

## Высоковольтные лавинные 4H-SiC диоды с прямой фаской

© П.А. Иванов, Н.М. Лебедева<sup>¶</sup>, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова, О.И. Коньков

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

<sup>¶</sup> E-mail: Natali\_lebedeva@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 1 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 11 декабря 2020 г.

Принята к публикации 11 декабря 2020 г.

Изготовлены высоковольтные лавинные  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диоды на основе 4H-SiC. Диоды выполнены в виде мезаструктур с пологими боковыми стенками, образующими прямую фаску. Мезаструктуры формировались с помощью сухого реактивно-ионного травления 4H-SiC через маску из фоторезиста с клинообразным краем. Мезы имеют площадь  $1 \text{ мм}^2$ , высоту  $3.6 \text{ мкм}$  (немного превышающую глубину залегания  $p - n_0$ -перехода —  $3 \text{ мкм}$ ) и угол наклона боковых стенок  $\sim 5^\circ$  от плоскости  $p - n_0$ -перехода. Измерены вольт-амперные характеристики изготовленных диодов. В прямом направлении дифференциальное сопротивление диодов и падение напряжения при токе  $10 \text{ А}$  составляют  $0.35 \text{ Ом}$  и  $6.5 \text{ В}$  соответственно. В обратном направлении диоды показали резкий пробой при напряжениях от  $1420$  до  $1500 \text{ В}$ . С помощью TCAD-моделирования рассчитана обратная вольт-амперная характеристика идеализированного одномерного диода с теми же параметрами структуры, как и у реальных диодов. Рассчитанное напряжение лавинного пробоя одномерного диода ( $1450 \text{ В}$ ) попадает в диапазон измеренных значений, т.е. эффективность работы прямой фаски в качестве охранного контура близка к  $100\%$ . Измерены импульсные обратные вольт-амперные характеристики диодов в режиме мощного лавинного пробоя: дифференциальное сопротивление составляет  $\sim 3 \text{ Ом}$ , что свидетельствует о том, что лавинный пробой однороден по площади. Диоды выдерживают без деструкции импульсы лавинного тока с амплитудой, как минимум,  $10 \text{ А}$  (плотность тока  $10^3 \text{ А/см}^2$ ) и длительностью  $1.2 \text{ мкс}$  (рассеиваемая энергия  $9 \text{ мДж}$ ).

**Ключевые слова:** карбид кремния, высоковольтный лавинный диод, прямая фаска.

DOI: 10.21883/FTP.2021.04.50737.9566

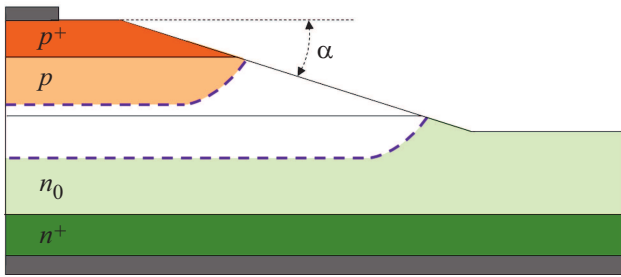
### 1. Введение

К настоящему времени для высоковольтных 4H-SiC диодов и транзисторов разработаны эффективные охраняющие системы [1], позволяющие предотвратить преждевременный краевой пробой. Однако разработанные системы довольно сложны, требуют применения дорогостоящих технологий, и поэтому проблема повышения напряжения пробоя, ограниченного краевыми эффектами, еще не утратила свою актуальность.

Одним из первых методов снижения краевого поля в эпитаксиальных SiC-приборах было сухое селективное травление мезаструктур в плазме фторсодержащих молекулярных газов, таких как  $\text{CF}_4$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{NF}_3$  и др. [1]. Травление SiC во фторсодержащих газах происходит по механизму реактивно-ионного травления (РИТ), который сочетает в себе химические реакции и прямое физическое распыление. Атомы Si удаляются с поверхности за счет химической реакции ионов  $\text{F}^+$  с SiC и образованием летучих молекул  $\text{SiF}_4$ , а атомы C — за счет их преимущественного физического распыления. Особенность селективного травления SiC методом РИТ состоит в том, что стенка протравливаемой ступеньки получается вертикальной. При травлении через маску вертикальная стенка SiC покрывается монослоем графита и, так как она не подвергается ионной бомбардировке, блокирует латеральное травление; именно этим объясняется высокая анизотропия, достигаемая при

