

Токи утечки в 4H-SiC-диодах Шоттки с интегрированной шоттки—(p-n-структурой)

© П.А. Иванов[¶], И.В. Грехов, А.С. Потапов, О.И. Коньков, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова, О. Korol'kov⁺, N. Sleptsuk⁺

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

⁺ Department of Electronics, Tallinn University of Technology,
Tallinn, Estonia

(Получена 6 сентября 2011 г. Принята к печати 12 сентября 2011 г.)

Исследованы утечки в высоковольтных диодах Шоттки на основе 4H-SiC, имеющих интегрированную шоттки—(p-n)-структуру (JBS, Junction Barrier Schottky). Для исследований использовались коммерческие диоды, а также специально изготовленные (на основе коммерческого эпитаксиального материала) тестовые диоды Шоттки как с JBS-структурой, так и без нее. Показано, что: 1) основную роль в протекании обратного тока играют дефекты кристаллической структуры SiC, по всей вероятности, дислокации (плотность $\sim 10^4$ см⁻²); 2) JBS-структура, формируемая с помощью имплантации бора, способствует частичному подавлению токов утечки (до 10 раз при оптимальном зазоре, между локальными p-областями, равном 8 мкм).

1. Введение

В современных высоковольтных диодах Шоттки (ДШ) на основе 4H-SiC обычно используется интегрированная шоттки—(p-n)-структура (JBS, Junction Barrier Schottky), в которой области Шоттки перемежаются с локальными имплантированными p-n-областями (см., например, [1,2]). В прямом направлении ток протекает через области Шоттки, так что сопротивление такого диода в открытом состоянии определяется характеристиками контакта Шоттки. В то же время зазор между p-областями делают таким узким, чтобы при включении диода в обратном направлении области пространственного заряда (ОПЗ) от соседних p-n-переходов смыкались при некотором напряжении, что должно в принципе способствовать уменьшению токов утечки до значений, характерных для p-n-перехода.

При обратном смещении система p-областей в ДШ с JBS-структурой действует как экранирующая сетка: силовые линии электрического поля в ОПЗ полупроводника частично замыкаются не на металле контакта Шоттки, а на p-областях. Благодаря эффекту экранирования область максимального поля находится, в отличие от обычного ДШ, не в плоскости раздела металл—полупроводник, а несколько отодвинута от поверхности в объем. Поэтому токи утечки, чувствительные к величине поверхностного поля, уменьшаются по величине. Это относится, например, к термоэмиссионному току электронов из металла в полупроводник, величина которого в ДШ на основе 4H-SiC сильно зависит от поверхностного поля [3]. Однако, что касается токов утечки, связанных с дефектами кристаллической структуры, физические механизмы их протекания в высоковольтных 4H-SiC-диодах Шоттки до настоящего времени достоверно не установлены. Поэтому априори

нельзя сказать, будет ли использование JBS-структуры эффективным для подавления утечек такого рода.

В настоящей работе приводятся результаты статистических исследований токов утечки в высоковольтных ДШ на основе 4H-SiC. Использовались коммерческие диоды, а также специально изготовленные тестовые ДШ, как с JBS-структурой, так и без нее. Диоды Шоттки с JBS-структурой были сделаны с разным зазором между локальными p-областями. Цель исследований состояла в том, чтобы выяснить роль дефектов в протекании обратного тока и оценить эффективность использования JBS-структур разной плотности для подавления токов утечки.

2. Коммерческие 4H-SiC-диоды Шоттки

В качестве первого шага были измерены токи утечки в коммерческих 4H-SiC-диодах CPW3-1700S010 производства Cree, Inc. (США) [4]. Диоды рассчитаны на обратное напряжение 1700 В и прямой ток 10 А. Диоды выпускаются в виде некорпусированных чипов, что упрощает их использование в исследовательских целях. Заранее ожидалось, что токи утечки могут быть связаны с дефектами. Поскольку в этом случае весьма вероятен разброс утечек по величине, для набора статистики были измерены характеристики достаточно большого количества чипов — 147 штук. Замеры тока утечки проводились при фиксированном обратном напряжении 1400 В, при комнатной температуре. На рис. 1 показаны результаты разбраковки чипов на группы по величинам тока утечки. Разброс, действительно, оказался значительным — от 10 нА до 6 мкА (почти 3 порядка величины). Одно только это обстоятельство уже говорит в пользу дефектной природы токов утечки. На рис. 2 показаны прямые и обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) трех

