



الجمهورية العربية السورية
هيئة الطاقة الذرية

هـ ط ذ س- ف / ت ن ب ع 397
كانون الاول 2007

تقرير نهائي عن بحث علمي
قسم الفيزياء

دراسة قفل الأنماط وتعديل الجودة معاً باستخدام
بلورة $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ في ليزر $\text{Nd}:\text{YVO}_4$

الدكتور محمد بهاء الصوص

هـ ط ذ س- ف / ت ن ب ع 397

دراسة قفل الأنماط وتعديل الجودة معاً باستخدام بلورة Nd:YVO₄ في ليزر Cr⁴⁺:YAG

الملخص:

نعرض فيما يلي نموذجاً عددياً لمعادلات المعدل في ليزر الحالة الصلبة رباعي السويات مع بلورة Cr⁴⁺:YAG الماصة القابلة للإشباع يأخذ بعين الاعتبار امتصاص الحالة المثارة (ESA). فُسِّمَ المجاوب الليزري إلى عدد كبير من الشرائح وجرى حل النموذج ضمن كل شريحة باعتبار التدفق الفوتوني الخاص به. يجري إزاحة صفيحة قيم التدفق عند كل تكرار للحل لمحاكاة تدفق الفوتونات ضمن المجاوب الليزري. يستطيع هذا النموذج أن يوصف ظاهرة قفل الأنماط ويمكن استخدامه لنمذجة قفل الأنماط المتزامن مع تعديل الجودة باستخدام ماص قابل للإشباع.

الكلمات المفتاحية: ليزر حالة صلبة، قفل الأنماط، تعديل الجودة، نمذجة الليزر.

Study of simultaneous Q-switching and mode-locking in Nd:YVO₄ laser with Cr⁴⁺:YAG crystal

Abstract

A numerical model of rate equations for a four-level solid-state laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber including excited state absorption ESA is presented. The cavity is divided into a large number of disks and the model is solved for each disk and its local corresponding photon flux. The flux array is shifted for each recurrence simulating the movement of photons inside the cavity during the round trip. This simulator can describe the mode locking phenomenon and can be used to simulate the simultaneous mode locking and Q-switching with a saturable absorber.

Key Words: Solid state laser, mode-locking, Q-switching, laser modeling.

الفهرس

- 1- المقدمة 4
- 2- مخطط التجربة 4
- 3- النموذج النظري الأولي 6
- 3-1 حل النموذج النظري الأولي 8
- 3-2 مناقشة النموذج الأولي 11
- 3-3 دراسة أثر الاستقطاب في النموذج الأولي 11
- 4- النموذج الرياضي الحاسوبي المطور 13
- 4-1 النتائج والمناقشة 14
- 5- الخاتمة 18
- 6- المراجع 18
- 7- الملحق 1 : البرنامج الحاسوبي 20

1- المقدمة

إن المنابع الليزرية عند طول الموجة 1.06 ميكرومتر ذات استطاعة وسطى معتدلة وتواتر تكرار النبضات المرتفع مفيدة في تطبيقات عديدة كتحويل طول الموجة خارج المجاوب باستخدام بلورة لا خطية [1]. كما أن قطار النبضات مقفلة الأنماط ضمن مغلف تعديل الجودة يفيد في دراسة الظواهر اللاخطية الديناميكية في المجال 10-1000 نانو ثانية [2].

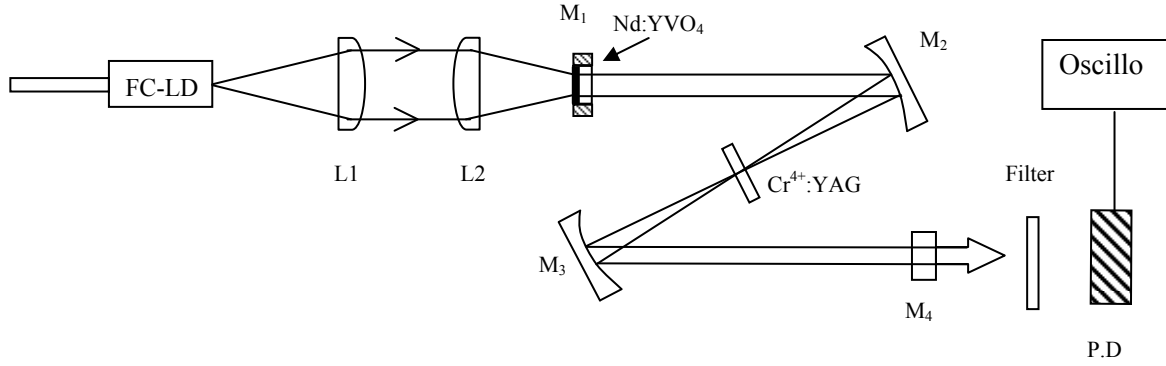
بينت المراجع [3-4] تحقيق قفل الأنماط وتعديل الجودة معاً باستخدام بلورة ماصة قابلة للإشباع ($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$) واحدة عند طول الموجة الأساسي 1.06 ميكرون في ليزر $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ مضخوخ طويلاً بالديودات. جذب قفل الأنماط وتعديل الجودة بشكل سلبي باستخدام بلورة $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ واحدة اهتماماً كبيراً بسبب قلة التعقيد وتدني الكلفة مقارنة مع الطرق الفعالة التي تستلزم معدلات صوت-ضوئية (لمفتاح الجودة وقفل الأنماط).

تظهر المراجع [5-6] تحليلاً لمثل هذا النظام الذي يستخدم البلورة $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ الماصة القابلة للإشباع لتوصيف تغير الشدة النسبي للنبضات مقفلة الأنماط خلال نبضة تعديل الجودة.

ينين في هذا التقرير نموذجاً حاسوبياً قائماً بنفسه لحل معادلات المعدل في ليزر الحالة الصلبة رباعي السويات مع بلورة $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ الماصة القابلة للإشباع مع الأخذ بالاعتبار امتصاص الحالة المثارة (ESA). أمكن الحصول على نبضات مقفلة الأنماط ومعدلة الجودة بأن معاً عن طريق الحل العددي لهذا النموذج.

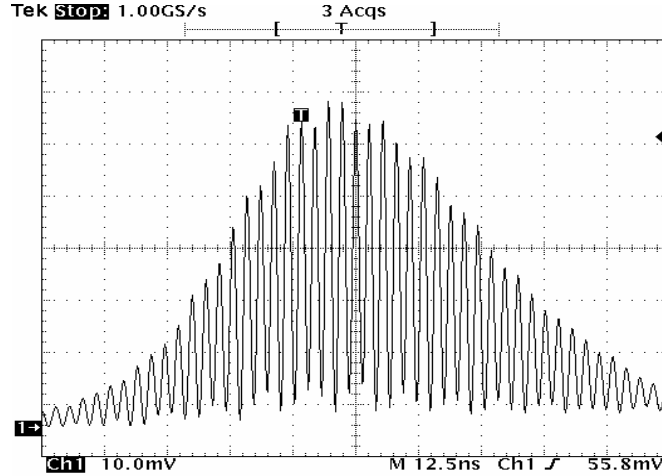
2- مخطط التجربة

يبين الشكل 1 المخطط التجريبي لليزر $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ مقفل الأنماط ومعدل الجودة معاً باستخدام بلورة $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ [6,4] الذي جرى بناؤه ضمن مشروع بحث مشترك مع مركز التكنولوجيا المتقدمة الهندي CAT في إطار اتفاقية أكاديمية العالم الثالث للعلوم TWAS. كان منبع الضخ ليزراً نصف ناقل مبرداً بالماء مزوداً بليف بصري قطر قلبه 600 ميكرون وفتحته العددية 0.22. يُجمَع الضوء الصادر من نهاية الليف ثم ييار باستخدام عدستين L_1 و L_2 من النوع مستوية-محدبة بعدهما المحرقي 25 مم. كانت بلورة الليزر من النوع $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ مقطوعة وفق المحور a ومشوبة ذرياً بنسبة 1% وثخنها 1.5 مم ووضعت عند موضع تجمَع حزمة الضخ. تمتص البلورة 84% من استطاعة الضخ الواردة التي تقابل معامل امتصاص α_a قدره 12.2 سم⁻¹. جعلت بلورة $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ ضمن حامل نحاسي مبرد بالماء عند درجة $17 \pm 0.1^\circ\text{C}$ لتجنب تلفها الحراري. استخدمت بلورة $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ذات نفوذية أولية 81% لتحقيق تعديل الجودة وقفل الأنماط المتزامن. طلي وجهها بلورة $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ بطلاء مانع للانعكاس عند الطول الموجي 1064 نانومتر



الشكل 1. المخطط التجريبي لليزر Nd:YVO4 مقفل الأنماط ومزود بمعدّل جودة سلبى

يتألف المجاوب الليزري من أربع مرايا رتبت على شكل الحرف z للحصول عل توافق مع حزمة الضخ من جهة، ولتأمين تبئير جيد للحزمة عند البلورة الماصة القابلة للإشباع. كانت مرآة الدخل M_1 متوضعة على سطح البلورة الليزرية مباشرة وذات نفوذية عالية بالنسبة لطول موجة الضخ ($T > 95\%$) وانعكاسية عالية ($R > 99.8\%$) عند الطول الموجي الأساسي (1.064 ميكرون). طلي السطح الآخر للبلورة بطلاء مضاد للانعكاس ($R < 0.2\%$) عند طول الموجة 1.064 ميكرون. يتضمن المجاوب مرأتين كرويتين M_2 و M_3 نصف قطر كل منهما 10 سم ومطليتين بطلاء عاكس جداً عند 1.064 ميكرون. قدرت المسافة بين المرأتين بحوالي 10.2 سم للحصول على بقعة ضوئية دقيقة، وروعي أن تكون زاوية الورود عليهما بحدود 10 درجات للتقليل من الزيوعات على البقعة داخل المجاوب. كانت الأطوال داخل المجاوب على النحو التالي: $l_1 = 170$ مم و $l_2 = 102$ مم و $l_3 = 148$ مم، وكان طول المجاوب الكلي حوالي 42 سم مما يعطي زمناً قدره 2.8 نانو ثانية للدورة الكاملة. توضع بلورة $Cr^{4+}:YAG$ في الوسط بين المرأتين المقعرتين وعلى بعد 57 مم تقريباً من المرآة M_2 . حُسبت أنصاف أقطار النمط المهتز، من أجل استطاعة ضخ العتبة والبالغة 2.5 واط، عند بلورة الوسط المضخم وعند بلورة $Cr^{4+}:YAG$ وعند مرآة الخرج فكانت على التوالي 320 و 73 و 280 ميكرون على الترتيب. تبلغ انعكاسية مرآة الخرج 86% عند طول موجة الليزر 1.06 ميكرون. استخدم ديود ضوئي (TF1850) له زمن صعود 0.1 نانو ثانية مربوط براسم إشارة (تكترونكس 500 MHz) لتحصيل النبضات الليزرية. كانت النبضات مقفلة الأنماط (الشكل 2) مفصولة عن بعضها بـ 2.6 نانو ثانية ضمن مغلف تعديل الجودة مما يوافق تماماً زمن الدورة الكاملة ضمن المجاوب. قيس العرض الزمني للنبضة مقفلة الأنماط فكان حوالي 500 بيكو ثانية، غير أن هذا القياس كان محكوماً بدقة أجهزة الكشف المستخدمة في التجربة.

