

Высоковольтные (1800 В) планарные $p-n$ -переходы на основе $4H$ -SiC с плавающими охранными кольцами

© П.А. Иванов[¶], И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 24 июня 2008 г. Принята к печати 8 июля 2008 г.)

Изготовлены планарные $p-n$ -переходы на основе $4H$ -SiC с плавающими охранными кольцами. Основной переход и кольца формировались имплантацией бора при комнатной температуре с последующим высокотемпературным отжигом. Напряжение пробоя изготовленных $p-n$ -переходов составляет 1800 В, что вдвое больше по сравнению с напряжением пробоя аналогичных переходов без охраны и достигает 72% от расчетного напряжения пробоя плоскопараллельного $p-n$ -перехода с такими же параметрами эпитаксиального слоя.

PACS: 73.40.Lq, 85.30.Kk

1. Введение

Ранее в работах [1,2] нами были исследованы характеристики пробоя планарных $p-n$ -переходов на основе $4H$ -SiC, которые использовались в качестве охранных колец в диодах Шоттки. Переходы формировались локальной имплантацией высокоэнергетических ионов бора (энергия 350 кэВ). Было показано, что благодаря неравновесной диффузии бора за время постимплантационного отжига глубина залегания $p-n$ -перехода достигает 1.7 мкм, что приблизительно на 1 мкм больше пробега ионов бора с энергией 350 кэВ в $4H$ -SiC. Максимальное обратное напряжение $p-n$ -переходов было ограничено краевым лавинным пробоем в цилиндрической части перехода, где концентрируется электрическое поле. Величина пробойного напряжения, ~ 900 В, оказалась близкой к расчетному напряжению пробоя планарного перехода с „проколотой“ базой [3] — 990 В при концентрации примесей в n -слое $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщине n -слоя 12 мкм и радиусе кривизны перехода 1.7 мкм. В то же время расчетное напряжение пробоя плоскопараллельного $p-n$ -перехода (V_{Bpp}) с такими же параметрами эпитаксиального слоя составляет ~ 2500 В [1]. Таким образом, при условии применения эффективной охранной системы резерв увеличения напряжения пробоя составляет по меньшей мере 2 раза.

Для уменьшения концентрации краевого электрического поля в планарных $4H$ -SiC-структурах применяют разные методы, в частности „плавающие“ охранные кольца (см., например, [4–6]). Зазоры между основным переходом и первым кольцом, а также между кольцами подбираются таким образом, чтобы области пространственного заряда (ОПЗ) основного и плавающих переходов смыкались по мере увеличения напряжения на аноде (рис. 1). В результате толщина ОПЗ плавно уменьшается к краю, что способствует выравниванию распределения электрического поля в структуре.

В настоящей работе изготовлены и исследованы планарные $p-n$ -переходы на основе $4H$ -SiC с охранными кольцами, имеющие напряжение пробоя 1800 В.

2. Выбор числа колец и расстояния между ними

В простейшем варианте подбором числа колец и зазоров между ними можно добиться такой ситуации, когда пробой будет происходить не на крае основного перехода, а на крае последнего кольца. В этой ситуации потенциал анода (относительно заземленного катода-подложки) при пробое $V_{BA} > V_{Rn} = V_{Bcycl}$, где n — число колец, V_{Rn} — потенциал последнего кольца, V_{Bcycl} — напряжение пробоя планарного перехода без охраны.

В высоковольтных $4H$ -SiC-структурах с плавающими охранными кольцами зазор d между кольцами выбирают довольно узким (как правило, в пределах 2–3 мкм [7]), для того чтобы при нулевом напряжении на аноде ОПЗ основного и плавающих переходов были „на грани“ смыкания. В нашем случае величина d выбиралась несколько большей, чем $2(r_0 - r_j)$, где r_0 — радиус кривизны края ОПЗ при нулевом смещении, а r_j — радиус кривизны металлургической границы $p-n$ -перехода (рис. 2).

