اعتماد نموذج الإشارة الصغيرة في تمثيل الدائرة المكافئة لليزر أشباه الموصلات المصنّع بنمط آبار الجهد الكمية المتعددة

بان عبد المسيح بدر*

تاريخ التسلم: ٢٠٠٤/١١/٣٠
تاريخ القبول: ٢٠٠٥/٩/٧

الخلاصة

في هذه الدراسة، جرى تقديم نتائج لتحليل أداء ليزر أشباه الموصلات المصنع بنمط الآبار الكمية المتعددة تحت شرط الحالة المستقرة والإشارة الصغيرة لكل من الربح وكثافة حاملات الشحن والتيار وقدرة الخرج الليزري. استناداً إلى النتائج المستحصلة، جرى تقديم وصف لدائرة RLC المكافئة لتركيب ليزر أشباه الموصلات لغرض التعرف على معاملات التشغيل والخرج وحدود الكفاءة التي يمكن بلوغها.

Adopting Small Signal Model for the Equivalent Circuit Instrumentation of a Multi-Quantum Wells Semiconductor Laser

Abstract

In this study, results of an analysis for the MQW semiconductor laser performance are presented. This analysis considers the steady-state condition and small signal modeling to introduce optical gain, charge carrier density, current and output laser power. Accordingly, a description of AC RLC circuit equivalent to semiconductor laser structure is presented in order to introduce operation and output parameters as well as achievable efficiencies.

المقدمة

يعد الليزر أحد أهم عناصر منظومة الاتصالات البصرية إذ أنه يمثل مصدر الإشارة التي يتم تحميل البيانات المراد إرسالها عليها. وفي منظومات الاتصالات الحديثة، يتم توظيف الألياف البصرية كأوساط ناقلة للإشارة (الليزر). إن الليزر الأكثر ملائمة للاستخدام في مثل هذه المنظومات هو ليزر أشباه الموصلات لما يمتاز به من صغر الحجم وقلة الكلفة ووضوح التقنية، وإن أكثر الأطوال الموجية شيوعاً في الاستخدام هما 1.3μm و 1.55μm إذ تقل خسائر التشتت والامتصاص من قبل الليف البصري عند هذين الطولين الموجيين إلى الحد الأدنى [1].

تمثل عملية إعادة الاتحاد (Recombination) المحتثة ما بين أزواج إلكترون- فجوة في ليزر ثنائي الوصلة (p-n) الآلية الأساس لحدوث الفعل الليزري إذ أنها تناظر عملية الانبعاث المحفز (Stimulated Emission) في نظرية الليزر. ويعطى معدل حدوث عملية إعادة الاتحاد المحتثة كالآتي:

$$R_{st}=v_g g S \qquad (1)$$

حيث S كثافة الفوتونات، g معامل الربح البصري و v_g سرعة المجموعة البصرية وهي بحدود (10^{10}cm/s). تعتمد قيمة المعامل g على كثافة أزواج إلكترون-فجوة (N) ودرجة الحرارة (T) والطول الموجي

* قسم العلوم التطبيقية / الجامعة التكنولوجية/ بغداد – العراق .

http s://doi.org/10.30684/etj.25.5.2
2412-0758/University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq
This is an open access article under the CC BY 4.0 license http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

(λ) للفوتون المنبعث وكثافة الفوتونات *(S)* لتركيب ليزر ثنائي الوصلة [2].

يتم اللجوء إلى بناء تركيب ليزر أشباه الموصلات بنمط بئر الجهد الكمي (Potential Quantum Well) وكما في الشكل (1) حيث يتم الحكم بتراكيز العناصر المكونة له للحصول على منطقة ذات سمك قليل جداً (بحدود النانومتر) عبر الوصلة. وفي هذه المنطقة يتم تحديد عملية إعادة الاتحاد المحتثة لغرض الحصول على أعظم قيمة لمعامل الربح وكذلك الحصول على الطول الموجي المطلوب من خلال التحكم بتركيب منطقة البئر الكمي (QW) لتحقيق قيمة محددة لفجوة الطاقة [3-5]. ولأجل مضاعفة الربح وتقليل كثافة حاملات الشحن المطلوبة، فإنه يتم إحداث عدد من مناطق لآبار الجهد الكمية وهذا التركيب يعرف بمتعدد الآبار الكمية (MQW).

