

اعتماد خرج ليزر شبه الموصل نوع النقطة الكمية الممتدة على درجة الحرارة

محمد سالم جاسم ، جاسب عبد الحسين مشاري

قسم الفيزياء/ كلية التربية للعلوم الصرفة / جامعة البصرة

الخلاصة:

تمت دراسة اداء ليزر شبه الموصل نوع النقطة الكمية الممتدة تحت تاثير درجة الحرارة ضمن المدى (250 – 400) كلفن حيث وجدنا عتبة تيار حقن دنيا تكون عندها شدة الخرج اعلى ما يمكن عند درجة حرارة 280 كلفن.

Temperature dependence of quantum dash semiconductor laser out put

M.S.Jasim , C.A.Emsary

Department of Physics, College of Education for Pure Sciences ,
University of Basrah

Abstract:

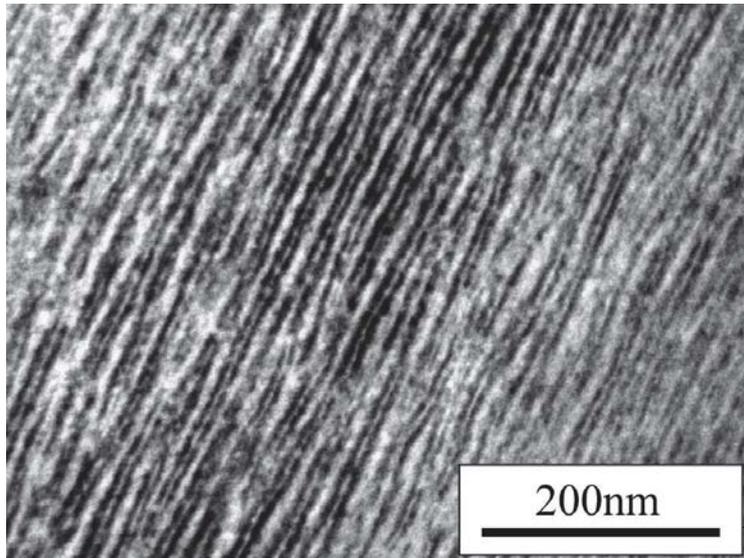
The temperature performance of a quantum dash semiconductor laser in the temperature range (250 – 400)K has been studied . Minimum threshold current occurred at 280K where the laser output intensity was at its peak .

1-مقدمة

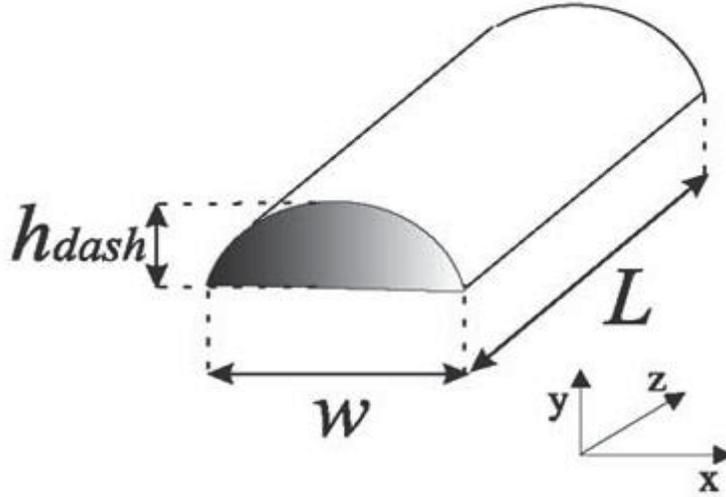
إن ليزر شبه الموصل نوع النقطة الكمية يمتلك مميزات غاية في الأهمية مثل عتبة تيارات حقن منخفضة وأستقرارية حرارية مقارنة بأجهزة الليزر ذات الآبار الكمية التقليدية وقد أستعمل ليزر النقطة الكمية المبني على مادة GaAs وبطول موجي قدرة $1.3\mu\text{m}$ كثيراً إلا أنه من الصعوبة جعل هذا الجهاز كي يعمل بالطول الموجي $1.55\mu\text{m}$. كبديل فأن المواد المصنوعة والمبنية على مادة InP المنمات على سطح ترسيب (100) ، والمستعملة في الليزر التقليدية بالطول الموجي $1.55\mu\text{m}$ ، يمكن أن تستعمل لإنماء نقاط كمية . لقد وجد بأن نقاط InAs المنمات على لوح ترسيب InP بالاتجاه (100) تصبح نقاط كمية مستطالة أطلق عليها تسمية النقاط الكمية الممتدة [Wanget al.] Quantum Dash (QDash) . أظهرت أجهزة الليزر InAs/InP ذات النقطة الكمية الممتدة مميزات مهمة مثل تحصيل تفاضلي Differential gain مرتفع و درجة حرارة مميزة (T_p) Characteristics temperature مرتفعة وقابلة للتضمين الى مستويات كبيرة .

إن تراكيب النقاط الكمية الممتدة تحتوي نقاط كمية متساوية الخواص ارتفاعها يبلغ (3-4) نانومتر وطول قاعدتها يتراوح بين (10-20) نانومتر بينما طولها يمتد من العشرات الى المئات من النانومترات كما يتضح ذلك في شكل (1) ويبين صورة مأخوذة بواسطة المجهر الذري والشكل (2) يبين أبعاد النقطة الكمية الممتدة [Legarde et al.] .

