

©1995 г.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ 6H-SiC ЭПИТАКСИАЛЬНО-ДИФФУЗИОННЫХ p - n -СТРУКТУР

А.А.Лебедев, А.Н.Андреев, А.А.Мальцев, М.Г.Растегаева,
Н.С.Савкина, В.Е.Челноков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 25 ноября 1994 г. Принята к печати 13 декабря 1994 г.)

Показано, что при диффузии бора в 6H-SiC эпитаксиальные p - n -структуры можно значительно повысить напряжение объемного пробоя и уменьшить вероятность поверхностного пробоя последних. Обнаружено, что выбор оптимальной температуры диффузии позволяет также сохранить достаточно малое омическое сопротивление диода при включении в прямом направлении. Проведено исследование величин пробоя 6H-SiC эпитаксиально-диффузионных p - n -структур в широком диапазоне температур.

Известно, что карбид кремния является перспективным материалом для создания мощных высокотемпературных приборов, в том числе высоковольтных выпрямительных диодов [1]. Получению и исследованию приборов такого типа было посвящено большое количество работ [2-7]. Качественные высоковольтные выпрямительные диоды характеризуются оптимальным сочетанием нескольких факторов, в том числе величинами пробивного напряжения (U_{br}) и омического сопротивления диода при включении в прямом направлении (R).

Анализ литературных данных показывает, что создание SiC-диодов с $U_{br} > 400-500$ В раньше, как правило, приводило к увеличению значения R [2,3,6,7] (в частности, из-за их малых рабочих площадей). Так в [7], при $U_{br} \sim 2000$ В величина R составляла порядка 150 Ом. Другой проблемой являлось то, что при обратных напряжениях $> 300-400$ В у части образцов [4-5] (или даже у большинства [7]) пробой развивался по поверхности меза-структуры. Рекордные же значения U_{br} [7] были получены при комнатной температуре при помещении образцов в диэлектрическую жидкость (FluorientTM FC-77) с высоким значением напряженности электрического поля пробоя.

В ходе настоящей работы для оптимизации рабочих параметров SiC эпитаксиальных p - n -структур, а именно для увеличения значения U_{br} при минимальном увеличении R , проводилась диффузия бора (т.е. были получены эпитаксиально-диффузионные p - n -структуры).

Известно, что бор образует в $6H$ -SiC глубокие акцепторные уровни $E_v + 0.35$ эВ $^{[8-9]}$. Кроме того бор обладает высокой растворимостью $\sim 10^{20}$ см $^{-3}$ и является одной из наиболее быстро диффундирующих примесей в SiC $^{[10]}$. Ранее в $^{[2,3]}$ диффузия бора использовалась для создания охранных колец, что, по мнению авторов, уменьшало вероятность образования микроплазм на периферии высоковольтных SiC-диодов. Охранные кольца готовились кратковременной диффузией бора при $T_d \sim 2000^\circ\text{C}$. Диффузия проводилась в кристалл с уже приготовленными меза-структурами.

В настоящей работе эпитаксиально-диффузионные диоды были получены импульсной диффузией бора (время диффузии ~ 8 мин) в $6H$ -SiC- p - n -структуры, выращенные сублимационной эпитаксией в открытой ростовой системе $^{[5]}$. Однако в отличие от $^{[2,3]}$ диффузия проводилась в n -базу через слой p -типа проводимости до формирования меза-структур методом плазмохимического травления (ПХТ) $^{[11]}$. В результате удавалось одновременно решать две задачи.

1. Увеличить напряжение пробоя диодов при минимальном увеличении сопротивления.

2. Избежать поверхностного пробоя по периферии меза-структуры.

Как известно, диффузия акцепторной примеси в материал n -типа (диффузия бора в n -SiC) приводит к компенсации полупроводника (уменьшению $N_d - N_a$) и, следовательно, к увеличению напряжения пробоя. Как было показано в $^{[12]}$, диффузионная длина дырок в исследованных структурах составляет ~ 0.1 – 0.3 мкм. Следовательно, возможна модуляция компенсированных слоев толщиной 0.3 – 0.5 мкм, и значительного ухудшения прямой ветви вольт-амперной характеристики не происходит. Кроме того, ранее было показано, что введение примеси бора в n -SiC не приводит к уменьшению времени жизни дырок $^{[13]}$.

