الترقيم الدولي ٨٦٩٠ - ١٩٩١ ISSN 1991- 8690

السيطرة على حركيات خرج ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs بطول موجي 1.3µm: التأخير الزمني ، زمن الوصول و زمن منطقة التذبذب

ضياء صيوان بريسم رائد محمد حسن

قسم الفيزياء - كلية التربية للعلوم الصرفة- جامعة البصرة - البصرة / العراق

الخلاصة:

تم دراسة تأثير بعض عوامل السيطرة لمنظومة ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs بطول موجي 1.3 µm . من ضمن العوامل التي شملتها الدراسة : معامل الانبعاث التلقائي، عامل الخسارة، كثافة تيار الحقن، و كثافة النقاط الكمية وتأثير هذه العوامل على استقراريه الحالة المستقرة steady (state) لليزر QD . اضافة الى ملاحظة تأثير نسبة الضخ على التأخير الزمني (delay time) وزمن النهوض (rise time) وزمن منطقة التذبذب (oscillation region time) ونسبة عدد الفوتونات.

الكلمات المفتاحية: ليزر النقطة الكمية ، ليزر InAs/InGaAs ، التأخير الزمني ، زمن الوصول ، زمن التذبذب

control Dynamical times of Quantum Dot laser InAs / InGaAs output at wavelength 1.3 µm: delay, rise and oscillation

Dhia Saiwan Ra'ed M. Hassan

Department of Physics. College of Education for Pure Science-University of Basrah- Basrah/ IRAQ

Abstract:

We studied some control parameters effect of quantum dot laser InAs / InGaAs system at wavelength of 1.3 µm. The study taken such as the parameters: spontaneous emission coefficient, loss factor, injection current density, and the density of quantum dots on stabilizing the steady state. In addition, we studied the effect of the impact of pumping on the proportion of time-delay, rise time, oscillation time and the ratio of photons number.

Key words: Quantum dot laser , InAs / InGaAs laser, Delay time, Rise time, Oscillation time

المقدمة:

أدى ظهور الجيل الاخير من ليزرات أشباه الموصلات Semiconductor Lasers الى زيادة الاهتمام بخصائص هذه المصادر الضوئية والاختزال الهائل الذي أحدثته في منظومات الاتصالات البصرية التي توظف هذه الليزرات كمصادر لحمل البيانات والمعلومات ومع التقدم الكبير الذي طرا على تقنيات تصنيع التراكيب المتعددة والدقيقة فأن ليزرات النقطة الكمية Quantum Dot Lasers (QDL) أخذت الاهتمام الاكبر وفضلت على ليزرات البئر الكمي Quantum Well Lasers (QWL) فيما يتعلق بتيار العتبة، استقراريه درجة الحرارة، الفوضوية (chaos) و التغذية المرتدة [1]. ان نقل البيانات بسرعة عالية يتطلب اجهزة غير حساسة لدرجة الحرارة، من ناحية اخرى فأن الليزرات العاملة عند الطوليين الموجيين 1.3 µm و 1.55 µm الاكثر تميزا من بين المدى الواسع من الاطوال الموجية ان احد اسباب هذا التميز والذي يمكن ان يعد السبب الرئيس هي درجة الاقتران الكبيرة ما بين هذين الطوليين الموجيين والألياف البصرية المستخدمة حاليا في منظومات الاتصالات البصرية مما يؤدي الى انخفاض خسائر التشتت لشعاع الليزر داخل الليف البصري الى حدها الأدنى مما يرفع كفأه مرور شعاع الليزر الى حدها الاعلى [2] . ان الليزر قيد الدراسة هنا هو ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs ، فسلوك الليزر يمكن ان يوصف بمعادلات نسبية لتعداد الحاملات في

(SCH) *Separate Confinement* Heterostructure [5,4,3] ومعادلة واحدة للفوتونات الناتجة من الانبعاث المحفز. النموذج قيد الدراسة يدمج الحسابات المايكروسكوبية لنسب الأستطارة (حامل – حامل) والتي تعتمد على كل من كثافة الالكترون والفجوة [6] والتي تتفاوت مع تيار الضخ . ان معادلات المنسوب Rate Equations مع المعاملات الثابتة مستندة اساسا على اطياف الليزر التجريبية والتي تظهر زيادة في عرض خط الليزر مع زيادة تيار الضخ حيث تم دمج درجة الحرارة في المعادلات التي تزداد بزيادة تيار الضخ [7]. اضافة الى هذا فأن هناك عدد من المعاملات والتي تسمى بمعاملات النظام لها تأثيرات مختلفة على معدلات الاستطارة غير الخطية لكثافة الحاملات في الطبقة الرطبة wetting layer (WL) ,ومنطقة النقط الكمية (QDs). اغلب النتائج المعطاة ركزت على كثافة الفوتون كذلك فأنه تم اختصار نسب الاستطارة الغير خطية في المعادلات النسبية في ليزر النقطة الكمية لأن نظرية تذبذبات الاسترخاء اساسا هي مستندة على نظرية مجهرية [6] و بالتالي نستطيع مناقشة تأثير المعاملات المختلفة على انتاج الليزر.

