

تأثير تيار الحقن وحقن الاستقطاب وزمن استرخاء البرم على خرج الليزر البرم

ضياء جبار عكوش وحسن عبد الله سلطان

قسم الفيزياء ، كلية التربية للعلوم الصرفة ، جامعة البصرة

البصرة ، العراق

الخلاصة:-

نقدم في هذا البحث دراسة عددية لليزر الانبعاث السطحي ذات التجويف الشاقولي VCSEL البرم. تم في هذا العمل حل معادلات المعدل التي تصف الليزر البرم عدديا باستخدام طريقة رونج- كتا وبرنامج الماتلاب. كما درسنا تأثير كل من تيار الحقن وحقن الاستقطاب وزمن استرخاء البرم على حركة ليزر البرم. بينت النتائج المستحصلة أن خرج الليزر يعتمد على كل من تيار الحقن وحقن الاستقطاب وان عتبة الليزر تنخفض بزيادة حقن الاستقطاب. كما أن خرج الليزر وسرعة الحصول على فعل الليزر يعتمدان على زمن استرخاء البرم.

الكلمات المفتاحية: البرم ، ليزرات البرم ، الاستقطاب ، السبنترونكس ، ليزرات الانبعاث السطحي ذات التجويف الشاقولي.

المقدمة:-

تعتبر ليزرات أشباه الموصلات ذات أهمية كبيرة في مختلف التطبيقات العملية كالاتصالات [١]، وذلك بسبب خواصها المميزة مثل انخفاض عتبة الليزر ونقاوة الضوء المنبعث وملائمتها للاستخدام مع الاليف الضوئية. [2] لقد تطورت ليزرات أشباه الموصلات من ليزرات الحافة (EEL) (Edge Emitting) وليزرات الانبعاث الشاقولي (VCSEL) وليزرات السلك الكمي (Quantum Wire) وليزرات النقطة الكمية (Quantum Dot) في عام 1995 أدخل مفهوم الاستقطاب وتأثير البرم على ليزرات (VCSEL) من قبل (San Migul) ومجموعته [3] بعد ذلك درس تأثير البرم بشكل واسع لمعرفة مدى تأثيره على خرج ليزرات (VCSEL). [4] ثم أستخدم

مصطلح ليزرات البرم (Spin Laser) من قبل Lee و مجموعته 2008[5] و 2010[6]

تستخدم ليزرات أشباه الموصلات مواد شبة موصلة كوسط فعال (Active Meduum) هذا الوسط يسخ بواسطة الضوء أو بواسطة الحقن الكهربائي للحصول على قلب التعداد اللازم لحدوث فعل الليزر . وبعد حصول الباحثين على مديات النانومتر وتصنيع الاجهزة النانوية ظهر فرع من فروع علوم النانو وهو السبنترونكس (spintronics) [7] ، وهو علم يتعامل مع صفات برم الالكترون بالإضافة الى تأثير شحنته ، وبدراسة انتقال حاملات الشحنة (الالكترون ، الفجوة) المعتمدة على البرم خلال المواد شبة الموصلة أمكن

استخدام الحاملات مستقطبة البرم في تحديد عمل ليزرات (VCSEL) عام 2010[6]

