

06.1;06.2

## Электрические характеристики гетеропереходов ( $p$ ) 3C–SiC–( $n$ ) 6H–SiC

© А.А. Лебедев, А.М. Стрельчук, Д.В. Давыдов,  
Н.С. Савкина, А.Н. Кузнецов, Л.М. Сорокин

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

Поступило в Редакцию 22 апреля 2002 г.

Проведено исследование характеристик гетероструктуры системы ( $p$ ) 3C–SiC/( $n$ ) 6H–SiC, выращенной методом сублимационной эпитаксии. Определены разрывы зон и построена энергетическая диаграмма гетероперехода. Показано, что данная гетероструктура является перспективной для получения на ее основе транзисторов с двухмерным электронным газом (НЕМТ).

В предыдущих работах [1,2] нами была показана возможность получения гетероэпитаксиальной структуры ( $p$ ) 3C–SiC/( $n$ ) 6H–SiC методом сублимационной эпитаксии. Использувавшиеся методы структурного анализа показали, что рост слоя  $p$ -3C SiC происходил непосредственно на слое 6H SiC  $n$ -типа проводимости. Согласно данным EBIC, данный  $pn$ -переход был резким и достаточно структурно совершенным. Целью настоящей работы было формирование диодных структур на основе гетерополитипной структуры и исследование их электрических свойств.

Омические контакты к слою  $p$ -типа проводимости были получены магнетронным напылением пленок Al и Ti с последующим отжигом в вакууме при 1100°C. Омические контакты к  $n^+$ -подложке были получены магнетронным нанесением Ni отжигом при 900°C. Межа-структуры с площадями  $3 \times 10^{-3}$  см,  $1 \times 10^{-4}$  см и  $8 \times 10^{-5}$  см были сформированы ионно-плазменным травлением в SF<sub>6</sub> с использованием маскирующего покрытия из Al.

Концентрация нескомпенсированных доноров (акцепторов) ( $N_d - N_a$ ) определялась по наклону вольт-фарядных ( $C-U$ ) характеристик. Величина  $N_d - N_a$  составила  $1.7 - 2 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup> в слое 6H–SiC  $n$ -типа и  $N_a - N_d \sim 3 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup> в слое 3C–SiC  $p$ -типа проводимости.  $C-U$  характеристики диодов были линейны в координатах  $C^{-2}-U$  (рис. 1), что означало, что полученный  $pn$ -переход был резким. Напряжение емкостной от-

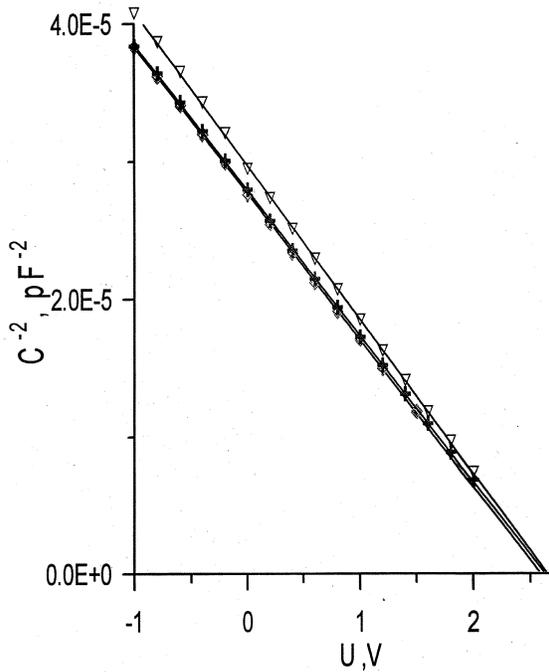


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики исследованных гетеропереходов.

сечки ( $U_c^c$ ) определялось экстраполяцией линейной зависимости  $C^{-2}-U$  к  $C^{-2} \Rightarrow 0$  (где  $C$  — емкость  $pn$ -перехода и  $U$  — приложенное напряжение) и для исследованных диодов составило  $2.65 \pm 0.05$  V. Было показано, что в области малых плотностей токов зависимость тока от напряжения была экспоненциальной:  $J = J_0 \exp(qV/nkT)$  (рис. 2) (с коэффициентом идеальности  $q \sim 2.1-2.4$ ). На том основании, что большинство диодов вне зависимости от площади имели подобные  $I-V$  и  $C-U$  характеристики был сделан вывод о достаточно высокой однородности свойств эпитаксиальных слоев на расстояниях порядка диаметра структуры.

