

# Экспериментальные диоды Шоттки–( $p-n$ ) (JBS-диоды) на основе $4H-SiC$

© П.А. Иванов<sup>¶</sup>, И.В. Грехов, А.С. Потапов, Н.Д. Ильинская,  
Т.П. Самсонова, О.И. Коньков

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

(Получена 5 февраля 2009 г. Принята к печати 20 февраля 2009 г.)

Изготовлены интегрированные диоды Шоттки–( $p-n$ ) (JBS-диоды) на основе  $4H-SiC$ , в которых локальные  $p-n$ -переходы под контактом Шоттки сформированы с помощью неравновесной диффузии бора. Статические и динамические характеристики изготовленных JBS-диодов сравниваются с характеристиками аналогичных диодов Шоттки на  $4H-SiC$ . Показано, что по сравнению с обычными диодами Шоттки токи утечки в JBS-диодах при одном и том же обратном напряжении уменьшаются в среднем в 200 раз. Заряд обратного восстановления для обоих типов диодов одинаков и равен заряду основных носителей, выносимых из базовой  $n$ -области при переключении.

PACS: 73.40.Lq, 73.40.Ns, 85.30.De, 85.30.Hi, 85.30.Kk

## 1. Введение

К настоящему времени западной промышленностью освоены диоды Шоттки (Schottky Barrier Diode, SBD) на основе  $4H-SiC$  на обратное напряжение до 1200 В и прямой ток до 20 А. Они находят широкое применение в импульсных преобразователях напряжения вместо быстро восстанавливающихся кремниевых диодов с  $p-n$ -переходом. Создание еще более высоковольтных (1.5–10 кВ) SBDs на  $4H-SiC$  натолкнулось на проблему утечек, которые возникают при сильных электрических полях и повышенных температурах. Для уменьшения токов утечки были предложены интегрированные диоды Шоттки–( $p-n$ ) (Junction Barrier Schottky diode, JBS-диод) (см., например, [1,2]), в которых локальные  $p-n$ -переходы перемежаются с контактами Шоттки в одном приборе. Характеристики JBS-диодов в прямом направлении ближе к характеристикам диодов Шоттки (по напряжению открывания и дифференциальному сопротивлению в открытом состоянии), а в обратном направлении — к характеристикам  $p-n$ -диодов (по напряжению пробоя и предпробойным токам утечки).

В JBS-диодах на  $4H-SiC$  локальные  $p-n$ -переходы формируют, как правило, с помощью ионной имплантации алюминия при повышенной температуре (500°C и более), чем достигается прецизионный контроль дозы электрически активных акцепторных примесей [3,4]. В данной работе представлены экспериментальные JBS-диоды на  $4H-SiC$ , в которых локальные  $p-n$ -переходы под контактом Шоттки формировались с помощью неравновесной диффузии бора. Статические и динамические характеристики изготовленных JBS-диодов приведены в сравнении с характеристиками аналогичных SBDs на  $4H-SiC$ .

## 2. Концепция JBS-диода

В SBD на  $4H-SiC$  при большом обратном напряжении электрическое поле в плоскости металлического контакта достигает  $\sim 10^6$  В/см. При таких больших полях могут возникать объемные утечки, обусловленные полевой и (или) термополевой эмиссией электронов из металла в полупроводник. Для подавления (по крайней мере частичного) такого рода утечек необходимо уменьшать электрическое поле на поверхности. В показанной на рис. 1 JBS-структуре это достигается за счет формирования под металлом контакта Шоттки локальных  $p$ -колец. Ширина  $p$ -колец выбирается малой, для того чтобы обеспечить по возможности максимальное отношение площади областей Шоттки к площади  $p$ -колец и минимизировать тем самым удельное сопротивление диода в открытом состоянии. Зазор между кольцами тоже делают узким, так чтобы в обратном направлении области пространственного заряда от соседних  $p-n$ -переходов смыкались при напряжении на аноде, меньшем напряжения перекрытия  $n$ -базы областью пространственного заряда (ОПЗ). В этом случае система  $p$ -колец действует как экранирующая сетка: силовые линии поля частично замыкаются не на металле Шоттки, а на  $p$ -областях, как это показано на рис. 2.

