجاد نسبة الإجهاد إلى الانفعال ضمن حدود المرونة.

- **الإجهـــاد Stress**

يعرف بأنه القوة المؤثرة على وحدة المساحات ووحدته نيوتن / م$^2$ والإجهاد أنواع منها إجهاد الشد وينتج عنه زيادة في الطول وإجهاد الضغط و ينتج عنه نقص في الطول أو تغير في الحجم وإجهادالقص (إجهاد مماسي) و ينتج عنه تغير في شكل الجسم الهندسي[11||12].

- **الانفعـــال Strain**

يعرف الانفعال أو المطاوعة بأنه تشوه تلك المادة كما يعرف أيضا على انه التغير النسبي الذي يسببه الإجهاد لأبعاد الجسم أو شكله أو حجمه وهناك أنواع عدة للمطاوعة وهي مطاوعة الشد ومطاوعة الكبس ومطاوعة القص[11||12].

للحصول على الخواص الصلبة، في حالة تشوهات مرنة، مؤثرالإجهاد في شروط مؤثر الانفعال تعطى بالعلاقة[13]:

$$(2.\mathrm{II})\sigma_{ij} = Ku_{ll}\delta_{ij} + 2G\left(u_{ij} - \delta_{ij}\,u_{ll}/3\right)$$

حيث K: هو معامل الجسمي.

G: هو معامل العرضي

و يتم وصف سلوكـــــها المرن بالكامـــــل من قبل معامـــــل الطولـــيL و أيضا معامل العرضي و تعرف علاقة كوشي العلاقة بين LوG بـــــــــ (L=3G)، و هذه العلاقة صالحة للمواد الصلبة موحدة الخواص التي تتألف من جزيئات تتفاعل مع جسمين القوة المركزية، و يمكن أن ينص عليه[13]:

(3.II)

وهذا يعني أن L و K تساوي 0 عندما G = 0.

بالتفاعل الكموني للينارد جونز، هذه العبارة تتغير L=a+bGحيث a و b ثوابت. وهذا يؤدي إلى العلاقة[13]:

(4.II)

والذي يعرف باسم علاقة كوشي المعممة. a وb تبقى ثابتة مع تغير درجة الحرارة والضغط، ولكن تتأثر بتغيّر صغير في الكمون. هذه العلاقة هي صالحة لكل من السوائل و الزجاج.

في الآونة الأخيرة، لوحظ تعميم علاقة كوشي على إجرائها في السوائل فائقة التبريد ويمكن التعبير عن: L (T) = BG (T) + A، حيثA وB ثوابت مستقلة من T وP ضمن نطاق تعمل على التحول الزجاجي.

للتشوه البسيط فان uij هي دالة خطية، وهذا التشوه يتناسب مع القوى المطبقة. يسمى هذا القانون بقانون هوك، الذي هو في الواقع ينطبق على التشوهات كلها تقريبا مرنة في المواد الصلبة. في حالة بسيطة لتشوهات متجانسة فيه مو ثالانفعال هو ثابت في جميع أنحاء حجم الجسم، و موثالإجهاد معطى بدلالة موثالانفعال بـــ[13]:

$$(5.\text{II})\sigma_{ij} = \frac{E}{1+v}\left(u_{ij} + \frac{v}{1-2v}u_{ij}\,\delta_{ij}\right)$$

حيث E: هو معامل يونغ.

### 2.2.II.المعاملات المرونيـــة Elastic modules

يعتبر الزجاج مادة صلبة مرنة، و هذا يعني عند تعرضه لإجهاد ميكانيكي فانه ينعكس تماما[18].

و تعرف هذه النظرية بتفاصيل استجابة المواد للاجتهادات المسلطة عليها حيث تستعمل معاملات مختلفة و تعرفبالمعاملات المرونية هي: معامل يونغ E، المعامل الجسمي k، المعامل العرضي G ، و المعاملالطوليL، بالإضافةإلى نسبة بواسون υ [14][15].

- **المعامل الطولي Module longitudinally**

المعامل الطولي L يعبر عن استطالة العينة تحت تأثيرالإجهاد الطولي، يحدث توسع في اتجاه عمودي على استطالة الانكماش العرضية[14].

- **المعامل الجسمي Module rigidity**

يصف المعامل الجسمي استجابة انفعال الجسم إلى الضغط الهيدروستاتيكي الذي يعمل على تغيير في الحجم دون تغيير الشكل و يطبق الإجهاد على جميع الأطراف[14].

- **المعامل العرضي Module shear**

ويتعلق المعامل العرضي بستجابة انفعالالجسم للإجهاد القص، الذي يعمل على تغيير الشكل دونتغيير الحجم

و إجهاد القص يؤدي إلى عملية القص، و المعامل الموافق G يحمل الكثير من التسميات و هي معامل القص، المعامل العرضي و معامل الالتواء [14].

- **معامل يونغ Module Yong**

يدعى معامل يونغ نسبة إلى توماس يونغ (العالم البريطاني القرن ال19). ومع ذلك، تم تطوير مفهومه في عام 1727 من قبل ليونارد يولر، وأجريت التجربة الأولى التي يستخدم فيها مفهوم معامل يونغ من قبل العالم الإيطالي جيوردانوريكاتي في 1782.

و يعرف معامل يونغ باسم معامل الشد، هو مقياس لصلابة من مادة مرنة الخواص. ويعرف بأنه نسبة الإجهاد ذو محورين على انفعال ذو محورين في نظام مرن[14][15].

هذا ويمكن تحديده تجريبيا من منحنى الإجهاد والانفعال التي تم إنشاؤها أثناء اختبارات الشد أو الضغط التي أجريت على المواد. و بشكل غير صحيح، يسمى معامل يونغ بمعامل المرونة، لأن معامل يونغ E هو ثابت مرونة الأكثر شهرة، والذي هو الأكثر شيوعا في التصميم الهندسي [13].

- **نسبة بواسون Poisson Coefficient**

سميت نسبة إلى سيميونبواسون،وهي خاصية مادية هامة تستخدم في تحليل المرونة من المواد، عندما يتم ضغط مادة في اتجاه واحد، فإنه يميل عادة للتوسع في غيرها من اتجاهين عمودي على اتجاه الضغط. وتسمى هذه الظاهرة تأثير بواسون، و هيالنسبة بين الانكماش العرضي و الاستطالة النسبية [14][18].

## 3.II.الخصائص المرنة للجسم الصلب

تعتمد الخصائص المرنة للجسم الصلب على درجة الحرارة، يمكن للتشوهات أن تحدث مصحوبة بتغيير في درجة حرارة الجسم إما نتيجة لعملية تشويه نفسها أو من أسباب خارجية. ومن بين أنواع مختلفة من التشوهات، تشوهات متساوي الحرارة ومكظوم الحرارة ذات أهمية. في تشوه متساوي الحرارة، درجة حرارة T للجسم لا تغير كل من المعامل الجسمي (K)، معامل يونغ (E)، المعامل العرضي (G)، و نسبة بواسون( $\nu$ ) وبالتالي يمكن أن تسمى معاملات المرونة متساوي الحرارة[14].

إذا لم يكن هناك تبادل الحرارة بين أجزاء مختلفة من الجسم، يسمى تشوه ثابت الحرارة، وتسمى معاملات المرونية ثابتة الحرارة[13] $G_{ad}$، $K_{ad}$ ، $E_{ad}$ و $v_{ad}$.

العلاقات بين ثابت الحرارة ومتساوي الحرارةو معاملاتالمرونية هي[13]:

$$^1/_{K_{\mathrm{ad}}} = {}^1/_{\mathrm{K}} - \mathrm{T}\alpha^2/\mathrm{C_P} \qquad (6.\mathrm{II})$$

$$G_{ad} = G$$

$$E_{ad} = \frac{E}{1 - E\ T\ \alpha^2/9C_P} \qquad (7.\mathrm{II})$$

$$v_{ad} = \frac{v + E\,T\,\alpha^2/9C_P}{1 - E\,T\,\alpha^2/9C_P} \qquad (8.\text{II})$$

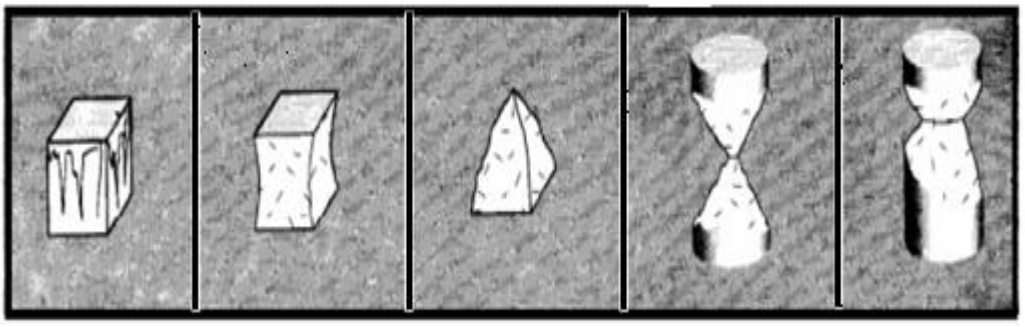
حيثα هو معامل التمدد الحراري للجسم الصلب. هذا هو تأثير ديباي- Grüneisen التمدد الحراري على الثوابت المرنة للحالة المعزولة.

## 4.II.الاختبارات الميكانيكية

إن الهدف من كل اختبار هو ضمان أداء عمل المواد و الأجزاء بالطريقة المتوقعة منها لهذا الغرض هنالك بصورة أساسية نوعان من الفحوصات الميكانيكية هما الاختبار الاتلافي و الاختبار اللااتلافي[16]:

## 1.4.II.الاختبار الاتلافي

هو الفحص الذي يتلف القطع الاختبارية خلال إجراء عملية الاختبار الذي يفقد الاستفادة من المادة بعد إجرائها،و لهذا سمي بالاختبار الاتلافي و كمثال على ذلك اختبار الشد و اختبار الانضغاط و اختبار الالتواءو الانحناء و الصلادة[17].



**الشكل(1.II)**:يوضح الاختبارات الاتلافية

## 2.4.II.الاختباراللا تلافي

هو الاصطلاح الذي يطلق على كل الطرائق الممكنة لفحص المواد و الأجزاء دون إتلافهاأوالتأثير على العمل الذي صممت من اجله أو على عمرها في ما بعد، وتعتبر الاختبارات اللااتلافية واحدة من أهم الوسائل للكشف و التحقق من جودة المواد[17].

و من بين الاختبارات اللاتلافيةالفحص البصري، الجسيمات المغناطيسية و التصوير الإشعاعي، ومرأهم الطرائق في الاختبار هي تقنية الأمواج فوق الصوتية.

## II.1.2.4.اختبارات الأمواج فوق الصوتية(UltrasonicTesting)

إن استخدام الموجات الصوتية عالية التردد، و هو ما يعرف باسم الموجات فوق الصوتية، يعد منأهم التقنيات المطبقة اليوم لاختبار سماكة المواد و الكشف عن العيوب المادية العميقة.

و تعملالاختبارات فوف الصوتية بالطريقة نفسها التي تعمل بها الرادارات، أي النبضات و الصدى خلال فترات زمنية قصيرة، تنتقل ذبذبات ميكانيكية إلى المادة المختبرة، أي قطعة الاختبار و تنتقل الذبذبات عالية التردد عبر المادة في حزمة ضيقةإلىأن تصل إلى الطرف الثاني من قطعة الاختبار

و في حال صادفت الموجة فوق صوتية عيبا في المادة، فإنها ستنعكس بحيث تعيد الإشارةإلى المصدر و هنا علينا قياس الفترة الزمنية إذا ما أردنا أن نحسب دقة عمق العيب تخل قطعة الاختبار. و تستخدم الترددات العالية لان الترددات الصوتية لا تحقق النتيجة المرجوة، حيث أن الموجة الصوتية تجتاز العيوب الصغيرة[17].

حيث يتولى مولد النبضات إصدار نبضات عالية الترددات، و تتحول النبضات الكهربائية من قبل المحول (transducer)إلى ترددات مقابلة و التي تنتقل إلى قطعة الاختبار.

يتلقى المحول إشارة الصدى ليحولها إلى المستقبل المضخم لمعالجة الإشارةو تصل مخرجات المستقبل إلى الشاشة في شكل صورة تفسر ما حدث، و يتم وصل الساعة أيضا مع الشاشة لإعطاء عنصر الوقت الذي له أهمية في تفسير الإشارة.

## II.5.الطرق التجريبية لتعيين المعاملات المرونية للزجاج

### II.5.1.طريقة الأمواج فوق الصوتية

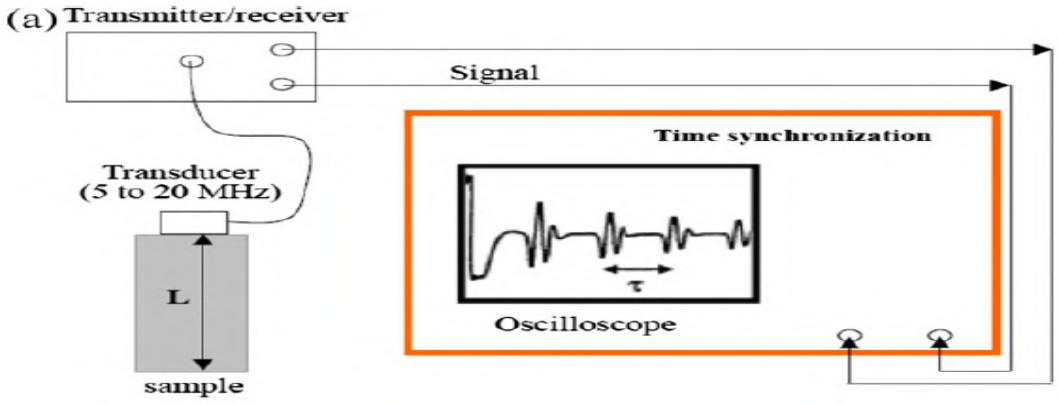
يتم تعيين معاملات المرونة بطريقة الأمواج فوق الصوتية هيكلها و خصائصها. ويمكن قياس الثوابت المرونية بالعديد من الطرق مثل: طريقة التشوه الميكانيكية أو طريقة انتشار الأمواج فوق الصوتية بالنسبة للسوائل، و يمكن الحصول على الثوابت المرنة من قياسات سرعة الموجات فوق الصوتية عالية التردد.

تنقسم طرق تحديد المعاملات المرونية في المواد الصلبة إلى طرق ثابتة و ديناميكية، يمكن اعتبار في الطرق الثابتة و المرونية ثابت الحرارة و متساوي الحرارة هي شروط القياس على التوالي.

في حين الشروط التجريبية تؤثر تأثرا كبيرا على دقة قياس المعاملات المرونيةو الطرق الثابتة هي أيضا من الصعب تطبيقها على المواد الهشة مثل المواد الزجاجية[13].

الطرق الديناميكية لديها درجة عالية من الدقة النسبية وفقا لتطبيق مجموعة من الترددات و تصنف على النحو التالي:

الطريقة الصوتية و طريقةالأمواج فوق الصوتية و يمكن تطبيق هذه الطرق على نطاق واسع لدراسة الخصائص المرونية للزجاج و السوائل المكونة للزجاج لذلك نركز على طريقة واحدة من الطرق الديناميكية و هي طريقة الأمواج فوق الصوتية.