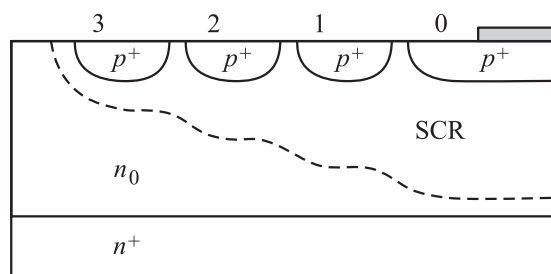


Рис. 1. Концепция плавающих охранных колец: 0 — основной планарный $p-n$ -переход, (1–3) — плавающие кольца. SCR — область пространственного заряда.

[¶] E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

Для цилиндрического перехода величина r_0 рассчитывается из трансцендентного уравнения [8]

$$V_{bi} = \frac{qN}{2\epsilon} \left[\frac{r_j^2 - r_0^2}{2} + r_0^2 \ln \left(\frac{r_0}{r_j} \right) \right], \quad (1)$$

где V_{bi} — контактная разность потенциалов p - n -перехода, q — элементарный заряд, N — концентрация доноров в базе, ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника. Полагая $r_j \approx 1.7$ мкм и $N = 2 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, получим $r_0 = 2.8$ мкм. Тогда $d \geq 2.2$ мкм.

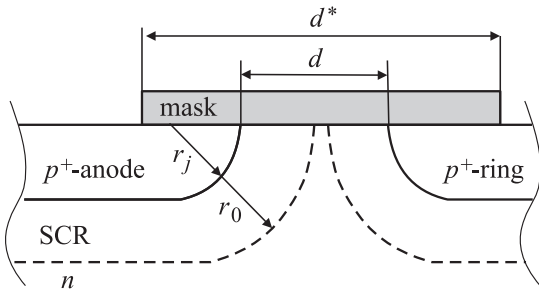


Рис. 2. Геометрия охранных колец.

Число колец должно выбираться таким, чтобы потенциал анода при условии $V_{Rn} = V_{Bcyl}$ не превышал напряжения пробоя плоскостепенного перехода V_{Bpp} . В работе [9] для планарного p - n -перехода с одним кольцом были получены аналитические выражения для зависимости потенциала кольца V_R от потенциала анода V_A . Для структуры с „проколотой“ базой эта зависимость имеет вид

$$V_R = V_A \left(\frac{W}{W + kd} \right) - \sqrt{V_{PT} V_{RT}}, \quad (2)$$

$$V_{PT} = \frac{qNW^2}{2\epsilon}, \quad V_{RT} = \frac{qN(kd)^2}{2\epsilon}, \quad (3)$$

$$k = \left[\left(1 + \frac{r_j}{d} \right)^2 \ln \left(1 + \frac{d}{r_j} \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{r_j}{d} \right) \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Здесь W — толщина базы, V_{PT} — напряжение прокола базы, V_{RT} — напряжение „смыкания“. В том случае если колец несколько, потенциал последнего кольца (при заданном анодном потенциале) может быть рассчитан следующим образом. Вначале по формулам (2)–(4) рассчитывается потенциал первого кольца. Затем первое кольцо рассматривается как „основной переход“ и по формулам (2)–(4) рассчитывается потенциал второго кольца, и так далее, до последнего кольца. Затем процедура повторяется для следующего значения анодного потенциала. Таким способом можно построить зависимости $V_{Rn}(V_A)$ при разных значениях n . На рис. 3 показаны для интересующего нас случая $N = 2 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, $W = 12$ мкм и $r_j = 1.7$ мкм расчетные зависимости $V_{Rn}(V_A)$: число

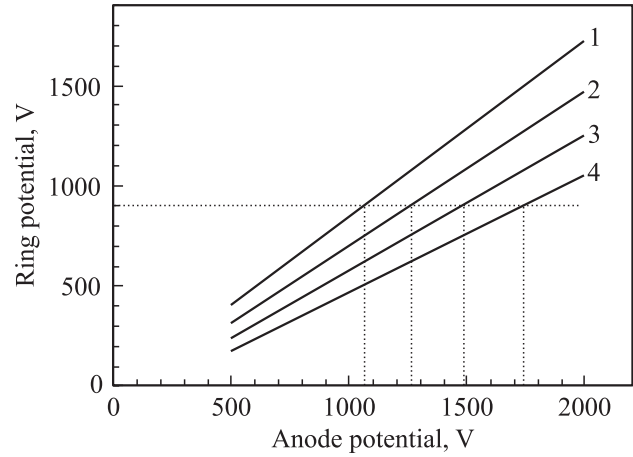


Рис. 3. Зависимости потенциала последнего кольца от потенциала анода, рассчитанные для разного числа колец (число колец от 1 до 4 указано).