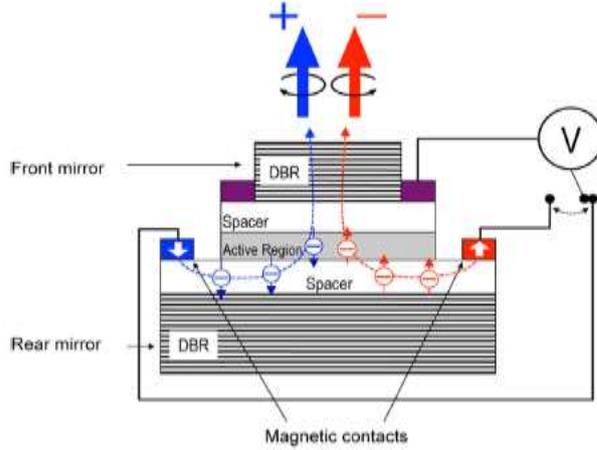
أن ليزرات البرم تعتمد على أوصول الحاملات مستقطبة البرم (نحو الاعلى أو نحو الاسفل) للمنطقة الفعالة بحيث أن قلب التعداد يحدث بواسطة حاملات ذات برم محدد ($s=1/2$ ors $=-1/2$) وأن خرج هذه الليزرات يكون مستقطبا دائريا نحو اليمين او اليسار اعتمادا على حالة البرم لحاملات الشحنة (الالكترونات والفجوات). تستخدم ليزرات البرم في تطبيقات مختلفة مثل الاتصالات التي تحتاج الى ضوء مستقطب باتجاه محدد [والخزن المغناطيسي . والتلفزيون ثلاثي الابعاد والذي يحتاج الى مصدرين مستقطبين بشكل متعامد هناك ثلاث فروقات أساسية بين الليزرات الاعتيادية وليزرات البرم .

1. أن حاملات الشحنة في الوسط الفعال تكون ذات برم مستقطب .

2. خرج ليزرات البرم يكون مستقطب دائريا باتجاه يحدده اتجاه البرم (+ أو -) .

3. هناك عتبتان لليزر وحسب اتجاه اليرم.

في هذا البحث درسنا تأثير تيار الحقن (Injection current) وحقن الاستقطاب (Polarization injection) على خرج الليزرات البرمية مثل تحديد عتبة الليزر وسرعة استجابته . كما درس تأثير زمن أسترخاء اليرم على خرج هذه الليزرات واستخدم ليزر نوع (VCSEL) كمثال لليزرات البرمية .



شكل (1) : شكل توضيحي لليزر الانبعاث السطحي ذي التجويف الشاقولي البرمي [1]

الانموذج الرياضي :

لوصف ليزرات اليرم عند البئر الكمي التي تستخدم المادة الفعالة نوع GaAs أو (In,Ga)As سوف نقوم بتعميم معادلات المعدل التي تصف التصرف الزمني لليزرات [5,6,8] حيث ان :-

$$n = n_+ + n_- \dots \dots \dots (1)$$

$$p = p_+ + p_- \dots \dots \dots (2)$$

حيث n_+ , n_- , p_+ , p_- هي كثافة الالكترونات والفجوات ذات اليرم المستقطب وان + تعني يرم باتجاه الاعلى و- نحو الاسفل.

وان كثافة الفوتون تكتب بالشكل:

$$s = s^+ + s^- \dots \dots \dots (3)$$

حيث + (-) تمثل اتجاه الضوء المستقطب دائريا نحو اليمين (اليسار).

للحصول على الكترونيات مستقطبة اليرم يتم ضخ البئر الكمي (QW) بتيار كثافته:

$$J = J_+ + J_- \dots \dots \dots (4)$$

وحقن الاستقطاب هو:

$$P_j = (J_+ - J_-) / J \dots \dots \dots (5)$$

بإدخال هذه المتغيرات في معادلات المعدل الأساسية [6,8] نحصل على :-

$$\frac{dn_{\pm}}{dt} = J_{\pm} - g_{\pm}(n_{\pm}, S)S^{\mp} - \frac{(n_{\pm} - n_{\mp})}{\tau_s^n} - R_{sp}^{\pm} \dots \dots (6)$$

$$\frac{ds^\pm}{dt} = \Gamma g_{\mp} (n_{\mp}, S) S^\pm - S^\pm / \tau_{ph} + \beta \Gamma R_{sp}^\mp \dots \dots \dots (7)$$

حيث g_{\pm} هو الربح البصري المعتمد على البرم، Γ معامل الحصر الكمي، β معامل الانبعاث التلقائي τ_s^n زمن استرخاء برم الألكترون، τ_{ph} زمن عمر الفوتون، R_{sp}^\pm معدل الانبعاث التلقائي.

$$R_{sp}^\pm = \frac{n_{\pm}}{\tau_r} \dots \dots \dots (8)$$

في الليزر التلقائية ($p_j=0$)، فإن مصطلح الربح البصري، يمكن تمثيله كالاتي [8] :-

$$g(n,s) = g_0 (n - n_{tr}) / (1 + \epsilon S) \dots \dots (9)$$

حيث g_0 تمثل معامل الربح التفاضلي، n_{tr} كثافة الالكترونات عند الشفافية (transparency)، ϵ معامل إشباع الربح.