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

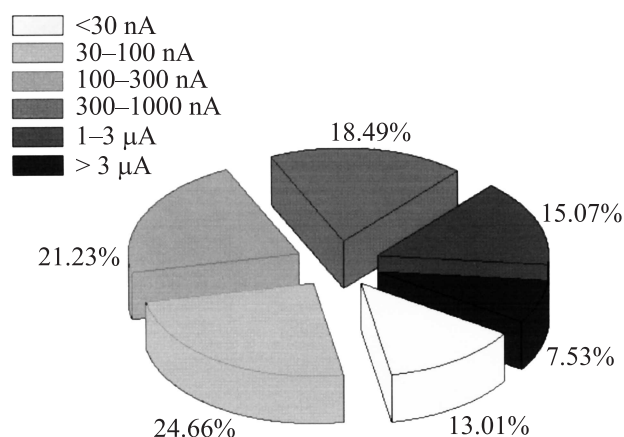


Рис. 1. Статистические данные разбраковки диодных чипов CPW3-1700S010 по току утечки при обратном напряжении 1400 В. Температура комнатная.

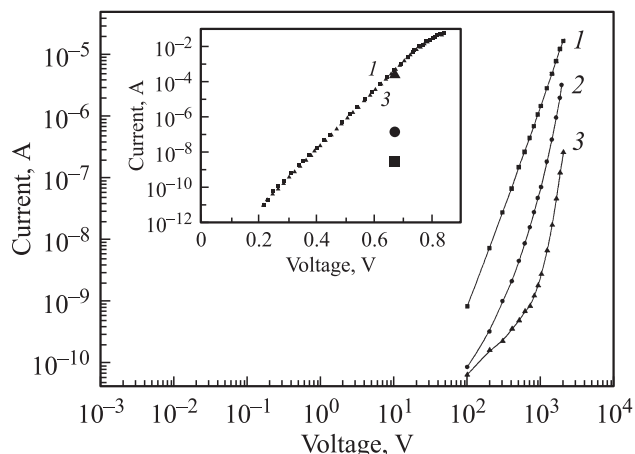


Рис. 2. Обратные ВАХ трех диодных чипов CPW3-1700S010 при комнатной температуре: 1 — чип 1-7 (ток утечки 4300 нА при 1400 В), 2 — чип 4-4 (ток утечки 360 нА при 1400 В), 3 — чип 6-7 (ток утечки 15 нА при 1400 В). На вставке — прямые ВАХ чипов 1-7 (1) и 6-7 (3).

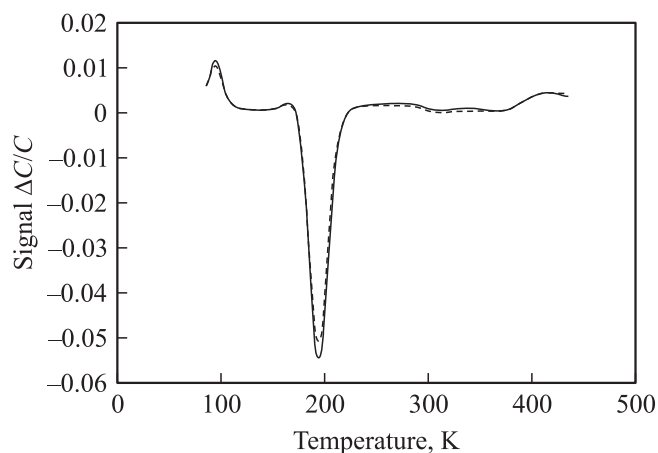


Рис. 3. Спектры DLTS диодных чипов CPW3-1700S010: чипы 1-7 и 6-7.

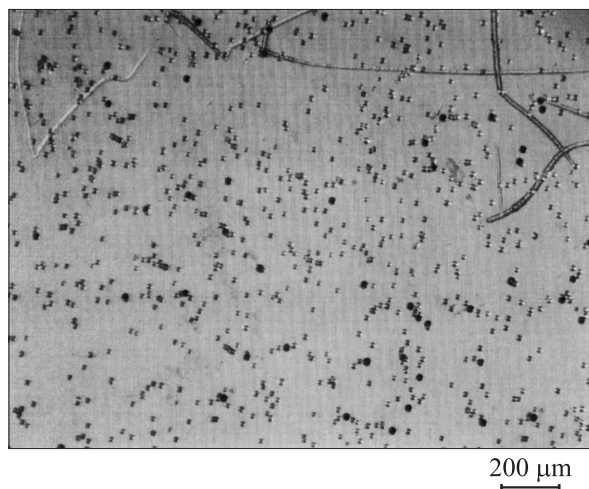


Рис. 4. Ямки травления на поверхности одного из чипов CPW3-1700S010. Травление в расплаве КОН (450°C, 20 мин).

