

Определение профиля распределения концентрации носителей заряда в слабосвязанных сверхрешетках GaAs/AlGaAs

© П.Н. Брунков[¶], С.О. Усов*, Ю.Г. Мусихин, А.Е. Жуков,
Г.Э. Цырлин[†], В.М. Устинов, С.Г. Конников, Г.К. Расулова[‡]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

[†] Институт аналитического приборостроения Российской академии наук,
190103 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

(Получена 17 сентября 2003 г. Принята к печати 18 сентября 2003 г.)

С помощью метода электрохимического вольт-фарадного профилирования проведены исследования влияния уровня легирования на вольт-амперные характеристики полупроводниковых гетероструктур со сверхрешетками GaAs/AlGaAs. Показано, что высокая концентрация свободных электронов в сверхрешетке GaAs/AlGaAs экранирует внешнее электрическое поле и препятствует образованию домена с высоким электрическим полем, ответственного за процесс резонансного туннелирования в слабосвязанных решетках.

В настоящее время широко исследуется транспорт носителей заряда в полупроводниковых сверхрешетках с целью создания высокочастотных (до частот порядка нескольких ГГц) генераторов на основе эффекта отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) [1–4]. В данной работе представлены результаты исследований структур на основе полупроводниковых слабосвязанных сверхрешеток GaAs/AlGaAs с широкими ямами и барьерами, в которых ширина минизоны уровней размерного квантования из-за слабого перекрытия электронных волновых функций между соседними квантовыми ямами не превышает 1 мэВ. Как следует из теоретических расчетов [5,6], в таких структурах благодаря формированию домена с высоким электрическим полем реализуется туннелирование из основного состояния квантовой ямы (КЯ) в возбужденные состояния соседней КЯ. В структурах с широкими ямами имеется несколько уровней размерного квантования, ширина минизоны которых увеличивается с ростом энергии уровня. Время туннелирования определяет скорость движения домена и, следовательно, частоту генерации, которая увеличивается с ростом номера подзоны КЯ, в которую идет туннелирование. В зависимости от величины постоянного напряжения, приложенного к структуре, различные уровни минизон участвуют в процессе резонансного туннелирования, что позволяет управлять частотой генерации [3,4].

В работах [5,6] было показано, что условие формирования устойчивого домена зависит от уровня легирования сверхрешетки. В связи с этим появилась необходимость в разработке метода для контроля уровня легирования сверхрешетки. Сильно легированные контактные слои (порядка $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) исследуемых структур делают невозможным применение традиционного метода контроля путем вольт-фарадных измере-

ний профиля концентрации с использованием барьера Шоттки, где максимальная толщина исследуемых слоев ограничена шириной области пространственного заряда при напряжении пробоя исследуемого образца. Для преодоления этого ограничения нами был выбран метод электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV) [7–9], который заключается в последовательном чередовании процессов электролитического травления материала и вольт-фарадных измерений на барьере Шоттки электролит–полупроводник. Для получения высокого пространственного разрешения (порядка нескольких нм) была проведена оптимизация методики электрохимического травления.

В данной работе были проведены исследования двух типов образцов F237 и 4-995 на основе соединений GaAs/AlGaAs. Исследуемые структуры были выращены на разных установках методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке n^+ -GaAs и представляют собой сверхрешетки, состоящие из 30 периодов слабосвязанных квантовых ям (30 нм) GaAs, разделенных барьерами $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной 10 нм. Область сверхрешетки была однородно легирована кремнием на уровне $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и ограничена с двух сторон барьерами (5 нм) $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Сверху и снизу сверхрешетки были выращены сильно легированные контактные слои n^+ -GaAs (уровень легирования $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщиной 0.5 и 1 мкм соответственно).

