

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА SiC-6H-СТРУКТУР С РЕЗКИМ $p-n$ -ПЕРЕХОДОМ

Аникин М. М., Лебедев А. А., Попов И. В., Пятко С. Н.,  
Растегаев В. П., Сыркин А. Л., Царенков Б. В., Челноков В. Е.

Установлено, что электростатические свойства эпитаксиальных SiC-6H  $p(\text{Al})-n(\text{N})$ -структур с резким  $p-n$ -переходом в широком интервале температур (300–800 К) соответствуют теории Шокли, и на основании этого определены их электростатические параметры.

Показано, что уменьшение диффузионной разности потенциалов на  $p-n$ -переходе с ростом температуры определяется главным образом температурным ходом химических потенциалов электронов в  $n$ -области и дырок в  $p$ -области, а не температурной зависимостью ширины запрещенной зоны.

1. В последние годы благодаря достижениям ряда исследовательских центров наметилась тенденция к переводу карбида кремния из давно потенциально перспективного полупроводника в реально пригодный для полупроводниковой электроники сегодняшнего дня.

Карбид-кремниевая электроника развивается на основе нескольких поли-типов SiC, и один из основных — политип 6H. В настоящее время созданы SiC-6H  $p-n$ -структуры (см., например, [1–5]), свойства которых уже можно сравнивать с классическими представлениями физики полупроводников и полупроводниковой электроники. Для количественного анализа многих явлений в  $p-n$ -структуре необходимо прежде всего знать ее электростатические свойства.

Задача данной работы — определение электростатических свойств SiC-6H-структур с резким  $p-n$ -переходом в широком интервале температур. Для этого использовались характеристики дифференциальная емкость  $p-n$ -структуры ( $C$ )—напряжение на  $p-n$ -структуре ( $U$ ).

2. Электростатические свойства SiC-6H-структур с резким  $p-n$ -переходом в известной литературе почти не представлены. Однако отрывочные упоминания о  $C-U$ -характеристиках резких  $p-n$ -переходов имеются [1–3] и относятся они только к комнатной температуре. В [1]  $C-U$ -характеристика измерена лишь при обратных смещениях, в [2] — при прямых и обратных смещениях и определено емкостное напряжение отсечки  $U_{\xi}=2.55$  В, в [3]  $C-U$ -характеристика не приводится, но указывается, что она линейна в координатах  $C^{-2}-U$  и что  $U_{\xi}=2.7$  В.

Температурные зависимости  $C-U$ -характеристик представлены только для плавных SiC-6H  $p-n$ -переходов [6]; показано, что в интервале температур 150–630 К  $U_{\xi}$  уменьшается с ростом температуры практически линейно с температурным коэффициентом  $1.4 \cdot 10^{-3}$  В/град.

3. Объектами исследования в данной работе были эпитаксиальные SiC-6H  $p-n$ -структуры, плоскость  $p-n$ -перехода в которых перпендикулярна кристаллографической оси  $C$ .

Подложками для изготовления  $p-n$ -структур служили монокристаллические SiC-6H-пластины  $n$ -типа, легированные азотом до концентрации около  $5 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$  и ориентированные по плоскости (0001); площадь подложки  $\sim 1$  см $^2$ .

На (0001)Si-грань подложки сублимационным методом наращивался слой SiC-6H *n*-типа, мелкими донорами в котором были атомы азота; концентрация нескомпенсированных доноров ( $N_d - N_a$ ) порядка  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Затем на этот *n*-слой тем же методом наращивался слой SiC *p*-типа; мелкими акцепторами служили атомы алюминия, которыми был предварительно легирован сублимирующий источник — поликристаллический SiC.

На подложке с эпитаксиальной *p-n*-структурой реактивным ионно-плазменным травлением со стороны *p*-области формировались дискретные элементы с меза-структурой; площадь *p-n*-перехода элемента  $S = (4 \div 5) \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>.

Контакт к *p*-области создавался напылением алюминия, к *n*-области — электроискровой обработкой тыльной стороны *n*<sup>+</sup>-подложки с последующим нанесением металла.

