

محاكاة بالحاسوب لتحميل الإشارات الجيبية الصغيرة مباشرةً

على أشعة ليزر أشباه الموصلات

الأستاذ: علي اللافي على

الباحثة: نجية عمر المبروك

كلية الآداب والعلوم - ترهونة

جامعة المرقب

ملخص الدراسة

هذه الورقة تعرض دراسة نظرية تبين خصائص تضمين إشارات المعلومات مباشرةً على ليزر أشباه الموصلات عن طريق محاكاة بالحاسوب لعملية إنتاج ليزر شبه الموصل الرياعي InGaAsP الباعث للضوء بالطول الموجي μm 1.55. وبُنيت هذه الدراسة على ما يسمى بنموذج الإشارة الصغيرة لحل معادلات التغير التي تصف حالة توليد ليزر أشباه الموصلات. آخذين في الاعتبار حالة خمد الربح الضوئي. مع اشتقاء لصيغة استجابة التضمين للإشارات الصغيرة وصيغة لعرض حزمة التضمين، وكذلك استكشاف لتأثير كلٍ من تيار الانحياز، وتردد التضمين، والخمد في الربح الضوئي ، على خصائص التضمين. والناتج تبين أنه عندما يكون تيار انحياز ليزر شبه الموصل ذو قيمة أكبر كثيراً من تيار العتبة، فإن الزيادة في الخمد الضوئي تؤدي إلى زيادة في كل من استجابة التضمين وقمم ترددتها، وكذلك زيادة في عرض حزمة التضمين. بينما يتراقص معدل التضاؤل. مع وجود وصف كمي لعلاقة عرض حزمة التضمين مقابل تردد الاسترخاء للليزر.

1- المقدمة:

إن الميزة النموذجية لليزرات أشباه الموصلات تتلخص في إمكانية تضمين أشعتها مباشرةً (تضمين تماثلي). حيث يمكن أن يتم تحويل إشارات المعلومات وبترددات تصل إلى مدى عدة عشرات من الجيجا هيرتز GHz من إشارات كهربية إلى شدة ضوئية متغيرة في شعاع الليزر[1] وفي هذه العملية فإن التيار المستخدم للانحياز هو نفسه تيار التضمين الأمر الذي له كبير الأثر في تبسيط واختصار الدوائر الخارجية المستخدمة مقارنة مع عمليات تضمين المعلومات على أشعة الليزر باستخدام أداة تضمين خارجية حيث تكون الحاجة لعدة تيارات

[2] إن تضمين الإشارات الجيبية الصغيرة بترددات في مدى الجيغا هيرتز له تطبيقات منها تخفيض الضوضاء في أنظمة الألياف البصرية [3]، وكذلك الضوضاء التي تسببها التغذية الخلفية الخارجية في أنظمة الأقراص البصرية المدمجة [4].

وتحت التضمين القوى تتحصل على نبضات ضوئية قصيرة جداً بزمن دوري لا يتعدي القليل من البيكوثانية مما يعني انتقال معدل عالي من المعلومات في أنظمة الاتصالات الضوئية [6,5].

إن دراسة خواص تضمين إشارات المعلومات على أشعة الليزر يمكن إدراكها من تحديد مدى استجابة الليزر لتضمين الإشارات الصغيرة وتعرف هذه الاستجابة بأنها نسبة بين سعة الإشارة المحملة لسعتها وهي غير محملة [7] وتلك الاستجابة تشبه مرشح حزمة ترددات واطئة Low-pass filter من الرتبة الثانية بقمم عند تردد استرخاء الليزر [7].

إن عملية استكشاف الخواص المميزة لتضمين الإشارات الصغيرة كان موضوعاً لعدة دراسات عملية ونظرية مركزة [17-8]. وقد وجد أن عرض حزمة التضمين يتحدد من تردد استرخاء الليزر ومعدل تضاءل تذبذب الليزر، وإن هذا العرض يزداد مع زيادة تيار الانحياز حتى يبلغ حد علوي معين، وهذا الحد العلوي للتردد المُضمن هو مقاييس مباشر لأعلى سرعة يمكن أن تبعث بها معلومات بواسطة شعاع ليزر [2] فقد سُجلت 20GHz كحد لأعلى تردد قد تم تضمينه على ليزر شبه الموصل الرباعي InGaAsP [10].

إن دراسات عديدة أُنجزت لنقصي البارمترات التي يمكن أن تعمل على زيادة هذا الحد الأعلى للتضمين إلى قيم أكبر [8-13]. وقد وجد أن الخاصية الغير خطية للربح الضوئي، وظاهرة التيارات الطفيفية Parasitic current هي أسباب لظاهرة التضاؤل التي تحد من الحد الأعلى لتردد التضمين [13,7-16]. وإن الزيادة في الربح التقاضيي وعمل الليزرات في درجات حرارة أقل يمكن أن يسبب في رفع هذا الحد العلوي [15,9,7].

إن دراسة السلوك الإستاتيكي وكذلك الديناميكي لليزرات أشباه الموصلات تتم من خلال زوج من المعادلات تسمى معادلات التغير أو معادلات التصنيف rate equations وهي معادلات تصف التتابع الزمني لعدد الفوتونات الضوئية المتولدة وعدد الإلكترونات المحقونة في الطبقة الفعالة في ليزر شبه الموصل [18]. إن التضمين المباشرة في الواقع هو إضافة إشارات متعددة AC لحد التيار في تلك المعادلات، وبسبب اقتران هذه المعادلات وعدم خطيتها فإنه لا يمكن الحصول على حلول تحليلية لتلك المعادلات. ولكن بإجراء بعض التقريرات على هذه المعادلات يمكن حلها وهذا ما يُجز عادة باستخدام ما

يسمى أسلوب تحليل الإشارة الصغيرة Small signal analysis الذي بدوره يمكننا من الحصول على حلول لتلك المعادلات وهذه الحلول دوال في التردد وأول من طبق مثل هذا الأسلوب على ليزر أشباه الموصلات كان Haug [19].

و فكرة أسلوب التحليل هذا تتلخص في إحداث تغيرات صغيرة جداً في عدد الفوتونات وعدد الإلكترونات مقارنة مع قيمها المتوسطة. وتطبيق هذا التحليل يمكننا من استنتاج صيغ لحساب عرض حزمة التضمين واستجابة التضمين، بالإضافة إلى أن هذا الأسلوب يساعد في فهم كيف يعمل الليزر عند التضمين عالي السرعة[20].