أما في حالة الربح المعتمد على البرم فأن:

$$g(n,s) \rightarrow g(n_{\pm}, p_{\pm}, s) = g_0 (n_{\pm} + p_{\pm} - n_t) \dots \dots \dots (10)$$

وأن عتبة الليزر ستعتمد على برم الإلكترون المستقطب بحيث تكون هناك عتبتان لعمل الليزر الأولى للفتونات T_1 والمستقطبة S^+ و T_2

$$J_{T1} = J_T / [1 + |P_j| / (1 + 2w)] \dots \dots \dots (11)$$

$$J_{T2} = J_T / (1 - |P_j|) \dots \dots \dots (12)$$

هي عتبة الليزر التقليدي (غير المستقطب البرم) وتعطى بالعلاقة: J_T بحيث

$$J_T = \frac{N_T}{\tau_r} \dots \dots \dots (13)$$

حيث N_T كثافة الالكترونات عند العتبة التقليدية وتعطى بالعلاقة:

$$N_T = n(J \geq J_T) = (\Gamma g_0 \tau_{ph})^{-1} + n_{tran} \dots \dots \dots (14)$$

$$W = \frac{\tau_r}{\tau_s^n} \dots \dots \dots (15).$$

هو نسبة إعادة الالتحام إلى زمن استرخاء البرم

حسب المعادلتين (11) و (12) هناك ثلاث حالات:-

1- في حالة $J_{T1} < J_T$ فإن الليزر يعمل كثنائي باعث للضوء البرمي (LED) مستقطب البرم

2- في حالة $J_{T1} \leq J_T \leq J_{T2}$ ، و ($p_j > 0$) هنا العملية مختلطة و الليزر مع الاستقطاب الدائري الاول (فقط S^-)، بينما الاستقطاب الدائري الآخر لا يزال يمثل LED البرمي.

3- في حالة $J_{T2} \geq J_T$ الليزر في هذه الحالة هو ليزر برمي يعمل بكلا الأستقطابين S^\pm

النتائج والمناقشة :

تم في هذا البحث حل معادلات المعدل لليزر (VCSEL) البرمي (6-7) عددياً باستخدام طريقة رونج – كوتا (Runge – Kutta) مع برنامج الماتلاب (Matlab) واستخدام تيار الحقن (J) ضمن المدى من الصفر ولغاية ($2J_T$)، كما تم تغيير قيم حقن الاستقطاب (p) من الصفر ولغاية 1، بالإضافة الى استخدام المعاملات الواردة في المعادلتين أعلاه والمذكورة في الجدول رقم (1).

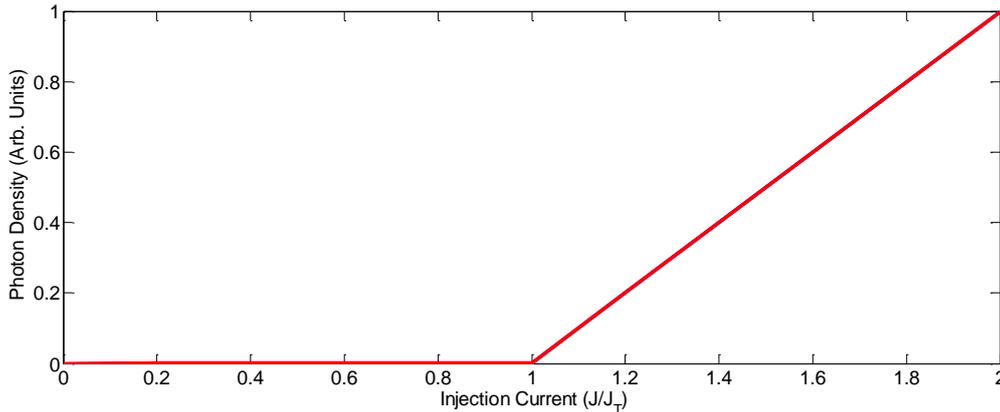
الجدول رقم (1) : المعاملات المستخدمة في الحسابات [5,6,8]