إن الحصر شبه ثلاثي الأبعاد للحاملات يمكّن النقطة الكمية الممتدة (Q Dash) لأن تبدي مميزات فريدة ومدهشة مثل عدم الحساسية نحو درجة الحرارة و مقاومة للتغذية العكسية البصرية وذات مناغمة طيفية واسعة وانبعثات محفز واسع . كما وأنها أي النقاط الكمية الممتدة تبدي تحصيلاً مرتفعاً وخسائر منخفضة. وسبب التحصيل المرتفع هو التكميم المخفض لكثافات الحالات باتجاه واحد مما يجعل من تركيب ال نقاط الكمية الممتدة يقع وسطاً بين الآبار الكمية QWs والنقاط الكمية QDs . عموماً فأن تراكيب النقطة الكمية الممتدة تصنف أما على شكل نقطة ممتدة في حاجز (Dash-in-a- barrierDBAR) أو نقطة ممتدة في بئر Dash-in- well أو (Dwell) [Heck] .



شكل (1) يبين صورة لنقاط كمية ممتدة مأخوذة بواسطة المجهر الذري [Legarde et al.]



شكل (2) يمثل ابعاد النقطة الكمية الممتدة ، L طول النقطة الممتدة و W عرضها و h_{dash} ارتفاعها

نظراً لشكلها الممتد فإن للنقاط الكمية الممتدة (QDashes) عدد كبير من الحالات المحصورة طولياً التي يمكن ملؤها بكثافات تيار واطئة إضافة إلى تغيرات في الحجم باتجاه المقطع العرضي فإن ذلك يؤدي إلى طيف تحصيل واسع جداً . تتبع الصفات المميزة للنقاط الكمية الممتدة (QDashes) من الأبعاد الصفرية مثل عتبة التيار المنخفضة ومعامل تعزيز عرض الخط Linewidth enhancement factor، منخفض لذلك فإن مواد النقاط الكمية الممتدة (QDashes) تعد مهمة للتطبيق في أجهزة الالكترونيات البصرية التي تستفيد من عرض طيف التحصيل البصري . كمثال على ذلك فإن مواد QDash وجدت تطبيقاً كوسط فعال في المضخمات .

يهدف البحث الى دراسة تأثير درجة الحرارة على اداء ليزر النقطة الكمية الممتدة باستعمال أنموذج رياضي يتكون من ثلاث معادلات تفاضلية مبينة في البند التالي.

2- الأنموذج الرياضي

الأنموذج المعتمد في الدراسة قدم للمرة الاولى من قبل [O'Brien et al.] عام 2004 حيث كَتَبَ الأنموذج بالأساس لدراسة حركات ليزر نقطة كمية يتعرض إلى تغذية عكسية بصرية Optical Feedback (OFB) . بعد التخلص من التغذية العكسية البصرية وفي هذه الحالة فإن نمو كل من شدة الضوء وكثافة الحاملات لا يعتمد على طور المجال الكهربائي ليصبح الأنموذج كما يلي :

$$\dot{s} = -\frac{5}{0} + \alpha(2\rho - 1)s \dots \dots \dots (1)$$

$$\rho = \frac{6}{0} - \alpha(2\rho - 1)s + F(N, \rho) \dots \dots \dots (2)$$

$$\dot{\theta} = \frac{0}{\tau} - 2 \theta F(N, \rho) \dots \dots \dots (3)$$

حيث ان s كثافة الفوتونات و ρ احتمالية الاشغال للنقاط الكمية و N كثافة الحاملات في منطقة الترطيب Wetting layer (WL) و $g_o = \sigma_{res} v_g$ حيث σ_{res} المقطع العرضي لتفاعلات حاملات الشحنة في النقاط الكمية مع الفوتونات و v_g سرعة المجموعة وأن

$$v = \frac{2N_d}{d} \Gamma$$

حيث N_d كثافة النقاط الكمية ثنائية الأبعاد و Γ معامل الحصر Confinement Factor و d سمك طبقة النقاط. دالة تصف المعدل الزمني لتبادل الشحنات بين البئر والنقاط الكمية . J تيار الحقن Injection current (أو الضخ) و τ_d و τ_n و τ_s على التوالي عمر الفوتونات والحاملات في البئر والنقطة على التوالي. إن الأنموذج (3 – 1) يمكن أن يكتب بدلالة شدة مجال الليزر I واحتمالية الإشغال Occupation probability في النقطة الكمية الممتدة في الليزر ، ρ ، و عدد الحاملات في منطقة الترطيب (WL) ، n ، [Erneux et al.2007] كما يلي :

$$\dot{I} = [-1 + g(2\rho - 1)] I \dots\dots\dots(4)$$

$$\dot{\rho} = \eta [F(\rho, n) - \rho - (2\rho - 1) I] \dots\dots\dots(5)$$

$$\dot{n} = \eta [J - n - 2F(\rho, n)] \dots\dots\dots(6)$$

المعادلات (6 – 4) بدون وحدات dimensionless والنقطة أعلى كل من I و ρ و n تُشير إلى المشتقة الأولى نسبة إلى زمن مُعيار Normalized time .