4. *C-U*-характеристики измерялись мостовым методом по параллельной схеме замещения. Использовался трансформаторный мост; амплитуда синус-

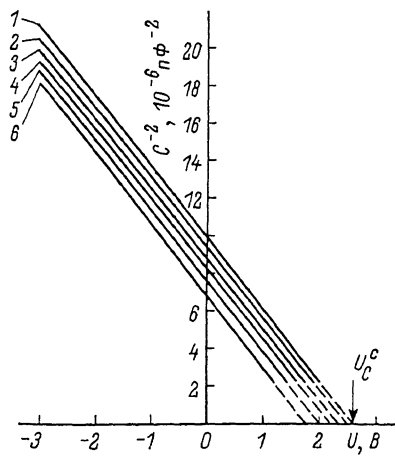


Рис. 1. *C-U*-характеристики SiC-6H *p-n*-структуры 1 при разных температурах. *T*, К: 1 — 293, 2 — 400, 3 — 500, 4 — 600, 5 — 700, 6 — 800.

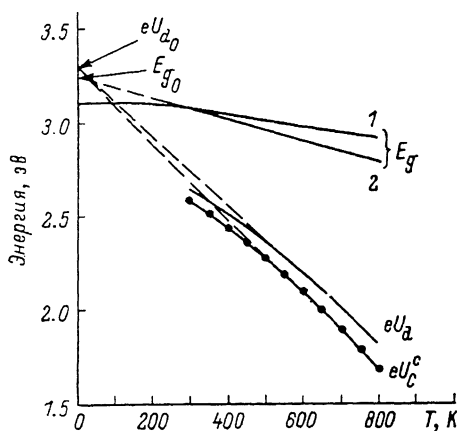


Рис. 2. Температурные зависимости емкостного напряжения отсечки  $U_c^C$  и диффузионной разности потенциалов  $U_d$  *p-n*-структуры 1, а также ширины запрещенной зоны  $E_g$  SiC-6H по данным работ [11] (1) и [12] (2).

соидального сигнала не превышала 100 мВ, частота варьировалась в пределах  $10 \div 100$  кГц; погрешность измерений емкости не превышала 1 %.

Измерения проводились в интервале температур от 293 до 800 К с шагом 50 град.

5. Для изучения были отобраны *p-n*-структуры, у которых измеряемая емкость не зависела от частоты до 100 кГц и *C-U*-характеристики, построенные в координатах  $C^{-2}-U$ , были линейны во всем интервале напряжений и температур (рис. 1).

Поскольку измеряемая дифференциальная емкость изучаемых структур не зависела от частоты, она является истинной дифференциальной емкостью *p-n*-структуры [7]. То обстоятельство, что истинная дифференциальная емкость линейна в координатах  $C^{-2}-U$ , т. е.  $C = C_0 [U_c^C / (U_c^C - U)]^{1/2}$ , означает, что она является именно барьерной емкостью и что *p-n*-переход резкий ( $C_0$  — дифференциальная емкость при нулевом смещении,  $U_c^C$  — емкостное напряжение отсечки, получаемое экстраполяцией линейной зависимости  $C^{-2}-U$  к  $C^{-2}=0$ ). Следовательно, для определения электростатических параметров *p-n*-структуры из *C-U*-характеристики можно пользоваться теорией Шокли [8], согласно которой  $C_0 = S [e \epsilon N_B / (8\pi U_c^C)]^{1/2}$ , где приведенная концентрация доноров и акцепторов  $N_B = (N_d^{(n)} - N_a^{(n)}) (N_a^{(p)} - N_d^{(p)}) / [(N_d^{(n)} - N_a^{(n)}) + (N_a^{(p)} - N_d^{(p)})]$  ( $N_d^{(n)} - N_a^{(n)}$  — концентрация нескомпенсированных доноров в *n*-области,  $N_a^{(p)} - N_d^{(p)}$  — концентрация нескомпенсированных акцепторов в *p*-

области); статическая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  для SiC-6H-структур с полем в слое объемного заряда, параллельным оси  $C$ , при дальнейших расчетах бралась равной  $10$  [9].

Емкостное напряжение отсечки  $U_c^0$  для разных структур оказалось в пределах  $2.5 \div 2.7$  В при комнатной температуре и с ростом температуры уменьшалось до 600 К нелинейно, а затем линейно (рис. 2). Для линейного участка  $U_c^0(T) = U_c^0 - \alpha_c T$ , где  $U_c^0$  — напряжение, получаемое экстраполяцией линейной зависимости  $U_c^0(T)$  к  $T = 0$  К; для разных структур  $U_c^0 = 2.9 \div 3.3$  В и  $\alpha_c = (1.6 \div 2.1) \cdot 10^{-3}$  В/град.