Symbol	Description	Value	Units
n_{tr}	Carriers density at transparency	1×10^{14}	cm^{-3}
β	Spontaneous emission factor	1×10^{-5}	-
ϵ	Compression factor	2×10^{-18}	cm^3
τ_r	Recombination time	200	Ps
τ_{ph}	Photon life time	1	Ps
Γ	Confinement factor	0.003	-
g_0	Differential gain	2000	cm^{-1}
τ_s^n	Spin relaxation time	600	Ps
B	Quadratic recombination constant	1.43×10^{-7}	$\text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$

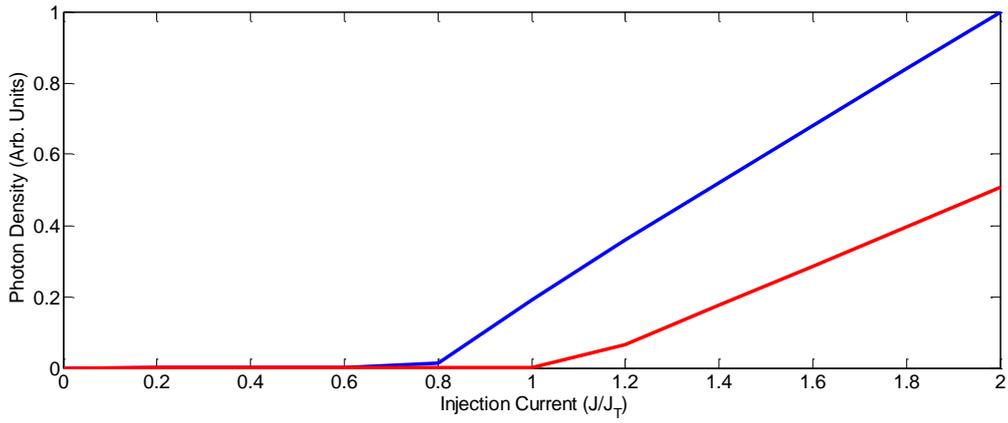
لدراسة تأثير تيار الحقن على خرج الليزر البرمي تم تثبيت قيمه معينة لحقن الاستقطاب وتغير قيم تيار الحقن وملاحظة تصرف خرج الليزر .

عند قيمة حقن الاستقطاب $p_r=0$ (ليزر اعتيادي) نلاحظ وجود عتبة واحدة لليزر كما في الشكل (2.a) . عند تغيير قيمة p_r الى 0.25 نلاحظ ظهور عتبتين لليزر الاولى J_{T1} حيث يبدأ انبعاث الليزر المستقطب دائريا نحو اليسار (S^-) ثم العتبة J_{T2} للضوء المستقطب دائريا نحو اليمين (S^+) ونلاحظ انخفاض عتبة الليزر الى $J_T 0.8$ كما هو واضح في الشكل (2.b) ، إذا كانت قيمة $p_r=0.5$ فإن عتبة الليزر ستزحف باتجاه $J_T 0.6$ كما مبين في الشكل (2.c) .

