

06

## Исследование $p^-$ -3C-SiC/ $n^+$ -6H-SiC гетероструктур с модулированным легированием

© А.А. Лебедев, А.М. Стрельчук, Н.С. Савкина,  
Е.В. Богданова, А.С. Трегубова, А.Н. Кузнецов, Л.М. Сорокин

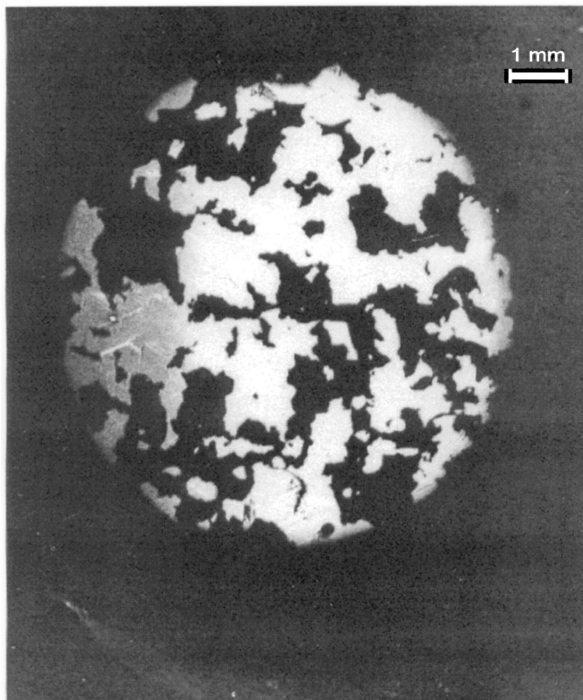
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 17 июля 2002 г.

Методом сублимационной эпитаксии в вакууме реализована  $p^-$ -3C-SiC/ $n^+$ -6H-SiC гетероструктура с модулированным легированием. Вольтамперные характеристики, а также особенности спектров электролюминесценции свидетельствуют о проявлении размерного квантования в треугольной квантовой яме на гетерогранице структуры. Настоящее исследование показывает, что разработанная технология может быть использована для создания квантово-размерных структур на основе карбида кремния.

**Введение.** Благодаря большому числу политипов карбид кремния (SiC) является весьма перспективным материалом для создания различного типа гетероструктур. В последние годы было опубликовано несколько работ, посвященных получению гетероструктур 6H-SiC/3C-SiC и 4H-SiC/3C-SiC различными технологическими методами [1–4]. В работе [1] были впервые исследованы электрические характеристики  $pn$ -гетероструктур  $p$ -3C-SiC/ $n$ -6H-SiC, и на основе полученных данных построена энергетическая диаграмма, которая оказалась близка к теоретически ожидаемой [5]. Из этой диаграммы, в частности, следовала принципиальная возможность получения двумерного электронного газа (2DEG) на гетерогранице этой пары полупроводников.

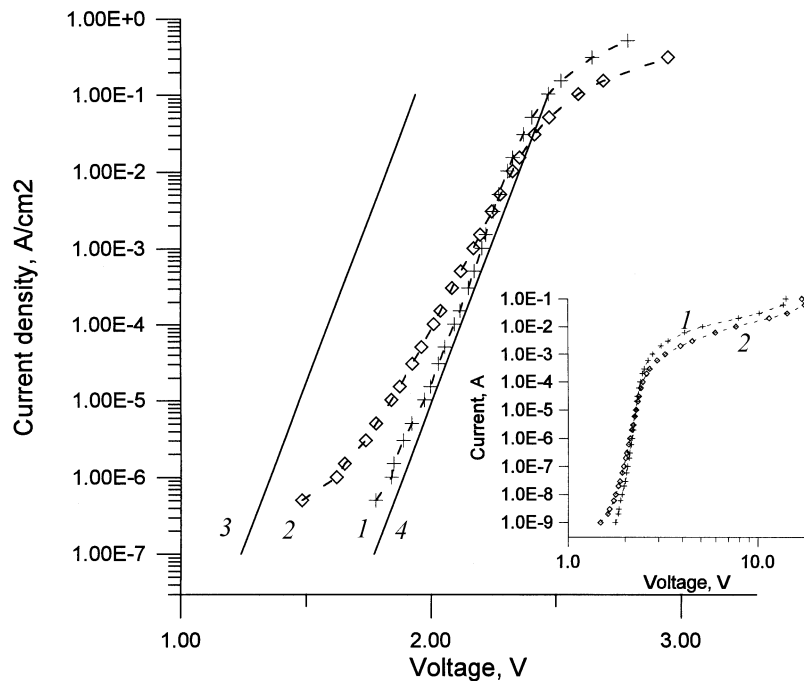
Однако для реализации 2DEG необходимо использовать структуры с „модулированным легированием“ [6], так как необходимо, чтобы широкозонный полупроводник  $n$ -типа проводимости имел бы высокий уровень легирования, а узкозонный — проводимость, близкую к собственной. Тогда дно образовавшейся квантовой ямы оказывается ниже уровня Ферми, что приводит к переходу электронов из широкозонного полупроводника в квантовую яму с образованием 2DEG.