النموذج النظري:

نستطيع استخدام مجموعة من المعادلات النسبية التفاضلية لوصف التطور الزمني للخصائص لمايكروية لتجويف الليزر مثل التعداد واستقطاب QDs [9,8] . ان هذه المعادلات تم اشتقاقها من معظم نماذج ليزر أشباه الموصلات (SLs) او ما يعرف بنظرية QD [10] والتي تدمج الديناميكيا الكهربائية الكلاسيكية التي تحدث ضمن الليزر بالإضافة الى ميكانيك الكم [11] . فإذا اخذنا نظام بمستويين في QDs للإلكترونات والفجوات حيث ان الإلكترونات في البداية تحقن في WL قبل اسرها بواسطة QDs ولأن كثافة WL عالية فأن عملية استرخاء الحاملات اسرع بكثير من عمليات الأسر من WL في QDs [12] . فيمايلي معادلات نسبية غير خطية لتغير كثافة حاملات الشحنة في QDs (n_h, n_e) , وكثافة الحاملات في QW (w_h, w_e) , وكثافة الفوتونات n_{ph}, [7]:

$$\dot{n}_e = S_e^{in}(N^{QD} - n_e) - S_e^{out} n_e - R_{ind} - R_{sp} \quad (1)$$

$$\dot{n}_h = S_h^{in}(N^{QD} - n_h) - S_h^{out} n_h - R_{ind} - R_{sp} \quad (2)$$

$$\dot{w}_e = \tau \frac{j(t)}{e_0} - \frac{N^{sum}}{N^{QD}}\left[S_e^{in}(N^{QD} - n_e) - S_e^{out} n_e\right] - R_{loss} \quad (3)$$

$$\dot{w}_h = \tau \frac{j(t)}{e_0} - \frac{N^{sum}}{N^{QD}}\left[S_h^{in}(N^{QD} - n_h) - S_h^{out} n_h\right] - R_{loss} \quad (4)$$

$$\dot{n}_{ph} = -2k\, n_{ph} + \Gamma R_{ind} + \beta R_{sp} \quad (5)$$

ان العمليات الناتجة عن الامتصاص والانبعاث معطاة بواسطة الربح الخطي

$$R_{ind} = WA(n_e + n_h - N^{QD}) \quad (6)$$

حيث ان N^{QD} هي كثافة QD حيث يؤخذ في الحسبان انحلال البرم وهي ليست ثابتة وانما تزداد بزيادة تيار الضخ لتزايد الانماط الطولية في ناتج الليزر وتعطى بالعلاقة [7]

$$\frac{N^{QD}}{10^{-4} nm^{-2}} = \left[0.75 - 0.74 \exp\left(-\frac{10^6}{1.75} w_e^{\,2}\right)\right] \quad (7)$$

حيث ان W هو معامل أينشتاين و Γ عامل الحصر البصري وهو ناتج من عامل الحصر الهندسي (النسبة بين حجم كل QDS وحجم النمط) [7]، β معامل الانبعاث التلقائي k , عامل الخسارة والذي يعبر عن الخسارة الكلية للتجويف [13] ,ويعطى كقيمة ثابتة ، j هو كثافة تيار الحقن و e_0 عنصر الشحنة، τ هو كفاءة الحقن والتي تحسب لكون أننا لا نستطيع أن نحقن اي زيادة حاملات عندما يكون QW ممتلئ (w_e R_{SP} , $(= N^{QW}$ ترمز الى الانبعاث التلقائي المقرب $R_{sp}(n_e, n_h) = (\frac{w}{N^{QD}})\, n_e n_h$, و R_{loss} هي حد الخسائر طبقا الى خسارة الحاملات في QW وتعطى بالعلاقة, $= B\, w_e w_h$ R_{loss} حيث ان B يعرف بواسطة

$$B = 0.03 nm^2 ps^{-1} + 30 nm^4 ps^{-1} \left(\frac{T}{300\,k}\right)^4 w_e \quad (8)$$

