

СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ P-P-ПЕРЕХОДЫ С НАПРЯЖЕНИЕМ ПРОБОЯ ВЫШЕ 20 кВ

Е.В. Астрова, В.М. Волле, В.Б. Воронков,
И.В. Грехов, В.А. Козлов, А.А. Лебедев

Устойчивой тенденцией в силовом полупроводниковом приборостроении является увеличение мощности единичного полупроводникового прибора. Успехи в области выращивания монокристаллического кремния методом бестигельной зонной плавки (БЗП) позволили создать высококачественный материал с диаметром 100 мм, приборы на его основе имеют средний рабочий ток до 3 кА [1, 2]. Рабочее напряжение серийно выпускаемых мощных тиристоров в настоящее время доведено до 4–5 кВ [2, 3 и др.], а в [4] сообщалось о тиристоре с напряжением переключения $U_{BO} \approx 10$ кВ. Для получения приемлемого значения остаточного напряжения U_{TM} в проводящем состоянии время жизни дырок τ_p в p-базе такого тиристора, как показывают оценки, должно быть на уровне ~ 100 мкс, что соответствует времени выключения $t_q \approx 1$ мс, которое слишком велико даже для работы на частоте 50 Гц. Однако, например, для асимметричного тиристора с комбинированным выключением соотношение между U_{TM} , U_{BO} и t_q позволяет иметь достаточно высокое быстродействие при $U_{BO} > 10$ кВ и поэтому исследование предельных возможностей блокирования сверхвысоких напряжений кремниевыми p-p-переходами представляет не только научный, но и практический интерес.

Принципиальной сложностью при изготовлении сверхвысоковольтных (с напряжением пробоя U_{BR} выше 10 кВ) кремниевых p-p-переходов является сохранение в процессе высокотемпературных термообработок (ВТО) исходного высокого значения удельного сопротивления материала. Высокий уровень чистоты технологического процесса, в частности, ВТО в хлоросодержащей атмосфере [5], позволил получить $U_{BR} \approx 12$ кВ, а добавка в кремний связывающих кислород редкоземельных элементов в сочетании с программируемым охлаждением после ВТО позволили получить p-p-переходы с $U_{BR} \approx 15$ кВ [6]. Однако попытки дальнейшего увеличения U_{BR} успеха не имели из-за падения исходных значений удельного сопротивления S_i в процессе термообработок.

В дальнейшем было показано [7, 8], что ВТО, проводимые в рамках серийной технологии (формирование p-p-переходов методом одновременной диффузии Al и B в шлифованную поверхность пластин S_i) приводят к образованию донорных термодфектов с уровнями $E_1 = E_c - (0.27 \pm 0.01)$ эВ, $E_2 = E_c - (0.54 \pm 0.01)$ эВ, ответственных за снижение удельного сопротивления материала (ρ). Концентрация термодфектов и профиль их распределения в p-базе в большой степени определяются состоянием поверхности полупроводниковой пластины и зависят от режимов ВТО [7]. Проведенные на-