Для проведения измерений по методу ECV использовалась установка фирмы „Polaron Equipment Limited“ PN4200. Установка обеспечивает одновременное измерение емкости C и производной емкости по напряжению dC/dV . В качестве электролита использовался 10% раствор тайрона (tigon) в деионизованной воде. Электролит используется для двух целей: в качестве травителя и как электрический контакт при измерении вольт-амперных и вольт-фарадных (C - V) характеристик $C(V)$.

[¶] E-mail: brunkov@mail.ioffe.ru

При контакте эпитаксиального слоя n -GaAs с электролитом происходит перераспределение зарядов в системе. В данной системе работа выхода в полупроводниковом материале меньше, чем в электролите, поэтому электроны из полупроводника будут переходить в электролит. В используемом электролите концентрация носителей заряда выше, чем 10^{22} см^{-3} . Поэтому проникновение поля в электролит незначительно по глубине, и граница раздела электролит–полупроводник ведет себя как барьер Шоттки.

В процессе электрохимического травления происходит реакция разложения полупроводникового материала. Результатом реакции разложения является возрастающее перераспределение заряда. Равновесие достигается за счет уменьшения свободной энергии в результате разложения и уравнивается ростом электростатической энергии, связанной с перераспределением заряда (двойной электронный слой Гельмгольца) [7]. В равновесии анодный ток травления уравнивается переносом заряда от электролита к полупроводнику. Глубина травления определяется по закону Фарадея [7]:

$$X_e = \frac{M}{zFDS} \int_0^t I_e dt, \quad (1)$$

где M — молекулярный вес, D — плотность полупроводника, F — постоянная Фарадея, z — число носителей заряда, переносимых одной молекулой растворенного материала, I_e — ток травления, t — время травления.

Общая глубина, на которой определяется концентрация свободных носителей заряда, определяется следующим выражением:

$$X = X_e + X_d, \quad (2)$$

где X_d — толщина области пространственного заряда на барьере Шоттки электролит–полупроводник:

$$X_d = \frac{S\varepsilon_0\varepsilon_r}{C(V)}, \quad (3)$$

где C — емкость, V — напряжение, S — площадь контакта, ε_r — диэлектрическая проницаемость полупроводника и ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Используя приближение обедненного слоя, из C - V -характеристики можно вычислить профиль распределения концентрации свободных носителей по толщине структуры [7]:

$$N(X) = \frac{2}{q\varepsilon_r\varepsilon_0S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где q — заряд электрона.

Чередуя процессы измерения $C(V)$ для определения концентрации и травления с одновременным измерением тока травления I_e , можно определить профиль

