



الجمهورية العربية السورية
هيئة الطاقة الذرية

هـ ط ذ س - خ ع / ت د ع ٨٥٠
تشرين الثاني ٢٠٠٩

تقرير عن دراسة علمية حاسوبية
قسم الخدمات العلمية

النمذجة الرياضية لليزر نصف ناقل مزود بمفتاح جودة منفعل

الدكتور بشار عبد الغني
الفيزيائي مصطفى حمادي

هـ ط ذ س - خ ع / ت د ع ٨٥٠

المحتويات

٣	١ . الخلاصة
٣	٢ . المقدمة
٤	٣ . النموذج الرياضي
٦	٤ . الحلول العددية لمعادلات المعدل
٦	٥ . الحلول التحليلية لمعادلات المعدل وحساب تواتر التجاوب ومعامل التخامد
٨	٦ . النتائج والمناقشة
٨	٦, ١ التشغيل النبضي مع مفتاح كسب ومضاعف تواتر
٩	٦, ٢ التشغيل المستمر مع مفتاح كسب لمغلق النمط
٩	٧ . الخاتمة
١٠	٨ . المراجع
١٢	٩ . الأشكال والجداول

جرى في هذا العمل تقديم نموذج رياضي لوصف الإصدار الديناميكي لمضاعف التواتر بداخل التجويف لمفتاح الكسب ولمفتاح الجودة لمغلق النمط للديود الليزري $InGaAs / GaAs / KTP$ المؤلف من قطاعي موجه موجة بمقدمة متناقصة تدريجياً. أخذ بالحسبان التفاعل المتبادل بين نبضات الخرج من مفتاح الكسب للديود الليزري وبين مضاعف التواتر داخل التجويف. جرت نمذجة مضاعف التواتر بداخل التجويف لمفتاح الكسب $InGaAs / GaAs$ للديود الليزري، حيث جرى ضخ أحد القطاعين كهربائياً ليشكل قطاع الكسب بينما لم يسخ القطاع الآخر (أو طبق عليه توتر انحياز عكسي) ليلعب دور الماص القابل للإشباع. جرى اختزال المسألة الفيزيائية ثلاثية الأبعاد بنموذج ذو بعد واحد باستخدام التقريب الكظوم الذي يسمح بفصل التابع الموجي. يمكن النموذج المقترح من دراسة تأثير تغيير وسطاء الدخول للديود الليزري $InGaAs / GaAs / KTP$ على مميزات نبضة الخرج لكل من مضاعف التواتر داخل التجويف لمفتاح الكسب ولمفتاح الجودة لمغلق النمط للديود الليزري. يشير النموذج المقترح إلى إمكانية التخلص من الذيل الطويل لنبضات خرج مضاعف التواتر داخل التجويف لمفتاح الكسب كما بلغ عرض النبضة عدة عشرات بيكوثانية. جرى حل النموذج الرياضي عددياً باستخدام برنامج حاسوبي يعتمد طريقة رونج-كوتا الشهيرة، كما جرى عرض طريقة لحل معادلات المعدل تحليلياً وحساب تواتر التجاوب ومعامل التخادم بالاعتماد على حسابات استجابة الإشارة الصغيرة. تشير النتائج المحسوبة في هذا العمل إلى وجود إنسجام جيد مع النتائج التجريبية المتاحة.

٢. المقدمة

تستخدم نبضات الديودات الليزرية بنمط وحيد مستقر ذوات الاستطاعة العالية للقيمة ومن مرتبة البيكوثانية في مجالات تطبيقية علمية وتقنية متعددة، مثل المفاتيح الضوئية والمعدى وصناعة الأجهزة والاتصالات الفضائية [3-1]. كما وتكون عملية قياس امتصاص فوتونين وتوليد الضوء الأزرق من الديود الليزري على قدر كبير من الاهتمام في التشخيص الضوئي وتخزين المعطيات الضوئية [4,5].

جعلت عمليات تحسين تنمية البلورات والتقانات الصناعية من أنصاف النواقل أداة للتحكم في الجملة الكمومية (الإلكترونات)، حيث يمكن حصر الإلكترونات في الاتجاهات الفراغية الثلاثة. تبدي الإلكترونات المحصورة في هذه البنية صفات أخرى مختلفة عن تلك البنى الكمومية المحصورة ضمن أبعاد أقل. تقدم دراسة كثافة الحالات الطاقية المتقطعة فواند مميزة في إنتاج الأدوات الضوئية والإلكترونية [5,6]. أبدت الديودات الليزرية مندمجة المنطقة الفعالة للجملة الكمومية تيار عتبة أخفض بسبب اختزال تيار الإصدار التلقائي المرتبط بشكل ضيق مع كثافة الحالات الطاقية المتقطعة [5,7]. ترتبط أيضاً المواصفات الديناميكية لليزر بشكل حرج بكثافة الحالات الطاقية المتقطعة لحوامل الشحنة، وهذا يتحكم بالكسب الديناميكي للبنية الليزرية [5,6,8]. تتطلب عملية الحصر الكمومي للإلكترونات (الأبعاد الفيزيائية من مرتبة تباعد ذرات الشبكة البلورية) تحكماً استثنائياً لتنمية نصف الناقل وتحسين تقنية التصنيع وذلك لجعل التأرجح في حده الأدنى.

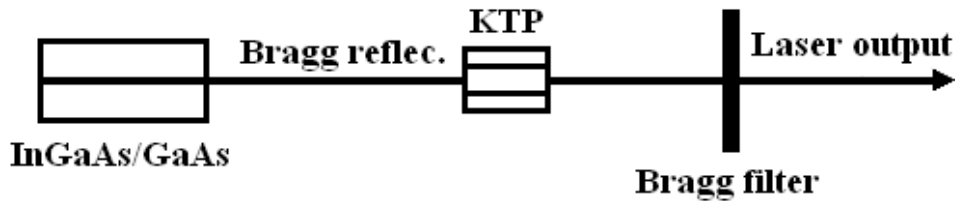
بالإضافة إلى أن الطبيعة المتقطعة لكثافة الحالات تولد كسب إشباع شديد وبالتالي لا يمكن تطبيق التقريب الخطي ضمن مجال واسع [9-12]. يمكن أن يكون منبع الضوء الأزرق الليزري ذي نبضات من مرتبة بيكوثانية والذي يدمج الديود الليزري $InGaAs / GaAs$ مع البلورة KTP المصممة بشكل ملائم والمقسمة دورياً إلى موجهات الموجة (بهدف تحقيق شروط شبه الانسجام الطوري والذي يؤدي إلى تزايد مردود تحويل التوافقية الثانية) مدمجاً ومستقراً ومحتوى ذاتياً. يُشغّل الليزر $InGaAs / GaAs$ مع مفتاح الكسب بشكل مستمر أو بشكل نبضي. لتحقيق توليد مردودية عالية للمدروج الثاني من الديود الليزري تصمم بلورة من قطاعين بموجه موجة مع بنية شبكة انعراج دورية وشبكة انعراج براغ. يتمثل دور شبكة الانعراج هذه في تسهيل الحقن البذري اللاتجاوبي للديود الليزري $InGaAs / GaAs$.

