

*И.А. СУХОИВАНОВ, канд. техн. наук, В.В. ЛЫСАК,  
С.О. МАРТЫНЕНКО*

## **ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МНОГОСЛОЙНЫХ КРС-ЛАЗЕРОВ**

Создание и эксплуатация новых широкополосных систем, таких как мультимедиа, видеоконференций, ИНТЕРНЕТ, определяют переход к использованию сверхскоростных оптоволоконных систем передачи информации. С применением лазеров на основе четверных соединений скорость передачи данных повысилась; кроме этого, снизился уровень вносимых помех и возросла критическая мощность. Одномодовые лазеры на основе GaInAsP применяются в системах связи со скоростью передачи данных до 8 Гбит/с [1]. Разработка лазеров с квантоворазмерной структурой (КРС) открывает новые возможности для создания широкополосных оптоволоконных систем. Данные лазеры обладают чрезвычайно широкой полосой модуляции, которая в малосигнальной области достигает 40 ГГц.

При исследовании КРС-лазеров чаще всего рассматривают лазер с одним квантовым слоем [2; 3]. Однако эффективность таких лазеров ниже из-за малого объема активного слоя. Для увеличения эффективности применяется многослойная квантовая структура, которой должна соответствовать более сложная математическая модель.

В данной работе представлены две модели: для лазера с одним квантовым слоем с учетом параметров безызлучательной рекомбинации для квантового слоя и зоны ограничения, а также расширенная модель для многослойного КРС-лазера. Динамическая модель КРС-лазеров состоит из трех и более дифференциальных уравнений, каждое из которых отражает динамику изменения количества носителей в каждом конкретном слое.

Рассмотрим сначала систему дифференциальных уравнений, применяющуюся при анализе лазеров с одним квантоворазмерным (КР) слоем. Такая система включает в себя четыре уравнения, которые следует записать с учетом дальнейшего ее распространения на многослойные КРС-лазеры. Поскольку для многослойного КРС-лазера зона ограничения (ЗО) должна быть разделена достаточно широкой областью, состоящей из КР-слоев и разделяющих их барьеров, то целесообразно для базовой однослойной модели отдельно записать области ограничения справа и слева от КР-слоя [4], а также учесть их взаимодействие. Тогда однослойную модель можно представить следующим образом:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV_s} - \frac{N_1}{\tau_s} - \frac{N_1}{\tau_{ns}(N_1)} + \frac{N_1}{\tau_e} \left( \frac{V_w}{V_s} \right) + \xi \frac{N_1}{\tau_s}; \quad (1)$$

$$\frac{dN_w}{dt} = (1-\xi) \frac{N_1}{\tau_s} \frac{V_s}{V_w} + (1-\xi) \frac{N_2}{\tau_s} \frac{V_s}{V_w} - \frac{2N_w}{\tau_e} - \frac{N_w}{\tau_n(N_w)} - \frac{\Gamma_w v_g g(N_1) S}{1 + \varepsilon \Gamma_w S}; \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_2}{\tau_s} - \frac{N_2}{\tau_{ns}(N_2)} + \frac{N_1}{\tau_e} \left( \frac{V_w}{V_s} \right) + \xi \frac{N_1}{\tau_s}; \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma_w v_g g(N_1) S}{(1 + \varepsilon \Gamma_w S)} - \frac{S}{\tau_p} + \beta \frac{N_1}{\tau_n(N_1)}. \quad (4)$$

Здесь  $N_1, N_2, N_w$  — плотности носителей в ЗО, зоне вноса и в квантовом слое;  $S$  — плотность фотонов;  $I$  — сила тока инжекции;  $q$  — заряд электрона;  $V_s$  — объем ЗО;  $\tau_s$  — время пролета носителей через ЗО;  $\tau_e$  — время освобождения носителей заряда;  $\xi$  — коэффициент утечки;  $\Gamma_w$  — фактор оптического ограничения;  $g(N)$  — усиление, зависящее от плотности носителей;  $V_w$  — объем КР-слоя;  $\tau_p$  — время жизни фотона;  $\varepsilon$  — фактор нелинейности;  $\beta$  — фактор спонтанной эмиссии;  $\eta_i$  — внутренняя квантовая эффективность;  $v_g$  — групповая скорость;  $\tau_{ns}, \tau_n$  — рекомбинационное время жизни носителей в ЗО и квантовом слое,

$$\tau_{ns}(N) = (A_s + B_s N + C_s N^2)^{-1}; \quad \tau_n(N) = (A_w + B_w N + C_w N^2)^{-1},$$

где  $A_s, B_s, C_s, A_w, B_w, C_w$  — коэффициенты мономолекулярной, бимолекулярной и Оже-рекомбинаций в ЗО и КР-зоне соответственно.

Используем в качестве модели усиления линейную модель  $g(N) = g_0(N - N_0)$ , где  $N$  — плотность носителей в КР-зоне;  $N_0$  — пороговая плотность носителей;  $g_0$  — дифференциальный коэффициент усиления.

