



712 / -
2007

-

Cr⁴⁺:YAG

712 / -

عنوان التقرير: الحسابات العددية لعمليات الامتصاص والإصدار في البلورة اللاخطية المستقطبة $Cr^{4+}:YAG$ المضخوخة بليزر نيودميوم-زجاج.
أسماء وعناوين معدي التقرير: 1. د. بشار عبد الغني – قسم الخدمات العلمية.
2. مصطفى حمادي – قسم الفيزياء.

الخلاصة:

تم في هذا العمل تطوير نموذج رياضي يصف عملية الإصدار الديناميكي في البلورة $Cr^{4+}:YAG$ المتوضعة بداخل التجويف الليزري كماص قابل للإشباع صلب مستقطب. تلعب البلورة $Cr^{4+}:YAG$ دور أداة لمفتاح الجودة المنفعل و عمليات الليزر $1.062 \mu m, 1.4 \mu m$ بنتيجة ضخها بنبضتين. يصف النموذج السلوك الزمني للتفاعل المتبادل بين نبضة ليزر الضخ مع حالة الاستقطاب المتغيرة والماص المستقطب.

الكلمات المفتاحية:

نمذجة؛ إصدار ديناميكي؛ البلورة المستقطبة $Cr^{4+}:YAG$ ؛ نيودميوم-زجاج.

=====

عنوان التقرير:

Numerical calculations of the absorption and oscillation processes in the nonlinear polarized crystal $Cr^{4+}:YAG$ pumped by Nd-glass laser.

أسماء وعناوين معدي التقرير:

1. Bashar Abdul Ghani – Scientific Services Department
2. Mustafa Hammadi – Physics Department

الخلاصة:

A mathematical model describing the dynamic emission of intracavity isotropic $Cr^{4+}:YAG$ polarized solid-state saturable absorber as a tool of dual Q-switching and lasing processes $1.06 \mu m$ and $1.4 \mu m$ by double pumping pulse has been developed. This model describes the time evolution of interaction between the pumping laser pulse with a changed polarization state and the polarized absorber.

الكلمات المفتاحية:

Modeling; Dynamic emission; polarized $Cr^{4+}:YAG$ crystal; Nd- glass

المحتويات

3	.....	1- الخلاصة
4	.....	2- المقدمة
5	.....	3- النموذج الرياضي
5	.....	1-3 وسط منبع الضخ
8	.....	2-3 وسط الماص الصلب القابل للإشباع
10	.....	4- الحلول العددية لمعادلات المعدل
11	.....	5- النتائج والمناقشة
12	.....	6- الخاتمة
13	.....	7- كلمة شكر
13	.....	8- المراجع
15	.....	9- الأشكال والجداول

1- الخلاصة:

تم في هذا العمل تطوير نموذج رياضي يصف عملية الإصدار الديناميكي في البلورة $Cr^{4+}:YAG$ المتوضعة بداخل التجويف الليزري كماص قابل للإشباع صلب مستقطب. تلعب البلورة $Cr^{4+}:YAG$ دور أداة لمفتاح الجودة المنفعل و دور ليزر نبضي من ناحية أخرى. وبالتالي تقود إلى وجود عمليتي الإصدار الليزري $1.4 \mu m, 1.062 \mu m$ بنتيجة ضخها بنبضتين خلال مجال زمني محدد. كي يتمكن من وصف السلوك الزمني لجملة ليزر مع حالة استقطاب متغيرة - ماص قابل للإشباع مستقطب نأخذ بالحسبان التفاعل المتبادل بين فوتونات النبضة الليزرية ذات حالة الاستقطاب المتغيرة والماص القابل للإشباع المستقطب $Cr^{4+}:YAG$ لترابط توجهات عزوم ثنائي القطب الكهربائي للمراكز الفعالة Cr^{4+} .

يفترض النموذج المقترح أن المراكز الفعالة (الأيونات) Cr^{4+} مع ثنائيات القطب الموجهة المثارة إلى السوية الأعلى من سوية الامتصاص الأساسية يمكن أن تسترخي مباشرة إلى السوية الليزرية العليا من خلال تفاعل القناة السريعة وبشكل غير مباشر من خلال تفاعل قناة بطيئة وسيطة مفترضة بأعمار حياة مختلفة.

يقدم النموذج المقترح آلية بسيطة لدراسة حركية الليزرات النبضية ودراسة تأثير تغيرات وسائط الدخل الليزري مثل استطاعة الضخ (معدل الضخ ومعامل التضخيم الأعظمي ومعامل الضياع)، تركيز الأيونات Cr^{4+} في البلورة $Cr^{4+}:YAG$ وخصوصاً تأثير ظاهرة عدم التناحي اللاخطي للامتصاص عند الإشباع كنتيجة لتأثير تغير زاوية دوران البلورة المتناحية $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة حول محور التجويف على نبضات الخرج لليزر نيودميوم-زجاج مع مفتاح جودة منفعل وليزر $Cr^{4+}:YAG$ النبضي. يخمن النموذج المقترح السلوك الزمني لانقلاب الإسكان النسبي لليزر الضخ نيودميوم- زجاج وكثافات إسكان السويات المستقطبة المختلفة وكثافات النبضات الليزرية لليزر الضخ والليزر النبضي بنتيجة تأثير ظاهرة عدم التناحي اللاخطي لامتصاص الإشباع وبوجود مقطب جزئي. يمكن تحليل استقرار جملة ثنائي مفتاح الجودة بوساطة الحلول العددية لجملة معادلات المعدل في حالة الاستقرار.

2- المقدمة

استثمرت البلورة $Cr^{4+}:YAG$ على نطاق واسع كماص قابل للإشباع من أجل مفتاح الجودة عند الليزر الصلبة. ويعود هذا إلى خواصها التي تتعلق بشكل رئيسي بالمميزات الحرارية - الميكانيكية والمقطع العرضي الكبير للامتصاص بالقرب من طول الموجة $1.062 \mu m$ والتركيز العالي نسبياً وعمر حياة السوية المثارة الطويل كفاية (لكي يتحقق الاستنزاف التام للسوية الأرضية) وتدقق إشباع منخفض نسبياً. تعتبر هذه الخواص هامة بشكل خاص عندما يطلب إصدار ليزر عالي استطاعة ومعدل تكرار عال. من ناحية أخرى، تعتبر الليزرات القابلة للتوليف في منطقة الطيف تحت الأحمر $(1.6-1.35) \mu m$ هامة من أجل التطبيقات في حساسات التحكم ومجال حماية العين والاتصالات [2,1].

يعود استثمار البلورة $Cr^{4+}:YAG$ عملياً كمفتاح جودة عند ليزرات النيودميوم إلى عملية الابيضاض والمميزات الضوئية الحرارية لهذه البلورة وإلى عدم التناحي اللاخطي لعملية امتصاص عند الإشباع. درس مبكراً تأثير ظاهرة عدم التناحي على جملة مفتاح الجودة لليزر الصلبة والليزر النبضي $Cr^{4+}:YAG$ وعلى عملية توليد المدرج الثاني في [3,2]. وبسبب عرض عصابة التضخيم الواسع فان عملية التوازن بين التضخيم وعدم التناحي في امتصاص عند الإشباع تقود إلى التنوع في أنظمة التشغيل.

درست ظاهرة عدم التناحي اللاخطي لامتصاص الإشباع للأيونات Cr^{4+} في بلورة متناحية مطعمة ضوئياً في المراجع [4-6]. تم إيضاح أن انتشار النبضات القصيرة مع طول موجة (فترة النبضة أقصر من عمر حياة السوية المثارة للمراكز Cr^{4+}) من المرتبة $1 \mu m$ في بلورة متناحية ضوئياً للعقيق الأحمر المضيف يؤدي إلى زيادة في الامتصاص اللاخطي اللامتناحي المحرض ذاتياً في مجال امتصاص الإشباع مع أن عدم التناحي المحرض يزول بشكل عملي عندما تكون طاقة إشعاع السبر عالية أي في مجال امتصاص الإشباع الكامل. يمكن انجاز وصف هذه الظاهرة ضمن إطار نموذج الامتصاص الخطي لثنائيات الأقطاب الموجهة على طول محاور البلورة للمادة المضيئة [7,8].

تُمتص نبضات الضخ المتولدة ذات حالة الاستقطاب المتغيرة والمحدد بتابع ضمني للزمن (الشكل 1a) بوساطة ليزرات النيودميوم في البلورة $Cr^{4+}:YAG$ المتناحية. تحصل الانتقالات بنتيجة

الامتصاص من الحالة الأساسية والحالة المثارة العليا بالأيونات Cr^{4+} ذات العزوم ثنائيات الأقطاب الموجهة إلى السوية المثارة الأعلى. يتعلق اتجاه استقطاب النبضة العملاقة المتولدة بعملية التوجيه الزاوي للبلورة $Cr^{4+}:YAG$ بداخل المجاوب الليزري الفعال التي تحدد ما يسمى بعدم التناحي اللاخطي في عملية الامتصاص. لذلك نختار المحور [001] باتجاه مواز للمحور الضوئي للحزمة الليزرية ذات حالة الاستقطاب المتغيرة والمحورين الآخرين للماص المعتبر [100] و [010] موجهين بالنسبة للمحور الضوئي z بالزاويتين θ و $\theta + \pi/2$ على التوالي (الشكل 1b) أي في المستوي العمودي (x-y). بتعبير آخر تشكل المراكز الفعالة ثلاث زمر متعامدة لثنائيات الأقطاب الموجهة على طول محاور البلورة للمادة المضيفة مع بنية بلورية. لذا فإن تدوير مفتاح الجودة حول المحور الضوئي للتجوير الليزري يغير اتجاه محور مفتاح الجودة بالنسبة لمستوي استقطاب الإشعاع المتولد في عنصر الاستقطاب. تم اختيار التوجيه المفترض للمحاور x و y كي تكون الضياعات الكلية العائدة إلى وجود المقطب الجزئي في قيمتها الدنيا على المحور x وفي قيمتها العظمى على المحور y. يكون المقطب الجزئي على شكل صفيحة زجاجية تشكل زاوية β مع المحور العمودي على المحور الطولي أو الضوئي للتجوير الليزري (يصح الضوء غير المستقطب مستقطباً جزئياً عند انعكاسه على صفيحة زجاجية). تصف هذه الزاوية عدم التناحي الخطي للتجوير الليزري، حيث يعود عدم التناحي الخطي هذا في التجوير إلى التوجيه النوعي لمحاور البلورة $Cr^{4+}:YAG$. بينما يعود عدم التناحي اللاخطي إلى عدم التناحي اللاطي (عدم التناحي الذاتي المحرض في مفتاح الجودة السلبى) لخاصة إشباع الحالة الصلبة المستقطب ويحدد بالزاوية θ [9,8,1].

