

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ $p^+ - n - n^+$ -СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПОЛИТИПА 6H

Аникин М. М., Лебедев А. А., Попов И. В., Растегаев В. П.,  
Стрельчук А. М., Сыркин А. Л., Таиров Ю. М., Цветков В. Ф.,  
Челноков В. Е.

Изготовлены эпитаксиальные  $p^+ - n - n^+$ -структуры на основе карбида кремния политипа 6H с напряжением пробоя свыше 300 В и на прямые токи  $\sim 1$  А ( $j \sim 200$  А/см<sup>2</sup>) при напряжениях  $\sim 4$  В, работоспособные до температур  $\sim 800$  К. Обратные токи при температуре 720 К и напряжении  $\sim 300$  В составляют  $\sim 10^{-6}$  А.

Эффективное время жизни неосновных носителей в слое объемного заряда при высоких температурах в предположении модели Шокли—Нойса—Саа составляет  $\sim 10$  нс.

В работах [1, 2] приведены результаты исследований  $p^+ - n - n^+$ -структур на основе эпитаксиального карбида кремния с  $p - n$ -переходом, сформированным методом ионной имплантации алюминия. Значительная неравновесность процесса имплантации является причиной образования большого количества дефектов, которые могут ухудшать параметры  $p^+ - n - n^+$ -структур. Эпитаксиальные  $p^+ - n - n^+$ -структуры [3], в которых  $n$ - и  $p^+$ -области были сформированы сублимационным сэндвич-методом, исследовавшиеся ранее, имели большие токи утечки при напряжениях свыше 50 В. Прямые ВАХ в области больших плотностей токов и температурные зависимости ВАХ не приводились.

В данной работе приведены результаты исследований электрических характеристик  $p^+ - n - n^+$ -структур с  $p - n$ -переходом, сформированным сублимационным сэндвич-методом.  $n - n^+$ -Структуры были получены аналогично [1, 2]. Выращивание осуществлялось на грани (0001) Si монокристаллов карбида кремния. Концентрация примесей в  $n$ -области составляла  $N_d - N_n \sim 5 \cdot 10^{16} \div 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.  $p - n$ -Переходы формировались при температуре порядка 2100 К. В качестве легирующей примеси использовался алюминий. Непосредственно перед наращиванием  $p^+$ -области проводилось сублимационное травление  $n$ -базы аналогично [4]. Меза-структуры диаметром 0.3 ÷ 0.9 мм формировались реактивным ионно-плазменным травлением.

Вольтфарадные характеристики, измеренные на частотах 1 и 100 кГц, в координатах  $1/C^2 \sim U$  представляли собой прямые линии, что характерно для резких переходов. Напряжения емкостной отсечки при температурах 290 и 800 К составляли  $(2.55 \pm 0.05)$  и  $(1.53 \pm 0.05)$  В соответственно.

Исследовавшиеся структуры имели напряжение пробоя свыше 300 В. Аналогично [2] было получено два типа структур. Пробой в структурах первого типа был обратим и имел микроплазменный характер. Структуры второго типа пробивались по периферии. ВАХ структур второго типа восстанавливались после дополнительного травления меза-структур. Прямая ВАХ при напряжениях, превышающих контактную разность потенциалов, описывалась линейной зависимостью. На рис. 1, а, б приведены ВАХ полученных структур (диаметр меза-структуры 0.9 мм).

Прямая ветвь ВАХ структур той же площади в области малых токов приведена на рис. 2. В диапазоне температур 300 ÷ 720 К ВАХ имела два участка.