В спектре электролюминесценции (EL) диодов одновременно наблюдались две полосы с максимумами  $h\nu_{\max} \approx 2.9$  eV и  $h\nu_{\max} \approx 2.3$  eV,

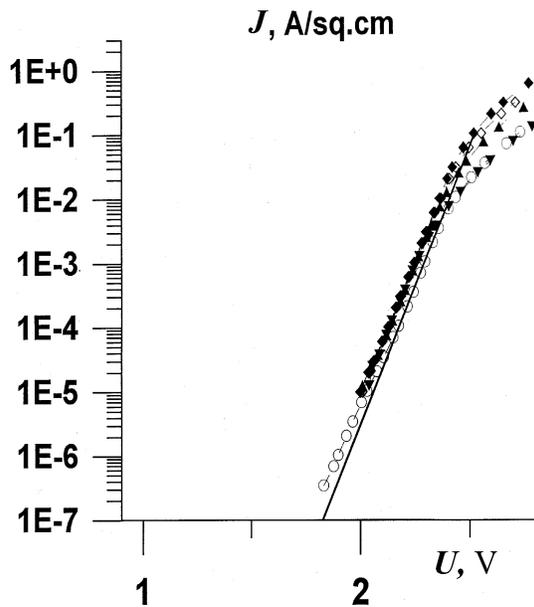
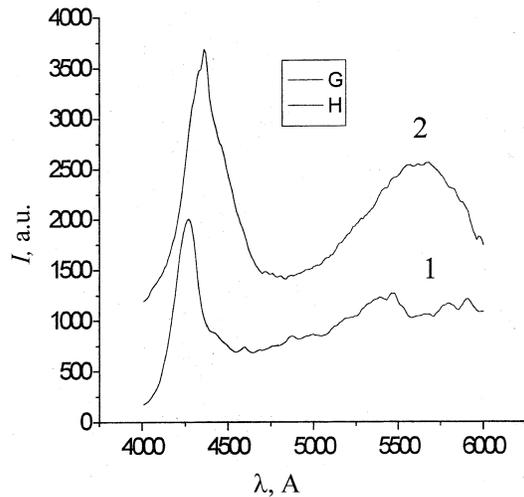


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики исследованных гетеропереходов.

и их интенсивности росли с увеличением прямого тока (рис. 3). В спектре EL диодов преобладала полоса с максимумом  $h\nu_{\max} \approx 2.9 \text{ eV}$ , и интенсивность второй полосы увеличивалась после нагрева структуры. Спектральное положение полос EL с максимумами при  $h\nu_{\max} \approx 2.9 \text{ eV}$  и  $h\nu_{\max} \approx 2.3 \text{ eV}$ , близкими ширинам запрещенных зон 6H- и 3C-SiC, их незначительная полуширина (в частности, по сравнению с полушириной так называемой „дефектной“ (зеленой в 6H-SiC) ЭЛ), характерное изменение интенсивности при увеличении тока и нагреве, позволяют связать эти две полосы ЭЛ с аннигиляцией свободного экситона в 6H- и 3C-SiC [3,4].

Оценим теперь значения разрыва зон проводимости ( $\Delta E_c$ ) и валентной зоны ( $\Delta E_v$ ) из полученного экспериментального значения контактной разности потенциалов ( $U_d$ ). ( $U_d = U_c^c + 2kT/e$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура и  $e$  — заряд



**Рис. 3.** Спектры электролюминесценции при прямом токе 70 мА,  $T = 300$  К (1); 600 К (2) (кривая 2 сдвинута вверх на 1000 единиц).

электрона [5]). Известно [6], что

$$\Delta E_c = U_d - E_{g_{3C}} + \mu_{3C} + \mu_{6H},$$

где  $E_g$  — величина запрещенной зоны 3С SiC,  $\mu_{3C}$  и  $\mu_{6H}$  — величина энергетического зазора между положением уровня Ферми и дном ближайшей зоны в  $p$ -3С и  $n$ -6Н соответственно.

Будем полагать, что при комнатной температуре положение уровня Ферми совпадает с положением основных легирующих примесей:  $\mu_{3C} \approx 0.2$  eV;  $\mu_{6H} \approx 0.15$  eV. Отсюда  $\Delta E_c = 0.55 \pm 0.05$  eV, следовательно [6]  $\Delta E_v = E_{g_{6H}} - E_{g_{3C}} - \Delta E_c = 0.05$  eV. Отметим, что полученное значение  $\Delta E_c$  хорошо согласуется с последними данными по определению сродства электронов 6Н и 3С SiC [7]:  $\chi_{6H} = 3.5$  eV;  $\chi_{3C} = 4.0$  eV. Отсюда  $\Delta E_c = \chi_{3C} - \chi_{6H} \sim 0.5$  eV.