تحتاج حاملات الشحن إلى عبور منطقتي الحصر على جانبي منطقة الآبار الكمية لأجل اقتناصها داخل هذه الآبار وهذه العملية تسبب بعض التأخير الزمني في وصول الحملات إلى الآبار الكمية وتتحدد بقيمة زمنية ثابتة تعرف بثابت زمن الانتقال (Transient Time Constant) ويرمز له *(τ_t)* [6]. عند وصول حاملات الشحن إلى منطقة الآبار الكمية فإنها تعيد اتحادها في الغالب، ولكن يمكن أن تفلت (Escape) بعض هذه الحاملات من الآبار الكمية بواسطة الانبعاث الحراري الأيوني (Thermo-ionic Emission) فيتولد بذلك تيار تسرب (Leakage Current) بمعدل زمني يعرف بثابت زمن الإفلات (τ_e). يمكن تحويل الثوابت الزمنية المتضمنة في تركيب ليزر اشباه الموصلات ذي الآبار الكمية المتعددة (MQW) إلى معدلات زمنية لتغير كثافة الآبار الكمية *(N)* أو كثافة الحاملات عند حاجز الجهد *(N_b)* مع ضرورة التحكم بحالة الاتزان ما بينهما.

تولد الفوتونات المحتثة داخل تركيب ليزر ثنائي الوصلة مجالاً بصرياً (Optical Field) تتم السيطرة عليه بواسطة تصميم الحجرة البصرية لليزر، والشكل (2) يوضح ثلاث تصاميم للحجرة البصرية لليزرات ثنائيات الوصلة الحديثة. يوظف التصميم الأبسط منها الانعكاس عند طرفي الحجرة لتشكيل مرنان فابري-بيرو (Fabry-Perot) على المحور الطولي إذ يقتصر التداخل البنّاء (Constructive Interference) للموجات المنتقلة ذهاباً وإياباً على أطوال موجية محددة تكوّن النمط الطولي لليزر. يكون الطول النموذجي للمرنان *(L)* في مثل هذا التصميم أجزاء الملمتر وهو أكبر بكثير من الطول الموجي لليزر. لذلك يمكن أن تتواجد عدة أنماط طولية داخل المرنان، إلا أن الأنماط الفعلية تتحدد بقيمة معامل الربح للبئر الكمي. يكون من الصعب تحقيق نمط منفرد (Single Mode) لشعاع الليزر في تصميم فابري-بيرو (FP) فيما يتطلب العديد من التطبيقات أن يكون الليزر ذا نمط منفرد وخاصة في حالة التضمين (Modulation). لذا يتم استخدام الحجرة البصرية ذات الانعكاسية المحددة لتحقيق ذلك [1-2].

اتجهت التطبيقات التي تتطلب نمطاً منفرداً لشعاع الليزر إلى استخدام ليزرات التغذية العكسية المنتظمة (Distributed Feedback) ويرمز لها (DFB) والتي تعمل وفق مبدأ التغير الدوري لمعامل الانكسار على طول إحدى طبقات التركيب المتعدد إذ يحدث الانبعاث الفوتوني عند حافتي البئر الكمي [1-2,7]. فيما ظهرت ليزرات الحجرة العمودية (Vertical Cavity Lasers) ويرمز لها (VCL) كبديل لليزرات DFB لأنها أقل كلفة وأن الانبعاث الفوتوني يحدث خلال قمة وقعر التركيب متعدد الطبقات [1-3].

إن حصر الموجة البصرية بالاتجاه العرضي يتم من الناحية النظرية من خلال السيطرة على معامل الانكسار. لذلك يحدث تعدد للأنماط المستعرضة في التصاميم الثلاثة لليزر حتى عند العمل بنمط طولي منفرد لشعاع الليزر. وكما هو معروف فإن النمط المستعرض الأساس يمتلك أعظم شدة مقارنة بالأنماط المستعرضة الأعلى مرتبة.

