198/R

الجمهورية العربية السورية
هيئة الطاقة الذرية
دمشق – ص. ب ٦٠٩١

تقرير عن دراسة علمية حاسوبية

قسم الخدمات العلمية

توليد نبضات من مرتبة بيكو ثانية باستخدام ليزر نيوديميوم – زجاج كمنبع لضخ ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي

الدكتور بشار عبد الغني
السيد مصطفى حمادي

هـ ط ذ س - خ ع/ت د ع ٥٧٥ آب ٢٠٠٤

المحتويات

1- الخلاصة:

درس في هذا العمل السلوك الزمني لليزر نيوديميوم- زجاج وليزر توزع التغذيـة العكسـية الصـباغي (DFDL). تم تحقيق التغذية العكسية بوساطة الكسب الضوئي وقرينـة الانكسـار. يصـف النمـوذج الرياضي المقترح ديناميكية الإصدار لليزر نيوديميوم- زجاج وليزر توزع التغذيـة العكسـية الصـباغي ودرجة حرارة شبكة الإنعراج المتولدة في المحلول الصباغي. يسمح النموذج أيضاً بدراسة تأثير وسـائط الدخل على نبضات الخرج الليزري في الهزاز الرئيسي وفي ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي. نوقش زمن اضمحلال التجويف الناتج عن تحقيق التغذية العكسية بوساطة قرينة الانكسارفقط والكسب الضـوئي وقرينة الانكسار معاً،كما نوقش عرض النبضة، الدور بين نبضتين متتـاليتين ودرجـة حـرارة شـبكة الإنعراج المتولدة لليزر توزع التغذية العكسية الصباغي. تتنبأ الحلول العددية لجملـة معـادلات المعـدل المقترنة بتوليد نبضات من مرتبة النانو ثانية لليزر نيوديميوم- زجاج ونبضات من مرتبة البيكـو ثانيـة لليزر توزع التغذية العكسية الصباغي. يعطي النموذج تقديراً لكثافة الإشعاع الصادر والكثافـة الطاقيـة لحالة الاحادي والثلاثي واستطاعة الدخل والخرج لليزر توزع التغذية العكسية الصباغي ودرجة حـرارة شبكة الانعراج. تعطي النتائج توافقاً مقبولاً مع المعطيات التجريبية.

2- المقدمة:

يعتبر الليزر الصباغي من أكثر الليزرات القابلة للتوليف استخداماً على نطاق واسع نظراً لإمكانية التوليف المستمر والعصابة الضيقة (عرض الخط الضيق) والمجال الطيفي الواسع والأصطفافية السهلة وبسـاطة التصميم والتي جعلت منه أداة أساسية في كثير من مجالات البحث والتطبيقات في مجال الفيزياء والكيمياء والبيولوجيا وفي كثير من مجالات التحليل الطيفي [1] (على سبيل المثال كمسبرلقياس عمر حياة السويات الأهتزازية- الدورانية). تعتبر ميزة قابلية التوليف بوساطة تغير زاوية التداخل بين حزمتي الضخ الميزة الهامة لليزر الصباغي (انظر الشكل 1a). يمكن توسيع مجال قابلية التوليـف بتغيـر تركيـز الصـباغ المستخدم وتعطي عملية خلط صباغين مختليفين توسيعاً أكبر لمجال التوليف. يغطـى المجـال الطيفـي الأوسع بوساطة الليزر النبضي الضاخ لليزر الصباغي والذي يعمل عند طول موجة من البنفسجي حتـى تحت الأحمر. تستخدم ليزرات النتروجين، الياقوت، الأرغون، نيوديميوم –ياغ ونيوديميوم- زجاج كمنـابع عيارية للنبضات من مرتبة نانوثانية لضخ الليزرات الصباغية. يمكن توسيع مجال طول الموجـة أبعـد بداخل المجال البنفسجي وتحت الأحمربمزج التواترات بوساطة البلورات الضوئية اللاخطية.

توجد ثلاث ثوابت زمنية تميز الليزر الصباغي وهي عمر السوية المثارة الأولى S_1، عمر السوية الثلاثية T_1 وزمن انتقال الفوتون في المجاوب ويهمل إسكان الثلاثي T_1 في حالة زمن ضخ قصير نسبياً (زمن تقاطع الجملة داخلياً من S_1 الى T_1) بالمقارنة مع عمر السوية. يعتبر عمر الحالة المستقرة أكبر الثوابت الثلاث ولذلك يعد شرط الحالة المستقرة جيداً لعمل الليزر المستمر، حيث يتطلب زمن ضخ أكبر بكثيرمن عمر السوية S_1 . يكون الإصدار المحثوث الصادر عن السوية S_1 مسطيراً في حالة معدل الضخ العالي. وللحصول على الفعل الليزري يجب أن يكون زمن ارتفاع نبضة الضخ من مرتبة $2\sigma_e / K_{st}\sigma_T$ حيث يعتبر هذا شرط تحقيق الليزر النبضي الصباغي [2] (σ_e المقطع العرضي للإصدار المحثوث من الحالة S_1 إلى الحالة S_0 عند طول موجة الإصدار الليزري، K_{st} معدل الاسترخاء التقاطع الداخلي للجملة، σ_T المقطع العرضي للانتقال من الحالة T_2 الى T_1).

تستخدم الحزمة الليزرية (بعد محرقتها على سبيل المثال بوساطة عدسات أسطوانية) الصادرة عن ليـزر نيوديميوم- زجاج أو نبضة مفتاح الجودة أو نبضة النمط المغلق لضخ الليزر الصباغي ذي توزع التغذيـة العكسية المؤلف من خلية صباغية، شبكة إنعراج (كعنصر ذي انتقائية جيدة للتواتر) ، موزع الحزمـة أو موشور ومركبات ضوئية أخرى [2,1]. لا يتشكل التجويف في ليزر توزع التغذية العكسـية الصـباغي بواسطة المرايا الخارجية، ولكن ينجز (يتشكل) بتبعثر براغ ذي الانتقائية العالية للتواتر داخـل الوسـط المضخم. يتولد هذا التبعثر نتيجة للاضطرابات أو التغيرات الفراغية الدورية للوسائط الضـوئية للوسـط الفعال. يمكن أن تكون هذه الوسائط قرينة الانكسار العقدية للوسط الليزري أو الكسب الضوئي أو كلاهما