درس تشغيل مفتاح الجودة المنفعل (مفتاح الكسب) تجريبياً للديود الليزري ذي القطاعين موجه الموجة بمقدمة متناقصة تدريجياً في المراجع [3-1] وقد استخدمت هذه البنية لتعزيز استطاعة النبضة في مفتاح الجودة للديودات الليزرية.

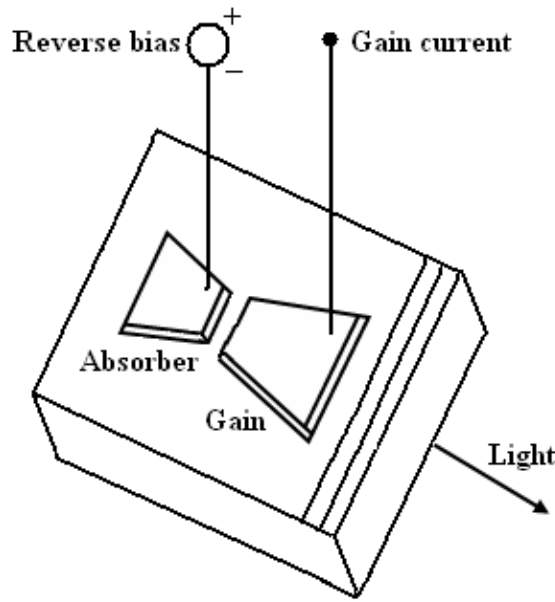
درست محاكاة مفتاح الجودة المنفعل للديود الليزري $InGaAs / GaAs$ في أعمال كثيرة [1-8,10]. إلا أنه يظهر في بعض النماذج الرياضية المعروضة في البعض من هذه الأعمال تناقضات في البنية الفيزيائية والرياضية، بالإضافة إلى عدم وجود انسجام مع مبدأ التجانس في وحدات القياس [1,2].

جرى في عمل سابق [12] دراسة آلية الإصدار لمضاعف التواتر مع مفتاح جودة منفعل متوضع داخل التجويف الليزري.

يقدم العمل الحالي معالجة نظرية لمضاعف التواتر داخل التجويف لمفتاح الكسب (الشكل ١) ولمفتاح الكسب لمغلق النمط باستخدام نموذج معادلات المعدل ببعد واحد. يدرس النموذج المقترح في هذا العمل تأثير تغيير تيار الضخ الكهربائي على استطاعة الخرج الليزري أخذاً بالاعتبار معظم العمليات الفيزيائية التي يمكن أن تحدث في قطاعي الليزر نصف الناقل مع موجة مقدمة متناقصة تدريجياً (الشكل ٢). تدل الحلول العددية للنموذج على وجود توافق جيد مع المعطيات التجريبية لمفتاح الكسب ومضاعف التواتر [10]. أخيراً، يقدم العمل طريقة لحل معادلات المعدل تحليلياً والحصول على قيمة تواتر التجاوب ومعامل التخماد [12,13].



الشكل 1. المخطط التجريبي لمضاعف التواتر بداخل التجويف للديود الليزري $InGaAs / KTP$ مع مفتاح الكسب $GaAs$ كماص قابل للإشباع



الشكل ٢. مفتاح الكسب للديود الليزري المؤلف من قطاعي موجة مع مقدمة متناقصة تدريجياً

٣. النموذج الرياضي

نعتبر تجمع ذاتي لجملة كمومية (إلكترونات) والتي لها بنية الشكل العدسي النموذجي. يمكن حساب طاقة سويات الإلكترونات والثقوب في البنية العدسية باستخدام التقريب الكظوم كإحدى الطرق المعروفة في نظرية الاضطراب. يمكن عموماً تطبيق التقريب الكظوم على الذرة التي تتحرك ببطء شديد بالمقارنة مع الإلكترونات [6,14]. يمكن فصل مؤثر هاميلتون للإلكترونات كجملة كمومية كما هو معروف باتجاهين، يكون أحدهما عمودياً على مستوي تنمية البلورة والآخر متطابقاً مع الإتجاه القطري [5,6]. لذا يمكن تحويل التابع الموجي ذي البعدين بدلالة توابع موجية ببعد واحد باستخدام التقريب الكظوم المذكور. يمكن تطبيق هذا التقريب عندما يكون التابع الموجي للحوامل مقيداً بشدة إلى السوية الأخفض للطاقة في الاتجاه z وتكون تغيرات الكمون بطيئة جداً بالاتجاه القطري. تعطى المعادلات التالية لجملة كمومية متناهية في بعد واحد في الاتجاه z .

يعطى التطور الزمني لكثافات الحوامل الحرة لمضاعف التواتر بداخل التجويف لمفتاح الكسب ولمفتاح الجودة لمغلق النمط لليزرات نصف الناقل في قطاعي الكسب والماص القابل للإشباع، على التوالي كما يلي [1,2,5,15]:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{\eta I_g}{eVf_1} - (A + C_A N_1^2) N_1 - G_1 U_Q - \frac{1}{T_{ga}} (N_1 - \frac{V_{gs}}{V_{as}} N_2) - \frac{N_1}{2\tau_{SHR}} - \frac{N_1}{\tau_c} \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{I_a}{eVf_2} - (A + C_A N_2^2) N_2 - G_2 U_Q + \frac{1}{T_{ag}} (\frac{V_{as}}{V_{gs}} N_1 - N_2) - \frac{N_2}{\tau_{abs}} - \frac{N_2}{2\tau_{SHR}} - \frac{N_2}{\tau_c}, \quad (2)$$

حيث: η مردود الضخ الكهربائي و I_g التيار الكهربائي المطبق في قطاع الكسب و e شحنة الإلكترون و V حجم المنطقة الفعالة و f_i ($i = 1, 2$) جزئي طولي قطاعي الكسب والماص القابل للإشباع على التوالي و A معامل إعادة الإتحاد غير المشع و C_A معامل أوجر (Auger) لإعادة الإتحاد و v_g سرعة الزمرة للضوء و a_g ثابتة الكسب و $G_i = v_g a_g (N_i - N_{Ti}) / (1 + \varepsilon_i U_Q)$ ($i = 1, 2$) الكسب المستنظم داخل قطاعي وسط الكسب والماص القابل للإشباع على التوالي [1,11] و N_{Ti} ($i = 1, 2$) عدد الإلكترونات عند شفافية قطاعي وسط الكسب والماص القابل للإشباع على التوالي و ε_i ($i = 1, 2$) معاملي انضغاط وسط الكسب والماص القابل للإشباع على التوالي و T_{ga} زمن الانتشار من قطاع الكسب إلى قطاع الماص القابل للإشباع و V_{as}, V_{gs} حجمي قطاعي وسط الكسب والماص القابل للإشباع على التوالي و τ_{SHR} زمن استرخاء شوكللي-هول-ريد (Shockley-Hall-Read) لعملية إعادة الإتحاد داخل قطاعي وسط الكسب والماص القابل للإشباع و τ_c عمر حياة الحوامل الحرة و I_a تيار الإنحياز العكسي و T_{ag} زمن الانتشار من قطاع الماص القابل للإشباع إلى قطاع وسط الكسب و τ_{abs} عمر حياة الماص القابل للإشباع (sweep-out time).