السلوك الديناميكي لل LZRs أشباه الموصلات يتأثر بالخاصية غير الخطية للربح الضوئي التي أصلاً تسببها عمليات الاسترخاء لحملات الشحنة بين الحزم والتي تمتد لفترات زمنية قصيرة $0.1ps$ [21]، ففي الوقت الذي يزداد فيه تيار الحقن بعيداً عن تيار العتبة يظهر خمد في الربح الضوئي لتسقط قيمة الربح مباشرةً أسفل مستوى ربح العتبة. ورغم أن تأثير الربح الغير خططي على عرض حزمة التضمين مثبت أصلاً [16,11,7] ولكن ليس هناك وصف كمي مثل هذا التأثير. والأجزاء اللاحقة سوف تتضمن نظرية تضمين الإشارات الصغيرة مع إثبات لصيغ تحليلية تخص استجابة التضمين وعرض حزمة التضمين، بالإضافة لتحليل عددي مطبق على ليزر شبه الموصل الرباعي InGaAsP الباعث للليزر بطول موجي $1.55\mu m$ وتم اختيار هذا النموذج من LZRs أشباه الموصلات على اعتباره المصدر الضوئي الأكثر استعمالاً في الاتصالات البصرية. مع اختبار لتأثير بارامترات التضمين المتمثلة في تياراً لأنحصار، تيار التضمين، الخمد في الربح الضوئي على تصنيف التضمين. وكذلك دراسة للدور الذي يلعبه معدل التضاؤل في الحد العلوي لتردد التحميل. وكلما أتاحت الفرصة فإن نتائج محاكاة بالحاسوب سوف تقارن مع نتائج تجريبية متحصل عليها. وفي الآخر فإن استنتاج لهذا العمل سوف يظهر في الجزء رقم 4 من هذه الورقة.

2- نظرية تضمين الإشارات الصغيرة.

1.2- تقريرات لجعل معادلات التصنيف خطية.

التضمين التماثلي لل ليزر أشباه الموصلات يوصف رياضياً بمعادلات التصنيف لعدد الفوتونات الضوئية المولدة $S(t)$ وعدد الإلكترونات المحقونة $N(t)$ الآتية [20,22]

$$\frac{dS}{dt} = (G - G_{th})S + \frac{C}{\tau_r} N \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I(t)}{e} - AS - \frac{N}{\tau_e} \quad (2)$$

حيث G هو الربح الضوئي (s^{-1}) ويعرف في صيغته غير الخطية [21]

$$G = A - BS \quad (3)$$

حيث A تمثل معامل الربح الخطى و B معامل الربح الغير خطى (حمد الربح)

$$A = \frac{a\xi}{V} (N - N_g) \quad (4)$$

$$B = \frac{9}{2} \frac{\pi \hbar v}{\epsilon_0 n_a^2 V} \left(\frac{\xi \tau_{in}}{\hbar} \right)^2 a R_{cv}^2 (N - N_g) \quad (5)$$

حيث a الربح التقاضى، ξ عامل الحصر للمجال الضوئي في الطبقة الفعالة التي حجمها V ومعامل إنكسار الضوء فيها n_a و N_g يمثل عدد الإلكترونات عند بلوغ الوسط الفعال حالة الشفافية و N عدد الإلكترونات الذي يميز الربح الغير خطى B زمن الاسترخاء بين الحزم و تردد الليزر و R_{cv} عزم شائي القطب الكهربى و \hbar ثابت بلانك المختصر و ϵ_0 ثابت العزل للفضاء الحر.

وبسبب عدم الزيادة في عدد الإلكترونات $N(t)$ في الطبقة الفعالة إلا بمقدار قليل جداً عن قيمة عددها المناظر لتيار العتبة N_{th} ، فإن الربح الغير خطى B يمكن أن يُقرب إلى

$$B \approx \frac{9}{2} \frac{\pi \hbar v}{\epsilon_0 n_a^2 V} \left(\frac{\xi \tau_{in}}{\hbar} \right)^2 a R_{cv}^2 (N_{th} - N_g) \quad (6)$$

وربح العتبة الضوئي G_{th} يعطى من

$$G_{th} = \kappa + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_f R_b} \right) \approx \frac{a\xi}{V} (N_{th} - N_g) \quad (7)$$

K هو فقد الضوئي بسبب الامتصاص و R_f قدرة الإنعكاس عند الوجه الأمامي و R_b عند الوجه الخلفي للمرنان و L طول الطبقة الفعالة [21] الحد الأخير في (1) يمثل معدل الزيادة في عدد الفوتونات بسبب الانبعاث التلقائى والتي يحددها عمر الانبعاث التلقائى τ_r و C عامل للانبعاث التلقائى يحدد مقدار الانبعاث التلقائى المحول إلى الانبعاث المحفز، وبالقرب من قيم العتبة فإن C يمكن أن يُقرب إلى [23]

$$C = \frac{\xi a \tau_r}{V} \quad (8)$$

وفي أسلوب تحليل الإشارة . الصغيرة يفترض إضافة تشويش صغير لتيار الانحياز I_b هذا التشويش على هيئة إشارة جيبية صغيرة جداً بتردد زاوي $\Omega_m = 2\pi f_m$ حيث f_m تردد الإشارة المحمولة ليصبح التيار اللحظي $I(t)$

$$I(t) = I_b + I_m \cos(\Omega_m t)$$

$$I(t) = I_b + \left[\frac{I_m}{2} e^{j\Omega_m t} + c.c \right] \quad (9)$$

بشرط $I_b \ll I_m$ و $I_b > I_{th}$ I_m هو المراافق المركب.

وبالتالي فإن العدد اللحظي للفوتونات $S(t)$ والإلكترونات $N(t)$ كل منها يصبح متكوناً من مركبتين أحدهما قيمة ثابتة تناظر تيار الانحياز المستمر I_b والأخر قيمة متغيرة تناظر تيار إشارة المعلومة المتردد I_m (تيار التحميل) أي:

$$S(t) = S_b + \left[\frac{S_m}{2} e^{j\Omega_m t} + c.c \right] \quad (10)$$

$$N(t) = N_b + \left[\frac{N_m}{2} e^{j\Omega_m t} + c.c \right] \quad (11)$$

حيث يتشرط أيضاً أن: $S_m \ll S_b$ و $N_m \ll N_b$ وبوضع المعادلات من (9) - (11) في معادلات التصنيف (1) و(2)، ثم فصلها إلى مركبات تخص تيار الانحياز وأخر تخص تيار التضمين وبعد إهمال الحدود ذات التوافقيات العليا. فإننا نحصل على زوج من أزواج المعادلات، الزوج الأول يخص مركبات الانحياز وهو

$$\{A_b - BS_b - G_{th}\} S_b + \frac{C}{\tau_r} N_b = 0 \quad (12)$$

$$-A_b S_b - \frac{N_b}{\tau_e} + \frac{I_b}{e} = 0 \quad (13)$$

وزوج المعادلات الثاني يخص مركبات التضمين وهو

$$-[\Gamma_s + j\Omega_m] S_m + \frac{a\xi}{V} \left(S_b + \frac{CV}{a\xi\tau_r} \right) N_m = 0 \quad (14)$$

$$-A_b S_m - [\Gamma_N + j\Omega_m] N_m + \frac{I_m}{e} = 0 \quad (15)$$

حيث

$$A_b = \frac{a\xi}{V} (N_b + N_g)$$

وهي تمثل مركبة الانحياز للربح الخطى A و Γ_N ، Γ_s معدلات التضاؤل لكل من $N(t)$ ، $S(t)$ على التوالى وتعطى من

$$\Gamma_s = -(G_b - G_{th}) + BS_b = BS_b + \frac{CN_b}{\tau_r S_b} \quad (16)$$