العدد 2 في المعادلة رقم (6) ويُخذ بنظر الاعتبار انحلال البرم الثنائي في مستويات الطاقة للنقطة الكمية والعدد الأخر (2) في المعادلة رقم (4) يدخل في تعريف معامل التحصيل التفاضلي g والمعامل η يمثل النسبة بين معدلي اضمحلال كل من حاملات الشحنة ، γ_n ، والفوتونات ، γ_s ، اي $(\frac{\gamma_n}{\gamma_s})$. J يمثل تيار الضخ لكل نقطة كمية والدالة $F(\rho, n)$ تمثل تبادل الحاملات بين كل من منطقة الترطيب (WL) والنقاط الكمية الممتدة وتكتب على شكل :

$$F(\rho, n) = R^{cap} (1 - \rho) - R^{esc} \rho \dots\dots\dots(7)$$

حيث ان المقدار $(1 - \rho)$ يمثل معامل عزل باولي Pauli blocking factor اما R^{cap} فتكتب على شكل ، $R^{cap} = Bn$ والتي تمثل أقتناص capture الحاملات بمعدل B و R^{esc} تمثل معدل هروب الحاملات من النقاط الكمية الممتدة نحو منطقة الترطيب ، وبذلك فان المعادلة (7) تصبح بالشكل الاتي :

$$F(\rho, n) = Bn(1 - \rho) - R\rho \dots\dots\dots(8)$$

حيث $R = R^{esc}$ والآنموذج (6 - 4) يصبح بالشكل الاتي :

$$\dot{I} = [-1 + g(2\rho - 1)] I \dots\dots\dots(9)$$

$$\dot{\rho} = \eta [Bn(1 - \rho) - R\rho - \rho - (2\rho - 1) I] \dots\dots\dots(10)$$

$$\dot{n} = \eta [J - n - 2Bn(1 - \rho) - 2R\rho] \dots\dots\dots(11)$$

النقطة أعلى كل من I و ρ و n تُشير إلى المشتقة الأولى نسبة إلى زمن مُعيار . في ليزرات النقطة الكمية فان آليات الهروب مهمة و توفر مواد النقاط الكمية الممتدة ربح اكبر مقارنة مع تراكيب النقاط الكمية التقليدية والذي يعني إن معامل التحصيل اكبر من

الواحد [Erneux et al.2009] مع الفرض بأن لعملية هروب الحاملات تأثير كبير على خصائص الاسترخاء التي تبديها ليزر اتال نقطة الكمية الممتدة.

في دراسة عملية سابقة [Marko et al.] وعلى نوعين من ليزراتا لنقطة الكمية الممتدة عند طولين موجيين مختلفين اعتماد كثافة تيار الحقن J ، على درجة الحرارة وكان الاعتماد شبه أسي. كما وجد [Lin et al.] عملياً أيضاً اعتماد معامل التحصيل على كثافة تيار الحقن في ليزر نقطة كمية ممتدة آخر، طردياً.

أن افتراض اعتماد كثافة تيار الحقن عند العتبة على درجة الحرارة يعتبر تبسيط لما يحصل في جهاز ليزر النقطة الكمية الممتدة أسوة لما يحصل في باقي أنواع ليزرات أشباه الموصلات وهذا سيؤدي بالتأكيد إلى التأثير على شدة خرج هذا الجهاز، إلا إن التفكير باعتماد تحصيل الجهاز على درجة الحرارة وارد فإنه سيصطدم بعائق مهم، هذا العائق يتمثل بضرورة معرفة فيزياء الحرارة Thermal Physics في الجهاز وهذا أمر غاية في الصعوبة ولا يمكن استعمال المعادلات الخاصة بليزرات النقطة الكمية وهي الأقرب إلى ليزر اتال نقطة الكمية الممتدة لأنها تحتاج إلى معطيات لا يستطيع النظام الحالي توفيرها [Asryan and Suris]. لذلك ولكوننا نحتاج إلى نموذج بسيط [Mena et al.] يمكن أن يُستنبط من نتائج عملية قام بها آخرون فقد عمدنا إلى اعتماد نتائج [Zhou et al.] في إيجاد علاقة بين كثافة تيار الحقن عند العتبة ودرجة الحرارة حيث توصلنا من نتائجهم إلى العلاقة التي يمكن أن نسميها تجريبية Empirical formula الآتية :

$$J_{th} = 10867.45966 - 74.50128T + 0.13246T^2 \dots \dots \dots (12)$$

حيث يمثل الحد الأيسر من المعادلة (12) مقدار كثافة تيار الحقن عند العتبة والرمز T ، يمثل مقدار درجة الحرارة بوحدات الكلفن، علماً بأنه تم الاكتفاء بالحدود الثلاثة الأولى من المفكوك.

لدراسة تأثير تيار الحقن J ، على حركات الشدة في ليزر النقطة الكمية الممتدة سنعمد على نموذج المعادلات (11 – 9) حيث ورد رمز تيار الحقن في المعادلة (11) بعد كتابة كثافة تيار الحقن المعايير J ، على شكل [PoI] :

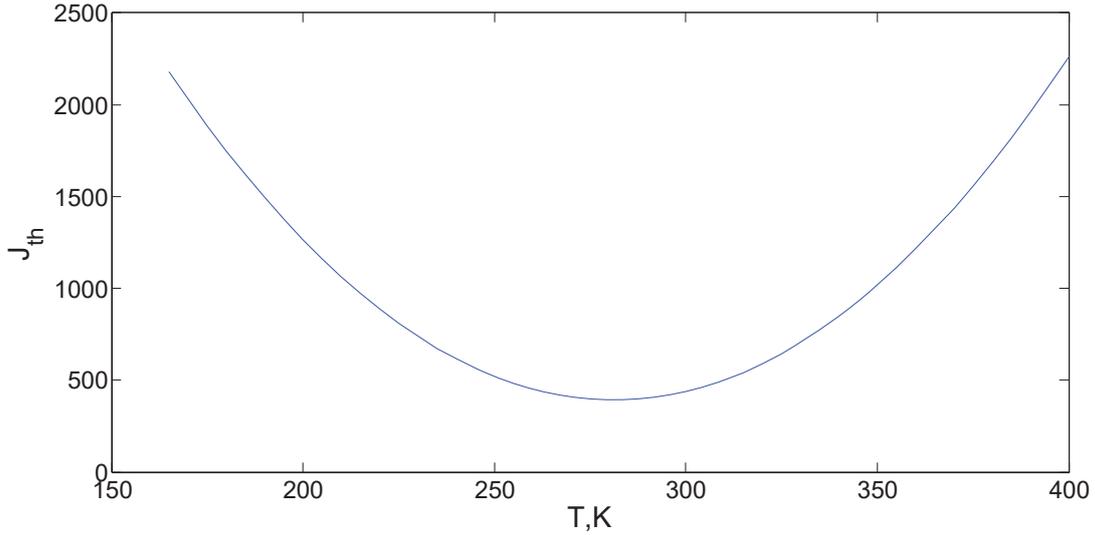
$$J \frac{J' - J_{th}}{J_{th}} \dots \dots \dots (13)$$

