

06;12

©1995 г.

ХАРАКТЕРИСТИКИ SiC СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ДИАПАЗОНА ТЕМПЕРАТУР 20–300 °С

*А.М.Стрельчук, М.М.Аникин, А.Н.Андреев, В.В.Зеленин,
А.А.Лебедев, М.Г.Растегаева, Н.С.Савкина, А.П.Сыркин,
В.Е.Челноков, Л.Н.Шестопалова*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 1 ноября 1994 г.)

Представлены характеристики корпусированных стабилизаторов напряжения, работоспособных в диапазоне температур 20–300 °С, изготовленных на основе 6Н-SiC *p-n*-структур. Напряжения стабилизации находятся в диапазоне от 4 до 50 В, токи стабилизации 1–100 мА. Дифференциальное сопротивление при токе 100 мА не более 30 Ом. Температурный коэффициент напряжения стабилизации не более $6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Введение

Достоинством приборов на основе SiC является их работоспособность в широком диапазоне температур (до 500 °С и более), что обусловлено главным образом большой шириной запрещенной зоны полупроводника (3 эВ для 6Н-SiC) и высокой теплопроводностью (4 Вт/см · град при 300 °С).

Лучшие результаты при изготовлении приборных структур в настоящее время достигнуты при использовании эпитаксиальных технологий получения *p*- и *n*-слоев. В частности, на основе сублимационной эпитаксии в открытой ростовой системе (СЭ) [1] изготовлены диоды [2] и полевые транзисторы [3], обладающие характеристиками, близкими к предельным, и работоспособные в диапазоне температур 20–500 °С.

Большинство приборов на основе SiC в настоящее время изготавливается в лабораторных условиях. Эти приборы не корпусированы и с технической точки зрения представляют интерес как иллюстрация потенциальных возможностей корпусированных приборов.

Ранее в работах [4,5] обращалось внимание на возможность использования SiC *p-n*-структур в качестве ограничителей напряжения. В настоящей работе сообщается о корпусированных SiC стабилизаторах напряжения на основе *p-n*-структур, изготовленных методом СЭ.

Метод изготовления и конструкция стабилитронов

Стабилитроны с напряжениями стабилизации U_{st} до 10 В изготавливались на основе последовательно соединенных $p-n$ -структур, работающих при прямом смещении. Для стабилизации напряжения в области от 20 до 50 В использовались $p-n$ -структуры, работающие в режиме пробоя при обратном смещении.

Для изготовления стабилитронов применялись структуры типа p^+-n-n_s и p^+-n_s . Подложки n_s вырезались из монокристаллов 6H-SiC, выращенных методом Лели. После сублимационного травления на грани (0001) Si подложки методом СЭ выращивались n - и p^+ -слои или только p^+ -слой. Толщины p^+ - и n -слоев составляли 3–5 мкм, толщины подложек — 450 мкм. Омические контакты к подложке изготавливались на основе вольфрама, к p^+-SiC — на основе сплава (W/Au)Al [6]. Меза-структуры площадью $1-3 \cdot 10^{-3}$ см² формировались методом реактивного ионно-плазменного травления [7].

Затем проводились тестирование и отбор структур с требуемой степенью легирования базы. Все $p-n$ -структуры являлись резкими, о чем свидетельствует линейность вольт-фарадных характеристик в координатах $C^{-2}-V$. Концентрация нескомпенсированных доноров N_d-N_a в подложке не превышала $3-5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Среди p^+-n-n_s -структур отбирались структуры с $N_d-N_a > 1.5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ в n -слое. Концентрация нескомпенсированных акцепторов в p^+ -слое $N_a-N_d \sim 10^{19}$ см⁻³.

Подложка с меза-структурами разрезалась на части (чипы), содержащие одну или две меза-структуры с площадью чипа, примерно вдвое большей площади меза-структур. Затем производился отбор чипов с $p-n$ -структурами, обладавшими минимальными токами утечки и минимальными последовательными сопротивлениями. Разброс напряжений стабилизации не превосходил $\pm 7\%$. Чипы припаивались к основанию металлостеклянного никелированного корпуса ТО-66 припоем на основе эвтектического сплава кремния с алюминием при температуре около 600 °С. При последовательном соединении нескольких $p-n$ -структур для электрической изоляции использовалась теплопроводная керамика. Электрическое соединение верхнего контакта меза-структуры с подложкой или основанием корпуса осуществлялось ультразвуковой сваркой алюминиевой проволоочки диаметром 30–100 мкм. Крышка корпуса приваривалась к основанию корпуса в инертной атмосфере азота. Использование металлостеклянного корпуса определило верхний предел температуры окружающей среды величиной около 300 °С, так как при более высоких температурах значительно возрастали утечки между корпусом и выводом (при охлаждении утечки уменьшались, т. е. эффект обратим).