أما عند قيمة $p_r=0.7$ نلاحظ أن عتبة الليزر تنخفض الى $J_T 0.4$ كما هو موضح بالشكل (2.d)

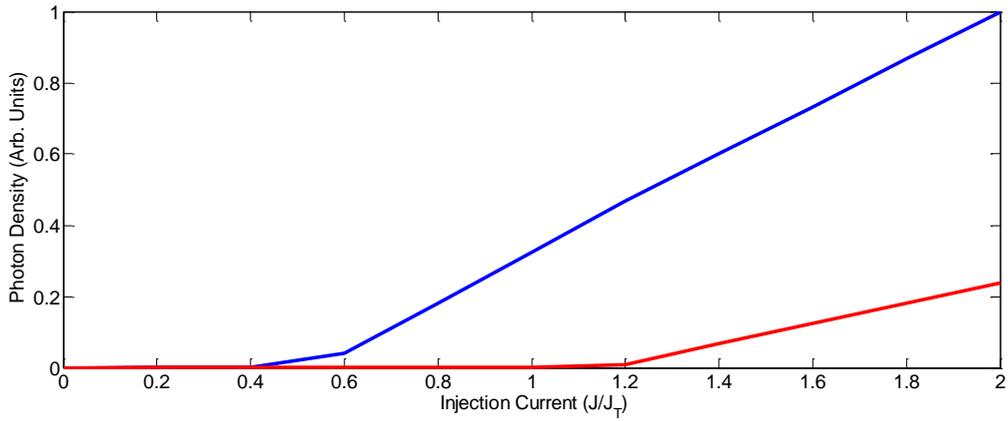


(a)

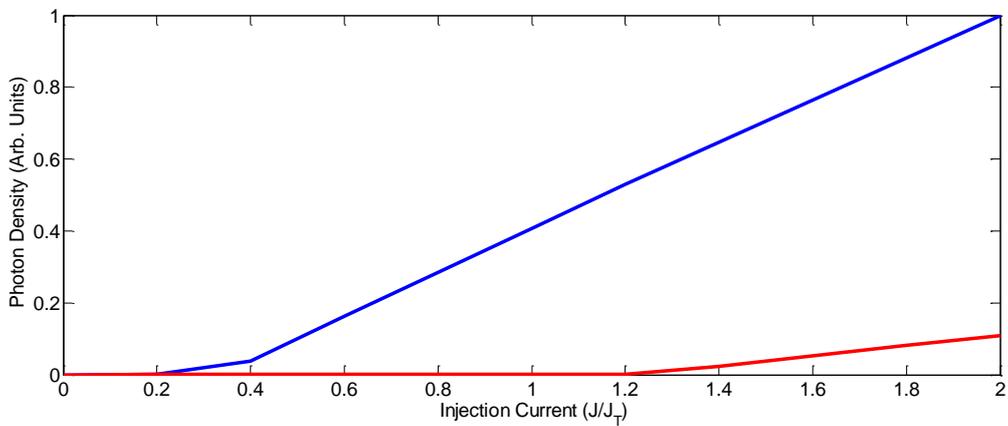


(b)

يتبع الشكل (2)



(c)



(d)

شكل (2) : انخفاض عتبة الليزر لقيم حقن استقطاب مختلفة (a) $P_r = 0$ (b) $P_r = 0.25$ (c) $P_r = 0.5$ (d) $P_r = 0.25$ $P_r = 0.7$ (الخط الأزرق يمثل الضوء المستقطب S^- والخط الأحمر يمثل الضوء المستقطب S^+)