اما فيما يخص الاستطارة فهناك انواع عديدة من الاستطارة غير الخطية وقد تم التركيز على أربعة انواع , اثنان للأستطارة الداخلية غير الخطية والاخرى للأستطارة الخارجية غير الخطية هذه العمليات تلعب دورا اساسيا في ديناميكيات ليزرالنقطة الكمية والتي تتضمن الالكترونات والفجوات في كل من نسبتي الأستطارة الداخلية للإلكترون والفجوة تعطى بالعلاقات التالية [7]

$$S_e^{in} = \frac{9\,T + KT_0}{3000K}[\tanh(a\,w_e - b) + c](m\,w_e{}^2 + n\,w_e)$$

$$S_h^{in} = \frac{0.75\,T + KT_0}{525K}[\tanh(a\,w_h - b) + c](n\,w_h)$$

أما الاستطارة الخارجية فهي مرتبطة باالاستطارة الداخلية وتعطى بالعلاقات العلاقات الاتية :

$$S_e^{out} = S_e^{in}\exp(\frac{-210\,mev}{26\,mev} - \ln[\exp\left(\frac{w_e}{4.7\times10^{11}cm^{-2}}\right) - 1.8)$$

$$S_h^{out} = S_h^{in}\exp(\frac{-50\,mev}{26\,mev} - \ln[\exp\left(\frac{w_e}{48\times10^{11}cm^{-2}}\right) - 1.8$$

نسب الاستطارة تعتمد على درجة حرارة الحاملات داخل QW والتي تكون متغيرة . ان $\Delta T = 60$ K عندما يكون تيار الضخ i=150 A [7] حيث ان هناك علاقة ما بين كثافة التيار ودرجة الحرارة $\Delta T(j)\propto j^2$ لذا فأن $w_e\propto\sqrt{j}$ [14] . واعتمادا على تيار الضخ حيث $\Delta T(w_e)\propto (w_e)^4$ لذا فأن

$$T=300\,K+0.245\times10^{12}nm^8(w_e)^4 \quad\ldots\ldots(9)$$

ان نسب الاستطارة اعلاه تزداد بزيادة كثافة حاملات QW لأن هناك المزيد من الاستطارة المشتركة المتاحة ولكن عندما تكون كثافة QW عالية فأن احتمالية الاستطارة الخارجية تقل بسبب مبدأ الاستبعاد لباولي [15]لأنه يؤثر على الالكترونات بصورة أسرع.

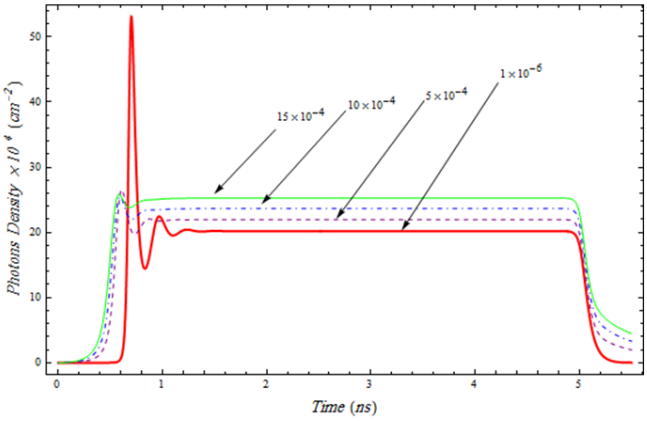
النتائج والمناقشة:

الدراسة الحالية تعتمد على حلول عددية لنظام المعادلات (1-5) بأستخدام برنامج Mathematica. نتائجنا النظرية للخصائص الديناميكية لليزر النقطة الكمي InAs/InGaAs QD فوق العتبة بطول موجي 1.3 μm . فمن المعلوم ان هناك علاقة ما بين معامل الانبعاث التلقائي (β) وكثافة الفوتونات حيث أن (β) يتحكم في اضمحلال عمليات التشغيل [1] فيلاحظ ان فترة تذبذب الاسترخاء في منطقة الحوادث اللحظية تكون طويلة نسبيا عندما تكون β ذو قيمة صغيرة و تتناقص هذه الفترة مع زيادة β كما في الشكل (1 (a)) . كما يلاحظ ان العلاقة هي خطية بين المجال ومعامل الانبعاث التلقائي كما يظهر في الشكل (1(b)) .اما من خلال دراسة تأثير اخر على المجال من قبل معامل أنشتاين W حيث يكون التأثير المباشر لمعامل أينشتاين هو خطي على R_{ind} و R_{SP} والتي تم تظمينها في المعادلات (1-5) كما أن تأثيره واضح على تشغيل ديناميكيات ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs حيث ان الزيادة تظهر في خرج الليزر عندما W=0.9 .أضافه الى هذا فأنه يؤثر على زمن التأخير والذي يزداد بزيادته كما في الشكل (2(a)) . الشكل (2(b)) يوضح تأثير دقيق لمعامل أينشتاين على خصائص ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs حيث يلاحظ انه مع زيادة هذا العامل تزداد شدة المجال سريعا حتى الوصول الى اقصى قيمتها عند مقدار W=0.665 , بعدها يهبط المجال مع زيادة معامل أينشتاين بشكل شبة خطي كما مبين في الشكل (2(b)). في ليزر النقطة الكمية يكون دائما التعامل مع طبقات من النقاط الكمية المكدسة لذا فأن العامل N^{QD} (كثافة النقاط الكمية) لة تأثير واضح حيث ان N^{QD} له دور مهم في تحديد مقدار الربح التفاضلي للمنظومة و بالتالي يؤثر في مقدار الربح الكلي للوسط الفعال . نلاحظ من خلال الشكل (3(a)) ان زيادة N^{QD} تؤدي الى زيادة كثافة الفوتونات المنبعثة ونقصان زمن التأخير (Delay time) شكل ((3(b)) يوضح التأثير شبة الخطي لـ N^{QD} على كثافة الفوتونات . عند كثافات عالية من QW فأن عمليات استرخاء الناقل سريعة جدا حوالي (Ps) من عمليات الأسر[7] .ان زيادة N^{QW} تؤدي الى زيادة خرج الليزر الى مستوى معين ثم تحصل حالة استقرار بسبب وجود العامل ($\tau = 1 - \frac{w_e}{N^{QW}}$) حيث تكون $w_e = N^{QW}$ كما في الشكل (4 (a)) كذلك فأن نسب الأستطارة تزداد بزيادة حاملات QW لأن هناك استطارة مشتركة متوفرة بصورة اكثر بسبب مبدئ استبعاد باولي وهذا ما يوضحه الشكل (4(b)). كما أن الكثافة الفعالة لحالات QW وعدد النقاط الكمية N^{QD} تزداد مع زيادة المساحة والأنبعاثات التلقائية التي يسيطر عليها التهيج في QD من $R_{sp}(n_e,n_h)$ (أنظر المعادلة (6)). نظرا لأن عمليات التحفيز الناتجة من الانبعاث والامتصاص تعتمد على مساحة QW (A) ، لذلك فأنها تحسن من خصائص الإخراج التي تحدث في Quantum (QDL

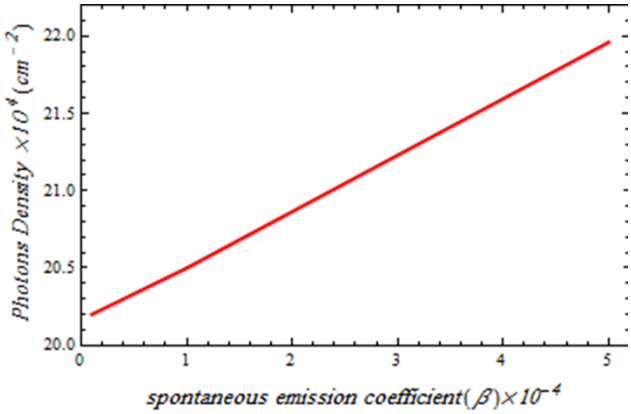
Dot Laser) وهذا واضح في شكل (5 (a))، كما أن خرج QDL يزداد بزيادة مساحة QW (A) ونقصان زمن التأخير {أنظر الشكل (5(a) و (b))}. أن نسبة الضخ تلعب دورا أساسيا في تحديد خصائص QDL مثل المجال وزمن التأخير وزمن منطقة التذبذب oscillation (region time) حيث أنه فوق العتبة نجد ان هناك علاقة خطية ما بين نسبة الضخ وعدد الفوتونات وهو ما يظهر في شكل (6 (a)) الذي يبين خرج الليزر لتيارات ضخ مختلفة تعطى بوحدات عتبة الليزر التي تم تحديدها من خصائص الحالة المدروسة (n_{ph}). كذلك فأن زمن النهوض (Rise time) يأخذ تناقص لوغاريتمي بزيادة نسبة الضخ كما في الشكل (6(b)) وهذه الحالة مشابهة لسلوك زمن التأخير (Delay time) الوقت الازم للوصول الى عتبة الليزر كما في الشكل (6 (c)). تذبذبات منطقة الاسترخاء تتناقص بزيادة تيار الضخ وهذا واضح يظهر من خلال الشكل (6 (d)).أن معامل الخسارة K يلعب دورا اساسيا في تحديد خرج الليزر والذي ينتج من خسارة الحاملات الحرة في طبقات الحصر او في QW حيث أن موجة الليزر يمكن أن تظهر (blue shift) [16] مع زيادة الخسائر البصرية والتي تحدث بزيادة طول التجويف والذي يؤدي بدورة الى نقصان خرج الليزر وهذا ما يمكن ملاحظته في الشكل (7(a)) حيث نلاحظ أن زيادة عامل الخسارة (K) يؤدي الى نقصان خرج الليزر وزيادة التأخير الزمني . كما أن الشكل (7(b)) يصف قياس خرج الليزر لقيم مختلفة من (K).