При температурах выше 370 К первый (нижний на рис. 2) участок ВАХ описывался зависимостью  $j_1 = j_{01} \exp(qU/\beta_1 kT)$ . В диапазоне температур 370 ÷ 640 К характеристический коэффициент  $\beta_1$  был близок к 2. При дальнейшем увеличении температуры  $\beta_1$  уменьшался и составлял  $\sim 1.65$  при температуре 720 К. При этом зависимость предэкспоненциального множителя  $j_{01}$  от температуры была экспоненциальной  $j_{01} = j'_{01} \exp(-E_{A1}/kT)$  с энергией активации  $E_{A1} \sim 1.4 \div 1.5$  эВ, близкой к половине ширины запрещенной зоны для 6H-SiC. Второй (верхний на рис. 2) участок прямой ВАХ во всем исследованном диапазоне температур описывался зависимостью  $j_2 = j_{02} \exp(qU/\beta_2 kT)$ . Характеристический коэффициент  $\beta_2$  практически не зависел от температуры и составлял  $\sim 1.5$ . Предэкспоненциальный множитель  $j_{02}$  аналогично  $j_{01}$  зависел от температуры экспоненциально с энергией активации  $E_{A2} \sim 2$  эВ.

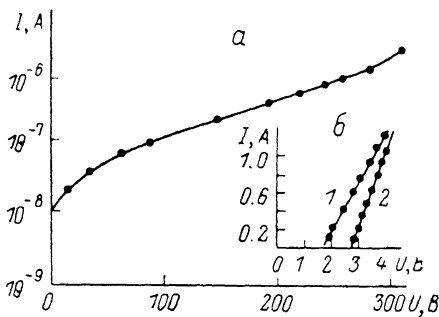


Рис. 1. ВАХ  $p^+ - n - n^+$ -структуры.  
 а — обратная ветвь,  $T \approx 720$  К; б — прямая ветвь,  $T$ , К: 1 — 720, 2 — 300.

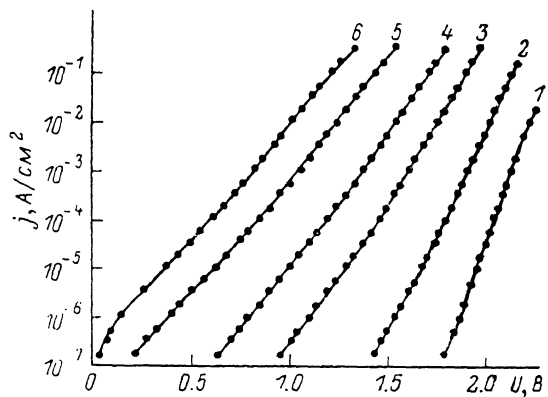


Рис. 2. Прямая ветвь ВАХ  $p^+ - n - n^+$ -структуры.  
 $T$ , К: 1 — 290, 2 — 370, 3 — 470, 4 — 540, 5 — 640, 6 — 720.

Обратные токи до пробоя при комнатной температуре составляли  $\sim 10^{-9}$  А и обуславливались утечками по периферии меза-структур. При температурах 700 ÷ 800 К до напряжений 60 В обратный ток зависел от температуры экспоненциально с энергией активации  $\sim 1.5$  эВ (рис. 3). Обратная ветвь ВАХ описывалась при этом зависимостью  $I \sim U^n$ . Величина  $n$  уменьшалась при повышении температуры от 0.9 до 0.7.

Если предположить, что при высоких температурах механизм протекания тока при малых обратных напряжениях определяется в основном рекомбинационно-генерационными процессами в ОПЗ через уровень вблизи середины запрещенной зоны и описывается теорией Шокли—Нойса—Саа, можно оценить минимально возможное эффективное время жизни неосновных носителей заряда из соотношения

$$\tau = qn_i w / j,$$

где  $q$  — заряд электрона,  $n_i$  — собственная концентрация,  $w$  — ширина слоя объемного заряда,  $j$  — плотность обратного тока. Оценка времени жизни при температуре  $\sim 720$  К дает величину порядка 10 нс.

Параметры ГЦ, обнаруженных в  $p^+ - n - n^+$ -структурах

ГЦ	Положение уровня $E_i$ , эВ	Сечение захвата		Эффективная концентрация
		$S_p$ , см <sup>-2</sup>	$S_n$ , см <sup>-2</sup>	$N_{эфф}$ , см <sup>-3</sup>
1	$E_v + 0.28$	$2 \cdot 10^{-14}$		$1.5 \cdot 10^{15}$
2	$E_v + 0.66$	$1 \cdot 10^{-15}$		$(5 \div 6) \cdot 10^{15}$
3	$E_c - 1.06$		$6 \cdot 10^{-15}$	$4 \cdot 10^{13}$

Механизм протекания тока на втором участке прямой ВАХ в области малых токов формально не противоречит теории рекомбинации через двухуровневый центр в слое объемного заряда [5].

