

# Моделирование распределения электронов в структурах AlGaAs/GaAs ( $\delta$ -Si), выращенных на вицинальных поверхностях

© В.М. Осадчий

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 2 февраля 1999 г. Принята к печати 3 марта 1999 г.)

Проведены расчеты распределения потенциала и концентрации электронов в структурах AlGaAs/GaAs ( $\delta$ -Si), выращенных на вицинальных поверхностях. Показана возможность формирования латеральной сверхрешетки в этих структурах. Оценены оптимальные технологические параметры для получения сверхрешетки.

В последнее время исследуются низкоразмерные структуры с вицинальными границами раздела, позволяющие получать в них  $\delta$ -слоевое латерально-модулированное легирование и, таким образом, воздействовать на процессы переноса носителей заряда [1,2]. Представляется интересным исследовать влияние технологических параметров на распределение потенциала и концентрации двумерных электронов в таких структурах. С этой целью нами проведены модельные расчеты этих распределений в структуре AlGaAs/GaAs ( $\delta$ -Si) с вицинальной границей GaAs.  $\delta$ -легированный слой рассматривался как периодическая система заряженных нитей с расстоянием между ними  $d$ , линейной плотностью заряда  $N$  и расстоянием до потенциальной ямы (well) в GaAs (толщина спейсера)  $t$  (рис. 1). Строго говоря, для определения потенциала в такой структуре нужно решать самосогласованную систему уравнений, включающую уравнения Пуассона и Шредингера, что в двумерном случае является сложной задачей. Мы ограничились решением двумерного уравнения Пуассона в приближении Томаса–Ферми [3], так как известно, что такой подход дает для  $\delta$ -легированной квантовой ямы потенциал, очень близкий к полученным в самосогласованных расчетах [4]. Уравнение Пуассона решалось численно, учитывая электронейтральность системы. Чтобы избежать сингулярностей в потенциале от нитей, последние рассматривались с конечной толщиной порядка атомных размеров. Результаты расчетов мало изменялись при увеличении толщины нити в несколько раз.

Расчеты показали, как и следовало ожидать, что распределение потенциала и концентрации электронов в GaAs-яме вдоль гетерограницы носит периодический характер. Максимум концентрации имеет место при координате вдоль границы, соответствующей положению нити, минимум — посередине между двумя нитями. Глубина модуляции концентрации, т.е. разность между максимальной и минимальной величиной, имеет большие величины в структурах с предельно малой толщиной спейсера. При увеличении толщины спейсера глубина модуляции заметно уменьшается. Например, для структуры с периодом  $d = 16$  нм при толщине спейсера  $t = 10$  нм модуляции распределения практически нет, так как здесь электронный газ в GaAs-яме находится от

нитей на расстоянии, сравнимом с расстоянием между нитями. При увеличении периода системы нитей глубина модуляции растет.

Интересный характер имеет зависимость распределения концентрации электронов в GaAs-яме от плотности заряда на нити (рис. 2). При увеличении заряда глубина модуляции потенциала растет, что ведет сначала к росту модуляции концентрации. Однако при больших  $N$  происходит перекрытие двумерного электронного газа (ДЭГ) в GaAs-яме и он распадается на систему изолированных одномерных каналов — квантовых проволок. Такие системы могут быть интересны с той точки зрения, что поперечное движение в них квантовано, а проводимость вдоль этих каналов может быть высокой [5]. Концентрация  $N$ , при которой происходит переход к системе одномерных каналов, зависит от толщины спейсера. Так, для  $t = 2$  нм и  $d = 16$  нм перекрытие ДЭГ имеет место при  $N$  выше  $4 \cdot 10^6$  см<sup>-1</sup>, а для  $t = 3$  нм — при  $N$  выше  $6 \cdot 10^6$  см<sup>-1</sup>. Для  $t = 1$  нм перекрытие ДЭГ имеет место по меньшей мере с  $N = 5 \cdot 10^5$  см<sup>-1</sup>. Для большего периода системы нитей распад ДЭГ на систему квантовых проволок начинается при большей толщине спейсера при одной и той же плотности заряда на нити: для  $d = 32$  нм и  $t = 5$  нм это имеет место даже при  $N = 5 \cdot 10^5$  см<sup>-1</sup>. Очевидно, что проводимость в рассматриваемых структурах должна носить анизотропный характер, особенно при переходе к системе квантовых проволок.