يمكن تحقيق الضخ المزدوج كما يلي: بفرض أن الحالة الأساسية تكون ظاهرياً مستقطبة بشكل تام على أحد المحاور، حيث يقود اعتبار حالة الاستقطاب المتغيرة (زاوية الاستقطاب تابع للزمن) أو الأوضاع النسبية لتوجهات عزوم ثنائيات الأقطاب إلى الصورة التالية:

ترفع نبضة الضخ الأولى ذات حالة الاستقطاب المتغيرة المركز الفعالة Cr^{4+} مع توجهات لعزوم ثنائيات الأقطاب من السوية الليزرية الدنيا A_2^3 بنتيجة عملية الامتصاص إلى السوية الليزرية العليا T_2^3 وترفع أيضاً هذه النبضة، بسبب الأوضاع النسبية لتوجهات عزوم ثنائية الأقطاب، الأيونات ذات التوجهات العكسية لتوجهاتها في السوية الأرضية (بعد قلب اتجاه الحقل الكهربائي أو بعد تدوير الصفيحة ربع الموجة بزاوية 90°) من السوية الليزرية العليا إلى السوية المثارة الأعلى T_1^3 أيضاً بنتيجة عملية الامتصاص عند طول الموجة 1062 ns ويتكرر ذلك من أجل نبضة الضخ الثانية. يعود جزء من الأيونات المنتقل إلى السوية الليزرية العليا T_2^3 بتأثير نبضة الضخ الأولى إلى السوية الأرضية A_2^3 مع التوجهات الأولية لعزوم ثنائيات الأقطاب من السوية الليزرية العليا بسبب عمليات الامتصاص وإصدار الإشعاع التلقائي والمحتوث .

وبتأثير نبضة الضخ الثانية يعاد ضخ الأيونات Cr^{4+} ذات المواقع النسبية للعزوم ثنائيات الأقطاب (ذات حالة الاستقطاب المتغيرة) من السوية الأرضية إلى السوية الليزرية العليا T_2^3 وإلى السوية المثارة الأعلى T_1^3 (خلال فترة نبضة الضخ البالغ تقريباً 150 ns). تستمر عملية الامتصاص حتى بلوغ عملية الابيضاض وتصبح البلورة $Cr^{4+}:YAG$ شفافة بعدها تمر نبضة الخرج الليزري من خلال البلورة المستقطبة عند ذات طول موجة الضخ $1.062\ \mu\text{m}$ (عملية مفتاح الجودة الشكل 2). يعود جزء من الأيونات Cr^{4+} ذات عزوم ثنائيات الأقطاب الموجهة التي انتقلت إلى السوية المثارة الأعلى T_1^3 بتأثير نبضة الضخ الأولى والثانية (الشكل 2) بشكل سريع إلى السوية الليزرية العليا T_2^3 (القناة السريعة) ويمكن أن يمر الجزء الآخر المتبقي من خلال السوية الافتراضية الوسيطة ولا يشارك في الفعل الليزري (القناة البطيئة) إلا خلال فترة النبضة [11,10].

لقد دون مبكراً في المراجع [11,10,7,5] وأنجزت محاكاة السلوك الزمني لمشاكل مشابهة تتعلق بعمليات الامتصاص والإصدار والأفعال الليزرية $1.062\ \mu\text{m}$ و $1.4\ \mu\text{m}$ بنتيجة عمليات الضخ بنبضة مفردة ونبضتين باعتبار عملية الضخ كتابع غوصي أو قيمة ثابتة أو وصفة بمعادلة تفاضلية بسيطة تصف فقط التفاعل بين الحزمة الليزرية والبلورة $Cr^{4+}:YAG$. بالحقيقة لا تأخذ النماذج السابقة بالاعتبار الوصف الحقيقي الفيزيائي والرياضي لمصدر الضخ الليزري وتغيرات تأثير وسائطه الحقيقية مثل معدل الضخ، معامل التضخيم الأعظمي ومعامل الضياع أو بتعبير آخر تغير طاقة الضخ من تشغيل إلى آخر وتغير هذه الطاقة بين عتبة الإصدار الليزري والشدة العظمى التي يمكن الحصول عليها من القضيب الليزري المضخوخ. حيث يعتبر هذا الاتجاه أحد محاور الاهتمام الذي سيركز عليها في هذه الدراسة. لم تهتم أيضاً الأعمال السابقة مطلقاً بدراسة عملية عدم التناحي اللاخطي في عملية الامتصاص

للبلورة $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة والمضخوخة بنبضتين بنتيجة عملية تدويرها ولم تدخل الأعمال السابقة تأثير ضياعات فرينل الناتجة عن الانعكاسات أو عن عملية الانعراج على مجمل سطوح القضيب الليزري في عملية المحكاة.

سيركز هذا العمل بشكل أساسي على دراسة تأثير تغيرات تدوير البلورة $Cr^{4+}:YAG$ ودراسة ظاهرة عدم التناحي اللاخطي في عملية الامتصاص بإدخال ضياعات فرينل في المحكاة و باعتبار وجود صفيحة ربع طول موجة موجودة في المجاوب الليزري (بهدف قلب أو تغير اتجاه الاستقطاب ميكانيكياً أو إمكانية قلب اتجاه التوتر المولد للحقل الموضوع فيه البلورة $Cr^{4+}:YAG$ الكترونياً) بالإضافة إلى وجود مقطب جزئي في التجويف الليزري. سيهتم هذا العمل أيضاً بعملية الامتصاص والإصدار أو ما يسمى مفتاح الجودة الثنائي والأفعال الليزرية بطولي الموجة $1.062 \mu m$ و $1.4 \mu m$ بنتيجة الضخ المزدوج وبفرض توجه عزوم ثنائيات الأقطاب للمراكز الفعالة على طول المحورين [100] و [010] وبحيث يصنع هذان المحورين مع محوري البلورة الزاويتان ϑ و $\vartheta + \pi/2$ على التوالي، كما تصنع زاوية $\varphi(t)$ (زاوية الاستقطاب) مع اتجاه الحقل الكهربائي.

3- النموذج الرياضي

يصف النموذج المقترح كلا الوسطين الليزرين منبع الضخ (ليزر نيوديميوم- زجاج) وماص إشباع الحالة الصلبة المستقطب $Cr^{4+}:YAG$.

3-1 وسط منبع الضخ

يعطى التغير الزمني لانقلاب الإسكان النسبي في منبع الضخ كما يلي [10]:

$$\frac{dY}{dt} = G - DY - 2B_{32}(\nu)U_{\vartheta}Y \quad (1)$$

يمكن استخدام مصفوفات جونسون- ميلر لمقطب دوار لتوليد استقطاب قطع ناقصي للحزمة الليزرية التي تمر من خلال مستقطب مثالي مدور بزاوية ϑ . وعلى سبيل المثال، ففي حالة تشكيل استقطاب قطع ناقص بالشكل المعياري تكون محاور القطع الناقص المستقطب باتجاه المحورين x و y ويكون انتشار الضوء باتجاه المحور z (بشكل عام، يمكن توليد استقطاب قطع ناقص انطلاقاً من استقطابين خطيين). إن حساب عنصر المصفوفة لعزم ثنائي القطب الكهربائي لضوء مستقطب خطياً على محورين متعامدين x و y في حالة الجملة الكمومية المتناحبة وكون السويات الطاقية متقطعة يقود إلى وجود أربع معاملات أينشتاين من أجل الإصدار التلقائي والمحثوث). تعطى مصفوفة جونسون لمستقطب دوار كما يلي [12,13]:

$$J = \begin{pmatrix} \cos^2 \vartheta & \cos \vartheta \sin \vartheta \\ \cos \vartheta \sin \vartheta & \sin^2 \vartheta \end{pmatrix}$$

ويعطي شعاع جونسون الناشئ أو شعاع الحقل الكهربائي للحزمة كما يلي:

$$\vec{E} = J \begin{pmatrix} a \\ ib \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cos^2 \vartheta & ib \cos \vartheta \sin \vartheta \\ a \cos \vartheta \sin \vartheta & ib \sin^2 \vartheta \end{pmatrix}$$

يلاحظ فوراً أنه يمكن إعطاء شدة الضوء المقابل بالعلاقة:

$$I(\vartheta) = a^2 \cos^2 \vartheta + b^2 \sin^2 \vartheta$$

يمكن عملياً تحقيق استقطابين متعاكسين بالتحكم بحالة استقطاب البلورة من الخارج بالطريقتين التاليتين: إلكترونياً بقلب اتجاه الحقل المطبق على خلايا بوكل أو الحقل الموجودة فيه البلورة $Cr^{4+}:YAG$ دون إحداث أي تشويه في العناصر الضوئية وميكانيكياً أيضاً بتدوير صفيحة ربع طول الموجة ضمن التجويف الليزري بزاوية قدرها $\vartheta_1 = \pi/2$.