تهدف هذه الدراسة إلى التعرف على خصائص الدائرة الكهربائية المكافئة لتركيب ليزر أشباه الموصلات المصنع بنمط الآبار الكمية المتعددة وذلك لغرض تحديد القيم المثلى لمعاملات التشغيل كالربح وكثافة حاملات الشحن والتيار كذلك الخرج الليزري والكفاءة وتاثير العمل تحت شرط الحالة المستقرة والإشارة الصغيرة على هذه المعاملات. يمكن أن تمثل هذه الدراسة محاولة لاستقراء خصائص ليزر أشباه الموصلات المصنع بنمط الآبار الكمية المتعددة في مرحلة التصميم مما يختزل الكلفة التنفيذية والتشغيلية لهذا النوع من الليزرات بشكل ينعكس إيجابياً على كلفة إنتاج هذه الليزرات واستخداماتها المتزايدة يوماً بعد يوم [8-13].

التحليل

يمكن أن تتولد إشارة ضوئية ذات شدة واطئة نتيجة الانبعاث التلقائي (Spontaneous Emission) عند قيم واطئة لتيار حقن الحاملات. أما الفعل الليزري (Lasing Action) فإنه يبدأ عندما تصل كثافة حاملات الشحن في البئر الكمي (أو الآبار الكمية) إلى حد العتبة (N_{th}) وكما في الشكل (3) حيث يتساوى الربح مع الخسائر، وإن قيمة تيار العتبة (I_{th}) التي يبدأ عندها الفعل الليزري تناظر كافة الخسائر في حاملات الشحن المتضمنة كالآتي:

$$h_a I_{th} = qV_a(AN_{th} + BN_{th}^2 + CN_{th}^3) \quad (2)$$

حيث q شحنة الإلكترون و V_a الحجم الفعال المنتج لليزر، و η_a كفاءة الحقن التي تحدد عدد الإلكترونات التي تعيد اتحادها خلال الحجم الفعال. تمثل A و B و C ثوابت لمتعددة الحدود تعتمد قيمها على معاملات الليزر الواردة في المعادلة وهي تختلف باختلاف نوع الليزر وشروط التشغيل.

وعليه، يمكن تحديد الجزء المستهلك من التيار نتيجة التسرب بالمقدار $(1-\eta_a)$. يمكن تحليل التسرب الحاصل في التيار إلى انتشار عرضي (Lateral) وإفلات عمودي (Vertical) لحاملات الشحن. تبلغ قيمة كثافة تيار العتبة حوالي ($1kA/cm^2$). إن الحجم الصغير لليزرات VCL يتيح الحصول على منحني تغير قدرة الليزر (P_o) مع التيار (I) فوق حد العتبة كالآتي [12]:

$$P_o = h_s(I - I_{th}) = h_d \frac{hn}{q}(I - I_{th}) = h_i \frac{a_m}{a_i + a_m}.\frac{hn}{q}(I - I_{th}) \quad (3)$$

حيث $h\nu$ طاقة الفوتون المنبعث و α_m معامل خسائر المرآة لحزمة الليزر المنبعثة و α_i معامل الخسائر الداخلية. والشكل (4) يمثل العلاقة النموذجية ما بين قدرة الليزر والتيار.

ترتبط كفاءة الميل (η_s) بالكفاءة الكمية (η_d) والتي تمثل مساهمة كل إلكترون يحقن فوق حد العتبة بفوتون مناظر في حزمة الليزر المنبعثة. تنقسم كفاءة الميل (η_s) إلى حدين: يمثل الأول خسائر الحاملات (η_i) ويمثل الثاني خسائر الفوتونات (α_i). يعرف الحد الأول (η_i) بالكفاءة الداخلية (Internal Efficiency) وتمثل ذلك الجزء من الزيادة الكلية في التيار فوق حد العتبة الذي يسبب الانبعاث المحفز لفوتونات الليزر، ويتم افتراضها غالباً مساوية لكفاءة الحقن $(\eta_a=\eta_i\sim0.8)$ طالما بقيت كثافة الحاملات ثابتة فوق حد العتبة. لقد وجد أن هذا الافتراض ليس دقيقاً في ليزرات الآبار الكمية المتعددة (MQW) [14] لأن خسائر الفوتونات تتحدد بمعامل الخسارة الداخلية $(\alpha_i\sim10cm^{-1})$ وإن معامل خسائر المرآة لحزمة الليزر المنبعثة يعطى كالآتي:

$$a_m = \frac{1}{L}\ln(\frac{1}{R}) \quad (4)$$

حيث R انعكاسية المرآتين و L طول حجرة الليزر. وعليه، فإن كفاءة الميل (η_s) تعتمد على طول حجرة الليزر (L) وتساوي حوالي (57%) في حالة ليزر FP ذي الطول الموجي (1.55μm) وانعكاسية وجهين (0.3) وطول حجرة الليزر (L=270μm) وكفاءة حقن (87%) وإن قيمة الكفاءة الكمية تساوي (η_d=47%).

من أجل تحقيق كفاءة ميل عالية، يتوجب تقليل الخسائر الداخلية لحاملات الشحن (الإلكترونات والفجوات) والفوتونات إلى الحد الأدنى، كما أن زيادة حصر الحاملات في المنطقة الفعالة يقلل من تسربها بالاتجاهين الطولي والعرضي. يمكن تقليل الخسارة الناجمة عن امتصاص الفوتونات في مناطق الحصر من خلال تقليل مستويات الإشابة فيها. كذلك يمكن تعزيز قيمة كفاءة الميل من خلال تقليل انعكاسية المرايا وطول حجرة الليزر، مع أن ذلك يتم على حساب زيادة كثافة تيار العتبة (J_{th}).

إن أقصى قيمة نظرية لكفاءة الميل (η_s) عند الطول الموجي (1.55μm) تبلغ (80%) على فرض أن الكفاءة الكمية تامة (η_d=100%) فيما تبلغ (95%) عند الطول الموجي (1.3μm). بلغت أقصى قيمة للكفاءة الكمية من الوجه الأمامي لليزر DFB ذي الطول الموجي (1.3μm) حوالي (65%) حيث انعكاسية الطلاء الأمامي (2%) والطلاء الخلفي (90%) [15]. ومع ذلك، فإن القيم النموذجية لكفاءة الميل والمقاسة عملياً تكون أقل قليلاً وإن خسارة الاقتران ما بين حزمة الليزر والليف البصري تقلل كفاءة الميل إلى حوالي (20%) في حالة ليزرات FP و DFB شائعة الاستخدام [1-2,7]، فيما تمتلك ليزرات VCL ميزة التوزيع الدائري المنتظم لحزمة الليزر، لذلك تكون خسارة الاقتران لها صغيرة جداً [1].

عادة ما يتم تحليل أداء ليزرات أشباه الموصلات باستخدام معادلات المعدل (Rate Equations) التي تتضمن كافة العمليات الفيزياوية التي يمكن أن تغيّر كثافة الفوتونات (S) وكثافة الحاملات. في حالة ليزر أحادي النمط تكون فيه كثافة الفوتونات (S) والحجم البصري (V_o) كثافة الآبار الكمية (N) والحجم الفعال (V_a) وكثافة الحاملات عند حاجز الجهد (N_b) وحجم منطقة الحاجز (V_b) بما في ذلك منطقة الحصر المنفصلة، تعطى معادلات المعدل كالآتي [7]:

$$\frac{dN_b}{dt} = \frac{h_a I}{qV_a} - \frac{N_b}{t_t} + \frac{V_a}{V_b}\frac{N}{t_e} \qquad (5a)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{V_b}{V_a}\frac{N_b}{t_t} - \frac{N_b}{t_e} - [AN + BN^2 + CN^3] - v_g g(N,S)S \qquad (5b)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma v_g g(N,S)S - v_g[a_i(N) + a_m]S + b\Gamma BN^2 \qquad (5c)$$

