

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ $6H$ -SiC $p$ - $n$ -СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

© А.А.Лебедев, Д.В.Давыдов, К.И.Игнатъев

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 14 декабря 1995 г. Принята к печати 25 декабря 1995 г.)

Методом вольт-фарадных характеристик измерены величины контактной разности потенциалов ( $U_d$ )  $6H$ -SiC диодов,  $p$ - $n$ -переход в которых был сформирован сублимационной, жидкостной либо газофазной эпитаксией. При использовании других измерительных методик и литературных данных определены необходимые параметры и сделан расчет величины  $U_d$  как функции концентрации примеси в базе  $n$ -типа проводимости. Показано, что наилучшее соответствие эксперимента и теории получено при использовании для расчета величины запрещенной зоны  $6H$ -SiC, равной 2.86 эВ.

### Введение

Известно, что контактная разность потенциала полупроводниковой  $p$ - $n$ -структуры ( $U_d$ ) определяется как разность величины запрещенной зоны и величины химических потенциалов электронов и дырок в  $n$ - и  $p$ -областях соответственно. Точное значение величины  $U_d$  необходимо при определении многих важнейших характеристик полупроводниковых приборов, в том числе и предельных рабочих температур.

Цель настоящей работы — сопоставление экспериментальных значений  $U_d$ , полученных из вольт-фарадных характеристик  $6H$ -SiC диодов и расчетных значений, полученных на основе параметров, известных из литературы либо определенных другими экспериментальными методами.

### Образцы для исследований

Все исследовавшиеся в настоящей работе  $p$ - $n$ -структуры были сформированы на грани (0001) Si монокристаллических подложек карбида кремния политипа  $6H$ .

В качестве базовых слоев были использованы:

1) монокристаллические подложки, выращенные по методу Лэли (Lely) [1];

2) эпитаксиальные слои, полученные: а) методом сублимационной эпитаксии в открытой системе (SE) [2]; б) бесконтейнерной жидкостной эпитаксией (LPCFE) [3]; в) газотранспортной эпитаксией (CVD) [4]. В данном случае подложками служили монокристаллы SiC, выращенные модифицированным методом Лэли (ML) [5].

$p$ - $n$ -переходы были получены выращиванием  $p^+$ -эмиттера методом сублимационной (SE, Lely-SE  $p$ - $n$ -структуры), бесконтейнерной жидкостной (LPCFE  $p$ - $n$ -структуры) и газотранспортной (CVD  $p$ - $n$ -структуры) эпитаксией. В случае структур Lely-SE  $p^+$ -эмиттер выращивался непосредственно на подложке Lely без промежуточных слабо легированных слоев  $n$ -типа проводимости.

Отметим, что (ML) подложки, а также CVD-эпитаксиальные слои  $n$ - и  $p$ -типа проводимости были изготовлены фирмой CREE inc. (США).

Меза-структуры диаметром 100÷800 мкм были сформированы плазхимическим травлением в  $SF_6$  с использованием маскирующего покрытия из алюминия.

### Вольт-фарадные измерения

В случае резкого асимметричного  $p$ - $n$ -перехода величина емкостной отсечки ( $U_c$ ) определяется экстраполяцией линейной зависимости  $C^{-2} - U$  к  $C^{-2} = 0$ , где  $C$  - емкость  $p$ - $n$ -перехода,  $U$  - приложенное напряжение. Величина  $U_c$  связана с контактной разностью потенциалов соотношением [6]

$$U_c = U_d - 2kT/e,$$

где  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $e$  - заряд электрона.

$C$ - $U$ -характеристики измерялись мостовым методом по параллельной схеме замещения. Использовался трансформаторный мост; амплитуда синусоидального сигнала не превышала 100 мВ, частота варьировалась в пределах 10-100 кГц; погрешность измерений емкости не превышала 1%.

Для измерений были отобраны диоды, в которых: 1) измеряемое значение нескомпенсированной донорной примеси ( $N_d - N_a$ ) совпадало

