

# Моделирование прямой модуляции квантово-каскадного лазера ТГц диапазона

А. А. Афоненко, Е. В. Кадола, В. С. Радчикова

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: [afonenko@bsu.by](mailto:afonenko@bsu.by)

Разработана динамическая модель квантовокаскадного лазера с учетом зависимости скоростей переходов между подзонами от напряжения на каскаде. Проведены расчеты модуляционных характеристик квантово-каскадного лазера с периодом из 2-х квантовых ям. Найдено, что амплитуда модуляции плотности фотонов в резонаторе монотонно уменьшается с ростом частоты модуляции. Полоса прямой модуляции уменьшается с ростом тока накачки.

**Ключевые слова:** квантово-каскадный лазер, ТГц диапазон, прямая модуляция

## Modeling of direct modulation of quantum-cascade laser of the THz range

A. A. Afonenko, E. V. Kadola, V. S. Radchikova

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: [afonenko@bsu.by](mailto:afonenko@bsu.by)

A dynamic model of a quantum cascade laser has been developed, taking into account the dependence of transition rates between subbands on the cascade voltage. Calculations of the modulation characteristics have been performed for a quantum cascade laser with a period of two quantum wells. It has been found that the modulation amplitude of photon density in the resonator decreases monotonically with increasing modulation frequency. The direct modulation bandwidth decreases with increasing pump current.

**Keywords:** quantum cascade laser, THz range, direct modulation

Полоса прямой модуляции полупроводникового лазера является важной характеристикой для практических применений. Обычно модуляционные характеристики инжекционных лазеров анализируются с использованием скоростных уравнений [1]. В отличие от межзонных полупроводниковых лазеров, в квантово-каскадных лазерах скорости переходов между подзонами существенно зависят от приложенного напряжения. Целью данной работы является разработка динамической модели квантовокаскадного лазера с учетом зависимости скоростей переходов от напряжения на каскаде.

Напряжённость электрического поля  $E$ , создаваемая поверхностной плотностью зарядов  $\sigma$  на внешних контактах (обкладках конденсатора)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (1)$$

Потенциал, создаваемый зарядами на обкладках конденсатора

$$U_c = mEd = \frac{m\sigma d}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (2)$$

Закон сохранения заряда (разность втекающей и вытекающей плотности тока при переносе зарядов) имеет вид

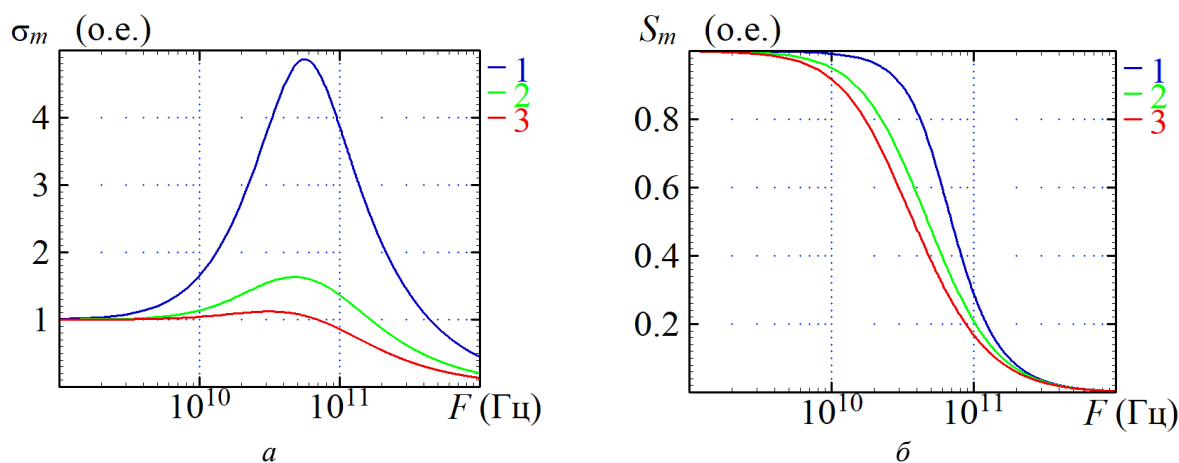
$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{I}{S} - j_{qc}. \quad (3)$$

где  $j_{qc}$  – плотность тока носителей заряда через каскад,  $I$  – полный ток электрической цепи,  $S$  – площадь контакта. Плотность тока носителей в каскад определяется разностью потоков электронов в противоположных направлениях на границе каскада с координатой  $z_1$

$$j_{qc} = eN_d \left( \sum_{z_i \leq z_1, z_f > z_1} A_{if} n_i - \sum_{z_i > z_1, z_f \leq z_1} A_{if} n_i \right). \quad (4)$$

где  $N_d$  – слоевое легирование периода,  $A_{if}$  – вероятности переходов.

Населенности подзон  $n_i$  в каскаде и плотность фотонов в резонаторе  $S$  находились из балансных уравнений с учетом зависимости скоростей переходов от напряжения на каскаде (2). В работе анализировалась структура [2] с периодом из двух квантовых ям. В переносе носителей задействованы три уровня энергии. Генерация осуществляется с основного уровня узкой квантовой ямы на второй уровень широкой квантовой ямы. Как видно на рисунке, амплитудно-частотные характеристики поверхностной плотности зарядов имеют резонансный вид, но амплитуда модуляции плотности фотонов в резонаторе монотонно уменьшается с ростом частоты модуляции. Полоса прямой модуляции квантово-каскадного лазера уменьшается с ростом тока накачки. На больших частотах амплитуда плотности фотонов уменьшается пропорционально квадрату частоты модуляции.



Зависимости от частоты модуляции при напряжениях на каскаде 52 мВ (1), 56 мВ (2) и 60 мВ (3):

$a$  – нормированные амплитуды плотности заряда на контактах;

$b$  – плотность фотонов в резонаторе

### Библиографические ссылки

1. Афоненко А. А., Манак И. С. Кинетическая теория полупроводниковых инжекционных лазеров. Мн.: Белгосуниверситет, 1998. 69 с.
2. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K / Bosco L. [et al.] // Applied Physics Letters. 2019. Vol. 115, №1. P. 010601.