Отметим, что температурная зависимость  $U_c^0$  изученных в данной работе резких  $p$ - $n$ -переходов сильнее, чем линейных [6].

Удельная емкость при нулевом смещении  $C_0/S$  для разных структур составляет  $(4 \div 7) \cdot 10^4$  пФ/см<sup>2</sup> (293 К) и слабо увеличивается с ростом температуры.

Приведенная концентрация  $N_B$ , определенная по наклону  $C-U$ -характеристик, находится в пределах  $(0.8 \div 1.6) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> и практически не зависит от температуры.

Ширина слоя объемного заряда при нулевом смещении  $W_0$  ( $W_0 = \epsilon S / 4\pi C_0$ ) для разных структур составляет  $0.1 \div 0.2$  мкм (293 К) и слабо уменьшается с ростом температуры.

Напряженность электрического поля в максимуме распределения при нулевом смещении  $E_{m0}$  ( $E_{m0} = 2U_c^0/W_0$ ) находится в пределах  $(2.5 \div 3.0) \cdot 10^5$  В/см (293 К) и слабо уменьшается в ростом температуры.

Численные значения электростатических параметров трех  $p$ - $n$ -структур представлены в таблице.

Электростатические параметры трех SiC-6H-структур с резким  $p$ - $n$ -переходом

№ структуры	$10^{-3} \frac{S}{\text{см}^2}$	$T, \text{ К}$	$C_0, \text{ пФ}$	$10^4 \frac{C_0/S}{\text{пФ/см}^2}$	$U_c^0, \text{ В}$	$10^{17} \frac{N_B}{\text{см}^{-3}}$	$10^{-4} \frac{W_0}{\text{см}}$	$10^5 \frac{E_{m0}}{\text{В/см}}$	$U_d, \text{ В}$
1	4.8	293	318	6.6	2.58	1.6	0.13	4.0	2.63
		650	358	7.5	1.97		0.12	3.4	2.07
		800	392	8.2	1.77		0.11	3.3	1.91
2	4.4	293	190	4.3	2.71	0.9	0.18	2.9	2.76
		650	228	5.2	2.0		0.15	2.6	2.11
3	4.4	293	184	4.2	2.45	0.8	0.19	2.6	2.5
		650	220	5.0	1.9		0.16	2.3	2.0

6. Емкостное напряжение отсечки  $U_c^0$  (та часть диффузионной разности потенциалов, которая характеризует изменение электростатического потенциала на практически полностью обедненном слое объемного заряда) связано с диффузионной разностью потенциалов на всем барьере  $U_d$  соотношением  $U_d = U_c^0 + 2kT/e$ , где  $2kT/e$  учитывает размытие распределения плотности объемного заряда на границе слоя объемного заряда с нейтральными областями (эта поправка к теории Шокли введена в [10]). Таким образом,  $U_d = U_{d0} - \alpha_d T$ , где  $U_{d0} = U_c^0$ ,  $\alpha_d = \alpha_c - 2k/e$ ; для разных структур  $U_{d0} = 2.9 \div 3.3$  В и  $\alpha_d = (1.4 \div 1.9) \cdot 10^{-3}$  В/град.

Сравним температурные зависимости диффузионной разности потенциалов  $U_d$  и ширины запретной зоны  $E_g$  (рис. 2), учитывая, что  $U_d$  связана с  $E_g$  и химическими потенциалами электронов в  $n$ -области  $\chi_c^{(n)}$  и дырок в  $p$ -области  $\chi_h^{(p)}$   $p$ - $n$ -структуры соотношением  $eU_d = E_g - \chi_c^{(n)} - \chi_h^{(p)}$ .

Температурная зависимость  $E_g$  SiC-6H (рис. 2) построена по результатам работ [11, 12], в которых по спектрам поглощения света была определена температурная зависимость так называемой экситонной ширины запретной зоны  $E_{g\alpha}$ ; истинная ширина запретной зоны  $E_g = E_{g\alpha} + E_x$ , где энергия связи свободного экситона  $E_x = 0.078$  эВ [13]. Зависимость  $E_g(T)$  при  $T > 350$  К практически линейная:  $E_g(T) = E_{g0} - \alpha_g T$ , где  $E_{g0}$  находится экстраполяцией линейного участка  $E_g(T)$  к  $T = 0$  К. Численные значения  $E_{g0}$  и  $\alpha_g$ , получаемые на основа-

нии результатов [11] и [12] с учетом [13], разные:  $E_{g0}=3.18$  [11, 13] и  $3.26$  эВ [12, 13];  $\alpha_g=3.5 \cdot 10^{-4}$  [11] и  $5.5 \cdot 10^{-4}$  эВ/град [12].