Параметры стабилитронов

Параметры стабилитронов представлены в таблице, ряд примеров $I-V$ -характеристик показан на рис. 1.

Рассмотрим подробнее некоторые характеристики стабилизаторов напряжения в диапазоне 20–50 В. Напряжения пробоя U_b $p-n$ -структур изменяются от 50 до 20 В при изменении N_d-N_a от $1.5 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Следовательно, напряженности полей пробоя E_b составляют $7-5 \cdot 10^6$ В/см и близки к максимальным величинам E_b , ранее

Характеристики стабилизаторов напряжения

$U_{st}, \text{В}$ (при токе 10 мА)		$\alpha_{st}, \text{K}^{-1}$ (при токе 10 мА) не более чем	$R_d, \text{Ом}$ (при токах 1, 10, 100 мА) не более чем					
20 °С	300 °С		20 °С			300 °С		
			1 мА	10 мА	100 мА	1 мА	10 мА	100 мА
47	45	$-2 \cdot 10^{-4}$	1500	250	25	1500	200	23
33	34	$+2 \cdot 10^{-4}$	400	45	15	1300	50	20
23	23	$-2 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-5}$	1400	25	15	1700	45	10
7.6	6.3	$-6 \cdot 10^{-4}$	150	20	17	200	25	21
5.0	4.1	$-6 \cdot 10^{-4}$	50	10	5	80	15	8

П р и м е ч а н и е. U_{st} — напряжение стабилизации, α_{st} — температурный коэффициент напряжения стабилизации, R_d — дифференциальное сопротивление.

наблюдавшимся при указанных $N_d - N_a$ [8]. В структурах, описанных в работе [8], пробой был однородным. В наших структурах пробой был микроплазменным, однако экспоненциальный или близкий к экспоненциальному рост тока с увеличением напряжения (рис. 2) свидетельствует о близких (практически одинаковых) напряжениях включения отдельных микроплазм, а уменьшение дифференциального сопротивления $p-n$ -структур до 10–20 Ом при увеличении тока до 100 мА говорит о пробое по значительной части площади структуры (сопротивление одиночной микроплазмы в низковольтных SiC $p-n$ -структурах около 10–20 кОм [9,10]). Температурный коэффициент напряжения (ТКН) пробы α_b (т.е. и температурный коэффициент напряжения стабилизации α_{st}) был как отрицательным, так и положительным, а также практически нулевым (см. таблицу, рис. 2, б), максимальная величина α_{st} не превышала $2 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$. Как известно, в 6H-SiC $p-n$ -структурах с данной ориентацией (электрическое поле E направлено вдоль гексагональной оси C кристалла) наблюдались как отрицательный [8], так и положительный и знакопеременный [9,10] ТКН лавинного пробы. По-видимому, характер пробы рассматриваемых стабилизаторов близок достаточно сложному характеру пробы одиночных микроплазм в аналогичных $p-n$ -структурах, исследовавшихся в работах [9,10]. Дифференциальное сопротивление в области стабилизации или не зависит от температуры, или несколько растет с температурой (рис. 2, в).

Последовательное соединение $p-n$ -структур позволило реализовать низковольтные стабилизаторы напряжения. Так, соединение двух $p-n$ -структур дает $U_{st} \approx 5 \text{В}$, трех — $U_{st} \approx 7.5 \text{В}$ ($I = 10 \text{мА}$, температура комнатная). Рост температуры до 300 °С приводит к уменьшению U_{st} до 4.0–4.1 и 6.1–6.3 В для стабилизаторов на основе двух и трех $p-n$ -структур соответственно (рис. 3, 4, а, $\alpha_{st} \approx -6 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$). Температурная зависимость дифференциального сопротивления рассматриваемых стабилизаторов близка температурной зависимости удельного сопротивления n -SiC (рис. 4, б). $I-V$ -характеристика стандартна для прямосмещенных SiC $p-n$ -структур: экспоненциальный рост тока с увеличением напряжения сменяется омической зависимостью $I(V)$ [2]. Сопротивление стабилизаторов определяется сопротивлением под-

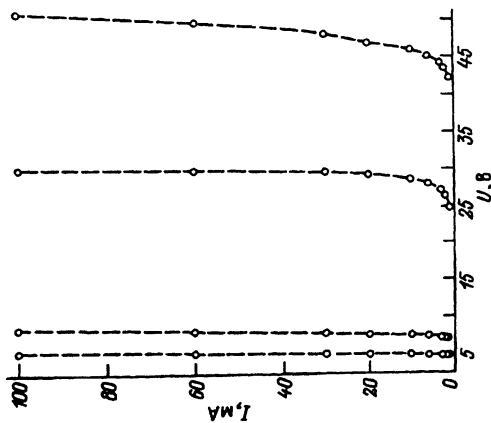


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики стабилизаторов напряжения с различными напряжениями стабилизации.