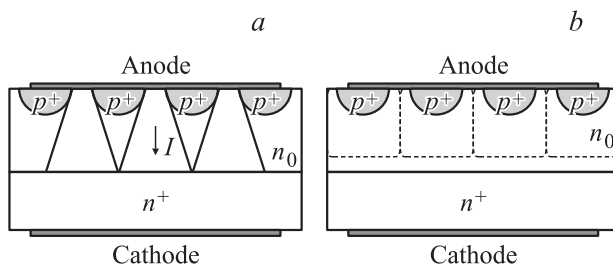
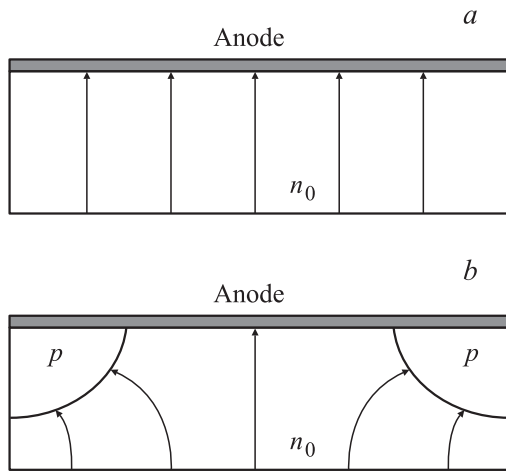


Рис. 1. Концепция JBS-диода:  $a$  — прямое смещение,  $b$  — обратное смещение.

<sup>¶</sup> E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

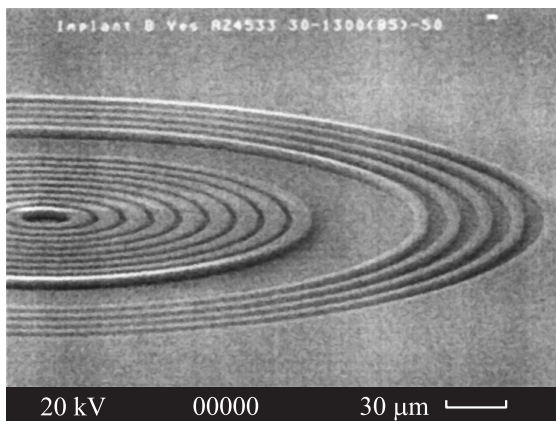


**Рис. 2.** Картина силовых линий электрического поля в базе SBD (a) и JBS-диода (b).

Благодаря эффекту экранирования область максимального электрического поля в JBS-диоде находится, в отличие от диода Шоттки, не в плоскости металлического контакта, а несколько отодвинута от поверхности в объем. Очевидно, что чем больше глубина залегания локальных  $p-n$ -переходов и чем меньше расстояние между ними, тем сильнее должен проявляться экранирующий эффект и тем эффективнее должны подавляться токи утечки, обусловленные полевой и термополевой эмиссией.

### 3. Образцы

Экспериментальные SBDs и JBS-диоды изготавливались на основе коммерческого эпитаксиального материала  $4H$ -SiC: концентрация доноров в  $n$ -слое  $N = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , толщина  $n$ -слоя  $d = 12 \text{ мкм}$ . Для по-



**Рис. 3.** Электронно-микроскопическое изображение фоторезистивной маски для изготовления JBS-структуры с 4 плавающими охранными кольцами (расстояние между кольцами 6 мкм) и 8 кольцами под анодным контактом (расстояние между кольцами 8 мкм).

вышения напряжения пробоя были применены охранные  $p-n$ -переходы, как описано в работах [5,6]. Число плавающих внешних охранных  $p$ -колец было выбрано равным 4. Расстояние между ними (технологическая ширина маски для имплантации) было выбрано равным 6 мкм, а ширина  $p$ -колец — 10 мкм.

В изготовленных JBS-диодах внутренние  $p$ -кольца под металлом Шоттки формировались одновременно с охранными. Расстояние между кольцами было 8 мкм, а ширина колец 5 мкм (на рис. 3 показана фоторезистивная маска для изготовления JBS-структуры с 4 плавающими охранными кольцами и 8 кольцами под анодным контактом). Имплантация проводилась так же, как и в работах [5,6], ионы  $^{11}\text{B}$  внедрялись в  $n$ -слой двумя дозами с разной энергией (при комнатной температуре): 1) энергия 350 кэВ, доза  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 2) энергия 200 кэВ, доза  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Постимплантационный отжиг проводился при температуре  $1500^\circ\text{C}$  в атмосфере аргона в течение 60 мин. Далее поверхность эпитаксиального слоя была пассивирована слоем собственного окисла  $\text{SiO}_2$ , выращенного в потоке сухого кислорода при температуре  $1150^\circ\text{C}$  в течение 9 ч. Затем формировался никелевый омический контакт к шлифованной с обратной стороны подложке (катод) путем ионного распыления Ni-мишени (толщина слоя Ni около 100 нм) с последующим отжигом в вакууме при температуре  $950^\circ\text{C}$  в течение 15 мин. Анодные контакты диаметром 300 мкм формировались электронно-лучевым напылением никеля в высоком вакууме (толщина слоя Ni около 150 нм) с последующим отжигом при температуре  $200^\circ\text{C}$  в течение 1 ч. Для этого в термическом окисле предварительно вскрывались окна путем его травления в буферной HF с последующей отмывкой поверхности в деионизованной воде.