حيث تمثل β معامل يمثل نسبة الفوتونات المنبعثة تلقائياً والتي تدخل ضمن نمط الليزر المنبعث وتكون قيمته صغيرة (10^{-4}) و Γ معامل حصر الحاملات داخل التركيب متعدد الطبقات. عند تحقق شروط الحالة المستقرة (Steady State) تتضاءل قيمة β إلى حد الإهمال ويصبح الطرف الأيسر من المعادلة صفراً، فنحصل على:

$$\Gamma g(N,S) = a_i(N) + a_m \qquad (6)$$

وهذه المعادلة تصف حالة الاتزان ما بين الربح والخسائر البصرية، والشكل (5) يبين علاقة معامل الربح (g) بكثافة حاملات الشحن (N) عند درجات حرارة مختلفة. يمكن إهمال تأثير إفلات حاملات الشحن من الآبار الكمية عند درجة حرارة الغرفة (T=300K) إذ يكون ثابت زمن الانتقال أقل بكثير من ثابت زمن الإفلات $(\tau_t << \tau_e)$ وتحت شروط الحالة المستقرة والحصول على كثافة فوتونات مستقرة تصبح معادلة المعدل كالآتي:

$$S_0 = \frac{h_i t_p}{qV_o}(I - I_{th}) \qquad (7)$$

حيث τ_p تمثل فترة حياة الفوتون (10^{-12}s~) وتعطى كالآتي:

$$\tau_p = [v_g(\alpha_i + \alpha_m)]^{-1} \qquad (8)$$

وتعطى القدرة البصرية الكلية كالآتي:

$$P_o = v_g \alpha_m h\nu V_o S_o \qquad (9)$$

وهذه المعادلة تعطي نتيجة للمعادلة (3).

النتائج والمناقشة

في العديد من التطبيقات، يتم اعتماد حد يمثل التغير في التيار (ΔI) يكون أصغر بكثير من $(I-I_{th})$ وهذا يؤدي إلى ظهور حدود ΔN و ΔS و ΔP تكون أصغر بكثير من قيم المعاملات N_{th} و S_o و P_o عند الحالة المستقرة. تعرف هذه الحالة بتحليل الإشارة الصغيرة (Small Signal Analysis) إذ تكون فيه معادلات المعدل خطية وقابلة للحل (Soluble). لذلك يمكن تعريف فترة حياة حاملات الشحن (τ_c) (10^{-9}s~) بعلاقة خطية كالآتي:

$$t_c = [A + 2BN_{th} + 3CN_{th}^2]^{-1} \qquad (10)$$

ويعطى تردد الرنين الزاوي (ω_r) كالآتي [1]:

$$w_r^2 = \frac{a}{b}\frac{v_g S_o}{t_p(1+eS_o)}\left(1+\frac{e}{v_g a t_c}\right) \qquad (11)$$

حيث تمثل ε معامل انضغاط (اختزال) الربح ويعتمد على الإشارة الداخلة. فيما يعطى ثابت التخميد γ كالآتي:

$$g = \frac{a}{b}\frac{v_g S_o}{t_p(1+eS_o)} + \frac{eS_o}{t_p(1+eS_o)} + \frac{1}{bt_c} \qquad (12)$$

حيث a معامل الربح الخطي و $b = 1 + \frac{t_t}{t_e}$ ويعرف بمعامل الانتقال.

مع تقليل زمن إفلات حاملات الشحن (τ_e) عند درجات الحرارة العالية فإن معامل الربح يقل بمقدار (a/b) فيما تزداد فترة حياة الحاملات بمقدار $(b\tau_c)$. لذلك، فإن تردد الرنين الزاوي (ω_r) في المعادلة (11) يتم اختزاله إلى $(w_r/\sqrt{b})$ وإن ثابت التخميد (γ) في المعادلة (12) يقل إلى (γ/b). في حالة عدم وجود إفلات لحاملات الشحن $(b=1)$، نحصل على:

$$w_r = \sqrt{\frac{v_g a S_o}{t_p}} = \sqrt{\frac{P_o a \Gamma}{t_p a_m h n V_a}} = \sqrt{\frac{\Gamma h_i v_g a}{qV_a}}\sqrt{I - I_{th}} \qquad (13)$$

$$g = w_r^2 t_p + t_c^{-1} \qquad (14)$$

والشكل (6) يمثل مقارنة ما بين الربح الفعلي والربح الخطي والخسائر البصرية كدالة لكثافة حاملات الشحن.

