

## ДИОДЫ НА ОСНОВЕ 6H-SiC, ПОЛУЧЕННЫЕ СОВМЕЩЕНИЕМ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ И СУБЛИМАЦИОННОЙ ЭПИТАКСИИ

© А.А.Лебедев, А.А.Мальцев, Н.К.Поletaев, М.Г.Растегаева,  
Н.С.Савкина, А.М.Стрельчук, В.Е.Челноков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 10 ноября 1995 г. Принята к печати 21 ноября 1995 г.)

Сообщается о совмещении сублимационной и газотранспортной эпитаксии для получения диодов на основе 6H-SiC. Показано, что параметры полученных «комбинированных» структур не уступают, и в некоторых случаях превосходят параметры диодов, изготовленные одним из указанных методов.

В настоящее время наиболее слабо легированные эпитаксиальные слои 6H-SiC получены методом газотранспортной эпитаксии (CVD) [1]. В то же время метод сублимационной эпитаксии (SE) позволяет получить сильно легированные слои SiC *p*-типа проводимости, которые использовались в качестве эмиттеров в целом ряде полупроводниковых приборов [2]. Задачей настоящей работы было получение диода на основе 6H-SiC с использованием обеих указанных технологий и исследование его параметров.

В качестве *n*-базы использовались эпитаксиальные слои 6H-SiC, изготовленные фирмой CREE, с концентрацией  $N_d - N_a = (7-9) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и толщиной 6 мкм. Слой *p*-типа, легированный Al, был выращен методом сублимации в открытой системе с концентрацией  $N_a - N_d = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , толщиной 2 мкм [3]. Ранее при росте эпитаксиальных слоев методом SE мы использовали подложки SiC, с ориентацией (0001)Si. Используя в настоящей работе *n-n*<sup>+</sup>-структуры имели разориентацию (3-4)° в направлении плоскости (1120). Было обнаружено, что при выращивании эпитаксиальной пленки методом SE на основе *n-n*<sup>+</sup>-структур, изготовленных методом CVD, чаще всего на поверхности эпитаксиального слоя *p*-типа проводимости образуется пленка *n*-типа толщиной менее или порядка 0.5 мкм. Введением сублимационного травления на заключительных стадиях процесса роста удалось избавиться от образования данной пленки. Меза-структуры были сформированы ионно-плазменным травлением с использованием Al в качестве маскирующего покрытия [4]. Площадь отдельных диодов составляла  $4 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ .

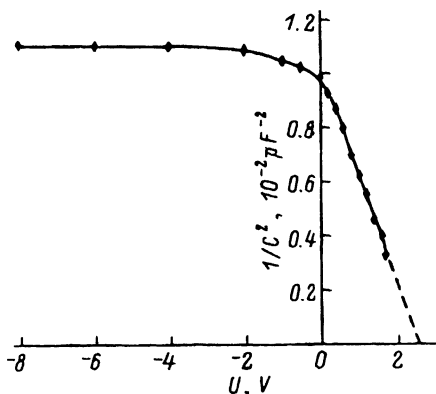


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика гибридной  $p-n$ -структуры, изготовленной совмещением методов газотранспортной эпитаксии и сублимационной эпитаксии.

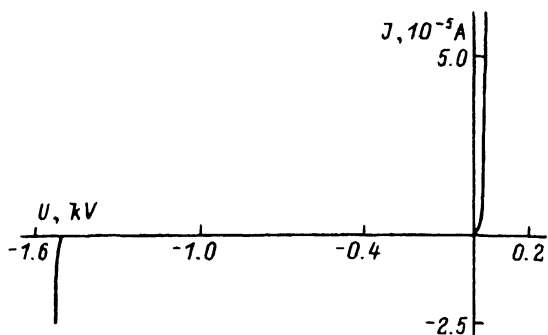


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика легированной бором  $p-n$ -структуры, полученной совмещением газотранспортной и сублимационной эпитаксии (измерена в очищенном керосине).