На рис. 3 приведены зависимости концентрации электронного газа в GaAs-яме, усредненной по периоду  $d = 16$  нм, от линейной плотности заряда на нити. Эти зависимости носят немонотонный характер в отличие от зависимостей для обычных модулированно легирован-

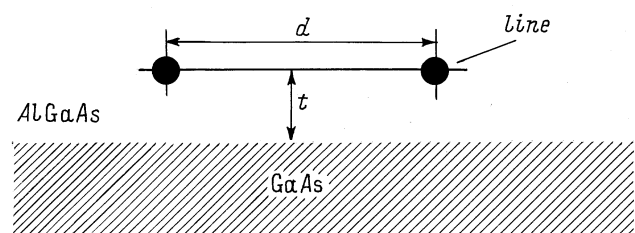
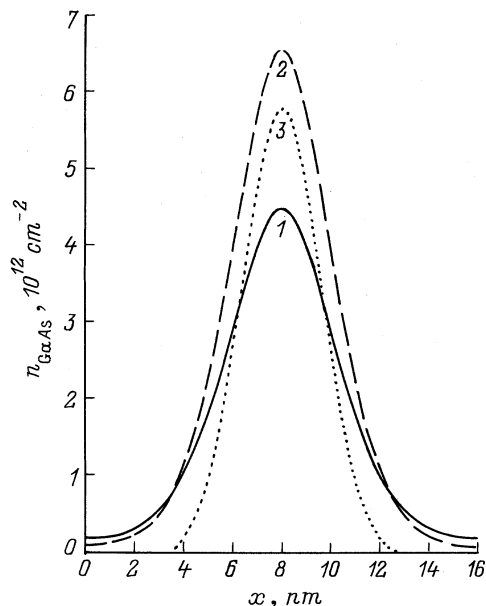
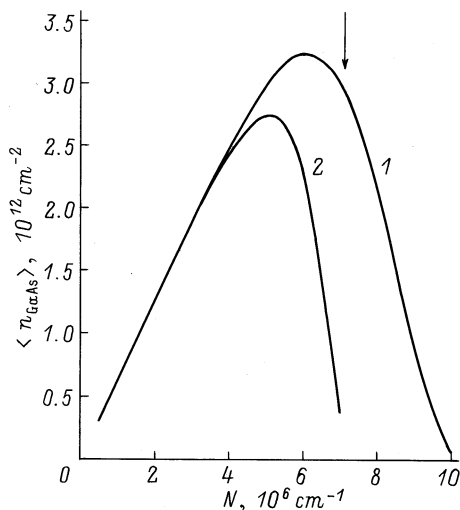


Рис. 1. Схематическое изображение моделируемой структуры.

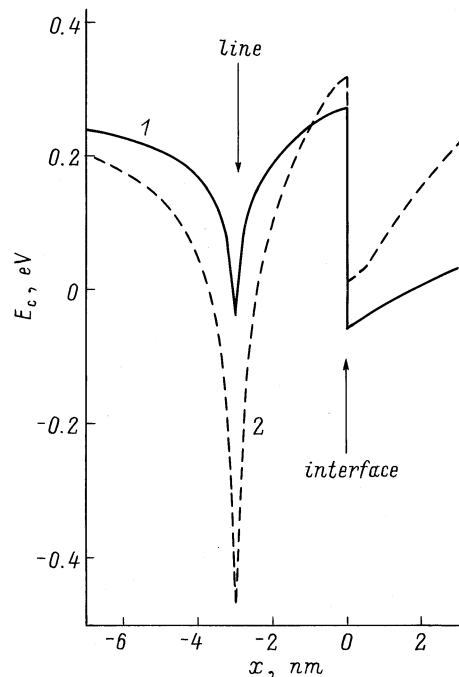
ных структур, что объясняется особенностями экранирования электронным газом потенциала заряженной нити. Как показали наши численные расчеты, экранирование электронами заряда нити слабее, чем заряда плоскости. При увеличении заряда на нити потенциальная яма вокруг нее углубляется (рис. 4) и все большая часть