تعطي مصفوفة جونسون لحالة صفيحة ربع الموجة أو ما يسمى بالمؤخر كما يلي [12]:

حيث إن $J_{WP} = \begin{pmatrix} e^{i\Phi/2}, 0 \\ 0, e^{-i\Phi/2} \end{pmatrix}$ هو الانزياح الطوري بين مركبتي الحقل الكهربائي. يؤدي المؤخر إلى

التزايد الطوري على طول المحور x وإلى التأخير الطوري على طول المحور y. يوجد عموماً حالتين هامتين لصفحة مؤخر الموجة أو صفحة ربع ونصف طول الموجة وهما $\vartheta_1 = 90^\circ$, $\vartheta_1 = 180^\circ$ وبالتالي تعطى مصفوفتا جونسون على التوالي كما يلي:

$$J_{WP}(\lambda/2, 180^\circ) = i \begin{pmatrix} 1, & 0 \\ 0, & -1 \end{pmatrix}, \quad J_{WP}(\lambda/4, 90^\circ) = \begin{pmatrix} 1, & 0 \\ 0, & -i \end{pmatrix}$$

وتعطى مصفوفات جونسون في حالة تدوير صفحة الموجة بزاوية قدرها ϑ_1 بالشكل:

$$J_{WP}(\Phi, \vartheta_1) = i \begin{pmatrix} e^{i\Phi/2} \cos^2 \vartheta_1 + e^{-i\Phi/2} \sin^2 \vartheta_1, (e^{i\Phi/2} - e^{-i\Phi/2}) \sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1 \\ (e^{i\Phi/2} - e^{-i\Phi/2}) \sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1, e^{i\Phi/2} \sin^2 \vartheta_1 + e^{-i\Phi/2} \cos^2 \vartheta_1 \end{pmatrix}$$

تختزل هذه المصفوفة في حالة صفحة ربع ونصف الموجة إلى ما يلي :

$$J_{WP}(\lambda/2, \vartheta_1) = i \begin{pmatrix} \cos 2\vartheta_1, \sin 2\vartheta_1 \\ \sin 2\vartheta_1, \cos 2\vartheta_1 \end{pmatrix}, \quad J_{WP}(\lambda/4, \vartheta_1) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i}{\sqrt{2}} \cos 2\vartheta_1, \frac{i}{\sqrt{2}} \sin 2\vartheta_1 \\ \frac{i}{\sqrt{2}} \sin 2\vartheta_1, \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i}{\sqrt{2}} \cos 2\vartheta_1 \end{pmatrix}$$

وبالتالي تعطى شدة الحقل الكهربائي بعد صفحة ربع الموجة بالشكل التالي:

$$\vec{E}' = J(\lambda/4, \vartheta_1) \begin{pmatrix} a \\ ib \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a}{\sqrt{2}} + \frac{ai}{\sqrt{2}} \cos 2\vartheta_1, \frac{-b}{\sqrt{2}} \sin 2\vartheta_1 \\ \frac{ai}{\sqrt{2}} \sin 2\vartheta_1, \frac{ib}{\sqrt{2}} + \frac{-b}{\sqrt{2}} \cos 2\vartheta_1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{E}' = J \begin{pmatrix} a \\ ib \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a}{\sqrt{2}} - \frac{ai}{\sqrt{2}}, 0 \\ 0, \frac{b}{\sqrt{2}} + \frac{ib}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}; \quad \vartheta_1 = 90^\circ \text{ ومن أجل}$$

لكي نفهم كيفياً سلوك ظاهرة عدم التناحي بعد بداية الامتصاص عند الإشباع يجب أن نفترض أن عزوم ثنائيات الأقطاب للانتقال من الحالة الأرضية (السوية الليزرية الدنيا) إلى السوية المثارة الأولى (السوية الليزرية العليا) يجب أن يصطف أو يوازي أحد محاور البلورة [100] أو [010] أو [001]. لذا يجب أن يتم اختيار اتجاهات عزوم ثنائيات الأقطاب للمراكز الفعالة Cr^{4+} بحيث يوافق عدم التناحي المدروس [13,7,5].

يعطى التغير الزمني في كثافة شدة الحقل بداخل التجويف الليزري وباعتبار التفاعل المتبادل بين حزمة الضخ المستقطبة بشكل قطع ناقص مع حالة استقطاب متغيرة وماص إشباع الحالة الصلبة المتناحي Cr^{4+} : YAG والمستقطب ويفرض وجود اصطفااف باتجاه أحد المحاور وباعتبار ضياعات فربنل أو الضياعات الكلية في حدها الأدنى على المحور x وذات قيمة عظمى على المحور y بالمعادلة التالية [10]:

$$\frac{dU_\varrho}{dt} = [v\mu(\chi Y - K_{loss}) - v^* \mu^* (\sigma_{GS} N_1^s \cos^2(\vartheta - \varphi) + \sigma_{ES} N_2^s \sin^2(\vartheta - \varphi)) - \frac{v\mu}{L} (\alpha_x \cos^2 \varphi + \alpha_y \sin^2 \varphi)] U_\varrho \quad (2)$$

يمكن عملياً التحكم بحالة الاستقطاب لمفتاح الجودة المنفعل $Cr^{4+}:YAG$ لليزر النيودميوم بواسطة كل من التوجهات النسبية للبلورة $Cr^{4+}:YAG$ والمقطب الجزئي بداخل التجويف وأيضاً بكثافة طاقة النبضة الليزرية العملاقة في مفتاح الجودة. يمكن أن يقود التفاعل الديناميكي المتبادل خلال تشكل النبضة الليزرية العملاقة بين عدم التناحي الأولي الخطي في مفتاح الجودة وعدم التناحي الخطي للمقطب الجزئي وعدم التناحي اللاخطي المحرض ذاتياً في مفتاح الجودة المنفعل إلى سيناريوهات مختلفة في نشوء حالة الاستقطاب. وهذا يعني أن السلوك المعقد لحالة الاستقطاب يعود إلى التفاعل المتبادل بين المقطب الجزئي الذي يسبب عدم التناحي الخطي في التجويف الليزري والبلورة المتناحية $Cr^{4+}:YAG$ التي تؤدي إلى حصول عدم التناحي اللاخطي في التجويف الليزري. بالحقيقة، يمكن في أي لحظة تمثيل التطور الزمني لحالة الاستقطاب الليزري بحالة ذاتية تقابل كون الضياعات الكلية في التجويف الليزري في حدها الأدنى. يمكن عندها التعبير عن زاوية الاستقطاب بتابعة ضمنية للزمن كما في العلاقة التالية [13,7]:

$$\varphi(t) = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{\sin 2\vartheta}{\cos 2\vartheta - \frac{\alpha_y - \alpha_x}{2L^* [\sigma_{gs} N_1^s - \sigma_{es} (N_2^s + N_3^s)]}} \right]$$

سيضيع في أي مجاوب ليزري جزء من النبضة الليزرية أو الحزمة الليزرية إما بالتناثر على المرايا أو بواسطة الثقوب الموجودة ضمن التجويف الليزري. تتعلق هذه الضياعات بنصف قطر الحزمة الليزرية في مستوي الثقب ونصف قطر الثقب r_a . بالحقيقة تتعلق الضياعات بترابط الوسائط L_r, λ_p, r_a ويدعى ترابط الوسائط هذه بعدد فرينل $N = r_a^2 / \lambda_p L_r$. يعبر هذا العدد عن نسبة زاوية الورود r_a / L_r كما تبدو من مركز المرآة المعاكسة لها إلى زاوية الانعراج λ_p / r_a . في حالة مجاوب ذي مرايا مستوية متوازية وبوجود ثقب دائري ومن أجل عدد فرينل كبير نسبياً $N \geq 1$, تعطى ضياعات فرينل وفقاً للعلاقة [14,5,1]:

$$\alpha = 8\delta(M + \delta)K_{pl}^2 / [(M + \delta)^2 + \delta^2], \delta = 0.824, M = (8\pi N)^{1/2}$$

حيث K_{pl}^2 عبارة عن تابع ماكدونالد أو تابع بيسل (Macdonald or Bessel) ذي $(p+1)$ صفر من المرتبة 1. من أجل الحصول على ضياعات فرينل لمجاوبات أخرى انظر [16,15]. وأن $K_{pl}^2 = (\frac{\pi i}{2})^2 \exp[(p+1)\frac{\pi i}{2}] H_p^{(1)}(x) H_1^{(1)}(x)$ و $H_p^{(1)}(x)$ تابع هانكل (Hankel).