Из сравнения  $U_d(T)$  типичной структуры 4 с  $E_g(T)$  (рис. 2) видно:

— значение  $U_{d0}=3.3$  эВ достаточно хорошо совпадает со значением  $E_{g0}=3.26$  эВ [12, 13];

— температурная зависимость  $U_d$  намного сильнее температурной зависимости  $E_g$ : для линейных участков  $U_d(T)$  и  $E_g(T)$  [12] отношение  $\alpha_d/\alpha_g=3.5$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что температурная зависимость диффузионной разности потенциалов SiC-6H-структур с резким  $p-n$ -переходом определяется главным образом температурным ходом химических потенциалов электронов в  $n$ -области и дырок в  $p$ -области, а не температурной зависимостью ширины запретной зоны, хотя она и вносит некоторый вклад.

Линейность зависимости  $U_d(T)$  при  $T > 600$  К свидетельствует о том, что начиная с  $T \simeq 600$  К почти все основные примесные центры ионизованы.

7. Энергетическая диаграмма SiC-6H-структур с резким  $p-n$ -переходом, которой должна была бы завершиться работа по определению электростатических свойств и параметров  $p-n$ -структуры, не построена по следующим причинам:

— во-первых, из-за трудностей определения концентрации нескомпенсированных примесных центров и степени их компенсации отдельно в каждой из нейтральных областей  $p-n$ -структуры;

— во-вторых, из-за незнания истинных значений эффективных масс плотности состояний в  $c$ - и  $v$ -зонах и энергии ионизации атомов алюминия (литературные данные имеют сильный разброс).

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Muench W. V., Pfaffender I. — J. Appl. Phys., 1977, v. 48, N 11, p. 4831—4833.
- [2] Ikeda M., Hayakawa T., Yamagiwa S., Matsunami H., Tanaka T. — J. Appl. Phys., 1979, v. 50, N 12, p. 8215—8225.
- [3] Константинов А. О., Литвин Д. П., Санкин В. И. Резкие структурно-совершенные карбидокремниевые  $p-n$ -переходы. — Письма ЖТФ, 1981, т. 7, в. 21, с. 1335—1339.
- [4] Дмитриев В. А., Иванов П. А., Морозенко Я. В., Попов И. В., Челноков В. Е. Карбид-кремниевые светодиоды с излучением в сине-фиолетовой области спектра. — Письма ЖТФ, 1985, т. 11, в. 4, с. 246—248.
- [5] Анкиев М. М., Лебедев А. А., Попов И. В., Стрельчук А. М., Суворов А. В., Сыркин А. Л., Челноков В. Е. Исследование вольтамперных характеристик диодных структур на основе карбида кремния. — ФТП, 1986, т. 20, в. 5, с. 844—848.
- [6] Иванов П. А., Качоровский В. Ю., Морозенко Я. В., Суворов А. В. Температурная зависимость емкости карбид-кремниевых  $p-n$ -переходов. — ФТП, 1987, т. 21, в. 7, с. 1257—1260.
- [7] Гольдберг Ю. А., Иванова О. В., Львова Т. В., Царенков Б. В. Влияние последовательного сопротивления на характеристику емкость—напряжение поверхностно-барьерной структуры. — ФТП, 1983, т. 17, в. 6, с. 1068—1073.
- [8] Shockley W. — Bell. Syst. Techn., 1949, v. 28, N 3, p. 435—489.
- [9] Patrik L., Choyke W. — Phys. Rev. B, 1970, v. 2, N 6, p. 2255—2256.
- [10] Garrett C. G. B., Brattain W. H. — Phys. Rev., 1955, v. 99, N 2, p. 376—387.
- [11] Choyke W., Patrik L. — Phys. Rev., 1962, v. 127, N 6, p. 1868—1877.
- [12] Пихтин А. Н., Яськов Д. А. Край основной полосы поглощения SiC-6H. — ФТТ, 1970, т. 12, в. 6, с. 1597—1604.
- [13] Санкин В. И. Структура экситонного края поглощения в 6H-SiC. — ФТТ, 1975, т. 17, в. 6, с. 1820—1822.