колец n варьировалось от 1 до 4, зазор $d = 2.5$ мкм. Как видно, расчет предсказывает, что при $V_{Bcyl} = 900$ В одно кольцо должно увеличивать напряжение пробоя до 1070 В, два кольца — до 1270 В, три кольца — до 1490 В и, наконец, четыре кольца — до 1750 В.

3. Эксперимент

Экспериментальные p - n -структуры изготавливались на основе того же эпитаксиального материала 4H-SiC, который использовался нами ранее для изготовления переходов на 900 В без охраны [1]: концентрация доноров

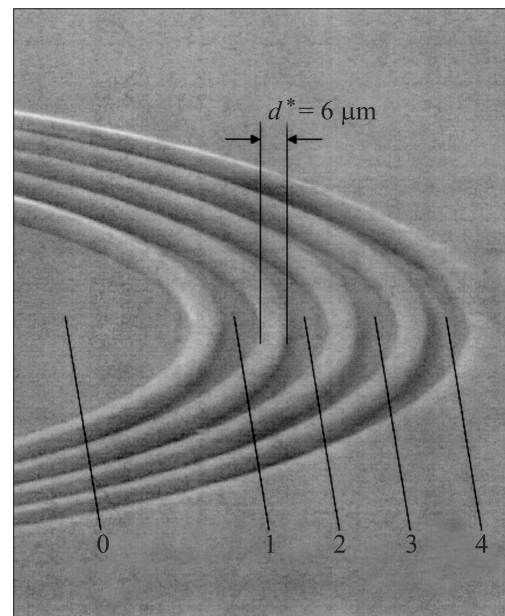


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение фоторезистивной маски для имплантации основного перехода (0) и четырех охранных колец (1–4).

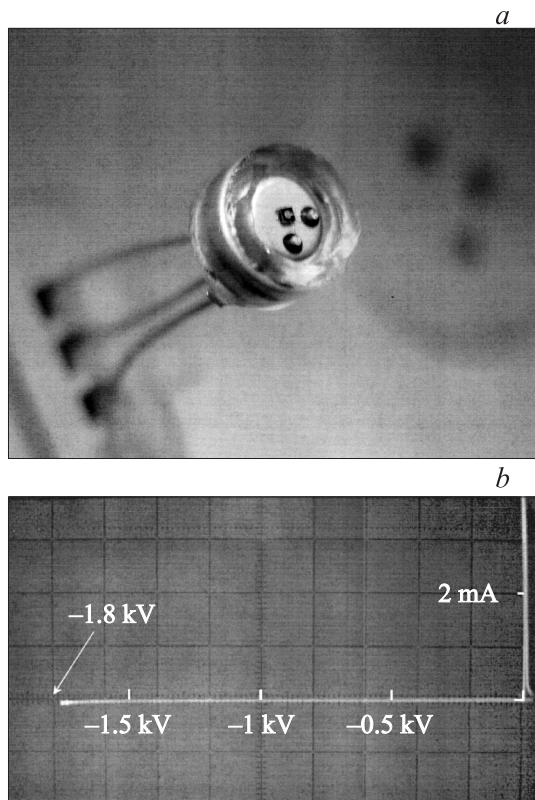


Рис. 5. $4H-SiC$ -диод, залитый силиконовым гелем (а), и его вольт-амперная характеристика (b). Масштаб по вертикали — 1 мА/дел, по горизонтали — 200 В/дел.