حيث $D = [2\psi (P_{21} + P_{32}) + 2P_{21}(P_{31} + P_{32})] / (2\psi + P_{21} + P_{31})$ و $G = [2\psi (P_{21} - P_{32})] / (2\psi + P_{21} + P_{31})$ إلى الحالة الأرضية E_1 (الشكل 2) و P_{31} احتمال انتقال أيونات Nd^{3+} من الحالة المثارة E_3 إلى الحالة الأرضية E_1 و P_{32} احتمال انتقال أيونات Nd^{3+} من السوية الليزرية العليا E_3 إلى السوية الليزرية الدنيا E_2 (الشكل 2) و $\psi = \eta_1 B_{14} U_{41}^{\max}$ معدل الضخ (احتمال الانتقال من E_1 إلى E_4 بتأثير نبضة الضخ) و $\eta_1 = P_{43} / (P_{43} + P_{42} + P_{41})$ عدد الأيونات المنتقلة من السوية E_4 إلى السوية E_3 و P_{4i} احتمال الانتقال من E_4 إلى E_i ($i=1,2,3$) (الشكل 2) و $B_{14} U_{41}^{\max}$ احتمال الإشعاع المحثوث في مركز خط الإصدار و B_{14} معامل اينشتاين التكاملي و $U_{41}^{\max} = \int B_{14} U_{41}(v) dv$ كثافة الإشعاع العظمى بداخل القضيب الليزري و ν تواتر الإصدار و B_{32} معدل استرخاء الأيونات Nd^{3+} بالإصدار المحثوث من السوية الليزرية العليا E_3 إلى الحالة E_2 و $Y = (N_3 - N_2) / N_r$ انقلاب الإسكان النسبي و N_i ($i=2,3$) كثافتها إسكان السويتين الليزريتين الدنيا والعليا لقضيب ليزر نيودميوم-زجاج و N_r الكثافة الكلية لأيونات Nd^{3+} و $\nu = c / \eta$ سرعة الضوء في قضيب ليزر نيودميوم-زجاج و c سرعة الضوء و η قرينة الانكسار لقضيب ليزر نيودميوم-زجاج و $\nu^* = c / \eta^*$ سرعة الضوء في البلورة $Cr^{4+}:YAG$ و η^* قرينة انكسار البلورة $Cr^{4+}:YAG$ المتناحية المستقطبة و

المجاوب الليزري و L الطول الفعال للقضيب الليزري و L_1 و L_2 المسافتين بين نهايتي القضيب الليزري و $\mu^* = L \cdot \eta^* / (L_1 + L_2 + L \cdot \eta + L^* \cdot \eta^*)$ و $\mu = L \cdot \eta / (L_1 + L_2 + L \cdot \eta + L^* \cdot \eta^*)$ معاملتي الامتلاء بدخل ومراتي الانعكاس و L^* سماكة البلورة $YAG:Cr^{4+}$ و χ قيمة معامل التضخيم الأعظمي في قضيب ليزر نيودميوم-زجاج (عندما يثار العدد الكلي لأيونات Nd^{3+}) و $K_{loss} = \rho + (1/2L)Ln(1/R_1R_2) + (\rho^*L^*/L)$ معامل الضياع في المجاوب الليزري بعد دورة واحدة و ρ و ρ^* معاملتي الضياع بالامتصاص وبالتبعثر... الخ في القضيب الليزري وفي البلورة على التوالي، α_x, α_y ضياعات فرينل على المحورين x و y و $R_i = (r_{Fr} - 2\tau^2 r_{Fr} r_i + \tau^2 r_i) / (1 - \tau^2 r_{Fr} r_i)$ ($i = 1, 2$) و (الشكل 1a) معامل انعكاس فرينل لسطح القضيب الليزري و τ معامل نفوذية المادة بين السطحين العاكسين و r_1 و r_2 معاملتي انعكاس مرآتي الدخل والخرج للمجاوب على التوالي و σ_{GS} المقطع العرضي للامتصاص التجاوبي لمامص قابل للإشباع عند طول موجة الضخ λ_p و σ_{ES} المقطع العرضي للحالة المثارة الأولى لمامص قابل للإشباع عند طول موجة الليزر λ_L و N_i^s ($i = 1, 2$) كثافتي إسكان السويتين الليزريتين الدنيا والعليا لمامص قابل للإشباع الحالة الصلبة على التوالي، ϑ زاوية عدم التناحي اللاخطي بين محاور البلورة والمحور الضوئي الأفقي (ماص الحالة الصلبة القابل للإشباع المستقطب).

2-3 وسط الماص الصلب القابل للإشباع

يجعل الترابط الاهتزازي للمخصب Cr من الجملة المدروسة جملة ذات أربع سويات فعالة (الشكل 2) حيث تنتمي الانتقالات المحثوثة والتلقائية إلى نفس السوية الأرضية المرتبطة 3A_2 وإلى العصابة التي تقع في الأعلى 3T_2 [17,1]. يبين الشكل 2 المخطط الطاقوي والانتقالات لليزر الضخ والمخصب Cr . يتعلق اتجاه استقطاب النبضة العملاقة المتولدة بالتوجهات النسبية الزاوية أو بالمواقع النسبية لتوجهات عزوم ثنائي القطب الكهربائي للبلورة المتناحية $YAG:Cr^{4+}$ بداخل التجويف الليزري والمستقطب.

نفترض وجود المركز الفعالة Cr^{4+} ذات توجه واحد في السوية الليزرية الدنيا أو الأرضية. بنتيجة عمليات الامتصاص يفترض وصول N_2^s من المراكز الفعالة إلى السوية الليزرية العليا. يصبح جزء من توجهات عزوم ثنائي القطب الكهربائي معاكساً لما كان عليه في السوية الأرضية بعد قلب اتجاه الحقل الكهربائي المطبق الكترونياً أو ميكانيكياً بتدوير صفيحة ربع طول الموجة بداخل التجويف الليزري بزاوية قدرها 90° .

نفترض أيضاً أن الاسترخاءات الفونونية بداخل المضاعفات $^3T_1, ^3T_2, ^3A_2$ تكون سريعة جداً والاسترخاء من 3E من المضاعف 3T_1 إلى 3E وبين 3A_2 و 3E يكون أيضاً سريعاً جداً (الشكل 2). لهذا تكون الحالات $^3T_1, ^3T_2, ^3A_2$ هي الحالات المشغولة فقط .

يعطى التطور الزمني لكثافة إسكان الحالة الأرضية (السوية الليزرية الدنيا) لمامص إشباع الحالة الصلبة المتناحي $YAG:Cr^{4+}$ والمستقطب بشكل قطع ناقص (جملة كمومية متناحية مع سويات طاقة متقطعة لعزوم ثنائي القطب الكهربائي للضوء المستقطب خطياً [16]) بالمعادلة التالية [11,10, 5, 1]:

$$\frac{dN_1^s}{dt} = -\frac{\sigma_{GS} v^* U_\varrho}{W_p} N_1^s \cos^2(\vartheta - \varphi) + \frac{N_2^s}{\tau_U} + \frac{N_2^s}{\tau_R} + \frac{(\sigma_{ST} - \sigma_{ES1}) v^* U}{W_L} N_2^s \quad (3)$$

يعطى التطور الزمني لكثافة إسكان السوية الليزرية العليا أو المثارة الأولى لمامص إشباع الحالة الصلبة $YAG:Cr^{4+}$ المستقطب بالعلاقة [11,10, 5, 1]:

$$\frac{dN_2^s}{dt} = \frac{\sigma_{GS} v^* U_\varrho}{W_p} N_1^s \cos^2(\vartheta - \varphi) - \gamma \frac{\sigma_{ES} v^* U_\varrho}{W_p} N_2^s \sin^2(\vartheta - \varphi) + \frac{N_3^s}{\tau_S} - \frac{N_2^s}{\tau_U} - \frac{(\sigma_{ST} - \sigma_{ES1}) v^* U}{W_L} N_2^s - \frac{N_2^s}{\tau_R} \quad (4)$$

يعطى التطور الزمني لكثافة إسكان السوية الوسيطة المفترضة للماص $Cr^{4+}:YAG$ كما يلي [11,10]:

$$\frac{dN_3^s}{dt} = \gamma \frac{\sigma_{ES} v^* U_0}{W_p} N_2^s \sin^2(\theta - \varphi) - \frac{N_3^s}{\tau_s} \quad (5)$$

كما يعطى التطور الزمني لكثافة شدة الحقل المتولد من الليزر $Cr^{4+}:YAG$ النبضي بالعلاقة [11,10]:

$$\frac{dU}{dt} = c(\sigma_{ST} - \sigma_{ES1})(N_2^s - \frac{g_2}{g_1} N_1^s)U + \frac{\Omega W_L}{4\pi\tau_R} N_2^s \quad (6)$$

حيث: W_p طاقة فوتون موجة الضخ و W_L طاقة الفوتون عند طول موجة الليزر الصادر عن البلورة المتناحية و σ_{ST} و σ_{ES1} المقاطع العرضية للإصدار المحثوث في مركز طيف الكسب عند طول الموجة λ_L لليزر $Cr^{4+}:YAG$ و τ_U عمر حياة السوية الليزرية العليا و τ_R عمر حياة إشعاع الإصدار التلقائي و τ_s متوسط عمر حياة السوية الوسيطة و γ معدل التفرع من أجل الاسترخاء من السوية المثارة الأعلى إلى السوية الوسيطة ذات حالة الاستقطاب المتغيرة والمعاكسة لاستقطاب الحالة الأرضية والموافق لاستقطاب السوية الليزرية العليا (قناة التفاعل البطيء) و g_1 و g_2 الوزنيات الإحصائية للسويتين الليزريتين الدنيا والعليا و $\Omega = \eta^2 \cdot A / L^2$ الزاوية المجسمة الواصفة لإسهام الإصدار التلقائي في الإصدار المحثوث بعد دور واحد و A مساحة المقطع العرضي للبلورة $Cr^{4+}:YAG$ و η^* قرينة انكسار البلورة $Cr^{4+}:YAG$.