تمثيل الدائرة المكافئة

عندما تكون كثافة حاملات الشحن في منطقة الآبار الكمية مرتبطة بفرق الجهد على طرفي الوصلة فإن تحليل الإشارة الصغيرة لمعادلات المعدل يقدم علاقة للممانعة (Z) كدالة للتردد (ω) كالآتي:

$$Z(w) = \frac{\Delta V(w)}{\Delta I(w)} \qquad (15)$$

وهذه المعادلة تناظر معادلة حساب الممانعة في الدوائر الإلكترونية.

عند إهمال تاثيرات الانتقال (ε=0 , β=0)، فإن الممانعة تصبح مماثلة لممانعة دائرة RLC على التوازي وكما في الشكل (7). يمكن حساب قيم المقاومة (R_e) والمحاثة (L_e) والمتسعة (C_e) كالآتي [16]:

$$R_e = R_d \frac{I_{th}}{I_o}, \quad L_e = R_d \frac{t_p I_{th}}{I_o - I_{th}},$$
$$C_e = \frac{t_c}{R_d}, \quad R_d = \frac{2KTt_c}{N_{th}V_a} \tag{16}$$

حيث R_d هي المقاومة الديناميكية لمجمل تركيب الليزر عند حد العتبة وتكون مقدار ثابت عند درجة حرارة محددة و K ثابت بولتزمان الحراري ($1.38x10^{-23}$J/K). يتم توسيع الدائرة المكافئة عند أخذ الانبعاث التلقائي [16] أو الضوضاء [17] أو انضغاط الربح [18] أو تأثيرات الانتقال [1] بنظر الاعتبار. تصف الدائرة المكافئة العمليات التي تحصل خلال المنطقة الفعالة على ألا تتداخل عناصرها الذاتية مع العناصر المضافة والتي تمثل عمليات تحصل خارج المنطقة الفعالة.

يمكن تحديد سلوك الكفاءة الداخلية (η_i) كدالة للتردد (ω) في الدائرة المكافئة المبينة في الشكل (7) كالآتي:

$$\frac{h_i(w)}{h_i(0)} = [(1-\frac{w^2}{w_o^2})^2 + (\frac{w}{w_o Q})^2]^{-1/2} \tag{17}$$

حيث

$$Q = \sqrt{\frac{LRC(R_s + R)}{L + CRR_s}} \tag{18a}$$

$$w_o^2 = \frac{R + R_s}{RLC} \tag{18b}$$

والشكل (8) يوضح حدود الكفاءة الداخلية (η_i) كدالة للتردد (ω) عند قيم إختبارية للعناصر الخارجية من الدائرة المكافئة. وكما يتضح فإن الدائرة تميل إلى العمل بكفاءة أعلى عند الترددات الواطئة وهذا يدعم ضرورة إجراء التحليل عند الأخذ بنظر الاعتبار تحليل الإشارة الصغيرة تحت شرط الحالة المستقرة. خلاف ذلك، يمكن أن يتغير سلوك الكفاءة الداخلية (η_{ni}) مع التردد إلا أن ذلك يتطلب بكل تأكيد كثافة حاملات عالية جداً إلى الحد الذي لا يمكن لعمليات التوليد الضوئي والحقن أن توفره داخل المنطقة الفعالة وبالتالي فإن النبيطة عموماً تصل حد الانهيار بسرعة كبيرة.