حيث استخدمنا المعادلة (12)

$$\Gamma_N = \frac{a\xi}{V} S_b + \frac{1}{\tau_e} \quad (17)$$

المعادلة (16) تبين أن سبب تضاؤل عدد الفوتونات $S(t)$ ينبع أساساً من كل من الفرق في الكسب، وكذلك من خمد الكسب BS_b . حيث بالقرب من مستوى العتبة عندما $B = 0$ فإن التضاؤل يتعدد من عامل الانبعاث التلقائي C . بينما بعيداً عن العتبة فإنه يتعدد من خمد الربح الغير خطى، وفي كلاً المعادلتين (16) و(17) فإن معدل تضاؤل $S(t)$ و $N(t)$ يزداد مع زيادة S_b

2.2 - مركبات الانحياز

عدد الإلكترونات المحقونة المناظرة لتيار الانحياز N_b والتي تمثل أحد مكونات $N(t)$ تتعدد من المعادلة (13)

$$N_b = \frac{\frac{a\xi}{V} N_g S_b + \frac{I_b}{e}}{\frac{a\xi}{V} S_b + \frac{1}{\tau_e}} \quad (18)$$

بينما القيمة S_b من عدد الفوتونات الكلى $S(t)$ هي الجذر الحقيقي الموجب للمعادلة $BS_b^3 + \left(\frac{BV}{a\xi\tau_e} + G_{th}\right)S_b^2 - \left(\frac{I_b}{e} - \frac{N_{th}}{\tau_e} + \frac{C}{\tau_r} N_g\right)S_b - \frac{CV}{a\xi\tau_r} \frac{I_b}{e} = 0$ (19)

يمكن أن تُقرَّب على الصورة $S_b = \frac{eN_{th}}{\tau_e}$ فإن قيمة $I_{th} = \frac{eN_{th}}{\tau_e}$ فوق العتبة وبخلافه تيار العتبة

$$S_b = \frac{I_b - I_{th}}{eG_{th}} \quad (20)$$

2.3- استجابة تضمين الإشارة الصغيرة

المركبة N_m في عدد الإلكترونات الاحظي (15) يتحدد من المعادلة (15) بدلالة المركبة المنشورة S_m من عدد الفوتونات $S(t)$ كالتالي

$$N_m = \frac{\Gamma_s + j\Omega_m}{\frac{a\xi}{V} \left(S_b + \frac{CV}{a\xi \tau_r} \right)} S_m \quad (21)$$

وباستبدال N_m في المعادلة (14) نحصل على المركبة S_m من عدد الفوتونات

$$S_m(\Omega_m) = \frac{\frac{a\xi}{V} \{S_b + 1\}}{\Omega_r^2 + 2j\Omega_m \Gamma_r - \Omega_m^2} \frac{I_m}{e} \quad (22)$$

حيث $\Omega_r = 2\pi f_r$ تمثل تردد الاسترخاء الزاوي بتعدد f_r و Γ_r تمثل متوسط معدل تضاءل ليزر شبة الموصل.

$$\Omega_r^2 = \frac{a\xi}{V} (S_b + 1) A_b + \Gamma_N \Gamma_S \quad (23)$$

$$\Gamma_r = \frac{1}{2} (\Gamma_N + \Gamma_S)$$

$$\Gamma_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_e} + \frac{a\xi}{V} S_b + B S_b + \frac{C N_b}{\tau_r S_b} \right) \quad (24)$$

إن أداء التضمين التماثلي للليزرات أشباه الموصلات يقدر بدلالة استجابة تضمين الإشارة الصغيرة والذي يعرف كدلالة تحويل من تيار التضمين إلى خرج قدرة ضوئية [7].

فعند تيار انحياز معين I_b فإن الاستجابة للتضمين (Ω_m) المنشورة لتردد التضمين Ω_m تعرف من نسبة عدد الفوتونات عند التضمين $S_m(\Omega_m)$ إلى عددها عند عدم التضمين $S_m(0)$. وباستخدام المعادلة (24) فإن الاستجابة $H_m(\Omega_m)$ تعطي من

$$H_m(\Omega_m) = \frac{S_m(\Omega_m)}{S_m(0)} \quad H_m(\Omega_m) = \left\{ 1 + 2j \frac{\Omega_m \Gamma_r}{\Omega_r^2} - \left(\frac{\Omega_m}{\Omega_r} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (25)$$

وهذه المعادلة يمكن كتابتها كما صاغها Petermann [7] على الشكل

$$H_m(\Omega_m) = \left\{ 1 + j \frac{\Omega_m}{\Omega_d} - \left(\frac{\Omega_m}{\Omega_r} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (26)$$

حيث

$$\Omega_d = 2\pi f_d = \frac{\Omega_r^2}{2\Gamma_r}$$

وهو ما يحدد تردد التضليل الزاوي للليزر بتردد تضليل f_d . وبسهولة يتضح أن مقدار الاستجابة المنشورة للترددات الصغيرة تساوي الوحدة حيث عندما $\Omega_m \rightarrow 0$ فإن $|H_m(\Omega_m)| = 1$ بينما تحدث قمم الاستجابة $|H_m(\Omega_m \rightarrow 0)| = 1$.

$$\Omega_m(\text{peak}) = \Omega_r \sqrt{1 - \frac{\Omega_r^2}{2\Omega_d^2}} \quad (27)$$

وبوضع (27) في (26) نحصل على النهايات العظمى لقمم الاستجابة $|H_m|_{\text{peak}}$.

$$|H_m|_{\text{peak}} = \left(\frac{\Omega_r}{\Omega_d} \sqrt{1 - \frac{\Omega_r^2}{4\Omega_d^2}} \right)^{-1} \quad (28)$$

وهو ما يوضح بجلاء بأنه عندما يكون تردد استرخاء الليزر $\Omega_r = \sqrt{2}\Omega_d$ فإنه لا تبرز قمم لتردد التضليلين $0 = \Omega_m(\text{peak})$ وإن الاستجابة $1 = |H_m|_{\text{peak}}$ تصبح مستوية وتحتفى قمم الاستجابة.

$$\Omega_r = \sqrt{2}\Omega_d \quad (29)$$

2.4 - عرض حزمة التضليلين:

إن عرض الحزمة لاستجابة تضليل الإشارة - الصغيرة والمنشورة لقيمة معطاة لتيار الانحياز I_b تتعدد من قيمة أعلى تردد مُضمن على شعاع الليزر، وهي قيمة التردد الذي تهبط عنده الاستجابة $|H_m(\Omega_m)|$ إلى نصف قيمتها (قيمة التردد $3dB$).