**الشكل(II.4)**:الرسوم التوضيحية التخطيطيق لطريقة الموجات فوق الصوتية[13].

### II.1.1.5.نظرية القياس بالموجات فوق الصوتية

سرعةانتشارالموجاتفوقالصوتيةمثلالموجاتالطولية،والقصيعتمدعلىطبيعةالمواد. ومعذلك،فيمادةمعينة،سرعةانتشارالموجاتفوقالصوتية موجةمستقلةعنترددهاوالبعدمنالمواد. فيالموادالصلبةمتجانسة الخواص

مثلالموادزجاجية، يتمالتعبيرعنمعادلاتالموجةالصوتيةكمايلي[13]:

الوضع الطولي $$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{Ld^2u}{\rho dX^2} \quad (9.\text{II})$$

الوضع العرضي $$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{Gd^2u}{\rho dX^2} \quad (10.\text{II})$$

أينu هوالنزوح، Lهوالمعامل الطولي.من المعادلات أعلاه،نحصل على[13]:

$$L = \rho \mathrm{v}^2{}_{\mathrm{L}} \quad (11.\text{II})$$

$$G = \rho \mathrm{v}^3{}_{\mathrm{s}} \quad (12.\text{II})$$

$\upsilon_l$و $\upsilon_s$ هي السرعات الصوت الطولية والعرضية،على التوالي ويمكن تعميم تقريبا أنυs هي نصف

$\upsilon_l$ فيالموادالمعدنيةمتجانسة،وهذاهو$2\upsilon_s\upsilon_l$= . و يمكنا التعبير

عنالمعادلاتE،K،وυمنالموادالصلبةآيزوتروبيةمثلالزجاجياتيمكنإعطاؤها في الشروط $\upsilon_l$ و $\upsilon_s$ و الكثافة كما يلي[13]:

- المعامل الجسمي $$K = \rho\left(\upsilon_l{}^2 - \frac{4}{3}\upsilon_s{}^2\right) \quad (13.\text{II})$$
- نسبة بواسون $$\upsilon = \frac{(\mathrm{v}^2{}_{\mathrm{L}} - 2\,\mathrm{v}^2{}_{\mathrm{s}})}{2(\mathrm{v}^2{}_{\mathrm{L}} - \mathrm{v}^2{}_{\mathrm{s}})} \quad (14.\text{II})$$
- معامل يونغ $$E = \rho \mathrm{v}^2{}_{\mathrm{s}} \frac{(3\mathrm{v}^2{}_{\mathrm{L}} - 4\,\mathrm{v}^2{}_{\mathrm{s}})}{\mathrm{v}^2{}_{\mathrm{L}} - \mathrm{v}^2{}_{\mathrm{s}}} \quad (15.\text{II})$$

- درجة حرارة ديباي Debye temperature

درجة حرارة ديباي هي معيار مهم في المواد الصلبة، يتم التعبير عن ذلك لوصف خصائص الاهتزازات الذرية الناتجة عن ذلك[14].

درجة حرارة ديباي $\theta_D$ للموادالصلبة آيزوتروبية يمكن أيضا حسابها من السرعات الصوتية والكثافة. للطول الموجي مثلا لموجات فوق الصوتية، يمكن اعتبار الزجاج الصلب سلسلة مرنةكلاسيكية التي تجتمع تقريب ديباي. باستخدام البيانات الصوتية، $\theta_D$ في درجة حرارة الغرفة يمكن أن تكون ممثلة على النحو[13]:

$$\theta_D = \frac{h}{K}\left(\frac{9N_A\rho}{4\pi M}\right)^{1/3} \mathrm{v}_m \qquad (16.\mathrm{II})$$

$$\mathrm{v}_m = \left(\frac{2}{\mathrm{v}^2{}_\mathrm{s}} + \frac{1}{\mathrm{v}^2{}_\mathrm{L}}\right)^{1/2} \text{حيث} \qquad (17.\mathrm{II})$$

h ثابت بولتزمان،: $K$ :ثابت بلانك

ولذلك، فان سرعات الموجات فوق الصوتية وقياسات الكثافة، تمكن الحصول بسهولة على المعاملات المرونية، ودرجة حرارة ديباي من الزجاجيات المعدنية.

## II.6.خلاصة

في هذا الفصل قمنا بإعطاء المفهوم الأساسي لنظرية المرونة ووصف الخصائص المرونية من المواد الصلبة، كمارأيناأهم الاختبارات الميكانيكية و الهدف من كل اختبار و أثره على المواد و الأجزاء.

قمنابدراسة أهم المعاملاتالمرونية للزجاج، المتمثلة في معامل يونغ، نسبة بواسون و درجة حرارة ديباي، و أهم الطرق التجريبية لتعيين هذه المعاملات، و قمنا بالتركيز على طريقة الأمواج فوق الصوتية،التي تعتبر من الطرق التجريبية اللاتلافية، ومن أهم التقنيات المطبقة لاختبار المواد و الكشف عن العيوب.

و سندرس في الفصل القادم المفاهيم الأساسية لمطيافية العناصر الترابية النادرة، و كذلك خصائص المواد المضيفة لهذه الايونات.

# الفصل الثـالث

# دراســـة مطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة

## III.1. مقدمـــــة

في هذا الفصل نقدم أيونات العناصر الترابية النادرة و بنيتها الالكترونية، و كذلك أصل مستويات الطاقة لهذه العناصر في الوسط الصلب، و سوف نرى آليات مختلفة من التفاعلات التي قد تحدث بين هذه الايونات و الإشعاع الكهرومغناطيسي، ووصف الخصائص الطيفية لهذه الايونات. و تستخدم ايونات العناصر الترابية النادرة كوسط فعال في العديد من المواد المضيفة الصلبة نظرا للتحولات الإشعاعية في المجال المرئي و الأشعة تحت الحمراء، فالزجاج يصبح نشطا عندما يطعم بكميات صغيرة من أيونات العناصر الترابية النادرة، هذه الأيونات لديها العديد من التحولات الضوئية، على مدى واسع من الأطوال الموجية، إذ يمكن للمواد المضيفة التي يتم وضعها مع الايونات النشطة أن تغير خصائص هذه الايونات، و سوف نتطرق إلى دراسة خصائص الزجاج المطعم بهذه الايونات

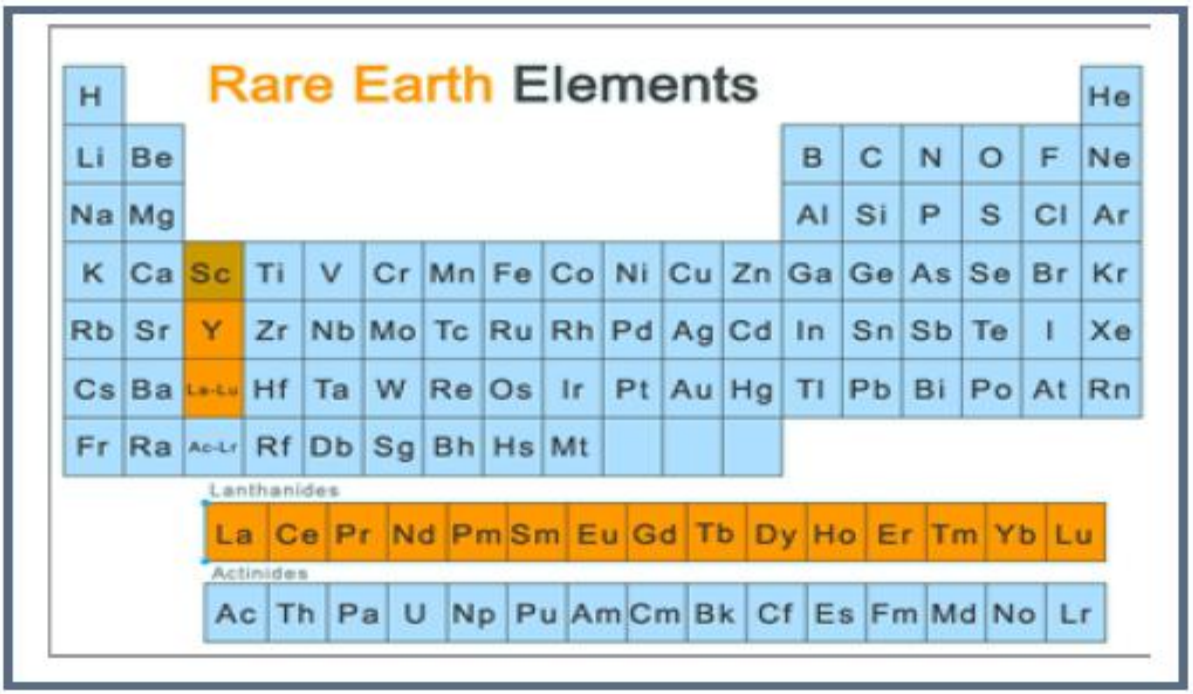
## III.2. العناصر الترابية النادرة

في الجدول الدوري للعناصر مندليف، هناك العديد من العائلات بما في ذلك اللانثينيدات التي ستخص بالدراسة و عرفتأيضا باسم العناصر الترابية النادرة و العناصر الانتقالية.

اللانثينيدات سميت نسبة لعنصر اللانثانيوم $L_a$ و تتكون من 15 عنصر ترابي نادر تبدا من عنصر اللانثانيوم ($Z=57$) في الجدول الدوري إلى عنصر اللوتسيوم ($Z=71$).

و يكون التوزيع الالكتروني للعناصر الترابية النادرة من الشكل $|Xe|=4f^n 5d^0 6s^2$

حيث n يتراوح بين 0 للانثانيوم الى 14 للتيسيوم[20] .




**الشكل (1.III)**: موقع العناصر الترابية في الجدول الدوري[33] .

تتكون العناصر الترابية النادرة من سلسلة من العناصر تتميز بملئ المدار f في حين المدارات الخارجية d و p تكون فارغة بكونها نشطة كيميائيا. و تكون هذه العناصر متشابهة كيميائيا و هذا راجع للطبقة 4f بمداراتها الفرعية السبعة التي تتسع الى 14 إلكترون، و إمكانية انتقال الالكترونات فيها.

في الحالة الأيونية تكون العناصر الترابية ثنائية التكافؤ أو ثلاثية التكافؤ. فبالنسبة لثنائية التكافؤ تنتج من فقدان الذرة لإلكترونين للطبقة 6s، أما ثلاثية التكافؤ فتكون بالإضافة إلى فقدان الذرة لإلكترونين للطبقة 6s، تفقد إلكترون 5d إذا كان ممكن، و إذا كان ليس ممكن فستفقد من الكترونات الطبقة 4f، و تعتبر الحالة ثلاثية التكافؤ أكثر استقرارا لهذه الايونات.

**الجدول (1.III)**: التشكيل الالكتروني للهولميوم Ho.

| Z | العنصر | التوزيع الذري | ثنائي التكافؤ $Ho^{+3}$ | ثلاثي التكافؤ $Ho^{+3}$ |
|---|---|---|---|---|
| 57 | الهولميوم Ho | $\|Xe\|4f^{11}5d^{0}6s^{2}$ | $\|Xe\|4f^{11}5d^{0}$ | $\|Xe\|4f^{10}$ |

## III.3. مطيافية أيونات العناصر الترابية النادرة

### III.3.1. الأعداد الكمية

توجد أربعة أعداد كمية مهمة تميز الذرة و هي **العدد الكمي الرئيسي (n)** يبين مستوى الطاقة الذي يتواجد فيه الإلكترون و يأخذ القيم التالية n=1,2,3,.....، **العدد الكمي اللفي (s)** يدل على وجود حركة مغزلية للإلكترون ويمكن أن يأخذ القيم 1/2 أو 1/2- ، **العزم الزاوي المداري (l)** و يأخذ القيم l=0,1,2,3,.... ;n-1، **العدد الكمي المغناطيسي (m)**، يحدد تصرف المستويات الطاقية في وجود حقل مغناطيسي و يأخذ القيم m=0,±1,±2,....±l |22|.

### III.3.2. الرموز الطيفية

يمكن الحصول على توضع مستويات الطاقة من قياس الامتصاص و الانبعاث ، كما يمكن الحصول عليها عن طريق الحساب. و يمكن التعرف على جميع مستويات الطاقة لأيونات العناصر الترابية النادرة من معرفة التكوين الالكتروني ووصف كل إلكترون من هذه الايونات و الطبقة التي ينتمي إليها.

تتميز كل ذرة بطاقتها و العزم الزاوي لها، و ذلك فان الطاقات التي يمكن أن تتخذها الذرات تعتمد على اتجاه العزم الزاوي للذرة|23|.

لتحديد أنماط مستويات الطاقة من التكوين الالكتروني فمن الضروري جمع العزم الزاوي المداري و العزم اللفي للإلكترون لتشكيل العزم الزاوي الكلي و ذلك للحصول على ما يسمى راسيل- سوندر (Russel-saunders) أو الثنائي (L – S) و يعرف الترميز الطيفي $^{2S+1}L_J$

**S**: العزم الزاوي اللفي الكلي

**L**: العزم الزاوي المداري الكلي

$$\mathbf{L}= S, P, D, F, G, H, I$$

و توافق القيم $\mathbf{L}= 0,1,2,3,4,5,6,..$

**J**: العزم الزاوي الكلي

من اجل تحديد شكل الكتروني معين للمستوي الأساسي حسب مبدأ الاستبعاد لباولي و بتطبيق قاعدة هوند و ذلك:

- القيمة العظمى لـــ S

- القيمة العظمى لـــ L

حيث: $J = J_{\min} = |L - S|$ : للطبقة المملوءة أقل من نصف

$J = J_{\max} = |L + S|$ : للطبقة المملوءة أكبر من نصف.