يعطى التطور الزمني لكثافة الفوتونات لمضاعف التواتر بداخل تجويف مفتاح الكسب للديود الليزري لقطاعي موجة الموجة مع مقدمة متناقصة تدريجياً (كما في الشكل ٢) بالمعادلة التالية [1,6,15]:

$$\frac{dU_Q}{dt} = \Gamma U_Q \sum_{i=1}^2 G_i + \beta_{sp} B (\sum_{i=1}^2 f_i N_i^2) - \frac{U_Q}{\tau_p} - \frac{\eta_{2\omega} v_3^2 W_{Lf} U_Q^2}{2\ell_k} \quad (3)$$

حيث: Γ معامل الحصر الهندسي و β_{sp} معامل اقتران الإصدار المحثوث (الجزء من الإصدار المحثوث المقترن في نمط الليزر) و B معامل إعادة الإتحاد المشع ثنائي الجزئية و τ_p عمر حياة الفوتون في المجاوب الليزري و $\eta_{2\omega}$ تأثير اقتران مردود تحويل مضاعف التواتر بداخل التجويف و v_3 سرعة الضوء في البلورة KTP و W_{Lf} طاقة فوتون طول موجة الليزر الأساسي و ℓ_k طول البلورة KTP. يعطى تأثير مضاعف التواتر من أجل تقريب الضخ غير المستنفذ واعتبار موجة مستوية وتوزيع فراغي منتظم للشدة بالعلاقة المختزلة التالية [16,17]:

$$\eta_{2\omega} = \frac{8\pi^2 d_{eff}^2 \ell_k^2}{\varepsilon_0 n_1^\omega n_2^\omega n_2^{2\omega} v_3 \lambda_{Lf}^2} \left(\frac{W_0}{W_c}\right)^2 \frac{\sin^2(\Delta k \ell_k / 2)}{(\Delta k \ell_k / 2)^2},$$

حيث d_{eff} معامل اللاخطية الفعال من المرتبة الثانية و Δk معامل الإنسجام الطوري (الإستقطاب) و ε_0 ثابتة العزل الكهربائي و $n_1^\omega, n_2^\omega, n_2^{2\omega}$ فرائن انكسار موجة التوافقية الثانية والأساسية (الأطوال الموجية ٩٧٢ أو ٩٧٦ أو ٩٨٢ نانومتر) و λ_{Lf} طول الموجة الأساسية و W_0, W_c قياس نصف القطر الفعال لبقعة الحزمة الليزرية للديود الليزري وعلى البلورة KTP المقترنة على التوالي. استخدمت في

هذا العمل الموجة الأساسية بطول $\lambda_{FL} = 972 [nm]$ والموجة التوافقية الثانية بطول $\lambda_{SH} = 486 nm$.

تعطى علاقة استطاعة خرج مفتاح الجودة من جهة واحدة بعبارة كثافة الفوتونات كما يلي :

$$P_{out}(t) = \frac{V \eta_D W_{Lf} \delta}{2\Gamma \tau_p} U_Q(t), \quad (4)$$

حيث: η_D المرادود الكومومي التفاضلي و R_1 انعكاسية الوجه الأمامي و $\delta = (1 - |R_1|^2)$.
تعطي استطاعة الخرج للمدروج الثاني بالعلاقة التالية:

$$P_{2\omega} = \eta_{2\omega} (N_w P_{out})^2 / A_f, \quad (5)$$

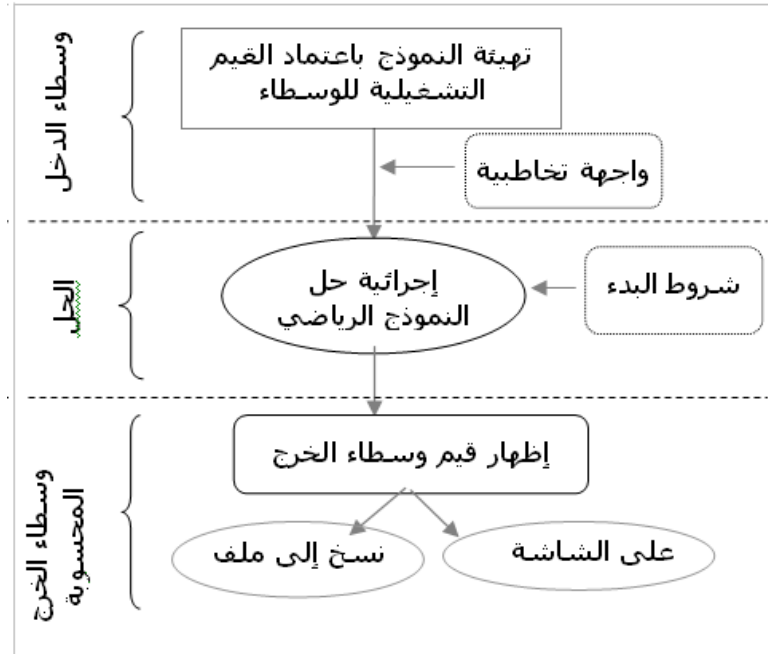
حيث: N_w عدد دليل الموجة المحتوى في البلورة KTP و $A_f = \pi W_0^2 / 4$ مساحة البقعة الليزرية للموجة الأساسية.

٤. الحلول العددية لمعادلات المعدل

تمثل معادلات المعدل (١)-(٣) جملة معادلات تفاضلية غير خطية عادية صلدة. تصف هذه المعادلات الإصدار الديناميكي لمضاعف التواتر بداخل التجويف لمفتاح الكسب ولمفتاح الجودة لمغلق النمط لقطاعي الديود الليزري *InGaAs / GaAs / KTP*. يطلب إيجاد المعرفة والإستيعاب لتشغيل قطاعي الديود الليزري المندمج مع مضاعف تواتر بداخل التجويف لمفتاح الكسب ولمفتاح الجودة لمغلق النمط لكي يتم انجاز أمثلة طريقتي التشغيل.