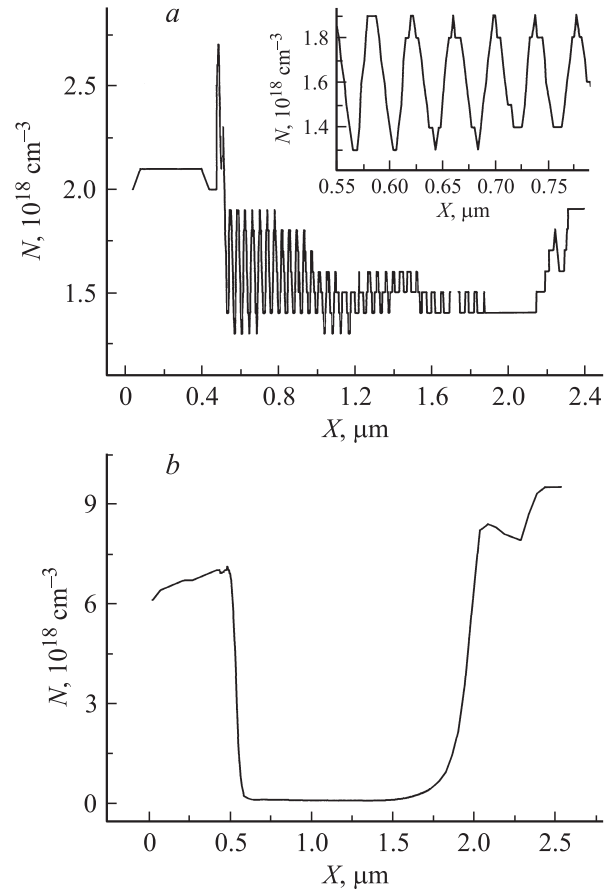


Рис. 1. Профили распределения концентрации носителей заряда в образцах F237 (a) и 4-995 (b). На вставке к рис. 1, a представлен профиль распределения концентрации носителей заряда в образце F237 в диапазоне от 0.55 до 0.80 мкм.

распределения концентрации свободных носителей $N(X)$ в исследуемом образце на достаточно большую глубину, которая ограничивается неоднородностью травления по площади контакта полупроводник–электролит.

На рис. 1, a представлен ECV-профиль распределения концентрации носителей заряда $N(X)$, полученный на структуре F237 с шагом травления $X_e = 2 \text{ нм}$. Скорость травления полупроводниковых материалов n -типа проводимости определяется интенсивностью подсветки в области основного поглощения и напряжением обратного смещения [7]. Было установлено, что оптимальная планарность дна кратера травления получается при плотности тока травления $I_e = 1 \text{ мА/см}^2$ с соответствующей скоростью травления 0.5 нм/с .

Измерения по методу ECV показали, что верхний контактный слой n^+ -GaAs в структуре F237 имеет толщину около 0.4 мкм и легирован Si на уровне $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1, a). В области сверхрешетки ECV-профиль $N(X)$ имеет 30 пиков, что обусловлено аккумуляцией носителей заряда в квантовых ямах GaAs [10]. Среднее расстояние между пиками равно 40 нм (см. вставку на рис. 1, a), что совпадает с периодом сверхрешетки GaAs/AlGaAs.



Рис. 2. ПЭМ изображение поперечного сечения структуры F237, полученное в режиме темного поля в рефлексе ($g = 200$).

Полученные результаты хорошо согласуются с данными просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), представленными на рис. 2, где отчетливо видна сверхрешетка GaAs(12 нм) / AlGaAs(27 нм) с периодом 39 нм.

Толщина слоя сверхрешетки, определенная из ECV-профиля $N(X)$, составляет 1.4 мкм. Следует также отметить, что пики в зависимости $N(X)$ хорошо разрешаются до глубины 1.85 мкм (рис. 1, *a*). С увеличением глубины травления наблюдается уменьшение амплитуды модуляции концентрации $N(X)$, что связано с ростом неоднородности травления дна кратера по глубине [8,9].

Анализ ECV-профиля $N(X)$ структуры F237 на основе численного решения самосогласованных уравнений Шредингера и Пуассона [10] показал, что уровень легирования широкозонных слоев $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ в сверхрешетке находится на уровне 10^{18} см^{-3} . Это выше уровня, заложенного в технологических условиях роста, что может быть связано с наличием неконтролируемой примеси в источнике алюминия в установке молекулярно-пучковой эпитаксии.

Из ECV-профиля $N(X)$ структуры 4-995 можно заключить, что концентрация свободных носителей заряда в слое сверхрешетки находится на уровне $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и не наблюдается модуляции, связанной с перераспределением носителей заряда между барьерами и квантовыми ямами (рис. 1, *b*), тогда как просвечивающая электронная микроскопия дает параметры, аналогичные структуре F237. Модельные расчеты профиля концентрации носителей заряда показывают, что такая ситуация имеет место в случае, если легирование барьеров $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ в сверхрешетке находится на уровне не

более $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Отсутствие модуляции концентрации свободных носителей в слое сверхрешетки связано с тем, что ее уровень легирования значительно ниже уровня легирования контактных слоев n^+ -GaAs (рис. 1, *b*). Поэтому при измерении $C(V)$ незначительное проникновение области пространственного заряда в боковые стенки кратера травления с высоким уровнем легирования дает больший вклад в емкость, чем слой сверхрешетки.