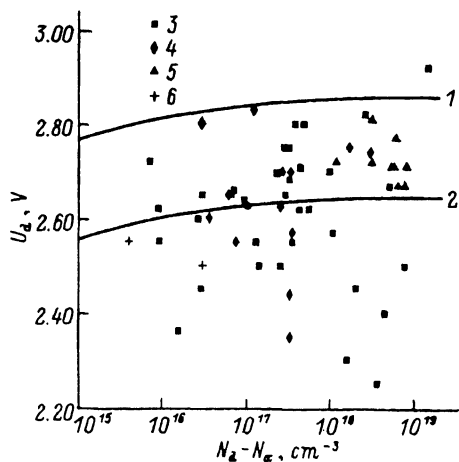


Рис. 1. Зависимости контактной разности потенциалов  $6H$ -SiC  $p$ - $n$ -структур от концентрации  $N_d - N_a$  в базе. 1 - расчетная зависимость для  $E_g = 3.07$  эВ (300 K); 2 - расчетная зависимость для  $E_g = 2.86$  эВ (300 K); Экспериментальные значения: 3 - для SE  $p$ - $n$ -структур; 4 - для LPCFE  $p$ - $n$ -структур; 5 - для Lely-SE  $p$ - $n$ -структур; 6 - для CVD  $p$ - $n$ -структур.

со значением  $N_d - N_a$ , полученным из измерений емкости диода Шоттки, созданного на поверхности эпитаксиального слоя  $n$ -типа до выращивания  $p^+$ -эмиттера (либо со значением  $N_d - N_a$ , приведенным в спецификации); 2) измеряемые емкости не зависели от синусоидальной частоты до 100 кГц; 3)  $C-U$ -характеристики, построенные в координатах  $C^{-2}-U$ , были линейны в интервале напряжений  $-10 - +2$  В; 4) в указанном диапазоне напряжений отсутствовали токи утечки более  $10^{-6}$  А; 5) согласно данным рентгенодифракционного анализа, отсутствовали включения каких-либо других политипов.

Полученные значения  $U_d$  представлены на рис. 1.

### Методика расчета

Величина  $U_d$  для резкого асимметричного  $p-n$ -перехода определена как [7]

$$U_d = (kT/e) \ln(n_n p_p / n_i^2), \quad (1)$$

где  $n_n$  — равновесная концентрация электронов в зоне проводимости,  $p_p$  — равновесная концентрация дырок в валентной зоне,  $n_i$  — собственная концентрация носителей заряда.

Для величин  $n_n$  и  $p_p$  известно выражение [8]

$$\begin{aligned} n_n &= 2(N_d - N_a) / \left\{ (1 + (N_a / \beta N_c) e^{\epsilon_d}) + \right. \\ &\quad \left. + [(1 + (N_a / \beta N_c) e^{\epsilon_d})^2 + (4 / \beta N_c) (N_d - N_a) e^{\epsilon_d}] \right\}^{1/2}, \\ p_p &= 2(N_a - N_d) / \left\{ (1 + (N_d / \beta N_v) e^{\epsilon_a}) + \right. \\ &\quad \left. + [(1 + (N_d / \beta N_v) e^{\epsilon_a})^2 + (4 / \beta N_v) (N_a - N_d) e^{\epsilon_a}] \right\}^{1/2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N_c = 2(2\pi m_e kT / h^2)^{3/2}$ ,  $N_v = 2(2\pi m_h kT / h^2)^{3/2}$ ,  $\epsilon_d = E_d / kT$ ,  $\epsilon_a = E_a / kT$ ,  $\beta$  — фактор спинового вырождения.

Значения эффективных масс плотности состояний в  $6H$ -SiC согласно последним литературным данным, составляют  $m_e = 0.27 m_0$ ,  $m_h = m_0$  [9,10].

Степень компенсации SE-эпитаксиальных слоев  $n$ -типа проводимости определялась из исследования температурной зависимости проводимости канала полевого транзистора [11]. Согласно [11], величина  $k$  находилась в пределах 0.4-0.6. Эти значения хорошо коррелируют с определенной методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) концентрацией глубоких акцепторных уровней в слоях данного типа [12]. В LPCFE-слоях  $n$ -типа проводимости концентрация глубоких акцепторных уровней была примерно на порядок меньше при том же значении  $N_d - N_a$ . Однако при исследовании полевых транзисторов на основе данных эпитаксиальных слоев было обнаружено, что величина  $k$  приблизительно такая же, как и в случае SE-слоев [13]. Таким образом, очевидно, что компенсация LPCFE-слоев  $n$ -типа проводимости обусловлена более мелкими акцепторными уровнями, чем в случае SE-слоев.

