УДК 621.315

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОКОЛЕБАНИЙ В БАЛАНСНОЙ СХЕМЕ ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СРЕДЕ С РЕЗОНАНСНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

С. О. ПАРАШКОВ, Е. В. ТИМОЩЕНКО, В. А. ЮРЕВИЧ
Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Известно, что структурные элементы (квантовые точки (КТ)) используемых в лазерных приборах полупроводниковых структур с квантоворазмерными эффектами характеризуются большими дипольными моментами, связанными с экситонными переходами. Этим обусловлены относительно сильный нелинейный материальный отклик подобных активных сред и их применение в излучающих элементах нанофотоники [1]. Последнее объясняется возможностью реализации автоколебательных режимов излучения в форме серии регулярных импульсов без использования внешних модулирующих компонентов, синхронизированных с током накачки и усложняющих схему лазерного прибора.

Предложена и качественно исследована расчётная модель компактного лазерного устройства, представляющая систему нелинейных дифференциальных уравнений. Оригинальность модели состоит в учете типичных для полупроводниковых структур с высокой концентрацией КТ эффектов резонансной фазовой нелинейности. В рамках обобщенной двухуровневой схемы взаимодействия, применяемой аналогично [2], в модифицированной модели рассмотрено влияние комплекса связанных с резонансным насыщением инверсии эффектов фазовой нелинейности: резонансная нелинейная рефракция; влияние ближних полей КТ; оптический эффект Штарка. Для ориентации и концентрации образующих среду дипольных КТ характерны конечные времена спонтанной релаксации τ_r и T.

Уравнения балансной модели, обычно называемые скоростными, для переменных мощности ($x(t) \sim |E(t)|^2$) и инверсии заселённости $y(t)$, определяющей усиление в ходе вынужденного излучения, формулируются в следующем виде:

$$\dot{x} = (Ay - 1)\, x/\tau_r \; ; \quad \dot{y} = \left[\sigma - (1 + Ax)\, y\right]/T \; ;$$
$$A = \left[B^2 + \left(B\Delta\omega - \kappa y + \beta\tau_r x/2T\right)^2\right]^{-1} ; \quad B = 1 + \beta\kappa\,(y - 1)\,. \qquad (1)$$

Здесь σ – параметр тока накачки; β, κ – коэффициенты нелинейности; $\Delta\omega$ – линейная часть отстройки спектрального резонанса усиления, испытывающего осциллирующий нелинейный дрейф в ходе вынужденного излучения.

Качественное изучение поведения решений (1) для $y(\tau)$ вблизи равновесного состояния с ненулевой мощностью y_S дает возможность оценить зону параметров системы (1), в которой это состояние устойчиво. Тогда на временно́й шкале кривые, которыми описываются решения для обеих переменных, выходя из начальных точек, после ряда осцилляций «затухают», приближаясь к стационарным значениям x_S, y_S. Выражения для равновесных состояний x_S, y_S следуют из сингулярных пределов системы (1):

$$\sigma = x_S + y_S; \quad \beta\tau_r x_S / 2T = B_S\Delta\omega - \kappa y - \sqrt{y_S - B_S^2}; \quad B_S = 1 + \beta\kappa\left(y_S - 1\right). \qquad (2)$$

Линеаризация системы (1) в окрестности точек равновесия (2) позволяет записать аналог модели (1) для относительно малых решений $\Delta x(t)$ и $\Delta y(t)$ в некоторой области фазового пространства (1) (плоскости (x, y)), включающей точки x_S, y_S. Для решения линеаризованного аналога (1) записывается характеристическое уравнение, выражение комплексных корней $\lambda_{1,2}$ которого

$$2\lambda_{1,2} = -(1 + F - I/\tau_r) \pm i\sqrt{4(I - F)/\tau_r - (1 + F - I/\tau_r)^2}$$

позволяет сформулировать условие неустойчивости x_S, y_S, т. е. $Re\ \lambda_{1,2} > 0$, в виде

$$I/\tau_r > 1 + F; \quad I = 2\beta\frac{x_S}{y_S}\sqrt{y_S - B_S^2}; \quad F = \frac{x_S}{y_S}\left[1 - \frac{2\kappa}{T}\left(\beta B_S + (1 + \beta\Delta\omega)\sqrt{y_S - B_S^2}\right)\right]. \quad (3)$$

Параметрическим расчетом (3) установлена область коэффициентов системы (1), при которых её решения неустойчивы. Инверсия $y(t)$ неизбежно насыщается, поэтому неустойчивым решениям $x(y)$ в фазовой плоскости соответствует аттрактор, представляющий предельный цикл. Решения $x(t), y(t)$ тогда принимают форму автоколебаний, описывая контрастную регулярную серию пикосекундных импульсов мощности, развивающуюся при постоянной накачке. На рис. 1 изображены примеры моделирования осцилляторных процессов, выполненного интегрированием системы (1) методом Рунге – Кутты.

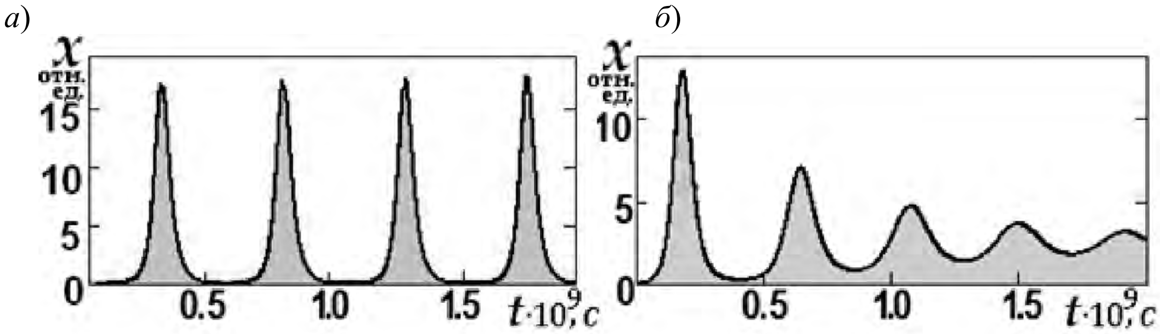

Рис. 1. Временнáя зависимость нормированной мощности излучения: $\beta = 0{,}1$ (*а*); 0 (*б*); $\kappa = 1{,}2$; $\sigma = 1{,}5$; $\Delta\omega = 1{,}5$; $\tau_r = 7\cdot10^{-11}$с; $T = 5\cdot10^{-9}$с

Характерные временные развертки нормированной мощности $x(t)$ подтвердили решающую роль оптического эффекта Штарка в стимуляции самоподдерживающихся пульсаций интенсивности в лазерах на квантовых точках.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs photon Reststrahlen band predicted by the balance equation method / D. V. Ushakov [et al.] // Opt. Express. – 2020. – Vol. 28, № 17. – P. 25371–25382.

2. **Юревич, В. А.** Динамика излучения в квантоворазмерных структурах при учете диполь-дипольного взаимодействия / В. А. Юревич, Е. В. Тимощенко, Ю. В. Юревич // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 1 (10). – С. 64–68.