На рис. 3, *a* представлена вольт-амперная характеристика структуры 4-995, измеренная при температуре $T = 4.2 \text{ К}$. На данной характеристике отчетливо видны участки, связанные с формированием домена с высоким электрическим полем, где реализуется туннелирование из основного состояния КЯ (E_0) в возбужденные состояния соседней КЯ (E_1, E_2, E_3 и т.д.) [1]. Характеристика $I(V)$ структуры 4-995 имеет большое количество участков с ОДС. На рис. 4 приведен пример осцилляций тока с частотой около 3.6 МГц в структуре 4-995 при температуре $T = 4.2 \text{ К}$ и напряжении смещения 4.42 В. В отличие от структуры 4-995, вольт-амперная харак-

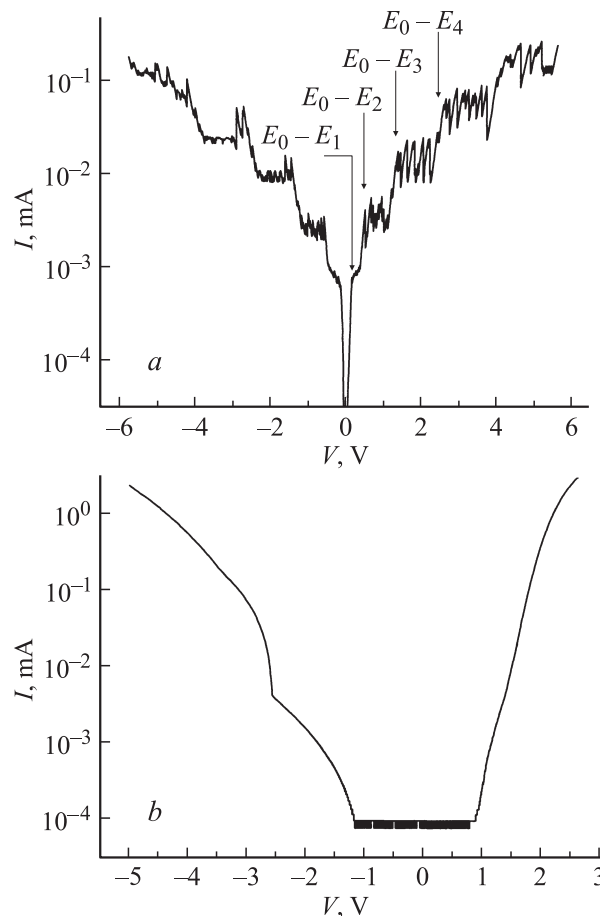


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структур 4-995 (*a*) и F237 (*b*), измеренные при температуре $T = 4.2 \text{ К}$. На рис. 3, *a* стрелками показаны напряжения формирования домена с высоким электрическим полем, связанного с туннелированием из основного состояния квантовой ямы (E_0) в возбужденные состояния соседней квантовой ямы (E_1, E_2, E_3 и т.д.).

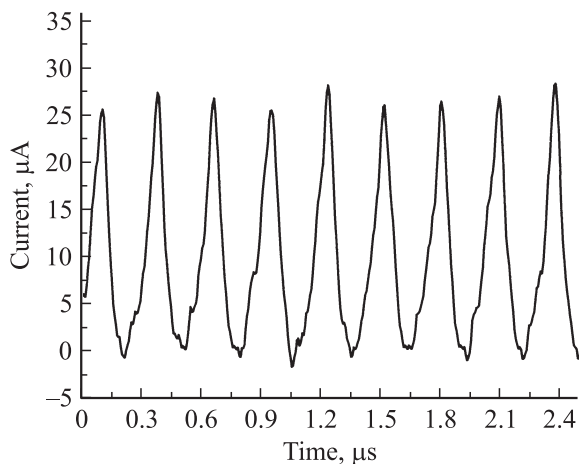


Рис. 4. Осцилляции тока с частотой 3.6 МГц в структуре 4-995 при температуре $T = 4.2$ К и напряжении смещения 4.42 В.

