

РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

А. В. Борздов

В последние годы особенно большое внимание в микроэлектронике уделяется низкоразмерным системам. В таких системах движение носителей заряда ограничено в некоторых направлениях потенциальными барьерами. Движение носителя заряда можно считать ограниченным, если он локализован в области, ширина которой сравнима с его длиной волны де Бройля в данных условиях. В направлении, в котором движение носителей заряда ограничено, происходит квантование их энергии. В данной работе рассматривается двумерный электронный газ, находящийся в одномерной квантовой яме гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Основные свойства двумерного газа носителей заряда достаточно хорошо изучены в кремниевых МОП-структурах. Хотя принципиальных различий при образовании квантовой ямы в МОП-структуре и гетероструктуре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ нет, расчет электронных состояний в последней имеет ряд особенностей [1; 2]. Так, от количества Al зависит величина разрыва зоны проводимости на границе гетероперехода, а также эффективная масса электрона и диэлектрическая проницаемость слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Если для МОП-структуры хорошо работает приближение бесконечного потенциального барьера на границе полупроводник-диэлектрик, то для гетероструктуры необходимо принимать во внимание конечность этого барьера, т. к. в этом случае наблюдается заметное присутствие электронов в слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Зависимости эффективной массы электрона, диэлектрической проницаемости и величины разрыва дна зоны проводимости от концентрации Al в слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ определялись в соответствии с формулами, приведенными в [3; 4].

В приближении эффективной массы движение электрона в таком газе можно описать волновой функцией

$$\Psi(z) = \psi_n(z) \exp(-i\vec{k} \cdot \vec{r}), \quad (1)$$

где \vec{k} и \vec{r} – волновой вектор и радиус-вектор в плоскости гетероперехода. Как видно из (1), огибающая волновой функции $\psi_n(z)$ определяет поведение функции $\Psi(z)$. Далее волновой функцией будем называть также и функцию $\psi_n(z)$. Для расчета электронных состояний в данной квантовой системе, т.е. для нахождения волновых функций и энергий

электронов, необходимо решать систему уравнений Шредингера и Пуассона, имеющую вид [1]

$$\begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \frac{1}{m_z(z)} \frac{d\psi_n(z)}{dz} + (V(z) - E_n) \psi_n(z) = 0 \\ \frac{d}{dz} \varepsilon_0 \varepsilon(z) \frac{d\varphi(z)}{dz} = e \sum_n N_n |\psi_n(z)|^2 - \rho_{depl} \end{cases}, \quad (2)$$

где

$$N_n = \frac{m_z k_b T}{\pi \hbar^2} \ln \left[1 + \exp \frac{E_f - E_n}{k_b T} \right], \quad (3)$$

$$V(z) = -e\varphi(z) + V_h(z) + V_{xc}(z) + V_{im}(z). \quad (4)$$

В формулах (2) – (4) m_z – эффективная масса электрона, k_b – постоянная Больцмана, e – абсолютная величина заряда электрона, N_n – заселенность n -й подзоны, T – абсолютная температура, ρ_{depl} – плотность заряда обедненной области, E_f – энергия Ферми, E_n – энергия n -й подзоны, φ – электростатический потенциал, V_h , V_{xc} , V_{im} – потенциалы гетероструктуры, обменно-корреляционный и отображения соответственно [1; 2]. Плотность зарядов обедненной области ρ_{depl} определяется статическими зарядами легирующих примесей. В наших расчетах предполагалось однородное легирование областей GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$.

В качестве граничного условия для волновой функции бралось ее равенство нулю в глубине слоев GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$. Электростатический потенциал полагался равным нулю на границе гетероперехода, а в глубине слоев GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$ полагалась равной нулю его первая производная. Это условие означает равенство нулю электрического поля вне областей пространственного заряда для обоих полупроводниковых слоев.

Следует отметить, что если доля алюминия составляет значение, меньшее 0.35, то высота потенциального барьера для электронов невелика и квантовые эффекты в такой потенциальной яме выражены слабо. Использование доли алюминия более 0.7 нецелесообразно с технологической точки зрения, т.к. изготовление такой гетероструктуры является достаточно сложным. Кроме того, при увеличении доли алюминия ухудшается качество границы гетероперехода, что отрицательно сказывается на рабочих характеристиках приборов.

Система уравнений (2) – (4) в общем случае аналитически не решается. Для ее решения применяется численный самосогласованный рас-

чет. В настоящей работе была разработана процедура самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона в гетероструктуре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, с помощью которой были рассчитаны электронные состояния в квантовой яме такой гетероструктуры для некоторых значений x , лежащих в диапазоне $0.35 \div 0.7$. Эта процедура также позволила исследовать влияние доли алюминия в слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на распределение концентрации электронного газа вблизи границы гетероперехода.