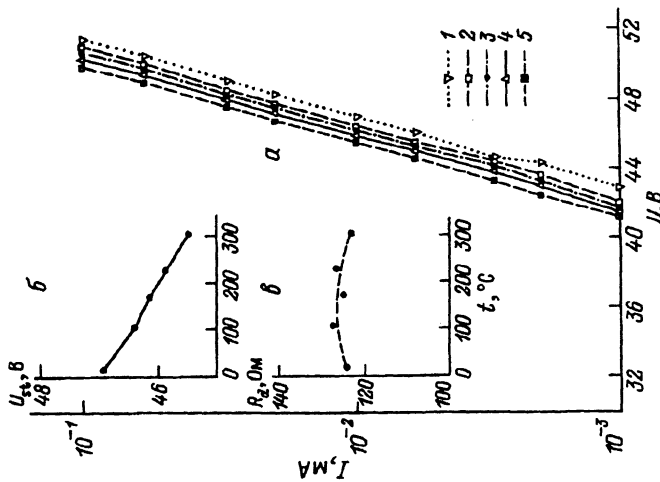


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики стабилизатора напряжения, работающего в режиме лавинного протекания $p-n$ -структуры, при температурах $t = 18$ (1), 106 (2), 172 (3), 228 (4), 306 °С (5) (а), а также температурные зависимости при токе 10 мА напряжения стабилизации U_{st} (б) и дифференциального сопротивления R_d (в).

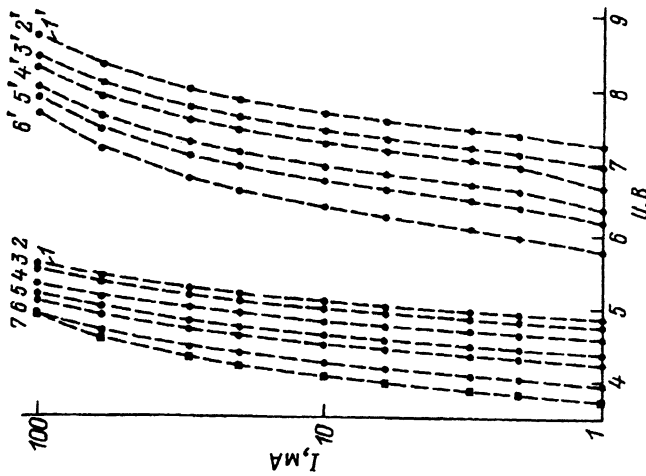


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики стабилизаторов напряжения, изготовленных на основе двух (1-7) и трех (1'-6') $p-n$ -структур, соединенных последовательно и работающих при прямом смещении.

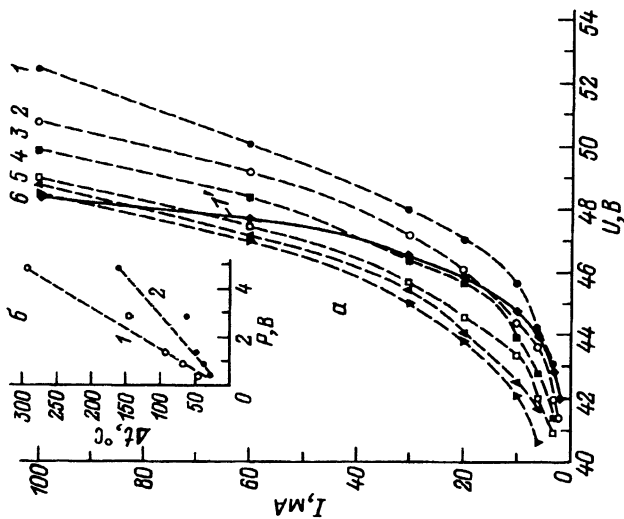


Рис. 5.

(а) — вольт-амперные характеристики стабилизатора напряжения, измеренные на импульсах длительностью 8 мкс, частотой 10 Гц (1-6) и на постоянном токе (1'); температура окружающей среды $t = 20$ (1), 70 (2), 130 (3), 165 (4), 235 (5), 310 °С (6); (б) — перегрев Δt р-п-перехода относительно окружающей среды (1) и относительно корпуса (2) в зависимости от рассеиваемой мощности P .