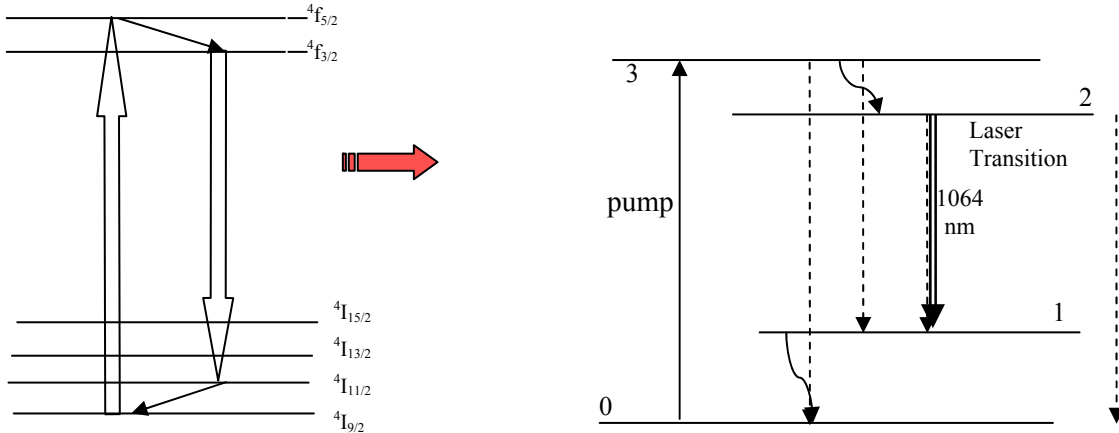


الشكل 2. نتائج التجربة: نبضات الخرج مقفلة الأنماط داخل مغلف نبضة تعديل الجودة

3- النمذجة النظرية الأولى

لتوصيف ظاهرة قفل الأنماط المتزامن مع تعديل الجودة، قمنا في دراسة نظرية سابقة [7]، بطرح نموذج نظري يعتمد على علاقات تكرارية تمكن من حساب استطاعة النبضة مقفلة الأنماط اعتماداً على استطاعة النبضة التي تسبقها ضمن مغلف تعديل الجودة الواحد مع شرط معرفة العرض الزمني التجريبي لهذه النبضات. مكن هذا النموذج من إعادة بناء النبضات مقفلة الأنماط ضمن مغلف تعديل الجودة بشكل يتوافق إلى حد كبير مع النتائج التجريبية. لكن هذا النموذج بقي قاصراً عن توصيف الإصدار الليزري منذ بدء الضخ الليزري (زمن بناء النبضات، شكل النبضة مقفلة الأنماط، ثباتية تكرار النبضات، ...)، فتم الانتقال إلى التفكير في حل معادلات المعدل للنموذج النظري لليزر رباعي السويات مع بلورة ماصة قابلة للإشباع.

يبين الشكل 3 مخطط الليزر ذي السويات الأربع الذي يمثل الليزر المشوبة بالنيوديميوم في الزجاج أو في البلورات [9,8,7]. يجري انتقال الضخ بين السوية الأرضية E_0 إلى عصابة الضخ العريضة E_3 . نفترض أن الانتقال بين عصابة الضخ والسوية الليزرية العليا سريع جداً.



الشكل 3. مخطط سويات الطاقة لليزر رباعي السويات مشوب بالنيوديميوم

تكتب معادلات معدل إسكان السوية الأرضية والسويتين الليزيتين كالتالي [8,7]:

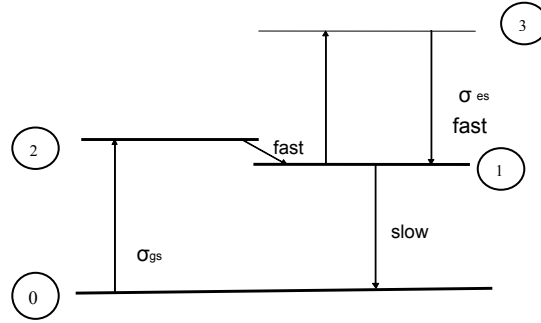
$$(1) \quad \frac{dn_0}{dt} = -W_P n_0 + \frac{n_1}{\tau_{10}} + \frac{n_2}{\tau_{20}}$$

$$(2) \quad \frac{dn_2}{dt} = W_P n_0 - v \sigma \phi (n_2 - n_1) - \frac{n_2}{\tau_f}$$

$$(3) \quad \frac{dn_1}{dt} = -\frac{n_1}{\tau_{10}} + \frac{n_2}{\tau_{21}} + v \sigma \phi (n_2 - n_1)$$

حيث n_i هو إسكان السوية i ، و W_P هو معدل الضخ الفعلي، و σ هي الكثافة الفوتونية، و v هي سرعة الضوء في الوسط الفعال، و σ_{ij} هو زمن الاسترخاء من السوية i إلى j ، و τ_f هو زمن الفلورة الذي يعطى بالعلاقة $\frac{1}{\tau_f} = \frac{1}{\tau_{20}} + \frac{1}{\tau_{21}}$ ، و σ هو المقطع العرضي للإصدار المحثوث.

يمكن تمثيل بلورة $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ التي تعرض خواص ماص قابل للإشباع وفق مخطط سويات طاقة مبسط كما في الشكل 4 [8,7].



الشكل 4: مخطط سويات الطاقة لـ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

تكتب معادلات المعدل للبلورة الماصة القابلة للإشباع كالتالي [9,8,7]:

$$(4) \quad \frac{dn_{s0}}{dt} = -\frac{A}{A_s} n_{s0} v_s \sigma_{gs} \phi + \frac{n_{s1}}{\tau_{gs}}$$

$$(5) \quad \frac{dn_{s1}}{dt} = \frac{A}{A_s} n_{s0} v_s \sigma_{gs} \phi - \frac{n_{s1}}{\tau_{gs}} - \frac{A}{A_s} (n_{s1} - n_{s3}) v_s \sigma_{es} \phi + \frac{n_{s3}}{\tau_{es}}$$

$$(6) \quad \frac{dn_{s3}}{dt} = \frac{A}{A_s} (n_{s1} - n_{s3}) v_s \sigma_{es} \phi - \frac{n_{s3}}{\tau_{es}}$$

حيث n_{si} هي كثافة الإسكان في السوية i ، و A هو مساحة النمط عند الوسط الفعال، و A_s هو مساحة النمط عند البلورة الماصة القابلة للإشباع، و σ_{gs} و σ_{es} هما المقطعان العرضيان لامتناس السوية الدنيا و السوية المثارة على الترتيب، و τ_{gs} و τ_{es} هما زمن استرخاء السوية الدنيا و السوية المثارة على الترتيب، و v_s هي سرعة الضوء في البلورة الماصة.

تعطى معادلة المعدل لكثافة الفوتونات كما يلي:

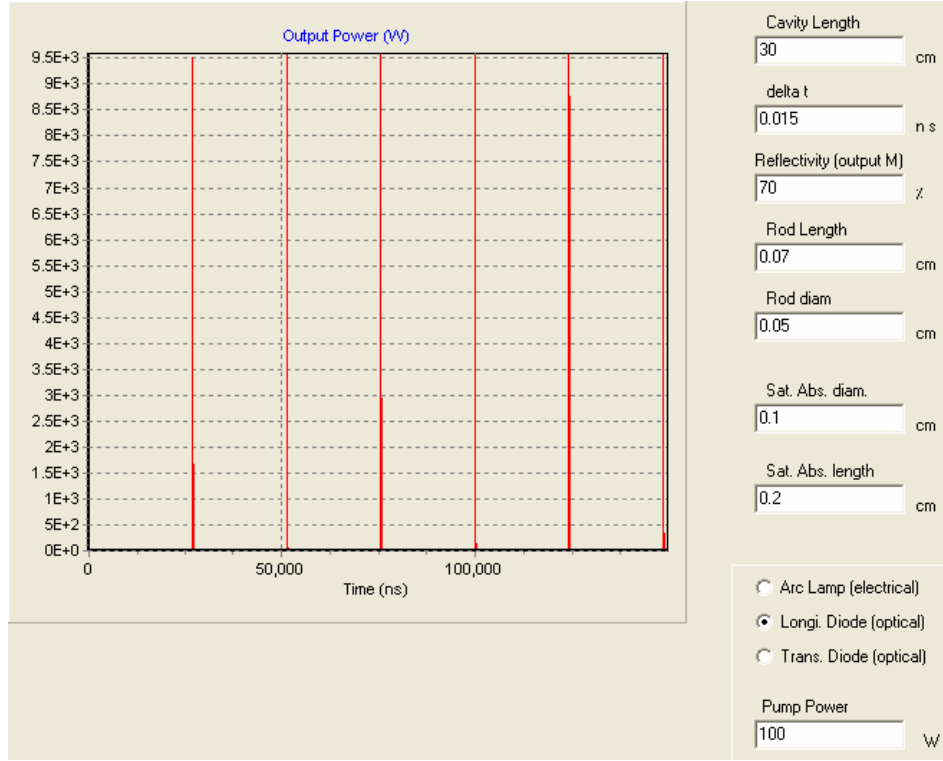
$$(7) \quad \frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[2\sigma(n_2 - n_1)l - 2\sigma_{gs} n_{s0} l_s - 2\sigma_{es} (n_{s1} - n_{s3}) l_s - \left(\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right) \right] + S$$

حيث l هو طول وسط الربح و l_s هو طول البلورة الماصة، و R هي انعكاسية مرآة الخرج، L هي مجموع الضياعات الضوئية غير القابلة للإشباع ضمن المجاوب خلال الدورة الكاملة، S هو معامل الإصدار التلقائي، و t_r هو زمن الدورة الكاملة.