травлении SiC методом РИТ. В мезаструктурных SiC-диодах с вертикальными стенками электрическое поле на поверхности мезы удастся понизить до величины поля в объеме, однако поверхностный пробой остается, как правило, доминирующим из-за наличия на поверхности различного рода структурных несовершенств, поверхностного заряда, загрязнений и т.п. Вообще говоря, для мезаструктурных SiC-диодов вместо вертикальных стенок более эффективным могло бы стать формирование мезаструктур с наклонными стенками по аналогии с формированием прямой или обратной фаски в кремниевых силовых приборах [2]. Что касается прямой фаски, то ее применение может быть эффективным для таких SiC-приборов, в которых  $p$ -область блокирующего  $p - n_0$ -перехода умеренно легирована (рис. 1); здесь за уменьшение поверхностного поля отвечает расширение обедненной области  $p - n_0$ -перехода у поверхности  $p$ -слоя. Такие  $p - n_0$ -переходы с концентрацией акцепторов в  $p$ -области  $\sim 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$  имеют дрейфовые диоды с резким восстановлением [3], биполярные транзисторы и встроенные антипараллельные диоды в МОП-транзисторах с индуцированным  $n$ -каналом [1].

В работе [4] с помощью двумерного численного моделирования нами было показано, что для мезаструктурного 4H-SiC  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диода, рассчитанного на обратное напряжение  $\sim 1500 \text{ В}$ , эффективной должна быть прямая фаска с углом  $\alpha < 10^\circ$  относительно плоскости  $p - n_0$ -перехода. Например, фаска с углом  $\alpha = 6^\circ$  позво-



**Рис. 1.** Мезоструктурный  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диод с прямой фаской. Пунктиром показаны границы области пространственного заряда блокирующего  $p - n_0$ -перехода.

ляет уменьшить краевое поверхностное поле почти в 3 раза по сравнению с полем в объеме. В работе [5] нами было продемонстрировано формирование  $4H-SiC$  мезоструктур с пологими боковыми стенками с помощью селективного РИТ  $4H-SiC$  через маску из фоторезиста; наклонные стенки получались при одновременном травлении  $4H-SiC$  и резистивной маски, край которой имеет форму острого клина. Были подобраны геометрические параметры маски (толщина и угол краевого клина) и параметры процесса травления (скорость и селективность травления  $4H-SiC$  по отношению к фоторезисту), обеспечивающие формирование мезоструктур высотой 3 мкм и углом  $\alpha < 10^\circ$ . В настоящей работе эта технология использовалась для изготовления высоковольтных  $4H-SiC$   $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диодов с прямой фаской.

## 2. Технология изготовления диодов

Для изготовления диодов использовалась коммерческая  $4H-SiC$  пластина  $n$ -типа с выращенной методом CVD-эпитаксии  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -структурой. В таблице приведены параметры эпитаксиальных слоев — уровень легирования и толщина слоев.

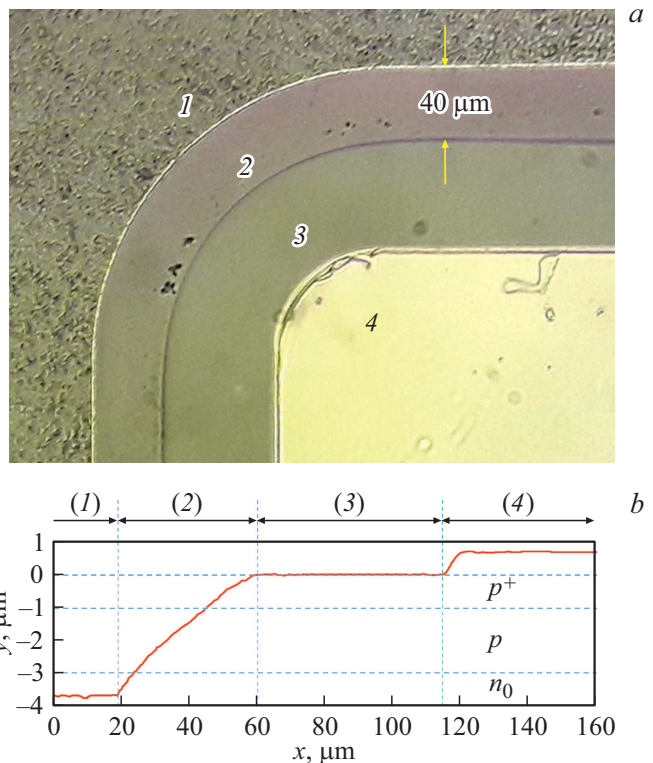
Технология изготовления диодов включала шлифовку тыльной стороны пластины, химическую очистку пластины на разных стадиях технологического процесса, нанесение и термический отжиг металлов, контактную фотолитографию, реактивно-ионное травление мезоструктур, резку пластины на чипы и их корпусирование. Последовательность основных технологических операций следующая.

