

Экранирование заряженных примесей в квантово-каскадных гетероструктурах

Ан. А. Афоненко¹⁾, А. А. Афоненко¹⁾, А. А. Дубинов²⁾, Р. А. Хабибуллин³⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: afonenko@bsu.by

²⁾ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

³⁾ НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

Разработана модель нелокального экранирования для квантоворазмерных сверхрешеток. Проведены расчеты экранированного Кулоновского потенциала примесей для квантово-каскадного лазера с периодом из 2-х квантовых ям. Показано, что учет нелокального характера экранирования приводит к большим величинам потенциала и большей величине обратной длины экранирования по сравнению с приближением локального объемного экранирования.

Ключевые слова: полупроводниковая сверхрешетка, заряженная примесь, экранированный потенциал, длина экранирования

Screening of charged impurities in quantum cascade heterostructures

An. A. Afonenko¹⁾, A. A. Afonenko¹⁾, A. A. Dubinov²⁾, R. A. Khabibullin³⁾

¹⁾ Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: afonenko@bsu.by

²⁾ Institute of Physics of Microstructures of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia

³⁾ NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

A model of nonlocal screening for quantum-well superlattices has been developed. Calculations of the screened Coulomb potential of impurities for a quantum cascade laser with a period of two quantum wells have been performed. It is shown that accounting for the nonlocal nature of screening leads to larger potential values and a larger inverse screening length compared to the local volume screening approximation.

Keywords: semiconductor superlattice, charged impurity, screened potential, screening length

Скорости рассеяния на заряженных примесях является одним из основных механизмов переноса заряда в квантово-каскадных лазерах. Сила взаимодействия зарядов существенно определяется эффектами экранирования. Обычно в расчетах экранирование учитывается в объемном приближении [1]. Целью данной работы является анализ экранирования в квантоворазмерных сверхрешетках с учетом неоднородного распределения плотности зарядов.

Уравнение для экранированного потенциала $\varphi(\mathbf{r})$ заряда в точке $\mathbf{r}_0$ имеет вид

$$\nabla \varepsilon_0 \varepsilon \nabla \varphi(\mathbf{r}) - e \rho(\mathbf{r}) = e \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0). \quad (1)$$

Здесь $\varepsilon = \varepsilon(z)$ – диэлектрическая проницаемость. В невырожденном случае для полупроводника с объемными свойствами индуцированная плотность электронов имеет локальный характер и прямо пропорциональна величине потенциала $\varphi(\mathbf{r})$:

$$\rho(\mathbf{r}) = \frac{en(z)}{kT} \varphi(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где $n(z)$ – объемная концентрация носителей, T – температура, k – постоянная Больцмана. В квантоворазмерных структурах распределение заряда определяется квантовыми состояниями, заселенность которых зависит от среднего потенциала

$$\langle \phi_i \rangle = \int \phi(\mathbf{r}') |\psi_i(z')|^2 dz', \quad (3)$$

где $\psi_i(z)$ – волновая функция i -го состояния. При этом индуцированная плотность электронов оказывается нелокальной функцией экранированного потенциала:

$$\rho(\mathbf{r}) = \frac{e}{kT} \left(\sum_i n_i^{(2D)} |\psi_i(z)|^2 \langle \phi_i \rangle \right) = \frac{e}{kT} \left(\sum_i n_i^{(2D)} |\psi_i(z)|^2 \int |\psi_i(z')|^2 \phi(\mathbf{r}') dz' \right). \quad (4)$$

Здесь $n_i^{(2D)}$ – двумерная населенность соответствующей подзоны.

Решение уравнения (1) удобно находить в виде Фурье-разложения по гармоникам в плоскости слоя. Для объемного экранирования для основной гармоники экранированный потенциал имеет вид:

$$\phi^{(3D)}(z) = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0\epsilon q_{scr}S} \exp(-q_{scr}|z - z_0|), \quad (5)$$

где обратная длина экранирования

$$q_{scr} = \sqrt{\frac{e^2 n}{\epsilon_0 \epsilon kT}}, \quad (6)$$

S – площадь анализируемого слоя.

Для квантоворазмерной сверхрешетки решение находится численно. В работе анализировалась структура [2] с периодом из двух квантовых ям (рис. 1). Легирование выполнялось в центре широкой квантовой ямы.