معاً. بالحقيقة نظراً للتضخيم العالي للوسط الفعال وللطول الصغيرلمجاوب ليزر توزع التغذية العكسية فإن زمن النشوء عند ليزر توزع التغذية العكسية يكون قصيراً جداً. كل هذا يجعل من المجاوب هذا مصدراً لتوليد نبضات من مرتبة بيكوثانية في ليزر توزع التغذية العكسية بعد ضخه بنبضات من مرتبة نانوثانية.
يمكن من أجل الأصبغة السائلة تحقيق الاضطراب الفراغي الدوري بضخ الوسط الفعال بحزمتين ليزريتين متداخلتين يقع تواترهما ضمن عصابة الصباغ المضخوخ. وبالتالي يمكن اعتبار الحقل الليزري كموجتين منتشرتين شدتاهما I_2,I_1 مترابطتان بشده بنتيجة القيمة $I_1^2+I_2^2$. تتولد بالحقيقة شبكة انعراج في المحلول الصباغي من خلال التداخل بين حزمتي الضخ. وبنتيجة كسب شبكة الانعراج تكون شدة الخرج الليزري متناسبة مع تشكل أمواج ذات طور ثابت، حيث تلعب العقد دور المرايا العاكسة وتعطي معنى التوزع وتسبب التغذية العكسية وذلك لأن العقد تتوزع بشكل دوري منتظم على طول محور الخلية. يتشكل عدد كبير من الحزم على طول محور الخلية وتتداخل فيما بينها وبالتالي تتناسب الشدة كما ذكرنا مع مربع السعة وتتحقق التغذية العكسية بنتيجة وجود عقد أمواج التداخل. لا توجد حدود بين المنطقة المثارة بوجود وبدون وجود شبكة الأنعراج. عموماً إن تغيرات قرينة إنكسار المحلول الصباغي والتي تسببها التغيرات الحرارية خلال نبضة الضخ تولد نتوءات عالية في تواتر نبضة خرج الليزر الصباغي.
لم تؤخذ تأثيرات تغيرات عملية الضخ على ليزر DFDL في معظم المراجع، حيث وفي كثير من الحالات تم اعتماد منابع ضخ ثابتة بنبضات ضخ غوسية الشكل [4,3]. كما أنه وفي معظم المراجع العالمية لم يتم بشكل واضح بيان طريقة التغذية المسيطرة على تحديد عرض نبضة الخرج الليزري هل الكسب الضوئي أم تغيرات قرينة الإنكسار؟. كما أن نتائج النظريات المطروحة في بعض المراجع لا تتوافق مع النتائج التجريبية بنسبة أكثر من 20-40% [6,5,3].
تم في عمل سابق [7] دراسة عملية ضخ ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي بوساطة ليزر الياقوت ثلاثي السويات الطاقية. أهملت الدراسة وجود الظاهرة الحرارية ووجود الثلاثي وعملية إعادة الإمتصاص ولم تحدد طريقة التغذية المؤثرة في تحديد عرض نبضة الخرج.
إن هدف هذا العمل هو تحسين نظرية توليد النبضات من مرتبة البيكوثانية، حيث يؤخذ بعين الأعتبار الإمتصاص الحالة المثارة، الإصدار التلقائي، حالة الثلاثي، عملية إعادة الإمتصاص، درجة حرارة الشبكة وابيضاض الحالة الأساسية [8,1]. سيتم اعتبار تأثير وسائط مختلفة مثل شدة الضخ، زمن التألق وارتفاع درجة حرارة المحلول الصباغي. بالإضافة إلى ذلك فإن هذا العمل سيركز على الدراسة النظرية للسلوك الزمني لليزر نيودميوم- زجاج واستخدامه كمنبع ضخ لليزر توزع التغذية العكسية وتحديد عرض خط الإصدار وبيان أي طريقة تغذية هي المسيطرة (الكسب الضوئي أم تغيرات قرينة الإنكسار). كما ستتم بالتفصيل معالجة السلوك الزمني لوسائط الخرج مثل الإستطاعة، عمر الفوتون في مجاوب ليزر توزع التغذية العكسية، درجة حرارة شبكة الإنعراج والطاقة الضائعة بشكل حراري.

3- النموذج الرياضي:

تم اعتماد النموذج الرياضي التالي لوصف آلية الإصدار الليزري في الهزاز (ليزر نيودميوم-زجاج) وفي الوسط المضخم (ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي) (الشكل 1b):

أ - ليزر نيودميوم-زجاج : تصف المعادلة التالية تغير كثافة الإسكان النسبية كتابع للزمن [9, 7]:

$$\frac{dY}{dt} = G - DY - 2B_{21}U_pY \qquad (1)$$

يعطى تغير كثافة شدة الحقل الإشعاعية بواحدة الحجوم كتابع للزمن بالمعادلة:

$$\frac{dU_p}{dt} = v\mu(\chi Y - K_{loss})U_p \qquad (2)$$

تصف المعادلتان (1) و(2) العمليات الفيزيائية المختلفة في ليزر نيودميوم-زجاج وبشكل عام الجمل الليزرية ثلاثية ورباعية السويات الطاقية.

ب - ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي: نعتبر القيمة الوسطى لتوزع شدة الحقل الكهرمغناطيسي الحقيقي (يمكن اعتبار متوسط شدة الحقل وذلك لأن زمن الضخ أكبر من زمن انتقال الضوء في الوسط الفعال أو في الخلية الصباغية عندها لا حاجة لاعتبار التغيرات الفراغية للحقل الليزري بداخل ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي بالتفصيل)، وباعتبارأن عملية توسيع عصابتي الإصدار والامتصاص لجزيئات المحلول الصباغي هي عملية متجانسة وباعتبار حالة الثلاثي (triplet) وبإهمال تأثير حالات الإثارة العليا، فإنه يمكن تمثيل الليزر الصباغي بجملة أربع سويات طاقية. يعتبر هذا الفرض محققاً في كل أنواع الليزرات الصباغية التي يكون تدفق الفوتونات فيها أقل من $(\sigma_p \tau_f)^{-1}$.

تصف المعادلتان التاليتان التغير الزمني لكثافة طاقة الإثارة للحالة المثارة الأولى من الأحادي (singlet) والثلاثي (triplet) [10,7]:

$$\frac{dE_1^*}{dt} = \frac{c\sigma_p}{W_p}(W_1^* N_d - E_1^*)U_p - \frac{c\sigma_e}{\eta_1 W_1^*}E_1^* U_1 - \frac{E_1^*}{\tau_f} + c\sigma_{rea} N_d U_1 - K_{st} E_1^* \qquad (3)$$

$$\frac{dE_T}{dt} = K_{st} E_1^* W_T / W_1^* - \frac{E_T}{\tau_T} \qquad (4)$$

حيث يمثل الحد الأول والثاني في المعادلة (4) تراكم الجزيئات في الثلاثي T_1 بنتيجة التقاطع داخل الجملة من S_1 الى T_1 ومعدل تفكك الثلاثي الى S_0.

تمثل النسبة W_1^* / W_p في المعادلة (3) مردود مضاعف التواتر (عملية الضخ) وهذه النسبة متغيرة ضمن مجال طيف الإصدار للخلية الماصة [10]، كما يمثل الحد $(W_1^* / W_p)\, c\sigma_p N_d U_p$ كثافة طاقة منبع الضخ بواحدة الزمن وتتغير قيمة هذا الحد تبعاً لأي تغير في ليزر الضخ (بتغير معامل الضياع أو معامل التضخيم الأعظمي أو معدل الضخ المرتبط بزمن ارتفاع نبضة الضخ).

هذا ويمكن من حيث المبدأ استنتاج علاقة تحليلية لا خطية لأثر مضاعف التواتر على الجملة الليزرية، إلا أن استنباط هذه العلاقات التحليلية سوف يتم ضمن شروط تقريبية فضلاً عن اختلاف الشكل الرياضي لهذه العلاقة تبعاً للمقدار الفيزيائي المدرج وتبعاً لنوع البلورة. تتضمن العلاقات التحليلية تنسورات من المرتبة الثالثة تستخدم فقط بعد تحديد درجة تناظر البلورة ويختلف شكل هذه العلاقة باختلاف تناظر ونوع البلورة، ومنه يلاحظ عدم وجود امكانية لاستخدام العلاقات التحليلية إلا لبلورة محددة النوع ودرجة التناظر.