جرى إعداد برنامج حاسوبي مبني على أساس طريقة رونج-كوتا من المرتبة الرابعة لحل جملة هذه المعادلات عددياً. يمكن البرنامج من دراسة تأثير تغيير تيار الحقن الكهربائي المطبق على وسط الكسب وتيار الإنحياز العكسي المطبق على قطاع الماص القابل للاشباع لمضاعف التواتر لمفتاح الكسب ومفتاح الجودة لمغلق النمط على مميزات نبضة الخرج الليزري في كلتا حالتَي التشغيل.
تقسم بنية البرنامج الحاسوبي إلى ثلاثة أقسام رئيسية كما في الشكل ٣، وتعطى الثوابت الفيزيائية لمعادلات المعدل (١)-(٣) والوسطاء الهندسية لقطاعي الديود الليزري المندمج في الجدول ١. تم عند حل النموذج اختيار القيم البدائية التالية لمعادلات المعدل:

$$N_1(0) = 0.0 (1/cm^3), \quad N_2(0) = 0.0 (1/cm^3), \quad U(0) = 10^{-9} (photon/cm^3).$$



الشكل ٣. الخطوات الرئيسية للبرنامج الحاسوبي

٥. الحلول التحليلية لمعادلات المعدل وحساب تواتر التجاوب ومعامل التخامد

يمكن حل معادلات المعدل (1) - (3) تحليلياً باستخدام طريقة خاصة، تعتمد حسابات استجابة الإشارة الصغيرة، بهدف الحصول على الحلول المنسجمة ذاتياً فضلاً عن حساب تواتر التجاوب ومعامل التخامد. نقدّم أيضاً طريقة لاخترزال الوسطاء المجهولة على أساس معالجة حالة الاستقرار عند العتبة وطريقة استجابة الإشارة الصغيرة.

الواحدة	القيمة	الثابتة	الواحدة	القيمة	الثابتة
s	3.01×10^{-12}	τ_p	cm / s	8.62×10^9	v_g
s	1×10^{-11}	τ_{abs}	cm ²	2.5×10^{-16}	a_g
-	10^{-3}	β_{sp}	cm ³	2×10^{-17}	$\epsilon_1 = \epsilon_2$
s ⁻¹	10^8	A	-	0.35	Γ
cm ⁶ / s	3×10^{-29}	C_A	cm ³ / s	10^{-10}	B
A	1	I_g	J	2.04×10^{-19}	W_{Lf}
A	0-15	I_a	-	0.82	f_1
C	1.602×10^{-19}	e	-	0.18	f_2
s	2.1×10^{-9}	$T_{ga} = T_{ag}$	cm ³	1.92×10^{-10}	V
cm ⁻¹	20	α_{in}	cm ³	0.12×10^{-9}	V_{as}
cm	6×10^{-2}	L	cm ³	3.3×10^{-9}	V_{gs}
cm	5×10^{-2}	L_1	s	$(10 - 90) \times 10^{-9}$	τ_{SHR}
cm	1×10^{-2}	L_2	s	38×10^{-9}	τ_c
-	0.33	R_1	F / cm	8.88×10^{-14}	ϵ_0
-	0.33	R_2	cm / V	3.18×10^{-10}	d_{eff}
-	1.83	n_1^{ω}	cm	1	ℓ_k
-	1.746	n_2^{ω}	cm	200×10^{-4}	w_0
-	1.79	$n_2^{2\omega}$	cm	90×10^{-4}	w_c

الجدول ١. القيم التجريبية لوسطاء الديود الليزري *InGaAs / GaAs* ذي القطاعين.

نفرض أن التغيرات الديناميكية لكثافات الفوتونات والحوامل الحرة بعيداً عن قيمها في حالة الإستقرار صغيرة. يمكن تحليل معادلات المعدل (1) - (3) بأخذ تفاضل كثافة الفوتونات والحوامل الحرة التي تقود إلى تراكم الإشارة الصغيرة لمتغير واحد (بعبارة الإضطراب) كما يلي:

$$\frac{d}{dt}[dN_1] = a_{11} dN_1 + a_{12} dN_2 + a_{13} dU_Q + b_1 dI_g \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt}[dN_2] = a_{21} dN_1 + a_{22} dN_2 + a_{23} dU_Q + b_2 dI_a \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}(dU_Q) = a_{31} dN_1 + a_{32} dN_2 + a_{33} dU_Q, \quad (8)$$

حيث:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= -\left\{A + 3C_A [(N_1)_{st}]^2 + \frac{v_g a_g (U_Q)_{st}}{[1 + \varepsilon(U_Q)_{st}]} + \frac{1}{T_{ga}} + \frac{1}{2\tau_{SHR}} + \frac{1}{\tau_c}\right\} \\
a_{12} &= \frac{V_{gs}}{T_{ga} V_{as}}, a_{13} = -\frac{G_1}{[1 + \varepsilon(U_Q)_{st}]}, b_1 = \frac{\eta}{eVf_1}, \\
a_{21} &= -\left\{A + 3C_A [(N_1)_{st}]^2 + \frac{v_g a_g (U_Q)_{st}}{[1 + \varepsilon(U_Q)_{st}]} + \frac{1}{T_{ag}} + \frac{1}{\tau_{abs}} + \frac{1}{2\tau_{SHR}} + \frac{1}{\tau_c}\right\} \\
a_{22} &= \frac{V_{as}}{T_{ag} V_{gs}}, a_{23} = -\frac{G_2}{[1 + \varepsilon(U_Q)_{st}]}, b_2 = \frac{1}{eVf_2}, \\
a_{3i} &= \frac{\Gamma(U_Q)_{st} v_g a_g}{[1 + \varepsilon(U_Q)_{st}]} + 2\beta_{sp} Bf_i (N_i)_{st} \quad (i = 1, 2), \\
a_{33} &= \frac{\Gamma \sum_{i=1}^2 G_i}{[1 + \varepsilon(U_Q)_{st}]} - \frac{1}{\tau_p} - \frac{\eta_{2\omega} v_3^2 W_{Lf} (U_Q)_{st}}{\ell_k}
\end{aligned}$$

يمكن إعادة كتابة جملة المعادلات (٦)-(٨) باستخدام المصفوفات على الشكل:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} dN_1 \\ dN_2 \\ dU_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dN_1 \\ dN_2 \\ dU_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 dI_g \\ b_2 dI_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

بوضع $dN_1 = N_1^* \exp(i\omega t)$ و $dN_2 = N_2^* \exp(i\omega t)$ و $dU_Q = U_Q^* \exp(i\omega t)$