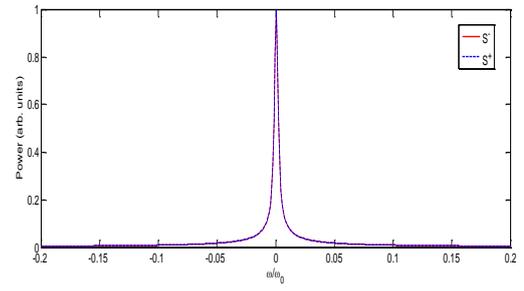
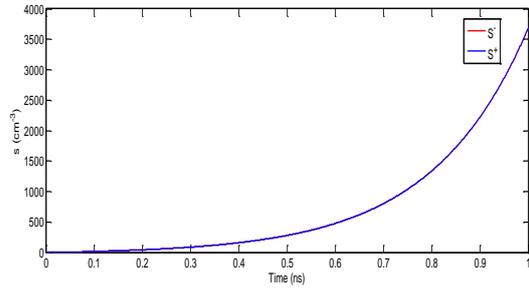
لدراسة تأثير تيار الحقن وحقن الاستقطاب على التصرف الزمني لليزر البرم ، ثبتنا قيمة (P_r) مع تغير قيم تيار الحقن كما نلاحظ في الشكل (3). عند قيمة $P_r = 0$ و $J = 1$ (عند العتبة) لليزر الاعتيادي . نلاحظ أن خرج الليزر يكون مزيج من S^+ و S^- وأن طيف القدرة لليزر يكون بالشكل المتعارف عليه كما موضح في الشكل (3.a) . عند زيادة P_r الى 0.25 نلاحظ أن الليزر يعمل بالضوء المستقطب S^- في حين أن S^+ لم يصل بعد الى حد العتبة كما هو بالشكل (3.b) مع ظهور تدبذبات حول التردد المركزي [10] ω_0 من خلال S^- وعند قيمة $P_r = 0.5$ نلاحظ زيادة عدد الفوتونات S^- الى $3 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ كما في الشكل (3.c). وعند زيادة تيار الحقن الى 1.5J والرجوع الى $P_r = 0.25$ نلاحظ ظهور عتبتين لليزر وأن الليزر يبدأ بالعمل S^- ثم S^+ وأن قيمة S^- هي المسيطرة . كما موضح في الشكل (3.d). كما نلاحظ زيادة التدبذبات حول التردد المركزي ولكلا الخرجين S^\pm .

ولدراسة تأثير زمن استرخاء البرم على خرج الليزر البرمي قمنا بتغيير قيم τ_s^n مختلفة ودرسنا تأثيره عند حالتين لتيار الحقن وحقن الاستقطاب، لاحظنا انه عند قيم تيار حقن $J = 1$ وحقن استقطاب واطي $P_r = 0.25$ فان كثافة الفوتونات المستقطب نحو اليسار (S^-) تزداد بزيادة زمن الاسترخاء كما زيادة سرعة الوصول للفعل الليزري تؤدي الى إنكماش في فترة الانبعاث التلقائي وكما موضح في الشكل (4 a) . أما عند قيمة $J = 1.5$ وحقن استقطاب $P_r = 0.5$ فان تأثير زيادة زمن .

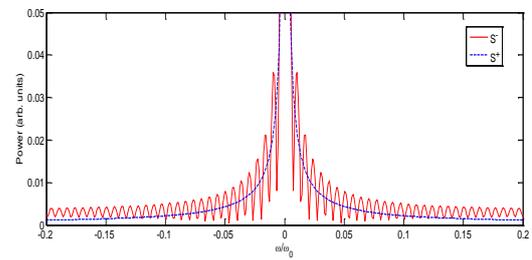
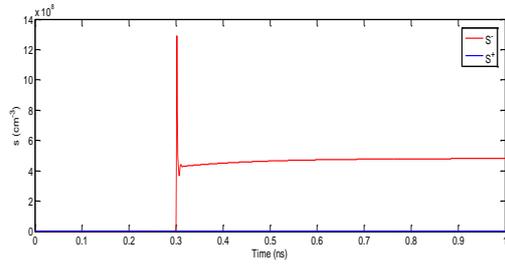
استرخاء البرم تؤدي الى انكماش في فترة الانبعاث التلقائي أو بمعنى آخر نقصان الفترة الزمنية التي يحتاجها الجهاز للوصول إلى الفعل الليزري وكما هو مبين في الشكل (4 b) .