### III .3.3. مستويات الطاقة

تتميز كل أيون ترابي نادرة بمخطط طاقة. ولتحديد وضع مستويات الطاقة له، فمن الضروري حل معادلة شرودنغر:

$$H\psi = E.\psi \qquad (1.\text{III})$$

حيث $\psi$ : دالة الموجة المرتبطة بالذرة، H : هاملتون التفاعل، E : طاقة المستوى من اجل الايونات الحرة و N الإلكترونات، والنواة شحنتها (Ze) و بفرض أن كتلتها لانهائية، نستطيع كتابة هاملتون للأيون الحر $H_0$ على الشكل التالي:

(2. I

- $H_c$: هاملتون التشكيل في تقريب "الحقل المركزي"، ويمثل مجموع الطاقة الحركية الممكنة للإلكترونات حول النواة. ويسمح بالحصول على وضع طاقة التشكيلات الإلكترونية.

$$H_c = \sum_i \left( -\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_i^2 - \frac{Ze^2}{r_i} \right) \qquad (3.III)$$

- $H_{el}$: يعبر عن تفاعل كولومب بين للإلكترونات في الطبقة (تنافر الإلكترونات فيما بينها)، هذا التفاعل يرفع التطابق في المستويات الإلكترونية 4F، من خلال الرموز الطيفية $^{2S+1}L$ ، وهي تدل على المسافة بين الإلكترونات i و j :

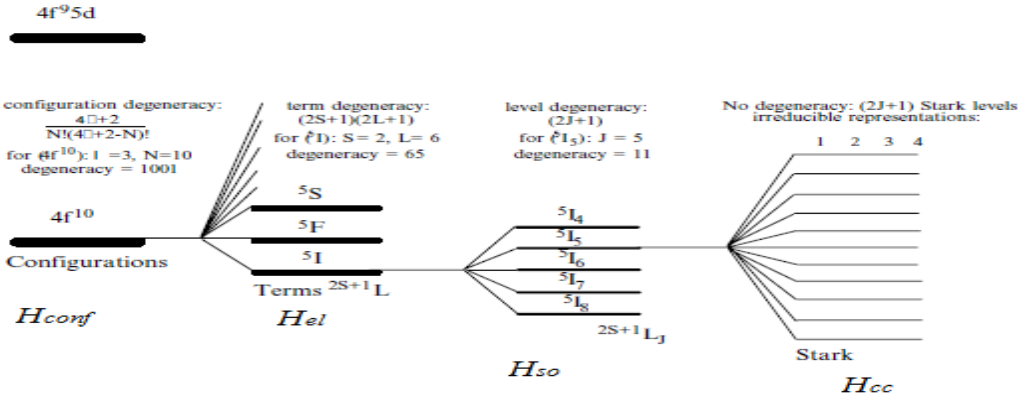
$$H_{el} = e^2 \sum_{i>j}^{N} \frac{1}{|\vec{r_i} - \vec{r_j}|} \qquad (4.III)$$

- $H_{SO}$: يمثل التفاعل بين اللف الذاتي والعزم الزاوي المداري لكل إلكترون (ازدواج سبين– مدار)، يعطي رفع التطابق للمستويات الثانوية من خلال الرمز الطيفي $^{2S+1}L_J$ ويحددها العدد الكمي J، وذلك بـــ $|L-S| \le J \le |L+S|$ وتعطى [21]|[23] :

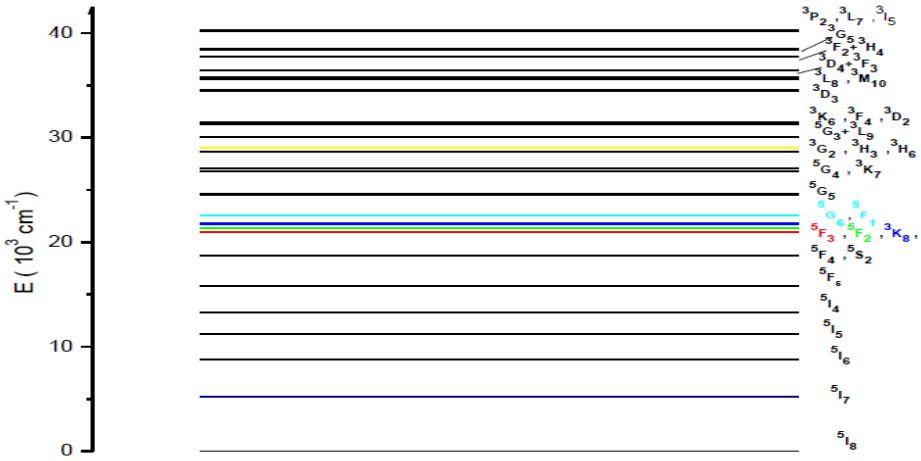
$$H_{so} = \lambda_i \sum_i s_i l_i \qquad (5.III)$$

$\lambda_i$ : معاملات الازدواج سبين– مدار

يتم إدخال هاملتون $H_{el}$ و $H_{SO}$ في نظرية الاضطراب.ويطبق هذا في حالة العناصر الترابية النادرة.




**الشكل (2.III)**: مخطط يوضح رفع التطابق لمستويات الطاقة لايون الهوليوم $Ho^{+3}$ [33].




**الشكل ( 2.III )**: مخطط لمستويات الطاقة للايون الترابي النادر $Ho^{+3}$ [33].

## III .4.3. قواعد الانتقاء

تفاعل الأيونات الترابية النادرة في المادة المضيفة مع الإشعاع الكهرومغناطيسي، قد تؤدي إلى الانتقال بين مستويات الطاقة، تحكم هذه الانتقالات قواعد الانتقاء ، تفاعل الإلكترونات الترابية النادرة مع الحقل البلوري يؤدي إلى نوعين من الانتقالات[23]:

•التفاعلات ثنائي القطب الكهـــــــربائي.

•التفاعلات ثنائي القطب المغناطيسي.

انتقالات ثنائي القطب الكهربائي عندما تكون مسموحة تكون أكثر شدّة. وتحكمها "قواعد لابورت [21]. règles de »" Laporte »

(6. III)

هذه القواعد تدل على أن انتقالات ثنائي القطب الكهربائي بين المستويات التي لها نفس التكافؤ ممنوعة، هذا يمنع كل الانتقالات داخل التشكيلات في الطبقة 4f.

انتقالات ثنائي القطب المغناطيسي هي أقل بكثير من كثافة انتقالات ثنائي القطب الكهربائي، وهي أيضا انتقالات مسموحة بين المستويات من نفس التكافؤ، بشرط القواعد التالية:

(7. III)

في مادة زجاجيه، يمكننا أن نلاحظ جميع الانتقالات[24].

## 4.III. تفاعل الإشعاع مع ايونات العناصر الترابية النادرة

### 1.4.III. آليـــــات إشـعاعيـــــة

تفاعل ايونات العناصر الترابية النادرة مع الإشعاع الكهرومغناطيسي يؤدي إلى الانتقال بين مستويات الطاقة المختلفة للايونات، وفقا لعدة آليات، و بعض الآليات هي أصل عملية التضخيم[25].

#### أ) الامتصـــــاص

هو عملية محرضة بواسطة الحقل الكهرو مغناطيسي، يتم انتقال ذرة من المستوي $E_1$ إلى المستوي $E_2$ و ذلك برفع الالكترونات من مدارات منخفضة الطاقة إلى مدارات عالية الطاقة. يمكن أن تكون هذه العملية بطريقتين مختلفتين، إما اعتمادا على تغير شدة الشعاع خلال الانتشار، أو تغير عدد الايونات المثارة في الزمن[25].

في كلتا الحالتين يتم إدخال المقطع الفعال للامتصاص $\sigma_a$ و هو معامل التناسب بين احتمال امتصاص الفوتون لعدد الايونات في وحدة الحجم، وتعطى عبارته كالتالي[26]:

$$\sigma_a = \frac{2{,}3\ \mathrm{DO}}{\mathrm{N}_0 x} = \frac{\alpha}{\mathrm{N}_0} \qquad (8.\mathrm{III})$$

حيث $DO$ هي الكثافة الضوئية وتعطى:

(9.III)

إذا ما أخذنا بالاعتبار نظام فيزيائي بسيط لتصادم مرن بين الايونات و الفوتونات، تنخفض شدة الشعاع أثناء انتشارها في المادة بفعل الامتصاص:

$$\frac{d\mathrm{I}(z)}{dz} = -\sigma_a \mathrm{I}(\mathrm{z})\mathrm{N}_1 \qquad (10.\mathrm{III})$$

على افتراض وجود احتمال انخفاض الامتصاص، يكون الإسكان في مستوي الإثارة $\mathrm{E}_2$ ضئيل جدا مقارنة مع التركيز الكلي للايونات أي $\mathrm{N}_1 \approx \mathrm{N}_0$ في ظل هذه الظروف، وبعد تكامل المعادلة السابقة فان الشدة المتبقية من شعاع الليزر خلال عينة سمكها $x$ هي:

$$\mathrm{I}\,(x) = \mathrm{I}_0 e^{-\sigma_a N x} \qquad (11.\mathrm{III})$$

حيث $a = \sigma_a\ \mathrm{N}$ يعبر عن معامل الامتصاص $\mathrm{cm}^{-1}$ ، ويمكن أن يفسر على أنه احتمال امتصاص لكل وحدة طول

تغير الإسكان في مستوي $\mathrm{E}_2$ مع مرور الزمن يحدد احتمال إثارة في وحدة الزمن $W_{12}$:

$$\frac{dN_2(dt)}{\mathrm{dt}} = \sigma_a \mathrm{DN}_2(\mathrm{dt}) = \mathrm{W}_{12}\mathrm{N}_2(\mathrm{dt}) \qquad (12.\mathrm{III})$$

حيث $\mathrm{D}$ هو تدفق الفوتون في وحدة الحجم

عدد الفوتونات التي تمر عبر المقطع الفعال في الثانية هي:

$$D = \frac{I}{h\nu} \qquad (13.\text{III})$$

حيث $h$ ثابت بولتزمان و$\nu$ التردد.

احتمال انتقال يمكن أن يعرف أيضا باستخدام معامل اينشتاين $B_{12}$ $(m^3.s^{-2}.J^{-1})$:

$$W_{12}(\nu) = B_{12}\,\rho\,(\nu) \qquad (14.\text{III})$$

حيث $\rho\ (\nu)$ هي كثافة لكل وحدة مساحة للشعاع الساقط $(J.s.m^{-3})$

## ب) الانبعاث التلقائي

هو عملية فقدان الطاقة من المادة بشكل تلقائي على شكل ضوء أو حرارة أو حركة بدون تأثير خارجي. حيث لا تبقى الايونات في حالة إثارة بل تعود بصورة تلقائية إلى حالتها الطاقية الدنيا، مما يؤدي إلى فقدان تلك الطاقة الزائدة في شكل انبعاث فوتونـــــي. و هذا ما يسمى بظاهرة الانبعاث التلقائي و ذلك بانتقال الايونات من المستوى $E_2$ إلى $E_1$.

يسمى متوسط عمر الذي تبقى فيه الايونات في الحالة المثارة بمدة الحياة ( بالثانية s) الحالة المثارة، و هي عبارة عن الكمية الإحصائية التي يتم تعريفها كالتالي[27][31]:

$$\tau = \frac{1}{N_0}\sum_{i=1}^{N_0} t_i \qquad (15.\text{III})$$

حيث $N_0$ عدد الايونات في الحالة المثارة في اللحظة $t=0$

و يعرف احتمال الانبعاث التلقائي لوحدة الزمن بمعامل اينشتاين $A_{12}$، و يمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة التالية:

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 \qquad (16.\text{III})$$

حيث يمثل $\frac{dN_2}{dt}$ معدل الانبعاث التلقائي و $A_{21}$ احتمالية الانبعاث التلقائي

حيث في الحالة $N_2 = N_2 e^{-A_{21}t}$ (17. III)

البسيطة (نظام من مستويين)، تعرف مدة الحياة الإشعاعية التي يتم التعبير عنها بـــــــــــــــــــــــــــــ:

$$\tau_{rad} = \frac{1}{A_{21}} \quad (18.\text{III})$$

$\tau_{rad}$ : مدة حياة الإشعاع في الحالة المثارة

## ج) الانبعاث المحثوث (المحرض)

هو الأساس لعمل الليزر و خلال هذه العملية يقوم فوتون ذو طاقة $h\upsilon$ بتحريض الذرة على الانتقال من المستوي الأعلى $E_2$ إلى المستوي الأسفل $E_1$ هذا يصحب بانبعاث فوتون له نفس خصائص الفوتون المحرض. و يمكن التعبير عن احتمال حدوث عملية الانبعاث المحفز باستخدام معامل اينشتاين $B_{21}$ [27 ]:

$$W_{21}(\nu) = B_{21}\rho(\nu) \quad (19.\text{III})$$

تغير نسبة الإسكان في مستوى الحالة المثارة $N_2$ اكبر منه في مستوي الحالة الأساسية يعني ذلك ان هناك تعداد معكوس للإسكان و يمكن تحقيق ذلك باستعمال قوة محفزة خارجية:

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}\,\rho(\nu)N_2 \quad (20.\text{III})$$

و يعرف المقطع الفعال للانبعاث $\sigma_e$:

$$\frac{dN_2}{dt} = -W_{21}N_2 = -\frac{\sigma_e I_p}{h\nu}N_2 \quad (21.\text{III})$$

حيث $I_p$ هي شدة الشعاع الساقط $(W/cm^2)$ من اجل نظام ذو مستويين تكون الإثارة الإشعاعية:

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - (W_{21} + A_{21})N_2 = -\frac{dN_1}{dt} \quad (22.\text{III})$$

في حالة توازن حراري، ترتبط نسبة الإسكان لمستويين بمعامل بولتزمان:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \qquad (23.III)$$

حيث $g_I=2J+1$ هو التوالد في مستوي الطاقة $E_1$، $T$ هي درجة الحرارة و $k$ ثابت بولتزمان. في حالة $N_i$ ثابتة اي $dN_I/dt=0$ يكون لدينا:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{W_{12}}{W_{21} + A_{21}} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \qquad (24.III)$$

من هذه العلاقة يمكن التعبير عن $\rho_\nu$ كثافة الطاقة للحزمة في وحدة مساحة كالتالي:

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\left(\frac{B_{12}}{B_{21}}\frac{g_1}{g_2} e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)} \qquad (25.III)$$

وفقا لقانون بلانك، لدينا:

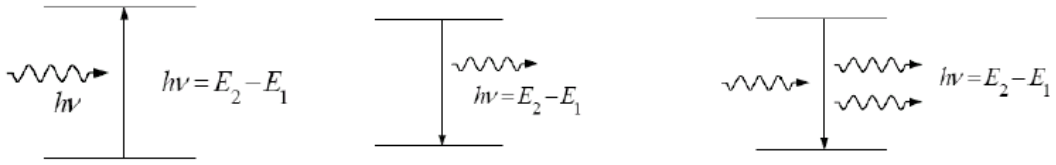
$$\rho(\nu) = \frac{8\pi n^3 \nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \qquad (26.III)$$

بالمطابقة بين طرفي المعادلتين نجد:

$$g_1 B_{21} = g_2 B_{12} \qquad (27.III)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi n^3 h\nu^3}{c^3} \qquad (28.III)$$

**انبعاث محثوث** **انبعاث تلقائي** **امتصاص**




**الشكل (3.III)**: يوضح آليات تفاعل الإشعاع مع المادة [31] .

## 2.4.III. الآليات غير إشعاعية

في بعض الأحيان تعود الذرة إلى المستوي الأساسي دون أن تشع موجات كهرومغناطيسية، و ذلك من خلال تشتيت الطاقة إلى الشبكة و خلق فونون، و يسمى التحول بالتحول غير إشعاعي.

التحولات غير الإشعاعية هي أكثر حساسية لطبيعة المواد من التحولات الإشعاعية، في كثير من الحالات فان طاقة الانتقالات الإلكترونية بين الحالة المثارة والحالة الأساسية أعلى بكثير من طاقة الفونونات، وبالتالي فإن الاسترخاء غير الإشعاعي بواسطة الفونونات هو إذا عملية متعددة الفونونات (multiphonon)[28].

احتمال حدوث الاسترخاء متعدد الفونونات يتعلق بالفرق الطاقي بين مستويات الانتقال كما تلخصها المعادلة التالية[21]:

$$W_{MP} = W_0[n(\nu) + 1]^p \qquad (29.III)$$

P: هو عدد الفونونات اللازمة لملء فجوة الطاقة بين المستويات، $W_0$ هو احتمال الانتقال عند $0°K$ بحيث:

$$W_0 = Be^{-a\Delta E} \qquad (30.III)$$

$\Delta E$: هو فرق الطاقة بين المستويات الانتقالية، $a\ (cm)$ و$B(s^{-1})$ ثوابت موجبة مميزة للشبكة. و $n(\nu)$ هو عدد بوز "Bose" حيث:

$$n(\nu) = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \qquad (31.III)$$

احتمال الانتقال غير الإشعاعي يزيد بارتفاع درجة الحرارة و بالتالي يؤدي إلى انخفاض في مدة الحياة الإشعاعية، و خلال

الاسترخاء فان الطاقة الزائدة هي اكثر اهمية من الطاقة القصوى للفونون في المادة، فهناك تحولات تشمل فونون واحد او عدة كمات اهتزاز و تسمى بالتحولات الاهتزازية، و بشكل عام فان تأثير هذه التفاعلات تؤدي الى تغيير الاسكان في المستويات، اذ يمكن كتابة هذا التغير بسبب الانتقالات الغير مشعة بالصيغة التالية[30]:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_2}{\tau_{nr}} \qquad (32.\text{III})$$

حيث: $\tau_{nr}$ ثابت زمني مميز يعبر عن مدة الحياة الغير مشعة وتعطى عبارته كالتالي:

$$\tau_{nr} = \frac{1}{W_{nr}} \qquad (33.\text{III})$$

و في الأخير فان التحولات غير الإشعاعية لها أثار ايجابية و أخرى سلبية لأنها تسمح بتجميع أو إخلاء مستوى معين و لذلك فإنها يمكن أن تزيد أو تقلل من كفاءة الانتقال تعطى حسب الحاجة.