و $dI_a = I_a^* \exp(i\omega t)$ و $dI_g = I_g^* \exp(i\omega t)$ وبإعادة ترتيب الجملة ينتج أن:

$$\begin{bmatrix} -a_{11} + i\omega & -a_{12} & -a_{13} \\ -a_{21} & -a_{22} + i\omega & -a_{23} \\ -a_{31} & -a_{32} & -a_{33} + i\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^* \\ N_2^* \\ U_Q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 I_g^* \\ b_2 I_a^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ويكون محدد هذه المصفوفة:

$$\Delta = a_{11} a_{23} a_{32} + a_{12} a_{21} a_{33} + a_{13} a_{22} a_{31} - a_{11} a_{22} a_{33} - a_{12} a_{23} a_{31} - a_{13} a_{21} a_{32} + (a_{11} + a_{22} + a_{33})\omega^2 + i(a_{11} a_{22} + a_{11} a_{33} + a_{22} a_{33} - a_{12} a_{21} - a_{13} a_{31} - a_{23} a_{32})\omega - i\omega^3 \quad (11)$$

يمتلك تابع استجابة التكيف $H(\omega)$ بشكل عام ثلاثة أقطاب. فمن أجل قيم صغيرة لـ ω وبهدف تقريب $H(\omega)$ بحيث يمتلك قطبين فقط، يمكن إهمال القطب الذي يمتلك القيمة الأعلى [19,18]. لذا يكون:

$$H(\omega) = \frac{\omega_0^2}{\Delta} \approx \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \quad (12)$$

وبالمقارنة مع (١١) نجد أن:

$$\omega_0^2 = \frac{a_{11} a_{22} a_{33} + a_{12} a_{23} a_{31} + a_{13} a_{21} a_{32} - a_{11} a_{23} a_{32} - a_{12} a_{21} a_{33} - a_{13} a_{22} a_{31}}{a_{11} + a_{22} + a_{33}} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{a_{12} a_{21} + a_{13} a_{31} + a_{23} a_{32} - a_{11} a_{22} - a_{11} a_{33} - a_{22} a_{33}}{a_{11} + a_{22} + a_{33}}$$

حيث ω_0 تواتر التجاوب و γ معامل التخامد. وبالتالي يكون حل الجملة (١٠) من أجل U_Q^* من الشكل:

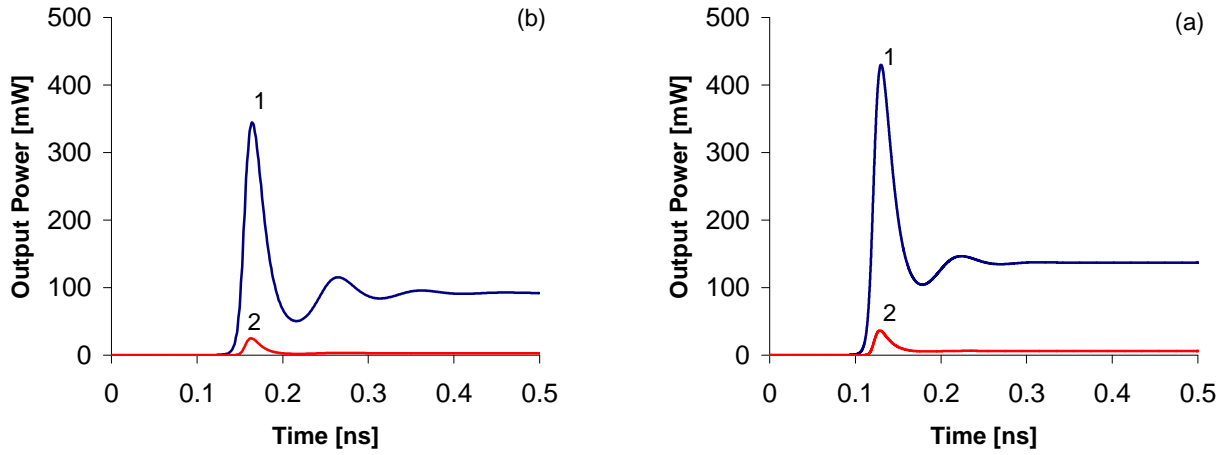
$$U_Q^* = \frac{\begin{vmatrix} -a_{11} + i\omega & -a_{12} & b_1 I_g^* \\ -a_{21} & -a_{22} + i\omega & b_2 I_a^* \\ -a_{31} & -a_{32} & 0 \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{(a_{21} a_{32} - a_{22} a_{31} + i a_{31} \omega) b_1 I_g^* + (a_{12} a_{31} - a_{11} a_{32} + i a_{32} \omega) b_2 I_a^*}{\Delta}$$

يمكن بعد ذلك اختزال عدد الوسطاء المجهولة لمعادلات المعدل بالاستفادة من المميزات L-I لحالة الاستقرار ومن قياسات الإشارة الصغيرة المقابلة لتواتر التجاوب ومعامل التخامد بالطريقة ذاتها المدرجة بالتفصيل في [12].

٦. النتائج والمناقشة

٦،٦ التشغيل النبضي مع مفتاح كسب ومضاعف تواتر

يبين الشكل ٤ السلوك الزمني لاستطاعة نبضة الخرج الليزري لنظامي تشغيل مفتاح الكسب فقط <1> ومضاعف التواتر داخل التجويف مع مفتاح الكسب <2> من أجل تيار حقن $I = 1 [A]$ ومن أجل (a) تيار انحياز $I_a = 0.0 [mA]$ و (b) تيار انحياز $I_a = -75 [mA]$ ومردود ضخ 100%. وتعطى مميزات نبضات الخرج هذه في الجدول ٢.



الشكل ٤: السلوك الزمني لاستطاعة الخرج الليزري عند التشغيل بنظام مفتاح الكسب (١) ولمضاعف التواتر مع مفتاح الكسب (٢) للديود الليزري $InGaAs / GaAs / KTP$ عند تطبيق تيار حقن $I_p = 1 [A]$ ومردود ضخ 100% ومن أجل (a) تيار انحياز $I_a = 0.0 [mA]$ و (b) تيار انحياز $I_a = -75 [mA]$.

نظام التشغيل	تيار الانحياز العكسي [mA]	استطاعة القمة [mW]	عرض النبضة [ps]	زمن التأخير [ps]
مفتاح الكسب فقط	0	429.7	29	98

131	28	344.5	-75	مفتاح الكسب مع مضاعف تواتر
115	22	36.5	0	
149	21	24.9	-75	

الجدول ٢. مميزات نبضات الخرج من أجل نظامي إصدار مختلفين.

يمكن أن نرى من الشكل 4 أن إسكان الفوتونات يبقى مساوياً تقريباً للصفير من أجل دور زمني يعرف بزمن التأخير. تشير المحاكاة إلى أن استطاعة نبضة الخرج للديود الليزري *InGaAs* تبلغ حالة الاستقرار خلال ٢٠٠ بيكو ثانية الأولى تقريباً بعد تطبيق تيار الحقن بفترة زمنية حوالي [ps] 100.