الاستنتاجات:

النتائج النظرية الواردة في هذا العمل تعطي فهم لتأثير معاملات عديدة على حركيات ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs الذي يعمل بطول موجي **1.3μm** وبدرجة حرارة الغرفة حيث أن حركيات بدء التشغيل تم تحليلها لمدى واسع لمختلف معاملات السيطرة وقد وجدنا أن كل معامل من هذه المعاملات له تأثير مباشر قد يكون خطي او العكس. للوصول الى الحالة المثلى في عمل ليزر InAs/InGaAs وذلك ببلوغ الحالة المستقرة سريعا لابد من العمل على تقليل زمن التأخير وزمن الوصول وزمن التذبذب. فمن العديد من المعاملات التي تلعب دورا في ليزر النقطة الكمية لاحظنا ان كثافة النقاط الكمية N^{QD} لة دور مميز في أستقرارية عمل الليزر أضافة الى هذا وجدنا أن زيادة مساحة QW تؤدي الى زيادة خرج الليزر ونقصان زمن التأخير. ان عامل الخسارة (K) يلعب دورا رئيسيا في تحديد خرج الليزر وزمن التأخير والذي يتأثر بطول التجويف .كما أن هناك علاقة خطية ما بين نسبة الضخ وعدد الفوتونات لتيارات ضخ مختلفة تعطى بوحدات عتبة الليزر والتي تم تحديدها من خصائص الحالة المدروسة لـ n_{ph}.

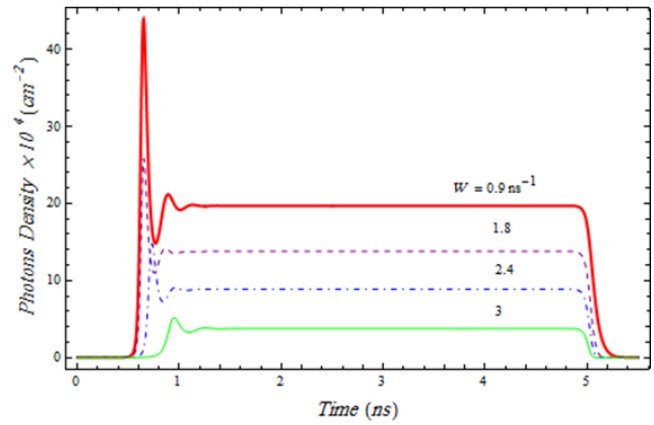


(a)

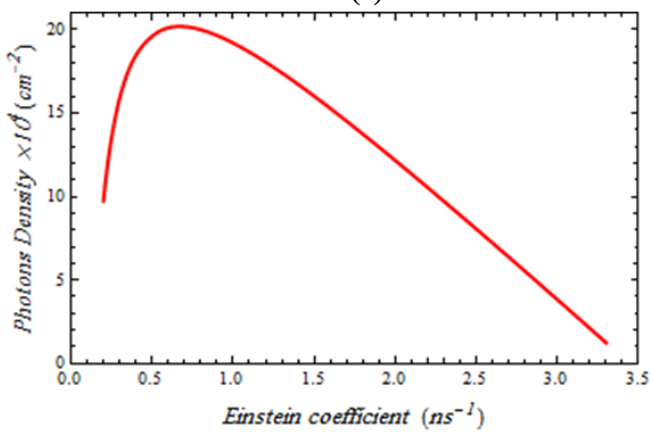


(b)

الشكل ١ : (a) يوضح حركيات بدء التشغيل لكثافة الفوتونات لنموذج ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs لقيم مختلفة لمعامل الانبعاث التلقائي (β = (1,5,10,15)×10^{-6} ، (b) *يوضح تغير كثافة الفوتونات مع معامل الانبعاث التلقائي* (β) *في ليزر النقطة الكمية* InAs/InGaAs . المعاملات الاخرى هي مستخدمة في [7] ($\Delta E_h = 50$ mev ,$\Delta E_e = 210$ mev , w = 0.7 ns^{-1}) 65 ، $N^{sum} = 20\times10^{10}$cm^{-2}، $A = 4.\times 10^{-5}$ cm^2، $= 5 \times 10^{-6}$، $N^{QW} = 1 \times 10^{12}$cm^{-2} ،$j_{th}$ = Acm^{-2} b ، a .Eq(7) N^{QD} ، Eq. (8) B , Eq. (9) T ، β ثوابت