3-1- حل النموذج النظري الأولي

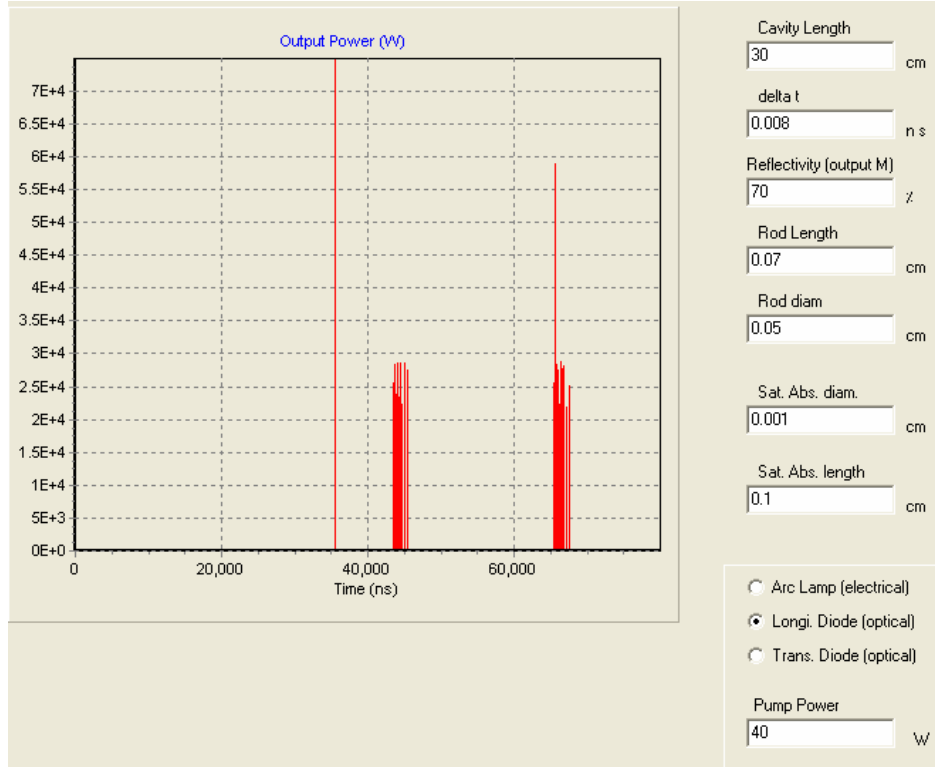
جرى بناء برنامج حاسوبي بلغة C++ Builder لحل النموذج النظري السابق لليزر Nd:YVO₄ مع ماص قابل للإشباع Cr⁴⁺:YAG موافق للمخطط التجريبي في الشكل 1 وفق طريقة رونج كوتا. يقوم المستخدم ضمن واجهة البرنامج في الشكل 5 بإدخال طول المجاوب الليزري وانعكاسية مرآة الخرج وأبعاد البلورة الليزرية والبلورة الماصة. اعتمدت في حل البرنامج قيمة النفوذية الابتدائية للبلورة الماصة القابلة للإشباع 81% ($n_{s0} = 3 \times 10^{17}$ ذرة/سم³) [7] وكذلك نسبة إشابة 1% نيوديميوم لبلورة Nd:YVO₄. يختار المستخدم طريقة الضخ الليزري (طولي أو عرضي) بديود ليزري أو عرضي بمصباح ضخ وميض) ويحدد طاقة الضخ الكهربائية النبضية للمصباح (جول) أو استطاعة الضخ المستمرة للديودات (واط) مما يسمح بتحديد مردود الضخ وفق طريقة الضخ.

جرى في بادئ الأمر إهمال امتصاص السوية المثارة ESA داخل المجاوب الليزري (المعادلة 6) واعتبرت كحد إضافي للضياعات داخل المجاوب. كانت نتيجة الحل هي حصولنا على نبضات معدلة الجودة من أجل بعض القيم المناسبة لأبعاد البلورتين، أو الحصول على إصدار ليزري مستمر من أجل قيم أخرى أو عدم حصول ليزرة ضمن المجاوب من أجل قيم غير مناسبة حيث تكون الضياعات كبيرة (ثخن البلورة الماصة كبير جداً مثلاً)، ولم يتم الحصول على نبضات مقفلة الأنماط من أجل مختلف القيم لاستطاعة الضخ أو أبعاد البلورتين.

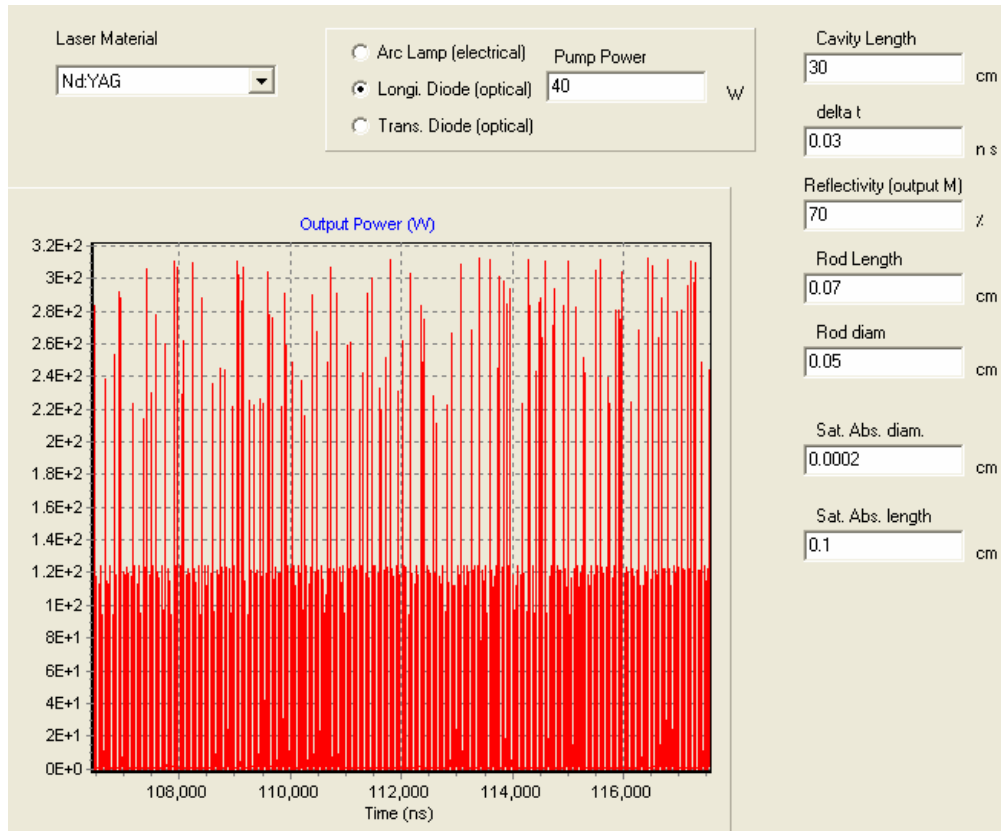


الشكل 5: نبضات معدلة الجودة فقط عند إهمال امتصاص السوية المثارة نتيجة حل النموذج الأولي

وعند حل النموذج السابق بعد الأخذ بعين الاعتبار امتصاص السوية المثارة ضمن معادلات المعدل أظهرت النتائج الحسابية (الشكل 6) وجود نبضات مقفلة الأنماط متزامنة مع تعديل الجودة من أجل قيم مناسبة لأبعاد البلورتين، وقد حصلنا على نبضات مقفلة الأنماط فقط (دون تعديل الجودة) (الشكل 7) من أجل قيم أخرى للأبعاد. ونستنتج من نتائج حل هذا النموذج أن وجود امتصاص السوية العليا في بلورة $Cr^{4+}:YAG$ هو المسؤول عن عملية قفل الأنماط في الليزر.



الشكل 6: نبضات معدلة الجودة ومقفلة الأنماط نتيجة حل النموذج الأولي



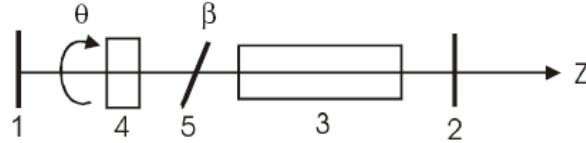
الشكل 7: نبضات مقفلة الأنماط فقط نتيجة حل النموذج الأولي

3-2- مناقشة النموذج الأولي

نجد عند تفحص نتائج حل هذا النموذج (كما في الشكل 6) أن البعد الزمني بين النبضات مقفلة الأنماط داخل مغلف تعديل الجودة غير ثابت ولا يساوي زمن الدورة الكاملة، وكذلك فإن شكل مغلف نبضة تعديل الجودة لا يتطابق مع النتائج التجريبية الموضحة في الشكل 2. ويعود ذلك إلى أن معدل تغير التدفق الفوتوني في المعادلة 7 يحسب فيزيائياً بقسمة مجمل التغيرات التي تطرأ على التدفق خلال دورة كاملة على زمن الدورة الكاملة، مما يدل على أن هذه المعادلة تعطي قيماً وسطية تقريبية وتصلح لتوصيف الظواهر ذات زمن أكبر من t_r . يعطي هذا النموذج نتائج مقبولة في حالة الإصدار الليزري المستمر، وليزرات نبضات من مرتبة مكرو ثانية، والليزرات معدلة الجودة من مرتبة نانو ثانية. وتقرّب تفاصيل الإصدار الليزري من حيث ظهور السفوات spiking وعدم الاستقرار والضجيج والتغير الزمني إلى حدود زمن الدورة الكاملة. وبما أن زمن النبضات مقفلة الأنماط هو أصغر بكثير من t_r فإن هذا النموذج غير قادر على توصيف ظاهرة قفل الأنماط بشكل دقيق، وهناك حاجة لتعديل هذا النموذج لنتمكن من دراسة هذه الظاهرة.

3-3- دراسة أثر الاستقطاب في النموذج الأولي

جرت في هذا العمل أيضاً (اعتماداً على النموذج الأولي) محاولة دراسة أثر الاستقطاب في بلورة $Cr^{4+}:YAG$ على الخرج الليزري. جرى إدراج مقطب جزئي ضمن المجابوب الليزري [10] كما في الشكل 8.



الشكل 8: نموذج ليزر Nd:YAG مع مفتاح جودة سلبي مزود بمقطب جزئي
1- مرآة الليزر الخلفية، 2- مرآة الخرج، 3- قضيب Nd:YAG، 4- بلورة $Cr^{4+}:YAG$ ، 5- مقطب جزئي

تمتلك بلورة $Cr^{4+}:YAG$ استقطابية لا خطية ويصنع محور البلورة زاوية \square مع محور السينات ويصنع المقطب الجزئي زاوية \square مع محور الانتشار. يكون الخرج الليزري مستقطباً ويصنع الحقل الكهربائي E زاوية \square مع محور السينات. نعتبر أن السوية الأرضية للبلورة الماصة متفسخة وأن عدد ثنائيات القطب المتوجهة وفق المحور [100] هو $^1n_{s_0}$ ووفق المحور [010] هو $^2n_{s_0}$. اعتبرت السوية المثارة للبلورة الماصة القابلة للإشباع غير متفسخة وأن امتصاص السوية المثارة مهمل وأضيف هذا الضياع إلى مجمل الضياعات L في المجابوب. وجرى اعتبار أن معدل الانتقال التلقائي من السوية المثارة إلى السويتين الأرضيتين متناسب عكساً مع نسبة إسكانهما. قمنا بتعديل النموذج الأولي في الفقرة السابقة وإدراج حدود تتعلق بالاستقطاب كما يلي:

$$(8) \quad \frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[\begin{array}{l} 2\sigma(n_2 - n_1)l - 2\sigma_{gs} (^1n_{s_0} \cos^2(\theta - \varphi) + ^2n_{s_0} \sin^2(\theta - \varphi))l_s \\ -\alpha_x \cos^2(\varphi) + \alpha_y \sin^2(\varphi) - \left(\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right) \end{array} \right] + S$$