чипов, выбранных из групп с разной утечкой, а на рис. 3 — спектры DLTS (deep level transient spectroscopy) тех же самых диодов. Прямые ВАХ оказались идентичными и идеальными (в прямом направлении доминирует надбарьерный термоэмиссионный ток электронов из полупроводника в металл). Спектры DLTS также оказались идентичными (во всех диодах присутствуют *S*-центры [5] в одинаковой концентрации). В обратном направлении утечки начинали проявляться только при достаточно больших обратных смещениях (благодаря высокому барьеру термоэмиссионный ток из металла в полупроводник был исчезающе малым). При этом обратные ВАХ, измеренные на разных чипах, существенным образом отличались друг от друга. Характер ВАХ и спектров DLTS свидетельствует в пользу того, что ток протекает с участием дефектов, причем не точечных, а протяженных. Ранее в нескольких работах выдвигалось предположение об участии в протекании обратного тока проникающих дислокаций (см., например, [6,7]). Их плотность в коммерческом эпитаксиальном материале пока еще велика. В исследуемых нами чипах CPW3-1700S010 выявленная травлением в расплавленной щелочи плотность дислокаций составляет $\sim 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ (рис. 4). Вполне вероятно, что наблюдаемый обратный ток проходит в местах выхода дислокаций на поверхность полупроводника. Механизм утечки с участием дислокации был предложен нами ранее в работе [8]. Согласно этой модели, обратный ток протекает по механизму токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), за счет монополярной инжекции электронов из точечных областей, находящихся в пределах контакта Шоттки (там, где проникающие дислокации выходят на поверхность) в ОПЗ полупроводника. В местах выхода дислокаций на поверхность энергетический барьер для электронов, покидающих металл, может быть понижен и отодвинут от поверхности полупроводника в его объем на некоторое расстояние. Как следствие, в приповерх-

ностной области полупроводника образуется точечный „резервуар“ электронов. Подача отрицательного потенциала на металл вызывает монополярную инжекцию электронов из такого наномасштабного резервуара в ОПЗ полупроводника и протекание тока по механизму ТОПЗ. Очевидно, что при таком механизме обратного тока вид ВАХ может сложным образом зависеть от того, сколько дислокаций и какого типа находится в пределах площади областей Шоттки. В этом случае значительный разброс величины тока утечки в исследованных чипах становится понятным.

3. Тестовые диоды

Как было показано выше, в коммерческих высоковольтных 4H-SiC-диодах Шоттки основную роль в протекании обратного тока играют дефекты кристаллической структуры полупроводника, по всей вероятности, дислокации. Чтобы оценить эффективность использования JBS-структуры для подавления подобных утечек, были изготовлены специальные тестовые ДШ малой площади, как с JBS-структурой (JBS-диоды), так и без нее (SBD, Schottky Barrier Diodes); JBS-диоды были сделаны с разным зазором между локальными p-областями (рис. 5).

Диоды изготавливались на основе коммерческого эпитаксиального материала: концентрация доноров в n-слое $N = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина n-слоя $d = 20 \text{ мкм}$. Для повышения напряжения пробоя были применены охранные p-n-переходы, формируемые имплантацией бора [9]. В изготовленных JBS-диодах внутренние p-кольца под анодным металлическим контактом формировались одновременно с охранными. Ширина маскирующих колец из фоторезиста, формирующих при

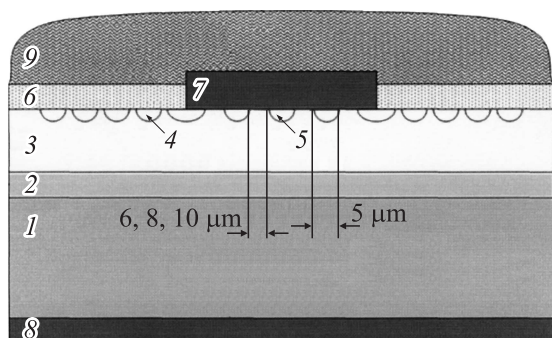


Рис. 5. Схематическое поперечное сечение 4H-SiC-диода Шоттки с JBS-структурой: 1 — подложка n-типа проводимости (удельное сопротивление $0.02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, толщина 370 мкм); 2 — буферный эпитаксиальный n-слой (концентрация доноров $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина 1 мкм); 3 — базовый эпитаксиальный n-слой (концентрация доноров $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина 20 мкм); 4 — „плавающие“ охранные p-кольца; 5 — локальные p-области JBS-структуры; 6 — пассивирующий окисел; 7 — металл контакта Шоттки (анод); 8 — металл омического контакта (катод); 9 — силиконовый гель.