في حال وجود مقطب وبفرض أن المركبات الناشئة عن عنصر الاستقطاب تكون مرتبطة خطياً مع مركبات الحزمة الساقطة على المستقطب تحدد عندها مصفوفة جونسون للمستقطب بالشكل التالي:

$$\begin{pmatrix} E_x^* \\ E_y^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x, 0 \\ 0, p_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$$

من أجل نفوذ تام $p_{x,y} = 1$ ومن أجل توهين كامل $p_{x,y} = 0$ عندئذ تحدد

مصفوفة جونسون للمستقطب بالشكل $J_p = \begin{pmatrix} p_x, 0 \\ 0, p_y \end{pmatrix}$ من أجل $0 \leq p_{x,y} \leq 1$. تعطى مصفوفتي جونسون من أجل مستقطب خطي أفقي أو عمودي مثالي حيث يكون النفاذ كاملاً على طول المحور الأفقي والعمودي بالشكل:

$$J_p = \begin{pmatrix} 0, 0 \\ 0, 1 \end{pmatrix}, J_p = \begin{pmatrix} 1, 0 \\ 0, 0 \end{pmatrix}$$

وأخيراً تعطى هذه المصفوفة في حالة دوران المستقطب الخطي بزاوية قدرها β بالعلاقة التالية

$$J_p(\beta) = J(-\beta) \cdot J \cdot J(\beta) \quad \text{حيث} \quad J(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad \text{هي مصفوفة الدوران.}$$

إذا وفي حالة دوران المستقطب الخطي تحدد بالشكل التالي:

$$J_p(\beta) = \begin{pmatrix} p_x \cos^2 \beta + p_y \sin^2 \beta, (p_x - p_y) \sin \beta \cos \beta \\ (p_x - p_y) \sin \beta \cos \beta, p_x \sin^2 \beta + p_y \cos^2 \beta \end{pmatrix},$$

من أجل $\beta = 90^\circ$ ، $\beta = 0^\circ$ نحصل على مصفوفتي جونسون من أجل مستقطب خطي أفقي وعمودي

$$J_p(\beta) = \begin{pmatrix} p_y, 0 \\ 0, p_x \end{pmatrix}, \quad J_p(\beta) = \begin{pmatrix} p_x, 0 \\ 0, p_y \end{pmatrix}$$

نذكر أخيراً أنه يمكن إيجاد حل المعادلات من (1)-(6) في الحالة المستقرة بوضع $d/dt = 0$ ومنه نجد أن:

$$Y = \frac{G}{D + 2B_{32}(v)U_Q} \quad (S_1)$$

$$U_Q = \frac{v\mu \chi G - Dk_1}{2B_{32}k_1} \quad (S_2)$$

$$k_1 = (v\mu K_{\text{loss}} + v^* \mu^* (\sigma_{GS} N_1^s \cos^2(\vartheta - \varphi) + \sigma_{ES} N_2^s \sin^2(\vartheta - \varphi)) + (\alpha_x \cos^2 \varphi + \alpha_y \sin^2 \varphi))$$

$$N_3^s = \frac{\gamma \sigma_{ES} v^* U_Q \tau_s \sin^2(\vartheta - \varphi)}{W_p} N_2^s \quad (S_3)$$

$$N_1^s = \frac{W_p [\tau_u \tau_R (\sigma_{ST} - \sigma_{ES1}) v^* U \sin^2(\vartheta - \varphi) + (W_L \tau_R + W_L \tau_u) N_2^s]}{W_L \tau_u \tau_R \sigma_{GS} v^* U_Q \cos^2(\vartheta - \varphi)} \quad (S_4)$$

$$N_2^s = \frac{-\gamma \sigma_{GS} v^* U_Q N_1^s \cos^2(\vartheta - \varphi)}{W_p K_2}, K_2 = \frac{-\gamma \sigma_{ES} v^* U_Q \sin^2(\vartheta - \varphi)}{W_p} - \frac{1}{\tau_U} - \frac{1}{\tau_R} + \frac{(\sigma_{ST} - \sigma_{ES1}) v^* U}{W_l} + \frac{\gamma \sigma_{ES} v^* U_Q N_1^s \cos^2(\vartheta - \varphi)}{W_L} \quad (S_5)$$

$$U = -\Omega W_L N_2^s / 4\pi c \tau_R (\sigma_{ST} - \sigma_{ES1}) (N_2^s - (g_2 / g_1) N_1^s) \quad (S_6)$$

4- الحلول العددية لمعادلات المعدل

تمثل معادلات المعدل (1)-(6) جملة معادلات تفاضلية لا خطية صلبة. تصف هذه المعادلات الإصدار الديناميكي في الوسطين الليزرين. استخدم برنامج حاسوبي مبني على أساس طريقة رونج-كوتا لحل جملة هذه المعادلات. يسمح هذا البرنامج بدراسة تأثير ماص إشباع الحالة الصلبة المستقطب على مميزات النمط المفرد لمفتاح الجودة لليزر نيودميوم-زجاج وليزر $Cr^{4+}:YAG$ النبضي وخصوصاً تأثير معامل عدم التناحي اللاخطي ϑ على السلوك الزمني لنبضتي الخرج الليزري وأيضاً السلوك الزمني لزاوية الاستقطاب. يدرس النموذج أيضاً تأثير تغيير وسطاء الدخل لنبضة الضخ ذات حالة الاستقطاب المتغيرة مثل الطاقة (معامل التضخيم الأعظمي و معامل الضياع ومعامل الضخ) و معامل عدم التناحي اللاخطي على تغيرات إسكان السويتين الليزريتين المستقطبتين العليا والدنيا وإسكان الحالة الوسيطة المفترضة ونبضتي الخرج الليزري لليزر نيودميوم-زجاج و البلورة المستقطبة $Cr^{4+}:YAG$ التي تلعب دورين أساسيين الأول كمفتاح جودة منفعل من أجل طول الموجة $1.062 \mu m$ والثاني كالليزر نبضي عند طول الموجة $1.4 \mu m$. كما ويمكن البرنامج أيضاً من دراسة تأثير تغير تركيز المركز الفعالة Cr^{4+} ذات العزوم ثنائيات الأقطاب الموجهة على إصدار الليزر $Cr^{4+}:YAG$ النبضي. تعطى الثوابت الفيزيائية للمعادلات (1)-(6) والأبعاد الهندسية للتجويف الليزري في الجدول 1 [18,13,11,10,4].

تم اختيار القيم البدائية لمعادلات المعدل كما يلي:

$$Y(0) = \frac{G}{D}, U_Q(0) = 10^{-9} (J/cm^3), N_1^s(0) = (1 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18}) (1/cm^3), N_2^s(0) = 0.0 (1/cm^3),$$

$$N_3^s(0) = 0.0 (1/cm^3), U(0) = 10^{-9} (J/cm^3).$$

5- النتائج والمناقشة

يشير الشكل 3 إلى علاقة الجزء النافذ من طاقة الإشعاع الضوئي المستقطب $1.062 \mu m$ كتابع لزاوية دوران البلورة (معامل عدم التناحي اللاخطي) من أجل قيم مختلفة لكثافة الدخل (معامل التضخيم الأعظمي). تكون الطاقات النافذة متناحية تماماً من أجل قيم منخفضة لكثافة الدخل ، ولكن حالما تتزايد كثافة ليزر الضخ تصبح المراكز الضوئية مشبعة بشكل مستقر وتتزايد الضوء النافذ $1062nm$ وبالتالي يتلازم مع هذا ظهور عدم التناحي اللاخطي. تبلغ سعة عدم التناحي اللاخطي النافذ بشكل واضح فيما عظمى في البطون من أجل القيم المتوسطة للكثافة الليزرية. يوجد أربعة بطون في مجال التدوير الكامل 360° . يمكن أن نجمل بشكل قاطع أن المقطع العرضي لامتناص الحالة المثارة الأولى (السوية الليزرية العليا) يجب أن يكون أصغر من المقطع العرضي لامتناص الحالة الأرضية (السوية الليزرية الدنيا). ولكي نفهم كيفاً سلوك ظاهرة عدم التناحي بعد بداية امتصاص الإشباع يجب أن نفترض أن عزوم ثنائيات الأقطاب للانتقال من الحالة الأرضية (السوية الليزرية الدنيا) إلى السوية المثارة الأولى (السوية الليزرية العليا) يجب أن تصطف بشكل مواز لأحد محاور البلورة $[010]$, $[100]$ أو $[001]$. لذلك يجب أن يتم اختيار اتجاهات عزوم ثنائية الأقطاب للمراكز الفعالة Cr^{4+} بحيث يتوافق مع عدم التناحي اللاخطي المدروس.

يظهر الشكلان 4 و 5 السلوك الزمني لكثافة انقلاب الإسكان النسبي وكثافة الفوتونات لليزر نيوديميوم - زجاج مع مفتاح الجودة المنفعل من أجل قيم مختلفة لزاوية عدم التناحي اللاخطي. يمكن أن نرى من هذين الشكلين أن التزايد في قيمة زاوية تدوير البلورة $Cr^{4+}:YAG$ يؤدي إلى تناقص الزمن الميت في حالتي كثافة الانقلاب الإسكاني النسبي وكثافة النبضة الليزرية عند القيم المختلفة لزاوية عدم التناحي اللاخطي. يمكن أن نرى من الشكل 5 أن فترة نبضة الضخ تبلغ $75 ns$ تقريباً. تكون في البداية كثافة الفوتونات منخفضة بينما تكون الضياعات الكلية أكبر من الكسب الليزري، ولكن يتزايد الكسب بسرعة أثناء عملية الضخ بتزايد زاوية التدوير وتتناقص الضياعات الكلية بنفس الوقت. تنشأ عند ذلك الكثافة الفوتونية وتبلغ عند القمة قيمة أعلى بعدة مراتب من القيمة الابتدائية حيث يبدأ الفعل الليزري.