**Рис. 1.** Рентгеновая топограмма исследованной 3C-SiC/6H-SiC структуры; отражение 101.14,  $\text{CuK}_\alpha$  излучение.

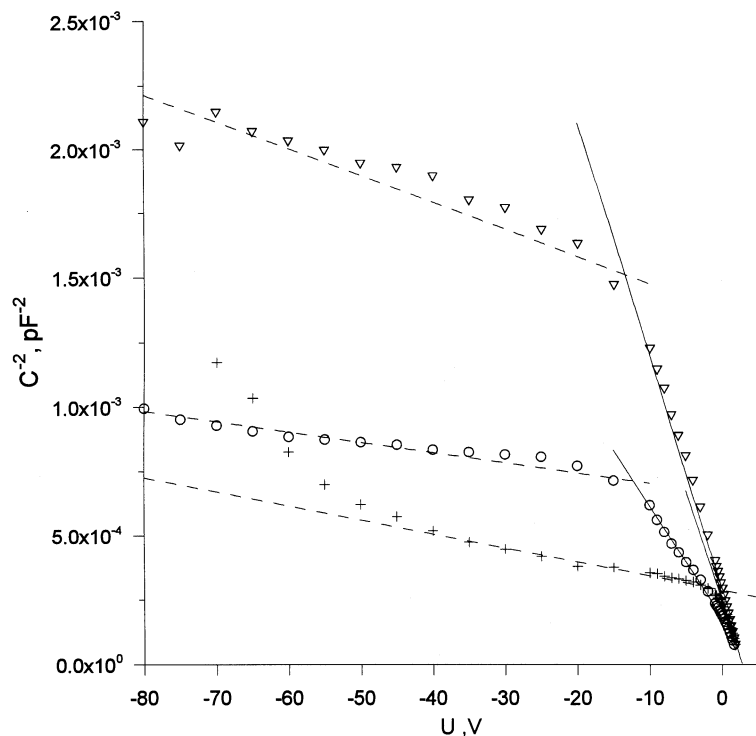
Целью данной работы было получение гетероструктур  $p^-$ -3C-SiC/ $n^+$ -6H-SiC и исследование их электрических свойств.

**Образцы.** Гетерополитипный рост проводился методом сублимационной эпитаксии в вакууме (SEV) [7] на подложке 6H-SiC с ориентацией (0001)Si (рис. 1). Процесс проводился в избытке паров Si в ростовой ячейке, что способствует формированию эпитаксиального слоя 3C-SiC на основе гексагональной подложки [8]. Структурное совершенство 3C слоев оценивалось рентгеновской топографией с использованием метода обратного отражения и  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения. Как видно из топограммы, представленной на рис. 1, эпитаксиальный слой



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики двух структур N1 (1) и N2 (2) при комнатной температуре; 3 и 4 — рассчитанные  $J = J_0 \exp[qU/(nkT)]$  характеристики, подчиняющиеся модели [9] ( $n = 2$ ), для 3C-SiC гомо  $pn$ -структуры ( $J_0 = 2.3 \cdot 10^{-18} \text{ A/cm}^2$ ) [10] и для 6H-SiC гомо  $pn$ -структуры ( $J_0 = 6 \cdot 10^{-23} \text{ A/cm}^2$ ) [11], соответственно. На вставке ВАХ структур N1 (1) и N2 (2) в области больших токов.

состоял из нескольких двойников площадью  $> 5 \text{ mm}^2$  каждый. Для уменьшения омического сопротивления при контакте с областью  $p$ -типа проводимости на поверхности  $p$ -3C-SiC был выращен слой  $p^+$ -3C-SiC. Омические контакты были получены магнетронным нанесением пленок Ni ( $n$ -тип) и Al + Ti ( $p$ -тип) с последующим вжиганием в вакууме при температуре 900 и 1500°C соответственно. Диодные структуры ( $\varnothing \sim 500 \mu\text{m}$ ) были сформированы ионно-плазменным травлением в  $\text{SF}_6$ .