في حالة الليزر فانه من المفيد جدا محاولة التقليل من عدم الانتقال الإشعاعي للانبعاث المطلوب و ربما تعزيز بعض التحولات الأخرى مفيدة لتسوية سريعة للمستوي الثاني المسؤول عن انبعاث الليزر.

## 5.III. المردودية الكمية

عند الأخذ بعين الاعتبار الآليات الإشعاعية وغير الإشعاعية، و التغيرات في مستوى المثار الثاني لنظام ذو مستويين يمكن أن يكتب:

(34.III)

$N_2(t)$ تتغير تغير أسي بدلالة الزمن كالتالي:

$$N_2(t) = N_2(0)\exp(-t/\tau_{mes}) \qquad (35.\text{III})$$

يتم تعريف المردودية الكمية على أنها النسبة بين عدد الفوتونات المنبعثة إلى عدد الذرات المثارة في المستوى المثار. و تعطى[21]:

$$\eta = \frac{\tau_{mes}}{\tau_{rad}} \qquad (36.\text{III})$$

## 6.III. المادة المضيفة للعناصر الترابية النادرة

يمكن تصنيف المواد المضيفة للعناصر الترابية النادرة إلى مجموعتين رئيسيتين: زجاجية ومواد صلبة بلورية يجب أن يكون للمضيف خصائص بصرية و ميكانيكية وحرارية جيدة لمقاومة ظروف عملية التطعيم وأيضا علينا الأخذ بعين الاعتبار حجم ذرات الأيونات النشطة، وخصائصها الطيفية، بطريقة مثالية تتوافق مع أيونات المادة المضيفة، ومقارنة الفرق بين مستويات الطاقة للأيونات النشطة، و التردد الأقصى لاهتزاز الشبكة للمادة المضيفة (فونون)، إن إضافة الايونات النشطة بكميات كبيرة قد يؤثر على خصائص المادة المضيفة، لذا فإن إضافتها للمواد الصلبة البلورية، أو الزجاجية، تكون بكميات صغيرة جدا لتفادي تلك التأثيرات الجانبية[21].

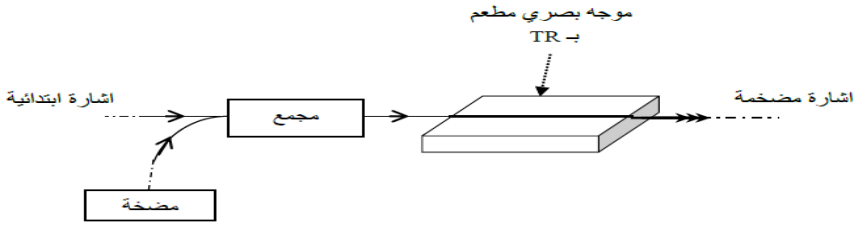
## 7.III. ذوبانية العناصر الترابية النادرة

يجب استخدام التضخيم العالي في فترة قصيرة في مضخم ضوئي متكامل حيث يجب أن يتحقق على نسبة تطعيم عالية من الايونات النشطة، هذا يعني أن الايونات لا يمكن دمجها في المادة المضيفة بطريقة عشوائية و لكن يجب أن تكون قابلة للذوبان في المرحلة الصلبة، بنية الزجاج تسهل إدراج التعديلات فيها، تفاعلات أيون-أيون والتفاعلات أيون—المادة تحدث تأثيرات على الخصائص الطيفية للأيونات الترابية النادرة مثل المقاطع الفعالة، شكل خطوط الامتصاص والانبعاث، مدة حياة، عند درجة الحرارة الانتقال الزجاجي، تنتج الاهتزازات في الشبكة الزجاجية، فمن المهم معرفة طاقة الفونون للمواد المضيفة لهذه الايونات[29].

## III.8. التضخيم الضوئي و الليزر

### III.8.1. التضخيم الضوئي

المضخم الضوئي يسمح بتضخيم الإشارة الضوئية باستخدام مبدأ الانبعاث المحفز للإشعاع، المكونات الأساسية لجهاز التضخيم الضوئي هي:موجه بصري مطعم بأيونات العناصر الترابية النادرة، ومضخة، التي تحقن في الموجه البصري بواسطة مجمع، والليف البصري، وينتج عنها انعكاس سكاني لإلكترونات أيونات العناصر الترابية النادرة، ومنه يكون عدد الفوتونات التي تخرج من الموجه البصري اكبر من تلك التي أدخلت إليه، **الشكل (III.4)**، لهذا فإنه من الضروري أن تكون بنية مستويات الطاقة تسمح بحدوث انعكاس سكاني[30].




**الشكل (III.4)**: رسم تخطيطي لمبدأ المضخم الضوئي

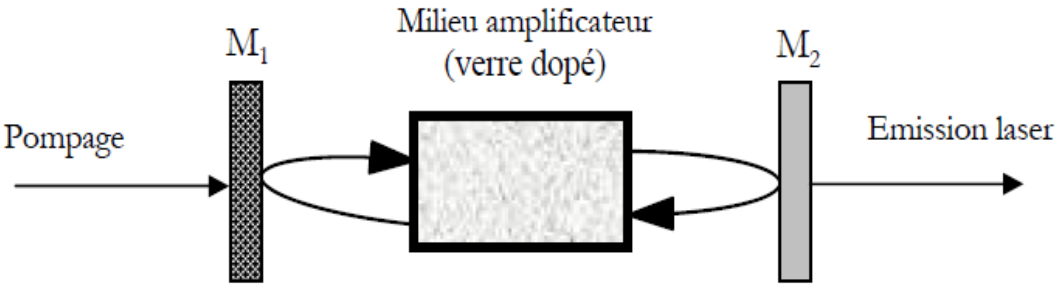
### III.8.2. الليزر LASER

بالانجليزية Light Amplification by Stimulated Emission Of Radiation

و تعني تضخيم الضوء بانبعاث الإشعاع المحفز و هو عبارة عن حزمة ضوئية ذات فوتونات تشترك في ترددها و تتطابق موجاتها بحيث تحدث ظاهرة التداخل البناء بين موجاتها لتتحول الى نبضة ضوئية ذات طاقة عالية. و هو مصدر لتوليد الضوء و له خصائص مميزة لا توجد في الضوء الذي تصدره بقية مصادر الضوئية الاخرى، قدم أول جهاز من هذا النوع في عام يتكون جهاز الليزر في الحالة T.Maiman 1960 م من قبل العالم الأمريكي تيودور ميمان

الصلبة من ثلاثة عناصر أساسية[27]:

- **وسط التضخيم**
- **مصدر الضوء**: يسمح الضخ الضوئي بالتضخيم في وسط نشط و الذي يقع بين المستويين الأدنى و الأعلى حيث تبدأ الالكترونات بالتراكم في هذا المستوى لينتج انعكاس سكاني[25].
- **المرنان:** هو منظومة مكونة من مرآتين على محور بصري مشترك حيث تنتقل فوتونات الليزر بين المرأتين ذهابا و إيابا من اجل تضخيمها، تكون إحدى هاتين المرأتين ذات انعكاسية تامة و المرأة الأخرى تكون ذات انعكاسية جزئية [31].




الشكل (**5.III**): مبدأ عمل جهاز الليزر[25]

### 1.2.8.III. التوزيع العكوس

يتطلب انبعاث أشعة الليزر العمل على زيادة عدد الذرات في مستويات الطاقة العليا اي زيادة تعدادها عن الحالة الطبيعية أي يكون $N_1 < N_2$ ، و لكي يحدث التوزيع المعكوس يتطلب اثارة الذرات عن طريق ضخ الوسط المادي بطاقة تحث الذرات الارتفاع من المستوي الادنى $N_1$ إلى المستوي الأعلى $N_2$ [32].

### 2.2.8.III. الربح

في ذرة ذات مستويين $N_1$ و $N_2$ و في وجود موجات كهرومغناطيسية ، توزيعها الطيفي يتركز على الانتقال بين المستويين $N_1$ و $N_2$ ، فان تغير الشدة الضوئية بدلالة اتجاه الانتشار تعطى بالمعادلة التالية[21]:

$$\frac{dI_\nu}{dZ} = (\sigma_{21}N_2 - \sigma_{12}N_1 - a)I \qquad (37.\text{III})$$

استعملنا هذا التقريب الذي يعتبر أن كثافة التوزيع المعكوس للإسكان ($\sigma_{21}\ N_{2-}\ \sigma_{12}N_1$) تكون ثابتة في وسط التضخيم . و بمكاملة المعادلة السابقة نحصل :

$$I_\nu(z) = I_\nu(0)exp[(\gamma(\nu) - a)z] \qquad (38.\text{III})$$

حيث $\gamma(\nu)$=($\sigma_{21}\ N_{2-}\ \sigma_{12}N_1$) هو معامل الربح.

إذا كانت: $\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_0$، نجد العبارة البسيطة التالية:

$$\gamma(\nu) = \sigma_0 \Delta N \qquad (39.\text{III})$$

حيث $$\Delta N = N_2 - N_1$$

و منه فان تعرف الربح هو النسبة بين شدة الإضاءة الناتجة عند خروج شعاع الليزر على شدة الإضاءة عند دخول الشعاع للوسط و تعطى:

$$G = \frac{I_\nu(l)}{I_\nu(0)} \qquad (40.\text{III})$$

L: طول العينة التي يجتازها الضوء

بما أن الضوء الوارد لا يكون موزع بانتظام داخل الوسط المضخم و كذلك توزيع ايونات النشطة ليس منتظم فاننا يمكننا ادخال عامل الحجز $\Gamma$ و يتم التعبير عن الربح بواسطة المعادلة التالية:

(41.III)

و بالتالي من اجل زيادة الربح لابدة من زيادة معامل الربح $\gamma$، و التقليل من الضياعات $\alpha$، و هناك ملاحظة و هي انه يمكن الحصول على نفس الربح عن طريق تركيز مرتفع او عن طريق طول كبير للمضخم[25].

و يعطى ربح (decibels) بالعلاقة التالية:

$$G_{dB} = 10\log(G) \qquad (42.\text{III})$$

و منه فان الربح هو:

$$G_{dB} = 4.34[(\Gamma\gamma(\nu) - a)L] \quad (43.\text{III})$$

### 3.2.8.III. آلية الضخ

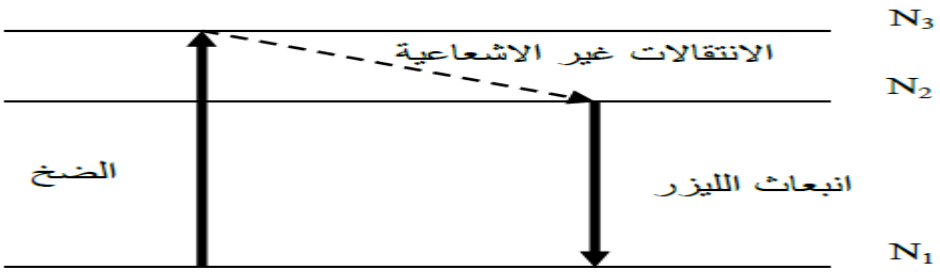
هناك نوعان من المنظومات الضخ التي تستخدم في توليد الليزر هما:

- **نظام المستويات الثلاثة**

يتكون من ثلاثة مستويات طاقة، المستوي الأرضي الذي يمثل المستوي الليزري السفلي و المستوي المتهيج الذي يمثل المستوي الليزري العلوي و المستوي شبه المستقر أو الوسطى.

المستوي الأرضي هو نفسه المستوي الليزري السفلي، يجب ضخ نصف عدد الذرت أو الجزيئات من المستوي الأرضي إلى المستوي العلوي للحصول على التوزيع المعكوس، لذلك نحتاج إلى طاقة ضخ عالية جدا.

المستوي شبه المستقر لايتم اختياره لعملية التوزيع المعكوس لانه لا يستطيع خزن عدد كبير من الذرات أو الجزيئات المتهيجة مثل المستوي الليزري العلوي [31].

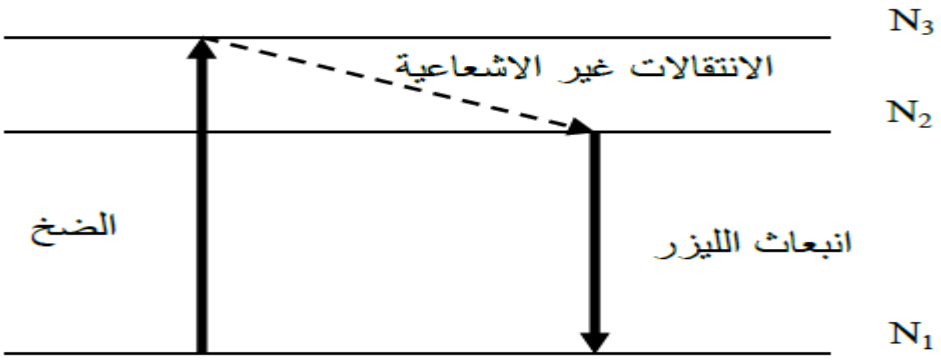



**الشكل (5.III)**:نظام ذو ثلاث مستويات طاقية[21].

- **نظام المستويات الرباعية**

يتكون من أربع مستويات طاقة، المستوي الأرضي و المستوي الليزري السفلي و المستوي المتهيج و المستوي الليزري العلوي.

المستوي الأرضي هو ليس نفسه المستوي الليزري السفلي، في هذا النظام تتأثر الذرات بالضخ بطريقة ما من المستوي الأساسي إلى مستوي الطاقة الرابع، و منه فان الدورة الليزريه لأربعة مستويات تشبه الدورة الليزرية لثلاثة مستويات و يكمن الاختلاف في الخطوة التالية و ذلك لان الانتقال الليزري المحفز في الليزر بأربعة مستويات، لا يتم فيه انتقال الذرات مباشرة إلى المستوي الأساسي بل تنتقل إلى المستوي الوسطى (2) يكون هذا المستوي فارغا، مما يتطلب ضخا طاقيا شديدا لجعل عدد الذرات في المستوي الثاني اكبر من المستوي الأساسي[31][32] .




الشكل (**6.III**): نظام ذو اربع مستويات طاقية[21].

## III.9. خلاصة

في هذا الفصل أشرنا إلى أساسيات التحليل الطيفي لايونات العناصر الترابية النادرة في الزجاج، رأينا انه عندما تتفاعل مع الإشعاع الكهرومغناطيسي فإنها تظهر آليات إشعاعية و هي الامتصاص و الانبعاث التلقائي و الانبعاث المحفز، و التي تعطي المقطع الفعال للامتصاص و المقطع الفعال للانبعاث و فترة الحياة الإشعاعية، و آليات غير إشعاعية نتيجة للتفاعلات بين ايونات العناصر الترابية و الفنونات.