حيث أن J كثافة تيار الحقن الفعلي المسلط على وسط ليزر النقطة الكمية الممتدة و J_{th} ، كثافة تيار الحقن عند العتبة الذي يُحسب لكل درجة حرارة T ، من العلاقة (12) ثم يتم تعويض كل قيمة لتيار الحقن المحسوب من العلاقة (13) في الأنموذج (11 – 9).

5.3 نتائج المحاكاة والمناقشة

لغرض أستخراج نتائج تأثير درجة الحرارة على أداء ليزر ال نقطة الكمية الممتدة قمنا بحل أنموذج المعادلات (11 – 9) مستفيدين من العلاقتين (12) و (13) ومستعينين بطريقة Runge – Kutta العددية ونظام Matlab واختيار شروط ابتدائية مناسبة. الشكل (3) يمثل اعتماد كثافة تيار الحقن عند العتبة J_{th} ، على درجة الحرارة والمحسوب من المعادلة (12). رُسمت تغيرات شدة خرج ليزر النقطة الكمية الممتدة I ، مع الزمن لمدى درجات الحرارة (250-400) K ولقيم التحصيل $g = 2-4$ والنسبة $\eta = 10^{-3} - 10^{-2}$ وتيار الحقن المعايير 2000, 2500, 3000 J' ومعدل الهروب $R=50$. قبل أستخراج هذه النتائج قمنا برسم العلاقة (12) والنتيجة مبينة في الشكل (3) حيث يتضح وجود قيمة دنيا لتيار العتبة J_{th} ، وهذه النتيجة تتفق تماماً مع ما حصل عليه [Hepburn et al.] حيث تم رسم علاقة تيار العتبة J_{th} ، بدرجات الحرارة بوحدات الكلفن. أن العلاقة في الشكل (3) تبدي اعتماداً لتيار العتبة كقطع مكافئ ذا بطن واسعة تمتد بين (255-300) وقد فسر [Hepburn et al.] هذا التصرف كالآتي : أن هذا التصرف يعزى الى التباين بين الاعتماد على درجة الحرارة لكل من ذروة تحصيل وسط الليزر والرنين في التجويف

Cavity resonance . هذا يؤدي الى إزاحة ذروة تحصيل وسط الليزر بالاتجاه الأحمر Red shift بمعدل أكبر من ذلك لنمط تجويف فابري بيروت Fabry – Perot mode كلما زادت درجة الحرارة . فدون أدنى درجة حرارة يكون ، عندها تيار العتبة، تتحرك ذروة التحصيل باتجاه نمط تجويف فابري بيروت ، بينما أعلى من أدنى درجة حرارة فأن ذروة التحصيل تتحرك بعيداً عن نمط تجويف فابري بيروت . الجدولين (1) و (2) يبينان أثر درجة الحرارة على قيمة شدة خرج الليزر ، I ، وطول فترة الحوادث اللحظية أو زمن وصول الجزء الثابت من شدة خرج ليزر الشخطة ، لقيم الثوابت المبينة في الجدول .



شكل (3) : اعتماد تيار الحقن عند العتبة ، J_{th} ، على درجة حرارة ليزر النقطة الكمية الممتدة T .

جدول (1) اعتماد كل من شدة الجزء الثابت من الخرج ، I ، وطول منطقة الحوادث اللحظية ، t ، على كل من درجة

الحرارة T ، و التحصيل ، g ، وتيار الحقن الكلي J' ، وكالاتي:

a: $\eta=10^{-2}$ ، $J'=2500$ ، $R=50$) ، $J'=2000$ ، $R=50$) ، $\eta=10^{-2}$ ،

c : $(\eta=10^{-2}$ ، $J' =3000$ ، $R=50)$

(a)

T	I, t		
	g		
	2	3	4
250	zero	1,2,550	2,320
275	1,550	2,5,275	4,180
290	1,550	2,5,275	4,180
300	0.5,620	2,300	4,180
325	zero	zero	zero
350	zero	zero	zero
375	730، ضوضاء	zero	zero
400	320، ضوضاء	zero	zero

T	I, t		
	g		
	2	3	4
250	1.8,420	4,100	5,150
275	4,280	6,130	9,90
290	4,280	6,130	8,100
300	3,300	5,150	8,100
325	0.5,550	2,300	4,180
350	Zero	Zero	Zero
375	Zero	Zero	Zero
400	Zero	Zero	Zero

جدول (2) : اعتماد كل من شدة الجزء الثابت من الخرج I ، وطول منطقة الحوادث اللحظية t ، على كل من درجة

الحرارة T ، و التحصيل g ، و تيار الحقن الكلي J' ، وكالاتي: :

a: $\eta=10^{-3}$ (، $J'=2000$ ، $R=50$) : ($\eta=10^{-3}$ ، $J'=2500$ ، $R=50$)، b

c : ($\eta=10^{-3}$ ، $J' =3000$ ، $R=50$)