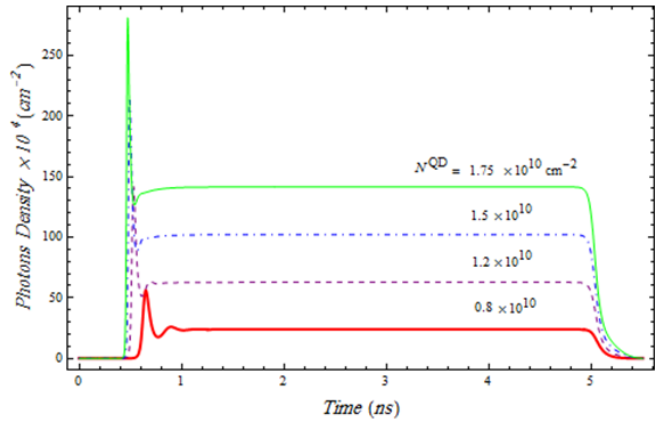


(a)

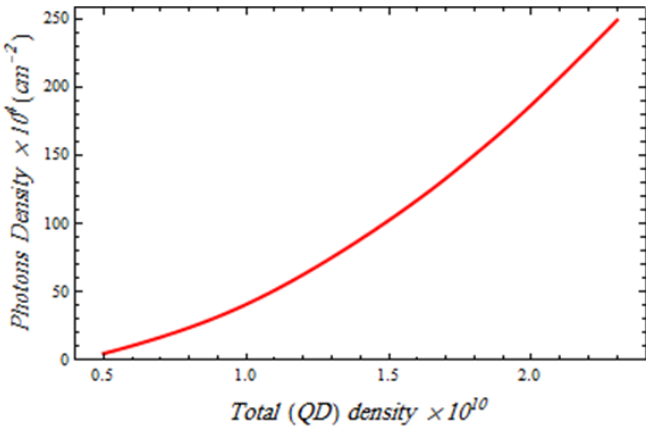


(b)

الشكل ٢ :(a) يوضح حركيات بدء التشغيل لكثافة الفوتونات لنموذج ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs لقيم مختلفة لمعامل أنشتاين (W=0.9,1.8,2.4,3)، (b) يوضح تغير كثافة الفوتونات مع معامل أنشتاين (w) في ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs. المعاملات الأخرى المستخدمة كما في شكل ١

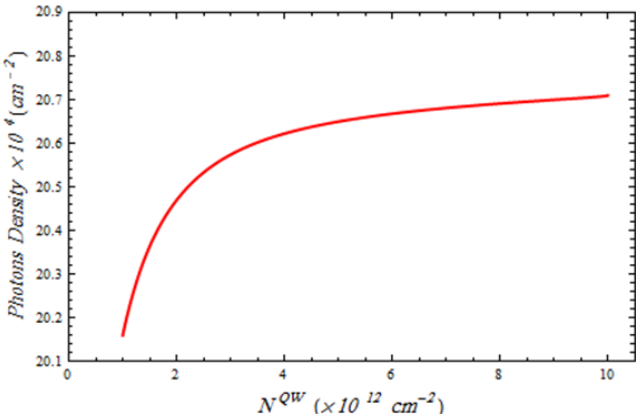


(a)

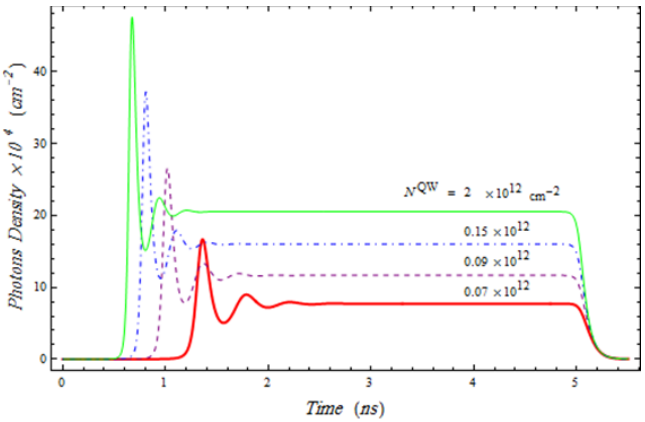


(b)

الشكل ٣ : (a) يوضح حركيات بدء التشغيل لكثافة الفوتونات لنموذج ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs لقيم مختلفة لكثافة النقاط الكمية (N^{QD}=0.8, 1.2, 1.5, 1.75)، (b) يوضح تغير كثافة الفوتونات مع كثافة النقاط الكمية (N^{QD}) في ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs المعاملات الأخرى المستخدمة كما في شكل ١