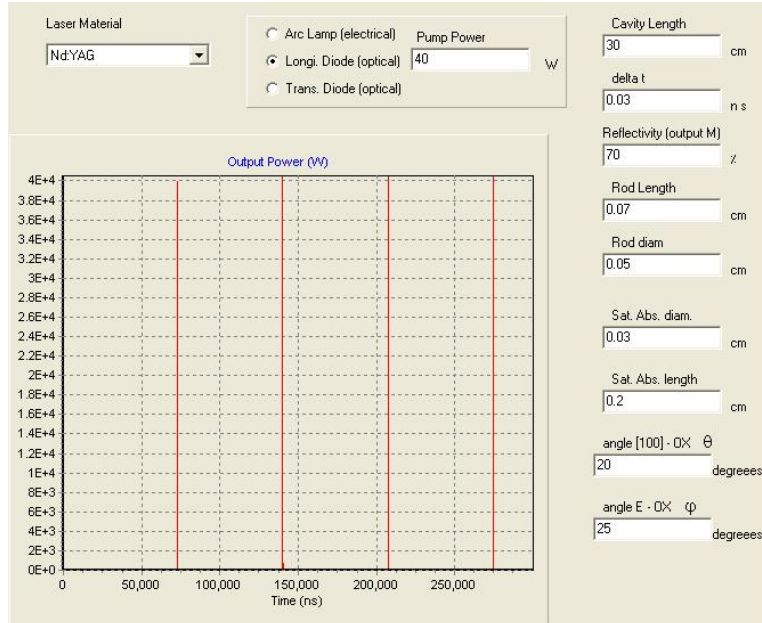
$$(9) \quad \frac{d^1 n_{s0}}{dt} = -\frac{A}{A_s} n_{s0} \cos^2(\theta - \phi) \nu_s \sigma_{gs} \phi + \frac{n_{s1}}{\tau_{gs}} \frac{2n_{s0}}{n_{s0}}$$

$$(10) \quad \frac{d^2 n_{s0}}{dt} = -\frac{A}{A_s} n_{s0} \sin^2(\theta - \phi) \nu_s \sigma_{gs} \phi + \frac{n_{s1}}{\tau_{gs}} \frac{1n_{s0}}{2n_{s0}}$$

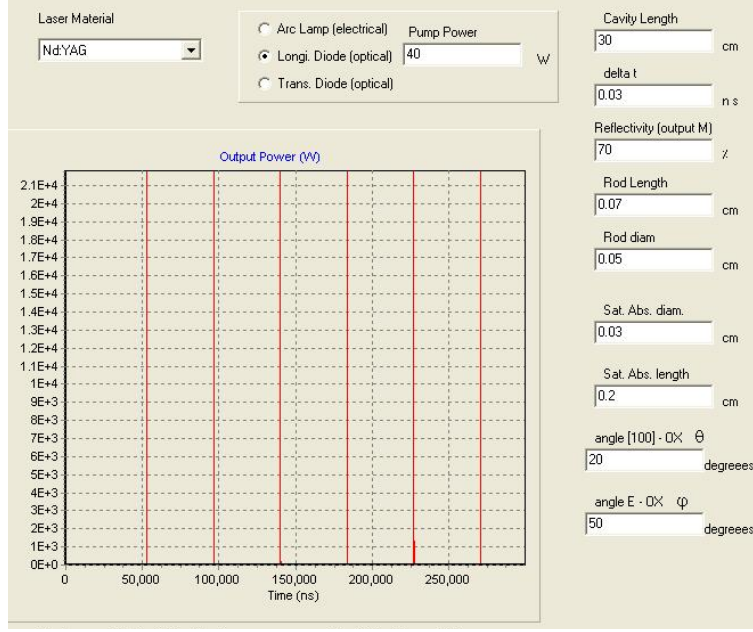
$$(11) \quad n_{s0}^1 + n_{s0}^2 = n_{s0}$$

حيث α_x و α_y هي الضياعات الناتجة عن وجود المقطب ضمن المجاوب.

جرى بناء برنامج حاسوبي جديد لحل هذا النموذج، ويوضح الشكلان 9 و 10 النتائج الحسابية من أجل قيمتين مختلفتين للزاوية ϕ هما 25 و 50 درجة. يظهر جلياً في الشكلين وجود نبضات معدلة الجودة مع اختلاف في تواتر تكرار النبضات واستطاعتها. لا نلاحظ ظاهرة قفل الأنماط في هذه النتائج بسبب إهمال امتصاص السوية المثارة.



الشكل 9: أثر ظاهرة الاستقطاب ضمن النموذج النظري. الزوايا: $\phi = 25^\circ$ ، $\theta = 20^\circ$.



الشكل 10: أثر ظاهرة الاستقطاب ضمن النموذج النظري. الزوايا: 0° ، 90° ، 180° .

4- النموذج الرياضي الحاسوبي المطور

بعد أن تبين في الفقرة السابقة أن الحل التقليدي للنموذج النظري الأولي لا يستطيع أن يوصف بدقة ظاهرة قفل الأنماط ضمن المجاوب لأن العرض الزمني للنبضة مقفلة الأنماط أقل بكثير من زمن الدورة الكاملة، كان لا بد من تطوير هذا النموذج وإيجاد طريقة جديدة للحل. تقوم فكرة هذا العمل على حل النموذج النظري الأولي ضمن شرائح يكون زمن انتشار الضوء فيها أقل بكثير من العرض الزمني للنبضة مقفلة الأنماط، وبذلك لا يؤثر التقريب المعتمد في الحل على ظاهرة قفل الأنماط.

قمنا بتقسيم المجاوب الليزري إلى شرائح ثخن الواحدة منها d ثم بحل النموذج السابق لمعادلات المعدل السبعة ضمن كل شريحة على شكل قرص. نحصر أن يكون عدد الأقراص كبيراً بحيث يكون عدد شرائح المادة الليزرية و البلورة الماصة أكبر من عشرين. يعتبر التدفق الفوتوني على شكل صفيحة ذات $2 \times n_d$ قيمة (الانتشار وفق جهتين متعاكستين). بحساب معدل تغير التدفق ضمن الشريحة الواحدة تصبح المعادلة 7 كالتالي:

$$(12) \quad \frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_d} \left[2\sigma(n_2 - n_1)l^t_d - 2\sigma_{gs}n_{s0}l^t_s - 2\sigma_{es}(n_{s1} - n_{s3})l^t_s - \left(\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right) \right] + S$$

حيث t_d هو زمن انتشار الضوء ضمن الشريحة وهو $t_d = \frac{t_r}{2n_d}$ ، l^t_d هو الطول الضوئي

لشريحة المادة الفعالة، l^t_s هو الطول الضوئي لشريحة المادة الماصة القابلة للإشباع.

يمكن كتابة المعادلة 12 في حالة الانتشار ضمن المادة الفعالة فقط كما يلي:

$$(13) \quad \frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_d} [2\sigma(n_2 - n_1)l^{t_d} - L_1] + S$$

حيث L_1 هو مجموع الضياعات الضوئية غير القابلة للإشباع ضمن شريحة الوسط الليزري.

ويعطى التدفق الفوتوني من أجل المادة الماصة القابلة للإشباع بالمعادلة 14 التالية:

$$(14) \quad \frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_d} [-2\sigma_{gs}n_{s0}l_s^{t_d} - 2\sigma_{es}(n_{s1} - n_{s3})l_s^{t_d} - L_2]$$

حيث L_2 هو مجموع الضياعات الضوئية غير القابلة للإشباع ضمن شريحة المادة الماصة.

يُحل النموذج ضمن كل شريحة مع قيمة التدفق الخاصة بها والتي هي مجموع قيمتي التدفق لاتجاهي الانتشار. يدخل مستثمر البرنامج الحاسوبي قيم الأطوال l_1 و l_2 و l_3 كما في الشكل 11، ويختار أبعاد البلورات ونوع المادة الليزرية ومحددات المجابوب الليزري ونمط الضخ. عند بداية الحل، نعطي للكثافة الفوتونية قيمة عشوائية صغيرة (أصغر من 10 فوتون/سم³) يولدها الحاسب تلقائياً. تزداد كثافة قيم التدفق عند كل تكرار للحل لمحاكاة حركة الفوتونات ضمن المجابوب خلال الدورة الكاملة. نعتبر في هذا النموذج ضياعات إضافية عند السطوح الفاصلة للوسط الفعال والماص القابل للإشباع والعناصر الضوئية الأخرى ضمن المجابوب.

يحسب تدفق الخرج ϕ_o كنسبة من التدفق الكلي ضمن المجابوب عند مرآة الخرج ϕ_c كما

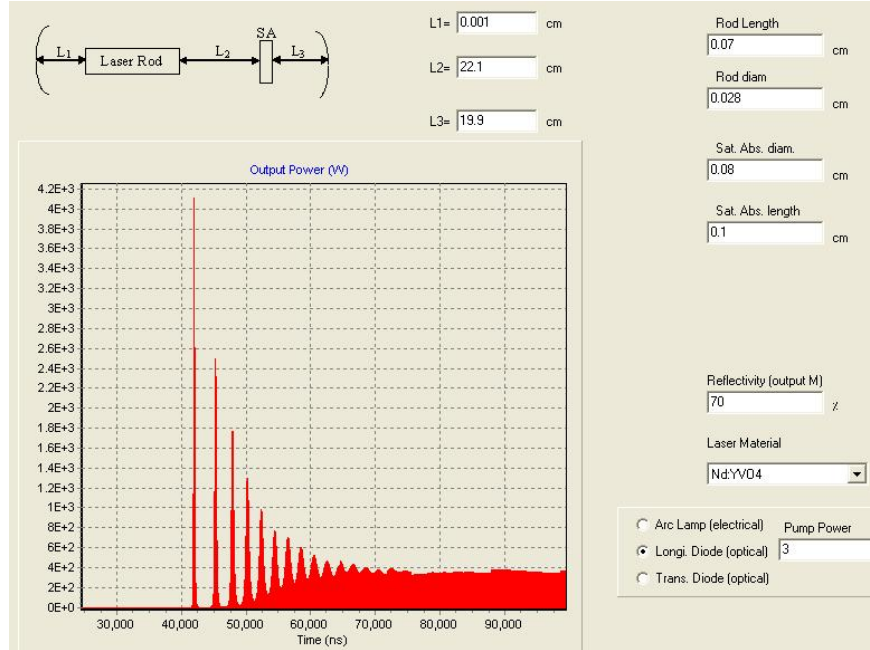
يلي:

$$(15) \quad \phi_o = \phi_c (1 - R)$$

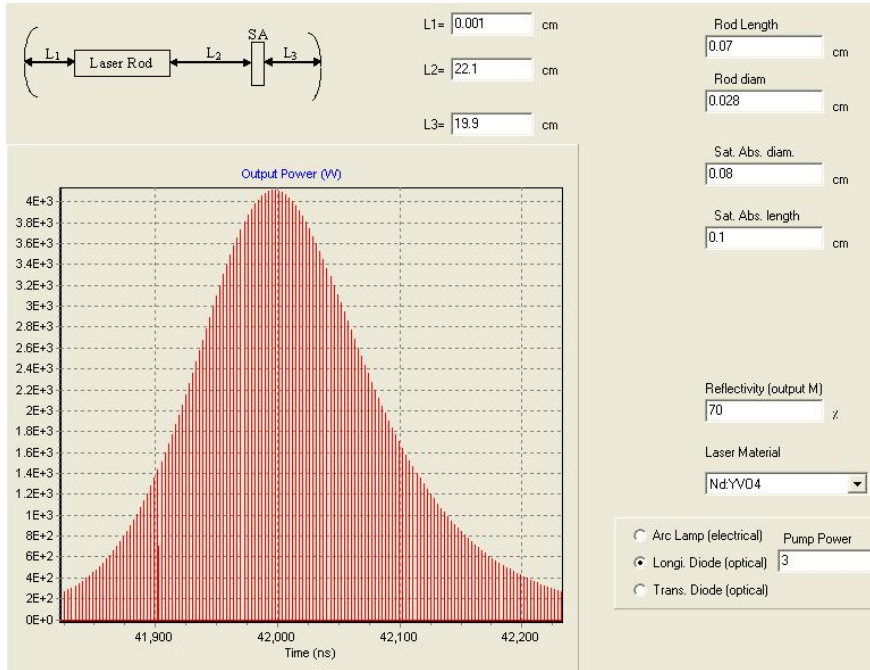
نقوم بالحل العددي لهذا النموذج وفق طريقة Runge-Kutta عند كل شريحة ثم بالحل التكراري للشرائح المختلفة ضمن كامل المجابوب.