يوصف التطور (التغير) الزمني للكثافة الحجمية لشدة الحقل الليزري في ليزر DFDL بالمعادلة التالية:

$$\frac{dU_1}{dt} = \frac{c(\sigma_e - \sigma_a)}{\eta_1 W_1^*}E_1^* U_1 - \frac{U_1}{\tau_c(t)} + \frac{\Omega E_1^*}{\tau_f} - c\sigma_{rea} N_d U_1 - \frac{c\sigma_T E_T U_1}{W_T} \qquad (5)$$

تصف المعادلات (3)-(5) العمليات الفيزيائية المختلفة للّيزر الصباغي ذي توزع التغذية العكسية المضخوخ بليزر نيوديميوم-زجاج، حيث اعتبرت الإثارة العرضية لمنطقة الإنفراغ منتظمة.

اذا أخذت الضياعات الخارجية بالاعتبار فقط فإن زمن اضمحلال التجويف لليزر توزع التغذية العكسية من أجل المرتبة الأولى لحالة الاقتران الفائق يعطى بالعلاقة التالية [3] :

$$\tau_c(t) = \frac{\eta_1 L_d^{\,3}}{2\pi^2 c}\left[\left(\frac{\pi}{\lambda_L}\eta_2(t)\right)^2 + \left(\frac{\alpha_1(t)}{2}\right)^2\right]$$

(الاقتران الفائق يعني في حالتنا أن زمن اضمحلال التجويف أكبر من $2.35\ ps$).

لا يحقق الضخ الدوري بدرجة حرارة شبكة الإنعراج المتولدة فقط، وإنما بالكسب الضوئي للشبكة أيضاً.

تكمن الميزة الهامة لليزر توزع التغذية العكسية في كون عمر الفوتون يتعلق بالزمن.

يمكن التعبير عن عمر الفوتون في ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي بالصيغة التالية [12,11,3]:

$$\tau_c(t) = \frac{\tau_{tr} L_d^2}{2\pi^2}\{(\frac{\pi}{\lambda_L})^2(\frac{d\eta_1}{dT})_p^2 \Delta T^2 + [\frac{(\sigma_e - \sigma_a)V_i E_1^*}{2W_1^\bullet}]^2\} \qquad (6)$$

يسهم الجزء الأول من هذه العلاقة في عملية التغذية العكسية التي يسببها الاضطراب في قرينة الإنكسار (يعود الإسهام الأكبر في تغيرات قرينة الإنكسار إلى التأثير الحراري)، بينما يمثل الجزء الثاني عملية الكسب الضوئي للشبكة.

في الحقيقة، يمثل تأثير الظاهرة الحرارية الإسهام الأكبر في تغير قرينة الإنكسار. وبفرض أن الوسط الفعال يُضخ بشكل منتظـم وأنه يمكن تجاهل الانتشار الحراري للنبضات ذات العرض (2-6) نانو ثانية فإن تغير قرينة الإنكسار يعطى بالعلاقة التالية: $\Delta\eta_1 = AE_p \cdot (\partial\eta_1/\partial T)/(\zeta \quad Vc_{sh})$

يكمن تحديد قرينة الانكسار المحلول الصباغي الآنية بدلالة طاقة السوية الليزرية العليا والـدنيا وبالتـالي تعطى حسب نموذج التبدد لتوسيع الخط وباستخدام تقريب لورنس بمجموع قـرائن الانكسـار للحـالات الطاقية المختلفة كما يلي:

$$\eta_1 = \eta_b + \frac{c(W_a - W_R)(N_d W_1^\bullet - E_1^\bullet)\sigma_a(W_R)}{2\pi h \quad W_1^\bullet W_R \quad \Delta W_a} - \frac{ch(W_1^\bullet - W_R)E_1^\bullet \sigma_e(W_R)}{2\pi \quad W_1^\bullet W_R \quad \Delta W_1^\bullet}$$
$$- \frac{ch(W_T - W_R)(N_d W_T - E_T)\sigma_T(W_T)}{2\pi \quad W_T W_R \quad \Delta W_T} \qquad (7)$$

يمثل الحد الأول قرينة الانكسار الكلية ويمثل الحد الثاني كسب التبدد ويمثل الحد الثالـث التبـدد بعمليـة الامتصاص في الحالة الأساسية بينما يمثل الحد الرابع التبدد العائد للامتصاص في حالة الثلاثي.

يولد الضخ الدوري شبكة انعراج حرارية دورية. وباهمال النقل الحراري الذي يحدث من المنطقة المثارة الى الجزء غير المثارمن الصباغ، يمكن وصف التغيرات الحرارية بالمعادلة التالية[13,3,2]:

$$\frac{d\Delta T(t)}{dt} = \frac{cA\sigma_p N_d V_i U_p(t)}{\zeta \quad c_{sh}} - \frac{\Delta T(t)}{\tau_r} \qquad (8)$$

حيث يعبر الحد الأول عن متوسط تغير درجة حرارة الوسط والذي يتزايد بشـكل خطـي مـع الطاقـة الممتصة. يعبر الحد الثاني عن درجة حرارة شبكة الإنعراج والذي يسبب التغير في قرينة الإنكسار.

تعطى استطاعة الخرج من إحدى نهايتي ليزر DFDL بالعلاقة التالية [7,5,1]:

$$P_{DFDL}^{out} \quad (W) = \frac{hcL_d a_1 b}{2\lambda_L W_1^*} \frac{U_1}{\tau_c(t)} \qquad (9)$$

حيث أن: $D = \frac{2\psi \quad (P_{21} + P_{32}) + 2P_{21}(P_{31} + P_{32})}{2\psi \quad + P_{21} + P_{31}}$, $G = \frac{2\psi \quad (P_{21} - P_{32})}{2\psi + P_{21} + P_{31}}$

(بشكل عام من أجل $P_{21} \gg P_{31}$ يمكن أن نحصل على $D = 2(P_{31} + P_{32} + \psi\ ), G = 2\psi$) ،

P_{13} هو معدل الضخ (احتمال انتقال شوارد النيوديميوم من الحالة الأساسية E_1 إلى الحالة المثارة E_3 بتأثير الضوء الصادر عن لمبة الضخ)، P_{32} هو احتمال الإنتقال التلقائي لشوارد النيوديميوم من السوية الليزرية العليا E_3 إلى السوية الليزرية الدنيا E_2 (الشكل 1(b))، $Y = (N_3 - N_2)/N_r$ الكثافة النسبية للإسكان، (i=2, 3) N_i الكثافة النسبية للسويتين الليزريتين الدنيا والعليا، B_{32} احتمال انتقال شوارد النيوديميوم من السوية الليزرية العليا إلى السوية الدنيا بالإصدار المحثوث، P_{21} معدل الاسترخاء من السوية الليزرية الدنيا إلى الحالة الأساسية، ψ معدل سرعة الضخ، $\upsilon = c/\eta$ سرعة الضوء في قضيب النيوديميوم زجاج، c سرعة الضوء في الخلاء، η قرينة انكسار القضيب الليزري، $\mu = (L\eta)/(L_1 + L_2 + L\eta)$ معامل امتلاء المجاوب الليزري ، L الطول الفعال للقضيب الليزري، L_1 و L_2