Методом DLTS исследовались глубокие центры (ГЦ) в  $p^+ - n - n^+$ -структурах с концентрацией примесей в базе  $N_d - N_a \sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Определение параметров ГЦ в нижней половине запрещенной зоны проводилось при инжекции дырок в  $n$ -область. Было обнаружено три типа ГЦ, параметры которых приведены в таблице. DLTS спектр приведен на рис. 4. Энергия ионизации центра 1 совпадает с литературными данными для уровня алюминия. Центр 2 описан в [6]. Кроме того, наблюдалась бесструктурная релаксация емкости в диапазоне  $190 \div 240 \text{ К}$ , что, возможно, связано с наличием полосы уровней в нижней половине запрещенной зоны в диапазоне энергий  $0.4 \div 0.5 \text{ эВ}$ .

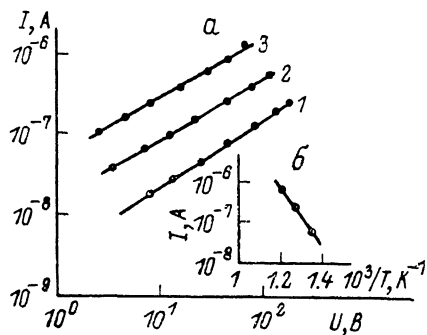


Рис. 3.

$\alpha$  — обратная ветвь ВАХ  $p^+ - n - n^+$ -структуры,  $T$ , К: 1 — 740, 2 — 780, 3 — 820; б — зависимость обратного тока от температуры.

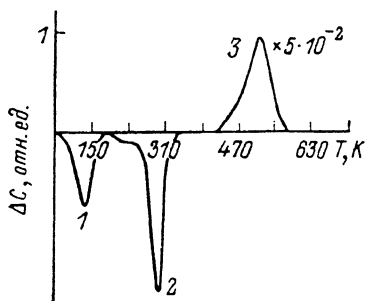


Рис. 4. DLTS спектр  $p^+ - n - n^+$ -структуры.

В заключение авторы благодарят Б. В. Царенкова и В. В. Евстропова за обсуждение результатов работы.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Аникин М. М., Лебедев А. А., Попов И. В., Севастьянов В. Е., Сыркин А. Л., Суворов А. В., Челноков В. Е., Шпынев Г. П. Выпрямительный диод на основе карбида кремния. — Письма ЖТФ, 1984, т. 10, в. 17, с. 1053—1056.
- [2] Аникин 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—847.
- [3] Веренчикова Р. Г., Водаков Ю. А., Литвин Д. П., Мохов Е. Н., Рамм М. Г., Санкин В. И., Остроумов А. Г., Соколов В. И. Электрофизические характеристики  $6H\text{-SiC } p - n$ -переходов с эпитаксиальным  $p^+$  (Al)-слоем. — ФТП, 1982, т. 16, в. 11, с. 2029—2032.
- [4] Константинов А. О., Литвин Д. П., Санкин В. И. Резкие структурно-совершенные карбид-кремниевые  $p - n$ -переходы. — Письма ЖТФ, 1981, т. 7, в. 21, с. 1335—1339.
- [5] Евстропов В. В., Киселев К. В., Петрович И. Л., Царенков Б. В. Ток, обусловленный рекомбинацией через многоуровневый центр в слое объемного заряда  $p - n$ -структур. — ФТП, 1984, т. 18, в. 10, с. 1852—1857.
- [6] Аникин М. М., Лебедев А. А., Сыркин А. Л., Суворов А. В. Исследование глубоких уровней в SiC методами емкостной спектроскопии. — ФТП, 1985, т. 19, в. 1, с. 114—117.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 23.02.1987  
Принята к печати 21.08.1987