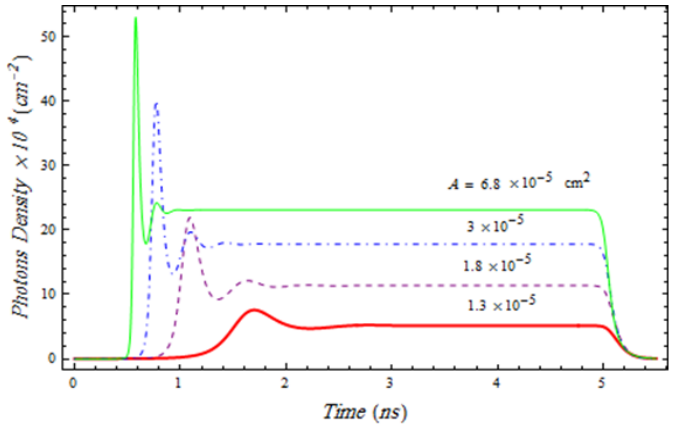


(a)

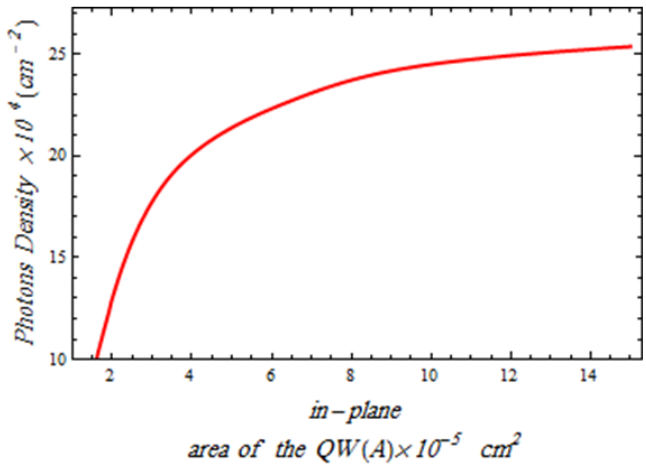


(b)

الشكل 4 :(a) يوضح تغير كثافة الفوتونات مع كثافة N^{Qw} في ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs، (b) يوضح حركيات بدء التشغيل لكثافة الفوتونات لنموذج ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs لقيم مختلفة من (N^{Qw}= 0.07 , 0.09, 0.15, 2)

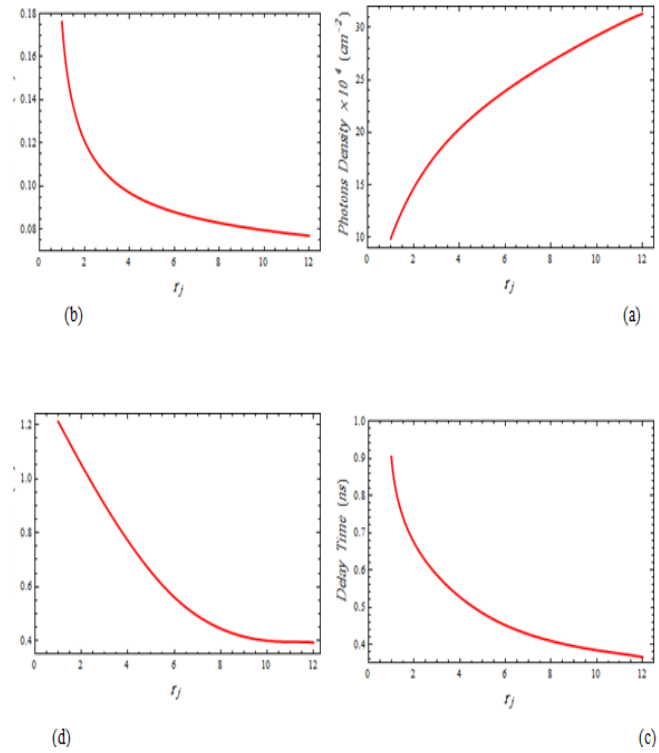


(a)

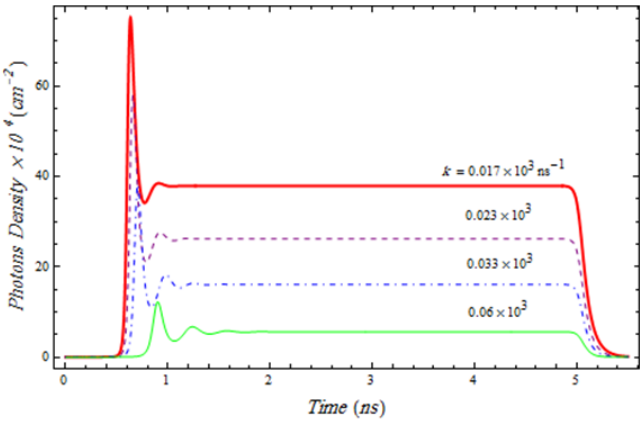


(b)