يظهر الشكل 6 السلوك الزمني لكثافة إسكان السوية الليزرية الدنيا للبلورة $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة المتناحية من أجل قيم مختلفة لمعامل عدم التناحي اللاخطي و من أجل معامل تضخيم أعظمي $\chi = 15 cm^{-1}$ ومعامل ضياع لمينع الضخ $K_{loss} \cong 0.01 cm^{-1}$. يمكن أن نلاحظ من هذا الشكل أن كثافة إسكان الحالة الأرضية (السوية الليزرية الدنيا) للليزر النبضي $Cr^{4+}:YAG$ تبقى ثابتة من أجل زمن تأخير محدد يتعلق بقيمة معامل التضخيم الأعظمي وبقيمة معامل الضياع لمينع الضخ و بقيمة زاوية عدم التناحي اللاخطي في عملية امتصاص الإشباع. ويتزايد زاوية عدم التناحي اللاخطي يتناقص زمن التأخير مثلاً من أجل $\theta = 1^\circ, 45^\circ$ (المنحنيان 1 و 2). بينما من أجل $\theta = 90^\circ$ يصبح زمن التأخير لانهاضي (المنحني 3) وذلك بسبب عدم حصول عملية الامتصاص في السوية الليزرية الدنيا. وبسبب عمليات الامتصاص لنبضة الضخ الأولى والثانية عند طول الموجة $1.062 \mu m$ والمستقطبة بشكل قطع ناقص مع مواقع نسبية لتوجهات عزوم ثنائيات الأقطاب تستمر عمليات الامتصاص حتى تصبح البلورة المستقطبة $Cr^{4+}:YAG$ شفافة (عملية الابيضاض). يمر الجزء المتبقي (غير المتفاعل) من هذه الفوتونات المستقطبة خلال البلورة المدروسة عند نفس طول موجة نبضة الضخ (عملية مفتاح الجودة). ويتأثر نبضة الضخ الأولى تستنزف الحالة الأرضية للمركز الفعالة Cr^{4+} ذات عزوم ثنائيات الأقطاب الكهربائية الموجهة إلى القيمة الدنيا لكثافة الإسكان. يعود ، بسبب عمليتي الإصدار التلقائي والمحثوث، جزء من المركز الفعالة Cr^{4+} إلى الحالة الأرضية التي تظهر قيم امتلاء عظمى أخرى تتعلق بقيمة زاوية عدم التناحي اللاخطي $\theta = 1^\circ, 45^\circ$. تعيد نبضة الضخ الثانية ذات حالة الاستقطاب المتغيرة المراكز الفعالة Cr^{4+} مع توجهات لعزوم ثنائية الأقطاب مرة أخرى من الحالة الأرضية إلى السوية الليزرية العليا (الشكل 2). يمكن أن نرى أيضاً أنه بتزايد زاوية عدم التناحي اللاخطي $\theta = 1^\circ, 45^\circ$ يتناقص إشغال السوية الأرضية للمرة الثانية.

يظهر الشكل 7 السلوك الزمني لكثافة إسكان السوية الليزرية العليا للبلورة $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة المتناحية من أجل قيم مختلفة لزاوية عدم التناحي اللاخطي. يلاحظ من هذا الشكل أن كثافة إسكان السوية الليزرية العليا تبلغ من أجل $\theta = 1^\circ, 45^\circ$. قيمها العظمى بسبب تأثير نبضة الضخ الأولى المستقطبة ناقصياً عند طول الموجة $1.062 \mu m$ مع حالة استقطاب متغيرة. ويتزايد قيمة معامل عدم التناحي اللاخطي يتناقص زمن التأخير من أجل $\theta = 1^\circ, 45^\circ$ ، بينما يصبح زمن التأخير لانهاضياً من أجل

$\theta = 90^\circ$ ولا تشغل السوية الليزرية العليا بسبب عدم حصول الامتصاص في السوية الليزرية الدنيا (الأرضية). تقابل القيم العظمى المذكورة من أجل $\theta = 1^\circ, 45^\circ$ القيم الدنيا للحالة الأرضية بسبب عمليات امتصاص فوتونات نبضة الضخ الليزرية الأولى ذات المواقع النسبية لتوجهات عزوم ثنائيات الأقطاب أو مع حالة الاستقطاب المتغيرة. تستنزف الحالة المثارة الممثلة الأولى ذات المركز الفعالة Cr^{4+} مع العزوم ثنائية القطب الكهربائي الموجهة بشكل سريع إلى الحالة الأرضية خلال تأثير نبضة الضخ الأولى وإلى السوية الليزرية الأعلى بسبب إصدار الإشعاع التلقائي والمحثوث. تبدأ السوية الليزرية العليا في البلورة $Cr^{4+}:YAG$ المتناحية والمستقطبة بناء إسكان جديد بسبب تأثير امتصاص نبضة الضخ الثانية مع المواقع النسبية لتوجهات العزوم ثنائية الأقطاب وتتشكل قمة ثانية أصغر من الأولى من أجل زاوية عدم التناحي للاختي $\theta = 45^\circ$ بينما من أجل $\theta = 1^\circ$ تقترب النبضتين المتشكلتين بنبضة واحدة مع استواء واسع نسبياً، ويقابل هذا البناء الجديد للإسكان الامتلاء الثاني الجديد للسوية الليزرية العليا ذات حالة الاستقطاب المتغيرة. يمكن أن تخضع الحالة الأرضية إلى عملية استنزاف جديدة خلال زمن نشوء النبضة الليزرية. يعاد ضخ المركز الفعالة Cr^{4+} ذات عزوم ثنائيات القطب الموجهة مرة ثانية إلى السويات المثارة الأعلى بتأثير نبضة الضخ الثانية. يعود جزء من المركز الفعالة Cr^{4+} ذات عزوم ثنائيات القطب الموجهة بشكل سريع إلى السوية الليزرية العليا بتأثير الإصدار التلقائي والمحثوث (الشكل 2) ويسهم في الفعل الليزري (قناة التفاعل السريعة). وتكون هذه العملية هي المسئولة عن الفعل الليزري في البلورة $Cr^{4+}:YAG$ عند طول الموجة $1.4 \mu m$. يمر الجزء المتبقي مع التوجه المقلوب لثنائيات الأقطاب بالنسبة لما هو عليه في السوية الأرضية من خلال السوية المفترضة الوسيطة (قناة التفاعل البطيئة) ولا يسهم في الفعل الليزري إلا خلال زمن نشوء نبضة الخرج الليزري فقط.

يضع الفرق بين الإسكان الابتدائي والإسكان الجديد الثاني للحالة الأولية والحالة المثارة الأولى بعملية الانتشار بداخل البلورة المستقطبة $Cr^{4+}:YAG$ بسبب ظاهرة عدم التناحي للاختي الناتجة عن عملية امتصاص الإشباع أو عبارة أخرى عملية عدم التناحي اللاطي المتولدة بسبب استقطاب البلورة. لا يمكن لبعض المركز الفعالة المتبقية في الحالتين المثارة الأعلى والوسيطة أن تسهم في الفعل الليزري.

يظهر الشكل 8 تابعة إسكان الحالة الوسيطة المفترضة للزمن من أجل قيم مختلفة لمعامل عدم التناحي للبلورة المستقطبة. تمتلئ هذه السوية بنتيجة تأثير نبضتي الضخ الأولى والثانية ذات المواقع النسبية لتوجهات عزوم ثنائيات الأقطاب وتستنزف إلى السوية الليزر العليا. يمكن أن نرى من الشكل 8 أن تزايد معامل عدم التناحي للاختي $\theta = 1^\circ, 45^\circ$ يقود إلى تزايد كثافة إسكان الحالة الوسيطة المفترضة. وبتزايد زاوية التدوير $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ تتناقص القمم العظمى لكثافة إسكان المراكز الفعالة Cr^{4+} مع عزوم ثنائيات الأقطاب الموجهة. تُشغل هذه الحالة بالمراكز الفعالة Cr^{4+} مع عزوم ثنائيات الأقطاب الموافقة لتوجهها في السوية الليزرية العليا. تمثل هذه الحالة المراكز الفعالة Cr^{4+} التي لا تسهم في الفعل الليزري.

يظهر الشكل 9 كثافة الفوتونات الصادرة عن ليزر $Cr^{4+}:YAG$ النبضي كتابع للزمن من أجل قيم مختلفة لمعامل عدم التناحي للبلورة المتناحية $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة. يمكن أن نلاحظ من هذا الشكل أن تزايد زمن التأخير وتناقص قيم القمم العظمى وتزايد عرض النبضة الليزرية يعود إلى تزايد معامل عدم التناحي للاختي أو اللاطي من أجل $\theta = 1^\circ, 45^\circ$ ويختفي الفعل الليزري من أجل $\theta = 90^\circ$ بسبب عدم حصول الامتصاص في السوية الأرضية للبلورة المتناحية $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة وبالتالي عدم امتلاء السوية المثارة الأولى ومن ثم انعدام الانقلاب الإسكاني بين السويتين الليزريتين.

6- الخاتمة:

تم في هذا العمل تطوير نموذج رياضي لوصف عمليتي الامتصاص والاهتزاز في البلورة المتناحية $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة الموجودة ضمن التجويف الليزري (Nd-laser) خلال عملية الضخ بنبضتين. تعمل البلورة المتناحية $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة كمفتاح جودة وكوسيط لليزر نبضي عند الأطوال الموجية $1.062 \mu m, 1.4 \mu m$. و لوصف السلوك الزمني لجملة ليزر مع حالة استقطاب متغيرة - ماص إشباع مستقطب، أخذ بالحسبان التفاعل المتبادل بين فوتونات ليزر نيوديميوم - زجاج مع مواقع نسبية لتوجهات ثنائيات الأقطاب والبلورة المتناحية $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة وبوجود

المستقطب الجزئي. كما تم اعتبار تأثير تغيرات استطاعة منبع الضخ وزاوية دوران البلورة كمقياس لعملية عدم التناحي اللاطي لامتصاص الإشباع في البلورة المتناحية المستقطبة. نوقشت عملية عدم التناحي اللاخطي من أجل قيم مختلفة لزاوية تدوير البلورة $\theta = 1^\circ, 45^\circ, 90^\circ$.