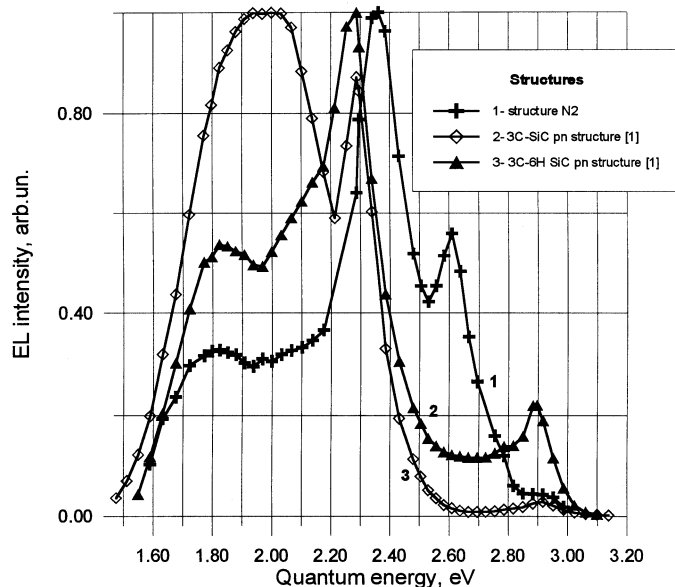


**Рис. 3.** Вольт-фарадные характеристики полученных гетеродиодов в различных областях выращенной структуры. Кружки соответствуют характеристикам структуры N 2.

**Результаты измерений.** Вольт-амперные ( $I-V$ ) характеристики исследовавшихся структур представлены на рис. 2. Отметим, что в области малых токов зависимость тока от напряжения близка к экспоненциальной  $J = J_0 \exp[qU/(nkT)]$  с коэффициентом идеальности  $n > 2$ . В лучших структурах (N1)  $n$  приближается к 2 и, как и ранее [1], вольт-амперная характеристика таких структур близка вольт-амперной характеристике  $6H-SiC$  гомо  $pn$ -структур. Вольт-фарадные характеристики ( $C-V$ ) исследовавшихся структур представлены на рис. 3.  $C-V$  характеристики состояли из двух участков, каждый

из которых был линейен в координатах  $1/C^2 - V$ . Это означало, что исследовавшиеся  $pn$ -структуры были „резкими“. Как видно из рисунка, наблюдается разброс значений  $Na-Nd$  на обоих участках зависимости  $1/C^2 - V$  для различных диодов. Нижний участок исследовавшейся  $C-V$  характеристики соответствовал слаболегированному слою  $p-3C-SiC$  ( $Na-Nd \sim 4-5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ). Полученное из наклона характеристики значение  $Na-Nd$  было близко к ранее определенному с помощью ртутного зонда на поверхности слоя до роста  $p^+-3C-SiC$ . Толщина слаболегированного слоя составляла около  $0.7 \mu\text{m}$ . Верхняя часть  $C-V$  характеристики соответствовала сильнолегированному под-контактному слою  $p^+-3C-SiC$  ( $Na-Nd \sim (0.4-1) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ). Контактная разность напряжений ( $U_d$ ), определенная экстраполяцией зависимости  $1/C^2 \Rightarrow 0$ , была равна  $\sim 2.43 \text{ V}$ , что близко к значениям, полученным в работе [1].