В высоковольтных кремниевых p - n -структурах для снижения вероятности поверхностного пробоя применяют механическое профилирование (см., например $^{[14]}$). При этом меза-структура имеет форму усеченного конуса. В результате напряженность электрического поля на поверхности меньше и пробой развивается в объеме полупроводника.

Для SiC механическое профилирование затруднено, так как из-за высокой химической стойкости SiC травление грани (0001)Si возможно только плазмохимическим методом. Использование ПХТ не дает возможности получать сильно растянутые фаски, что не позволяет устранить поверхностный пробой SiC p - n -структур путем профилирования. В наших экспериментах форма фаски была близка к цилиндрической. Кроме того, поверхность полупроводника сильно нарушена и не обладает электрической нейтральностью. Сочетание этих двух условий приводит к развитию пробоя при значительно меньших напряжениях, чем это следует ожидать исходя из значений концентрации примеси в базе. Пробой в этом случае носит поверхностный характер, начинается от значений тока 10^{-6} – 10^{-8} А и необратим.

После диффузии бора концентрация нескомпенсированной примеси увеличивается в базе при увеличении расстояния от металлургической границы p - n -перехода. При этом слой полупроводника, находящийся у основания меза-структуры, будет всегда слабее легирован,

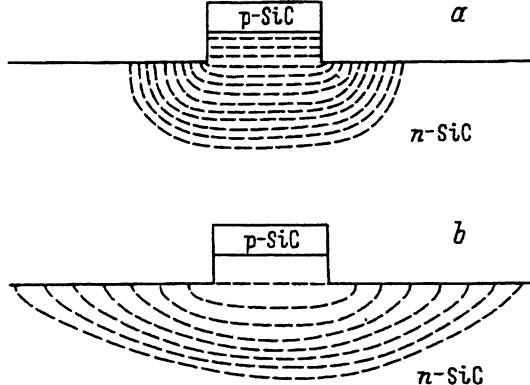


Рис. 1. Схематическое изображение распределения электрического поля в исследованных диодах. *a* — эпитаксиальная *p-n*-структура. *b* — эпитаксиально-диффузионная *p-n*-структура.

чем более глубокие слои подложки. Поэтому толщина слоя объемного заряда у поверхности будет больше (а напряженность электрического поля меньше), чем в объеме, что сильно снижает вероятность поверхностного пробоя (рис. 1).

Экспериментальные значения напряжения пробоя *p-n*-структур после диффузионной обработки температуры, при которой проводилась диффузия, а также концентрация $N_d - N_a$ в исходных эпитаксиальных слоях, сведены в таблицу. В таблице также представлены расчетные напряжения объемного пробоя, которые, согласно литературным данным [2,3], имели бы *p-n*-структуры, сформированные на основе исходных эпитаксиальных слоев без проведения диффузии бора. Как видно из таблицы, после проведения диффузии $U_{br.exp} > U_{br.theor}$. В среднем увеличение пробивного напряжения составляло 4 раза, а в отдельных случаях оно увеличивалось более чем на порядок. Кроме того, в подавляющем большинстве диодов, прошедших диффузию бора, наблюдался объемный пробой и отсутствовал поверхностный пробой.

№ образца	T_d , °C	Концентрация $N_d - N_a$ в эпитаксиальных слоях до диффузии бора, см ⁻³	$U_{br.theor}$, В	$U_{br.exp}$, В	$\frac{U_{br.exp}}{U_{br.theor}}$	Наличие участка S-образной ВАХ
1	1900	$5 \cdot 10^{17}$	100	150	1.5	-
2	2000	$1 \cdot 10^{17}$	70	350	5.0	-
3	2050	$5 \cdot 10^{17}$	100	150	1.5	-
4	2100	$3 \cdot 10^{17}$	170	300	1.76	-
5	2100	$4 \cdot 10^{17}$	140	600	4.28	+
6	2150	$2.4 \cdot 10^{18}$	40	680	17.0	-
7	2170	$1.4 \cdot 10^{18}$	60	60	1.0	-
8	2200	$2.6 \cdot 10^{18}$	35	170	4.95	-
9	2200	$5 \cdot 10^{17}$	100	250	2.5	+
10	2200	$6 \cdot 10^{17}$	90	550	6.11	+