Модель (1) — (4) одно-слойного КРС-лазера можно расширить для лазеров с многослойной КР-структурой. Схематическое изображение переноса носителей представлено на рис. 1. Модель содержит  $M+3$  дифференциальных уравнений, где  $M$  —

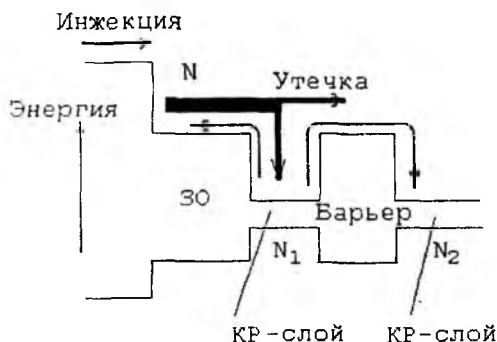


Рис. 1

количество КР-слоев в моделируемом лазере:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{\eta I}{qV_S} - \frac{N_1}{\tau_s} - \frac{N_1}{\tau_{ns}(N_1)} + \frac{N_{w1} V_w}{\tau_e V_s} + \xi \frac{N_2}{\tau_s}; \quad (5)$$

$$\frac{dN_{w1}}{dt} = (1 - \xi) \frac{N_1 V_s}{\tau_s V_w} - \frac{N_{w1} - N_{w2}}{\tau_s} - \frac{N_{w1}}{\tau_e} - \frac{N_{w1}}{\tau_n(N_{w1})} - M\Gamma_w v_g \frac{g(N_{w1})}{1 + \varepsilon \Gamma S} S; \quad (6)$$

$$\frac{dN_{wi}}{dt} = \frac{N_{wi-1} - N_{wi}}{\tau_c} - \frac{N_{wi} - N_{wi+1}}{\tau_c} - \frac{N_{wi}}{\tau_n(N_{wi})} - M\Gamma_w v_g \frac{g(N_i)}{1 + \varepsilon \Gamma S} S; \quad (7)$$

$$\frac{dN_{wM}}{dt} = (1 - \xi) \frac{N_2 V_s}{\tau_s V_w} + \frac{N_{wM-1} - N_{wM}}{\tau_c} - \frac{N_{wM}}{\tau_e} - \frac{N_{wM}}{\tau_n(N_{wM})} - M\Gamma_w v_g \frac{g(N_{w1})}{1 + \varepsilon \Gamma S} S; \quad (8)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_2}{\tau_s} - \frac{N_2}{\tau_{ns}(N_2)} + \frac{N_{wM} V_w}{\tau_e V_s} + \xi \frac{N_1}{\tau_s}; \quad (9)$$

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{i=1}^M \frac{\Gamma_w v_g g (N_{wi}) S}{1 + \varepsilon \Gamma S} - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\beta}{M} \sum_{i=1}^M \frac{N_{wi}}{\tau_n(N_{wi})}. \quad (10)$$

Здесь  $\Gamma$  — общий фактор оптического ограничения, который может быть рассчитан по формуле  $\Gamma = M \Gamma_w$ ;  $\tau_c$  — время пролета носителей через барьер;  $N_{wi}, N_{wM}$  — плотности носителей в  $i$ -м и последнем КР-слоях. Достоинствами модели (5) — (10) являются высокая скорость счета при реализации на ЭВМ и универсальность: модель пригодна для структур с любым количеством КР-слоев.

Модель (5) — (10) реализована с помощью математического пакета Matlab. Она позволила получить полный набор динамических характеристик. Из рис. 2 видно, что с возрастанием силы тока накачки уменьшаются время задержки и время релаксационных колебаний, а также увеличивается число фотонов. С увеличением числа КР-слоев уменьшается сила порогового тока: она составляет 8; 2; 1,2; 1,1 мА для одно-, двух-, трех- и четырехслойных КРС-лазеров соответственно.

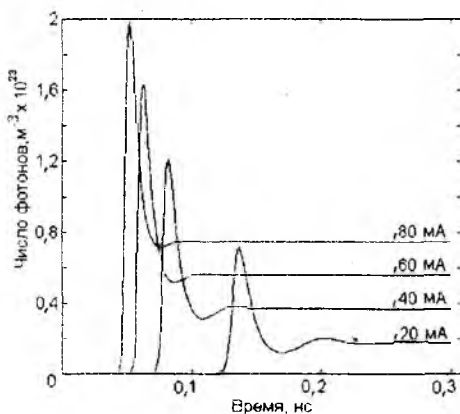


Рис. 2

Полученные алгоритмы включены в состав разрабатываемого пакета САПР моделирования полупроводниковых лазеров.

**Список литературы:** 1. *Физика полупроводниковых лазеров*: Пер. с яп. / Под ред. Х. Такумы. М.: Мир, 1989. 310 с. 2. McDonald D., O'Dowd R.F. Comparison of two- and free level rate equations in the modelling of quantum well lasers // *IEEE J. Quantum Electronics*. 1995. Vol. 31. P. 1927 — 1934. 3. Tessler N., Esenstein G. Modelling carrier dynamics and small-signal modulation response in quantum well lasers // *Optical and Quantum Electronics*. 1994. Vol. 26. P. 767 — 787. 4. *A time-domain model for high-speed quantum-well lasers including carrier transport effects* / L.V.T. Nguyen, A.J. Lowery, P.C.R. Gurney, D. Novak // *IEEE J. of sel. topics in quantum electronics*. 1995. Vol. 2. P. 494 — 502.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 30.07.97