كما تطرقنا إلى بعض خصائص الزجاج المطعم بالايونات الترابية النادرة، و مدى تأثير هذه الايونات على خصائص الزجاج الضوئية، و تعد أيونات العناصر الترابية النادرة عناصر منشطة عند إضافتها لمواد زجاجية ، وذلك من أجل تطبيقات الليزر والمضخمات الضوئية.

لهذا يمكننا الحصول على افضل المواد المضيفة المطعمة بـــــــــــــالايونات الترابية النادرة، عن طريق تحديد الوسائط المرونية و الوسائط الطيفية (باستخدام نظرية جود–اوفلت) لهذه المواد ، هذا ما نتطرق له في الفصل القادم .

# الفصل الرابع

# تحديد الخصائص المرونية و

# الوسائط الطيفية للزجاج 79 $NaPO_3$

# – 10 $SrF_2$ – 10$ZnF_2$– $HoF_3$

## IV.1.مقدمـــة

لا تزال البحوث جارية للبحث عن أفضل المواد المضيفة للعناصر الترابية النادرة و تحديد الوسائط الطيفية ( المقاطع الفعالة للامتصاص و الانبعاث، مدة الحياة الإشعاعية.....الخ)، و ذلك لأن هذه الوسائط مهمة جدا في تطوير المركبات الضوئية الفعالة.

و يعد الزجاج مرشحا جيدا لهذه التطبيقات بفضل خصائصه المميزة كقابليته للتشكيل في قطع كبيرة و تجانسه الضوئي بالإضافةإلى انخفاض تكلفته، و نجد أن البحوث و الدراسات الطيفية لا تزال قائمة حول الزجاج الهالوجينو–فوسفاتي المطعم بالعناصر الترابية النادرة نظرا لأهميته في تطبيقات الليزر و المضخمات الضوئية.

في هذا الفصل سنقوم بتحديد الوسائط المرونيةو الطيفية للزجاج الهالوجينو–فوسفاتي المطعم بالهوموليوم$HO^{+3}$ ذي الصيغة $(79NaPO_3–10SrF_2–10ZnF_2– HoF_3)$.

## IV .2. تركيبة الزجاج المدروس

العيّنة المدروسة عبارة عن زجاج هالوجينو–فوسفاتيمطعّم بالهولميوم، تركيبته المولية (mol%) تُعطى بالصيغة التالية: $79NaPO_3-10SrF_2-10ZnF_2- HoF_3$ وسنرمز له اختصارا بـــــــــــ : NPSZH1، نسبة التطعيم بأيون الهوليوم ($HO^{+3}$)هي 1 % بتركيز قيمته $N_0=1.649\times10^{20}$ ion/cm$^3$ وقرينة انكساره n=1.496، و كتلته الحجمية 2.803 g/cm$^3$ ، وسمك العينة المدروسة من هذا الزجاج 0.5cm، الجدول (**2.IV**) يوضح الكتل المولية و النسب المئوية لمركب الزجاج المدروس.

الجدول(**2.IV**):يوضح الكتل المولية و المعامل المولي للمركبNPSZH1

| المركب | $NaPO_3$ | $SrF_2$ | $ZnF_2$ | $HoF_3$ | NPSZH1 |
|---|---|---|---|---|---|
| الكتلة المولية g/mol | 101,962 | 125,617 | 103,376 | 221,926 | 552,881 |
| المعامل المولي(100%) | 79 | 10 | 10 | 1 | 10 |

**الشكل (1.IV)**:العينة المدروسة

## IV .3.تعيين الخصائص المرونية للعينة المدروسة:

تمّ حساب مختلف معاملات المرونة للعيّنة انطلاقا من نتائج القياس بواسطة تقنية الأمواج فوق الصوتية، مبدأ هذه الطريقة يستند على قياس سرعتي انتشار الصوت الطولية $V_L$والعرضية $V_S$ لموجة فوق صوتية داخل العينة المدروسة، وبمعرفة سمك العينة وكتلتها الحجمية يمكن حساب المعاملات المرونية (الطريقة مشروحة في الفصل الثاني).

**الجدول (1.IV):** يعطي المعاملات المرونية

| المرجع | $\theta_D$ (K) | $\upsilon$ | E (GPa) | K(GPa) | G (GPa) | L (GPa) | العينة |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| العمل الحالي | 204,794 | 0,281 | 43,283 | 32,923 | 16,895 | 55,450 | الزجاج الحالي |
| [13] | - | 0.211 | 67.2 | 38.8 | 27.7 | - | زجاج النوافذ |
| [13] | - | 0.24 | 61.9 | 40.5 | 24.9 | - | زجاج $SiO_2$ |
| [13] | - | 0.195 | 83.6 | 45.7 | 35.0 | - | Borosilicate |
| [18] | - | 0.276 | 34.347 | 25.619 | 13.453 | 43.557 | أوكسيد الأنتيموانSKWP |

الخصائص المرونية مهمة جدا لمعرفة ما إذا كان الزجاج مناسب لتطبيق معين و هي محددة من اجل وصف بنيةالزجاج كدالة في المكونات، والمعاملات المرونية تتعلّق بالموقع وبالاتجاه الذي تقاس فيه، ومن أهمها معامل يونغ الذي يتعلق بالبنية وبالروابط بين الذرات، إذ كلّما كانت قيمته كبيرة كلّما كان هذا مؤشر على صلابة المادة، بالنسبة للعمل الحالي، وجدنا أنّ قيمة معامل يونغ أكبر من قيمته في زجاج أكسيد الأنتيموان وأقل من زجاج $SiO_2$ على سبيل المثال، مما يدل على أن صلابة العينة المدروسة تكون أقل من صلابة زجاج السيليس الذي يتمتع بصلابة عالية تترجمها قيمة معامل يونغ المرتفعة، وأكبر من صلابة

زجاج الأنتيموان الذي يتمتّع بصلابة أقل نظرا لتواجد بعض الأكاسيد القاعدية في مكوّناته مثل : $K_2O$, و $Na_2O$ و $Li_2O$[18]

درجة حرارة ديباي هي معامل مهم جدا من اجل الأجسام الصلبة و هي تمثل درجة الحرارة التي تكون تقريبا عندها كل الأنماط الاهتزازية مثارة، في عملنا الحالي وجدنا أن قيمتها تكون مساوية لـــــ: 204,794 K

## IV.4.تعيين الخصائص الطيفية للعينة المدروسة:

### IV.4.1.طيف الامتصاص:

يمكن حساب المقطع ال فعال للا متصاص عند أطوال موجية مختلفة انطلاقا من طيف الامتصاص . هذا الطيف يتم قياسه باستخدام مطياف مزدوج الحزمة. وذلك بإرسال شعاع من الضوء الأبيض الى موحد اللون ( spectrophotomètre à doubles faisceaux)،فيتم فصلها إلى شعاعين بشدة متساوية: حزمة واردة شدتها $I_0(\lambda)$، وحزمةتم من خلال عينة شدتها$I(\lambda)$، الكثافة الضوئية $DO$ تعطى[21]:

$$DO = \log\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right) \qquad (1.IV)$$

شدة الضوء الممتصة تعتمد على معامل الامتصاص$\alpha$ وسمك المواد التي يجتازها الشعاع$dl$:

$$\frac{dI}{I} = -\alpha \cdot dl \qquad \Rightarrow \qquad I = I_0 \exp(-\alpha.l) \qquad (2.IV)$$

معامل الامتصاص$\alpha$ بـــ $cm^{-1}$، ويعبر عنه بدلالة الكثافة الضوئية $DO$ وفقا للعلاقة التالية[20]:

$$\alpha = \frac{\ln 10}{x} \cdot DO \qquad (3.IV)$$

ونستنتج المقطع الفعال للامتصاص[26]:

$$\sigma_a(\lambda)=\frac{\alpha(\lambda)}{N_0}=\frac{2,3.DO}{N_0\cdot x} \qquad (4.IV)$$

حيث $N_0$ : تركيز الايونات المسؤولة عن الامتصاص، و$x$ : سمك العينة

## 2.4.IV. نظرية جود–اوفلتJudd– Ofelt

نظرية جود–اوفلت"*Judd-Ofelt*" (1962) ، تسمح بتحديد الوسائط الطيفية للزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة ،مثل احتماليةالانتقال الإشعاعي بينمستويي طاقة، مدة حياة الحالة المثارة،وتعتمد هذه النظرية على دراسة عصابات الامتصاص للأيون الترابي النادر،من أجل تحديد قوى الاهتزاز لثنائي القطب الكهربائية (DE)، أو ثنائي القطب المغناطيسي (MD)،للانتقالين المستويين،هذه القوى يتم تحديدها تجريبيا من طيف الامتصاص، وتعتمد هذه النظريةعلى قواعد الانتقاء:

في حالة انتقالات ثنائي القطب الكهربائي، الانتقالات المسموحة هي[21]:

$$\Delta L=\pm 1 \qquad \Delta S=0$$
$$\Delta J\le 2l \qquad \Delta L\le 2l$$

في حين انتقالات ثنائي القطب المغناطيسي تحدد:

$$\Delta L=0 \qquad \Delta S=0 \qquad \Delta J=0,\pm 1$$

### 2.4.IV. 1. قوى الانتقال و قوى الاهتزاز

قوة الانتقال بين عنصري ستارك يرمز لها ب ـــــــ$S(J,J')$،يعرف بأنه عنصر المصفوفة لمربع مؤثر الانتقال لثنائي القطب الكهربائي (DE) أو ثنائي القطب المغناطيسي(MD):

$$S_{ed}(J,J')=\left|\langle J\,|DE|\,J'\rangle\right|^2 \qquad (5.IV)$$

$$S_{md}(J,J')=\left|\langle J\,|DM|\,J'\rangle\right|^2 \qquad (6.IV)$$

قوىالانتقال بين مستويين هي مجموع القوى الانتقالية بين مستويات ستارك

$$S_{ed,md}(J,J')=\sum S_{ed,md}(J,J') \qquad (7.IV)$$

القوىالاهتزاز تعرف[24]:

$$f(J,J') = \frac{8\pi^2 m_e c}{3h(2J+1)n^2\lambda}\left[\chi_{ed} S_{ed}(J,J') + \chi_{md} S_{md}(J,J')\right] \quad (8.IV)$$

حيث $\chi_{ed} = \frac{n(n^2+2)^2}{9}$ و $\chi_{md} = n^3$ ، هما التصحيحين للحقل المحلي حول الأيون ات الترابية النادرة، $m$ هي كتلة الإلكترون،

$c$ هي سرعة الضوء في الفراغ و n هي قرينة الانكسار في الوسط، h ثابت بلانك و $\lambda$ الطول الموجي لموسط الانتقال.

## 22..4.IV.حساب قوى الانتقال

في حالة الانتقالات ثنائي القطب المغناطيسي قوى الانتقال $S_{md}$ وقوى الاهتزاز $f_{md}$ لا تعتمد على المادة المضيفة، بل تعتمد فقط على الأيون الترابي النادر، وتعرف قوة الانتقال التجريبية $S_{md}$ بالعلاقة التالية [21] :

$$S_{md} = \left(\frac{h^2}{4\pi m_e c}\right)\left|\langle J \| L + 2S \| J' \rangle\right|^2 \quad (9.IV)$$

: $\left|\langle J\|L+2S\|J'\rangle\right|$ مؤثر عنصر المصفوفة، ويتعلق فقط بأيونات الترابية النادرة والانتقال $|J\rangle \to |J'\rangle$ و لدينا[21]:

$$\text{J = J' :} \begin{cases} \left|\langle J \| L + 2S \| J' \rangle\right| = g\hbar\left[J(J+1)(2J+1)\right]^{\frac{1}{2}} \\ g = 1 + \left\{\frac{\left[J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)\right]}{2J(J+1)}\right\} \end{cases} \quad (10.IV)$$

$$\text{J = J - 1:} \left|\langle J \| L + 2S \| J-1 \rangle\right| = \hbar\left\{\frac{\left[(S+L+J+1)(S+L+1-J)(J+S-L)(J+L-S)\right]}{4J}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11.IV)$$

$$\text{J = J + 1:} \left|\langle J \| L + 2S \| J+1 \rangle\right| = \hbar\left\{\frac{\left[(S+L+J+2)(S+J+1-L)(L+J-S)(S+L-J)\right]}{4(J+1)}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12.IV)$$

وفقا لنظرية جود–أوفلت، قوى الانتقال لثنائي القطب الكهربائي بين مستويين $|J'\rangle$ و $|J\rangle$ تعطى عن طريق المعادلة[21]:

$$S_{ed}^{calc} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \Omega_k \left| \langle J' \| U^{(k)} \| J \rangle \right|^2 \quad (13.IV)$$

$\Omega_k$هي معاملات تعكس تأثير المادة المضيفة على احتمال يةالانتقالات الإشعاعية، وهي معروفة تحت اسم وسائط ج ود– أوفلت"Judd–Ofelt"، $U^{(k)}$ تمثل قيم المصفوفة لمكونات المؤثر التنسوريالمختزل(l'opérateur tensoriel réduit) ، وهي قيم ثابتة مستقلة عن المادة المضيفةوتتعلق فقط بعنصر التطعيم[34].

## IV.4.2. 3.قوى الاهتزاز التجريبية:

قوى الاهتزاز التجريبية $F_{mes}$ و تحدد باستخدام طيف الامتصاص معامل الامتصاص$\alpha(\lambda)$ في الطول الموجي $\lambda$وفقا للمعادلة[21]:

$$f_{mes} = \frac{m_e c^2}{\pi e^2 N} \int \frac{\alpha(\lambda) d\lambda}{\lambda^2} \quad (14.IV)$$

حيث:

$$f_{mes} = f_{ed}^{mes} + f_{md}^{mes} \quad (15.IV)$$

وايضا:

$$f_{ed}^{mes}(J, J') = \frac{m_e c^2}{\pi e^2 N} \int_{J \to J'} \frac{\alpha(\lambda) d\lambda}{\lambda^2} - f_{md}^{mes} \quad (16.IV)$$

ويكون لدينا:

$$S_{ed}^{mes}(J, J') = \frac{9n}{\left(n^2+2\right)^2} \left[ \frac{3hc\,(2J+1)}{8\pi^3 e^2 N} \int_{J \to J'} \frac{\alpha(\lambda) d\lambda}{\lambda^2} - S_{md}^{mes} \right] \quad (17.IV)$$

في هذا العمل، استندنا الى نظرية جود اوفلت باستعمال برنامج الماتلاب الذي يحسب قيم$\Omega_K$، و مختلف المعايير الطيفية، احتمالية الانتقال الاشعاعية، مدة الحياة و المقاطع الفعالة

## IV.5.المراحل المختلفة للحساب:

نضع:

$$S_{ed}=\begin{pmatrix} S_{ed1} \\ . \\ . \\ S_{edi} \\ . \\ . \\ S_{edq} \end{pmatrix}; \qquad f_{ed}=\begin{pmatrix} f_{ed1} \\ . \\ . \\ f_{edi} \\ . \\ . \\ f_{edq} \end{pmatrix}; \qquad \Omega=\begin{pmatrix} \Omega_2 \\ \Omega_4 \\ \Omega_6 \end{pmatrix}$$

$$A=\begin{pmatrix} \left\langle \left\| U^{(2)} \right\| \right\rangle_1^2 & \left\langle \left\| U^{(4)} \right\| \right\rangle_1^2 & \left\langle \left\| U^{(6)} \right\| \right\rangle_1^2 \\ . & . & . \\ . & . & . \\ \left\langle \left\| U^{(2)} \right\| \right\rangle_i^2 & \left\langle \left\| U^{(4)} \right\| \right\rangle_i^2 & \left\langle \left\| U^{(6)} \right\| \right\rangle_i^2 \\ . & . & . \\ . & . & . \\ \left\langle \left\| U^{(2)} \right\| \right\rangle_q^2 & \left\langle \left\| U^{(4)} \right\| \right\rangle_q^2 & \left\langle \left\| U^{(6)} \right\| \right\rangle_q^2 \end{pmatrix}$$