Параметры эпитаксиальных слоев		
	Концентрация легирующих примесей ( $см^{-3}$ )	Толщина (мкм)
$p^+$	$10^{19}$	1
$p$	$8 \cdot 10^{16}$	2
$n_0$	$8 \cdot 10^{15}$	5.5
$n^+$	$5 \cdot 10^{18}$	1

*Формирование сплошного катодного омического контакта к шлифованной  $n$ -подложке.* Контактным металлом служил никель (толщина слоя  $\sim 0.3$  мкм), нанесенный ионным распылением и отожженный в вакууме при температуре  $950^\circ C$  в течение 15 мин; далее ионным распылением поверх вожденного контактного  $Ni$ -слоя наносился слой серебра толщиной 1 мкм.

*Формирование на поверхности  $p^+$ -слоя анодных омических контактов.* Анодные контактные площадки размером  $960 \times 960$  мкм формировались с помощью взрывной фотолитографии. Контактным слоем служила комбинация из титана и хрома (толщина слоев 50 и 50 нм соответственно), нанесенная электронно-лучевым испарением в вакууме и отожженная при температуре  $950^\circ C$  в течение 5 мин; далее ионным распылением поверх вожденного контактного слоя наносился слой никеля толщиной 0.3 мкм с помощью повторной взрывной фотолитографии.

*Формирование прямой фаски.* Мезоструктуры с пологими стенками формировались с помощью селективного РИТ  $4H-SiC$  в плазме  $NF_3$  с маской из фоторезиста; наклонные стенки получались при одновременном травлении  $4H-SiC$  и резистивной маски, край которой имел форму острого клина с углом  $\sim 22^\circ$ . Маскирующие фоторезистивные площадки размером  $1060 \times 1060$  мкм формировались с помощью фотолитографии с совмещением (маскирующие элементы полностью закрывали анодные контакты). На рис. 2 показано микроскопиче-



**Рис. 2.** Микроскопическое изображение (а) и профиль (b) поверхности  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диода с прямой фаской: 1 —  $n_0$ -база, 2 — фаска, 3 —  $p^+$ -эмиттер, 4 — анодный никелевый контакт.

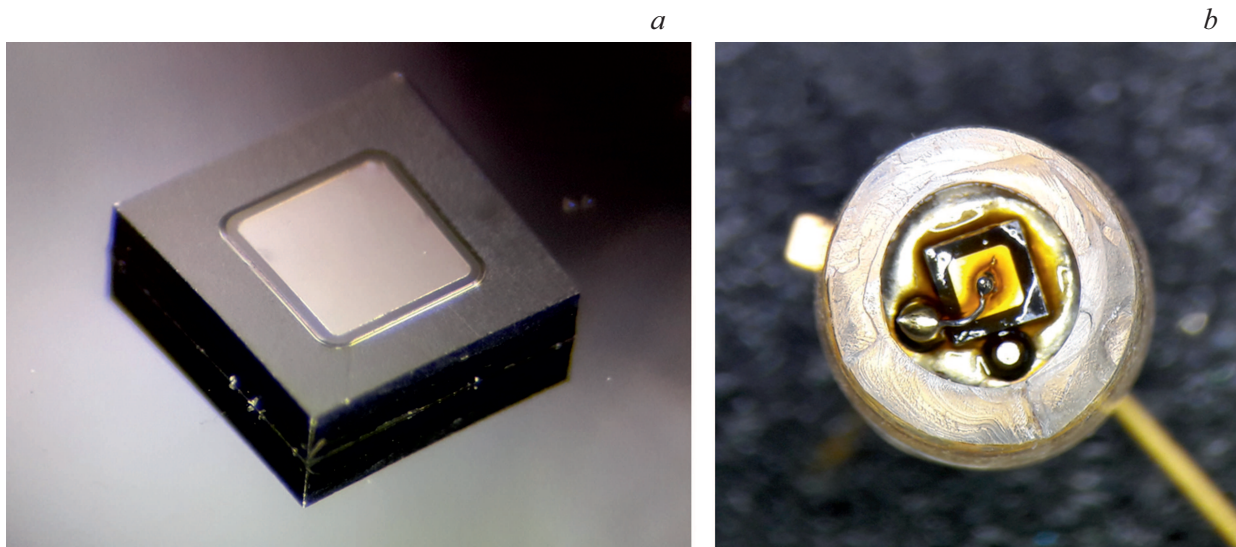


Рис. 3. Фотографии некорпусированного (а) и корпусированного (b) диодных чипов.

ское изображение поверхности мезоструктуры и профиль ее поверхности, полученный с помощью профилометра DEKТАК 3030. Как видно из рис. 2, мезоструктуры имеют высоту 3.6 мкм, которая немного больше глубины залегания  $p-n_0$ -перехода (3 мкм), и угол наклона боковой стенки  $5^\circ$  от плоскости  $p-n_0$ -перехода.