الاستنتاجات:

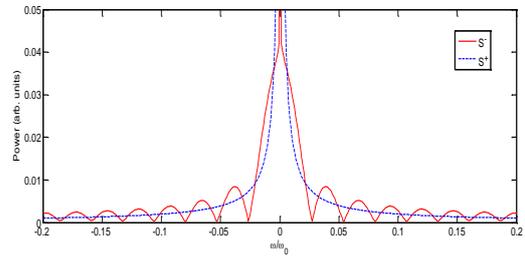
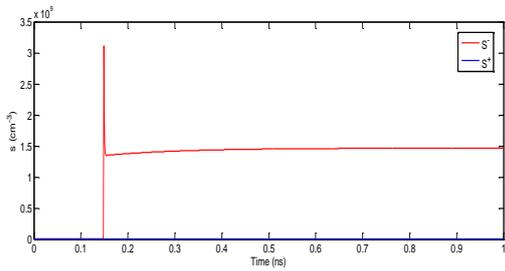
في حين أن خرج الليزر التلقائي يعتمد على تيار الحقن فقط فقد أوضحت الدراسة إن خرج الليزر البرمي يعتمد على تيار الحقن إضافة إلى حقن استقطاب برم الالكترونات المنقولة إلى المنطقة الفعالة وعلى زمن استرخاء برم الإلكترون. وأن عتبة الليزر الأولى تعتمد على حقن الاستقطاب، كلما أزداد انخفضت عتبة الليزر. في حين إذا كان تيار الحقن أكبر من تيار العتبة الأولى فإن الليزر يبعث فوتونات مستقطبة دائريا باتجاه معين وإذا زاد تيار الحقن نحو العتبة الثانية فإن الليزر يبعث ضوءا ممزوج الاستقطاب. أن زيادة زمن استرخاء برم الإلكترون تؤدي إلى تقلص فترة عبور الالكترونات وترفع من كثافة الفوتونات الخارجة



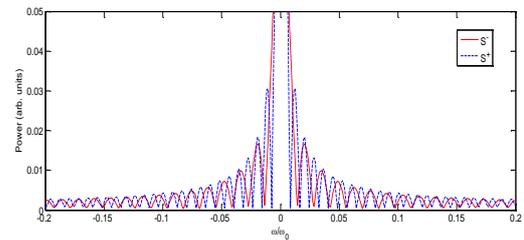
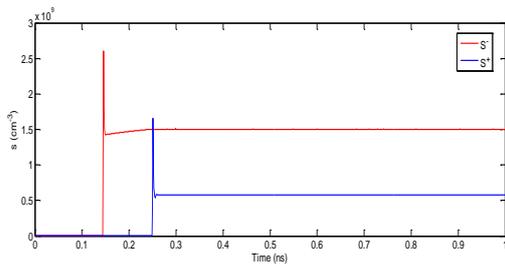
(a)



(b)



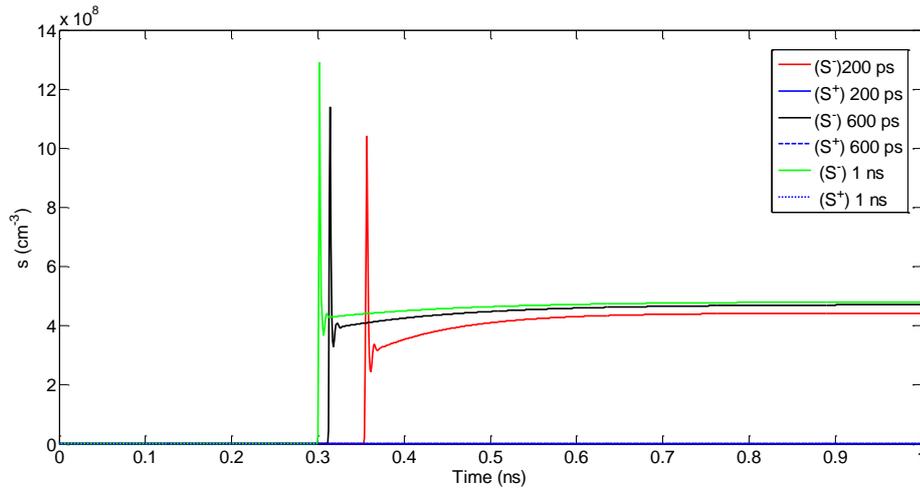
(c)