أي:

$$f_{3dB} = \frac{\Omega_{-3dB}}{2\pi}$$

ويحسب من

$$f_{3dB} = \frac{\Omega_r}{2\pi} \sqrt{\left(1 - \frac{\Omega_r^2}{2\Omega_d^2}\right) + \sqrt{\left(2 - \frac{\Omega_r^2}{2\Omega_d^2}\right)^2 + \frac{\Omega_r^2}{\Omega_d^2}}}$$

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(\Omega_r^2 - 2\Gamma_r^2) + 2\sqrt{(\Omega_r^2 - \Gamma_r^2)^2 + \Omega_r^2 \Gamma_r^2}} \quad (30)$$

ولو أخذنا في الاعتبار فرض Agrawal الذي ينص على أن $\Gamma_r \gg \Omega_r$ \gg فإن .

$$f_{3dB} \approx \sqrt{3} \frac{\Omega_r}{2\pi} = \sqrt{3} f_r \quad (31)$$

ومن الصيغة (23) يمكن تبسيط تردد الاسترخاء f_r إلى

$$\begin{aligned} f_r^2 &\approx \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{a\xi}{V} \right) \left[\frac{a\xi}{V} (N_b - N_g) + BS_b \right] S_b \\ f_r^2 &= \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{a\xi}{V} \right) \left[\frac{a\xi \tau_e}{eV} (I_b - I_g) + B \frac{I_b - I_{th}}{eG_{th}} \right] \frac{I_b - I_{th}}{eG_{th}} \end{aligned} \quad (32)$$

هو تيار الشفافية. وسوف نختبر دقة هذه التقريرات في الحسابات

حيث $I_g = \frac{eN_g}{\tau_e}$ حيث هو تيار اللاحقة ، والصيغة المشتقة أعلاه تبين اعتماد كل الترددتين f_r ، f_{3dB} على تيار الانحياز I_b وعامل خمد الربح B .

إن عرض حزمة التضمين بدون قمة تمثل حد حرج لليزر ومنها يتحدد الحد العلوي لأعلى تردد يمكن تضمينه على شعاع الليزر.

يتضح أن هذا الحد العلوي لعرض حزمة التضمين $f_{3dB(max)}$ يحدث عندما $f_r = 2fd$ ، الأمر الذي يعني أن تردد التضاؤل fd وبالتالي معدل التضاؤل هو بارامتر أساسي في التضمين.

3 - حسابات عددية وشرح.

سوف نستعرض الخواص التي تميز أو تصف تضمين الإشارة- الصغيرة عن طريق إجراء حسابات عددية نحصل عليها من صيغ التضمين التي سبق اشتقاها.

والجدول التالي يتضمن بارامترات ليزر شبه الموصل الرباعي InGaAsP الباعث لليزر بطول موجي $1.55\mu m$

جدول (1) القيم النموذجية لبارامترات الليزر InGaAsP

الوحدة	القيمة	المعنى	الرمز
Mm	1.55	الطول الموجي للإشعاع	λ
$m^3 s^{-1}$	7.85×10^{-12}	عامل الكسب التقاضي	A
-	0.2	عامل حصر المجال الضوئي	Ξ
μm^3	60	حجم الطبقة الفعالة	V
Mm	250	طول الطبقة الفعالة	L
-	3.56	عامل انكسار الضوء في الطبقة الفعالة	n_a
-	5.31×10^7	عدد الإلكترونات عند الشفافية	N_g
-	2.5×10^{-5}	عامل الانبعاث التلقائي	C
Ns	7.772	عمر إعادة الالتحامات المشعة	τ_r
Ns	4.45	عمر إعادة الالتحامات الغير مشعة	τ_{nr}
Ps	0.1	عمر استرخاء الإلكترونات بين الحزم	τ_{in}
$c^2 m^2$	8.575×10^{-57}	مربع عزم ثانوي القطب	$ R_{cv} ^2$
-	4.05×10^7	عدد الإلكترونات المميز لحمد الريح	N_s
-	0.95	الانعكاسية على الوجه الأمامي	R_f
-	0.85	الانعكاسية على الوجه الخلفي	R_b
m^{-1}	500	عامل فقد خلال مادة الوسط الفعال	K

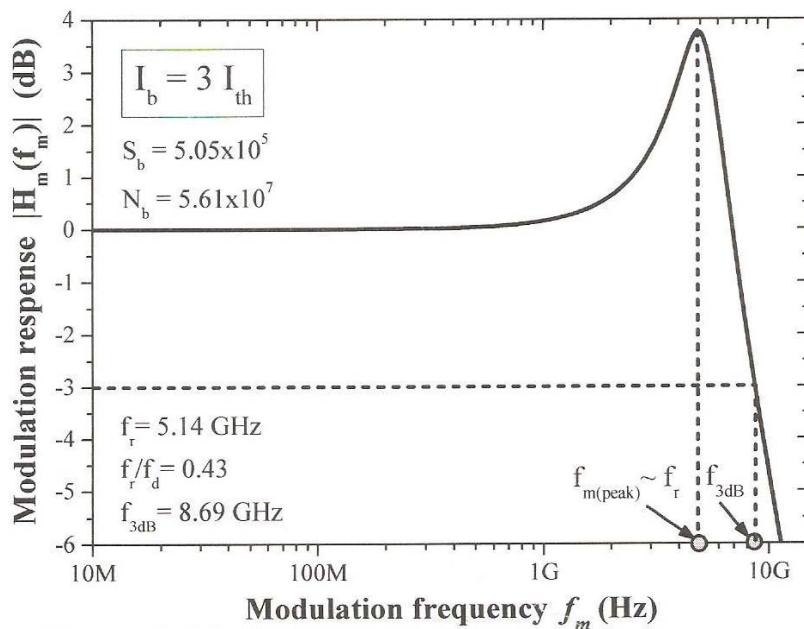
مع ملاحظة إن متوسط عمر الإلكترون τ_e في المعادلة (2) يتحدد بدلالة متوسط عمر الانبعاث لإعادة الالتحامات المشعة τ_r ، ومتوسط العمر في حالة إعادة الالتحامات الغير مشعة τ_{nr} . [22]

$$\frac{1}{\tau_e} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (33)$$

بينما القيمة المحسوبة لعامل $I_{th} = 3.17 \text{ mA}$ والقيمة المحسوبة لتيار العتبة $B_0 = 683 \text{ S}^{-1}$ الريح الغير خطى هي وسوف نختبر تأثير خمد الريح على خواص التضمين بتغيير العامل B في المعادلة (6) كمضاعف لهذه القيمة الثابتة

3.1 استجابة تضمين الإشارة- الصغيرة

طيف استجابة التضمين $|H_m(f_m)|$ عندما $I_b = 3I_{th}$ يوضحه الشكل البياني(1) ويوضح بروز قمة للاستجابة مناظرة لتردد التضمين $f_{m(\text{peak})} = 4.9 \text{ GHz}$ وهي قريبة جداً من قيمة تردد الاسترخاء $f_r = 5.14 \text{ GHz}$ وفي هذه الحالة يكون تردد التضاؤل f_d أعلى من تردد الاسترخاء ، $f_r = 0.43f_d$. ويكون عرض حزمة التضمين $f_{3\text{dB}} = 8.69 \text{ GHz}$. والطيف $|H_m(f_m)|$ يمكن أن يفهم بتجزئته إلى ثلاثة مناطق. هضبة وقمة ومنطقة انحدار[25].عندما $f_m \ll f_r$



الشكل (1) منحنى الاستجابة $|H_m(f_m)|$ عندما $I_b = 3I_{th}$ قمة طيف الاستجابة تحدث عند f_r وعرض الحزمة $f_{3\text{dB}}$

حاملات الشحنة تتبع التغير في تيار الحقن والليزر بصعوبة يتغير للعمل كموجات متصلة ونتيجة ذلك استجابة مستوية كما في الجزء الأول من المنحنى عند منطقة قمة الاستجابة، بالإضافة للاستجابة لتغيرات تيار الحقن. فإن حاملات الشحنة تتفاعل أيضاً مع مجال الفوتونات وهذا مشابه لأثر الحالة العابرة التي تحدث عند بداية فتح الليزر.