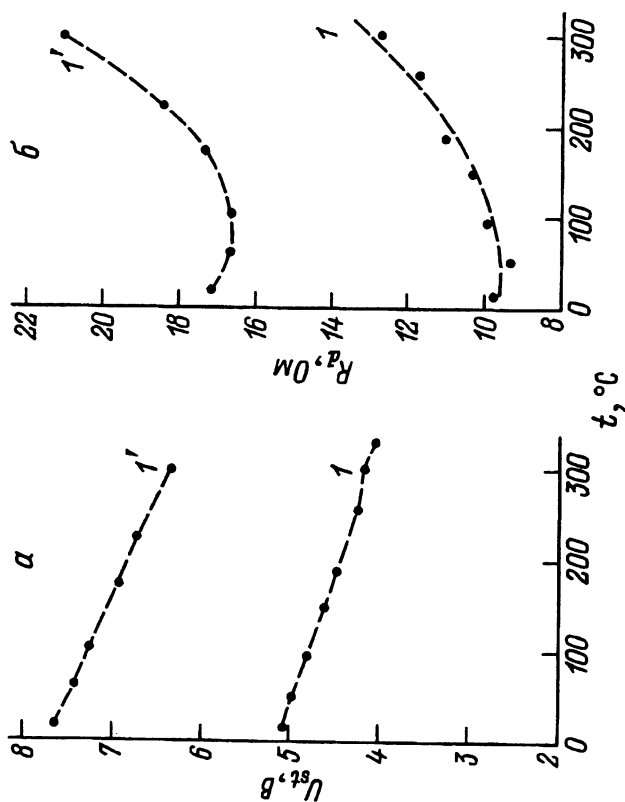


Рис. 4. Температурные зависимости напряжения стабилизации U_{st} (а) и дифференциального сопротивления R_d (б) при токе 10 мА стабилизаторов напряжения на основе двух (1) и трех (1') последовательно соединенных р-п-структур (рис. 3).

ложки и контактов. Соединением большего числа структур можно получить другие, кратные 2.5 В, напряжения стабилизации [5].

Измерение вольт-амперных характеристик на коротких импульсах (за время которых структура не успевает заметно разогреться) позволило оценить тепловые характеристики приборов. Тепловое сопротивление (R_t) SiC структура-корпус примерно 30 К/Вт, а тепловое сопротивление SiC структура-окружающая среда примерно 60 К/Вт (рис. 5). Перегрев структуры, работающей на постоянном токе, при максимальной рассеиваемой мощности 5 Вт — около 300 град.

Заключение

При комнатной температуре аналогами рассмотренных SiC стабилитронов являются Si стабилитроны средней мощности [11]. Сравнение параметров показывает, что SiC стабилитроны практически не уступают Si стабилитронам по величинам дифференциального сопротивления и в большинстве случаев превосходят по величине ТКН стабилизации (примерно соответствуют прецизионным Si стабилитронам). Максимальные токи Si стабилитронов снижаются с ростом температуры окружающей среды; по этому критерию, а также по величине диапазона рабочих температур SiC стабилитроны вне конкуренции (использование металлокерамических корпусов позволит значительно расширить диапазон рабочих температур). Из-за значительно меньших, чем в Si, времен жизни неравновесных носителей заряда частотные характеристики SiC стабилитронов на основе прямосмещенных $p-n$ -структур также должны быть лучше частотных характеристик, аналогичных по конструкции Si стабилитронов.

Авторы благодарят П.А.Иванова — одного из инициаторов работы по изготовлению стабилитронов, А.Р.Терру, В.Е.Александрову, Т.П.Самсонову за помощь при корпусировании структур.

Работа выполнена при частичной поддержке НПО ГЕРС (г. Тверь) и Министерства обороны США.

Список литературы

- [1] Аникин М.М., Гусева Н.Б., Дмитриев В.А., Сыркин А.Л. // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. материалы. 1984. Т. 10. С. 1768–1770.
- [2] Аникин М.М., Лебедев А.А., Попов И.В. и др. // ФТП. 1988. Т. 22. Вып. 2. С. 298–300.
- [3] Аникин М.М., Лебедев А.А., Растегаева М.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 10. С. 16–19.
- [4] Полтинников С.А., Водаков Ю.А., Ломакина Г.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 5. С. 261–264.
- [5] Дмитриев В.А., Иванов П.А., Попов И.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 13. С. 773–776.
- [6] Anikin M.M., Rastegaeva M.G., Syркин A.L., Chuiko I.V. // Proc. of the III Intern. Conf. Amorphous and Crystalline Silicon Carbide / Ed. G.L.Harris, M.G.Spencer, C.Y.Yang. Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 1992. P. 183–189.
- [7] Попов И.В., Сыркин А.Л., Челноков В.Е. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 2. С. 240–244.
- [8] Дмитриев А.П., Константинов А.О., Литвин Д.П., Санкин В.И. // ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 6. С. 1093–1098.
- [9] Аникин М.М., Левинштейн М.Е., Попов И.В. и др. // ФТП. 1988. Т. 22. Вып. 9. С. 1574–1579.
- [10] Кондратьев В.С., Попов И.В., Стрельчук А.М., Тиранов М.Л. // ФТП. 1990. Т. 24. Вып. 4. С. 647–652.
- [11] Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник / Под ред. Н.Н.Горюнова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 744 с.