Величина концентрации  $N_d - N_a$  в базовых слоях  $n$ -типа проводимости определялась по  $C-U$ -характеристикам  $p-n$ -структур. Концентрация некомпенсированных акцепторов ( $N_a - N_d$ ) в слоях  $p$ -типа проводимости измерялась по  $C-U$ -характеристикам диодов Шоттки на поверхности данных слоев до формирования меза-структуры и составила  $(0.7-5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Поскольку величина  $N_d - N_a$ , измеренная на диодах Шоттки, до выращивания  $p$ -слоя совпадала со значением  $N_d - N_a$ , измеренным на  $p-n$ -структуре, то  $N_a - N_d \gg N_d - N_a$  и вблизи металлургической границы  $p-n$ -перехода. При расчетах использовалось значение  $N_a - N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Глубины залегания донорных уровней азота в  $6H\text{-SiC}$  достаточно хорошо изучены и, согласно [14], составляют  $E_c - 0.1 \text{ эВ}$  ( $1/3 N_d$ ) и  $E_c - 0.13 \text{ эВ}$  ( $2/3 N_d$ ). При расчетах использовалось значение  $E_c - 0.13 \text{ эВ}$ .

Значения энергии ионизации акцепторных уровней алюминия, определенные из спектров фотолюминесценции, составили  $E_v + (0.22 \div 0.26) \text{ эВ}$  [15]. В то же время из исследований эффекта Холла было обнаружено, что энергия ионизации алюминия зависит от его концентрации в карбиде кремния и уменьшается от  $E_v + 0.27 \text{ эВ}$  ( $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) до  $E_v + 0.1 \text{ эВ}$  ( $N_a = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) [16]. Согласно концентрации  $N_a - N_d$ , в  $p^+$ -эмиттере исследовавшихся диодов при расчетах использовалось значение  $E_v + 0.1 \text{ эВ}$ .

Наиболее часто при определении ширины запрещенной зоны ( $E_g$ )  $6H\text{-SiC}$  исходят из экситонной ширины запрещенной зоны ( $E_g^{\text{ex}}$ ), найденной в работе [17]. Тогда  $E_g = E_g^{\text{ex}} + E^{\text{ex}}$ , где  $E^{\text{ex}}$  — энергия связи экситона. С учетом того что  $E^{\text{ex}} = 0.078 \text{ эВ}$  [18], по данным [17] для  $E_g$  при комнатной температуре получаем  $3.07 \text{ эВ}$ . Однако ранее тем же методом были получены другие результаты [19], согласно которым  $E_g(T = 300 \text{ К}) = 2.86 \text{ эВ}$ .

Степень компенсации слоев  $p$ -типа специально не измерялась. Поскольку рост слоев  $p$ -типа проводился приблизительно в тех же технологических условиях как и  $n$ -типа, но при использовании источников,

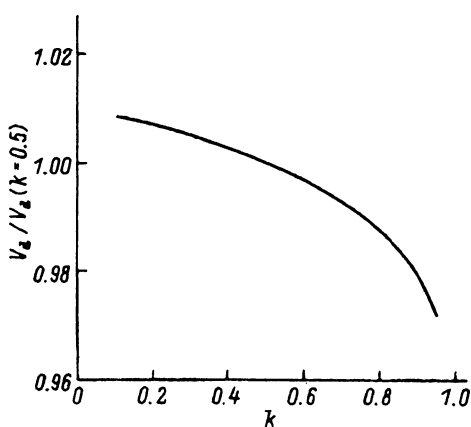


Рис. 2. Зависимости относительного изменения величины  $U_d$   $6H\text{-SiC}$   $p-n$ -структуры от степени компенсации  $p$ -эмиттера. Расчет сделан для значений  $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_a - N_d = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ;  $E_g = 2.86 \text{ эВ}$ .

легированных Al, очевидно, что фоновая концентрация азота будет в пределах  $3 \cdot 10^{17} < N_a < 5 \cdot 10^{18}$ , т. е.  $0.03 < k < 0.5$ . На рис. 2 представлена теоретическая зависимость  $U_d = F(k)$  для  $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_a - N_d = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ;  $E_g = 2.86 \text{ эВ}$ ; для остальных расчетных параметров использовались обоснованные выше значения. Как видно из рисунка, в указанном диапазоне изменения значений  $k$  изменение величины  $U_d$  составило  $\pm 1\%$ . Таким образом, существующая неопределенность в определении степени компенсации слоя  $p$ -типа проводимости не могла оказать существенного влияния на окончательную величину  $U_d$ . При расчетах для слоя  $p$ -типа принималось значение  $k = 0.5$ . Отметим, что в данном случае (так же как и ранее), если значение расчетного параметра было известно с точностью до некоторого диапазона значений, то при расчетах использовалась величина, при которой расчетное значение  $U_d$  было бы минимальным.