T	I, t		
	g		
	2	3	4
250	Zero	1,900	4,>1000
275	2,400	1.5,300	4,>1000
290	1,1000	1.4,420	4,>1000
300	o.3,21000	1.0,480	4,>1000
325	Zero	Zero	4,>1000

T	I, t		
	g		
	2	3	4
250	1.5,1000	2,550	2,>1000
275	2,420	4,200	2,>1000
290	2,420	4,200	2,>1000
300	2,420	3,220	1,>1000
325	Zero	1,600	1,>1000
350	Zero	Zero	Zero
375	Zero	Zero	Zero

T	,t		
	g		
	2	3	4
250	2,500	5,850	10,100
275	3.5,330	6,140	15,80
290	4,330	10,100	15,80
300	2,400	8,100	10,100
325	0.4,>1000	2,700	5,250
350	Zero	Zero	Zero
375	Zero	Zero	Zero
400	Zero	Zero	Zero

والأشكال (4) و (5) و (6) نماذج مختارة من النتائج المستحصلة لتغير شدة خرج الليزر مع الزمن .

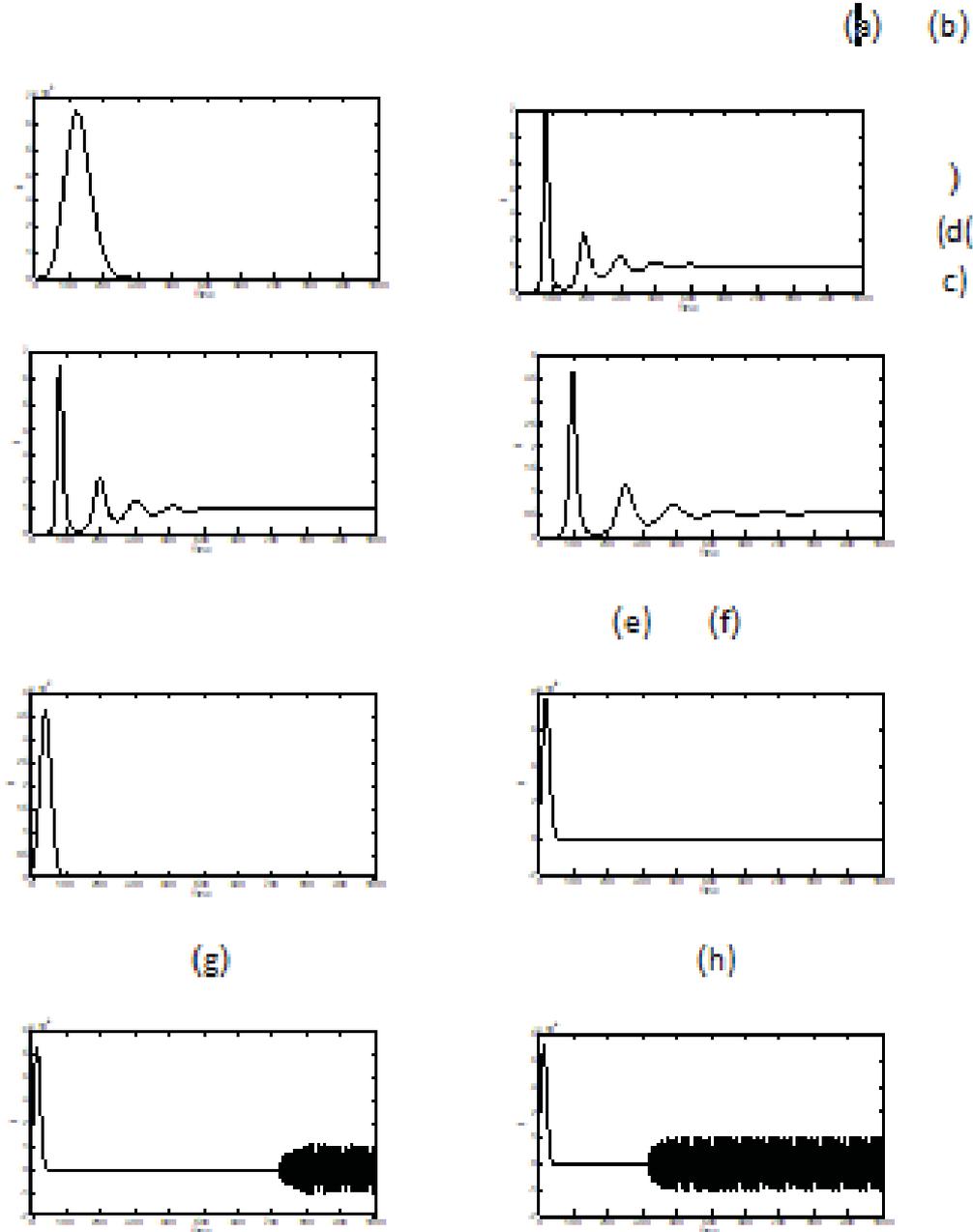
من خلال فحص كافة النتائج المستحصلة هنالك مدى من درجات الحرارة أو بالأحرى مدى من كثافة تيار الحقن عند العتبة تعمل فيها الليزر عند أو أعلى من العتبة أي عتبة أشغال جهاز الليزر فكما لاحظنا من الشكل (3) فدون درجة حرارة 250 K تقريباً أو أكثر من 350 K وبغض النظر عن قيمة التحصيل (g) فإن مقدار الخرج يتضاءل بشكل سريع وأحياناً عند الأبتعاد كثيراً عن درجة حرارة 325 K والنزول أقل بكثير من 250 K فإن الخرج لا يكتفي فقط بأن يكون ضئيلاً جداً بل تظهر تراوحات في الشدة فيها نوع من عدم الاستقرار كما يلاحظ ذلك من الشكل (4 h,g) .