يمثلان البعد بين نهايتي القضيب الليزري ومرآتي الانعكاس المحددتين للمجاوب الليزري، χ القيمة العظمى لمعامل التضخيم في قضيب الزجاج (عندما تثار كافة شوارد النيوديميوم)، $K_{loss}=\rho+(1/2L)Ln(1/R_1R_2)$ معامل الضياع في المجاوب الليزري بشكل عام، ρ معامل الضياع بالامتصاص ،بالتبعثر،... ، R_1 و R_2 معاملي انعكاس مرآتي المجاوب المركبة (المؤلفة من مرآتي الانعكاس ووجهي القضيب الليزري)، σ_p المقطع العرضي للامتصاص من الحالة الأساسية S_0 إلى الحالة الأعلى S_1 عند طول موجة الضخ، σ_a المقطع العرضي للامتصاص من الحالة المثارة S_1 إلى الحالة الأعلى S_2 عند طول موجة الإصدار الليزري، σ_{rea} المقطع العرضي لعملية اعادة الأمتصاص في الحالة الألكترونية الأساسية، τ_f زمن التألق في حال غياب الإصدار المحثوث وعمليات القمع المختلفة ،V حجم المنطقة المضخوخة، V_i وضوح أهداب التداخل المتشكلة بحزمة الضخ (-1،+1) ، η_1 متوسط قرينة انكسار المحلول الصباغي، $\Omega=b/(\pi N_d\sigma_p L_d^2 S)$ معامل يحدد الجزء من الإصدار التلقائي المنتشر بداخل المجال الزاوي والطيفي لحزمة ليزر DFDL ، W_p متوسط طاقة فوتونات الضخ ، W_1^* وW_T متوسط طاقة الحالة المثارة الأولى S_1 وحالة الثلاثي T_1، ΔW_1^*منتصف عرض الأصدار المتألق، ΔW_a منتصف عرض قمة الأمتصاص، W_a طاقة قمة الأمتصاص، W_R طاقة التجاوب للوسط ، S المعامل الطيفي المحدد لجزء الإصدار التلقائي والواقع ضمن عرض عصابة نبضة ليزر DFDL، τ_T عمر الثلاثي ، $\tau_{tr}=\eta_1 L_d/c$ زمن انتقال الضوء ضمن المحلول الصباغي، $\eta_2(t)=(\partial\eta_1/\partial T)_p\,\Delta T$ سعة الأضطراب الفراغي لقرينة الأنكسار، $\partial\eta_1/\partial t$ معدل تغير قرينة الأنكسار مع درجة الحرارة، $\tau_r=(\varsigma c_{sh}/\alpha)/(\Lambda/2\pi)^2$ استرخاء درجة حرارة شبكة الأنعراج، $\Lambda=d/2$ الفصل بين الأهداب ، dالفصل بين أثلام شبكة الانعراج، ς و c_{sh} الكثافة والحرارة النوعية للمحلول، αمعامل النقل الحراري، $A=1-\phi(\lambda_p/\lambda_L)$ الجزء الممتص من الفوتونات والمتحول الى حرارة، ϕ المردود الكوانتي للتألق، λ_p,λ_L متوسط طول موجة إصدار ليزر DFDL وموجة الضخ،L_d ، a_1 ، b أبعاد الجزء الفعال من الخلية الصباغية ، h ثابت بلانك . كي يتساوى عدد فوتونات الضخ الصادمة مع عدد الفوتونات الممتص فمن الضروري أخذ 1/e فقط من قيمة عمق نفاذ الإشعاع في الخلية الصباغية . يعطى عمق النفاذ بالعلاقة $a_1=1/N_d\sigma_p$.

4- الحلول العددية لمعادلات المعدل:

تمثل معادلات المعدل (1)-(5) والمعادلة (7) جملة معادلات تفاضلية لاخطية مقترنة. تصف هذه المعادلات ديناميكية الإصدار في الوسط الليزري (ليزر نيوديميوم – زجاج وليزر توزع التغذية العكسية الصباغي DFDL). تم إعداد برنامج مكتوب بلغة الفورتران مبني على أساس طريقة رونج-كوتا لحل جملة المعادلات المذكورة. يسمح هذا البرنامج بدراسة تأثيرات ليزر نيوديميوم – زجاج وليزر توزع التغذية العكسية الصباغي DFDL على توليد نبضات ليزرية قصيرة جداً من مرتبة البيكوثانية. ويسمح أيضاً بدراسة تأثير وسائط الدخل على نبضات الخرج في ليزر نيوديميوم – زجاج وليزر توزع التغذية العكسية الصباغي بالإضافة إلى دراسة تأثيرحالة الثلاثي ودرجة حرارة شبكة الإنعراج.

تعطى الثوابت الفيزيائية للمعادلات (1)-(5) والأبعاد الهندسية لليزر نيوديميوم – زجاج وليزر توزع التغذية العكسية الصباغي في الجدول 1 [9,5,2]. نذكر أخيراً أن قيم المقادير $E_1^\bullet,U_1$ تتعلق فقط بالقيمة $(W_1^*c\sigma_pN_dU_p)/W_P$ وليس بالقيم المستقلة للمقادير σ_p,N_d,U_p .

تم اختيار الشروط البدائية التالية لحل جملة معادلات المعدل:

$$Y(t_0)=\frac{G}{D},\quad U_P(t_0)=1.02\ 10^{-7}\ J/cm^3,\quad E_1^*(t_0)=\frac{W_1^*}{W_P}c\cdot\sigma_p\cdot N_d\cdot\tau_f\cdot U_p(t_0),\quad E_T=\frac{W_T}{W_1^*}E_1^*K_{st}\tau_T$$

$$U_1(t_0)=\frac{\Omega E_1^*(t_0)/\tau_f}{\frac{(\sigma_e-\sigma_a)c}{\eta_1 W_1^*}E_1^*(t_0)-c\sigma_{rea}N_d-(c\sigma_T E_T/W_T)-1/\tau_c},\quad \Delta T(t_0)=0$$

حيث أن t_0 هو زمن بداية الحساب العددي علماً بأن القيمة البدائية $U_p(t_0)$ متغيرة وتتعلق بشكل رئيسي بقيم المقدارين σ_p, N_d.

5- النتائج والمناقشة:

نرى من الشكل 2 والجدول 2 أنه بتزايد معامل التضخيم الأعظمي أو استطاعة الضخ في هزاز نيوديميوم –زجاج، يتناقص زمن التأخير وعرض النبضة من أجل معامل ضياع ثابت، بينما بتزايد معامل الضياع يتزايد زمن التأخير ويتناقص عرض النبضة.

أنجز الشكل 3 باعتبار أن عملية التغذية العكسية تتم بوساطة تغيرات قرينة الانكسار أو الكسب الضوئي أو بالاثنين معاً من أجل طاقات ضخ مختلفة (أو معامل تضخيم أعظمي متغير). يمكن أن نرى من الشكل 3 والجدول 2 مميزات الخرج الزمنية والطيفية المحسوبة لليزر توزع التغذية العكسية عندما يضخ فوق العتبة حيث يتم إصدار قطار نبضات من مرتبة بيكوثانية. يمكن أن نلاحظ أيضاً أنه بتزايد الاستطاعة الفعالة للضخ يتناقص عرض النبضة وتتزايد استطاعة ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي. يمكن أيضاً ملاحظة أن تأرجح النبضة الثانية لليزر DFDL أكبر بكثير من تأرجح النبضة الأولى. ويعزى ذلك ألى عدم استقرارية ليزر الضخ.