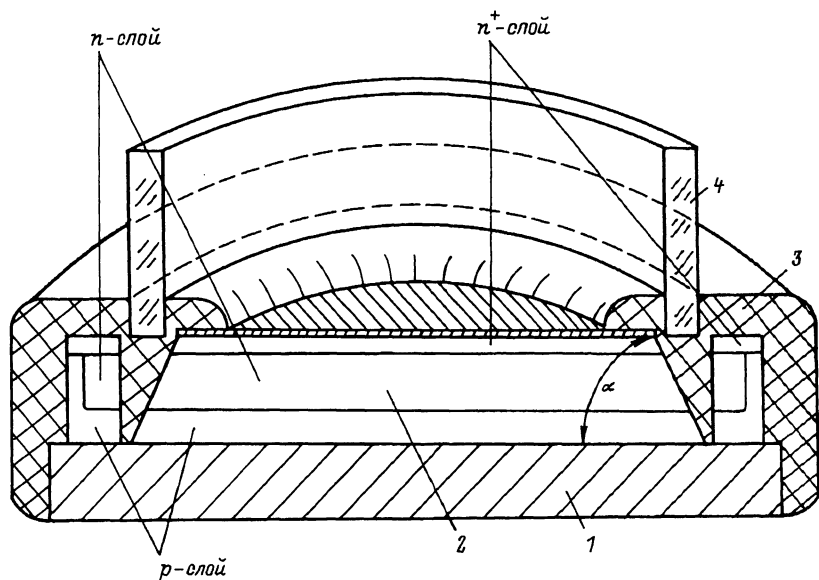


Рис. 1. Схематический разрез p^+-p-p^+ -структуры. 1 - вольфрамовый термокомпенсатор, 2 - полупроводниковая структура, 3 - кремнийорганический компаунд, 4 - защитный кварцевый цилиндр.

ми исследования показали, что концентрации термодфектов могут быть снижены до значений $\sim 10^{10}$ см^{-3} при изготовлении $p-p$ -переходов диффузией бора и галлия через полированную поверхность кремниевой пластины. Эта диффузия проводилась в 2 этапа: на первом велась загонка Ga при сравнительно низкой температуре ~ 1100 $^{\circ}\text{C}$ в течение 1–1.5 час в инертной атмосфере, а на втором - одновременная разгонка Ga и диффузия бора из источника, нанесенного на поверхность. После окончания процесса диффузии пластины медленно охлаждались до 800 $^{\circ}\text{C}$, после чего скорость охлаждения увеличивалась. Омический контакт к p -базе $p-p$ -структур создавался диффузией фосфора из фосфоросиликатного стекла при температуре ниже температуры загонки галлия.

Конструкция исследованных сверхвысоковольтных p^+-pp^+ -структур показана на рис. 1. Исходным материалом были полированные пластины БЗП-кремния с $\rho = 1.7-2.0$ $\text{кОм}\cdot\text{см}$, диаметром 40 мм и толщиной 3.8 мм. $p-p$ -переход изготавливался диффузией бора и галлия на глубину 90 мкм, p^+ -слой - диффузией фосфора на глубину 4 мкм, режимы термообработок соответствовали описанным выше, после термообработок удельное сопротивление сохранилось на исходном уровне. Для защиты $p-p$ -перехода от пробоя по поверхности краевой контур имел вид кольцевой фаски с $\alpha = 70^{\circ}$ (рис. 1),

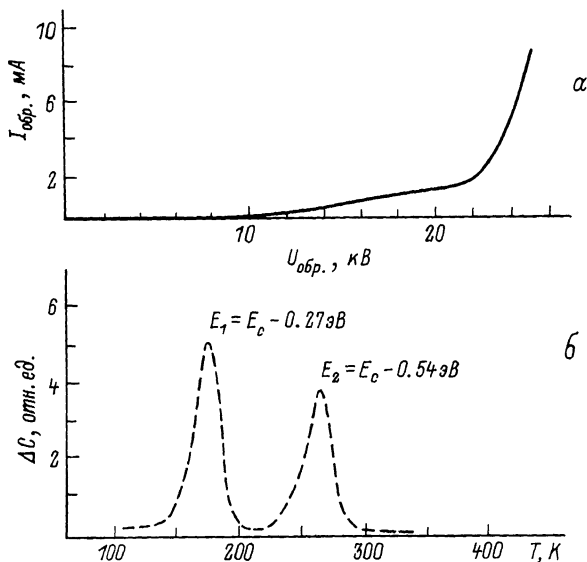


Рис. 2. а - обратная ветвь ВАХ $p^+ - p - p^+$ -структуры при $T = 300$ К, б - *DLTS* - спектр термодиффектов в p -базе $p^+ - p - p^+$ -структуры.