Вольт-фарадные характеристики полученных диодов были линейны в координатах  $1/C^2-U$ , а значение концентрации  $N_d - N_a$  совпадало со значением  $N_d - N_a$ , полученным на исходных эпитаксиальных слоях до выращивания  $p$ -слоя. Это указывало на то, что  $p-n$ -переходы были резкими и ассиметричными. Напряжение отсечки на зависимости  $1/C^2(U)$  составляло (2.45–2.5) В. При обратных напряжениях в интервале (0–2) В наблюдался изгиб вольт-фарадной характеристики, и при напряжениях более 2 В измеряемая емкость практически не зависела от напряжения (рис. 1). Это было связано с тем, что при данных напряжениях слой объемного заряда  $p-n$ -перехода распространялся на всю толщину базового слоя, приближаясь к сильно легированной подложке. Дальнейшее увеличение обратного напряжения незначительно сказывалось на увеличении области объемного заряда и, следовательно, на емкости  $p-n$ -структуры.

Вольт-амперные характеристики  $p-n$ -структур, полученных комбинацией методов CVD и SE, в области малых токов описывались выражением  $J = J_0 \exp(qU/\beta kT)$ , где  $q$  — заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура. Вольт-амперные характеристики диодов были однородны по площади подложки. В диапазоне токов ( $10^{-9} - 10^{-7}$ ) А величины  $\beta \approx 2$  и  $J_0 \approx 10^{-25}$  А, при больших токах коэффициент  $\beta$  лежит в диапазоне  $1 < \beta < 2$ . Пробой структур начинался при напряжении (300–350) В и носил резкий и необратимый характер.

Для увеличения напряжения пробоя в  $p-n$ -структурах, изготовленных комбинированным способом (CVD+SE), была проведена диффузия бора (см. подробнее [5]). После формирования меза-структур площадью  $4 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup> было обнаружено, что напряжение пробоя данных структур составляет примерно 600 В, что соответствует критической напряженности электрического поля  $E_{cr} \approx 10^6$  В/см и для данной геометрии прибора очевидно является предельным. Пробой диодов оставался обратимым до токов порядка  $10^{-4}$  А.

Также были подвергнуты диффузионной обработке бором структуры, изготовленные способом CVD+SE, у которых на поверхности  $p$ -типа имелся тонкий  $n$ -слой (без проведения такой обработки

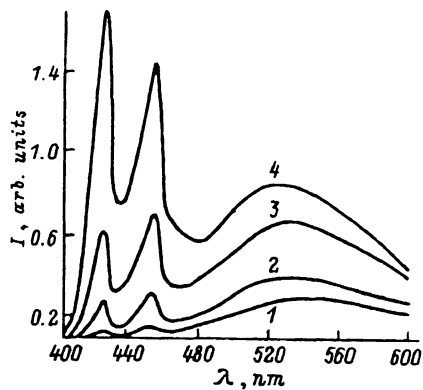


Рис. 3. Спектр электролюминесценции  $p-n$ -структуры, изготовленной совмещением газотранспортной и сублимационной эпитаксии, при различных плотностях прямого тока  $J$ ,  $A/cm^2$ : 1 — 4, 2 — 8, 3 — 16, 4 — 32.

необратимый пробой таких образцов наблюдался при напряжениях (600–700 В). После проведения диффузии пробой не наступал до напряжений (700–800) В. При больших значениях обратного напряжения начинался пробой воздушного промежутка вокруг меза-структуры. В микроскоп, а также невооруженным глазом было видно, что меза-структуры опоясывались кольцом разрядов, которые сопровождалась характерным звуком. Через 5–10 мин работы в таком режиме напряжение пробоя диода уменьшалось практически до нуля. В микроскоп было видно, что поверхность омических контактов на верхней плоскости меза-структуры сильно разрушалась. Очевидно, в результате воздушных разрядов происходило образование проводящих каналов на поверхности фаски меза-структуры за счет распыления Al. Были проведены эксперименты по исследованию пробоя данных структур в средах с  $E_{cr} > E_{cr}^*$ , где  $E_{cr}^*$  — критическое поле для воздушного промежутка. Было обнаружено, что в очищенном керосине величина напряжения пробоя  $U_{br}$  увеличивалась до 1500 В (рис. 2). Отметим, однако, что при включении в прямом направлении такие структуры имели напряжение токовой отсечки более 5 В, что, по-видимому, было связано с неполной перекомпенсацией бором прослойки  $n$ -типа на поверхности  $p$ -эмиттера. Однако такие структуры могут быть использованы в качестве высоковольтных ограничителей напряжения.