كانت النتائج المحسوبة في هذا العمل متوافقة بشكل مقبول مع المعطيات التجريبية المدونة في المرجعين [12,5]، حيث كانت القيمة العظمى لاستطاعة القمة ولأقصر عرض نبضة $\chi=15\,cm^{-1}$ (النبضة الأولى) وزمن الفصل بين النبضتين الأولى والثانية (من أجل معامل تضخيم أعظمي:) في المجال 23.3 - 40.5 كيلو وات و 11.2 - 14.8 بيكو ثانية و 140 – 279 بيكو ثانية على التوالي، بينما دلت المطيات التجريبية المدونة في المرجع [5] على القيم 20 - 40 كيلو وات و 17 بيكو ثانية و 200 – 250 بيكو ثانية على التوالي. كما يلاحظ أن العرض الطيفي وعدد النبضات القطار يتناقص بتزايد استطاعة الضخ (انظر الشكل 3 والجدول 2 والمرجع [12]).يتعلق عرض النبضة عموماً بالوسائط التالية [14,6]:

1- بسوية استطاعة الضخ لليزر توزع التغذية العكسية الصباغي (تختزل استطاعة الضخ الى قيمة صغرى باستخدام نمط طولي وحيد).
2- بتباعد حزمة الضخ (تختزل هذة الظاهرة الى قيمة صغرى بتوليد خصر الحزمة الساقطة في الخلية الصباغية).
3- ينشأ الارتباط الزمني لقرينة الانكسار بوساطة الظواهر الحرارية. إن الآلية التي تؤثر فيها الظواهر الحرارية على عرض النبضة تتلخص في أنه خلال نبضة الضخ تتزايد درجة حرارة الوسط الفعال وتؤدي إلى تغير قرينة الانكسار وينتج عن ذلك تغير في طول الموجة لليزر توزع التغذية العكسية الصباغي. اذا تغيرت قرينة انكسار الصباغ بمقدار $\Delta\eta_1$ ($\Delta\lambda_L/\lambda_L=\Delta\eta_1/\eta_1$) فإن هذا التغير يرتبط بانزياح طول موجة ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي. يمكن تفسير هذا الانزياح على أنه إسهام بعرض النبضة. يمكن أن نرى بوضوح أن إسهام الظواهر الحرارية بعرض النبضة يختزل بامتلاك محلول يحقق الشرط التالي $\partial\eta_1/\partial T=0$ هذا يعني أن اسهام الظواهر الحرارية يصبح مساوياً للصفر فيماذا تم تبريد أو تبديل المحلول الصباغي [14].

4- ينشأ الاسهام الزمني لقرينة إنكسار الوسط الفعال بعملية التبدد المرتبطة بالكسب الضوئي. تكمن الآلية التي من خلالها يؤثر التبدد على عرض نبضة ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي اثناء نبضة الضخ بتزايد كثافة طاقة السوية الليزرية العليا حتى قيمة عظمى تهبط بعدها إلى الصفر ثانية، بينما تخضع كثافة طاقة السوية الليزرية الدنيا إلى استنزاف عميق خلال تشكل النبضة. يفسر إسهام التبدد هذا بعرض نبضة ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي بارتباط عرض النبضة بطاقة الضخ أو بطول موجة الضخ. يبلغ التبدد قيمة عظمى عندما يتغير الكسب أوالامتصاص بشكل أسرع مع التواتر.

من المناقشة السابقة وبالإعتماد على الجدول 2 يمكن أن نستنتج أن تغيرات قرينة الإنكسار يمكن أن تكون هي المسيطرة في عملية تحديد عرض النبضة بالمقارنة مع تغيرات الكسب الضوئي.

يمكن أن نرى من الشكل 4 أن زمن اضمحلال التجويف (انظر العلاقة (6)) لا يمكن أن يكون ثابتاً كما هو الحال عند بعض الليزرات الصباغية التقليدية ويكون له قيمة كبيرة خلال نصف الزمن الأول لتشكل ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي ويمتلك قيمة صغيرة خلال اضمحلال نصف الزمن الآخر.

يمكن أن نلاحظ من الشكل 4 أن تزايد استطاعة الضخ الفعال تؤدي الى تزايد سعة زمن اضمحلال التجويف، حيث تتم عملية التغذية العكسية بوساطة الكسب الضوئي وتغيرات قرينة الإنكسار أو كليهما. يتناقص زمن التأخير وعدد النبضات المتشكلة بتزايد ضياعات التجويف لليزر توزع التغذية العكسية الصباغي أو بتزايد زمن اضمحلال التجويف لليزر المذكور. يمكن أن نلاحظ أيضاً من الشكل 4 أن ضياعات التجويف تتجه بشكل سريع نسبياً إلى حالة الإستقرار وذلك بنتيجة تناقص معامل التضخيم الأعظمي في هزاز النيوديميوم-زجاج. يمكن أن نرى أيضاً أن الإسترخاءات الإهتزازية تنشأ بنتيجة الإرتباط التربيعي لضياعات التجويف (زمن اضمحلال التجويف) بطاقة الحالة المثارة الأولى للسوية الليزرية العليا وتغير درجة الحرارة. يقود هذا التشكيل التربيعي إلى سلوك ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي مع مفتاح الجودة الذاتي، حيث يكون المسؤول عن توليد النبضات من مرتبة البيكوثانية [6].

يمكن أن نلاحظ من الجدول 3 أنه بتزايد استطاعة الضخ يزداد التأثير السلبي لحالة الثلاثي باعتبار تأثير قرينة الانكسار فقط ، بينما باعتبار تأثير قرينة الانكسار والكسب الضوئي معاً فإن هذا التأثير السلبي يتناقص إلى قيمة محددة ثم يتزايد بعدها . يكون التأثير السلبي للثلاثي مقبولاً تماماً، بسبب كون زمن الفلورة أو التألق للحالة المثارة الأولى في حالة الليزر الصباغي النبضي أقل من زمن حياة الحالة الثلاثية. يجب أن يظر تأثير حالة الثلاثي عند الليزر الصباغي المستمر حيث تلعب حالة الإستقرار دوراً أساسياً.

يعطي الشكل 5 تغيرات درجة الحرارة بنتيجة تسخين المنطقة المثارة. يمكن أن نرى من هذا الشكل أنه بتزايد معامل التضخيم الأعظمي تتزايد تغيرات درجة الحرارة (أي تتزايد درجة حرارة شبكة الإنعراج الديناميكية) حتى تبلغ قيمة عظمى. كما يمكن أن نرى أيضاً أن توزع تغيرات درجة الحرارة يكون غوسياً تقريباً. ويلاحظ أن تغيراً طفيفاً في درجة حرارة المحلول الصباعي يمكن أن يتسبب في تشكيل تدرج حراري بسبب عدم التجانس في عملية التسخين. يسبب التدرج المذكور تشوهاً في مقدمة موجة الحزمة الليزرية عند مرورها خلال الوسط الفعال مما يؤدي إلى الحد من إمكانية التكرار والتوليف. تنتج الحرارة المتولدة في حالة ضخ الليزر الصباغي عن الضياع لبعض طاقات الإثارة بظاهرة انزياح ستوكس [2].

من المفيد الآن إجراء مقارنة بين نبضة خرج ليزر DFDL المضخوخ بليزر نيوديميوم-زجاج رباعي السويات الطاقية وبين نبضة خرج ليزر DFDL تم ضخه بليزر الياقوت ثلاثي السويات الطاقية [7]. ولبيان الفرق بين نتائج العملين من المفيد أن نذكر النقاط التي درست في هذا العمل ولم يعنى بها العمل [7] وهي:

1 تم تعديل النموذج بإضافة حد إعادة الامتصاص وحد تأثير الثلاثي.
2 تم اعتبار عمر الفوتون في التجويف (ضياعات التجويف) كتابع لتغيرات قرينة الإنكسار وتغيرات كسب الإشباع الضوئي.
3 تمت إضافة تأثير الظاهرة الحرارية.