пассивация и защита осуществлялась кремнийорганическим компаундом КЛТ-30. При этом оказалось, что при сравнительно тонком слое компаунда (~ 0.5 мм) пробой происходил при напряжении ~ 15 кВ, причем хорошо наблюдаемый канал пробоя проходил сквозь слой компаунда на его поверхность; пробой носил обратимый характер. Увеличение толщины компаунда до ~ 2 мм позволило поднять напряжение пробоя до 20 кВ; пробой происходил по поверхности компаунда между металлическими контактами, а длина канала была более 1 см. Для полного устранения поверхностного пробоя в компаунд был вмонтирован кварцевый (или фторопластовый) цилиндр с толщиной стенки ~ 2 мм и высотой 10 мм над поверхностью компаунда. Такая конструкция позволяла поднимать напряжение до 25 кВ без поверхностного пробоя.

Обратная ВАХ $p^+ - p - p^+$ -структур исследовалась с помощью импульсного характеристикографа, подающего на структуру синусоидальные импульсы длительностью 10^{-2} с с частотой следования ~ 1 Гц. Типичная ВАХ при 300 К приведена на рис. 2, а. Излом, характерный для начала лавинного пробоя, наблюдается при 22 кВ, однако при возрастании $U_{обр.}$ от 22 до 25 кВ среднее динамическое сопротивление уменьшается всего лишь на порядок - от 10^6 до 10^5 Ом. Это свидетельствует либо о сильной неоднородности пробоя в объеме, либо о поверхностном характере пробоя при смыкании границы области объемного заряда с металлургической границей $p^+ - p$ -перехода [9]. Среднее по площади значение концентрации

мелкой примеси в p -базе, рассчитанное из вольт-фарадных характеристик $N_M \approx 2.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, хорошо согласуется с исходным уровнем легирования кремния фосфором и примерно соответствует наблюдаемому значению напряжения лавинного пробоя.

На рис. 2,6 показан *DLTS*-спектр дефектов в p -базе исследованной структуры. Хорошо видно наличие термодфектов с уровнями $E_1 = E_C - 0.27 \text{ эВ}$ и $E_2 = E_C - 0.54 \text{ эВ}$. Эти дефекты являются превалирующими, но концентрация их не превышает 10^{11} см^{-3} .

Таким образом, в работе показана возможность создания на кремнии p - p -переходов с напряжением пробоя 20–25 кВ, что примерно на 10 кВ превышает результаты, известные нам из публикаций к настоящему времени.

Авторы выражают благодарность И.А. Смирновой и И.Г. Чашникову за содействие в проведении диффузионных процессов.

Л и т е р а т у р а

- [1] T r a v i s B., - EDN, 1984, v. 29, N 18, p. 106-116.
- [2] I k e d a Y., Y a t s u o T., - Hitachi Rev., 1987, v. 36, N 1, p. 5-12.
- [3] K a s h i w a z a k i H., O d a i S., K o n i s . h i N., - Hitachi Rev., 1985, v. 34, N 5, p. 241-246.
- [4] O g a w a T., K a m e i T., M o r i t a K., - IEEE Int. Semicond. Power. Convert. Conf. Rec., 1972, Baltimore.
- [5] С о б о л е в Н.А., Ч е л н о к о в В.Е., Ш е к Е.И. Докл. на У1 Межд. конференции по проблемам силовой преобраз. техн. и автоматиз. электропривода, Пояна-Брашов, 1982, с. 51-59.
- [6] Б а г р а е в Н.Т., В л а с е н к о Л.С., В о р о н к о в В.Б. и др. - Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, в. 14, с. 880-882.
- [7] А с т р о в а Е.В., В о р о н к о в В.Б., К о з л о в В.А., Л е б е д е в А.А., Э к к е В. - Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе, № 1161, Л., 1987, 26 с.
- [8] А с т р о в а Е.В., В о л л е В.М., В о р о н к о в В.Б., К о з л о в В.А., Л е б е д е в А.А. - ФТП, 1986, т.20, в. 11, с. 2122-2125.
- [9] B r i e g e r K.P., G e r l a c h W., P e l k a J., - IEEE Trans. on. El. Dev., 1984, ED-31, N 6, p. 733-738.

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

Поступило в Редакцию
29 января 1988 г.
В окончательной редакции
15 апреля 1988 г.