الجدولين (1) و (2) يلخصان أثر كل من مقدار التحصيل (g) والنسبة بين معدلي أضمحلال الحاملات الى الفوتونات (η) وتيار الحقن الفعلي ولقيمة مختارة من معدل هروب الحاملات (R) على شدة خرج الليزر في الجزء الثابت وزمن تأخر ولادة خرج الليزر في الجزء الثابت منه فكلما تغيرت درجة الحرارة من (400 – 250) كلفن أن الخرج بشكل عام وبالاعتماد على قيمة التحصيل (g) يبدأ إما صفرأ أو قيمة واطئة ويزداد ليصل الى قيمة عظمى ليتضاءل بعدها بأتفاق مع النتيجة المستحصلة في الشكل (3) بالاعتماد على المعادلتين (12) و (13) . أن مدى وجود الخرج يزداد مع زيادة التحصيل لنفس المدى من درجات الحرارة . ان زيادة التحصيل تؤدي الى زيادة سعة التذبذب في منطقة الحوادث اللحظية وزيادة الجزء الثابت من الشدة ويتراجع طول الحوادث اللحظية مع زيادة التحصيل ويتناقص عرض التراوحات في منطقة الحوادث اللحظية . جميعها يتأثر بنقصان درجة الحرارة أو زيادتها نسبة الى أوطأ حرارة يكون عندها مقدار تيار العتبة عند قيمته الدنيا .

عند خفض η من 10^{-2} الى 10^{-3} يكون الخرج بحالة أفضل ، أي تزداد الشدة في الجزئين الثابت والحوادث اللحظية ويتراجع طول منطقة الحوادث اللحظية وتضيق التراوحات في منطقة الحوادث اللحظية أيضاً . وكما متوقع فإن زيادة تيار الحقن ، J، يؤدي الى ذات التأثيرات سابقة الذكر .

زيادة أو نقصان درجة الحرارة بعيداً عن أوطأ قيمة لتيار العتبة تؤدي الى زيادة تيار العتبة ونقصان في تيار الحقن المُعابر ، J، كما يتضح ذلك من العلاقة (13) حيث يتناقص البسط. ويزداد المقام هذا من الناحية الرياضية أما من الناحية الفيزيائية فذلك يعني بزيادة

أو نقصان درجة الحرارة فأن التيار اللازم توفيره لتحقيق قلب التعداد يصبح أكبر وهذا مما يقلل من كفاءة جهاز الليزر أو أن ترفع قيمة التيار (J) لتعويض النقصان وهذا يؤدي بدوره الى زيادة حرارة الجهاز وتعرضه للتلف .



شكل (4) اعتماد J على شدة الجزء الثابت من الخرج I ، وطول منطقة الحوائث الحثية l ، على التحصيل g ، والتيار الحقن الكلي J .

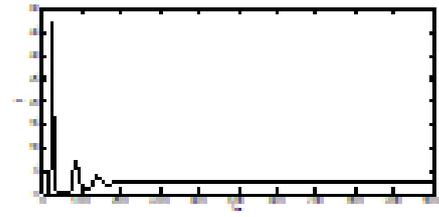
$$\text{عندما: } \eta=10^{-2}, J=2000, g=2, R=50$$

عند درجة حرارة (K)

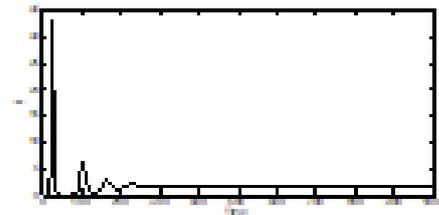
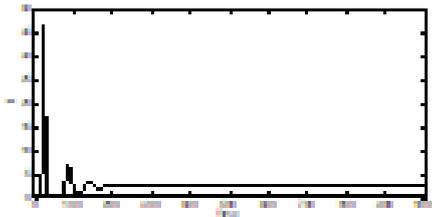
(a) :T=250, (b):T=275, (c) :T=290, (d) :T=300, (e) :T=325, (f) :T=350,
:T=375, (h) :T=400.



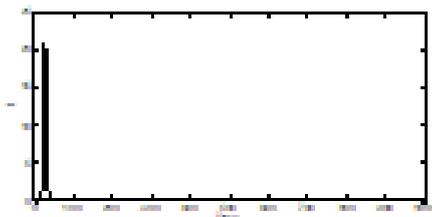
(k)



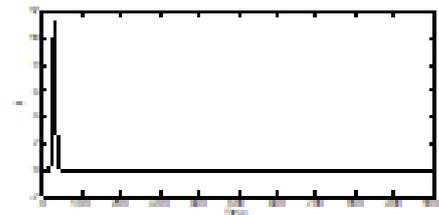
(l)



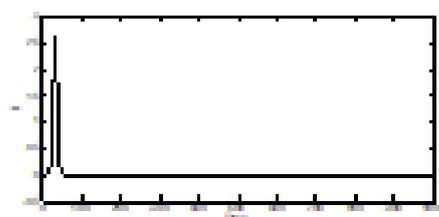
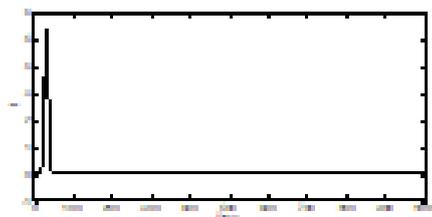
(m) (n)



(o)



(p)

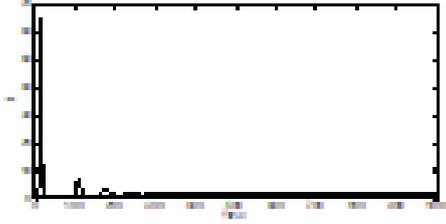


عندما: $\eta=10^{-2}, J=2000, g=3, R=50$

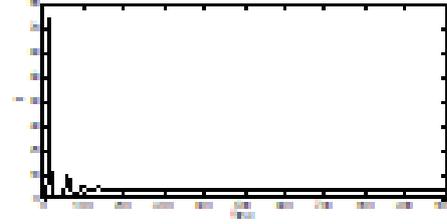
عند درجة حرارة (K)

(i) :T=250, (j):T=275, (k) :T=290, (l) :T=300, (m) :T=325, (n) :T=350,
:T=375, (p) :T=400.