При пропускании через структуры прямого тока наблюдалась неоднородная (излучение разного цвета исходило из разных областей диода) электролюминесценция (ЭЛ) по периферии мезоструктур. Кроме того, вклад в свечение давало излучение из-под контакта, отраженное и рассеянное задней поверхностью кристалла. В спектрах ЭЛ исследовавшихся структур присутствуют три пика — в красной ( $1.8-2.1 \text{ eV}$ ), зеленой (около  $2.36 \text{ eV}$ ) и фиолетовой (около  $2.9 \text{ eV}$ ) областях спектра. Кроме того, в разных структурах присутствует какой-либо из двух пиков в синей области спектра:  $2.6$  или  $2.73 \text{ eV}$ . Соотношение интенсивностей ЭЛ в пиках различно для различных структур. На рис. 4 представлен спектр ЭЛ структуры с максимумом излучения в зеленой области спектра ( $2.357 \text{ eV}$ ). Не наблюдалось зависимости положения максимума данной ЭЛ от плотности прямого тока. Там же представлены спектры ЭЛ исследовавшихся нами ранее  $3C/3C$ - и  $3C/6H-SiC$ -структур [1,12]. Зеленая ( $h\nu_{\text{max}} = 2.296 \text{ eV}$ ) и фиолетовая полосы ЭЛ связывались нами с аннигиляцией свободного экситона в объеме  $3C-SiC$  (согласно [13],  $h\nu_{\text{max}} = 2.298 \text{ eV}$ ; в [1,13], так же как и в настоящей работе, не наблюдалось зависимости положения максимума, данной ЭЛ от плотности прямого тока) и объеме  $6H-SiC$  соответственно. Красная и две синие полосы ЭЛ могут быть связаны с излучательной рекомбинацией носителей в  $3C-SiC$  (красная ЭЛ) и в  $6H-SiC$  (синяя ЭЛ) [14] с участием уровня, обусловленного присутствием  $Al$  в эпитаксиальном слое. Мы предполагаем, что фиолетовый и зеленый пики ЭЛ в исследуемых в данной работе структурах, так же как и в структурах, исследовавшихся



**Рис. 4.** Спектры электролюминесценции при комнатной температуре исследовавшейся в данной работе структуры N2 ( $I; J = 23 \text{ A/cm}^2$ ),  $p^+$ -3C-SiC/ $n^+$ -3C-SiC (2;  $J = 50 \text{ A/cm}^2$ ) и  $p^+$ -3C-SiC/ $n^+$ -6H-SiC (3;  $J = 3000 \text{ A/cm}^2$ ) структур из работы [1].

в работе [1,2], обусловлены аннигиляцией свободного экситона в 6H- и 3C-SiC, однако зеленый пик (2.357 eV) примерно на 60 meV оказывается смещенным в коротковолновую сторону (2.296 eV для структур в работе [1], рис. 4).

**Обсуждение результатов.** Известно, что при выполнении всех необходимых технологических условий в квантовой яме за счет размерного квантования происходит образование локальных уровней, находящихся выше дна зоны проводимости узкозонного полупроводника (рис. 5). В результате может наблюдаться смещение в коротковолновую область полос люминесценции, связанных с данным материалом. Оценим ожидаемое смещение для случая гетероперехода 3C-SiC/6H-SiC. Согласно известной формуле, для энергии квантовых уровней в тре-

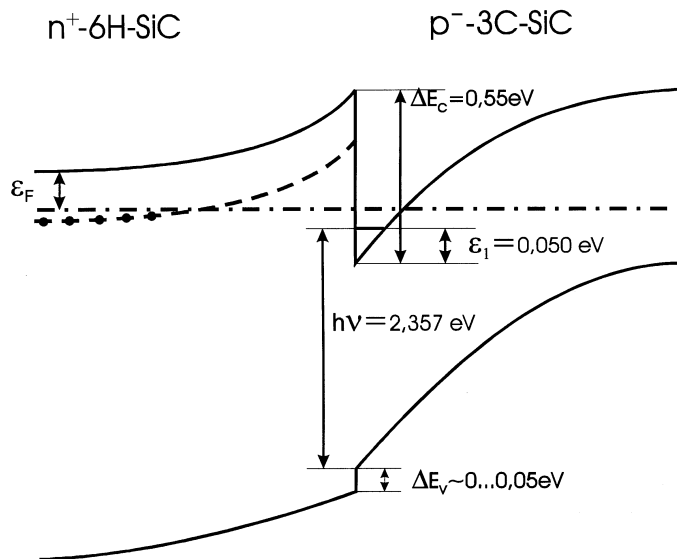


Рис. 5. Зонная диаграмма исследованной  $p^-$ -3C-SiC/ $n^+$ -6H-SiC структуры.

угольной яме можно записать [15]:

$$\varepsilon_N = (\hbar^2/2m^*)^{1/3} (2/3\pi qE)^{2/3} (N + 3/4) = A_N (E^2/(m^*/m_0))^{1/3}, \quad (1)$$

где  $N = 0, 1, 2, \dots$ ;  $A_N$  — коэффициент, зависящий от констант ( $A_0 = 4.56 \cdot 10^{-7}$ ;  $A_1 = 8.01 \cdot 10^{-7}$ ;  $A_3 = 1.09 \cdot 10^{-6}$ );  $E$  — напряженность электрического поля в яме (V/m);  $Q$  — заряд электрона;  $m^*/m_0 = 0.3$  [2] — отношение эффективной массы электрона в 3C-SiC к массе электрона. Оценим величину  $E$  как максимальную напряженность поля в  $pn$ -переходе:

$$E = Ud/W_0 \sim 2 \cdot 10^7 \text{ V/m},$$

где  $Ud$  — контактная разность потенциалов  $pn$ -структуры,  $W_0$  — толщина слоя объемного заряда при нулевом внешнем напряжении. Подставляя значения  $A$ ,  $E$  и  $m^*/m_0$  в формулу (1), получаем энергетическое положение для основного состояния квантовой ямы:  $\varepsilon_0 = 0.050 \text{ eV}$ .