إن حالة التزامن الكاملة بين الإلكترونات المحقونة ومجال الفوتونات هي ما يؤدي إلى حالة رنين الليزر التي تميزها f_r . وأخيراً الجزء المنحدر من $|H_m(f_m)|$ يكون ناتج عن حقيقة أن طور مجال الفوتونات يتختلف (يتأخر) عن تيار الحقن وذلك خلال الوقت الذي تزداد فيه قيمة تردد التضمين f_m بعيداً عن $f_{m(peak)}$ فإن مجال الفوتونات يميل ليصبح مختلف في الطور عن الإلكترونات المحقونة أكثر فأكثر مما يؤدي إلى تناقص رتبة $|H_m(f_m)|$.

3.2 تأثير تيار الانحياز على خواص التضمين.

من المفيد دراسة تأثير تيار الانحياز على معاملات التضاؤل $\Gamma_N, \Gamma_s, \Gamma_r$ للليزر قبل دراسة تأثيره على الاستجابة $|H_m(f_m)|$. الشكل (2a) تمثل بياني لغير Γ_s مقابل I_b وفيه بينما التأثير المنفرد لكل من حد الإنبعاث التلقائي $\frac{C N_b}{\tau_r S_b}$ وحد خمد الربح BS_b في المعادلة (16). حيث يتضح أن Γ_s تسسيطر بواسطة خمد الربح وتزداد خطياً مع I_b (وهذا يعني مع S_b).

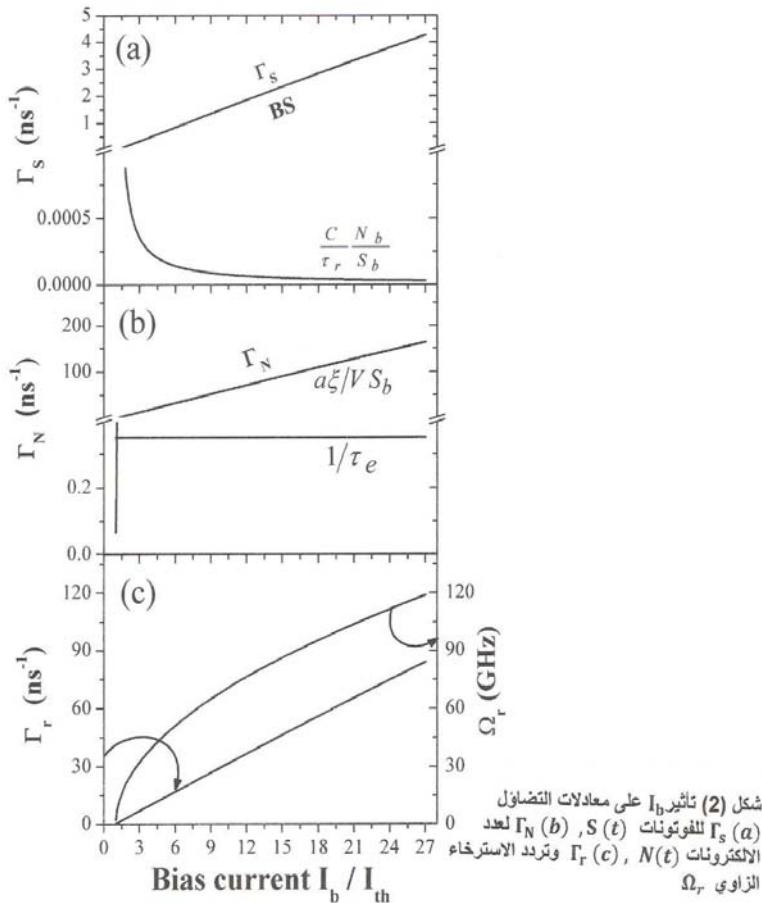
بينما لحد الإنبعاث التلقائي قيمة صغيرة جداً تتناقص بسرعة مع زيادة I_b بالقرب من I_{th} لذلك يمكن تقرير Γ_s لتصبح

$$\Gamma_s \approx BS_b = B \frac{I - I_{th}}{eG_{th}} \quad (34)$$

في الشكل (2b) يظهر التأثير المنفرد لكل من حد عدد الفوتونات $\frac{a\xi}{V} S_b$ وحد متوسط العمر لليكترون $\frac{1}{\tau_e}$ في المعادلة (17) على عامل التضاؤل Γ_N . وفيه تتضح سيطرة Γ_N

بواسطة الحد $\frac{a\xi}{V} S_b$ وتزداد خطياً مع I_b ، لذلك يمكن تقرير Γ_N على النحو

$$\Gamma_N \approx \frac{a\xi}{V} S_b = \frac{a\xi}{V} \left(\frac{I - I_{th}}{eG_{th}} \right) \quad (35)$$



عند مقارنة المدى العددي للشكلين (2a)، (2b) يتضح أن Γ_N تكون أكبر بكثير من Γ_s وهذا عكس تقريرات petermann [7] ومنشأ هذا الفارق يرجع إلى فرضي petermann. الأول وهو تساوي المعدلات لكل من الانبعاث التلقائي والمحفز في معادلة التصنيف رقم (1) لعدد المقطونات ($S(t)$) والثاني احتساب الربح الغير خطى في المعادلة رقم (2) لعدد الالكترونات ($N(t)$).