1-4- النتائج والمناقشة

نلاحظ عند الحل من أجل قيم محددة لأبعاد البلورة الليزرية والماص القابل للإشباع كما في الشكل 11 أن التزامن بين تعديل الجودة وقفل الأنماط غير ممكن من أجل مختلف استطاعات الضخ. يبين الشكل 11 أن الخرج الليزري مقفل الأنماط فقط مع وجود بعض اهتزازات الاسترخاء عند بداية الإصدار الليزري ذات تواتر تكرار غير محدد. عند تفحص هذه الاهتزازات بعناية نجدها مكونة من نبضات مقفلة الأنماط أيضاً كما في الشكل 12.

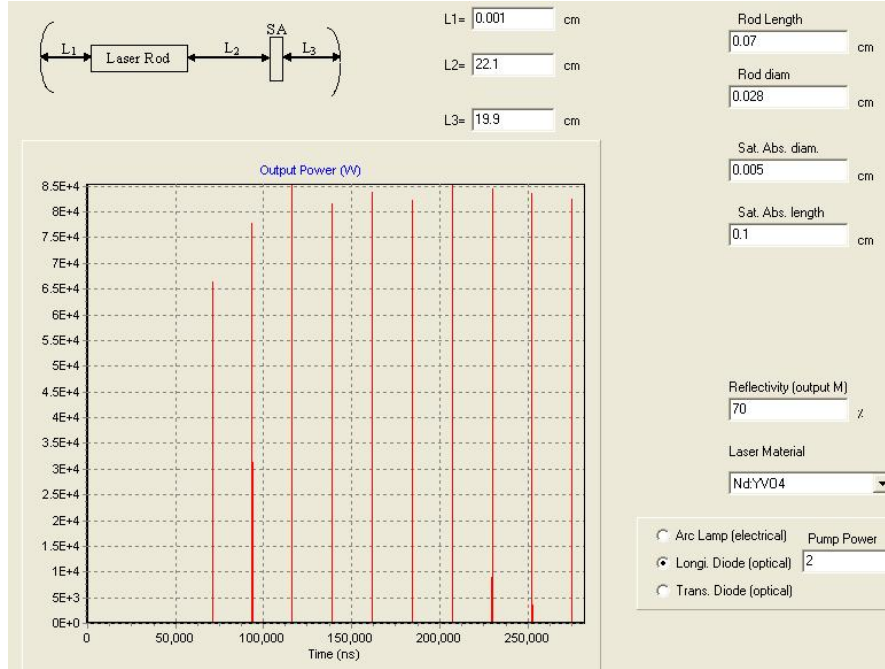


الشكل 11. الخرج الليزري مقفل الأنماط.

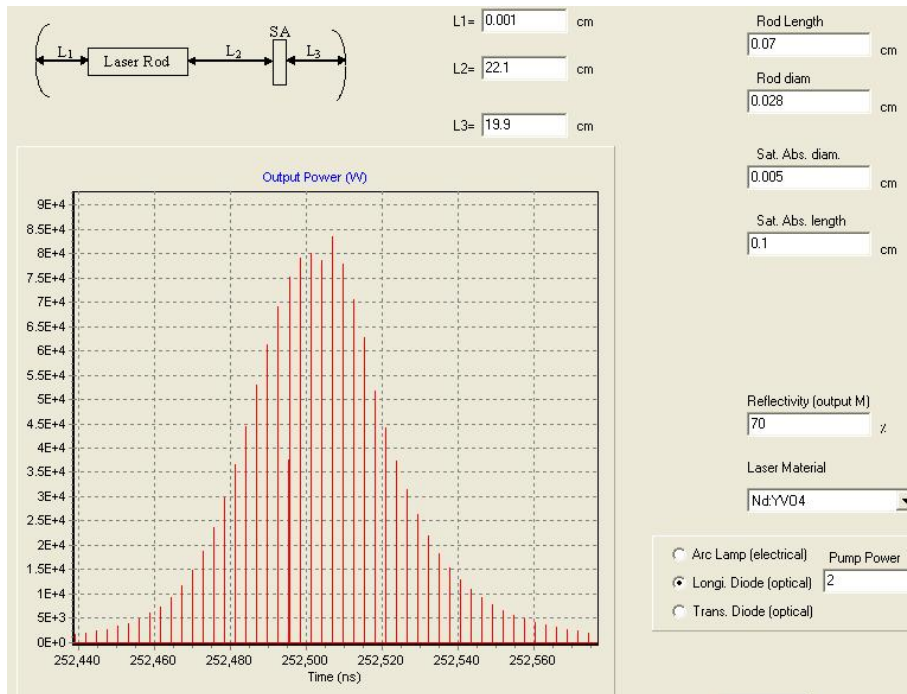


الشكل 12. النبضات مقفلة الأنماط داخل مغلف نبضة الاسترخاء الأولى.

للمقارنة مع النتائج التجريبية، نختار الوسط الفعال بلورة Nd:YVO_4 لها نفس الأبعاد المذكورة في فقرة القسم التجريبي (2)، وكذلك نأخذ نفس القيم التجريبية لأطوال وأبعاد العناصر المختلفة. يعطي الحل العددي للنموذج التغيرات الزمنية للخرج الليزري بميزر عال. جرى الحصول على نبضات مقفلة الأنماط ومعدلة الجودة بأن معاً (الشكل 13) ويتوافق مغلف نبضة تعديل الجودة المحسوب في الشكل 14 مع النتائج التجريبية المعروضة في الشكل 2.

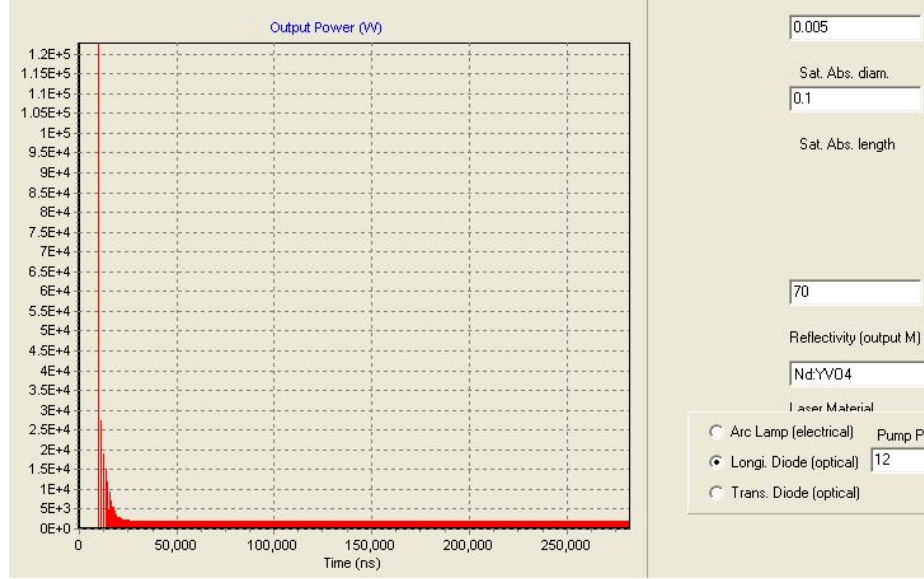


الشكل 13. قطار النبضات معدلة الجودة.



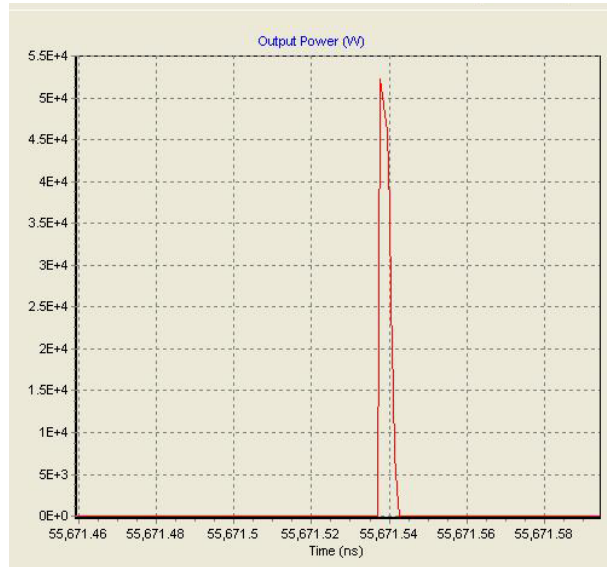
الشكل 14. النبضات مقفلة الأنماط داخل مغلف نبضة تعديل الجودة.

وعند زيادة استطاعة الضخ إلى 12 واط فإننا نلاحظ غياب تعديل الجودة المتزامن وانقلاب الإصدار إلى مقفل الأنماط فقط كما في الشكل 15.



الشكل 15. الإصدار مقفل الأنماط عند استطاعة ضخ قدرها 12 واط.

ييدي النموذج الحاسوبي الجديد تطابقاً جيداً مع النتائج التجريبية من حيث تزامن تعديل الجودة مع قفل الأنماط ومن حيث شكل النبضات مقفلة الأنماط داخل مغلف تعديل الجودة. إلا أن التفحص الدقيق للنبضات مقفلة الأنماط المحسوبة يبين أن العرض الزمني للنبضة الواحدة مقفلة الأنماط (الشكل 16) هو في حدود 5 بيكو ثانية وهو أقل بكثير مما كان متوقفاً. يبين Chen في [5] أن العرض الزمني المقيس للنبضات مقفلة الأنماط ضمن مغلف تعديل الجودة هو حوالي 200 بيكو ثانية.



الشكل 16. نبضة مقفلة الأنماط داخل مغلف نبضة تعديل الجودة.

جرت محاولة تعريض النبضات مقفلة الأنماط بإدراج ضياعات مختلفة ضمن المجاوب الليزري وعند السطوح الفاصلة، إلا أن قيم العرض الزمني بقيت ضمن حدود 7-4.5 بيكو ثانية. قمنا أيضاً بتعديل البرنامج (مما استغرق وقتاً إضافياً للعمل) بإجراء الحساب من أجل 100 نمط

طولي مهتزة عشوائياً إلا أن النتيجة كانت استقرار المجاوب نحو نبضات عرضها الزمني يتراوح حول 5 بيكو ثانية أيضاً.

يمكن أن نستنتج، بعد مراجعة عدد من الدراسات والورقات النظرية في هذا المجال، أن الحل العددي وفق هذا النموذج يعطي حلولاً في حدود القيم النظرية المثالية لبلورتي Nd:YAG و Nd:YVO₄ وهي حوالي 5 بيكو ثانية. إلا أن الحل الدقيق الذي يعطي العرض الزمني للنبضات مقفلة الأنماط وفق الظروف التجريبية المختلفة يجب أن يأخذ بعين الاعتبار العرض الطيفي لكل نمط وأن الحل يمكن أن يجرى وفق تحويلات فورييه [12,11] وهذا ما لا يسعه هذا البحث الحالي. نقتصر في هذا العمل على هذا المقدار ويمكن أن نبحث في نموذج مطور في عمل لاحق.