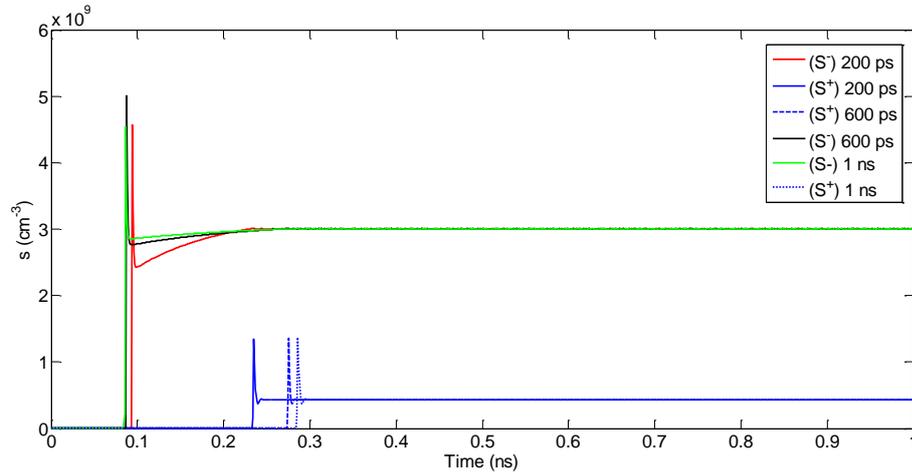
(d)

شكل (3) : تأثير تيار الحقن وحقق الاستقطاب على التصرف الزمني لليزر البرم وطيف القدرة لليزر البرم:

(a) $J=J_T$, $PJ=0$, (b) $J=J_T$, $PJ=0.25$, (c) $J=J_T$, $PJ=0.5$, and (d) $J=1.5J_T$, $PJ=0.25$



(a)



(b)

الشكل (٤): تأثير زمن استرخاء البرم على خرج ليزر VCSEL البرمي

(a) $J=1, P_J=0.5$ لقيم $\tau_s^n = 200 \text{ ps}, 600 \text{ ps}$ and 1 ns (b) $J=1.5, P_J=0.5$

References:

- 1- Y. Tsymobal and I. Zutic, 'Handbook of spin transport and magnetism', CRC Press, new York (2011).
- 2- I. Zutic, J. Fabian and S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys., 76, 323 (2004).
- 3- M. San Miguel, Q. Feng, and J.V. Moloney, phys. Rev. A52, 1728(1995).

- 4- M. Holub, J. Shin, S. chakrabarti, and P. Bhattacharya, Appl. Phys. Lett., 87, 091108 (2005).
- 5- Ch. Gothgen, R. Oszwaldowski, A. Petrou, and I. Zutic, arXiv: 0806.4209v (2008).
- 6- J. Lee, W. Fabian, R. Oszwaldowski and I. Zutic, Appl. Phys. Lett., 97, 041116 (2010).
- 7- D. Awschalom, D. Loos and N. Samarth, ' Semiconductor spintronics and quantum computation', nanoscience and Technology, Springer, Berlin (2002).
- 8- S. N. Hosseinimotlagh, H. Ghavidelfard, M. Pezeshkian and H. Molaei, Am. J. Elect. Appl., 2, 16 (2014).
- 9- G. Boeris, J. Lee, K. Vyborny and I. Zutic, Appl. Phys. Lett., 100, 121111 (2012).

The Effect of the injection current, the polarization injection and the spin relaxation time on spin lasers output

Dh. J. Akoosh and H. A. Sultan
Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, University of Basrah
Basrah, Iraq

Abstract: In this paper we introduce a numerical study of the spin vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs). The rate equations describe the spin lasers were solved numerically using Runge- Kutta method and Matlab. The effect of the injection current, the polarization injection and the spin relaxation time on the spin lasers dynamics was studied also. The obtained results show that the spin lasers output depend on the injection current and the polarization injection. The spin relaxation time enhances the laser threshold and the spin laser output.

Keywords: Spin, Spin lasers, VCSEL, Spintronics, polarization. The article is a part of ongoing M.S. thesis.