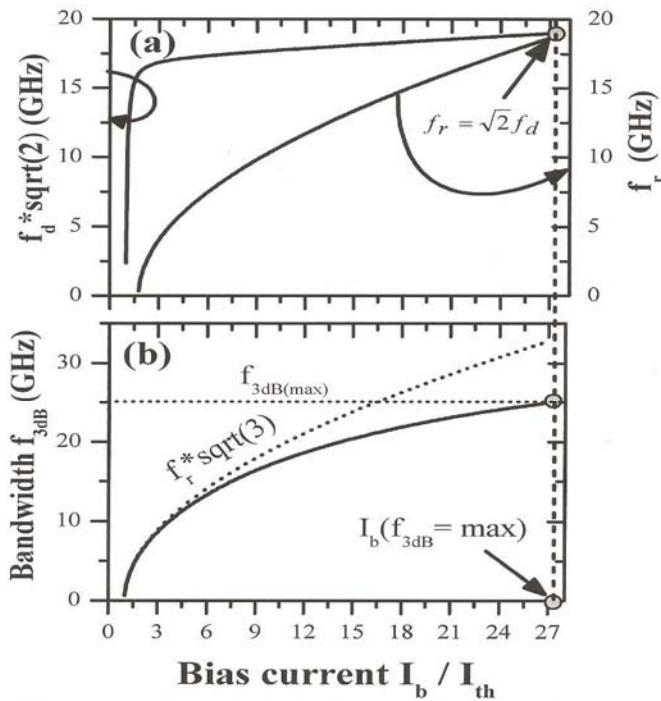
إن النموذج الحالي لمعادلات التصنيف (1) ، (2) قد تم استئصاله باستخدام أسلوب تحليل مصفوفة - الكثافة density- matrix analysis للكسب الغير خطى [21] الذي فيه يتم التحكم في عدد الإلكترونات المحقونة $N(t)$ بواسطة الكسب الخطى ولا يتأثر بالكسب الغير خطى.

ونخلص أخيراً بأن Γ_r للليزر تزداد خطياً مع I_b ، S_b كما تؤكد المعادلتان (34)، (35)

$$\Gamma_r = \frac{1}{2} \left(\frac{a\xi}{V} + B \right) S_b = \frac{1}{2} \left(\frac{a\xi}{V} + B \right) \left(\frac{I_b - I_{th}}{eG_{th}} \right) \quad (36)$$

وهذا ما يبينه الشكل (2c) والذي يبين أيضاً على المحور في الجانب الأيمن تغيرات تردد الاسترخاء الزاوي مع I_b وتتضح زيادة Ω_r مع I_b وإن تلك الزيادة تكون أسرع في المدى الأكثـر قليلاً من مستوى العتبة $I_{th} \leq I_b \leq 1.3I_{th}$ حيث تكون الزيادة تقريباً خطية في الانحياز البعيد فوق العتبة.

الشكل (3a,b) يبين تغيرات تردد التضاؤل f_d وعرض حزمة التضمين f_{3dB} مقابل تيار الانحياز I_b . الشكل يبين أيضاً أن Ω_r تكون أكبر من Γ_r ويظهر كبر الفرق بينهما في المنطقة عندما $I \gg I_{th}$



شكل (3) تأثير I_b على f_{3dB} (b)، f_d ، f_r في (a) التقرير
رسم بخط منقط الحد الأعلى لتردد التضمين
 $f_{3dB} = \sqrt{3}f_r$
 $I_b = 27.11I_{th}$ وينظر $25GHz$

في الشكل (3a) لكي نحدد قيمة I_b التي تناظر $f_r = \sqrt{2}f_d$ تم رسم تردد التضاؤل f_d مضروباً في $\sqrt{2}$ مقابل I_b وتردد الاسترخاء f_r على المحور الأيمن من نفس الشكل ويتبين أن f_d تزداد بسرعة مع I_b في المدى $I_b \leq I_{th} \leq 1.3I_{th}$ لتقل هذه الزيادة وتصبح صغيرة جداً خارج هذا المدى ، وتلك الزيادة السريعة في f_d بالقرب من العتبة تفسرها الزيادة السريعة في مقابل I_b وزيادة Γ_r الخطية المتزامنة المبينة في الشكل (2).

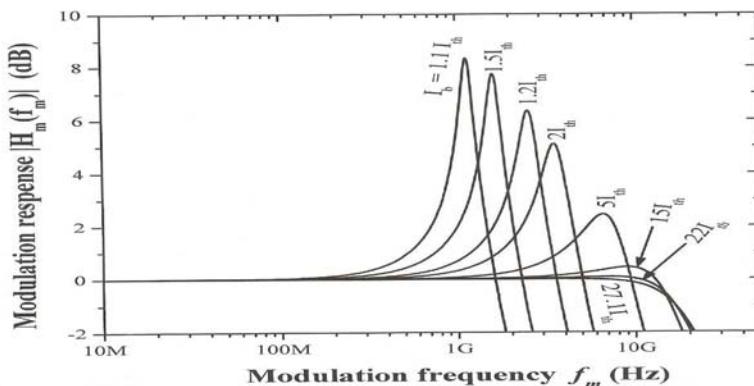
الشكل (3b) يبين زيادة f_{3dB} مقابل I_b وهي مشابهة لزيادة f_r مقابل المدى الصغير من I_b ولكنها أبطئ في المدى الأعلى من I_b الشكل يتضمن اختبار مدى شرعية علاقة التقرير $f_{3dB} = \sqrt{3}f_r$ وتنبئ شرعية هذا التقرير في المدى $I_{th} \leq I_b \leq 4I_{th}$ حيث تتعذر دقة هذا التقرير في المدى الأكبر.

إن التحليل العددي (الاستكمال بكثيرة الحدود) للبيانات المتحصل عليها يبين أن علاقة

f_3dB مقابل f_r تطابق كثيرة حدود من الدرجة الثالثة

$$f_{3dB} = \sqrt{3.46} f_r - 1.8 \times 10^{-11} f_r^2 - 4.71 \times 10^{-22} f_r^3 \quad (37)$$

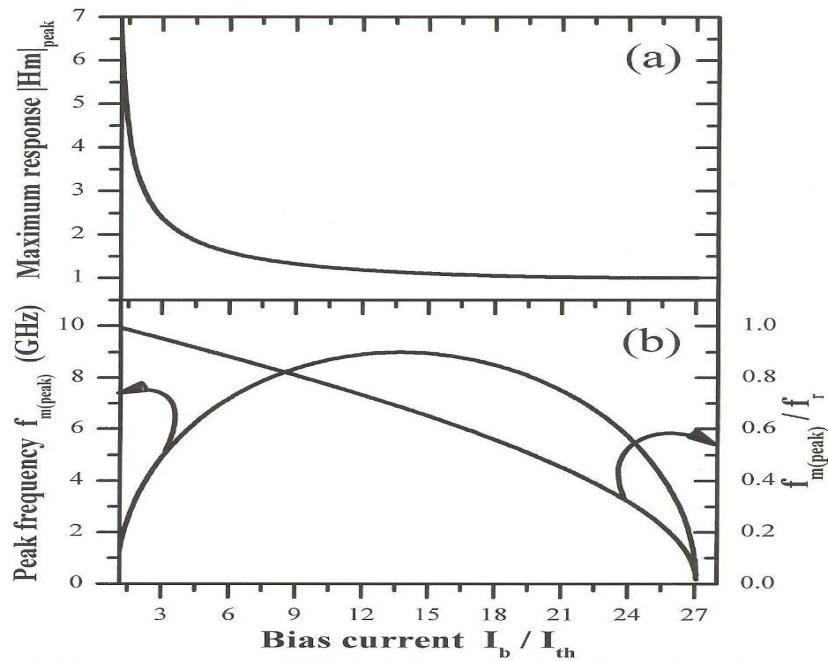
والنقطة التي يتقاطع عندها المنحنى f_r مع $\sqrt{2}f_d$ تحدد الحد الأعلى لتردد التضمين $I_b = 27.1I_{th}$ حيث $f_{3dB(max)} = 25\text{GHz}$ ومتوازراً $f_{3dB(max)}$ وهي قيمة مماثلة للمتوقعة في [26] والمفاسدة في [13, 17].