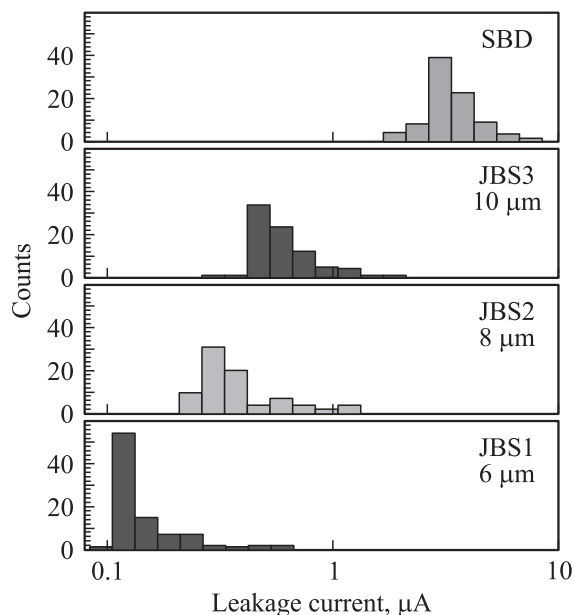


Рис. 6. Гистограммы распределения тестовых диодов по току утечки при обратном напряжении 2100 В . Температура комнатная.

имплантации зазоры между p-кольцами, была варьируемой: $6, 8, 10 \text{ мкм}$ (JBS1, JBS2, JBS3 соответственно). Расстояние между фоторезистивными кольцами было фиксированным — 5 мкм . Ионы ^{11}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°C в атмосфере аргона в течение 60 мин . Далее поверхность эпитаксиального слоя пассивировалась слоем собственного термического окисла, выращенного в потоке сухого кислорода при температуре 1150°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 $\sim 100 \text{ нм}$) с последующим отжигом в вакууме при температуре 950°C в течение 15 мин . Анодные контакты диаметром 300 мкм формировались электронно-лучевым напылением хрома в высоком вакууме (толщина слоя Cr $\sim 100 \text{ нм}$). Для этого в термическом окисле предварительно вскрывались окна путем его травления в буферном HF с последующей отмывкой поверхности в деионизированной воде. Общее число изготовленных на пластине размером $20 \times 20 \text{ мм}$ диодных структур составило 528 штук.

Абсолютное большинство диодов (включая SBD) оказались способными блокировать обратное напряжение 2 кВ . Для сравнения уровня утечек в диодах разной топологии были проведены замеры обратного тока при напряжении 2100 В (всего проведены измерения на 420 диодных структурах, по 105 штук диодов каждого типа). На рис. 6 показаны результаты замеров в виде

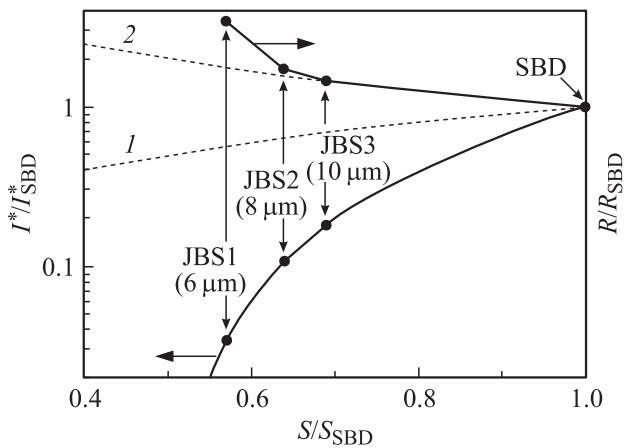


Рис. 7. Зависимости нормированного тока утечки I^*/I_{SBD}^* и нормированного сопротивления в открытом состоянии R/R_{SBD} от нормированной площади областей Шоттки S/S_{SBD} для тестовых диодов JBS1, JBS2, JBS3. 1, 2 — см. пояснения в тексте.

гистограмм распределения числа диодов по величинам тока утечки. Как видно, разброс по току утечки для каждого типа диодов довольно велик, что указывает на дефектную природу утечек. Наиболее вероятное значение тока утечки (I^*) составляет ~ 3 мкА для SBD, 0.5, 0.3, 0.1 для диодов JBS3, JBS2, JBS1 соответственно. Как видно, величина I^* монотонно падает в ряду SBD—JBS3—JBS2—JBS1, т.е. при уменьшении суммарной площади областей Шоттки в диодах. Очень важно отметить, что показанные на рис. 6 гистограммы частично перекрывают друг друга вследствие значительного разброса тока утечки по величине (например, 17 JBS2-диодов из 105 имели утечку выше, чем величина I^* для JBS3-диодов). Таким образом, говоря о снижении токов утечки при уменьшении зазора между p -кольцами в JBS-структуре, необходимо подчеркнуть, что речь идет об усредненных статистических данных.