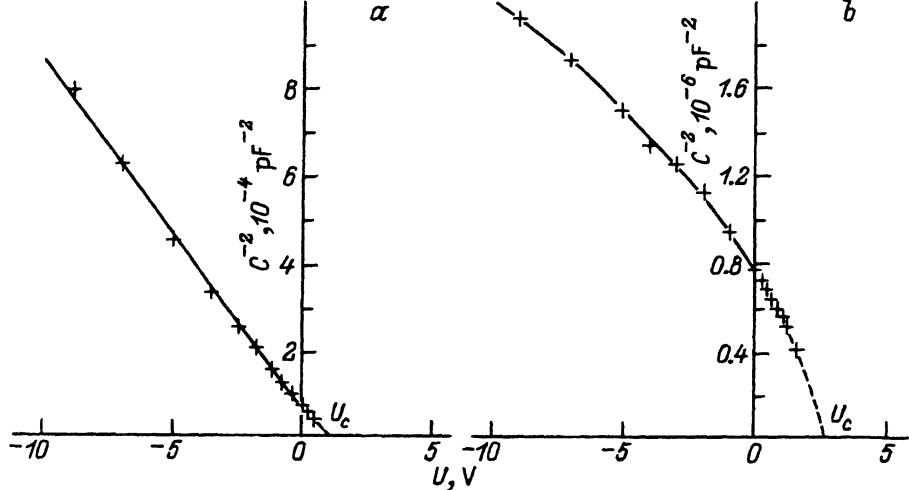


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики: а — эпитаксиального слоя n -типа проводимости, б — эпитаксиально-диффузионной p - n -структуры.

На рис. 2 представлены вольт-фарадные характеристики диода Шоттки, сформированного на поверхности эпитаксиального слоя до выращивания p -слоя и p - n -структуры после диффузии бора. Как видно из рис. 2, в полученном диоде в отличие от исходного эпитаксиального слоя наблюдается градиент концентрации основной легирующей примеси. На рис. 3 построены профили распределения примеси вблизи металлургической границы p - n -перехода и поверхности эпитаксиального слоя. Максимальное уменьшение концентрации $N_d - N_a$ в эпитаксиальном слое по сравнению с исходной наблюдалось у p - n -перехода и составляло ~ 30 раз, а при удалении в глубь базовой области на $1 \mu\text{м}$ от металлургической границы p - n -перехода уменьшение величины $N_d - N_a$ составляло около двух раз.

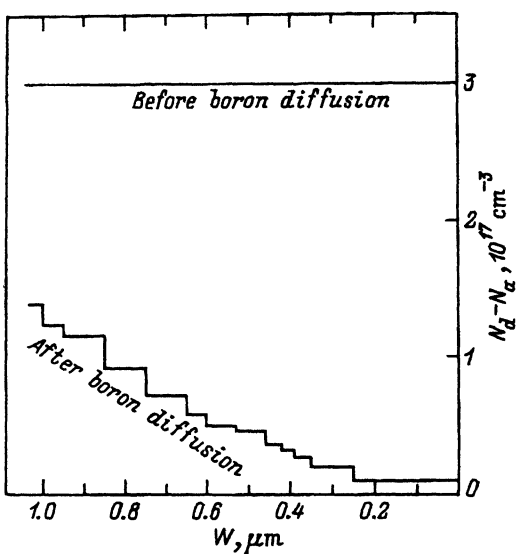


Рис. 3. Профили распределения основной донорной примеси в исходном эпитаксиальном слое и в n -базе, полученной на его основе эпитаксиально-диффузионной p - n -структуре.