حيث $q$ , . . . , $i$, . . . , $1$ : تمثل الانتقال.

$$C=\begin{pmatrix} C_1 & 0 & . & . & . & . & 0 \\ 0 & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & 0 & . & . & . \\ . & . & 0 & C_i & 0 & . & . \\ . & . & . & 0 & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & 0 \\ 0 & . & . & . & . & 0 & C_q \end{pmatrix} = \xi \times \begin{pmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & . & . & . & . & 0 \\ 0 & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & 0 & . & . & . \\ . & . & 0 & \lambda_i^{-1} & 0 & . & . \\ . & . & . & 0 & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & 0 \\ 0 & . & . & . & . & 0 & \lambda_q^{-1} \end{pmatrix} = \xi \times C'$$ و ايضا:

حيث: $$\xi=\frac{8\pi^2 m_e c\left(n^2+2\right)^2}{27hn\left(2J+1\right)}$$

ثم: $$f_{ed}=C\times S_{ed}$$

و: $$S_{ed}=A\times\Omega$$

قيم الوسائط $\Omega$ تعطى بمعادلة المصفوفة التالية

$$\Omega_S=\left(A^T A\right)^{-1}A^T S_{ed}$$

ومع:

$$f_{ed}=C\times S_{ed}\Rightarrow f_{ed}=C\times A\times\Omega=A'\times\Omega$$

$A' = C \times A$ :و

$\Omega_f = \left(A'^T A'\right)^{-1} A'^T f_{ed}$ :وبالتالي

- **جودةالتعديل**

تقيم مدى صحةهذهالوسائطوالتي تعطىبعبارةهاب ـــــــــــ:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (f_{cal} - f_{mes})^2}{q - p}}$$

حيث q هو عدد العصابات الطيفيةالمأخوذة بعين الاعتبارو P هو عدد مجهول في هذه الحالةP يساوي 3

- **احتماليةالانتقالات الإشعاعية**

وسائط جود–اوفلتنحصل عليها بالمقارنة بين قوة الاهتزاز المقاسة $f_{mes}$ والنظرية$f_{calc}$، لحساب القوة الانتقاليين الحالتين$J$ و$J'$نستخدم المعادلة(13.IV). و احتمالية الانتقال الإشعاعي تعطى بالمعادلة

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

حيث $\frac{n\left(n^2+2\right)^2}{9}$ :هو التصحيح الحقل المحلي في الحالة الاساسية $J$و المثارة $J'$، $n$ هي قرينة الانكسار عند الطول الموجي للانتقال و$S_{ed}$ هي القوة الانتقالية لثنائي القطب الكهربائي التي يعبر عنها بالمعادلة(13.IV).

- **نسبة التفرع**

ويمكن الحصول على نسبة التفرع من احتمالية الانتقالالإشعاعية$A_{rad}$ وفق المعادلة التالية:

$$\beta = \frac{A_{rad}(J, J')}{\sum_{J'} A_{rad}(J, J')}$$

- **مدة الحياة الإشعاعية**

مدة الحياة الاشعاعية $\tau_{rad}$ للمستوى J تعطى بالعلاقة

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

- **المقطع الفعال التكاملي للانبعاث**

يستعمل هذا المقدار بشكل خاص من اجل تحديد إمكانية حدوث مفعول الليزر في الزجاج و يعطى بالعلاقة:

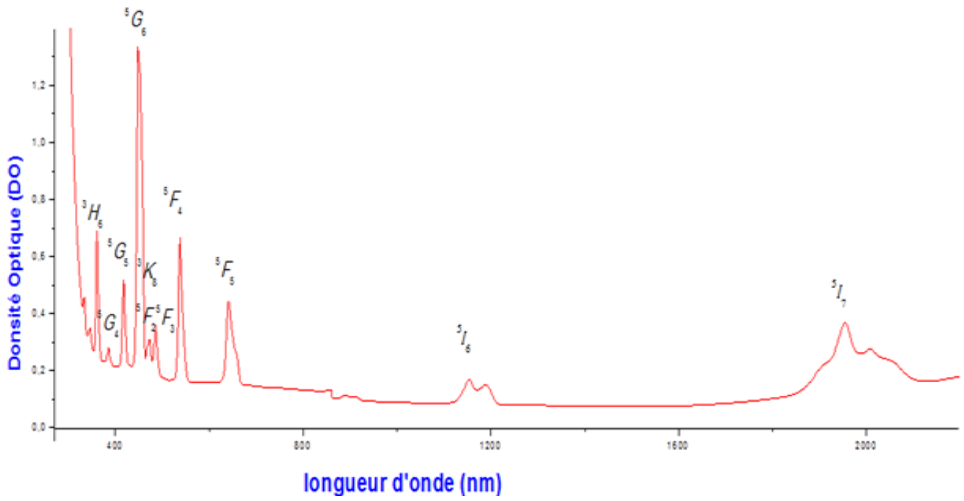
$$\Sigma=\frac{\lambda^2}{8\pi cn^2}.A_{red}\,(J,J')$$

عندما تكون قيمة المقطع الفعال التكاملي للانبعاث قريبةو أكبر من $10^{-20}$ m هذا يعني إمكانية حدوث فعل الليزر[35].

## 6.IV.النتائج و المناقشة

- **طيف الامتصاص**

طيف الامتصاص سجل عند درجة حرارة الغرفة بواسطة مطياف مزدوج الحزمة( Spectrophotomètre UV-Vis Near IR CARY 5G brand)، الذي يشتغل ما بين 3000-200nm،المنحنى المسجل يعطي تغير الكثافة الضوئية (DO) بدلالة الطول الموجي في مجال طيفي واسع انطلاقا من UV(200nm) وصولا الى ما تحت الحمراء القريبة IR-proche (3000nm)، و بدقة طيفية قدرها 2nm.




**الشكل (2.IV)**:طيف الامتصاص للزجاج الهالوجينو–فوسفاتي المطعم بالهوليوم $HO^{+3}$

من خلال الشكل(2.IV)، الذي يوضح طيف الامتصاص $HO^{+3}$، نميزعشرة عصابات امتصاص، وانطلاقا من هذا الطيف يمكننا حساب معاملات الامتصاص و المقاطع الفعالة للامتصاص لكل انتقال، والموضحةفي الجدول التالي:

**الجدول(3.IV)**:الاطوال الموجية و التردد ومعامل الامتصاص و المقاطع الفعال للامتصاص لأيون الهوليوم$HO^{+3}$في الزجاجNPSZH1

| الانتقالات | الطول الموجي ($\lambda$nm) | التردد $\upsilon$( $10^{14}$ $s^{-1}$) | معامل الامتصاص $\alpha$( $cm^{-1}$) | المقاطع الفعالة للامتصاص $\sigma_\alpha(10^{-20}$ $cm^2)$ |
|---|---|---|---|---|
| $^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$ | 1950 | 1,5342 | 113.277 | 7.090 |
| $^5I_8 \rightarrow {}^5I_6$ | 1150 | 2,5978 | 18.895 | 1.182 |
| $^5I_8 \rightarrow {}^5F_5$ | 642 | 4,6696 | 21.119 | 1.321 |
| $^5I_8 \rightarrow {}^5F_4$ | 538 | 5,5723 | 17.287 | 1.081 |
| $^5I_8 \rightarrow {}^5F_3$ | 489 | 6,1685 | 3.957 | 2.476 |
| $^5I_8 \rightarrow {}^5F2, {}^3K_8$ | 474 | 6,3246 | 1.955 | 1.223 |
| $^5I_8 \rightarrow {}^5G_6$ | 448 | 6,6917 | 63.229 | 3.957 |
| $^5I_8 \rightarrow {}^5G_5$ | 418 | 7,1720 | 8.940 | 5.595 |
| $^5I_8 \rightarrow {}^5G_4$ | 386 | 7,7665 | 1.245 | 0.779 |
| $^5I_8 \rightarrow {}^3H_6$ | 360 | 8,3275 | 11.100 | 6.947 |

- **قوى الاهتزاز**

من أجل الحصول على الخصائص الطيفية لأيونات $HO^{+3}$ في الزجاجNPSZH1نطبق نظرية جود– اوفلت،إن عصابات الامتصاص المقاسة تكون مسيطرة عليها الانتقالات ثنائي القطب الكهربائي ، في حين تكون مساهمة ثنائي القطب المغناطيسي ضعيفة، لذا لا تؤخذ بعين الاعتبار [36]، في البدايةنقوم بمكاملة كل عصابة من عصابات الامتصاص ، ونحدد قوى الاهتزاز الموافقة لكل انتقال، قوى الاهتزاز ثنائي القطب الكهربائي المقاسة لكل عصابة امتصاص معطاة في الجدول (3.IV)، تبين قيم RMS وجود توافق جيد بين القيم التجريبية و القيم المحسوبة لقوى الاهتزاز.

الجدول(4.IV):يوضح مقارنة لقيم قوى الاهتزاز المحسوبة مع قيم قوى الاهتزاز التجريبية

| $f_{exp}(\times10^{-6})$ | $f_{cal}(\times10^{-6})$ | الانتقالات |
|---|---|---|
| 1,195 | 1,310 | $^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$ |
| 0,594 | 0,0960 | $^5I_8 \rightarrow {}^5I_6$ |
| 2,373 | 2,580 | $^5I_8 \rightarrow {}^5F_5$ |
| 3,366 | 2,790 | $^5I_8 \rightarrow {}^5F_4$ |
| 0,818 | 1,040 | $^5I_8 \rightarrow {}^5F_3$ |
| 0,525 | 0,650 | $^5I_8 \rightarrow {}^5F2,{}^3K_8$ |
| 12,491 | 12,700 | $^5I_8 \rightarrow {}^5G_6$ |
| 2,3284 | 2,420 | $^5I_8 \rightarrow {}^5G_5$ |
| 0,353 | 0,320 | $^5I_8 \rightarrow {}^5G_4$ |
| 3,471 | 2,370 | $^5I_8 \rightarrow {}^3H_6$ |
| RMS= $0.053\times10^{-6}$ | | |

- **وسائط جود–اوفلت** $\Omega_{2,4,6}$

**الجدول(5.IV)**: يوضح قيم وسائط جود اوفلت$\Omega_{2,4,6}$($10^{-20}cm^2$)لبعض انوع الزجاج المطعم بالهولميوم $Ho^{+3}$

| المرجع | $\Omega_4/\Omega_6$ | $\Omega_6$ | $\Omega_4$ | $\Omega_2$ | الزجاج المطعم ب TR |
|---|---|---|---|---|---|
| العمل الحالي | 1.310 | 1,721 | 2.260 | 3.037 | NPSZH1 |
| **[39]** | 0.74 | 1.70 | 1.27 | 1.65 | NPSZHY 1-0.5 |
| **[38]** | 1.520 | 1.746 | 2.654 | 4.280 | NPH1 |
| **[38]** | 1.072 | 1.312 | 1.407 | 2.442 | NPBH1 |
| **[41]** | 4.93 | 0.61 | 3.01 | 3.33 | الفوسفاتي |
| **[42]** | 1.52 | 2.50 | 3.80 | 2.10 | فليوروفسفاتي |

وسائط جود–اوفلت تكون مرتبطة بالتركيبة البنيوية للزجاج المضيف إلى حد بعيد، ويمكنها إعطاء عدة معلومات تخص الايون الذي تمت إضافته للزجاج، هناك العديد من الدراسات التي حاولت الربط بين وسائط جود–أوفلت مع البنية المحلية للزجاج.

بصفة عامة فان الوسيط $\Omega_2$ مؤشريعبر عن مدى تكافئية الرابطة بين الايون الترابي و الجوار الأقرب، وقد لوحظ أن طبيعة الرابطة بين أيونات العناصر الترابية النادرة و ذرات المادة المضيفة تصبح أكثر تكافئيةكلما انتقلنا من الزجاج الفليوري

$\Omega 2 \approx 2 \times 10^{-20}\text{cm}^2$(أيوني) $\Omega 2 \approx 5.345 \times 10^{-20}\text{cm}^2$(تكافؤي) إلى الزجاج الفوسفاتي

بالنسبة لايون$Ho^{+3}$في دراستنا هذه $\Omega_2 = 3.037 \times 10^{-20}$، هذا يعني ان الرابطة أكثر أيونية، وهي نتيجة تتوافق مع دراسة سابقة لهذا النظام الزجاجي ( NPSZHY 1-0.5 ) لكن في حالة التطعيم الثنائي هولميوم/إيتربيوم [39] حيث كانت قيمة $\Omega_2 = 1.65 \times 10^{-20}$ ـــــ مما يعني أن طبيعة الروابط في هذا النظام تكون أيونية.

من جهة أخرى $\Omega_4$ و $\Omega_6$ تتعلقان بصلابة المادة المضيفة، مثل اللزوجة و ثابت العزل الكهربائي، وتتعلقان أيضا بتأثير الانتقالات الاهتزازية للروابط بين أيونات العناصر الترابية النادرة و الذرات المجاورة في المادة المضيفة.

اعتمادا على نظرية Jacobs–Weber [37]، فإن شدة الانبعاث لأيونات العناصر الترابية النادرة تتعلّقبالوسيطين $\Omega_4$ و $\Omega_6$، وتسمى النسبة $(\Omega_4/\Omega_6)$بمعامل الجودة الطيفية، هذا المعامل مهم جدا للتنبؤ بمدى فعالية الانتقالات الليزرية في المادة المعطاة، قيمة النسبة $(\Omega_4/\Omega_6)$ معطاة في الجدول(5.IV)، بالاعتماد على هذه القيمة يمكن أن يكون هذا الزجاج وسطا ليزريا جيدا.

- **الوسائط الطيفية**

انطلاقا من تعيين وسائط جود –أوفلت، يمكننا التنبّؤ عن طريق الحساب بمختلف الخصائص الطيفية للزجاج NPSZH1 مثل: احتمالية الانتقال الإشعاعية و نسبة التفرع و مدة الحياة الإشعاعية و المقطع الفعال التكاملي، قيم جميع هذه الخصائص معطاة في الجدول (6.IV) بالإضافة إلى قوى الانتقال من المستويات المثارة إلى المستويات الأدنى.

من الجدول ( 7.IV) نلاحظ أن مدة الحياة الإشعاعية للانتقال $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ (2µm~ ) تكون مساوية لـــــــ 17.439ms وقيمة المقطع الفعال التكاملي للانبعاث ، والذي هو مؤشر على حدوث مفعول الليزر ، كانت مساوية: 1.306، مما يدل على أن هذا الزجاج قد يكون مرشحا جيّدا لمفعول الليزر، لكن لا يمكن التحقق من هذا إلا تجريبيا.