в n -слое $N = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина n -слоя $d = 12 \text{ мкм}$. Основной переход и кольца формировались одновременно. Число колец было выбрано равным четырем (рис. 4). Технологическая ширина маски d^* для имплантации, обеспечивающая зазор $d = 2.5 \text{ мкм}$, была выбрана равной 6 мкм (см. рис. 2), с учетом того, что диффузионная разгонка бора в процессе отжига имплантированного слоя происходит не только в вертикальном, но и в латеральном направлении (как мы полагаем, на расстояние $\sim 1.7 \text{ мкм}$). Имплантация проводилась так же, как и в работе [1]: ионы ^{11}B внедрялись в n -слой двумя дозами с разной энергией (при комнатной температуре) — энергия 350 кэВ , доза $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и энергия 200 кэВ , доза $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Постимплантационный отжиг проводился при температуре 1500°C в атмосфере аргона в течение 60 мин . Kontakтами к катоду (подложка) и аноду служили никель и титан соответственно (площадь анода $7.1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$).

Диодные чипы были напаяны в металлостеклянные корпуса. К анодному контакту приваривались несколько алюминиевых проволочек. На рис. 5,а показан диод, залитый силиконовым гелем. На рис. 5,б показана вольт-амперная характеристика, снятая с экрана характеристикиста Л2-56. Пробой начинается при напряжении $\sim 1800 \text{ В}$ (тестовые переходы без охраны показывали напряжение пробоя $\sim 900 \text{ В}$) и достигает, таким обра-

зом, 72% от расчетного напряжения пробоя плоскопараллельного $p-n$ -перехода с такими же параметрами эпитаксиального слоя.

4. Заключение

В заключение можно отметить, что хотя описанный упрощенный подход к проектированию колец не является, строго говоря, оптимальным с точки зрения достижения максимально возможного напряжения пробоя (в приведенных рассуждениях пробой остается краевым, в то время как предпочтительной была бы ситуация, когда электрическое поле распределено по площади структуры более однородно), он позволил добиться требуемого практического результата — достигнутое обратное напряжение составляет 72% от предельно возможного для данной эпитаксиальной структуры. Очевидно, что дальнейшее повышение напряжения пробоя если и возможно, то сопряжено с существенным усложнением геометрии колец: увеличением их числа, подбором переменного расстояния между ними, подбором ширины колец.

Работа поддержана федеральной целевой программой „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы“ (госконтракт № 02.523.11.3006 от 15 августа 2007 г.), ОФН РАН (программа „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“) и грантом РФФИ № 07-02-13529-офи-ц.

Список литературы

- [1] И.В. Грехов, П.А. Иванов, Н.Д. Ильинская, О.И. Коньков, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. ФТП, **42**, 211 (2008).
- [2] П.А. Иванов, И.В. Грехов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. ФТП, **42**, 878 (2008).
- [3] V. Anantharam, K.N. Bhat. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-27**, 939 (1980).
- [4] П.А. Иванов, И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова. ФТП, **39**, 1475 (2005).
- [5] D.C. Sheridan, G. Niu, J.N. Merrett, J.D. Cressler, C. Ellis, C.-C. Tin. Sol. St. Electron., **44**, 1367 (2000).
- [6] W. Bahng, G.H. Song, H.W. Kim, K.S. Seo, N.K. Kim. Mater. Sci. Forum, **457–460**, 1013 (2004).
- [7] T. Yamamoto, T. Endo, N. Kato, H. Nakamura, T. Sakakibara. Mater. Sci. Forum, **556–557**, 857 (2007).
- [8] B.J. Baliga. Sol. St. Electron., **19**, 739 (1976).
- [9] K.D. Suh, S.W. Hong, K. Lee, C.-K. Kim. Sol. St. Electron., **33**, 1125 (1990).

Редактор Л.В. Шаронова

High-voltage (1800 V) planar 4H-SiC $p-n$ junctions with floating guard rings

*P.A. Ivanov, I.V. Grekhov, I.D. Il'inskaya,
T.P. Samsonova, A.S. Potapov*

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

Abstract 4H-SiC planar $p-n$ junctions terminated with floating guard rings have been fabricated. The main junction and rings were formed by room temperature implantation of boron specimens followed by high temperature thermal annealing. The breakdown voltage of the $p-n$ junctions was found to be 1800 V that is twice as compared to analogous junctions without any termination and reaches 72% of calculated breakdown voltage of a parallel plane $p-n$ -junction with the same epilayer parameters.