5- الخاتمة

جرى عرض نموذج عددي قائم بذاته لليزر رباعي السويات مع بلورة Cr⁴⁺:YAG الماصة القابلة للإشباع. يتضمن النموذج معادلات المعدل للوسط الليزري والبلورة الماصة مع اعتبار امتصاص الحالة المثارة. قسم المجاوب الليزري إلى عدد كبير من الشرائح وجرى حل النموذج ضمن كل قرص باعتبار التدفق الفوتوني الخاص به. تراح صفيحة قيم التدفق عند كل تكرار للحل لمحاكاة حركة الفوتونات ضمن المجاوب خلال الدورة الكاملة. جرى حل النموذج عددياً وفق طريقة Runge-Kutta. يستطيع هذا المحاكي توصيف ظواهر ذات زمن أقصر بكثير من زمن الدورة الكاملة. تعطي نمذجة ظاهرة قفل الأنماط وتعديل الجودة المتزامن نتائج عددية مطابقة إلى حد كبير النتائج التجريبية إلا أن العرض الزمني المحسوب للنبضات مقفلة الأنماط هو أقل بكثير من التجربة.

كلمة شكر

نتوجه بالشكر إلى المدير العام لهيئة الطاقة الذرية د. إبراهيم عثمان لدعمه لهذا العمل، وكذلك إلى الزملاء في قسم الفيزياء الذين ساهموا في إنجاحه.

6- المراجع

- 1- D. J. Kuizenga, D. W. Phillion, T. Lund, and A. E. Siegman, *Simultaneous Q-switching and modelocking in the CW Nd:YAG laser*, Opt. Comun. 9, 1973.
- 2- A.A. Mani, Z.D. Schultz, B. Champagne, C. Humbert, L. Dreesen Molecule orientation in self-assembled monolayers determined by infrared-visible sum-frequency generation spectroscopy, Applied Surface Science, 237 (2004) 444-449.
- 3- Y. F. Chen, J. L. Lee and S.W. Tsai, *Simultaneous Q-Switching and Mode-Locking in a Diode-Pumped Nd:YVO₄-Cr⁴⁺:YAG Laser*. IEEE J. Quantum Electron. 38 (2001) 580-586.
- 4- P. K. Mukhopadhyay, M.B. Alsous, K. Ranganathan, S.K. Sharma, P.K. Gupta, J. George, and T.P.S. Nathan, *Simultaneous Q-switching and mode-locking in an intracavity frequency doubled diode-pumped Nd:YVO₄ / KTP green laser with Cr⁴⁺:YAG*, Opt. Commun. 222, 399 (2003).

- 5- Y. F. Chen, J. L. Lee, H. D. Hsieh and S. W. Tsai, *Analysis of Passively Q-Switched Lasers With Simultaneous Modelocking*, IEEE J. Quantum Electron. **QE 38**, 312 (2002)
- 6- P. K. Mukhopadhyay, M.B. Alsous, K. Ranganathan, S.K. Sharma, P.K. Gupta, J. George, and T.P.S.Nathan, *Analysis of laser-diode end-pumped intracavity frequency doubled, passively Q-switched and modelocked Nd:YVO₄ laser*, Appl. Phys. B, 08.09.2004, vol. 79, no. 6, pp. 713-720.
- 7- بحث علمي، د. محمد بهاء الصوص، الدراسة النظرية لقفل الأنماط وتعديل الجودة معاً باستخدام بلورة Cr⁴⁺:YAG في ليزر Nd:YVO₄ مضاعف التواتر داخلياً ببلورة KTP ومضخوخ بديود ليزري، هـ ط ذ س – ف/ت ن ب ع 328، آذار 2005.
- 8- W.Koechner, *Solid state laser engineering* , Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1999).
- 9- A. E. Siegman, *Lasers*. Mill Valley, CA: Univ. Sci. Books, (1986)
- 10-D. Mayorga-Cruz and I.V. Mel'nikov, *Kinetics of a solid-state laser with polarizable saturable absorber*, OPTICS EXPRESS, Vol. 9, No. 9, 2001.
- 11- A. Agnesi and G.C. Reali, *Theory of passive negative feedback in passively mode-locked Nd:host lasers*, Optics Communications, v81, p306,1991
- 12- r. paschotta, *Passive mode locking with slow saturable absorbers*, Applied Physics B:Laser and Optics, v73,P653,2001

7- الملحق 1 : البرنامج الحاسوبي

نعرض فيما يلي البرنامج الحاسوبي النهائي بلغة C++ Builder لحل النموذج النظري المطور مع اعتبار 50 نمط طولي داخل المجاوب الليزري.

```
//-----  
  
#include <vcl.h>  
#include <math.h>  
#pragma hdrstop  
  
#include "rate_all_FE_mode.h"  
//-----  
#pragma package(smart_init)  
#pragma resource "*.dfm"  
TForm1 *Form1;  
//-----  
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)  
    : TForm(Owner)  
{  
    CB_Material->ItemIndex=0;  
    c=3e10;    // cm/s  
    // CR:YAG  
    sig_gs=7e-18;  
    sig_es=2e-18;  
    Tsg=4.1e-6;  
    Tse=0.1e-9;  
    RefInd_SA=1.8;  
    nmodes=50;  
    //sig_es=0;    //In case of 3-level-Saturable absorb  
    //default material Nd:YAG  
    Tf=230e-6;  
    sig=6.5e-19;  
    T21=406e-6;  
    T20=530e-6;  
    RefInd_amp=1.82;  
    T10=30e-9; //common for all materials  
  
    Pump_effic=0.74; // default pumping: Diode long.  
}  
//-----  
long double TForm1::differ_n2(long double nn0,long double nn1,long double nn2,long double fifi)  
{  
    long double diff;  
    diff=-(nn2-nn1)*sig*fifi*c_amplif-nn2/Tf+Wp*nn0;  
    //diff=-2*L_rod*sig*fifi*nn/Tr-nn/Tf+Wp*(n_tot-nn);  
    return(diff);  
}  
//-----  
long double TForm1::differ_n0(long double nn0,long double nn1,long double nn2,long double fifi)  
{  
    long double diff;  
    diff=-Wp*nn0+nn2/T20+nn1/T10;  
    //diff=-2*L_rod*sig*fifi*nn/Tr-nn/Tf+Wp*(n_tot-nn);
```

```

return(diff);
}
//-----
long double TForm1::differ_n1(long double nn0,long double nn1,long double nn2,long double fifi)
{
long double diff;
diff=(nn2-nn1)*sig*fifi*c_amplif-nn1/T10+nn2/T21;
//diff=-2*L_rod*sig*fifi*nn/Tr-nn/Tf+Wp*(n_tot-nn);
return(diff);
}
//-----
long double TForm1::differ_fi_FW_amplif(long double nn0,long double nn1,long double nn2,long double
fi_FW)
{
long double diff,sig_eff=sig;
if(ii*2!=nmodes) sig_eff=sig/fabs(nmodes-ii*2);

diff=sig_eff* c_amplif*((fi_FW+1)*nn2-fi_FW*nn1)-fi_FW*0.01;
return(diff);
}
//-----
long double TForm1::differ_fi_BW_amplif(long double nn0,long double nn1,long double nn2,long double
fi_BW)
{
long double diff,sig_eff=sig;
if(ii*2!=nmodes) sig_eff=sig/fabs(nmodes-ii*2);
diff=sig_eff* c_amplif*((fi_BW+1)*nn2-fi_BW*nn1)-fi_BW*0.01;
return(diff);
}
//-----
long double TForm1::differ_fi_FW_absorb(long double nns0,long double nns1,long double nns3,long
double fi_FW)
{
long double diff;
//double K= 2*L_rod*sig/Tr;
diff=-fi_FW*c_SA*(sig_gs*nns0+sig_es*(nns1-nns3))-fi_FW*0.005;;
return(diff);
}
//-----
long double TForm1::differ_fi_BW_absorb(long double nns0,long double nns1,long double nns3,long
double fi_BW)
{
long double diff;
//double K= 2*L_rod*sig/Tr;
diff=-fi_BW*c_SA*(sig_gs*nns0+sig_es*(nns1-nns3))-fi_BW*0.005;;
return(diff);
}
//-----
long double TForm1::differ_ns0(long double nns0,long double nns1,long double nns3,long double fifi)
{
long double diff;
diff=-A_Rod/As*nns0*sig_gs*fifi*c_SA+nns1/Tsg;
return(diff);
}
//-----
long double TForm1::differ_ns1(long double nns0,long double nns1,long double nns3,long double fifi)

```

```

{
long double diff;
diff=A_Rod/As*nns0*sig_gs* fifi* c_SA- nns1/Tsg-A_Rod/As*(nns1-nns3)*sig_es*fifi*
c_SA+nns3/Tse;
return(diff);
}
//-----
long double TForm1::differ_ns3(long double nns0,long double nns1,long double nns3,long double fifi)
{
long double diff;
diff=A_Rod/As*(nns1-nns3)*sig_es*fifi*c_SA-nns3/Tse;
return(diff);
}
//-----
void TForm1::calc (void)
{
long double Iconvert=c*1.86e-19* (1-R)/(1+R) * A_Rod;
long double fi0=0,fi2,fi,abs_fi,*fi_FW_p;
double *ff1, *ff2;
int nmax=100000,pos,i,j,k,pos_bw;
Series1->AddXY(0,0,"",clTeeColor);
for (i=0;i<nmax;i++)
{
for (j=0;j<niter;j++)
{
pos=n_space1-j;
if (pos<0) pos=niter+pos;
pos_bw=pos+j;
if (pos_bw>=niter) pos_bw=pos_bw-niter;
pos_bw=(niter-1)-pos_bw-j;
if (pos_bw<0) pos_bw=niter-1+pos_bw;

Int_reflect(&fi_tab[pos][0],&fi_tab[pos_bw][0]);

for (k=0;k<n_amplif;k++)
{
RK_amplif(&n0_tab[k],&n1_tab[k],&n2_tab[k],&fi_tab[pos][0],&fi_tab[pos_bw][0]);
pos++;
if (pos==niter) pos=0;
pos_bw--;
if (pos_bw<0) pos_bw=niter-1+pos_bw;
}

Int_reflect(&fi_tab[pos][0],&fi_tab[pos_bw][0]);

pos=pos+n_space2;
if (pos>=niter) pos=pos-niter;
pos_bw=pos+j;
if (pos_bw>=niter) pos_bw=pos_bw-niter;
pos_bw=(niter-1)-pos_bw-j;
if (pos_bw<0) pos_bw=niter-1+pos_bw;

Int_reflect(&fi_tab[pos][0],&fi_tab[pos_bw][0]);

for (k=0;k<n_absorb;k++)
{

