دراسات نظرية عن الكسب غير الخطي والضجيج لليزرات أشباه الموصلات ذات المركبات الرباعية

إعداد/ ريم عائض العتيبي

إشراف/ أ.د. مصطفى فرغل أحمد

المستخلص

يحظى ليزر أشباه الموصلات الرباعي باهتمام كبير نظرًا لإمكانية استخدامه في أنظمة اتصالات الألياف الضوئية. الخصائص الديناميكية لهذه الليزرات يتم التحكم بها عن طريق الكسب البصري كما تتأثر أيضا بالضجيج. تعد حسابات الكسب والضجيج من خلال ضبط طاقة فجوة النطاق ضرورية للتحكم في أداء ليزر أشباه الموصلات الرباعية وتحسينه. يعتبر كل من الكسب والضجيج خواص غير خطية ، وحساباتهم تتطلب اجراءات نظرية صعبه و معقده لوصف تفاعل المجال الكهرومغناطيسي مع المادة النشطة. تقدم هذه الأطروحة نمذجة نظرية لكل من الكسب غير الخطي والضجيج لليزر أشباه الموصلات الرباعية ، بهدف تطوير معادلات تجريبية تساعد في حساب خواص الكسب والضجيج كدوال لطاقة فجوة النطاق باستخدام الآلات الحاسبة البسيطة.

أولاً ، تم تقديم نمذجة الإشارة الصغيرة لكل من ضجيج الكثافة النسبية (RIN) وضجيج التردد (FN) بالإضافة إلى عرض الخط المرتبط واعتمادها على صيغة الكسب. تم استخدام ثلاث صيغ شائعة للكسب البصري بما في ذلك قمع الكسب. تم توضيح تأثير قمع الكسب على خصائص التردد لأطياف RIN و FN وكذلك على معدل التخميد وتردد تذبذبات الاسترخاء. شوهدت اختلافات في مستويات RIN و FN في نظام تردد الرنين مع تغيير شكل الكسب البصري بسبب التباين في معدل التخميد وتردد الرنين. كانت التفاوتات في التنبؤ بكل من مستويات RIN و FN بسبب أشكال الكسب هذه ١٪ و ١٤٪ على التوالي ، وهو ما يتو افق مع تفاوت عرض الخط ٢١,٦٪ عند تردد منخفض قدره ١٠ ميجاهرتز ، بينما كانت ٣٩٪ و ٢١,٦٪ عند ترددالاسترخاء.

في الجزء الثاني ، تم تقديم نمذجة الكسب الخطي وغير الخطي بناءً على نهج الاضطراب الثالث المعدل الذي يأخذ في الاعتبار التحولات الإلكترونية بين نطاق التوصيل وكلا نطاقات الفجوات الثقيلة و الخفيفة للطبقة النشطة. تم تطبيق النموذج المقترح على الليزر $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs/InP$ و $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}/InP$. أظهرت النتائج أن معاملات الكسب الخطي و غير الخطي تنخفض مع زيادة طاقة فجوة النطاق لكلا الليزرين. كما تم العثور على أن معاملات الكسب الخطية وغير الخطية أعلى لليزر $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}/InP$ وكثافة الناقل الشفاف أقل من تلك الموجودة في $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs/InP$. تم استخدام النتائج التي تم الحصول عليها لخصائص الكسب للنهج المعقد لتطوير معادلات تجريبية مبسطة تعمل في طاقة فجوة النطاق للمركبات الرباعية. ثم تم استخدام هذه العلاقات المبسطة في نموذج معادلة المعدل الذي يصف ديناميكيات الليزر لمحاكاة الخصائص الطيفية لضجيج الكثافة النسبية (RIN) كدالة لطاقة فجوة النطاق على النطاقات ذات الصلة. تم إثبات أن مستويات RIN تزداد مع زيادة طاقة فجوة النطاق حول تردد الاسترخاء لليزر الذي يتحول إلى ترددات أقل. يكون مستوى RIN عند التردد المنخفض متماثلًا تقريبًا في كلا الليزرين ، بينما يكون مستوى RIN في $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs/InP$ أقل بمقدار واحد عند التردد العالي. بالإضافة إلى المعادلات الملائمة لخصائص الكسب من حيث طاقة فجوة النطاق ، تم استخدام محاكاة أطياف الضجيج لإدخال معادلات ملائمة لمستويات RIN حول تردد الاسترخاء وفي نظام الترددات المنخفضة.