Диодные чипы были напаяны в металlostеклянные корпуса. К анодным контактам приваривались алюминиевые проволочки.

### 4. Экспериментальные результаты

На рис. 4 показаны типичные прямые и обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных SBDs и JBS-диодов на основе  $4H$ -SiC при комнатной температуре.

При малых токах прямые ВАХ SBDs и JBS-диодов экспоненциальны и довольно близки друг к другу, т.е. в JBS-структуре ток протекает через области Шоттки. Эффективная высота барьера Шоттки составляет  $\sim 1.5 \text{ эВ}$ , а фактор неидеальности  $\sim 1.1$ . Высота барьера и фактор неидеальности немного изменялись от контакта к контакту из-за неоднородности высоты барьера в пределах площади контакта [7].

При обратном смещении ток утечки на уровне 1 нА в SBDs появлялся при напряжении  $\sim 600 \text{ В}$ . Ток возрастал на порядок при приращении напряжения приблизительно на 150 В. Такой экспоненциальный характер роста тока, а также относительно слабая его температурная

зависимость дали основание полагать, что механизм утечки связан с тунелированием. Аналогичный экспоненциальный характер обратной ВАХ наблюдался и для JBS-диодов, с той разницей, что ток утечки на уровне 1 нА появлялся при существенно большем напряжении, ~ 1000 В. По сравнению с SBDs токи утечки в JBS-диодах при одном и том же обратном напряжении уменьшались в среднем в 200 раз, и вплоть до пробоя при напряжении 1750 В обратный ток не превышал 10 мкА.

Появление в структуре JBS-диода *p-n*-переходов потенциально может затягивать время обратного восстановления, поскольку в прямом направлении *p-n*-переход может инжектировать в *n*-базу неосновные носители — дырки. На рис. 5 приведены осциллограммы, показывающие процесс обратного восстановления SBDs и JBS-диодов после пропускания прямого тока (плотность тока 700 А/см<sup>2</sup>, падение напряжения 5.5 и 12 В соответственно) и переключения в обратное направление (обратное напряжение 300 В). Как видно, оба диода восстанавливаются одинаково быстро, приблизительно за 4 нс. Заряд обратного восстановления диодов, около 0.3 нКл, численно равен заряду основных носителей, выносимых из базовой области при переключении. Таким образом, обратный ток — чисто емкостной и инжекция из *p*-областей отсутствует, что является

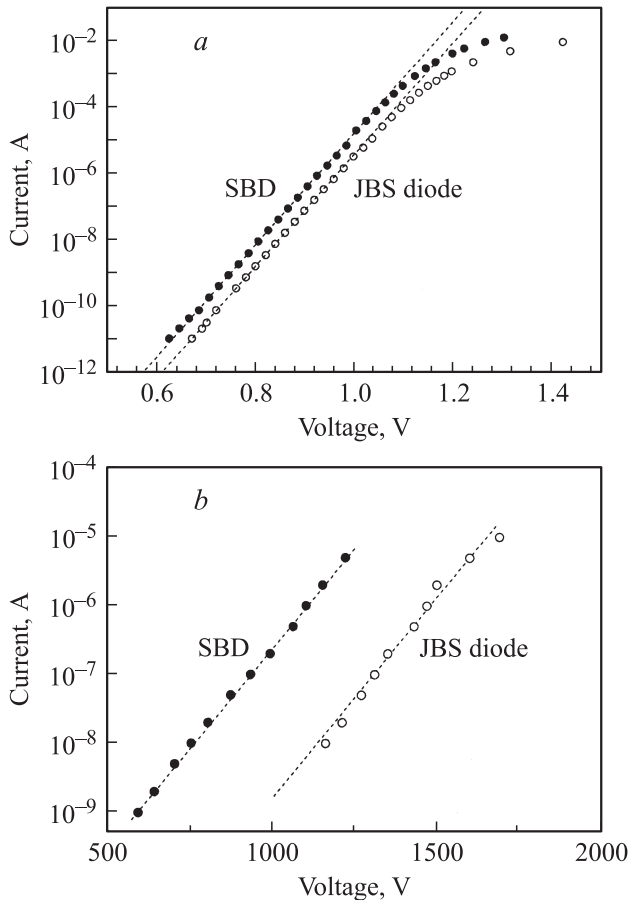


Рис. 4. Прямые (а) и обратные (б) ВАХ SBDs и JBS-диодов.