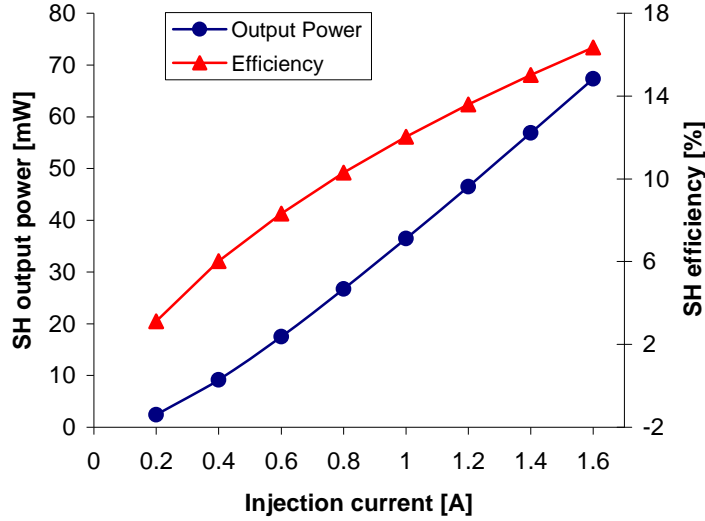
بسبب التيار المطبق نشوء الحوامل في قطاع الكسب وبتزايد بالتالي الكسب في التجويف، حيث تزداد الحوامل خلال فترة تشكل النبضة بتولد حوامل جديدة. في البداية، يكون الامتصاص في التجويف أعظماً بسبب عدم تتواجد الحوامل في القطاع الماص. يستمر تزايد عدد هذه الحوامل حتى يصبح الكسب كافياً للتغلب على ضياعات التجويف الأساسية والضياعات بالامتصاص في التجويف العائد لقطاع الماص القابل للإشباع. تزداد عندها كثافة الفوتونات في التجويف بشكل كبير جداً بتزايد كثافة الحوامل حتى الوصول إلى ابيضاض الامتصاص. أخيراً، وبسبب تزايد كثافة الفوتونات في التجويف تتناقص كثافة الحوامل في قطاع الكسب حتى يصبح الكسب من جديد غير كافٍ للتغلب على ضياعات التجويف وتطفئ عملية الليزرة.

يمكن إنجاز تشغيل مفتاح الكسب وتشغيل مضاعف التواتر داخل التجويف لمفتاح الكسب بتطبيق تيار انحياز عكسي مستمر في المجال $[0, -0.15]$ A على قطاع الماص القابل للإشباع (الشكل ٤). يتم تطبيق تيار الانحياز عادة بهدف زيادة معدل زمن الجريان الخارجي للحوامل المتولدة ضوئياً في الماص القابل للإشباع، والذي يقود إلى تعزيز عملية الامتصاص ويمنع ظهور نبضات متلاحقة بعد نبضة الخرج الليزري. جرت مقارنة كمية بين النتائج المحسوبة في هذا العمل والنتائج التجريبية المدونة في المرجع [10] لنبضة مفتاح الكسب مع مضاعف تواتر أنجزت بنفس الشروط. أدرجت نتائج هذه المقارنة في الجدول ٣، حيث يظهر انسجام جيد بين النتائج المحسوبة في هذا العمل وبين النتائج التجريبية.

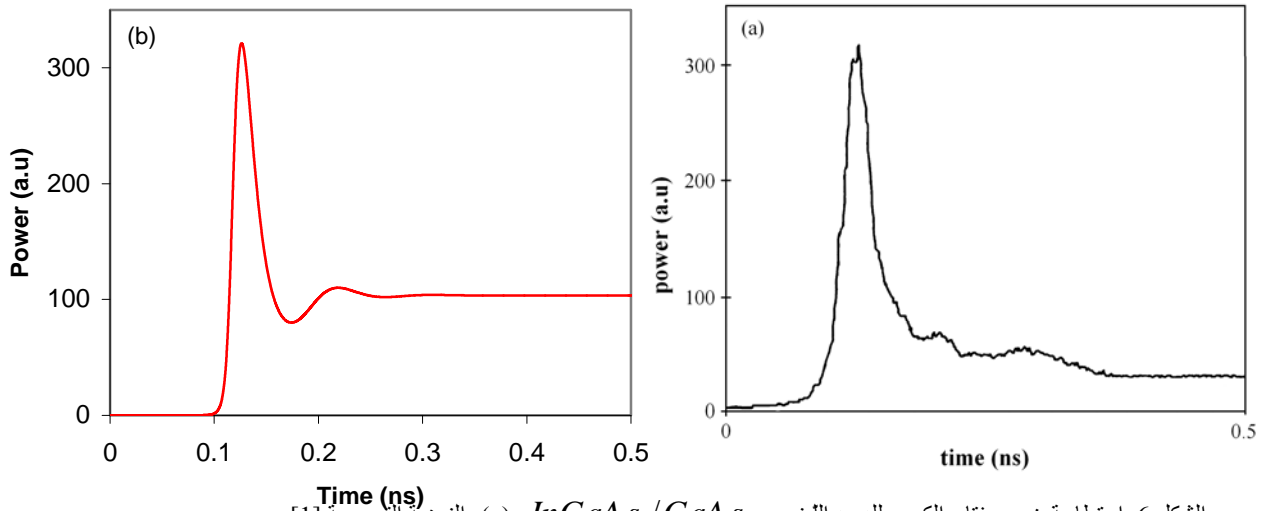
المرودود (%)	عرض النبضة [ps]	استطاعة القمة [mW]	النتائج
12	25	150	التجريبية (المدونة في [10])
12.63	25.2	146	المحسوبة (هذا العمل)

الجدول ٣. مميزات نبضات الخرج الليزري التجريبية والمحسوبة لمضاعف التواتر مع مفتاح الكسب.

يشير الشكل ٥ الى استطاعة الخرج الليزري للتوافقية الثانية ومردود التحويل المقابل لها كتابع لتيار الحقن من أجل استخدام البلورة KTP مصممة مع ٣٠ موجه موجة محدد بمجال أدوار شبكة انعراج براغ (Bragg). يلاحظ من هذا الشكل أنه وبتزايد تيار الحقن تظهر خطية المنحني بوضوح. يمكن أن يعزى ظهور سلوك اللاخطية بالقرب من العتبة إلى الإسهام القليل لظاهرة عملية امتصاص الحوامل الحرة وعملية امتصاص فوتونين. جرت أيضاً في الشكل ٦ مقارنة بين النتائج المحسوبة في هذا العمل والنتائج التجريبية المدونة في المرجع [1] لنبضة مفتاح الكسب فقط، حيث يظهر انسجام مقبول بين النتائج المحسوبة في هذا العمل وبين النتائج التجريبية مع وجود فارق بسيط في شكل ذيل النبضة والذي يمكن أن يعزى إلى وجود العدسة المتشكلة بسبب قرينة الإنكسار والتي تحدث بتأثير الفجوة المحترقة.