في عملية الضخ بنبضتين ذات العزوم ثنائيات الأقطاب الموجهة تضخ المراكز الفعالة Cr^{4+} التي عادت إلى السوية الأرضية بسبب عمليتي الإصدار التلقائي والمحثوث مرة ثانية خلال عملية الليزر بتأثير نبضة الضخ الثانية. ونتيجة تأثير الصفيحة ذات ربع طول الموجة أو عملية قلب اتجاه الحقل الموجودة فيه البلورة فإن نبضتي الضخ الأولى والثانية تنقل الأيونات أو المراكز الفعالة Cr^{4+} ذات عزوم ثنائيات الأقطاب الموجهة إلى السوية المثارة الأعلى حيث ينتقل جزء من هذه المراكز الفعالة إلى السوية الوسيطة الافتراضية ولا يشارك في الفعل الليزري إلا خلال زمن نشوء النبضة و يعود الجزء الآخر إلى السوية الليزرية العليا ليشارك في الفعل الليزري.

تظهر الحسابات العددية أن كثافة الخرج الليزري المستخرجة تُحدّ بتركيز الأيونات وبالمقطع العرضي وباستنزاف الحالة الأرضية لأيونات Cr^{4+} وتأثير الحالة الوسيطة المفترضة وبقيمة معامل عدم التناحي اللاطي في امتصاص إشباع البلورة.

يمكن عملياً استخدام توليد الحزم الليزرية المستقطبة في دراسة استقطاب الظواهر اللاخطية في التفاعل المتبادل للبلازما الليزرية وبعمليات الترسيب التي تستخدم الليزرات النبضية وفي مجالات مختلفة أخرى.

يسمح النموذج بدراسة الآليات الحركية لليزر الحالة الصلبة الأخرى مثل ليزر $Nd:YAG$ وليزر الياقوت وليزر $Nd:YVO_4$ وليزر $Nd:YAP$... الخ مع أنواع مختلفة لمصاصات إشباع الحالة الصلبة المستقطبة مثل $Cr^{4+}:YAG$ و $Cr^{4+}:YSGG$ و $LiF:F_2^-$.

7- كلمة شكر

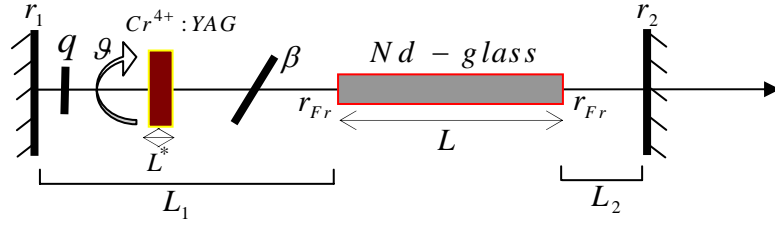
يشكر المؤلفان الأستاذ الدكتور إبراهيم عثمان المدير العام لهيئة الطاقة الذرية السورية على تشجيعه ودعمه المستمرين.

8- المراجع

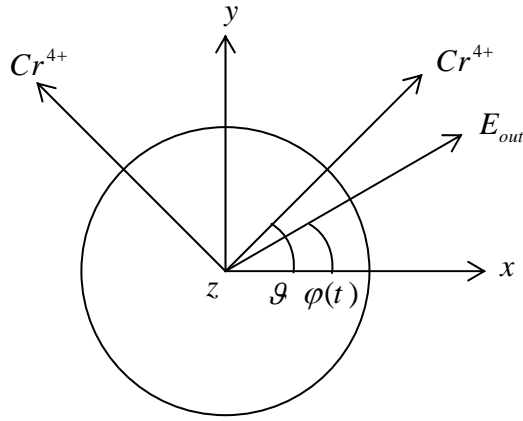
1. T. Richard, White and Iain T., M Kinnie. Pump- probe switching in gain –switched lasers. Optics express 1998.V.3,N.8 298-304.
2. Shcheslavsky V., Zhavoronkov N., Petrov V., Noack F. and Bouvier M. Kiloherz gain –switched laser operation and femtosecond regenerative amplification in Cr: forsterite. IEEE Journal of quantum electronics V35 (8), Pp1123-1133 (1999).
3. Xiao G., Lim H., Yang S., Stryland E.V., Bass M., and Weichman L., Z- Scan Measurement of the Ground and Excited State Cross Sections of Cr^{4+} in Yttrium Aluminum Garnet .IEEE J. of Quantum Electronics, V35, N7 , 1999, 1086-1091.
4. Calistru D.M., Demos S.G. and Alfano R.R. Dynamics of local modes during nonradiative relaxation .Physical review letters V7 8(2), pp 374-377, (1997).
5. Ilichev N.N., Kir'yanov A.V. and pashinin P.P. Model of passively Q- switched laser accounting nonlinear absorption anisotropy in a passive switch. IEEE journal of Quantum Electronics 1998. 113-115.
6. Eilers H., Dennis W.M., Yen W.M., Kuck S., Peterman K., Huber G. and Jia W. performance of a $Cr:YAG$ laser. IEEE journal of Quantum Electronics 29(9) 1993, 2508-2512.

7. Kir'yanov AV, Aboites VA et al. Second-harmonic generation by $Nd^{3+} :YAG /Cr^{4+} :YAG$ laser pulses with changing state of polarization. Optical Society of America 1999. TB4-3/331: TB4-1/329.
8. Kir'yanov A.V., Aboites V., and Ilichev N.N. Modeling a polarization- bitable neodymium laser with a $Cr^{4+} :YAG$ passive switch under the weak resonant radiation control. IEEE journal of Quantum Electronics 1999,469-470.
9. Eilers H., Hoffman K.R., Dennis W.M., Jacobsen S.M, and Yen W.M. saturation of $1.064 \mu s$ absorption in $Cr,Ca :Y_3Al_5O_{12}$ crystals. Appl. Phys. Lett.61(25) 1992, 2958-2960.
10. Mayorga-Cruz D. and Melnikov I.V., Kinetics of a solid state laser with polarizable saturable absorber. Optics Express 9,9 2001,428-435
11. Abdul Ghani B, Hammadi M. Computational model of dual Q-switching and lasing processes of the pulsed $Cr^{4+} :YAG$ laser pumped by a Nd-glass laser .J.Opt. A: pure and Appl. Opt. 8 p1-7 (2006).
12. Suda A, Kadoi A., Nagasaki K. Tashiro H. and Midorikawa K. Absorption and oscillation characteristics of a pulsed $Cr^{4+} :YAG$ laser investigated by a double- pulse pumping technique. IEEE, J. of Quantum electronics 35,10,1999 ,1548-1553.
13. Collett E. polarized light fundamentals and applications. Marcel dekker , New York. Basel .hong kong 1993.
14. Koechner W. Solid State Laser Engineering. Springer Verlag, 1988.
15. Korenev $Cr^{4+} :YAG$ B. G. Introduction to theory of the Bessel function. Nakladatelvi technicke literatury Praha 1977 (in Czech language).
16. Gripkovski V.B., semiconductor lasers. Minsk izdatelstvo univecitetskoe 1988.(in Russian).
17. Ilichev N.N., Kir'yanov A.V. and pashinin P.P. Experimental and theoretical study of a neodymium laser passively Q-switched with doped crystals $LiF : F_2^-$ and $Cr^{4+} :YAG$: An influence of nonlinear absorption anisotropy in the switches on output parameters. Spie V 3573377-385.
18. Klimov I.V., Shcherbakov I.A. and Tsvetkov V.B., Control of the Nd-laser output by Cr-doped Q-switches. laser physics 8,1,1998,232-237.

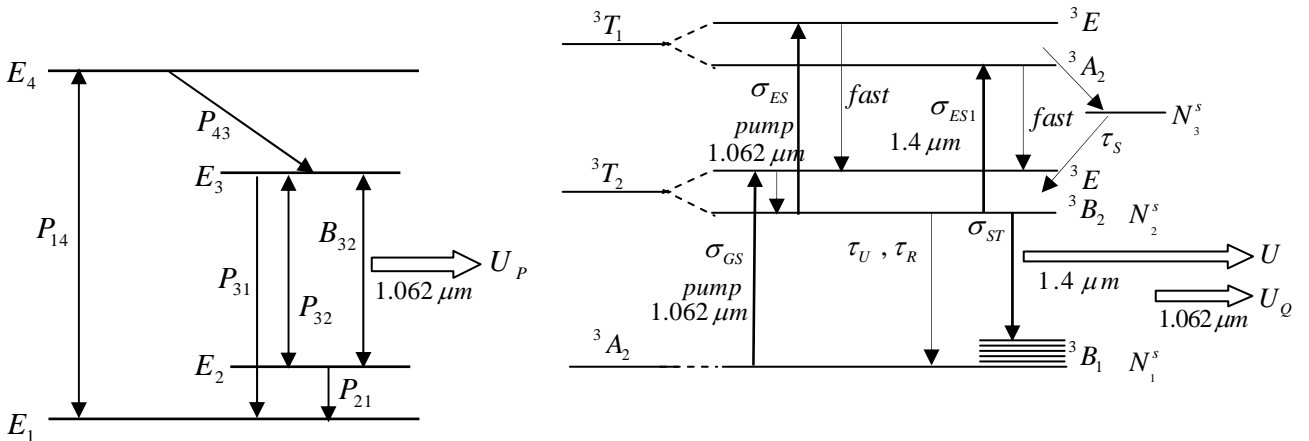
9- الأشكال والجداول



الشكل 1a : المخطط التجريبي لمفتاح الجودة المنفعل لليزر نيودميوم بواسطة البلورة $Cr^{4+}:YAG$ المستقطبة وبوجود مقطب بزواوية تدوير قدرها β وصفيحة ربع طول الموجة q .