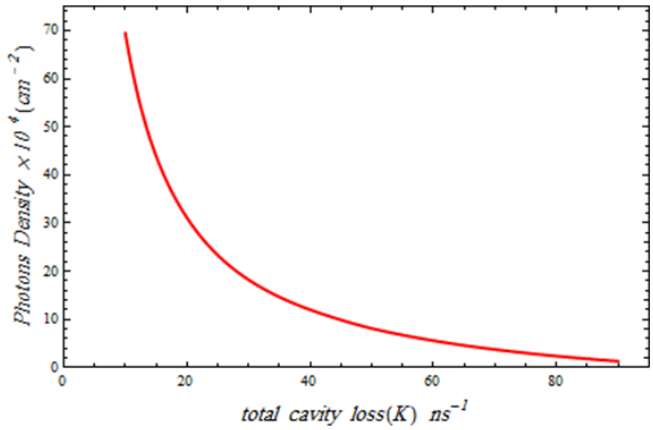
الشكل٥: (a) يوضح حركيات بدء التشغيل لكثافة الفوتونات لنموذج ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs لقيم مختلفة من (A= 1.3 , 1.8 , 3, 6.8)، (b) يوضح تغير كثافة الفوتونات مع A في ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs



الشكل٦ : يوضح خصائص حركيات الخرج لنموذج ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs بطول موجي 1.3 μ كدالة الى نسبة الضخ : (a) أستقرارية المجال، (b) زمن الوصول، (c) زمن التأخير، (d) زمن التذبذب



(a)



(b)

الشكل ٧: (a) يوضح حركيات بدء التشغيل لكثافة الفوتونات لنموذج ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs لقيم مختلفة من عامل الخسارة ($k = 0.017\times 10^{3}$, 0.023, 0.033 , 0.06)، (b) يوضح تغير كثافة الفوتونات مع عامل الخسارة k في ليزر النقطة الكمية InAs/InGaAs

المصادر

[1] K. Lüdge, M. J. P. Bormann, E. Malić, P. Hövel, M. Kuntz, D. Bimberg, A. Knorr, and E. Schöll . (2008), *"Turn-on dynamics and modulation response in semiconductor quantum dot lasers"*. Physical Review B, 78: 035316(1-11).

[2] V. M Ustinov and A .E Zhukov. 2000,*semicond.Sci.Technol.*,Vol.15, R 41-R 54 .

[3] M. Sugawara, May.(1998),*"Effect of carrier dynamics on quantum-dot laser performance"*, 10th Intern. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials, Tsukuba, Japan, 11-15 .

[4] A. H. Al-Khursan . (2005), *"Intensity noise characteristics in quantum-dot lasers: four-level rate equations analysis"*. Journal of Luminescence, 113: 129–136.

[5] J. Yang. (2008), *"High-Performance Quantum Dot Lasers and Integrated Guided-Wave Devices on Silicon"*. PhD. thesis, University of Michigan, USA.

[6] E. Mali´c, M. J. P. Bormann, P. Hovel, M. Kuntz, D. Bimberg, A. Knorr, and E. Scholl . (2007),"Coulomb damped relaxation oscillations in semiconductor quantum dot lasers". IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 13(5): 1242- 1248.

[7] K. Lüdge, R. Aust, G. Fiol, M. Stubenrauch, D. Arsenijevi´c, D. Bimberg, and E.Schöll. 2010,*"Large signal response of semiconductor quantum-dot lasers,"* *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 46, no. 12, pp. 1755 –1762.

[8] T. M. Khoon . (2008), *"Interfacing Light and a Single Quantum System with a Lens"*. PhD. thesis, Department of Physics, National University of Singapore, Singapore.

[9]T. R. Nielsen, P. Gartner, and F. Jahnke . (2004), *"Many-body theory of carrier capture and relaxation in semiconductor quantum-dot lasers"*. Physical Review B, 69: 235314(1-13).

[10] P. Meystre and M. Sargent III .(2007),*"Elements of Quantum Optics"*. ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[11] F. Schwabl . (2000),*"Advanced Quantum Mechanics"*. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Third Edition.

[12] R. Wetzler, A. Wacker, and E. Scho ll. (2004), *"Coulomb scattering with remote continuum states in quantum dot devices"*. Journal of Applied. Physics, 95(12): 7966 – 7970.

[13] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov. *(1999)*,Quantum Dot *Heterostructures. New York: Wiley.*

[14] K. Lüdge and E. Schöll, Nov. 2009, *"Quantum-dot lasers—desynchronized nonlinear dynamics of electrons and holes,"IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 45, no. 11, pp. 1396–1403.

[15] C. L. TANG.(2005), *"Fundamentals of Quantum Mechanics for Solid State Electronics and Optics"*. © Cambridge University Press.

[16] D. Bimberg, M. Grundmann, F. Heinrichsdorff, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, M.V. Maximov, Y.M. Shernyakov, B.V. Volovik, A.F. Tsatsul'nikov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. (2000). *"Quantum dot lasers: breakthrough in optoelectronics"*. Thin Solid Films 367: 235-249.