**الجدول(6.IV)**:قوى الانتقالواحتمالية الانتقال الإشعاعيةو نسبة التفرع و مدة الحياة الإشعاعية و المقطع الفعال التكاملي لأيون $HO^{+3}$في الزجاجNPSZH1

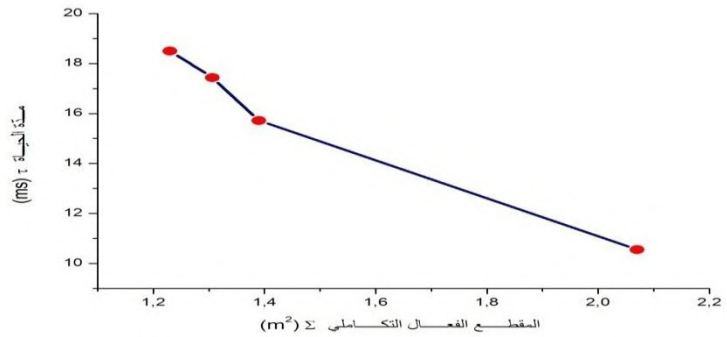
| τ (ms) | Σ ($10^{-20}$ m) | β | $A_{rad}$ ($s^{-1}$) | $S_{ed}10^{-20}$ | λ (nm) | الانتقالات |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 17.439 | 1.306 | 1.000 | 57.340 | 3.000 | 1960 | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ |
| 6.823 | 1.092 | 0.910 | 133.402 | 1.302 | 1175 | $^5I_6 \rightarrow ^5I_8$ |
| | 0.672 | 0.089 | 13.160 | 2.00 | 2934 | $^5I_6 \rightarrow ^5I_7$ |
| 8.143 | 0.237 | 0.403 | 49.580 | 0.183 | 899 | $^5I_5 \rightarrow ^5I_8$ |
| | 1,113 | 0.553 | 67.965 | 1.590 | 1662 | $^5I_5 \rightarrow ^5I_7$ |
| | 0.457 | 0.042 | 5.251 | 1.503 | 3831 | $^5I_5 \rightarrow ^5I_6$ |
| 11.994 | 0.025 | 0.090 | 7.570 | 0.013 | 749 | $^5I_4 \rightarrow ^5I_8$ |
| | 0.326 | 0.449 | 37.481 | 0.277 | 1211 | $^5I_4 \rightarrow ^5I_7$ |
| | 0.836 | 0.397 | 33.110 | 1.212 | 2064 | $^5I_4 \rightarrow ^5I_6$ |
| | 0.617 | 0.062 | 5.206 | 1.940 | 4472 | $^5I_4 \rightarrow ^5I_5$ |
| 0.541 | 3.510 | 0.769 | 1422.203 | 1.943 | 645 | $^5F_5 \rightarrow ^5I_8$ |
| | 1.872 | 0.184 | 341.777 | 1.544 | 961 | $^5F_5 \rightarrow ^5I_7$ |
| | 0.948 | 0.042 | 78.192 | 1.164 | 1430 | $^5F_5 \rightarrow ^5I_6$ |
| | 0.186 | 0.003 | 6.041 | 0.366 | 2282 | $^5F_5 \rightarrow ^5I_5$ |
| | 0.005 | 0.000 | 0.039 | 0.020 | 4658 | $^5F_5 \rightarrow ^5I_4$ |
| 0.498 | 1.854 | 0.534 | 1072.039 | 0.391 | 540 | $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ |
| | 2.422 | 0.365 | 733.685 | 0.705 | 746 | $^5S_2 \rightarrow ^5I_7$ |
| | 0.799 | 0.067 | 134.668 | 0.312 | 1000 | $^5S_2 \rightarrow ^5I_6$ |
| | 0.364 | 0.016 | 33.503 | 0.192 | 1354 | $^5S_2 \rightarrow ^5I_5$ |
| | 0.723 | 0.016 | 32.323 | 0.548 | 1942 | $^5S_2 \rightarrow ^5I_4$ |
| | 0.023 | 0.000 | 0.362 | 0.031 | 3330 | $^5S_2 \rightarrow ^5F_5$ |
| 0.293 | 4.676 | 0.806 | 2743.582 | 1.76 | 536 | $^5F_4 \rightarrow ^5I_8$ |
| | 0.972 | 0.088 | 301.037 | 0.504 | 738 | $^5F_4 \rightarrow ^5I_7$ |
| | 1.267 | 0.064 | 219.747 | 0.877 | 986 | $^5F_4 \rightarrow ^5I_6$ |
| | 1.183 | 0.033 | 113.301 | 1.102 | 1327 | $^5F_4 \rightarrow ^5I_5$ |
| | 0.376 | 0.005 | 17.802 | 0.980 | 1887 | $^5F_4 \rightarrow ^5I_4$ |
| | 0.364 | 0.001 | 6.104 | 0.812 | 3173 | $^5F_4 \rightarrow ^5F_5$ |
| | 0.0008 | 0.000 | 0.000 | 0.041 | 67656 | $^5F_4 \rightarrow ^5S_2$ |

الجدول(**7.IV**): يوضح مقارنة لقيم$A_{rad}$β,τ,Σللانتقال$^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$لأيون الهوليوم$Ho^{+3}$في المركب NPSZH1مع أنواعأخرى من الزجاج

| نوع الزجاج | $A_{rad}$ ($s^{-1}$) | β | Σ ($10^{-20}$ m) | τ (ms) | المرجع |
|---|---|---|---|---|---|
| NPSZH1 | 57.340 | 1.000 | 1.306 | 17.439 | العمل الحالي |
| NPSZHY 1-0.5 | 54.030 | 1.000 | 1.230 | 18.500 | [39] |
| NPH1 | 63.600 | 1.000 | 1.390 | 15.720 | [38] |
| NPBH1 | 94.700 | 1.000 | 2.070 | 10.550 | [38] |

وعلى سبيل المقارنة، أوردنا في الجدول ( **7.IV**) نتائج دراسات سابقة أجريت على عينات من الزجاج الهالوجينوفوسفاتي(كلوروفوسافتي : NPBH1, NPH1، وفليوروفوسفاتي: عملنا الحالي NPSZH1 و NPSZHY1-0.5) مطعّم بالهوليوم ($HoF_3$) خاصة بالانتقال $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$.

نلاحظ عموما أن الزجاج الفليوروفوسفاتي يتميّز بمدة حياة أعلى مقارنة مع الزجاج الكلوروفوسفاتي مصحوبا بمقطع فعال تكاملي أقل، **والشكل** (**3.IV**) يوضح العلاقة بين مدة الحياة والمقطع الفعّال بالاعتماد على نتائج الجدول (**7.IV**).




**الشكل** (**3.IV**): يوضح العلاقة بين مدة الحياة والمقطع الفعّالالتكاملي

## IV.7. خلاصة

قمنا في هذا الفصل بحساب المعاملاتالمرونية المتمثلة في ( المعامل الطولي و الحجمي، معامل يونغ، نسبة بواسون و درجة حرارة ديباي)انطلاقا من نتائج القياس بواسطة تقنية الأمواج فوق الصوتية، و كذلك الوسائط الطيفية (احتمالية الانتقال الإشعاعي، مدة الحياة،...الخ) التي تم الحصول عليها بالقياس التجريبي ، و استخلصنا المقطع الفعال للامتصاص مباشرة من طيف الامتصاص، و تمكننا من حساب وسائط جود اوفلت$\Omega_K$ انطلاقا من طيف الامتصاص و استنادا الى نظرية جود اوفلت.

نتائج الحساب بينت أن الوسائط المرونيةوالطيفية للزجاج محل الدراسة قد تجعل منه مرشحا جيدا من أجل التطبيقات الضوئية الفعالة مثل الليزراتو المضخمات الضوئية.

# الخـــــاتمة العـــــامة

من خلال دراستنا للوسائط المرونية و الطيفية للزجاج الهالوجينو- فوسفاتي المطعم بالهولميوم $Ho^{+3}$ ، كخطوة أولى قمنا بدراسة الزجاج بشكل عام، الذي يعتبر مادة صلبة لا بلوريـــــة تميزها ظاهرة الانتقال الزجاجي، و يمتلك خصائص متنوعة جدا تجعله يدخل في العديد من التطبيقات.

و قمنا ثانية بدراسة الخصائص المرونية للزجاج المطعم بايونات العناصر الترابية النادرة و انتقلنا الى دراسة الخصائص الطيفية لهذه الايونات النادرة لكونها عناصر تلعب دورا مهما في تطبيقات الليزر و المضخمات الضوئية، و ذلك أن لهذه الايونات العديد من الانتقالات الضوئية على مجال واسع من الأطوال الموجية، من الأشعة فوق البنفسجية إلى ما تحت الحمراء.

و سمحت لنا الدراسة المرونية و الطيفية للزجاج المطعم بايونات العناصر الترابية النادرة بمعرفة أن الزجاج مرشح جيد لاستضافة هذه الايونات النشيطة.

و قمنا بحساب قيم مختلف المعاملات المرونية (المعامل الطولي، العرضي، معامل يونغ، نسبة بواسون و درجة حرارة ديباي)، و تطرقنا لطريقة الأمواج فوق الصوتية لحساب هذه المعاملات .

و بالاستعانة بنموذج جود أوفلت "Judd-Ofelt" لحساب مختلف الوسائط الطيفية ( احتمالية الانتقال الإشعاعي و مدة الحية و المقطع الفعال للامتصاص)، تبين لنا ان هذه الوسائط لها علاقة بتركيبة الزجاج و يمكنها أن تعطينا معلومات مهمة عن الايون الذي تم إضافته للزجاج، كما تم أيضا تحديد وسائط جود أوفلت $\Omega_K$ ، التي تميز الثنائية (لمادة مضيفة- ايون التطعيم)، و من خلال تحليل النتائج وجدنا أن الوسيط $\Omega_2$ الذي يعطي القيمة $2.260 \times 10^{-20} cm^2$ يمكننا من معرفة نوع الرابطة مما يبين أن ايون $Ho^{+3}$ يشكل رابطة تكافؤية مع الجوار الأقرب، أما النسبة $(\Omega 4/\Omega 6 = 1.310)$ تسمى معامل الجودة الطيفية، هذا المعامل يعبر عن شدة الانبعاث لايونات العناص ر الترابية النادرة و هو مهم جدا للتنبؤ بمدى فعالية الانتقالات الليزرية في المادة المعطاة، وكذلك قمنا بحساب المقطع الفعال التكاملي $\Sigma$ في الزجاج محل الدراسة و هو مؤشر على مدى حدوث مفعول الليزر، لكن لا يمكن التحقق من هذا إلا تجريبيا.

و قمنا بمقارنة نتائجنا مع نتائج أخرى منشورة، فكانت القيم المتحصل عليها جد مرضية.

و من خلال النتائج المتحصل عليها تبين أن هذا الزجاج يمتلك خصائص مرونية و طيفية تسمح له بان يكون مرشحا جيدا لتطبيقات الليزر و المضخمات الضوئية.

# المراجع

[1] Azzedine Ayadi,"Technologie du verre", office des publication-Universitaires, Alger, 2004.

[2]الأستاذ غوقالي مبروك و بن حميدة سفيان "كتاب مدخل إلي فيزياء الحالة الصلبة "الجزء الأول، مطبعة مزوار الجزائر.

[3] M. Hamzaou, "Verres d'oxydes lourds a base de Sb2O3, exploration, caractérisation physico-chimiques et application a l'amplification optique ", Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 2013

[4] Claude Parent et Josik Portier, « Matériaux non-cristallins- Modèles, propriétés », université de Bordaux.

[5] To Thi Thao, Etude par dynamique moléculaire de spectres vibrationnels de verres de silice, Thèse de doctorat, Université de Lille (2007), pp 34-43.

[6] N. EL Jouhari, Les cristaux ioniques, Université Mohammed V-Agdal, p144, (2007).

[7] F.Rehouma, "Etude de l'échange d'ions à l'argent dans un verre aluminoborosilicate: Application a un procède d'enterrage sélectif des guide", Thèse de doctorat, Institut National de Grenoble 1994.

[8]غوقالي مبروك " نمذجة ومحاكاة ظاهرة التبادل الأيوني في الزجاج السيليكاتي القلوي " مذكرة ماجستير، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، (2005).

[9]Virginie Moizan,"Étude de l'amplification laser en bande II dans les fibres de verres chalcogénures", thèse de doctorat, Université Rennes I, 2008.

[10] Jon Rifkin, XMD - Molecular Dynamics Program, University of Connecticut, 18 Feb 2011.

[11] د.جواد كاظم الخفاجي، د.سلوى القاسم، د.محي رسول حمود، د.عماد الرجيلي، د.محمد المهداوي، الكيمياء الصناعية، جامعة بغداد،بيت الحكمة، (1988).

[12] آل آدم، كوركيس عبد، حسن علي،" تكنولوجيا و كيمياء البوليميرات" ، جامعة البصرة، كلية العلوم، (1985).

[13] W.H.Wang, "The elastic properties, elastic model and elastic perspectives of metallicglasses", Prog Mater Sci (2011) ,

[14] H.Slimani, "Elaboration, mesure mecanique et elastique des verres", mémoire de master, université Med khider-Biskre , (2013)

[15] H.Guezzoun, "Etude physic-chimique et spectroscopique de l'ion de cobalt dans les verres", mémoire de magister, université Kasdi merbah-ouargla, (2012)

[16] H.Jaafer, "Effects of fibers on damping behaviors of composites materials", universty Irak of Technology, department of Applied Sciences, (2010)

[17] د.هند مرعي، "استخدام طريقة الامواج فوق الصوتية المولدة بواسطة الليزر في الاختبارات اللاتلافية"، جامعة دمشق- سوريا، المعهد العالي للعلوم التطبيقية، (2009).

[18] M.Baazouzi, "Elaboration et caractérisation des verres d'oxydes à indice de refraction complexe pour application dans l'optique non linéaire", Thése de doctorat, université Med khider-Biskra , (2014)

[19] Tanguy ROUXEL, "Designing glasses to meet specific mechanical properties", LARMAUR, FRE-CNRS 2717, Université de Rennes 1

[20] Alombert-Goget," Spectroscopies et modélisation de verres de silice dopés d'ions de terre rare - influence du co-dopage" ,thèse de doctorat, 2007

[21] Bentouila Omar, "Etude de l'effet des terres rares Applications: laser et amplificateurs optique", Mémoire de magistère, Ouargla, Algérie, (2005).

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

[23] Y. Jestin ، "Verres fluorés à base de fluoroindate et fluorogallate pour I'amplification optique : fibres à forte ouverture numérique, guides d'onde planaires et spectroscopie des ions de terre rare". these de doctorat. 2002.

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

[25] محمد الكوسا، " فيزياء الليزر وتطبيقاته"، جامعة دمشق، كلية العلوم، 1426هـ-2006م

[26] O. Peron, "Guides d'ondes planaires en verre et vitrocéramique fluorés ", thèse de doctorat, Université du Maine, (2007).

[27]د.سعود بن حميد اللحياني، "الليزر و تطبيقاته"، كلية العلوم، جامعة ام القرى، كلية العلوم التطبيقية شعبة الفيزياء الطبية.

[28] M. El Jouad. Modélisation et Spectroscopie des Vitrocéramiques Fluorées dopés par des Ions de Terres Rares pour Applications en Amplification dans l'Infrarouge. Physics. Université d'Angers, 2010. French.

[29] T.Wächtler, Conception of an integrated optical waveguide amplifier, Project report, Technische Universität Chemnitz, (2002).

[30] H. Haquin, "Verres et guides d'onde de fluorozirconates dopés $Er^{+3}$ ou $Tm^{+3}$- Application a l'amplification optique-", thèse de doctorat, Université de Rennes I, (2003).

[31] عدي عطاء حمادي،"أساسيات الليزر و تقنياته"، 1425ه-2004م

[32]صالح مصطفى الاتروشي و رياض وديع يوسف، "الليزر اسس و استخدامات"، الطبعة الاولى 1426هـ 2008م، دار دجلة عمان.