На рис. 7 показана зависимость нормированного тока утечки I^*/I_{SBD}^* от нормированной площади областей Шоттки S/S_{SBD} (нормировка осуществлялась на ток утечки, I_{SBD}^* , и площадь областей Шоттки, $S_{SBD} = 4.9 \cdot 10^{-4}$ см², для SBD-диода). На этом же рисунке штриховой кривой 1 показана ожидаемая зависимость для случая, когда подавление утечек определялось бы исключительно уменьшением суммарной площади областей Шоттки (чисто геометрический эффект). Как видно, при уменьшении зазора между p -кольцами ток утечки падает быстрее, чем это можно было бы ожидать в случае чисто геометрического эффекта. Совершенно очевидно, что, кроме последнего, существенную роль в частичном подавлении токов утечки играет эффект экранирования электрического поля в JBS-структуре: чем меньше зазор между p -кольцами, тем он сильнее проявляется.

Следует, однако, учитывать, что уменьшение суммарной площади областей Шоттки должно приводить к

росту сопротивления диодов в прямом направлении. На рис. 7 показана зависимость нормированного сопротивления диодов в открытом состоянии (R/R_{SBD}) от нормированной площади областей Шоттки S/S_{SBD} . На этом же рисунке штриховой кривой 2 показана ожидаемая зависимость для случая, когда увеличение сопротивления определялось бы чисто геометрическим эффектом. Как видно, в случае JBS3- и JBS2-диодов увеличение сопротивления в самом деле определяется геометрическим эффектом. Однако для JBS1-диодов увеличение сопротивления уже намного выше ожидаемого. Объясняется это тем, что в JBS1-диодах области Шоттки уже отсекаются областями пространственного заряда имплантированных p - n -переходов.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что: 1) в высоковольтных $4H$ -SiC-диодах Шоттки, изготовленных на основе коммерческого эпитаксиального материала, основную роль в протекании обратного тока играют дефекты кристаллической структуры полупроводника, по всей вероятности, дислокации; их плотность в коммерческом эпитаксиальном материале пока еще велика ($\sim 10^4$ см⁻²); 2) JBS-структура, формируемая в $4H$ -SiC-диодах Шоттки с помощью имплантации бора, способствует эффективному снижению токов утечки; при оптимальном зазоре между локальными p -областями (8 мкм) снижение уровня утечек составляет около 10 раз.

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] П.А. Иванов, И.В. Грехов, О.И. Коньков, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, Т.В. Семенов. ФТП, **45** (10), 1427 (2011).
- [4] <http://www.cree.com/products/pdf/CPW3-1700S010.pdf>
- [5] M.L. David, G. Alfieri, E.M. Monakhov, A. Hallen, C. Blanchard, B.G. Svensson, J.F. Barbota. J. Appl. Phys., **95** (9), 4728 (2004).
- [6] Q. Wahab, A. Ellison, A. Henry, E. Janzen, C. Hallin, J. Di Persio, R. Martinez. Appl. Phys. Lett., **76**, 2725 (2000).
- [7] B. Hull, J. Sumakeris, M. O'Loughlin, J. Zhang, J. Richmond, A. Powell, M. Paisley, V. Tsvetkov, A. Hefner, A. Rivera. Mater. Sci. Forum, **600–603**, 931 (2009).
- [8] П.А. Иванов, И.В. Грехов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, Н.Д. Ильинская, О.И. Коньков, О.Ю. Серебрянникова. ФТП, **44** (5), 680 (2010).
- [9] П.А. Иванов, И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов. ФТП, **43** (4), 527 (2009).

Редактор Л.В. Шаронова

Leakage currents in 4H-SiC based JBS-diodes

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

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

⁺Department of Electronics,
Tallinn University of Technology,
Tallinn, Estonia

Abstract Leakage currents in high-voltage JBS-diodes based on 4H-SiC have been studied. Both commercial and special SBDs and JBS-diodes fabricated from commercial epitaxial wafers were used for measurements. It is shown that: 1) crystalline defects like threading dislocations play a key role in the flowing of leakage currents (the dislocation density $\sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$), 2) JBS-structure formed by boron implantation partly suppresses the leakage currents with optimal gap between the local *p*-rings of about 8 μm , the drop of leakage currents is 10 times.