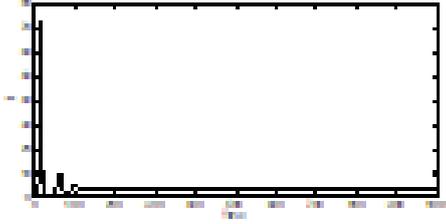
يستمر



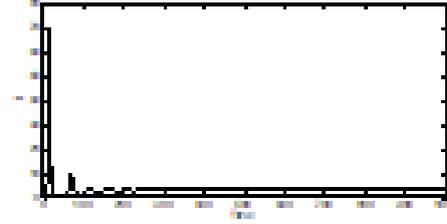
(s)



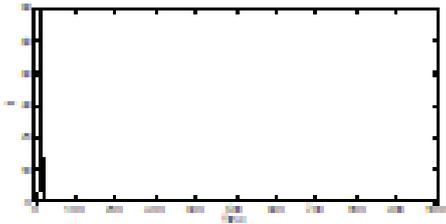
(t)



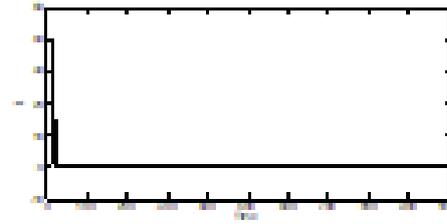
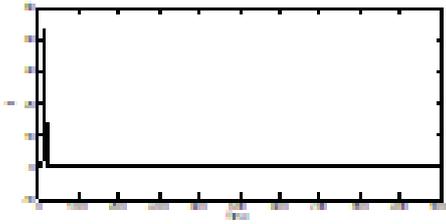
(u)



(v)



(w)(x)



عندما : $\eta=10^{-2}, J=2000, g=4, R=50$

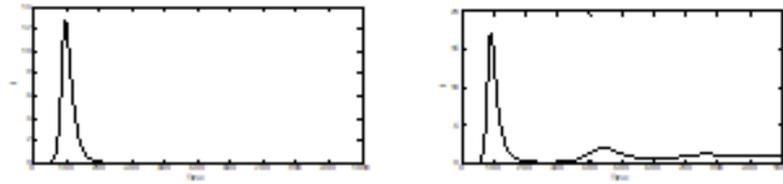
عند درجة حرارة (K)

(q) :T=250, (r):T=275, (s) :T=290, (t) :T=300, (u) :T=325, (v) :T=350,

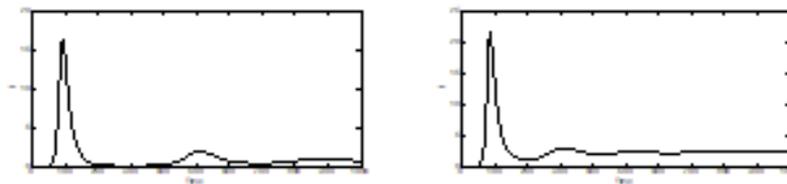
(w) :T=375, (x) :T=400.

أنتهى

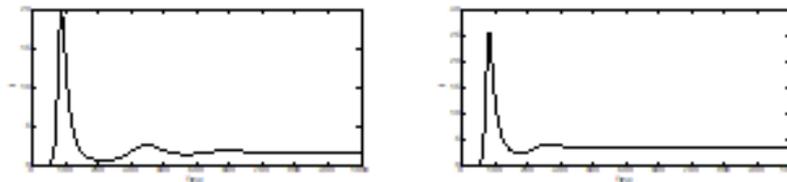
(d)



(e)

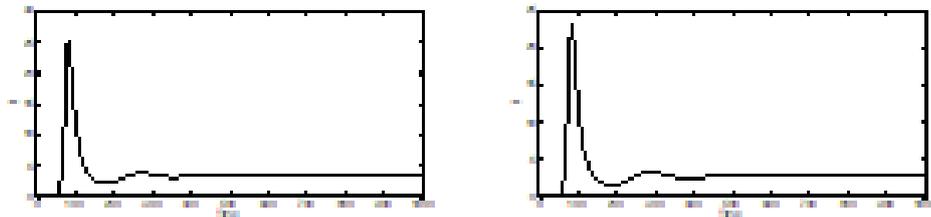


(f)