الاستنتاجات

استناداً إلى نتائج التحليل المقدم في هذه الدراسة، يمكن الحصول على وصف مناسب لعمل ليزر أشباه الموصلات المصنع بنمط الآبار الكمية المتعددة (MQW) تحت شرط الحالة المستقرة من خلال استخدام نموذج الإشارة الصغيرة للحصول على وصف للدائرة المكافئة لتركيب الليزر. جرى وصف تغير الربح مع كثافة حاملات الشحن في المنطقة الفعالة من التركيب، وهي منطقة الآبار الكمية، ومقارنتها مع دالة الربح الخطي والخسائر البصرية داخل حجرة الليزر. كما جرى التعرف على خصائص كثافة حاملات الشحن مع تيار الانسياق لتوضيح منطقة العتبة التي تمثل بداية تحقق شرط الحالة المستقرة ومن ثم بدء اشتغال الليزر. أثبتت نتائج تحليل الدائرة المكافئة أن هذا النوع من الليزرات يعمل بكفاءة أعلى عند الترددات الواطئة حيث يتم الحفاظ على شرط الحالة المستقرة وهذا ما يبرر اعتماد نموذج الإشارة الصغيرة للتحليل. اهتمت هذه الدراسة بثلاث أنواع من ليزرات أشباه الموصلات والتي شاع استخدامها مؤخراً في منظومات الاتصالات البصرية.

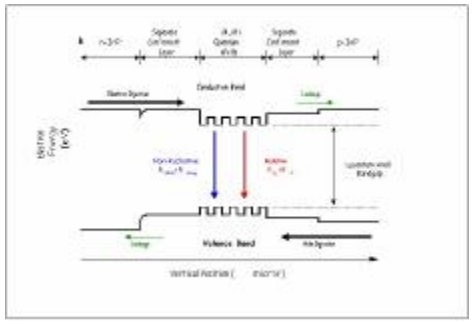
المصادر

[1] Lin M., "Principles and Applications of Optical Communications", McGraw-Hill Co., Ltd. (Chicago) 1997, p.77, 96-99, 639, 558, 452, 819-820, 196.

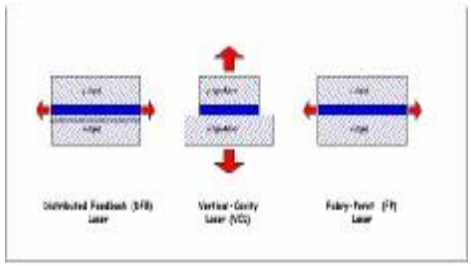
[2] Yariv A., "Optical Elecetronics in Modern Communications", Oxford University Press (NY) 1997, p.185, 623, 628.

[3] Chua et al, C. L., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.6, No.12, 1994, pp.1400-1402.

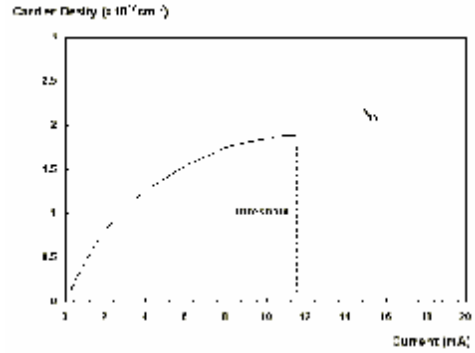
[4] Issanchou et al., O., *J. Appl. Phys.*, Vol.78, No.6, 1995, pp.3925-3930.
[5] Uchiyama S., Yakouchi N. and Ninomiya T., *Electron. Lett.*, Vol.32, No.11, 1996, pp.1011-1013.
[6] Nagarajan et al.R., *IEEE Photon Technol. Lett.*, Vol.4, No.2, 1992, pp.121-123.
[7] Morthier G., *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.30, 1994, pp.1520-1527.
[8] Lear et al.K., *Electron. Lett.*, Vol.31, No.3, 1995, pp.208-209.
[9] Tadokoro et al.T., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.4, No.5, 1992, pp.409-411.
[10] Babic et al. D. I., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.7, No.11, 1995, pp.1025-1027.
[11] Babic et al. D. I., *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.33, No.8, 1997, pp.1369-1383.
[12] Piprek J., Abraham P. and Bowers J. E., *Appl. Phys. Lett.*, Vol.74, No.4, 1999, p.489.
[13] Wada et al. H., *Appl. Phys. Lett.*, Vol.60, No.24, 1992, pp.2974-2976.
[14] Piprek J., Babic D. I. and Bowers J. E., *J. Appl. Phys.*, Vol.81, No.8, 1997, p.3382.
[15] Chen et al.T. R., *Electron. Lett.*, Vol.33, 1997, pp.963-964.
[16] Katz et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.17, No.1, 1981, pp.4-7.
[17] Harder et al. C., *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.18, No.3, 1982, pp.333-337.
[18] Flynn E. J., *J. Appl. Phys.*, Vol.85, No.4, 1999, pp.2041-2045