يبين الشكل (6) نبضتي خرج ليزر DFDL المضخوخ بليزر نيوديميوم-زجاج وليزر الياقوت من أجـل قيم محددة لمعدل الضخ ومعامل الضياع. يلاحظ أن النبضة في الشكل (a) تنتهي خـلال فتـرة زمنيـة قصيرة مع تأرجح كبير للنبضة الثانية بالمقارنة مع الشكل (b). بلغ عـرض النبضـة الأولـى لليـزر المضخوخ بليزر نيوديميوم-زجاج 16.4 ps باستطاعة عظمى قدرها 32 kW بينما بلغ عرض النبضـة 19.5 ps باستطاعة عظمى بحدود 125 kW في حالة الضخ بليزر الياقوت.

6- الخاتمة:

تم في هذا العمل تطوير نموذج رياضي بحيث يتنبأ بالمميزات المختلفة للهزاز الليزري نيوديميوم –زجاج وليزر توزع التغذية العكسية الصباغي. يعتمد النموذج المقترح على استخدام ست معادلات تصف بشـكل كامل العمليات الفيزيائية المختلفة للوسط الليزري الفعّال (الإمتصاص بالحالة المثارة، الإصدار التلقـائي، حالة الثلاثي، عملية إعادة الإمتصاص، درجة حرارة شبكة الإنعراج ، ابيضاض الحالة الأساسية).
يتعلق تحديد عرض نبضة خرج ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي بشكل أساسي بتغير قرينة إنكسـار الصباغ الموجود في الخلية الصباغية، حيث يتم توليد شبكة إنعراج أثناء التداخل بين حزمتين ليزريتين.
ويكون هذا الارتباط إما بسبب الظاهرة الحرارية أو بنتيجة الارتباط مع التغيرات في كسب الإشباع للخلية الصباغية (ظاهرة التبدد).
أخيراً يمكن استخدام نتائج هذا العمل ليس فقط للتحقق من صلاحية النظرية وإنما كدليل في مخابر الهندسة للمادة المكثفة، فصل النظائر، التطبيقات البيولوجية وفي فروع علمية وتقنية مختلفة.

7- كلمة شكر:

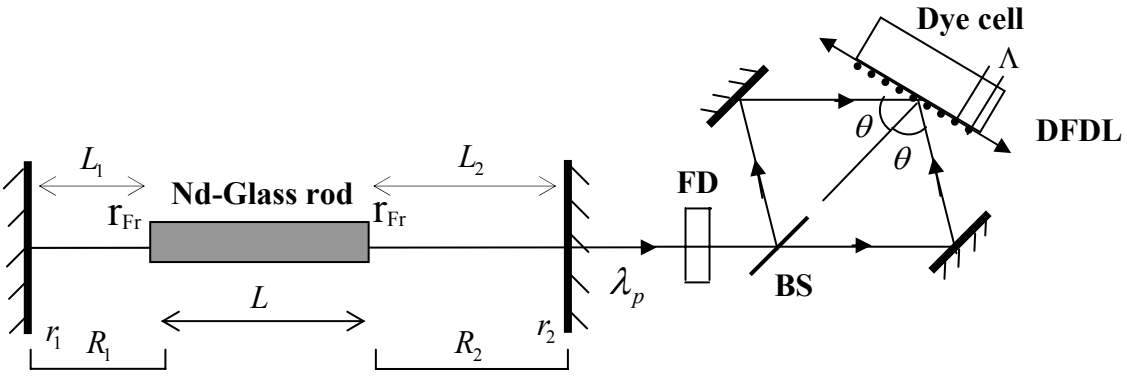
نتوجه بالشكر إلى السيد المدير العام لهيئة الطاقة الذرية السورية الأستاذ الدكتور إبراهيم عثمـان علـى تشجيعه ودعمه المستمرين.

8- المراجع :

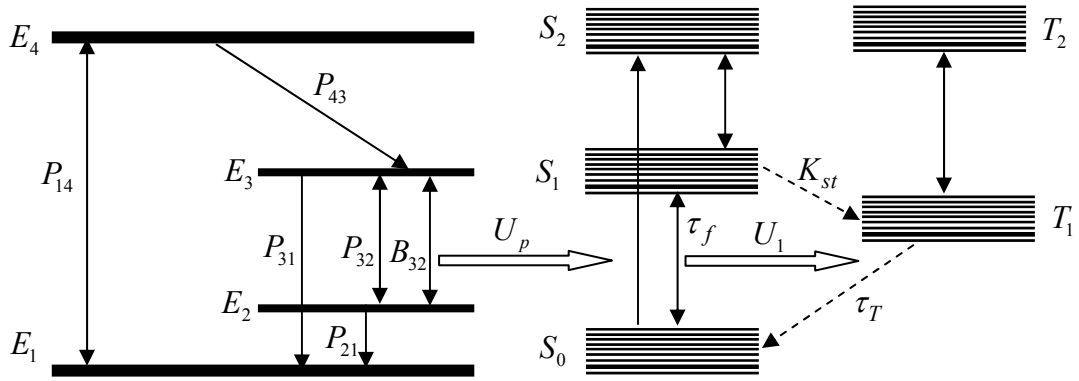
1. Nair L.G. Dye lasers . Prog.Quant.Electr.1982;7:153-269.
2. Nath Singh B. Fabrication, characterization and spectral studies of N_2-laser pumped dye laser. Thesis submitted for the degree of Ph. D: Banaras Hindu University,1987.
3. Bor Zsolt. Tunable Picosecond Pulse Generation by an N_2 laser pumped self Q-Switched distributed Feedback Dye laser. IEEE J. Quantum Electronics 1980;QE16(5):517-523.
4. Vorobiev N.S., Ruddock I.S. and Illingworth R. Generation of picosecond optical phase conjugate pulses using CW mode locked lasers. Optics Communications 1982;41(3):216-218.
5. Bor Zs. and Muller Alexander. Picosecond Distributed Feedback Dye Lasers. IEEE J.Quantum Electronic 1986;QE22 (8): 1524-1533.
6. Bor Zs., Muller Alexander, Racz B., and Schafer F.P. Ultra-short Pulses Generation by Distributed Feedback Dye Lasers I. Applied Physics 1982;B27:9-14.
7. Abdul Ghani B. and Hammadi M. Mathematical modeling of ruby laser as a pumping source of a "self Q-switched" distributed feedback dye laser (Submitted for publication in Optics and Lasers in Engineering).

8. Soukeih M., Abdul Ghani B., Hammadi M. Numerical calculations of dye Q-switched ruby laser .Optics and Lasers in Engineering 2004;41:177-187.
9. Stepanov B.I. Calculation methods of optical quantum generators II. Minsk: Nayka,1968 (in Russian).
10. Gale G.M., Ranson P., and Denariez-Roberge M. Coherent Spectroscopy with a Distributed Feedback Dye Laser. Applied Physics 1987;B44: 221-233.
11. Efendiev T.Sh., Katarkevich V.M. and Rubinov A.N. Generation of tunable picosecond pulses in a simple DFDL under N_2-laser pumping.Optics Communications 1985;55 (5):347-352.
12. Falkestein W., Penzkofer A. and Kaiser W. Amplified spontaneous emission in Rhodamine dyes:generation of picosecond light pulses and determination of excited state absorption and relaxation.Optics cominications 1978;27(1):151-156.
13. Elhanan S., Treves D. Excited singlet-state absorption in dyes and their effect on dye lasers. IEEE J.Quantum Electronics 1977; QE13(12): 962-967.
14. McIntyre I.A., Lusty M.E. and Dunn M.H. Linewidth-determining processes in distributed feedback dye lasers. Journal of Modern Optics 1988; 35(3): 325-343.