## Обсуждение результатов

На рис. 1 помещены расчетные зависимости  $U_d = F(N_d - N_a)$ , сделанные для двух значений величины запрещенной зоны. Как видно из рисунка, лучшее соответствие расчетных значений  $U_d$  эксперименту получено для  $E_g = 2.86 \text{ эВ}$ . В то же время практически все экспериментальные результаты лежат ниже расчетной кривой, полученной для значения  $E_g = 3.07 \text{ эВ}$ . Отбор образцов и анализ использовавшихся при расчете параметров исключает возможность значительной экспериментальной или расчетной ошибки.

Отметим также, что полученные нами экспериментальные значения близки к результатам, полученным при исследовании образцов, полностью полученных методом CVD [4]. В работе [20] было также показано, что сумма высот потенциальных барьеров диодов Шоттки к  $6H\text{-SiC}$   $n$ - и  $p$ -типа проводимости, полученных напылением различных металлов, дает примерно  $2.86 \text{ эВ}$ .

## Заключение

Настоящая работа показывает, что экспериментальные значения величины  $U_d$  для  $6H\text{-SiC}$  диодов, сформированных по различным технологиям, не соответствуют общепринятому значению ширины запрещенной зоны данного полупроводника. Такое несоответствие может быть объяснено либо сильными искажениями кристаллической решетки SiC вблизи металлургической границы  $p$ - $n$ -перехода, либо более сложной структурой разрешенных зон карбида кремния, чем это представляется в настоящее время.

Авторы благодарны В.А. Дмитриеву за предоставление для измерений LPCFE  $p$ - $n$ -структур. Часть работы выполнена при поддержке Министерства обороны США и гранта INTAS 93-543.

## Список литературы

- [1] J.A. Lely. Ber. Dt. Keram. Ges., **32**, 339 (1955).
- [2] М.М. Аникин, А.А. Лебедев, И.В. Попов, В.П. Растегаев, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин, Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков, В.Е. Челноков. ФТП, **22**, 298 (1988).
- [3] В.А. Дмитриев, Л.М. Коган, Я.В. Морозенко, И.В. Попов, В.С. Родкин, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, **12**, 385 (1986).

- [4] J.W. Palmor, J.A. Edmond, H.S. Kong, C.H. Carter, Jr. *Physica B*, **185**, 461 (1993).
- [5] Yu.M. Tairov, V.F. Tsvetkov. *J. Cryst. Growth*, **43**, 209 (1974).
- [6] C.G. Garret, W.H. Brattain. *Phys. Rev. B*, **19**, 376 (1970).
- [7] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Энергия, 1973).
- [8] Дж. Блекмор. *Статистика электронов в полупроводниках* (М., Мир, 1964).
- [9] W. von Munch. *Silicon carbide. Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology* (1982) v. 17<sup>a</sup>, p. 132.
- [10] M. Schadt, G. Pensl, R.P. Devaty, W.J. Choyke, R. Stein, D. Stepani. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 3120 (1994).
- [11] А.А. Лебедев, М.М. Аникин, А.Н. Кузнецов, М.Г. Растегаева, Н.С. Савкина, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. *ФТП*, **29**, 1231 (1995).
- [12] А.А. Lebedev, V.E. Chelnokov. *Diamond films and Related Mater.*, **3**, 1393 (1994).
- [13] П.А. Иванов. Автореф. канд. дис. (Л., 1990).
- [14] S.H. Hagen, A.W.C. van Kemanage, J.W.C. van der Does de Bye. *J. Luminesc.*, **8**, 18 (1973).
- [15] M. Ikeda, T. Haykava, S. Ymagiva, H. Matsunami, T. Tanaka. *J. Appl. Phys.* **50**, 8215 (1979).
- [16] Г.А. Ломакина. *ФТТ*, **17**, 2725 (1975).
- [17] W. Choyke, L. Patrik. *Phys. Rev.*, **127**, 1868 (1962).
- [18] В.И. Санкин. *ФТТ*, **15**, 1820 (1975).
- [19] W. Choyke, L. Patrik. *Phys. Rev.*, **105**, 1721 (1957).
- [20] J.R. Wardrop. *J. Appl. Phys.*, **75**, 4548 (1994).

Редактор В.В. Чалдышев

## Investigation of the diffusion potential of 6H SiC *p-n* structures, obtained by different technological methods.

*A.A. Lebedev, D.V. Davydov, K.I. Ignat'ev*

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

Diffusion potential ( $U_d$ ) of 6H SiC diodes obtained by sublimation, liquid and CVD epitaxy was investigated by voltage-capacitance method. With use of other measurement methods and literature data the parameters were obtained which were necessary for calculation  $U_d$  as a function of the impurity concentration in *n*-type base. It was shown that better agreement between experiment and theory takes place when a value of the 6H-SiC forbidden gap equal to 2.86 eV was used in the calculation.