Не легированные бором  $p-n$ -структуры, изготовленные способом CVD+SE, обладали эффективной электролюминесценцией, в спектре которой преобладали пики, связанные с рекомбинацией свободного экситона ( $h\nu = 2.92 \text{ эВ}$ ) [6] и рекомбинацией с участием уровней Al ( $h\nu = 2.75 \text{ эВ}$ ) [7]. Кроме того, в спектре электролюминесценции наблюдалась широкая полоса в желто-зеленой области спектра, которая может быть связана с излучательной рекомбинацией на глубоких акцепторных центрах [8,9] (рис. 3). Как видно из рисунка, с увеличением плотности прямого тока наблюдалось смещение максимума полосы в коротковолновую область. Подобная зависимость также ранее наблюдалась в диодах, изготовленных методом SE [10], и была объяснена на основе различия зависимостей интенсивности электролюминесценции от тока  $J$  для двух каналов излучательной рекомбинации в  $6H$ -SiC. Отметим, что максимум излучения спектра  $p-n$ -структур, изготовленных способом CVD+SE, находился в более коротковолновой области, чем у диодов, полностью изготовленных методом CVD [11]. С другой стороны, преобладание экситонной люминесценции в спектре излучения

диодов, полученных методом CVD+SE, наступало при токах, примерно на порядок меньших, чем в случае диодов, полностью полученных методом SE [12].

Настоящая работа показала возможность сочетания сублимационной и газофазной эпитаксии при создании  $p-n$ -структур на основе карбида кремния. Проведенные исследования показали, что «гибридные» структуры не уступают, а по отдельным параметрам могут превосходить не гибридные структуры.

Часть работы выполнена при поддержке Министерства обороны США и компании «Шнейдер Электрик» (Франция).

#### Список литературы

- [1] J.W. Palmour, J.A. Edmond, H.S. Kong, C.H. Carter Jr. *Physica B*, **185**, 461 (1993).
- [2] М.М. Аникин, Р.А. Иванов, А.А. Лебедев, С.Н. Pyatko, А.М. Стрельчук. In: *Semiconductor Interfaces and Microstructures*, ed. by Z.C. Feng (World Scientific, Singapore, 1990) p. 280.
- [3] М.М. Аникин, Р.А. Иванов, А.А. Лебедев, С.Н. Pyatko, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин. *Mater. Sci. Engin.*, **V11**, 113 (1992).
- [4] И.В. Попов, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. *Письма ЖТФ*, **12**, 240 (1985).
- [5] А.А. Лебедев, А.Н. Андреев, А.А. Мальцев, М.Г. Растегаева, Н.С. Савкина, В.Е. Челноков. *ФТП*, **29**, 1635 (1995).
- [6] M. Ikeda, H. Matsunami, T. Tanaka. *Phys. Rev. B*, **22**, 2842 (1980).
- [7] В.И. Павличенко, И.В. Рыжиков, Ю.М. Сулейманов, Ю.М. Шейдак. *ФТТ*, **10**, 2801 (1968).
- [8] М.М. Аникин, Н.И. Кузнецов, А.А. Лебедев, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин. *ФТП*, **24**, 1384 (1990).
- [9] А.Н. Андреев, М.М. Аникин, А.А. Лебедев, Н.К. Полетаев, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. *ФТП*, **28**, 729 (1994).
- [10] М.М. Аникин, Н.И. Кузнецов, А.А. Лебедев, Н.К. Полетаев, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. *ФТП*, **28**, 443 (1994).
- [11] J.A. Edmond, H.-S. Kong, C.H. Carter Jr. *Physica B*, **185**, 4536 (1993).
- [12] А.А. Лебедев, Н.К. Полетаев, М.Г. Растегаева, Н.С. Савкина. *ФТП*, **28**, 1769 (1994).

Редактор Т.А. Полянская

#### **6H-SiC diodes fabricated by chemical vapour deposition and sublimation epitaxy**

*A.A. Lebedev, A.A. Mal'tsev, N.K. Poletaev, M.G. Pastegaeva, N.S. Savkina, A.M. Strel'chuk, and V.E. Chelnokov*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia.

We report about a combination of the open sublimation method and the chemical vapour deposition technologies for producing 6H-SiC diodes. It was shown that this combined structures paramaters do not yield and in some cases exceed those of noncombined diodes.