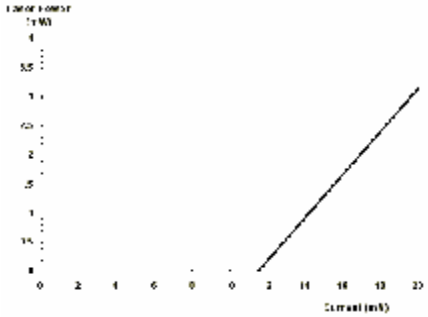
الشكل (1) مخطط توضيحي لتركيب ليزر
الآبار الكمية المتعددة (MQW)



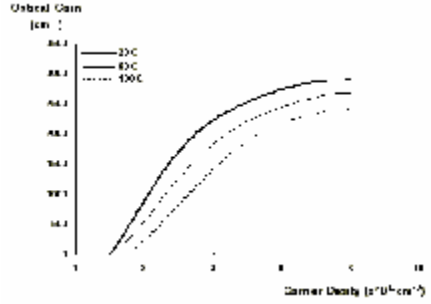
الشكل (2) أنواع ليزرات أشباه الموصلات
الحديثة شائعة الاستخدام في الاتصالات
البصرية



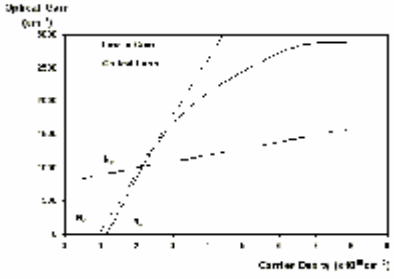
الشكل (3)
تغير كثافة حاملات الشحن في تركيب ليزر
الآبار الكمية مع التيار. تمثل N_{th} كثافة
الحاملات عند حد العتبة



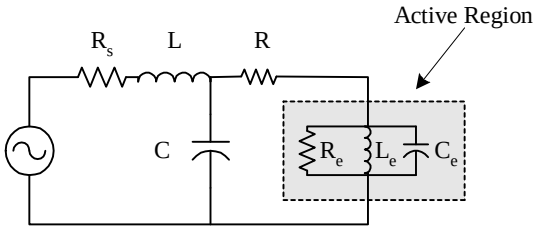
(4)الشكل
العلاقة النموذجية لتغير القدرة الخارجة من
ليزر أشباه الموصلات مع تيار الانسياق



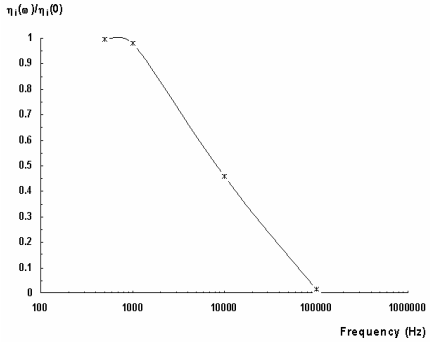
(5)الشكل
تغير الربح البصري مع كثافة حاملات
الشحن في تركيب ليزر الآبار الكمية
المتعددة عند درجات حرارة مختلفة



الشكل (6)
تغير الربح البصري مع كثافة حاملات
الشحن توضيح نمط الربح الخطي والخسائر
البصرية داخل تركيب ليزر الآبار الكمية
المتعددة



الشكل (7) دائرة RLC المتناوبة المكافئة لليزر أشباه الموصلات قيد الدراسة



الشكل (8) يوضح حدود الكفاءة الداخلية ($_i$) كدالة للتردد ( ) عند قيم إختبارية للعناصر الخارجية من الدائرة المكافئة (R_s=50 , L=1mH, C=1nF, R=1k)