Расчеты были проведены для температуры $T = 300$ К, концентрации акцепторов в слое GaAs и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $N_A = 1 \cdot 10^{21}$ и $N_A = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ соответственно, концентрации доноров в слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $N_D = 5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, поверхностной концентрации электронов двумерного газа $N_s = 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ и толщины спейсера $d = 10$ нм.

На рис.1 приведены две кривые, соответствующие распределению концентрации электронов двумерного газа при $x = 0.35$ и 0.7 . За начало координаты $z = 0$ взята граница гетероперехода. Область $z > 0$ соответствует GaAs, а область $z < 0$ – $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Рис. 1., отчасти, поясняет, почему электронный газ называется двумерным, а точнее квазидвумерным. Распределение концентрации электронов в направлении, перпендикулярном плоскости гетероперехода, т. е. в направлении оси z , определяется первым слагаемым в правой части уравнения Пуассона системы (2), которое включает в себя волновые функции электронов, а также заселенности соответствующих энергетических уровней. Волновые функции электронов, соответствующие нижайшим подзонам, значительно отличаются от нуля только в ограниченной области вблизи гетероперехода. А, так как наиболее заселенными являются только самые нижайшие подзоны, то электронный газ сосредоточен в достаточно узкой области вблизи границы гетероперехода.

Как видно из рисунка, распределение концентрации электронов не очень сильно различается для двух рассчитанных случаев. Нами было показано, что доля алюминия x оказывает тем меньшее влияние на по-

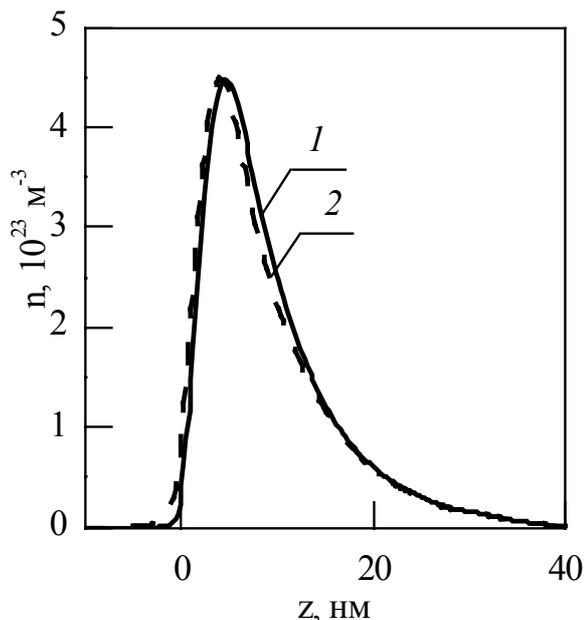


Рис. 1. Распределение концентрации электронов n в квантовой яме для доли алюминия в слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$:
1 – 0.35, 2 – 0.7

ложение энергетического уровня в квантовой яме и его заселенность, чем ниже расположен этот уровень в яме. Как было отмечено выше, наиболее заселенными, согласно формуле (3), являются самые нижние уровни, которые в основном и определяют распределение концентрации электронов в яме. А так как эти уровни и их заселенности очень слабо зависят от доли алюминия x , то и концентрация электронов также оказывается практически независимой от этого параметра.

Литература

1. *Stern F., Das Sarma S.* Electron energy levels in GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs heterojunctions // Phys. Rev. 1984. Vol. 30B, № 2. P. 840–847.
2. *Yokoyama K., Hess K.* Monte Carlo study of electronic transport in Al_{1-x}Ga_xAs/GaAs single-well heterostructures // Phys. Rev. 1986. Vol. 33B, № 8. P. 5595–5606.
3. *Ping E. X., Jiang H. X.* Resonant tunneling of double-barrier quantum wells affected by interface roughness // Phys. Rev. 1989. Vol. 40B, № 17. P. 11792–11798.
4. *Fu Y., Chen Q., Willander M., Brugger H., Meiners U.* Influence of impurity and phonon scattering effects in resonant tunneling structures // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74, № 3. P. 1874–1878.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЕЙ

А. А. Громько

Введение

Корпоративная сеть – это сеть, служащая для централизованного управления объединением предприятий – корпорацией. В ее состав могут входить магистральные сети от городского (MAN) до мирового (WAN) масштаба, предназначенные для связи отделений и офисов корпорации. Обязательными компонентами корпоративной сети являются локальные сети (LAN), связанные между собой магистральными.

В последнее время у разработчиков корпоративных сетей и сетевого оборудования самым важной и самой сложной является проблема объединения в одно целое сетей передачи речи и данных. Процесс интеграции телефонных сетей и сетей передачи данных уже начался, однако их полное объединение – все еще далекая цель для большинства организаций. Причина тому – неизбежный кардинальный пересмотр сетевых архитектур, а значит и взаимоотношений и с поставщиками телекоммуникационных услуг и с клиентами и партнерами. На все это потребуется время [1]. Сегодня интеграция осуществляется на отдельных сетевых участках, в первую очередь, где выгода перехода очевидна.