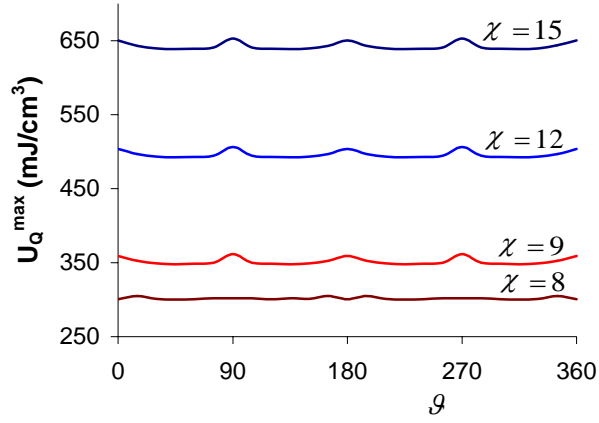


الشكل 1b: التوجهات الزاوية $(\vartheta, \vartheta + \pi/2)$ لمحاور البلورة $Cr^{4+}:YAG$ وزاوية استقطاب الحقل الكهربائي $E_{out}(\varphi(t))$ لنبضة الخرج الليزري.

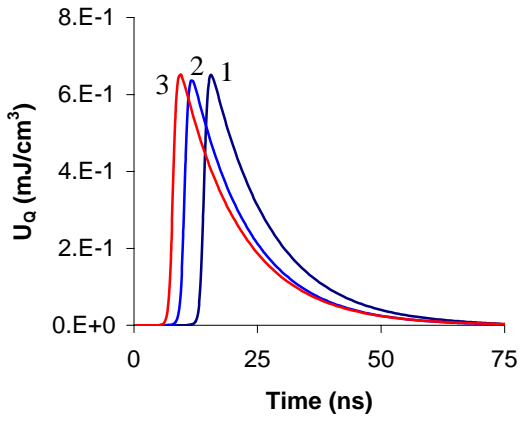


الشكل 2: مخطط السويات الطاقة لليزر نيودميوم-زجاج مع مفتاح الجودة البلورة $Cr^{4+}:YAG$.

[11].



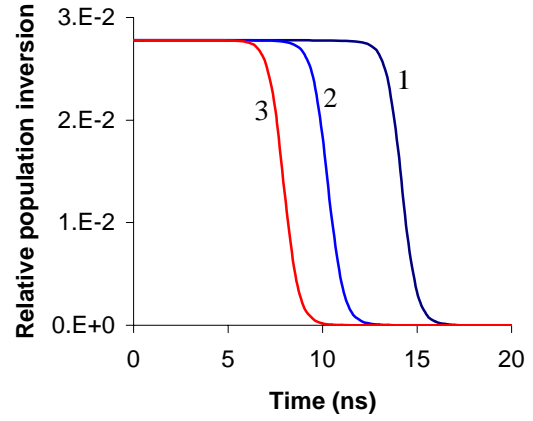
الشكل 3 : تابعة كثافة الضخ النافذة للضوء المستقطب لمعامل عدم التناحي اللاخطي (زاوية تدوير البلورة θ).



الشكل 5 : تابعة الكثافة الليزرية لليزر الضخ

للزمن من أجل :

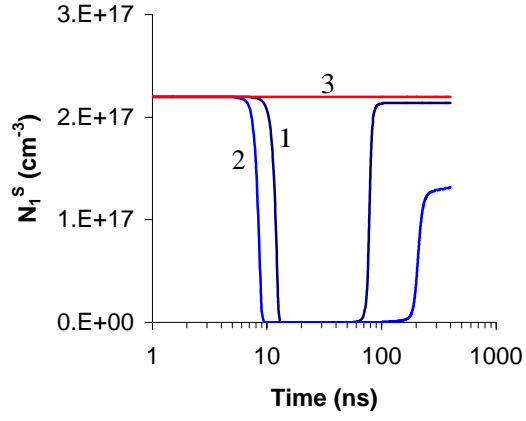
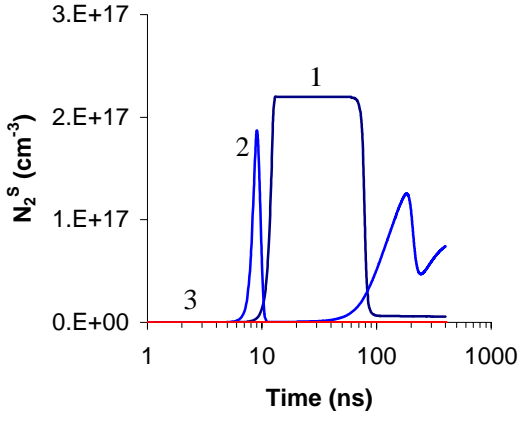
(1) $\theta = 1^\circ$, (2) $\theta = 45^\circ$, (3) $\theta = 90^\circ$



الشكل 4 : تابعة الانقلاب النسبي لليزر

الضخ للزمن من أجل :

(1) $\theta = 1^\circ$, (2) $\theta = 45^\circ$, (3) $\theta = 90^\circ$



الشكل 7 :تابعية كثافة إسكان السوية الليزرية

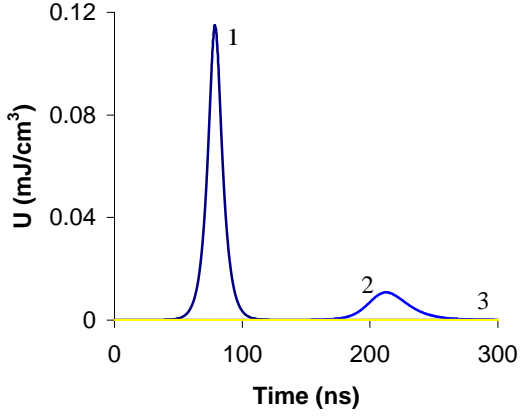
العليا لليزر $Cr^{4+}:YAG$ النبضي للزمن:

(1) $\vartheta = 1^\circ$, (2) $\vartheta = 45^\circ$, (3) $\vartheta = 90^\circ$

الشكل 6 : تابعية كثافة إسكان السوية الأرضية

لليزر $Cr^{4+}:YAG$ النبضي للزمن:

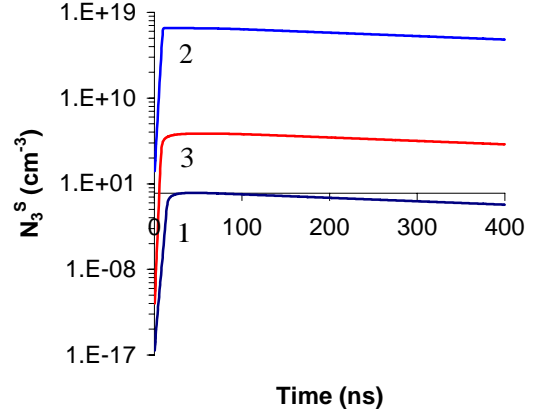
(1) $\vartheta = 1^\circ$, (2) $\vartheta = 45^\circ$, (3) $\vartheta = 90^\circ$



الشكل 9 : تابعية الكثافة الليزرية لليزر

$Cr^{4+}:YAG$ النبضي للزمن :

(1) $\vartheta = 1^\circ$, (2) $\vartheta = 45^\circ$, (3) $\vartheta = 90^\circ$



الشكل 8 : تابعية إسكان السوية الوسيطة

لليزر $Cr^{4+}:YAG$ النبضي للزمن :

(1) $\vartheta = 1^\circ$, (2) $\vartheta = 45^\circ$, (3) $\vartheta = 90^\circ$

الكمية	القيمة	الواحدة	الكمية	القيمة	الواحدة
P_{21}	10^7	s^{-1}	K_{loss}	0.005-0.1	cm^{-1}
P_{31}	560	s^{-1}	L	10	cm
P_{32}	840	s^{-1}	L^*	2	cm
B_{32}	175×10^7	cm^3 / Js	η	1.568	-
χ	(5-15)	cm^{-1}	η^*	1.82	-
W_p	1.87×10^{-19}	J	μ	0.33	-
W_L	1.42×10^{-19}	J	μ^*	0.067	-
ψ	(15-50)	s^{-1}	ρ	0.005-0.02	cm^{-1}
N_r	$(2-6) \times 10^{20}$	cm^{-3}	ρ^*	0.0032	cm^{-1}
σ_{ST}	9.1×10^{-20}	cm^2	τ_R	30.6	μs
σ_{ES}	$8. \times 10^{-19}$	cm^2	τ_U	3.5,4.1	μs
σ_{GS}	5.7×10^{-18}	cm^2	τ_S	0.12	μs
σ_{ES1}	$6. \times 10^{-20}$	cm^2	τ_U	2.7,3.5,4.1	μs

الجدول 1: وسطاء ليزر نيودميوم-زجاج وماص إشباع الحالة الصلبة المستقطب.

Syrian Arab Republic
Atomic Energy Commission(AECS)
Damascus P. O. Box 6091



**Report on Scientific Informatic Study
Department of Scientific Services**

**Numerical calculations of the absorption and oscillation
processes in the nonlinear polarized crystal $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$
pumped by Nd-glass laser.**

**Dr. B . Abdul Ghani
M . Hammadi**