На рис. 4 на основе полученных значений для  $\Delta E_c$  и  $\Delta E_v$  построена энергетическая диаграмма  $p$ -3С/ $n$ -6Н гетероперехода. Эта диаграмма оказалась близка к рассчитанной теоретически в работе [8] для той же пары полупроводников.

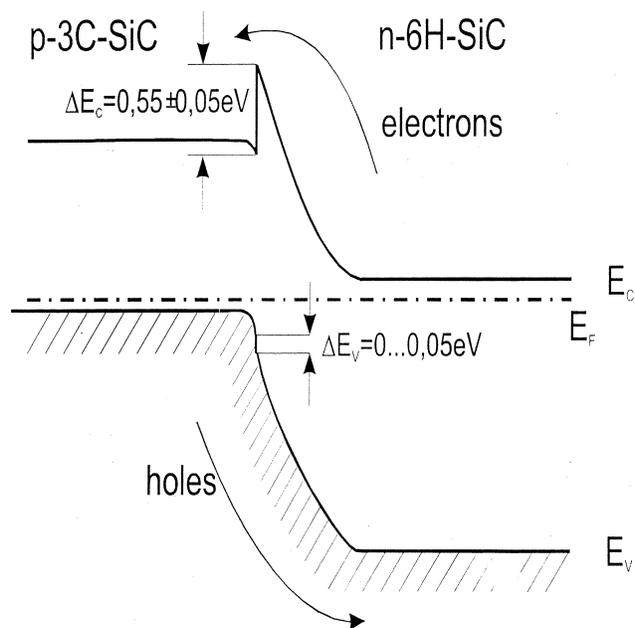


Рис. 4. Зонная диаграмма  $p$ -3C-SiC/ $n$ -6H-SiC гетероперехода.

Как видно из диаграммы, небольшое значение  $\Delta E_v$  не мешает инжекции дырок из  $p^+$ -3C SiC в  $n$ -6H SiC. В то же время возможна и инжекция электронов из широкозонного материала в узкозонный. Таким образом, в спектре ЭЛ данной структуры могут присутствовать полосы излучения, связанные с рекомбинацией как в 6H-, так и в 3C SiC, что и наблюдалось в эксперименте.

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты могут быть объяснены образованием 3C-6H SiC  $pn$ -гетероперехода с хорошим структурным совершенством. Определенные значения разрыва зон  $\Delta E_c = 0.55$  eV;  $\Delta E_v = 0.05$  eV хорошо согласуются с теоретическими расчетами и экспериментальными значениями для сродства электронов в 6H и 3C SiC. Данная структура зон показывает принципиальную возможность создания полевого транзистора с 2D электронным газом (HEMT) на основе гетероперехода 3C-6H SiC.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты N 00–02–16688 и 01–02–17657).

## Список литературы

- [1] *Lebedev A.A., Strel'chuk A.M., Davydov D.V., Savkina N.S., Tregubova A.S., Kuznetsov A.N., Solov'ev V.A., Poletaev N.K.* // Applied surface Science. 2001. V. 183. P. 421.
- [2] *Лебедев А.А., Мосина Г.Н., Никитина И.П., Савкина Н.С., Сорокин Л.М., Трегулова А.С.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. С. 57.
- [3] *Алтайский Ю.М., Авраменко С.Ф., Гусева О.А., Киселев В.С.* // ФТП. 1987. Т. 21. С. 2072.
- [4] *Лебедев А.А.* // ФТП. 1999. Т. 33. С. 107.
- [5] *Garret C.G.B., Brattain W.H.* // Phys. Rev. B 1970. V. 19 (2). P. 376.
- [6] *Sharma B.L., Purohit R.K.* // Semiconductor heterojunctions. Pergamon Press, 1974.
- [7] *Bozack M.J.* // Phys. stat. sol. (b). 1997. V. 202. P. 549.
- [8] *Bechstedt F., Kackell P., Zywiets A., Karch K., Adolphet B., Tenelsen K., Furthmuller J.* // Phys. stat. sol. (b). 1997. V. 202. P. 35.