**Рис. 2.** Распределение концентрации электронного газа в GaAs-яме для линейной плотности заряда на нити,  $N$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 1 —  $4 \cdot 10^6$ , 2 —  $6 \cdot 10^6$ , 3 —  $8 \cdot 10^6$ . Толщина спейсера  $t = 3$  нм.



**Рис. 3.** Зависимость усредненной концентрации электронов в GaAs-яме ( $\langle n_{\text{GaAs}} \rangle$ ) от заряда на нити ( $N$ ) для периода 16 нм и спейсера толщиной 3 нм (1) и 5 нм (2). Стрелка указывает для кривой 1 концентрацию  $N_1$ , выше которой газ в GaAs распадается на систему одномерных каналов.



**Рис. 4.** Профиль края зоны проводимости  $E_c$  перпендикулярно гетерогранице для структуры с периодом 16 нм, спейсером толщиной 3 нм, зарядом на нити  $4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$  (1) и  $10^7 \text{ см}^{-1}$  (2). Отсчет  $E_c$  производится от положения уровня Ферми.

электронов удерживается в потенциальной яме вокруг нити. Для периода нитей  $d = 16$  нм концентрация ДЭГ достигает достаточно больших величин — около  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Для спейсера  $t = 3$  нм уже вскоре после максимума происходит распад на систему одномерных каналов, в самом же максимуме мы имеем большую модуляцию концентрации (рис. 2, кривая 2). При увеличении толщины спейсера концентрация ДЭГ уменьшается (рис. 3, кривая 2).

Таким образом, выполнено моделирование распределения потенциала и концентрации электронов в структурах AlGaAs/GaAs ( $\delta$ -Si), выращенных на вицинальных поверхностях. Результаты вычислений указывают на возможность формирования латеральной сверхрешетки. Для периода решетки 16 нм оптимальными параметрами являются линейная плотность заряда нитей  $(5-6) \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ , толщина спейсера 3–5 нм, при этом концентрация двумерного электронного газа составляет около  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  с большой амплитудой модуляции. Для больших плотностей заряда нитей двумерный электронный газ распадается на систему одномерных каналов — квантовых проволок.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 96-02-19371a).

## Список литературы

- [1] В.И. Кадушкин, В.А. Кульбачинский, Е.В. Богданов, А.В. Сеничкин. ФТП, **28**, 1889 (1994).
- [2] В.И. Кадушкин, Е.Л. Шанина. ФТП, **30**, 1676 (1996).
- [3] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Квантовая механика. Нерелятивистская теория* (М., Наука, 1974) с. 302.
- [4] З.Д. Квон, А.Г. Погосов. ФТП, **25**, 138 (1991).
- [5] Н. Sakaki. Japan. J. Appl. Phys., **19**, L735 (1980).

Редактор Т.А. Полянская

## Electron distribution modeling in AlGaAs/GaAs ( $\delta$ -Si) structures, grown on vicinal surfaces

V.M. Osadchii

Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** Calculations of potential and electron concentration distributions in AlGaAs/GaAs ( $\delta$ -Si) structures, grown on vicinal surfaces, were carried out. The possibility of formation of lateral superlattice in these structures is shown. The optimum technological parameters for reception of a superlattice are appreciated.