الشكل 5. استطاعة الخرج الليزري للتوافقية الثانية ومردود التحويل كتابع لتيار الحقن من أجل ٣٠ موجه موجة للبلورة KTP ضمن مجال أدوار شبكة انعراج براغ (Bragg).



الشكل 6. استطاعة خرج مفتاح الكسب للديود الليزري $InGaAs / GaAs$: (a) النبضة التجريبية [1] و

(b) النبضة المحسوبة في هذا العمل عند نفس الشروط ومن أجل تيار حقن $I_p = 1 [A]$.

٢,٦ التشغيل المستمر مع مفتاح كسب لمغلق النمط

يمكن الحصول على أربع نماذج مختلفة لنبضات خرج مفتاح الكسب للديود الليزري $InGaAs / GaAs$ لمغلق النمط باستخدام قيم الوسطاء المدونة في [2] وهي كالتالي:

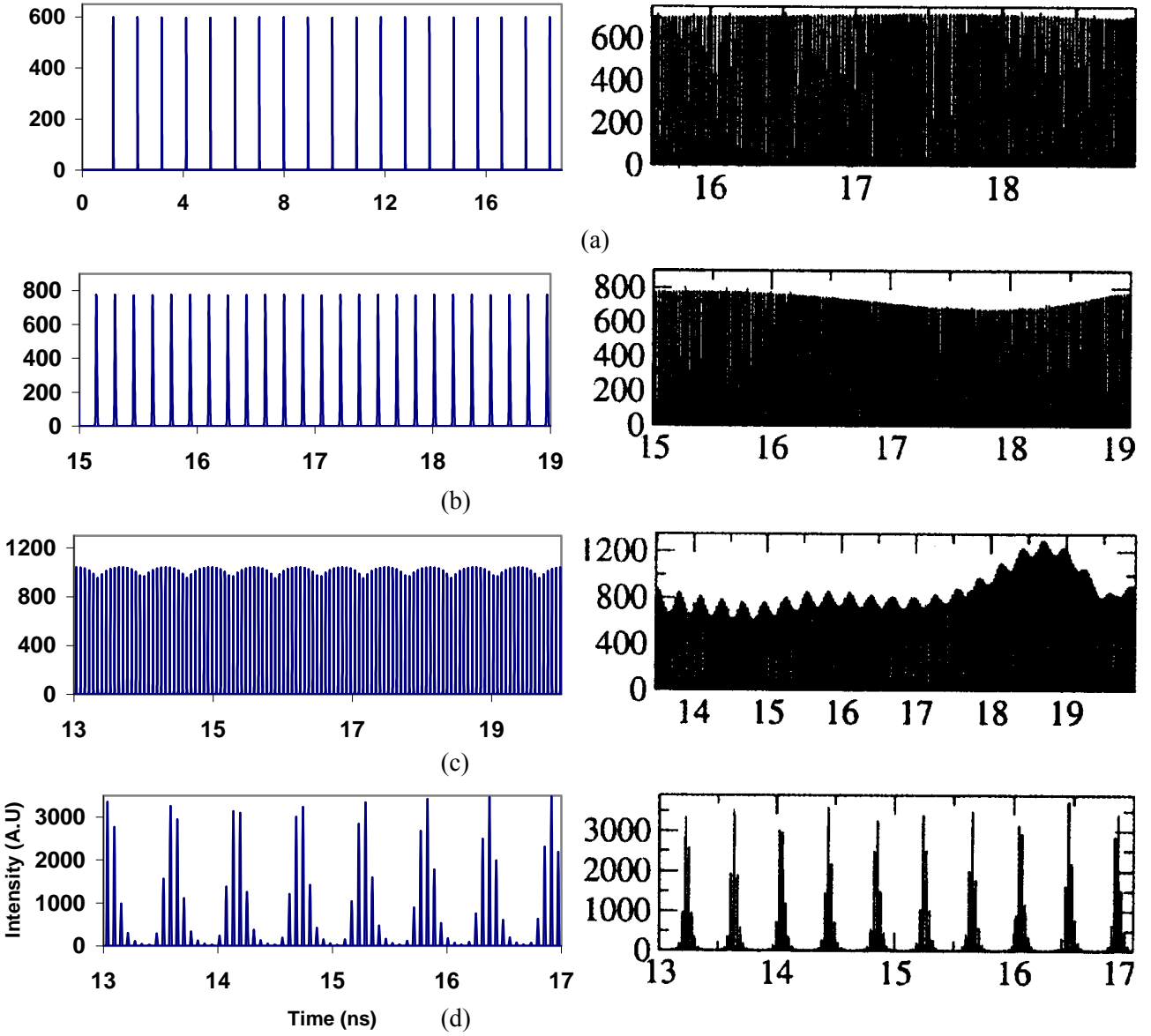
١. إغلاق النمط لموجة مستمرة، والذي يعطي قطاراً من النبضات مغلقة النمط مع سعة مستقرة (الشكل ٧a).

٢. إغلاق النمط غير المستمر، ويعطي قطاراً من نبضات الخرج مغلقة النمط لكل مرور في التجويف الليزري حيث تتجه السعات إلى الاختلاف (الشكل ٧b).

٣. الانتقال من الموجة المستمرة إلى إغلاق النمط لمفتاح الجودة من خلال التوسيط للنمط المغلق غير المستمر (الشكل ٧c).

٤. ظهور مفتاح الجودة كمغلف لنبضات خرج مغلق النمط (الشكل ٧d). عندما يكون الماص غير مشبع تكون الضياعات الكلية في التجويف أكبر من الكسب. تزداد كثافة الحوامل بعملية ضخ قطاع الكسب وتستمر هذه العملية حتى يصبح الكسب أكبر من

الضياعات الكلية وتتحول ننوات الضجيج ضمن التجويف إلى نبضات مغلقة النمط بطريقة مغلق النمط السلبي العادي ويبدأ الاهتزاز في التجويف.