[33] R. Fartas, " synthése et etude spectroscopique des matériaux solides dopes aux ion de terres rares, thèse de doctorat, université Badji Mokhtar-Annaba, (2004).

[34] 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).

[35] P. R. Watekar, S. Ju, Won-Taek Han, Optical properties of Ho-doped alumino – germano-silica glass optical fiber, Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 354, pp 1453–1459, (2008).

[36] N. Sooraj Hussain, N. Ali, A.G. Dias, M.A. Lopes, J.D. Santos, S. Buddhudu, Absorption and emission properties of Ho+3 doped lead–zinc–borate glasses, Thin Solid Films, vol. 515 , pp 318– 325, (2006)

[37] R. R. Jacobs, M. J. Weber, Dependence of the 4F3/2 → 4I11/2 Induced-Emission Cross Section for Nd3+ on Glass Composition, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 12, pp. 2, ( 1976).

[38] O. Bentouila, K. Eddine Aiadi, F. Rehouma, M. Poulain, Spectroscopic studies of rare earth-doped halogeno-phosphate glasses, Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials, Vol. 15, pp 1204 – 1208, (2013).

[39] شقوري حياة، "الخصائص الطيفية لزجاج فليوروفوسفاتي ثنائي لتطعيم$Yb^{+3}/Ho^{+3}$"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، (2014).

[40] مدخل آمنة،"دراسة طيفية لزجاج هالوجينو-فوسفاتي مطعم بالاربيوم($Er^{+3}$)"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، (2014).

[41] Chengguo Ming , Feng Song , Jing Hou , Yin Yu , Gong Zhang , Hua Yu ,Tongqing Sun , Jianguo Tian," Single color upconversion emission in Ho+3 / Yb+3 and Tm+3 /Ho+3 doped P2O5–MgO2–Sb2O3–MnO2–AgO glasses",Optics Communications, vol.**284**,pp 3304–3307, 2011.

[42] T. Suhasini , B.C.Jamalaiah , T.Chengaiah , J.SureshKumar , L.Rama Moorthy, "An investigation on visib le luminescence of Ho+3 activated LBTAFglasses",Physica B vol .**407**,pp,523–527, 2012.

# الملحق

- قيم الثوابت المستعملة

| | |
|---|---|
| ثابت بلانك | $h = 6.626 \times 10^{-34} Js$ |
| شحنة الالكترون | $e = 4.8 \times 10^{-10} u.e.s$ |
| ثابت بولتزمان | $K = 1.381 \times 10^{-23} JK - 1$ |
| كتلة الالكترون | $me = 9.1091 \times 10^{-31} Kg$ |
| سرعة الضوء في الفراغ | $c = 2.998 \times 10^{8} ms - 1$ |

- التوزيع الالكتروني و الايوني للعناصر الترابية النادرة ورموزها الطيفية لمستوياتها الاساسية ممثلة في الجدول التالي:

| العدد الذري Z | العنصر | رمز العنصر | التوزيع الالكتروني | التوزيع الايوني | الرمز الطيفي |
|---|---|---|---|---|---|
| 57 | لانثانيوم | *La* | $[Xe]\ 5d^1 6s^2$ | $[Xe]$ | $^1S_0$ |
| 58 | سيريوم | *Ce* | $[Xe]4f^2 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^1$ | $^2F_{5/2}$ |
| 59 | براسيوديميوم | *Pr* | $[Xe]4f^3 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^2$ | $^3H_4$ |
| 60 | نيوديوم | *Nd* | $[Xe]4f^4 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^3$ | $^4I_{9/2}$ |
| 61 | بروميثيوم | *Pm* | $[Xe]4f^5 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^4$ | $^5I_4$ |
| 62 | ساماريوم | *Sm* | $[Xe]4f^6 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^5$ | $^6H_{5/2}$ |
| 63 | يوروبيوم | *Eu* | $[Xe]4f75d06s2$ | $[Xe]4f^6$ | $^7F_0$ |
| 64 | جادولينيوم | *Gd* | $[Xe]4f^7 5d^1 6s^2$ | $[Xe]4f^7$ | $^8S_{7/2}$ |
| 65 | تربيوم | *Tb* | $[Xe]4f^9 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^8$ | $^7F_6$ |
| 66 | ديسبروسيوم | *Dy* | $[Xe]4f^{10} 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^9$ | $^6H_{15/2}$ |
| 67 | هوليوم | *Ho* | $[Xe]4f^{11} 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^{10}$ | $^5I_8$ |
| 68 | إربيوم | *Er* | $[Xe]4f^{12} 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^{11}$ | $^4I_{15/2}$ |
| 69 | ثوليوم | *Tm* | $[Xe]4f^{13} 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^{12}$ | $^3H_6$ |
| 70 | إيتربيوم | *Yb* | $[Xe]4f^{14} 5d^0 6s^2$ | $[Xe]4f^{13}$ | $^2F_{7/2}$ |
| 71 | لوتيتيوم | *Lu* | $[Xe]4f^{14} 5d^1 6s^2$ | $[Xe]4f^{14}$ | $^1S_0$ |

- عناصر مربع مصفوفة الاختزال لأيون الهولميوم $Ho^{+3}$ في المركب NPSZH

| SLJ | S'L'J' | $\|U^2\|^2$ | $\|U^4\|^2$ | $\|U^6\|^2$ | SLJ | S'L'J' | $\|U^2\|^2$ | $\|U^4\|^2$ | $\|U^6\|^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $^5I_8$ | $^3H_6(4)$ | 0.2335 | 0.1299 | 0.0019 | $^5F_4$ | $^5S_2$ | 0.0001 | 0.0167 | 0.0035 |
| | $^5G_4$ | 0.0000 | 0.0388 | 0.0339 | | $^5F_5$ | 0.2001 | 0.0919 | 0.0075 |
| | $^5G_5$ | 0.0000 | 0.5257 | 0.0000 | | $^5I_4$ | 0.0002 | 0.0237 | 0.2585 |
| | $^5G_6$ | 1.5048 | 0.8315 | 0.1397 | | $^5I_5$ | 0.0016 | 0.1327 | 0.4651 |
| | $^3K_8(2)$ | 0.0206 | 0.0307 | 0.1533 | | $^5I_6$ | 0.0011 | 0.2576 | 0.1721 |
| | $^5F_2$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.2092 | | $^5I_7$ | 0.0000 | 0.1960 | 0.0322 |
| | $^5F_3$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.3465 | | $^5I_8$ | 0.0000 | 0.2421 | 0.7087 |
| | $^5F_4$ | 0.0000 | 0.2421 | 0.7087 | | | | | |
| | $^5F_5$ | 0.0000 | 0.4241 | 0.5698 | $^5S_2$ | $^5F_5$ | 0.0000 | 0.0131 | 0.0058 |
| | $^5I_6$ | 0.0086 | 0.0387 | 0.6916 | | $^5I_4$ | 0.0015 | 0.0325 | 0.0285 |
| | $^5I_7$ | 0.0250 | 0.1348 | 1.5242 | | $^5I_5$ | 0.0000 | 0.0057 | 0.0932 |
| | | | | | | $^5I_6$ | 0.0000 | 0.0248 | 0.1421 |
| $^5G_5$ | $^5F_1$ | 0.0000 | 0.0070 | 0.0566 | | $^5I_7$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.4208 |
| | $^5G_6$ | 0.0568 | 0.2598 | 0.2500 | | $^5I_8$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.2091 |
| | $^3K_8(2)$ | 0.0000 | 0.0081 | 0.0009 | | | | | |
| | $^5F_2$ | 0.0000 | 0.1494 | 0.0118 | $^5F_5$ | $^5I_4$ | 0.0001 | 0.0060 | 0.0040 |
| | $^5F_3$ | 0.1868 | 0.1031 | 0.0331 | | $^5I_5$ | 0.0068 | 0.0279 | 0.1637 |
| | $^5F_4$ | 0.2867 | 0.0236 | 0.1429 | | $^5I_6$ | 0.0112 | 0.1242 | 0.4960 |
| | $^5S_2$ | 0.0000 | 0.1100 | 0.0006 | | $^5I_7$ | 0.0190 | 0.3318 | 0.4346 |
| | $^5F_5$ | 0.3494 | 0.0385 | 0.1183 | | $^5I_8$ | 0.0000 | 0.4241 | 0.5698 |
| | $^5I_4$ | 0.0000 | 0.0094 | 0.0421 | | | | | |
| | $^5I_5$ | 0.0034 | 0.0662 | 0.0576 | $^5I_4$ | $^5I_5$ | 0.0313 | 0.1239 | 0.9120 |
| | $^5I_6$ | 0.1329 | 0.1768 | 0.0791 | | $^5I_6$ | 0.0023 | 0.0283 | 0.6638 |
| | $^5I_7$ | 0.5889 | 0.0273 | 0.1133 | | $^5I_7$ | 0.0000 | 0.0033 | 0.1566 |
| | $^5I_8$ | 0.0000 | 0.5257 | 0.0000 | | $^5I_8$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.0078 |
| $^5F_3$ | $^5F_4$ | 0.0969 | 0.0313 | 0.0957 | $^5I_5$ | $^5I_6$ | 0.0437 | 0.1702 | 0.5750 |
| | $^5S_2$ | 0.0070 | 0.0001 | 0.0000 | | $^5I_7$ | 0.0028 | 0.0228 | 0.8872 |
| | $^5F_5$ | 0.0397 | 0.0807 | 0.0846 | | $^5I_8$ | 0.0000 | 0.0098 | 0.0939 |
| | $^5I_4$ | 0.0002 | 0.0982 | 0.3953 | | | | | |
| | $^5I_5$ | 0.0000 | 0.2185 | 0.0179 | $^5I_6$ | $^5I_7$ | 0.0316 | 0.1330 | 0.9310 |
| | $^5I_6$ | 0.0000 | 0.0892 | 0.2167 | | $^5I_8$ | 0.0086 | 0.0387 | 0.6916 |
| | $^5I_7$ | 0.0000 | 0.2472 | 0.2275 | | | | | |
| | $^5I_8$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.3465 | $^5I_7$ | $^5I_8$ | 0.0250 | 0.1348 | 1.5242 |

| Transition | $\| U^{(2)} \|^2$ | $\| U^{(4)} \|^2$ | $\| U^{(6)} \|^2$ |
|---|---|---|---|
| $^5F_4 \rightarrow {}^5S_2$ | 0.0000 | 0.0159 | 0.0033 |
| $^5F_4 \rightarrow {}^5F_5$ | 0.1944 | 0.0923 | 0.0080 |
| $^5F_4 \rightarrow {}^5I_4$ | 0.0001 | 0.0234 | 0.2587 |
| $^5F_4 \rightarrow {}^5I_5$ | 0.0018 | 0.1314 | 0.4655 |
| $^5F_4 \rightarrow {}^5I_6$ | 0.0012 | 0.2580 | 0.1697 |
| $^5F_4 \rightarrow {}^5I_7$ | 0.0000 | 0.1988 | 0.0324 |
| $^5F_4 \rightarrow {}^5I_8$ | 0.0000 | 0.2402 | 0.7079 |
| $^5S_2 \rightarrow {}^5F_5$ | 0.0000 | 0.0110 | 0.0036 |
| $^5S_2 \rightarrow {}^5I_4$ | 0.0013 | 0.0279 | 0.2795 |
| $^5S_2 \rightarrow {}^5I_5$ | 0.0000 | 0.0043 | 0.1062 |
| $^5S_2 \rightarrow {}^5I_6$ | 0.0000 | 0.0206 | 0.1541 |
| $^5S_2 \rightarrow {}^5I_7$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.4096 |
| $^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.2270 |
| $^5F_5 \rightarrow {}^5I_4$ | 0.0001 | 0.0059 | 0.0040 |
| $^5F_5 \rightarrow {}^5I_5$ | 0.0068 | 0.0271 | 0.1649 |
| $^5F_5 \rightarrow {}^5I_6$ | 0.0102 | 0.1213 | 0.4995 |
| $^5F_5 \rightarrow {}^5I_7$ | 0.0177 | 0.3298 | 0.4340 |
| $^5F_5 \rightarrow {}^5I_8$ | 0.0000 | 0.4277 | 0.5686 |
| $^5I_4 \rightarrow {}^5I_5$ | 0.0312 | 0.1237 | 0.9099 |
| $^5I_4 \rightarrow {}^5I_6$ | 0.0022 | 0.0281 | 0.6640 |
| $^5I_4 \rightarrow {}^5I_7$ | 0.0000 | 0.0033 | 0.1568 |
| $^5I_4 \rightarrow {}^5I_8$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 |
| $^5I_5 \rightarrow {}^5I_6$ | 0.0438 | 0.1705 | 0.5729 |
| $^5I_5 \rightarrow {}^5I_7$ | 0.0027 | 0.0226 | 0.8887 |
| $^5I_5 \rightarrow {}^5I_8$ | 0.0000 | 0.0099 | 0.0936 |
| $^5I_6 \rightarrow {}^5I_7$ | 0.0319 | 0.1336 | 0.9308 |
| $^5I_6 \rightarrow {}^5I_8$ | 0.0083 | 0.0383 | 0.6918 |
| $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ | 0.0249 | 0.1344 | 1.5217 |

## الملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الخصائص المرونية و الطيفية لزجاج مطعم بالهولمي $Ho^{+3}$ ذي التركيبة $79NaPO_3–10SrF_2–10ZnF_2 – HoF_3$. أنجزت هذه الدراسة في جزئين، جزء يضم حوصلة عامة حول الزجاج المطعم بالعناصر الترابية النادرة ودراسة اهم خصائصه الميكانيكية. أما الجزء الثاني خصص لتعيين المعاملات المرونية اعتمادا على طريقة الأمواج فوق الصوتية، و كذلك حساب الوسائط الطيفية استنادا إلى نظرية جود أوفلت "Judd–Ofelt" و



## Rrésumé:

Le but de ce travail est l'étude des propriétés élastiques et spectroscopiques d'un verre dopé $Ho^{+3}$avec la composition molaire : 79 $NaPO_3$ -10 $SrF_2$ -10$ZnF_2$- $HoF_3$. Cette étude est réalisée en deux parties, une section qui assemble des notions sur les verres dopés terres rares et l'étude ainsi que ses propriétés mécaniques intéressantes, et l'autre section ultrasonique , et est Alloué pour désigner les modules élastiques Selon la méthode de ainsi calcul les paramètres spectroscopiques basé sur la théorie de "Judd-Ofelt" Les résultats de cette étude montrent que ce verre possède des propriétés élastiques et spectroscopiques comparables avec celles autres verres. A la base de ces résultats, ce verre peut être utilisé dans les applications optiques actives telles que les lasers et les amplificateurs optiques



**Mots clés:** Holmium, Verre dopé, les modules élastiques, Terre rare, Théorie de Judd-Ofelt, les paramètres spectroscopiques



## :Rrésumé

The aim of this work is the study of the elastic properties and spectroscopic a glass doped with $Ho^{+3}$ molar composition: 79 $NaPO_3$ -10 $SrF_2$ -10$ZnF_2$- $HoF_3$. This study was conducted in two parts, a section which assembles notions on glasses doped rare earth and the study and its advantageous mechanical properties, and the other section is assigned to designate the elastic moduli According to the ultrasonic method, and and calculating the spectroscopic parameters based on the theory of "Judd-Ofelt" The results of this study show that this glass has elastic and spectroscopic properties comparable with other glasses. At the base of these results, this glass can be used in the active optical applications such as lasers and optical amplifiers



**Keywords:** Holmium Glass doped, elastic moduli, Rare Earth, Theory Judd-Ofelt, spectroscopic parameters