9- الأشكال والجداول:

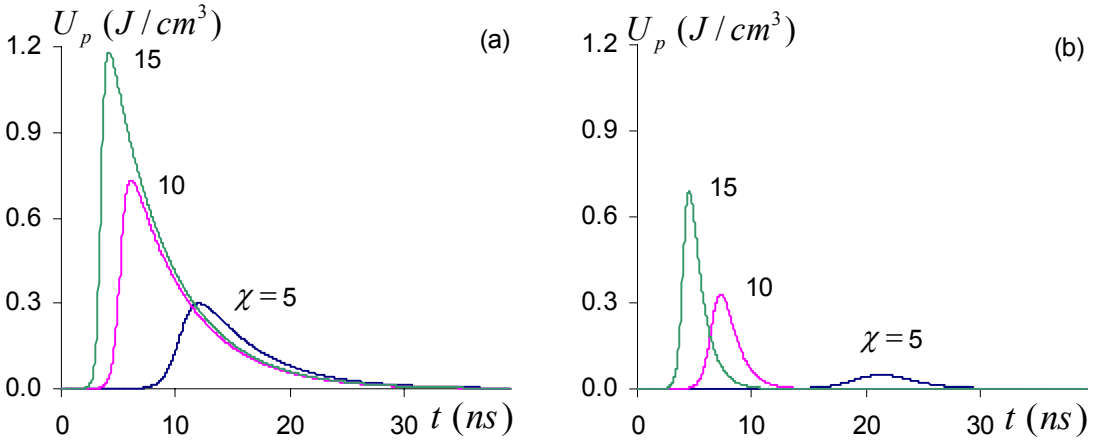


(a)

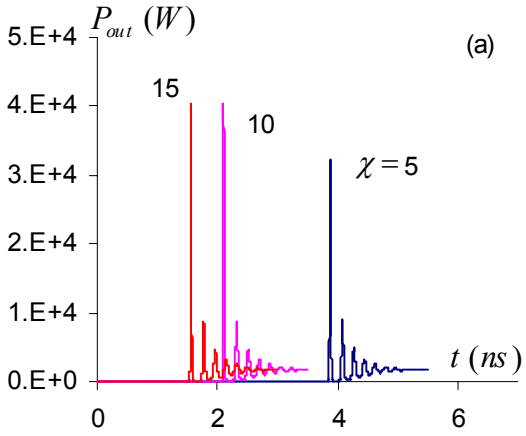


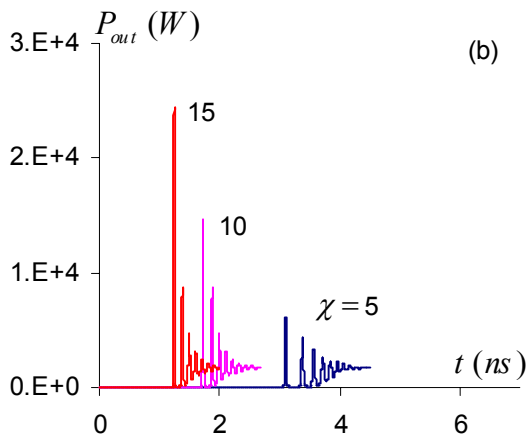
(b)

الشكل 1 . (a) المخطط التجريبي لليزر نيوديوم-زجاج وليزر DFDL.
(b) مخطط الإنتقالات بين السويات الطاقية المختلفة لأيونات النيوديوم والخلية الصباغية.



الشكل 2 . شكل نبضة خرج ليزر نيوديوم-زجاج كتابع للزمن من أجل قيم مختلفة لمعامل التضخيم الأعظمي: $K_{loss}=0.02\ cm^{-1}$ (a) ، $K_{loss}=0.1\ cm^{-1}$ (b)





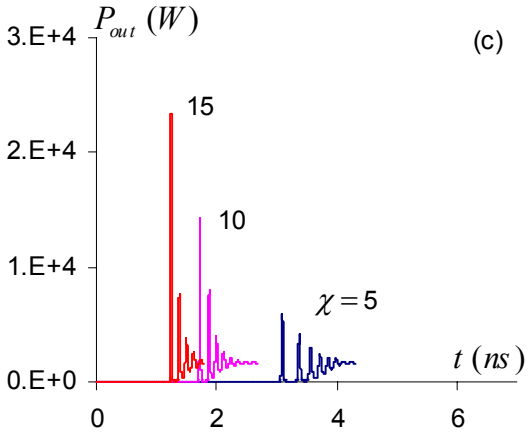
الشكل 3 . طاقة خرج ليزر DFDL كتابع للزمن من أجل $\psi = 50\ s^{-1}$ و K_{loss}=0.02 cm^{-1}

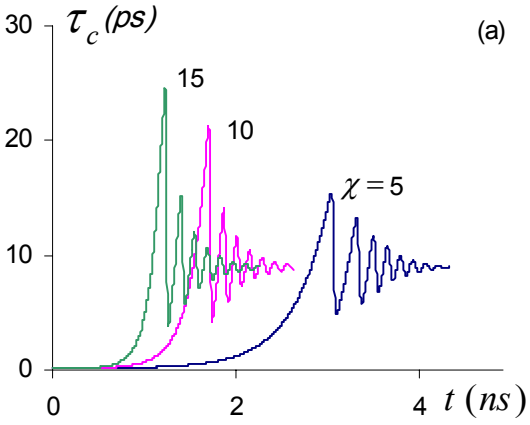
تتم التغذية العكسية بتغيرات:

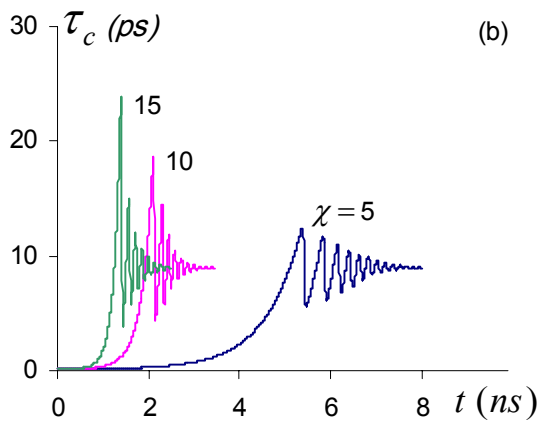
(a) قرينة الإنكسار

(b) الكسب الضوئي

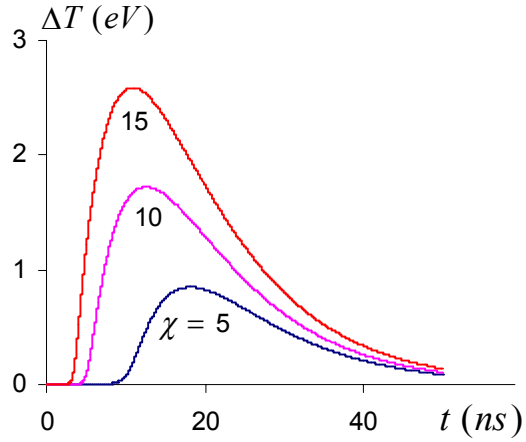
(c) الإثنان معاً



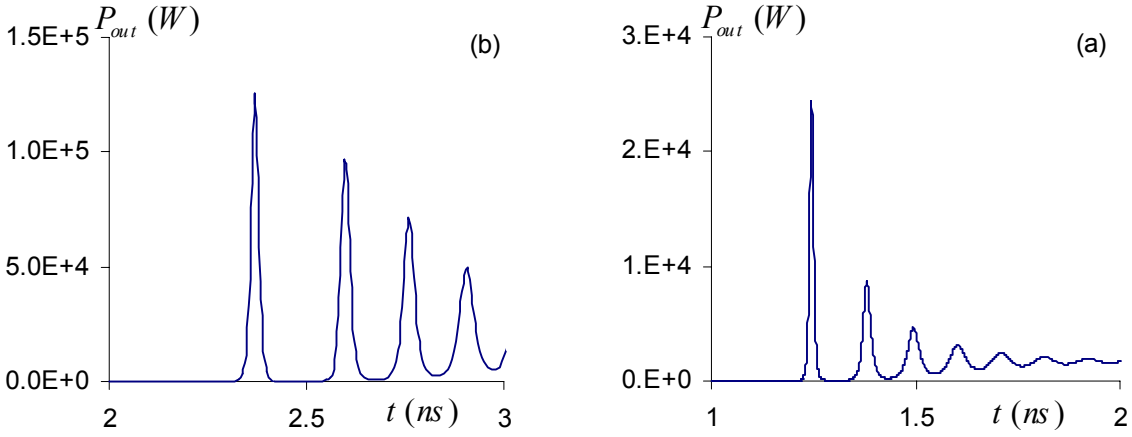




الشكل 4 . الزمن المكافئ لإضمحلال التجويف كتابع للزمن من أجل قيم مختلفة لمعامل التضخيم الأعظمي: K_{loss}=0.02 cm^{-1} (a) ، K_{loss}=0.1 cm^{-1} (b)



الشكل5.تغيرات درجة حرارة المنطقة المثارة كتابع للزمن باستخدام نبضة الضخ كاملة K_{loss}=**0.02 cm^{-1}**.



الشكل 6. شكل نبضة خرج ليزر DFDL كتابع للزمن :

(a) مضخوخ بليزر نيوديميوم-زجاج من أجل $\psi = 50\ s^{-1}$ و $\chi = 15\ cm^{-1}$ و $K_{loss} = 0.02\ cm^{-1}$

(b) مضخوخ بليزر الياقوت من أجل معدل ضخ $P_{13} = 7000\ s^{-1}$ ومعامل ضياع $K_{loss} = 0.02\ cm^{-1}$

Constant	Value	Unit	Constant	Value	Unit
P_{31}	560	s^{-1}	K_{loss}	0.02-0.1	cm^{-1}
P_{32}	840	s^{-1}	d	2.048×10^{-5}	cm
B_{32}	175×10^{7}	$cm^{3}/J.s$	η	1.57	-
P_{21}	1.10^{7}	s^{-1}	ψ	50	s^{-1}
v	1.91×10^{10}	cm/s	$W_1^{\bullet}$	3.42×10^{-19}	J
μ	0.5	-	V_i	1	-
χ	5-15	cm^{-1}	S	10^{4}	-
N_r	$(2\text{-}6) \times 10^{20}$	cm^{-3}	b	0.025	cm
W_p	3.74×10^{-19}	J	λ_L	5.8×10^{-5}	cm
σ_p	4.17×10^{-16}	cm^2	τ_T	2.7×10^{-7}	s
σ_a	$5. \times 10^{-17}$	cm^2	$a_1 = 1/N_d\sigma_p$	0.0208	cm
σ_e	0.86×10^{-17}	cm^2	η_1	1.44	-
σ_{rea}	7.5×10^{-19}	cm^2	τ_f	$4. \times 10^{-9}$	s
σ_T	9.1×10^{-18}	cm^2	L_d	0.56	cm
λ_p	5.31×10^{-5}	cm	A	0.5	-
α	1.84×10^{-3}	$J/cm.s.C^{\circ}$	c_{sh}	2.42	$J/g.C^{\circ}$
ζ	0.785	g/cm^3	$\partial\eta_1/\partial T$	$4. \times 10^{-4}$	$C^{\circ -1}$
N_d	2.1×10^{18}	cm^{-3}	W_T	3.2×10^{-19}	J
K_{st}	$3. \times 10^{6}$	s^{-1}			

الجدول 1. قيم وسائط ليزر نيودميوم – زجاج وليزر توزع التغذية العكسية الصباغي

		Fig. No	χ (cm^{-1})	K_{loss} (cm^{-1})	τ_{del} (ns)	FWHM	Separation (ps)	P_{out}^{max} (kW)
Nd-glass		2.a	5	0.02	6.0	6.4 ns		
			10		3.0	5.0 ns		
			15		2.0	4.4 ns		
		2.b	5	0.1	10.2	5.9 ns		
			10		3.8	2.4 ns		
			15		2.3	1.7 ns		
DFDL	effect of gain & ref. index ψ=50 s^{-1}	3.a	5	0.02	3.5	22.4 ps	279	5.99
			10		1.7	14.9 ps	172	14.3
			15		0.64	14.7 ps	181	23.3
		3.b	5	0.1	5.4	35.3 ps	455	2.6
			10		2.1	15.4 ps	190	10.3
			15		1.4	12.8 ps	172	19.2
	effect of gain & ref. index ψ=35 s^{-1}	3c	5	0.02	4.106	30.7	366.2ps	3.83
			10		2.245	19.1	208.6ps	9.28
			15		1.61	16.1	161ps	15.4
		3d	5	0.1	13.83	94.7	868.4ps	0.715
			10		3.15	34.8	284.8ps	5.6
			15		1.97	17.8	184.2ps	11.3
	effect of ref. index only	3.c	5	0.02	3.8	16.4 ps	204	32.2
			10		2.1	15.0 ps	212	40.3
			15		1.5	14.0 ps	207	40.5
		3.d	5	0.1	7.1	21.2 ps	315	16.6
			10		2.6	14.8 ps	215	40.1
			15		1.7	12.9 ps	212	40.4

الجدول 2 . وسائط نبضة الخرج لليزر زجاج-نيوديميوم وليزر توزع التغذية العكسية الصباغي.

χ (cm^{-1})	P_{out}^{max} (kW)			
	effect of optical gain & ref.		effect of ref. index only	
	with triplet	Without	With triplet	without triplet
5	5.989	5.996	32.244	32.303
10	14.037	14.317	40.319	40.368
15	23.335	23.349	40504	40.547

الجدول 3 . تأثير الثلاثي على القيمة العظمى لاستطاعة نبضة خرج ليزر توزع التغذية العكسية الصباغي.

SYRIAN ARAB REPUBLIC
ATOMIC ENERGY COMMISSION (AECS)
DAMASCUS, P.O.BOX 6091

Report on Scientific Informatic Study
Department of Scientific Services

Picoseconds Pulse Generation and Pulse Width Determination Processes of a Distributed Feedback Dye Laser

Dr. B. Abdul Ghani

Mr. M. Hammadi

AECS – SS \RSS 575

August 2004