Известно, что профиль диффузионного распределения бора в SiC в основном определяется поверхностной концентрацией примеси в процессе диффузии, временем диффузии и температурой диффузии (T_d). В наших экспериментах первые два параметра оставались постоянными и изменялась только величина T_d . Было обнаружено, что для каждой концентрации $N_d - N_a$ в исходном эпитаксиальном слое существует значение $T_{d,opt.}$, при котором получают диоды с оптимальным сочетанием рабочих параметров. Действительно, в случае если $T_d \ll T_{d,opt.}$, концентрация продиффундировавших атомов бора будет много меньше концентрации $N_d - N_a$ в эпитаксиальном слое. Компенсация базы увеличится не значительно, и U_{br} практически не увеличится (см. таблицу, образцы 1,3,7). В случае же если $T_d \gg T_{d,opt.}$, во-первых, увеличение концентрации продиффундировавших атомов бора приведет к появлению достаточно протяженных компенсированных участков, которые уже невозможно промодулировать при характерных для SiC значениях диффузионных длин и коэффициентов инжекции. Это увеличит сопротивление диода прямому току и возможно приведет к появлению участков S-образной ВАХ. Подобные ВАХ были зарегистрированы в ходе настоящей работы в случае диффузии бора ($T_d \sim 2100-2200^\circ\text{C}$) в относительно слабо легированные эпитаксиальные слои (см. таблицу, образцы 5,9,10). Во-вторых, увеличение концентрации атомов бора может привести к перекомпенсации n-типа вблизи металлургической границы p-n-перехода. В результате граница p-n-перехода сместится от границы эпитаксиальных слоев в глубь базовой области. Максимальная напряженность электрического поля теперь будет в районе диффузионного перехода, качество которого в SiC хуже, чем эпитаксиальных. Пробой становится плавным и уменьшается отношение $U_{br.exp}/U_{br.theor.}$. Подобную ситуацию мы наблюдали с образцом 9. Для наших условий проведения диффузии можно грубо оценить, что $T_{d,opt}$ для $N_d - N_a = (1-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ составляет $2100-2200^\circ\text{C}$, для $N_d - N_a = (0.5-1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ — $2000-2100^\circ\text{C}$, для $N_d - N_a = (1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ — $1900-2000^\circ\text{C}$.

На рис. 4 представлена ВАХ диода после диффузионной обработки при температурах, близких к оптимальным (образец 6, площадь меза-структуры составляла $\sim 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$). При измерениях на воздухе пробой структуры носил объемный характер и структуры обратимо входили в пробой до токов $10^{-4}-10^{-3} \text{ А}$. Значение U_{br} при комнатной температуре для различных меза-структур на одном образце соста-

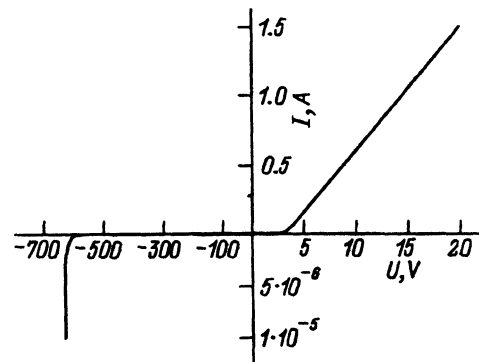


Рис. 4. Типичная вольт-амперная характеристика эпитаксиально-диффузионного диода. $T = 300 \text{ К}$.

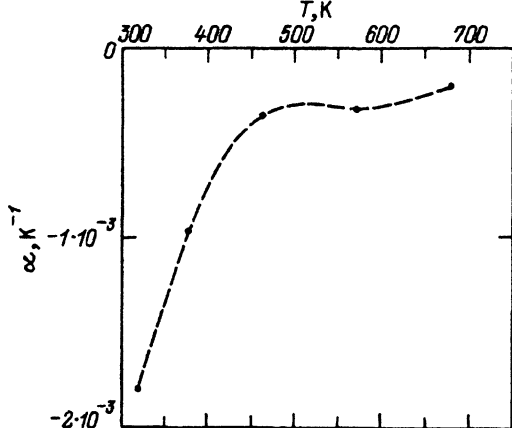


Рис. 5. Зависимость температурного коэффициента напряжения пробоя эпитаксиально-диффузионного диода от температуры.