теристика структуры F237 не имеет ярко выраженных участков, связанных с формированием домена с высоким электрическим полем (рис. 3, *b*). Это может быть связано с тем, что высокая концентрация свободных электронов в КЯ структуры F237 экранирует электрическое поле внешнего напряжения смещения и препятствует образованию домена с высоким электрическим полем.

Таким образом, в работе представлены результаты исследований влияния уровня легирования на вольт-амперные характеристики полупроводниковых гетероструктур со сверхрешетками GaAs/AlGaAs с помощью метода электрохимического вольт-фарадного профилирования. Показано, что высокая концентрация свободных электронов в сверхрешетке GaAs/AlGaAs препятствует образованию домена с высоким электрическим полем, ответственного за процесс резонансного туннелирования в слабосвязанных сверхрешетках. Следует отметить, что метод электрохимического профилирования обладает достаточно высоким пространственным разрешением (до 10 нм), позволяющим получать детальную информацию о распределении носителей заряда в полупроводниковых гетероструктурах с квантово-размерными слоями, что особенно важно при разработке таких приборов, как светодиоды, лазеры и фотоприемники.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-02-17957).

Список литературы

- [1] H.T. Grahn, H. Schneider, K. von Klitzing. Phys. Rev. B, **41**, 2890 (1990).
- [2] J. Kastrup, R. Klann, H.T. Grahn, K. Ploog, L.L. Bonilla, J. Galan, M. Kindelan, M. Moscoso, R. Merlin. Phys. Rev. B, **52**, 13 761 (1995).
- [3] J. Kastrup, R. Hey, K.H. Ploog, H.T. Grahn, L.L. Bonilla, M. Kindelan, M. Moscoso, A. Wacker, J. Galan. Phys. Rev. B, **55**, 2476 (1997).

- [4] X.R. Wang, J.N. Wang, B.Q. Sun, D.S. Jiang. Phys. Rev. B, **61**, 7261 (2000).
- [5] L.L. Bonilla, J. Galan, J.A. Cuesta, F.C. Martinez, J.M. Molera. Phys. Rev. B, **50**, 8644 (1994).
- [6] A. Wacker, M. Moscoso, M. Kindelan, L.L. Bonilla. Phys. Rev. B, **55**, 2466 (1997).
- [7] P. Blood. Semicond. Sci. Technol., **1**, 7 (1986).
- [8] И.В. Ирин, А.В. Мурель. ПТЭ, № 6, 151 (1993).
- [9] В.И. Шашкин, Р.И. Каретникова, А.В. Мурель, И.М. Нефедов, И.А. Шерешевский. ФТП, **31**, 926 (1997).
- [10] P.N. Brunkov, T. Benyattou, G. Guillot. J. Appl. Phys., **80**, 864 (1996).

Редактор Т.А. Полянская

Investigation of the charge carrier distribution in weakly coupled GaAs / AlGaAs superlattices

P.N. Brunkov, S.O. Usov*, Yu.G. Musikhin, A.E. Zhukov, G.E. Cirlin[†], V.M. Ustinov, S.G. Konnikov, G.K. Rasulova[‡]

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

[†] Institute for Analytical Instrumentation,
Russian Academy of Sciences,
190103 St. Petersburg, Russia

[‡] Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract The influence of a doping level on the current-voltage characteristics of semiconductor heterostructures with GaAs/AlGaAs superlattices was carried out by the method of electrochemical capacitance-voltage profiling. It has been shown, that high concentration of free electrons in GaAs/AlGaAs superlattice screens an external electric field and interferes with formation of the high electric field domain responsible for resonant tunnelling processes in weakly coupled superlattices.