```

```

    RK_absorb(&ns0_tab[k],&ns1_tab[k],&ns3_tab[k],&fi_tab[pos][0],&fi_tab[pos_bw][0]);
    pos++;
    if (pos==niter) pos=0;
    pos_bw--;
    if (pos_bw<0) pos_bw=niter+pos_bw;
}
//fi_tab[(niter-1)-pos]=fi_tab[(niter-1)-pos]*0.99;

Int_reflect(&fi_tab[pos][0],&fi_tab[pos_bw][0]);

pos=pos+n_space3;
if (pos>=niter) pos=pos-niter;
fi=sum_mods(&fi_tab[pos][0])*(1-R);
fi_FW_p=&fi_tab[pos][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
    *fi_FW_p=*fi_FW_p*R;
    fi_FW_p++;
}
abs_fi=fabsl(fi-fi0);
if ((abs_fi>0.1*fi && fi>1e12) || (i==(nmax-1)))
{
    Series1->AddXY(t*1e+9,Iconvert*fi,"",clTeeColor);
    fi0=fi;
}
else
{
    if (abs_fi>8*fi)
    {
        Series1->AddXY(t*1e+9,Iconvert*fi,"",clTeeColor);
        fi0=fi;
    }
}
t=t+h;
}
//Update();
}
Epower->Text=FloatToStr(fi*Iconvert);
//Epopulation->Text=FloatToStr(n2);
}

//-----
void TForm1::RK_amplif(long double *nn0,long double *nn1,long double *nn2,long double *ffi_FW,long
double *ffi_BW)
{
    long double
    k[4][5],kk[3][5][50],*kk_FW_p,*kk_BW_p,ffifi,n0=*nn0,n1=*nn1,n2=*nn2,fi_FW[50],*fi_FW_p,fi_BW[
50],*fi_BW_p;
    long double aux1,aux2,aux3,aux[3][50],*aux_FW_p,*aux_BW_p,sumfi;

    fi_FW_p=ffi_FW;
    fi_BW_p=ffi_BW;
    /* for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
    {
        fi_FW[ii]= *ffi_FW;

```

```

    fi_BW[ii]= *fi_BW_p;
    fi_FW_p++;
    fi_BW_p++;
}
for (ii=0;ii<nmodes;ii++) fi_BW[ii]= *ffi_BW; */
sumfi=sum_mods(ffi_FW)+ sum_mods(ffi_BW);

k[1][1]=h*differ_n0(n0,n1,n2,sumfi);
k[2][1]=h*differ_n1(n0,n1,n2,sumfi);
k[3][1]=h*differ_n2(n0,n1,n2,sumfi);

fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
kk_FW_p=&kk[1][1][0];
kk_BW_p=&kk[2][1][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
    *kk_FW_p=h*differ_fi_FW_amlif(n0,n1,n2,*fi_FW_p);
    *kk_BW_p=h*differ_fi_BW_amlif(n0,n1,n2,*fi_BW_p);
    fi_FW_p++;
    fi_BW_p++;
    kk_FW_p++;
    kk_BW_p++;
}

aux1=n0+ k [1][1] /2;
aux2=n1+ k [2][1] /2;
aux3=n2+ k [3][1] /2;

sumfi=0;
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
kk_FW_p=&kk[1][1][0];
kk_BW_p=&kk[2][1][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
    *aux_FW_p=*fi_FW_p+ *kk_FW_p /2;
    *aux_BW_p=*fi_BW_p+ *kk_BW_p /2;
    sumfi=sumfi+*aux_FW_p+*aux_BW_p;
    aux_FW_p++;
    aux_BW_p++;
    fi_FW_p++;
    fi_BW_p++;
    kk_FW_p++;
    kk_BW_p++;
}

//aux3=t+h/2;
k[1][2]=h*differ_n0(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[2][2]=h*differ_n1(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[3][2]=h*differ_n2(aux1,aux2,aux3,sumfi);

aux_FW_p=&aux[1][0];

```



```

aux_BW_p=&aux[2][0];
kk_FW_p=&kk[1][2][0];
kk_BW_p=&kk[2][2][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*kk_FW_p=h*differ_fi_FW_amlif(aux1,aux2,aux3,*aux_FW_p);
*kk_BW_p=h*differ_fi_BW_amlif(aux1,aux2,aux3,*aux_BW_p);
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

```

```

aux1=n0+ k [1][2] /2;
aux2=n1+ k [2][2] /2;
aux3=n2+ k [3][2] /2;
sumfi=0;
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
kk_FW_p=&kk[1][2][0];
kk_BW_p=&kk[2][2][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*aux_FW_p=fi_FW_p+ *kk_FW_p /2;
*aux_BW_p=fi_BW_p+ *kk_BW_p /2;
sumfi=sumfi+*aux_FW_p+*aux_BW_p;
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
fi_FW_p++;
fi_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

```

```

k[1][3]=h*differ_n0(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[2][3]=h*differ_n1(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[3][3]=h*differ_n2(aux1,aux2,aux3,sumfi);
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
kk_FW_p=&kk[1][3][0];
kk_BW_p=&kk[2][3][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*kk_FW_p=h*differ_fi_FW_amlif(aux1,aux2,aux3,*aux_FW_p);
*kk_BW_p=h*differ_fi_BW_amlif(aux1,aux2,aux3,*aux_BW_p);
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

```

```

aux1=n0+ k [1][3];
aux2=n1+ k [2][3];
aux3=n2+ k [3][3];

```

```

sumfi=0;
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
kk_FW_p=&kk[1][3][0];
kk_BW_p=&kk[2][3][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*aux_FW_p=*fi_FW_p+ *kk_FW_p ;
*aux_BW_p=*fi_BW_p+ *kk_BW_p ;
sumfi=sumfi+*aux_FW_p+*aux_BW_p;
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
fi_FW_p++;
fi_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

k[1][4]=h*differ_n0(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[2][4]=h*differ_n1(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[3][4]=h*differ_n2(aux1,aux2,aux3,sumfi);
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
kk_FW_p=&kk[1][4][0];
kk_BW_p=&kk[2][4][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*kk_FW_p=h*differ_fi_FW_amlif(aux1,aux2,aux3,*aux_FW_p);
*kk_BW_p=h*differ_fi_BW_amlif(aux1,aux2,aux3,*aux_BW_p);
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

n0=n0+(k[1][1]+2*k[1][2]+2*k[1][3]+k[1][4])/6;
n1=n1+(k[2][1]+2*k[2][2]+2*k[2][3]+k[2][4])/6;
n2=n2+(k[3][1]+2*k[3][2]+2*k[3][3]+k[3][4])/6;

fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*fi_FW_p=*fi_FW_p+(kk[1][1][ii]+2*kk[1][2][ii]+2*kk[1][3][ii]+kk[1][4][ii])/6;
*fi_BW_p=*fi_BW_p+(kk[2][1][ii]+2*kk[2][2][ii]+2*kk[2][3][ii]+kk[2][4][ii])/6;
if (*fi_FW_p<0) *fi_FW_p=1e-50;
if (*fi_BW_p<0) *fi_BW_p=1e-50;
fi_FW_p++;
fi_BW_p++;
}

if (n0>n_tot) n0=n_tot;
if (n0<0) n0=0;

```

```

if (n1>n_tot) n1=n_tot;
if (n1<0) n1=0;
if (n2>n_tot) n2=n_tot;
if (n2<0) n2=0;

*nn0=n0;
*nn1=n1;
*nn2=n2;

}
//-----
void TForm1::RK_absorb (long double *nns0,long double *nns1,long double *nns3,long double
*ffi_FW,long double *ffi_BW)
{
long double
k[4][5],kk[3][5][50],*kk_FW_p,*kk_BW_p,fifi,ns0=*nns0,ns1=*nns1,ns3=*nns3,fi_FW[50],*fi_FW_p,fi_
BW[50],*fi_BW_p;
long double aux1,aux2,aux3,aux[3][50],*aux_FW_p,*aux_BW_p,sumfi;

fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
/* for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
fi_FW[ii]= *ffi_FW;
fi_BW[ii]= *fi_BW_p;
fi_FW_p++;
fi_BW_p++;
}
for (ii=0;ii<nmodes;ii++) fi_BW[ii]= *ffi_BW; */
sumfi=sum_mods (ffi_FW)+ sum_mods(ffi_BW);

k[1][1]=h*differ_ns0(ns0,ns1,ns3,sumfi);
k[2][1]=h*differ_ns1(ns0,ns1,ns3,sumfi);
k[3][1]=h*differ_ns3(ns0,ns1,ns3,sumfi);

fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
kk_FW_p=&kk[1][1][0];
kk_BW_p=&kk[2][1][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*kk_FW_p=h*differ_fi_FW_absorb(ns0,ns1,ns3,*fi_FW_p);
*kk_BW_p=h*differ_fi_BW_absorb(ns0,ns1,ns3,*fi_BW_p);
fi_FW_p++;
fi_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

aux1=ns0+ k [1][1] /2;
aux2=ns1+ k [2][1] /2;
aux3=ns3+ k [3][1] /2;
sumfi=0;
aux_FW_p=&aux[1][0];

```

```

aux_BW_p=&aux[2][0];
fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
kk_FW_p=&kk[1][1][0];
kk_BW_p=&kk[2][1][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*aux_FW_p=*fi_FW_p+ *kk_FW_p /2;
*aux_BW_p=*fi_BW_p+ *kk_BW_p /2;
sumfi=sumfi+*aux_FW_p+*aux_BW_p;
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
fi_FW_p++;
fi_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

```

```

k[1][2]=h*differ_ns0(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[2][2]=h*differ_ns1(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[3][2]=h*differ_ns3(aux1,aux2,aux3,sumfi);
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
kk_FW_p=&kk[1][2][0];
kk_BW_p=&kk[2][2][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*kk_FW_p=h*differ_fi_FW_absorb(aux1,aux2,aux3,*aux_FW_p);
*kk_BW_p=h*differ_fi_BW_absorb(aux1,aux2,aux3,*aux_BW_p);
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

```

```

aux1=ns0+ k [1][2] /2;
aux2=ns1+ k [2][2] /2;
aux3=ns3+ k [3][2] /2;
sumfi=0;
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
kk_FW_p=&kk[1][2][0];
kk_BW_p=&kk[2][2][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*aux_FW_p=*fi_FW_p+ *kk_FW_p /2;
*aux_BW_p=*fi_BW_p+ *kk_BW_p /2;
sumfi=sumfi+*aux_FW_p+*aux_BW_p;
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
fi_FW_p++;
fi_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

```

```

}

k[1][3]=h*differ_ns0(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[2][3]=h*differ_ns1(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[3][3]=h*differ_ns3(aux1,aux2,aux3,sumfi);
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
kk_FW_p=&kk[1][3][0];
kk_BW_p=&kk[2][3][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*kk_FW_p=h*differ_fi_FW_absorb(aux1,aux2,aux3,*aux_FW_p);
*kk_BW_p=h*differ_fi_BW_absorb(aux1,aux2,aux3,*aux_BW_p);
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

aux1=ns0+ k [1][3];
aux2=ns1+ k [2][3];
aux3=ns3+ k [3][3];
sumfi=0;
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
kk_FW_p=&kk[1][3][0];
kk_BW_p=&kk[2][3][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*aux_FW_p=*fi_FW_p+ *kk_FW_p ;
*aux_BW_p=*fi_BW_p+ *kk_BW_p ;
sumfi=sumfi+*aux_FW_p+*aux_BW_p;
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
fi_FW_p++;
fi_BW_p++;
kk_FW_p++;
kk_BW_p++;
}

k[1][4]=h*differ_ns0(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[2][4]=h*differ_ns1(aux1,aux2,aux3,sumfi);
k[3][4]=h*differ_ns3(aux1,aux2,aux3,sumfi);
aux_FW_p=&aux[1][0];
aux_BW_p=&aux[2][0];
kk_FW_p=&kk[1][4][0];
kk_BW_p=&kk[2][4][0];
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*kk_FW_p=h*differ_fi_FW_absorb(aux1,aux2,aux3,*aux_FW_p);
*kk_BW_p=h*differ_fi_BW_absorb(aux1,aux2,aux3,*aux_BW_p);
aux_FW_p++;
aux_BW_p++;
kk_FW_p++;
}