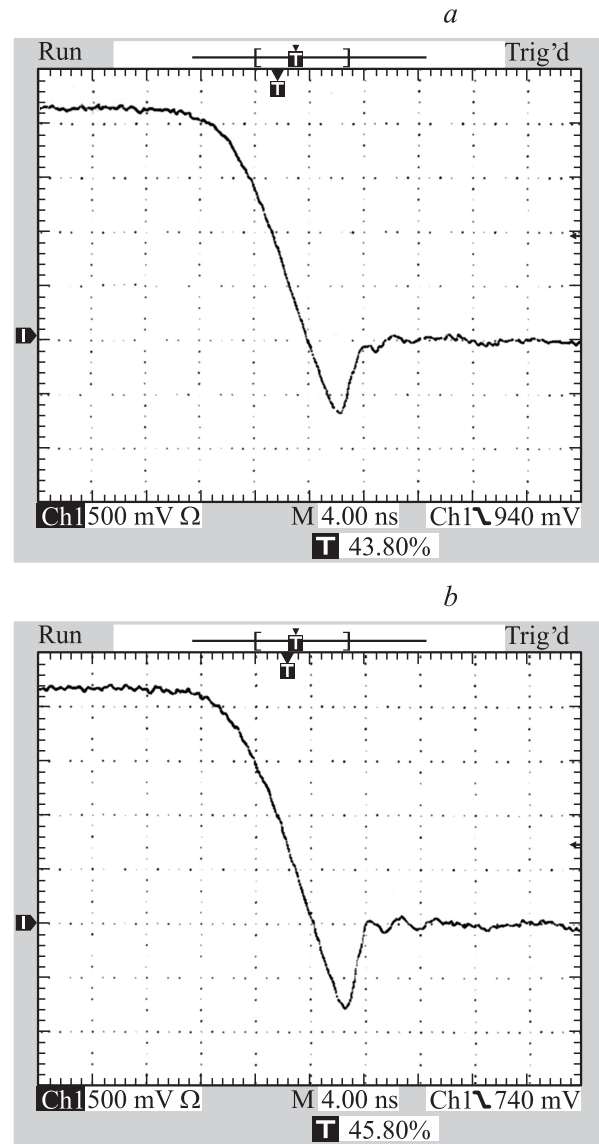


Рис. 5. Характеристики обратного восстановления SBDs (а) и JBS-диодов (б). Прямой ток 0.5 А, обратное напряжение 300 В.

следствием малой концентрации дырок в легированной бором *p*-области [8].

## 5. Заключение

По результатам проведенной работы можно заключить, что с помощью неравновесной диффузии бора могут изготавливаться JBS-диоды на 4H-SiC с охранными кольцами, имеющие большое обратное напряжение, пониженные токи утечки (по сравнению с SBDs) и предельно высокое быстродействие. Впоследствии планируется детально исследовать влияние геометрии колец на соотношение прямого и обратного токов и сравнить температурные зависимости токов утечки в SBDs и JBS-диодах с разной геометрией колец.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (ГК № 02.523.11.3006 от 15 августа 2007 г., № 02.516.12.6009 от 1 августа 2008 г.) и РФФИ (грант № 07-02-13529-офи-ц).

## Список литературы

- [1] R. Held, N. Kaminski, E. Niemann. Mater. Sci. Forum, **264–268**, 1057 (1998).
- [2] F. Dahlquist, C.M. Zetterling, M. Ostling, K. Rottner. Mater. Sci. Forum, **264–268**, 1061 (1998).
- [3] K. Tone, J.H. Zhao, M. Weiner, M. Pan. Semicond. Sci. Technol., **16**, 594 (2001).
- [4] R. Perez, N. Mestres, M. Vellvehi, P. Godignon, J. Millan. Semicond. Sci. Technol., **21**, 670 (2006).
- [5] И.В. Грехов, П.А. Иванов, Н.Д. Ильинская, О.И. Коньков, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. ФТП, **42**, 211 (2008).
- [6] П.А. Иванов, И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов. ФТП, **43**, 527 (2009).
- [7] А.С. Потапов, П.А. Иванов, Т.П. Самсонова. ФТП, **43**, 640 (2009).
- [8] П.А. Иванов, И.В. Грехов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. ФТП, **42**, 878 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

## Experimental junction barrier Schottky (JBS) diodes based on 4H-SiC

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

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

**Abstract** 4H-SiC based junction barrier Schottky (JBS) diodes have been fabricated. Local  $p-n$ -junctions under the Schottky contact metal were formed by transient enhanced diffusion of boron specimens. Static and dynamic characteristics of JBS diodes fabricated are compared with analogous 4H-SiC Schottky barrier diodes. It is shown that at fixed reverse voltages leakage currents in JBS diodes are 200 times less than those in Schottky barrier diodes. The reverse recovery charge is equal for both types of diodes. It is represented the majority carrier charge which is exhausted away from  $n$ -base during switch-off.