вляло 600–800 В, а величина R составила ~ 10 Ом. Напряжение пробоя диодов уменьшалось с увеличением температуры (\sim на 100 В при нагреве до 730 К), т.е. структуры имели отрицательный температурный коэффициент напряжения пробоя (ТКН). При этом абсолютная величина ТКН быстро уменьшалась с ростом температуры до 450 К, а затем оставалась практически постоянной (рис. 5). Величина R с ростом температуры также несколько уменьшалась.

Таким образом, были получены эпитаксиально-диффузионные 6H-SiC-диоды, в которых отсутствовал поверхностный пробой при обратных напряжениях в 2–2.5 раза больших, чем в [4,5,7], и которые были работоспособны до температур ~ 730 К. Проведенная работа также позволяет предположить, что после диффузионной обработки эпитаксиальных слоев с $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ можно ожидать получения на их основе высоковольтных диодов ($U_{br} \sim 1-2 \text{ кВ}$) с удовлетворительной прямой ВАХ.

Авторы благодарят М.М. Аникина за полезные обсуждения и А.М. Стрельчука за помощь в измерениях.

Работа была выполнена при частичной поддержке US Department of Defense и компании «Merlin Gerin» (Франция).

Список литературы

- [1] А.Е. Отблеск, В.Е. Челноков. *Тр. II Всес. совещ. по широкозонным полупроводникам* (Л., 1979) с. 197.
- [2] А.О. Константинов, Д.П. Литвин, В.И. Санкин. *Письма в ЖТФ*, **7**, 1335 (1981).
- [3] А.О. Константинов. *ФТП*, **17**, 2124 (1983).
- [4] М.М. Аникин, А.А. Лебедев, И.В. Попов, В.Е. Севастьянов, А.Л. Сыркин, А.В. Суворов, В.Е. Челноков, Г.П. Шпынев. *Письма ЖТФ*, **10**, 1053 (1983).
- [5] 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).
- [6] J.A. Edmond, H.-S. Kong, C.H. Carter Jr. *Physica B*, **185**, 453 (1993).
- [7] P.G. Neudeck, D.J. Larkin, J.A. Powel, L.G. Matus, C.S. Salipo. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 1386 (1994).
- [8] Ю.А. Водаков, Н. Жумаев, Б.П. Зверев, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, В.Г. Одинг, В.В. Семенов, Ю.В. Симахин. *ФТП*, **11**, 373 (1977).

- [9] А.И. Вейнгер, Ю.А. Водаков, Ю.Н. Кулев, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, В.Г. Одинг, В.И. Соколов. Письма ЖТФ, **6**, 1319 (1980).
- [10] Ю.А. Водаков, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, В.Г. Одинг, В.В. Семенов. *Тр. II Всес. сов. по широкозонным полупроводникам* (Л., 1979) с. 164.
- [11] И.В. Попов, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, **12**, 240 (1985).
- [12] M.M. Anikin, A.A. Lebedev, S.N. Pyatko, V.A. Soloviev, A.M. Strel'chuk. Springer Proc. in Physics, **56**, 269 (1992).
- [13] А.В. Наумов, В.И. Савкин. ФТП, **23**, 1009 (1989).
- [14] П. Тейлор. *Расчет и проектирование тиристоров* (М., Энергоатомиздат, 1990).

Редактор В.В. Чалдышев

Development and investigation of epitaxial-diffusion 6H-SiC $p-n$ structures

A.A. Lebedev, A.N. Andreev, A.A. Mal'tsev, M.G. Rastegaeva, N.S. Savkina, V.E. Chelnokov

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

It is shown that boron diffusion into 6H-SiC $p-n$ structures increases the volume breakdown voltage and reduces the probability of their surface breakdown. It was shown as well that a properly chosen optimal temperature makes it possible to maintain a low diod resistance to the forward current. An investigation of the breakdown voltages in epitaxial-diffusion $p-n$ structures was done over a wide temperature range.