شكل (4) تغيرات $|H_m(f_m)|$ مع تغيرات الانحياز I_b . قيمة الطيف تتناقص مع زيادة I_b و $|H_m(f_m)|$ تصبح مستوية عندما $I_b = 27.1I_{th}$

الشكل (4) يبين تغيرات الاستجابة $|H_m(f_m)|$ مع تيار الانحياز I_b لقيم I_b المحسورة بين كحد أدنى إلى $I_b = 27.1I_{th}$ كحد أعلى يناظر $I_b = 1.1I_{th}$. أطيف $f_{3dB(max)}$ يناظر $I_b = 27.1I_{th}$ كحد أدنى إلى $I_b = 1.1I_{th}$ كحد أعلى يناظر $I_b = 27.1I_{th}$ يصبح بدون قمة. إن السبب في بروز الاستجابة في الشكل تشتري جميعها في قيمة استجابة 1 (استجابة $|H_m(f_m)| = 1$) (استجابة مستوية) لمركبات التردد الواطئة. يتضح أيضاً من الشكل بأن قيم قمم الاستجابة تتناقص مع زيادة I_b . وإن طيف الاستجابة المناظر $I_b = 27.1I_{th}$ يصبح بدون قمة. إن السبب في بروز قمم الاستجابة عند قيم I_b الأصغر يرجع لصغر قيم f_r مقارنة مع f_d المناظرة. الشكل يبين بأن التناقص في قمم الاستجابة يكون متراجعاً مع إزاحة قمة تردد التضمين $f_{m(peak)}$ في إتجاه التردد الأعلى فيما عدا الحالة عندما

$$I_b = 22I_{th}$$

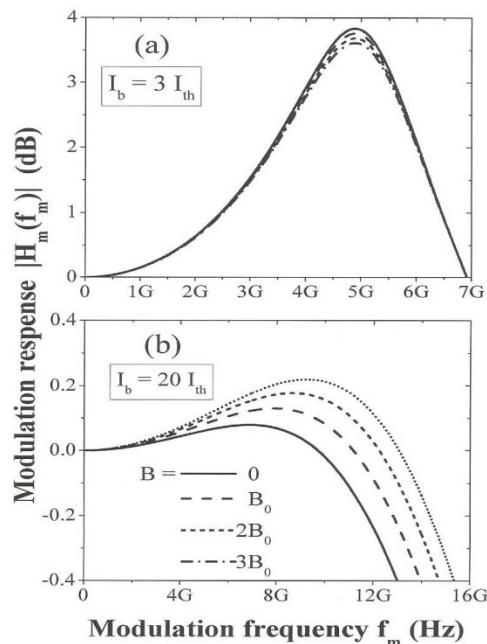


شكل (5) تأثير I_b على $|H_m|_{max}$ و f_m ونسبة التردد $\frac{f_{m(peak)}}{f_r}$
قيم الاستجابة تتناقص مع زيادة I_b . f_m تتزايد مع I_b نهائياً
عندما $I_b = 27.1I_{th}$ وعندها تتناقص، عندما $I_b = 13.7I_{th}$
 $f_{m(peak)} \rightarrow 0$ و $|H_{m(peak)}| = 1$

الشكل (5) يقدم توضيحاً عددياً لاعتماد قمم الاستجابة $|H_m|_{peak}$ و قمم تردد التضمين $f_{m(peak)}$ على تيار الإنحياز I_b وفيه $|H_m|_{peak}$ تهبط لقيم صغيرة جداً مع زيادة I_b لغاية $I_b \approx 3I_{th}$ حيث عندما تبدأ في التناقص ببطء لتصبح $|H_m|_{peak} = 1$ عندما $I_b = 27.1I_{th}$. الشكل (5b) يبين أن $f_{m(peak)}$ له منحى parabolic في اعتماده على I_b بنهاية عظمى عند تردد 8.99GHz مناظر لـ $I_b = 13.7I_{th}$ ومع ذلك فإنه خلال جزء تناقص $f_{m(peak)}$ الرسم يبين أن قمم الاستجابة بالكاد تبرز حيث قيم $|H_m|_{peak}$ لا تزيد عن الواحد إلا بقليل. الشكل أيضاً يبين تناقص النسبة $f_{m(peak)}/f_r$ مقابل I_b وانعدامها عندما $I_b = 27.1I_{th}$.

3.3 تأثير الكسب الغير خطى على خواص التضمين

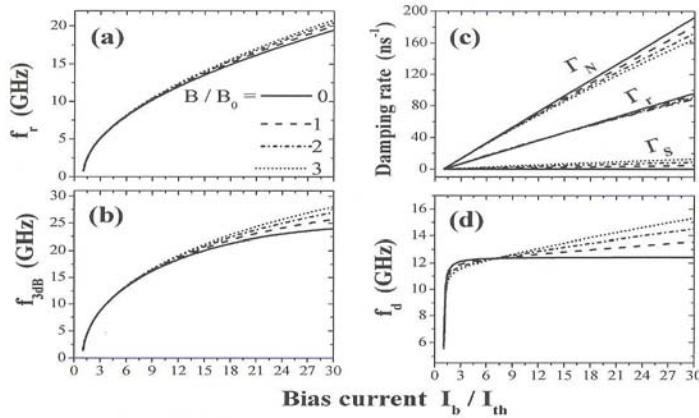
إن حد الكسب الغير خطى BS_b يزداد مع زيادة عدد الفوتونات، وبالتالي مع زيادة I_b . وهنا سنوضح تأثير خمد الكسب على خواص التضمين وذلك من خلال تغير قيمة خمد الربح B بالنسبة لقيمتها الثانية B_0 المناظر للثوابت في الجدول (1)



شكل (6) الاستجابة $|H_m(f_m)|$ كدالة في B عندما $I_b = 3I_{th}$ (a) $I_b = 20I_{th}$ (b) $|H_m(f_m)|$ يصل إلى الذروة عند $f_{m(peak)}$ ويزداد من قيم B_0