```

```

kk_BW_p++;
}

ns0=ns0+(k[1][1]+2*k[1][2]+2*k[1][3]+k[1][4])/6;
ns1=ns1+(k[2][1]+2*k[2][2]+2*k[2][3]+k[2][4])/6;
ns3=ns3+(k[3][1]+2*k[3][2]+2*k[3][3]+k[3][4])/6;
fi_FW_p=ffi_FW;
fi_BW_p=ffi_BW;
for (ii=0;ii<nmodes;ii++)
{
*fi_FW_p=*fi_FW_p+(kk[1][1][ii]+2*kk[1][2][ii]+2*kk[1][3][ii]+kk[1][4][ii])/6;
*fi_BW_p=*fi_BW_p+(kk[2][1][ii]+2*kk[2][2][ii]+2*kk[2][3][ii]+kk[2][4][ii])/6;
if (*fi_FW_p<0) *fi_FW_p=1e-50;
if (*fi_BW_p<0) *fi_BW_p=1e-50;
fi_FW_p++;
fi_BW_p++;
}

if (ns0>ns_init) ns0=ns_init;
if (ns0<0) ns0=0;
if (ns1>ns_init) ns1=ns_init;
if (ns1<0) ns1=0;
if (ns3>ns_init) ns3=ns_init;
if (ns3<0) ns3=0;

*nns0=ns0;
*nns1=ns1;
*nns3=ns3;
}
//-----
void __fastcall TForm1::BB_okClick(TObject *Sender)
{
R=Er_mirror->Text.ToDouble()/100;
double L_space1=E_L1->Text.ToDouble();
double L_space2=E_L2->Text.ToDouble();
double L_space3=E_L3->Text.ToDouble();
L_rod=Erod_length->Text.ToDouble();
L_SA=ESA_length->Text.ToDouble();
double d_rod=Ediam_rod->Text.ToDouble();
double d_SA=Ediam_SA->Text.ToDouble();
//double h=Edelta_T->Text.ToDouble()*1e-9;
IntReflect=Eback_ref->Text.ToDouble()/100;
double opt_L_rod=L_rod*RefInd_amp;
double opt_L_SA=L_SA*RefInd_SA;
long double L=L_space1+opt_L_rod+L_space2+opt_L_SA+L_space3;
long double step1=1./100.; //in cm # t=0.5 ps
if (step1*5 > opt_L_SA) step1= opt_L_SA/5;
if (step1*10 > opt_L_rod) step1= opt_L_rod/10;
n_amplif=opt_L_rod/step1+0.5;
long double L_rod_effect= step1*n_amplif/RefInd_amp;
n_absorb=opt_L_SA/step1+0.5;
long double L_SA_effect=step1*n_absorb/RefInd_SA;
n_space1=L_space1/step1+1;
n_space2=L_space2/step1+1;
n_space3=L_space3/step1+1;
niter=(n_amplif+ n_absorb+n_space1+ n_space2+n_space3) *2;

```

```

h=2*L/niter/c;
//double L_iter_ampli=L_rod/n_amlif;
//double L_iter_SA= L_SA/n_absorb;

delete [] fi_tab;
delete [] n0_tab;
delete [] n1_tab;
delete [] n2_tab;
delete [] ns0_tab;
delete [] ns1_tab;
delete [] ns3_tab;

//fi_tab=new long double [niter+1];
n0_tab=new long double [n_amplif+1];
n1_tab=new long double [n_amplif+1];
n2_tab=new long double [n_amplif+1];
ns0_tab=new long double [n_absorb+1];
ns1_tab=new long double [n_absorb+1];
ns3_tab=new long double [n_absorb+1];

A_Rod=M_PI*d_rod*d_rod/4;
As=M_PI*d_SA*d_SA/4;
n_tot=1.38e20;
//n0=n_tot;
ns_init=2.5e17;
V_rod_effect=A_Rod*L_rod_effect;
Wp=Epump->Text.ToDouble()/2.43e-19/V_rod_effect*Pump_effic;
Wp=Wp/n_tot;
c_SA=c/RefInd_SA;
c_amplif=c/RefInd_amp;
randomize();
float x;

int i;
for (i=0;i<niter;i++)
    for(ii=0;i<nmodes;i++)
        fi_tab[i][ii]=(float)rand()/(float)RAND_MAX*1.0e3;
for (i=0;i<n_amplif;i++)
    n0_tab[i]=n_tot;
for (i=0;i<n_amplif;i++)
    n1_tab[i]=1.0e3*(float)rand()/(float)RAND_MAX;
for (i=0;i<n_amplif;i++)
    n2_tab[i]=(float)rand()/(float)RAND_MAX*1.0e3;
for (i=0;i<n_absorb;i++) ns0_tab[i]=ns_init;
for (i=0;i<n_absorb;i++)
    ns1_tab[i]=(float)rand()/(float)RAND_MAX*1.0e2;
for (i=0;i<n_absorb;i++) ns3_tab[i]=0;

Tr=2*L/c;
Tc=Tr/(0.005-log(R));

Series1->Clear();
t=0;
//ns_init=1e18;
//ns0=ns_init;
//ns1=0;ns3=0;

```

```

//n1=0;
//n2=0;
//fi=0;
calc();
//calc(h*100);
}
//-----

void __fastcall TForm1::RBlampClick(TObject *Sender)
{
    Pump_effic=0.025;
}
//-----

void __fastcall TForm1::RBlong_diodeClick(TObject *Sender)
{
    Pump_effic=0.74;
}
//-----

void __fastcall TForm1::RBtrans_diodeClick(TObject *Sender)
{
    Pump_effic=0.55;
}
//-----

void __fastcall TForm1::CB_MaterialChange(TObject *Sender)
{
    if (CB_Material->ItemIndex==0) // Nd:YAG
    {
        Tf=230e-6;
        sig=6.5e-19;
        T21=406e-6;
        T20=530e-6;
        RefInd_amp=1.82;
    }
    if (CB_Material->ItemIndex==1) // Nd:YVO4
    {
        Tf=100e-6;
        sig=15.6e-19;
        T21=180e-6;
        T20=225e-6;
        RefInd_amp=2.165;
    }
    if (CB_Material->ItemIndex==2) // Nd: Glass
    {
        Tf=320e-6;
        sig=4e-20;
        T21=600e-6;
        T20=685e-6;
        RefInd_amp=1.53;
    }
}
//-----
long double TForm1::sum_mods( long double* x)

```



```

{
long double sum_m=0,*point;
point=x;
for (int i=0;i<nmodes;i++)
{
sum_m=sum_m+*point;
point++;
}
return(sum_m);
}
//-----
void TForm1::Int_reflect( long double* ff1,long double*ff2)
{
long double *ff1_p,*ff2_p;
ff1_p=ff1;
ff2_p=ff2;

for (int cc=0;cc<nmodes;cc++)
{
*ff1_p=*ff1_p*(1-IntReflect)+IntReflect* *ff2;
*ff2_p=*ff2_p*(1-IntReflect)+IntReflect* *ff1;
ff1_p++;
ff2_p++;
}
}
//-----

```

مقدمة البرنامج الحاسوبي (Header File .h)

```
//-----  
  
#ifndef rate_all_FE_modeH  
#define rate_all_FE_modeH  
//-----  
#include <Classes.hpp>  
#include <Controls.hpp>  
#include <StdCtrls.hpp>  
#include <Forms.hpp>  
#include <Buttons.hpp>  
#include <Chart.hpp>  
#include <ExtCtrls.hpp>  
#include <Series.hpp>  
#include <TeEngine.hpp>  
#include <TeeProcs.hpp>  
#include <Graphics.hpp>  
//-----  
class TForm1 : public TForm  
{  
    __published: // IDE-managed Components  
        TBitBtn *BB_ok;  
        TChart *Chart1;  
        TFastLineSeries *Series1;  
        TEdit *Edelta_T;  
        TLabel *Label1;  
        TLabel *Label2;  
        TEdit *Erod_length;  
        TLabel *Label3;  
        TLabel *Label4;  
        TEdit *Ediam_rod;  
        TLabel *Label5;  
        TLabel *Label6;  
        TEdit *Epower;  
        TEdit *Epopulation;  
        TLabel *Label11;  
        TLabel *Label12;  
        TEdit *Er_mirror;  
        TPanel *Panel1;  
        TLabel *Label7;  
        TLabel *Label8;  
        TEdit *Epump;  
        TRadioButton *RBlamp;  
        TRadioButton *RBlong_diode;  
        TRadioButton *RBtrans_diode;  
        TLabel *Label13;  
        TLabel *Label14;  
        TLabel *Label15;  
        TLabel *Label16;  
        TEdit *Ediam_SA;  
        TLabel *Label17;  
        TLabel *Label18;  
        TEdit *ESA_length;
```

```

TComboBox *CB_Material;
TLabel *Label19;
TImage *Image1;
TLabel *Label20;
TEdit *E_L1;
TLabel *Label21;
TLabel *Label22;
TEdit *E_L2;
TLabel *Label23;
TLabel *Label24;
TEdit *E_L3;
TLabel *Label25;
TEdit *Eback_ref;
TLabel *Label9;
TLabel *Label10;
void __fastcall BB_okClick(TObject *Sender);
void __fastcall RBlampClick(TObject *Sender);
void __fastcall RBlong_diodeClick(TObject *Sender);
void __fastcall RBtrans_diodeClick(TObject *Sender);
void __fastcall CB_MaterialChange(TObject *Sender);
private: // User declarations
public: // User declarations
    long double c,S,sig,Tf,Tc,n_tot,Wp,t,sig_gs,sig_es,Tse,Tsg,ns_init;
    long double fi_tab[10000][50],*n0_tab,*n1_tab,*n2_tab,*ns0_tab,*ns1_tab,*ns3_tab,h;
    double L_rod,Tr,R,A_Rod,V_rod_effect,T21,T20,T10,Pump_effic,L_SA,As;
    double RefInd_SA,RefInd_amp,c_amplif,c_SA,IntReflect;
    int nmodes,ii,niter,n_space1,n_space2,n_amplif,n_absorb,n_space3;
    long double differ_n0(long double,long double,long double,long double);
    long double differ_n1(long double,long double,long double,long double);
    long double differ_n2(long double,long double,long double,long double);
    long double differ_fi_FW_amlif(long double,long double,long double,long double);
    long double differ_fi_BW_amlif(long double,long double,long double,long double);
    long double differ_fi_FW_absorb(long double,long double,long double,long double);
    long double differ_fi_BW_absorb(long double,long double,long double,long double);
    long double differ_ns0(long double,long double,long double,long double);
    long double differ_ns1(long double,long double,long double,long double);
    long double differ_ns3(long double,long double,long double,long double);
    void RK_amplif(long double*,long double*,long double*,long double*,long double*);
    void RK_absorb(long double*,long double*,long double*,long double*,long double*);
    long double sum_mods(long double*);
    void Int_reflect(long double*,long double*);
    void calc(void);
    __fastcall TForm1(TComponent* Owner);
};
//-----
extern PACKAGE TForm1 *Form1;
//-----
#endif

```

SYRIAN ARAB REPUBLIC
ATOMIC ENERGY COMMISSION
DAMASCUS- P.O.BOX: 6091



Final Report on Scientific Research
Department of Physics

**Study of simultaneous Q-switching and mode-locking in
Nd:YVO₄ laser with Cr⁴⁺:YAG crystal**

Dr. M. B. Alsous