الشكل ٧. الإنتقال من الموجة المستمرة إلى مفتاح الجودة لمغلق النمط للديود الليزري $InGaAs / GaAs$ من أجل $\tau_{abs} = 35 ps$ و تيار حقن

$I_p = 0.15 mA$ حيث الأشكال على اليمين مأخوذة من المرجع [2] وعلى اليسار الأشكال المحسوبة في هذا العمل:

(a) : إغلاق النمط للموجة المستمرة من أجل $\ell_a = 100 \mu m$

(b) : إغلاق النمط غير المستقر من أجل $\ell_a = 120 \mu m$

(c) : الإنتقال من إغلاق النمط غير المستقر إلى مفتاح الجودة لمغلق النمط من أجل $\ell_a = 160 \mu m$

(d) : مفتاح الجودة لمغلق النمط من أجل $\ell_a = 240 \mu m$

٧. الخاتمة

جرى تقديم نموذج رياضي يصف الإصدار الديناميكي لمضاعف التواتر مع مفتاح الكسب للديود الليزري $InGaAs / GaAs$ المؤلف من قطاعي موجة مع مقدمة متناقصة تدريجياً. شمل النموذج الرياضي أيضاً معالجة حالة مفتاح الجودة لمغلق النمط.

استخدم نموذج البعد الواحد لوصف السلوك الزمني للمنظومة الليزرية، حيث أخذ بالحسبان التفاعل المتبادل بين مضاعف التواتر والديود الليزري $InGaAs / GaAs$ مع ماص نصف ناقل قابل للإشباع. كما درس ارتباط مضاعف التواتر و مفتاح الكسب بتيار الإنحياز العكسي. يشير النموذج المقترح الى أنه يتم التخلص من ذيل نبضات خرج مضاعف التواتر و مفتاح الجودة البالغ عرضها عدة عشرات بيكوثانية. يمكن أن يعزى الاختلاف الطفيف في شكل ذيل النبضة المحسوبة عددياً والنبضة التجريبية إلى العدسة المتشكلة بسبب قرينة الإنكسار والتي تحدث بتأثير الفجوة المحترقة.

تتحول نتوءات الضجيج ضمن التجويف إلى نبضات مغلقة النمط بطريقة مغلق النمط السلبي العادي ويبدأ الاهتزاز في التجويف. وهذا يقود إلى ماص الإشباع خلال دور صغير من الزمن ويسمح بصدور نبضات قصيرة وشديدة. جرى عرض طريقة مبسطة لحل معادلات المعدل تحليلياً واختزال المتغيرات المجهولة وذلك باستخدام قياسات الإشارة الصغيرة ومعالجة حالة الاستقرار عند العتبة.

يقدم النموذج المطور آلية بسيطة وموثوقة من أجل دراسة حركية مضاعف تواتر لليزر Nd^{+3} مع مفتاح الكسب ولمفتاح الكسب لمغلق النمط مثل $YVO_4 : Nd$ و $GdVO_4 : Nd$ الخ.

كلمة شكر

يشكر المؤلفان الأستاذ الدكتور إبراهيم عثمان، المدير العام لهيئة الطاقة الذرية السورية، على تشجيعه وإرشاده ودعمه المستمرين للأعمال العلمية في الهيئة.

٨. المراجع

1. Cakmak B. Modeling of experimentally measured Q-switched pulsations in $InGaAs / GaAs$ diode laser. Optics Communications (2006) 266, 614-619.
2. Flynn M.B., O'Faolain L. And Krauss T.F. An experimental and numerical study of Q-switched Mode Locking In Monolithic Semiconductor diode laser. IEEE J. of quantum electronic (2004) 40(8), 1008-1013.
3. Cakmac B. Williams K.A. Penty R.V. and White I.H. Experimental investigation of a Q-switched triple contact $InGaAs$ bow-tie diode laser. IEE proceeding optoelectron (1999) 146(6), 259-262.
4. Tsang D.Z. and walpole J.N. Q-switched semiconductor diode lasers. IEEE J. of quantum electronic (1983) 19 (2), 145-156.
5. Owen A., Rees P., Pierce D., Matthews and Summers H.D. Theory of Q-switching in a quantum-dot laser diode, Semiconductor Optoelectronics (2003) 150 (2), 152-158.
6. Sonnenberg-Klien B., Silverman Kevin L., and mirin R.P multimode lasing at room temperature from $InGaAs/GaAs$ from quantum dot laser. Semiconductor lasers for lightwave communication systems, proc., Spie (2001) 4533, 1-8.
7. Koechner W. Solid State Laser Engineering. Springer Verlag, sixth edition 2005.
8. Norman A.G., hanna M.C., Diplo P., Lvei D.H., Reedy R.C., Ward J.S. and Aljassim M.M $InGaAs/GaAs$. QD superlattice: MOVPE Growth, Structural and Optical Characterization, and Application in intermediate -and solar cells (2005). National renewable energy laboratory (NREL) 1617 Cole Boulevard, Golden Co 80401.

9. Leon R. *InGaAs/GaAs* Quantum dots: effect of ensemble interactions interdiffusion, egregation and proton radiation. jet propulsion laboratory, California institute of technology Pasadena, California, USA
10. Rafialov E.U., Birkin D.J.L., and sibbett W. Efficient frequency doubling of a pulsed laser diode by use of a periodically poled KTP waveguide crystal with Bragg gratings. *Optic letters* (2001) 26 (24), 1961-1962.
11. Amano T., Yamauchi S., Sugaya T and Komori K. Sub-band energy level controlling of QDs using *InGaAs* gradient composition strain-reducing layer. *Optical society of America* (2006).
12. Abdul Ghani B. and Hammadi M. Intracavity frequency-doubling of a *InGaAs* diode laser passively *Q*-switched with *GaAs* saturable absorber *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* (2009) 11.
13. Habibullah F., Huang W.P. A self-consistent analysis of semiconductor laser rate equations for system simulation purpose. *Optics communication* (2006) 258, 230-24.
14. Davydov. Quantum mechanics. Statni pedagogicke nakladatestvi (SPN) n.p., Prague 1978 (in Czech).
15. Kalimani Klio I., and OMahony M.J. relative intensity noise for laser diode with arbitrary amounts of Optical feedback. *IEEE Journal of Quantum Electronics* (1998) 34 (8) 1438-1446.
16. Sutherland R L 1996 *Handbook of Nonlinear Optics* (Marcel Dekker, Inc.).
17. Unicamp-Ifgw. Efficient intracavity frequency doubling of a high power diode laser generating light at 423 nm. *Annalis of optics* (2003) 5 .XXVI ENFMC.
- 18 Rana F. and Ram R.J. Theory of current noise and photon noise in quantum cascade lasers Massachusetts institute of technology ,Cambridge MA 02139 (2008).
19. Zhang J., Chang H., Hongxiang J., Wang R., and Peng K. Suppression of the intensity noise of a diode-laser – pumped single- frequency ring Nd:YVO₄-KTP green laser by optoelectronic feedback. *Optics laser* (2001) 26 (10), 695-697.

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



Report on Scientific Informatic Study
Department of Scientific Services

Mathematical Modeling of a passively Q-Switched Diode Laser

Dr. B. Abdul Ghani
Ph. M. Hammadi