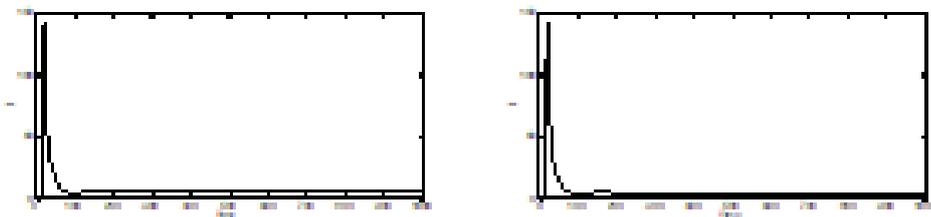


انتهى

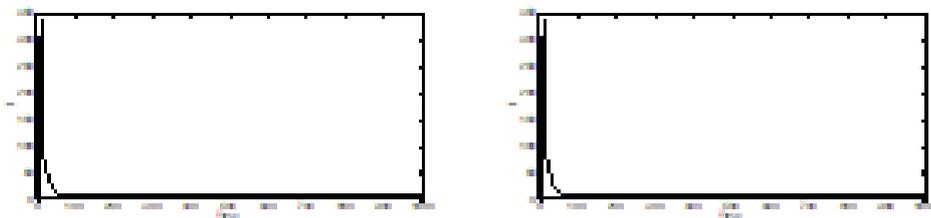
(a)



(b)



(c)



شكل (6) اعتماد كل من شدة الجزء الثابت من الخرج، I ، وطول منطقة الحوادث الحظية، t ، على التحصيل، g ، وتغير الحقن الكلي، J ،

وكالاتي :

$$a : \eta=10^{-3}, J=3000, g=2, R=50, T=290 \text{ K}, T=300\text{K}$$

$$b : \eta=10^{-3}, J=3000, g=3, R=50, T=290 \text{ K}, T=300\text{K}$$

$$c : \eta=10^{-3}, J=3000, g=4, R=50, T=290 \text{ K}, T=300\text{K}$$

الاستنتاجات : Conclusions

تمكنا من ايجاد علاقة بين عتبة تيار الحقن ودرجة الحرارة في ليزر شبه الموصل نوع النقطة الكمية الممتدة حيث وجدنا ان عتبة تيار الحقن تحصل عند درجة حرارة 280 كلفن اي اقل من درجة حرارة الغرفة وان شدة خرج ليزر الشخطة ابدت تغيرات واضحة بسبب تغير درجة الحرارة حيث انها كانت في اعلى مستوى لها عند درجة الحرارة 280 كلفن ثم بدأت بالانخفاض في درجات حرارة اعلى من 280 كلفن واوطا منها .

المصادر: References

- L.V. Asryan and R. A. Suris , Theory of threshold characteristics of quantum dot lasers : Effect of quantum dot parameter dispersion , Int-J.High Speed Electronics and Systems , 12,111 – 176 (2012)
- T. Erneux , E. A.Viktorov, and P. Mandel , Time scales and relaxation dynamics in quantum – dot lasers , Phys, Rev.A, 023819–1 (2007) .
- T. Erneux , E. A. Viktorov, P. Mandel , S. Azouigui , and A. Ramadane, Relaxation characteristics of quantum – dash – based semiconductor lasers , Appl. Phys. Lett. ,95, 231107–1 (2009) .
- S . C. Heck , Experimental study of quantum dot and dash lasers , PhD thesis, University College Cork , National University of Ireland cork , Ireland (2009)
- C. J. Hepburn , R. Sceats , D. Ramoo , A. B.- Thoms , N. Balkan , M. J. Adams , A. J. Dann , S. D. Perrin , I. Reid , J. Reed , P. Cannard , M. A. Fisher , D. J. Elton , and M.J.Harlow , Temperature dependent operation of 1.5 μm GaInAsP/InP VCSELS, Super lattices and Microstructure's , 32 , 103-116 (2002) .
- F.Legarde , B.Dagens , J.Renaudier , R.Brenot , A.Accard , F.vanDijk , D.Make ,O.LeGouezigou ,J.-G.Provost ,F.Poingt , J.Landreau , O.Drissi ,E.Derouin ,B.Rousseau ,F.Pommereau ,and G.-H.Duan , Recent advances on InAs/InP quantum dash based semiconductor lasers and optical amplifiers operating at 1.55 μm ,IEEE J.Selec.Top . Quant.Electron.13,111-123(2007)
- C.- Y. Lin , Y.- C. Xin , Y. Li , F. L. Chiragh and L. F. Lester , Cavity design and characteristics of monolithic long – wavelength InAs/InP quantum dash passively mode – locked lasers , Opt. Exp.,17, 19739 – 19748 (2009) .
- I. P. Marko , S. J. Sweeney , A. R. Adams , S. R. Jin , B. N. Murdin , R. Schwertberger , A.Somers , J.P.Reithmaier , and A.Forchel , Recombination mechanisms in InAs/InP quantum dash lasers studied using high hydrostatic pressure , Phys. Stat . Sol. , 241,3427 – 3435 (2004) .
- P.V. Mena , J. J. Morikuni , S. M. Kang, A. V. Harton , and K. W. Wyatt , A simple rate – equation based thermal VCSEL model ,J. Light Wave Tech., 17, 865 – 872 (1999).

D. O'Brien , S. P. Hegarty, G. Huyet and A. V. Uskov, Sensitivity of quantum – dot semiconductor lasers to optical feedback , Opt. Lett . , 29 , 1072 - 1074 (2004).

J. M. Pol , Semiconductor laser dynamics : compound –cavity , polarization and transverse modes , PhD thesis ,University of Les illesBalears,Spain (2002) .

R. H. Wang, A. Stintz , P. M. Varangis, T. C. Newell, H. Li, K. J. Malloy , and L. F. Lester, Room – temperature operation of InAs quantum – dash lasers on InP (001) , IEEE Photon . Techn.Lett., 13, 767-769 (2001) .

D. Zhou , B. O. Fimland , R. Piron , O. Dehaese , F. Grillot and S. Loualiche , Low threshold current density InAs quantum dash lasers on InP using double cap te- chnique , CS Mantech conference , May 18th – 21st , Tampa , Florida , USA , (2009).