Экспериментально наблюдаемое смещение максимума экситонной ЭЛ ( $\Delta h\nu$ ) оказалось несколько больше расчетного

$$\Delta h\nu = \varepsilon_0 + \delta,$$

где  $\delta \sim 0.01$  eV. Возможно, что величина  $\delta$  связана с уменьшением энергии связи экситона в кулоновском поле квантовой ямы.

В исследованных структурах трудно предположить значительную инжекцию дырок из  $p^-$ -3C-SiC в  $n^+$ -6H-SiC. Поэтому полосы ЭЛ, характерные для 6H-SiC, скорее всего, связаны с образованием включений  $p$ -6H-SiC на начальных стадиях роста слоя  $p$ -3C-SiC [16].

**Заключение.** Впервые обнаружено размерное квантование в треугольной квантовой яме на гетерогранице  $p^-$ -3C-SiC/ $n^+$ -6H-SiC. Подобная структура может быть основой для создания транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе SiC. Хотя качественный гетеропереход образовался не по всей площади эпитаксиального слоя, проделанная работа показывает, что технология SEV может быть использована для создания квантово-размерных структур на основе SiC.

Авторы благодарны Н.С. Аверкиеву и В.П. Кочерешко за полезные обсуждения. Данная работа была поддержана грантами РФФИ N00-02-16688 и 01-02-17657.

## Список литературы

- [1] *Lebedev A.A., Strelchuk A.M., Davydov D.V., Savkina N.S., Tregubova A.S., Kuznetsov A.N., Soloviev V.A., Poletaev N.K.* // Appl. Surf. Sci. 2001. V. 184. P. 419.
- [2] *Fissel A., Kaiser U., Schroter B., Richter W., Bechstedt F.* // Appl. Surf. Sci. 2001. V. 184. P. 37.
- [3] *Okojie R.S., Xhang M., Pirouz P., Tumakha S., Jessen G., Brillson L.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 3056.
- [4] *Lebedev A.A., Mosina G.N., Nikitina I.P., Savkina N.S., Sorokin L.M., Tregubova A.S.* // Techn. Phys. Lett. 2001. V. 27. P. 57.
- [5] *Bechstedt F., Kackell P., Adolph B., Furthmuller J.* // Phys. Stat. Sol. (b). 1997. V. 202. P. 35.
- [6] *Molecular beam Epitaxy and Heterostructures* / Ed. by L.L. Chang, K. Ploog. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht/Boston/Lancaster, 1985.
- [7] *Savkina N.S., Lebedev A.A., Davydov D.V., Strel'chuk A.M.* et al. // Mat. Science Eng. 2000. B77. N 1. P. 50.



- [8] *Водаков Ю.А., Ломакина Г.А., Мохов Е.Н.* // ФТТ. 1982. Т. 24. С. 1377.
- [9] *Sah S.T., Noyce R.N., Shockley W.* // Proc. IRE. 1957. V. 45. P. 1228.
- [10] *Strel'chuk A.M., Kiselev V.S., Avramenko S.F.* // Mat. Science. Eng. 1999. B61–62. P. 437.
- [11] *Стрельчук А.М.* // ФТП. 1995. Т. 29. С. 614.
- [12] *Strel'chuk A.M., Savkina N.S., Kuznetsov A.N., Lebedev A.A., Tregubova A.S.* // Mat. Science. Eng. 2002. B91–92. P. 321.
- [13] *Алтайский Ю.М., Авраменко С.Ф., Гусева О.А., Киселев В.С.* // ФТП. 1979. Т. 13. С. 1978.
- [14] *Лебедев А.А.* // ФТП. 1999. Т. 33. С. 129.
- [15] *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Квантовая механика. Нерелятивистская теория. Изд 3-е. М.: Наука, 1974.
- [16] *Lebedev A.A., Savkina N.S., Strel'chuk A.M., Tregubova A.S., Scheglow M.P.* // Mat. Science. Eng. 1997. B46. P. 141.