تمكن النتائج التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة من حسابات الخصائص الطيفية المعقدة للكسب والضجيج الخطية وغير الخطية من خلال حسابات بسيطة. لذلك ، تضيف هذه الأطروحة إلى نظرية ليزر أشباه الموصلات وتساعد على تبسيط تطبيقه لمحاكاة أداء أنظمة التطبيقات ذات الصلة.

Theoretical Studies on Nonlinear Gain and Noise of Quaternary III-V Semiconductor Lasers

By Reem Ayedh Alotaibi

Supervised By

Prof. Dr. Moustafa Farghal Ahmed

Abstract

Quaternary semiconductor lasers have received much attention because of their potential for use in fiber communication systems. The operation and dynamic characteristics of these lasers are controlled by optical gain and are affected by noise. Calculations of gain and noise by tuning the bandgap energy are perquisite for studying performance of these lasers. Both gain and noise are nonlinear properties, and their calculations are awesome implying tedious theoretical approaches to the interaction of the electromagnetic field with the active material. This thesis presents theoretical modeling of both nonlinear gain and noise of quaternary semiconductor lasers, aiming at developing empirical equations that help in calculation of gain and noise properties as functions of the bandgap energy using simple calculations.

First, small signal modeling was introduced to both the frequency noise (FN) and the relative intensity noise (RIN) and also to the associated linewidth and their dependence on the gain formulation. Three common formulas of nonlinear gain were used. Influence of gain suppression on the frequency characteristics of the RIN and FN spectra as well as on the damping rate and frequency of relaxation oscillations were elucidated. Variations were seen in the levels of RIN and FN in the regime of the relaxation frequency with changing the form of optical gain because of variation in the damping rate and relaxation frequency. The tolerances in predicting both the RIN and FN levels due to these gain forms were 1% and 14%, respectively, which corresponded to tolerance of the linewidth of 21.6% at low frequency of 10 MHz, while they were 39% and 21.6% at the relaxation frequency.

In the second part, modeling of the linear and nonlinear gain was introduced basing on a modified third perturbation approach that takes account of electronic transitions between the conduction band and both the heavy and light hole bands of the active layer. The proposed model was applied to $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$/InP and $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$/InP lasers. The results show that the linear gain and nonlinear gain coefficients decrease with the increase of the bandgap energy for both lasers. The $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$/InP laser was found to exhibit higher linear and nonlinear gain coefficients and lower transparent carrier density than those of the $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$/InP. The obtained results on gain characteristics of the complicated approach of gain were used to develop simplified empirical equations that function in the bandgap energy of the quaternary alloy. These

simplified relationships were then used in the rate equation model that describe the laser dynamics to simulate the spectral properties of relative intensity noise (RIN) as a function of the bandgap energy over the relevant ranges. The RIN levels were shown to increase with the increase of the bandgap energy around the relaxation frequency of the laser which shifts to lower frequencies. The level of the low frequency RIN is almost same in both lasers, while the high frequency RIN in the $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs/InP$ is one order of magnitude lower. In addition to the fitting equations of gain characteristics in terms of the bandgap energy, the simulated noise spectra were used to introduce fitting equations to the RIN levels around the relaxation frequency and in the regime of low frequencies.

The obtained result of this study enables calculations of the complicated spectral characteristics of linear and nonlinear gain and noise via simple calculations. Therefore, this thesis adds to the theory of the semiconductor laser and helps to simplify its application to simulate performance of related application systems.