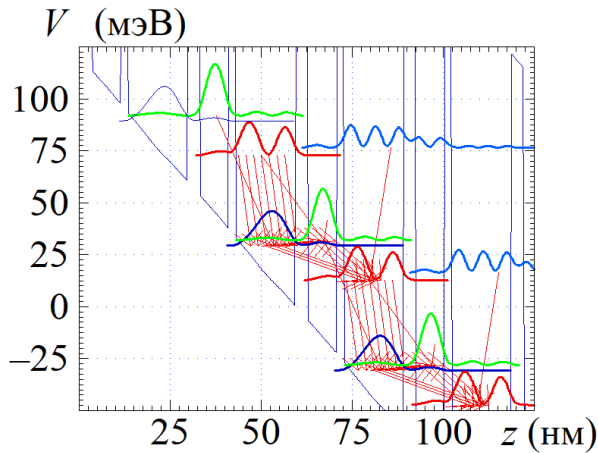


Рис. 1. Профиль зоны проводимости и волновые функции при напряжении на каскаде 60 мВ. Стрелками показан перенос заряда

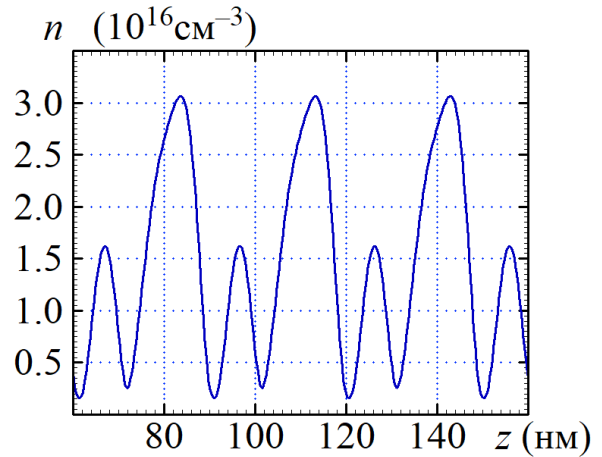


Рис. 2. Распределение плотности электронов в сверхрешетке

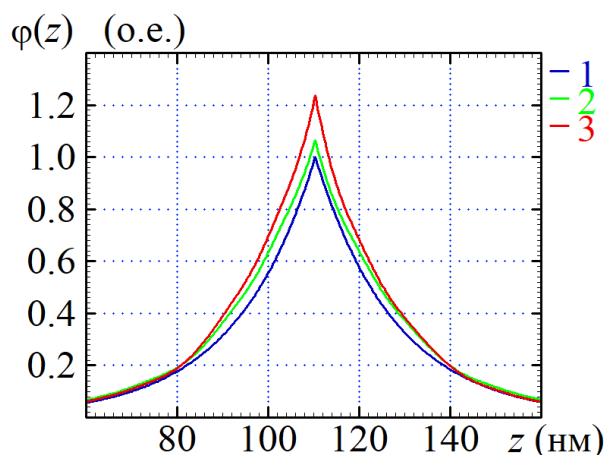


Рис. 3. Экранированный потенциал для объемного полупроводника:
1 – с равномерным распределением концентрации электронов;
2 – с неравномерным распределением концентрации электронов;
3 – для квантоворазмерной гетероструктуры с нелокальным экранированием

Уравнение (1) решалось с использованием разностной схемы. Шаг дискретизации равнялся половине постоянной решетки GaAs. Для локального экранирования нахождение потенциала с неравномерным распределением концентрации электронов (рис. 2) сводилось к задаче на собственные значения и собственные вектора матрицы 2×2 . Для нелокального экранирования решалось нелинейное уравнение, получаемое как определитель матрицы с размерностью, равной числу координатных точек разностной схемы на одном периоде.

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Усредненная по периоду обратная длина экранирования для неравномерного распределения электронной плотности оказалась практически равной обратной длине экранирования для объемного полупроводника с равномерным распределением электронной плотности (отличие менее 1 %). При этом максимальный потенциал оказался на 7 % больше, чем для равномерного распределения зарядов. С учетом квантоворазмерных эффектов и нелокального экранирования усредненная по периоду обратная длина экранирования получилась на 8 % больше, а максимальный потенциал – на 24 % больше, чем локального равномерного приближения. Вероятность перехода квадратично зависит экранированного потенциала, поэтому использование объемного приближения (5) для расчета скорости рассеяния может приводить к величинам, заниженным на десятки процентов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант №23РНФМ-064, Российского Научного Фонда, грант № 23-19-00436 и государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

Библиографические ссылки

1. Влияние селективного легирования на характеристики квантово-каскадных лазеров ТГц диапазона / Ан. А. Афоненко [и др.] // Труды XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 13–16 марта 2023 г.) в 2 т. Том 2. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2023. С. 530–531.
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.