الشكل (6a) يبين استجابة التضمين $|H_m(f_m)|$ كدالة في B عندما $I_b = 3I_{th}$ ويتبين أن كسب الخمد يسبب تناقص طفيف في طيف الاستجابة حول $f_{m(peak)}$. بينما الشكل (6b) يعرض تمثيل بياني لنفس العلاقة ولكن عند تيار انحصار $I_b = 20I_{th}$ وفيه يتضح أن زيادة خمد الكسب B تسبب زيادة في ارتفاع طيف الاستجابة لأعلى وتعمل على إزاحة $f_{m(peak)}$ في إتجاه تردد تضمين أعلى. التأثيرات أعلى يمكن أن تفهم من اختبارنا لتأثير B على معدلات التضاؤل الثلاثة Γ_N , Γ_s , Γ_r وعلى الترددات الثلاثة f_d , f_{3dB} , f_{r3} والأشكال من $-7d$ هي تمثيل بياني لتلك الخواص المميزة مقابل I_b كدالة في B الرسومات البيانية تبين أنه على المدى $I_{th} < I_b < 7I_{th}$ والذي يعطي منطقة العمل لليزرات أشباه الموصلات المعتادة. يكون تأثير خمد الربح B مهملاً عدا أن f_d تتناقص قليلاً مع زيادة B

وهو ما يبرر التناقص القليل في الاستجابة $|H_m(f_m)|$ عند قيم I_b الكبيرة الموضحة في الشكل (6a)



شكل (7) تأثير B على f_r ، f_{3dB} و Γ . (a) (b) (c) معدلات التضاؤل Γ_r ، Γ_s ، Γ_n و (d) تأثير B على زيادة خواص التضمين هذه حيث تقوية B تعمل على زيادة خواص التضمين هذه

في الشكلين (7a)، (7b) يتضح أن خمد الكسب B يعمل على زيادة f_r و f_{3dB} وهو ما يتفق مع توقع المصدر [24]. الشكل (7c) يوضح زيادة معدل التضاؤل في عدد الفوتونات S مع زيادة B كما تنص المعادلة (34). بينما في نفس الشكل يتضح تناقص Γ_N مع زيادة B بسبب تناقص S_b المرافق لتقوية الخمد لتكون النتيجة المحصلة هي تناقص في Γ_r وزيادة Γ_d كما يوضح الشكل (7d).

الأشكال تبين أن الزيادة في f_r صغيرة نسبياً عند مقارنتها مع زيادة f_d ، لذلك زيادة الخمد B تعمل على تناقص نسبة الترددين $\frac{f_r}{f_d}$ التي نتجتها زيادة $|H_m(f_m)|$ المبينة في الشكل . (6b)

-4 الخاتمة

عن طريق دراسة نظرية مبنية على نظرية تحليل الإشارة- الصغيرة. تم تقديم تصنيف للتضمين التماضي المباشر على شدة شعاع ليزر شبكة الموصل الرباعي InGaAsP الباعث

للضوء بالطول الموجي $1.55\mu\text{m}$ والنتائج المتحصل عليها بينت أن قمم أطيف استجابة التضمين عند ترددات تضمن أقل من أو مساوية لتردد استرخاء الليزر تعتمد على تيارات الانحياز، حيث الزيادة في تيار الانحياز تكون مصحوبة بتناقص في قيم هذه القمم مع زيادة ثابتة الوقيرة في تردد الاسترخاء. وإن طيف الاستجابة المناظرة لتيار انحياز بقيمة 27.1 مرة من تيار العتبة يصبح بدون قمة.

إن زيادة تيار الانحياز تكون مصحوبة أيضاً بزيادة خطية في معدل التضاؤل، وكذلك بزيادة سريعة في عرض حزمة التضمين بالقرب من العتبة متبوعة بزيادة أبطأ لمستويات الانحياز البعيدة عن العتبة، وإن النهاية العظمى لعرض هذه الحزمة هو 25GHz ثبيئ أيضاً. بأن زيادة خمد الريح الغير خطى تعمل على زيادة عرض حزمة التضمين وعلى تناقص في معدل التضاؤل وذلك عند تيارات انحياز تكون كبيرة كفاية عن مستوى العتبة، الأمر الذي يعني إمكانية زيادة الحد العلوي لتردد التضمين.

References

- [1]. Kjebon, R Schatz, S Lourdudoss, S Nilsson Stalnache and L Backbom, *Electron. Lett.* 33, 488 (1997).
- [2]. G P Agrawal, *Fiber-optic communication systems* (J. Wiley & Sons Inc., New York 2002).
- [3]. J Vanderwall and J Blackburn, *Opt. Lett.* 4, 295 (1979).
- [4]. M Yamada and T Higashi, *IEEE J. Quantum Electron.* 27, 380 (1991).
- [5]. D Bimberg, K Ketterer, HE Scholl and H P Vollmer, *Electron. Lett.* 20, 343 (1984).
- [6]. N Makeyev, Y A Zarkevitch and V I Smirnov, *Telecom. Radio Eng.* 45, 41(1990).
- [7]. K Petermann, *Laser diode modulation and noise* (Kluwer Academic, Dordrecht), (1988).
- [8]. C B 3u and V Lanzisera, *Appl. Phys. Lett.* 45, 1302 (1984).
- [9]. K Y Lau and A Yariv, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-21, 121 (1985).
- [10]. R Olshansky, D M Fye, J Manning and C B Su, *Electron. Lett.* 21, 721 (1985).
- [11]. G P Agrawal, *Appl. Phys. Lett.* 49, 1013 (1986).

- [12]. D M Fye, R Olshansky and V Lanzisera, *Pmc. 10th IEEE Semicond. Laser Conf.*, Kanazawa, Japan, 1986, p. 182.
- [13]. R Olshansky, P Hill, V Lanzisera and W Powazinik, *Appl. Phys. Lett.* 50, 653 (1987).
- [14]. E Henery, L Chusseau and J M Lourtioz, *IEEE J. Quantum Electron.* 26, 633 (1990).
- [15]. F Choa, Y H Lee, T L Koch, C A Burrus, B Tell, J L Jewell and R E Leibenguth, *IEEE Photonic Technol. Lett.* 3, 697 (1991).
- [16]. G P Agrawal and N K Dutta, *Semiconductor lasers*, 2nd edition (Van Nostrand Reinhold, New York), (1993).
- [17]. R Stevens, *Modulation properties of vertical cavity light emitters*, Ph.D. thesis (Royal Institute of Technology, Sweden), (2001).
- [18]. M Ahmed, M Yamada and M Saito, *IEEE J. Quantum Electron.* 37, 1600 (2001).
- [19]. J H Haug, *Phys. Rev.* 184, 338, (1969).
- [20]. M Ahmed, M Yamada and S W Z Mahmoud, *J. Appl. Phys.* 101, 33119, (2007).
- [21]. M Ahmed and M Yamada, *J. Appl. Phys.* 84, 3004 (1998).
- [22]. Abdulrahrnann, M Ahmed and M Yamada, *Opt. Rev.* 9, 260 (2002).
- [23]. Y Suematsu and A R Adams, *Handbook of semiconductor lasers and photonic integrated circuits* (Chapman and Hall, London), (1994).
- [24]. G P Agrawal, *IEEE J. Quantum Electron.* 26, 1901, (1990).
- [25]. C Y Wu, *Analysis of high-speed modulation of semiconductor lasers by electron heating*, Master Thesis (University of Toronto, Canada), (1995).
- [26]. J E Bowers, *Proc 10th IEEE Semicond. Laser Conf.*, Kanazawa, Japan, 1986, p.174