*Резка пластин на чипы.* Пластина с дискретными диодными структурами разрезалась алмазным диском на отдельные чипы размером  $2 \times 2$  мм (рис. 3, а).

*Корпусирование чипов.* Изготовленные чипы спаивались в металлостеклянные корпуса с последующим присоединением анодных выводов (рис. 3, б). Поверхность чипов закрывалась электроизоляционным лаком.

### 3. Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных диодов измерялись с помощью цифрового характеристикографа Л2-100.

*Прямые ВАХ.* На вставке рис. 4 показана типовая ВАХ в прямом направлении, измеренная при токах до 10 А (плотность тока  $10^3$  А/см<sup>2</sup>); запись проводилась в режиме однократного запуска развертки по напряжению. Как видно, напряжение открывания диодов составляет  $\sim 3$  В, а дифференциальное сопротивление в открытом состоянии — 0.35 Ом.

*Обратные ВАХ.* Обратные ВАХ на характеристикографе Л2-100 измерялись при токах до 4 мА. На рис. 4 сплошными линиями представлены обратные ВАХ трех диодов. Диоды показали резкий пробой при напряжениях от 1420 до 1500 В. Такой разброс значений обусловлен, очевидно, неоднородностью параметров эпитаксиальной структуры (согласно данным производителя, неоднородность легирования эпитаксиальных слоев  $n$ - и  $p$ -типа

может достигать 25 и 50% соответственно, а неоднородность толщины эпитаксиальных слоев — 10%).

Для оценки эффективности работы прямой фаски в качестве охранного контура проводился расчет обратных ВАХ идеализированного одномерного диода с теми же параметрами структуры, как и у реальных диодов. Использовался программный пакет SILVACO TCAD, в состав которого входит модуль ATLAS, предназначенный для моделирования электрических характеристик готовых полупроводниковых приборов. Моделировался переходной процесс в простейшей цепи, включающей источник медленно изменяющегося со временем то-

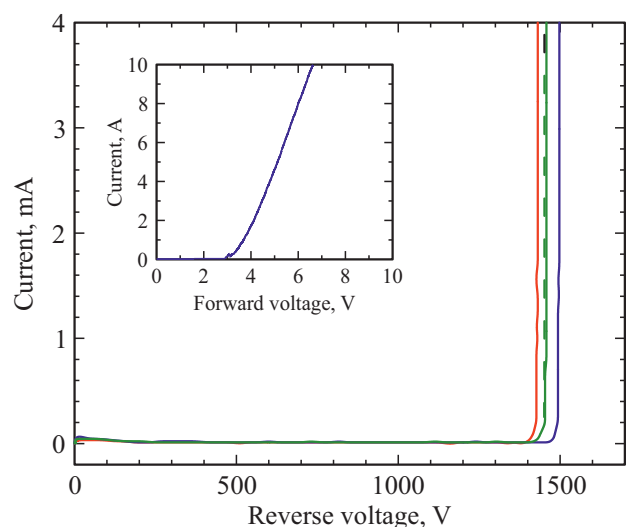


Рис. 4. Измеренные обратные ВАХ трех  $p^+-p-n_0-n^+$ -диодов (сплошные линии) и рассчитанная обратная ВАХ идеализированного одномерного  $p^+-p-n_0-n^+$ -диода (пунктирная линия). На вставке представлена типовая ВАХ, измеренная в прямом направлении.

ка  $I(t)$  и подключенный к источнику тока моделируемый 4H-SiC диод.

Модельный эксперимент состоял в следующем. Начиная с момента времени  $t = 0$  ток медленно поднимается со скоростью  $dI/dt = 1 \text{ A/c}$ . Во время переходного процесса записывается файл *pn\_tr.log*, содержащий временную зависимость напряжения на диоде. Искомая зависимость  $I(V)$  получается путем исключения параметра  $t$  из ВАХ, заданной параметрически:  $I(t)$  и  $V(t)$ . Из физических моделей, которые заложены в модуле ATLAS, использовались следующие: 1) модель низкополевой подвижности носителей тока [6] с параметрами для 4H-SiC из работы [7]; 2) модель насыщения дрейфовой скорости носителей тока [6] с параметрами для 4H-SiC из работы [8]; 3) модель ударной ионизации [9] с параметрами для 4H-SiC из работы [10]; 4) модель генерации-рекомбинации Шокли–Рида–Холла [11] с параметрами для 4H-SiC, принятыми в ATLAS по умолчанию. Известная для широкозонного 4H-SiC проблема запуска ударной ионизации при комнатной температуре была решена способом, который предлагается в описании ATLAS, а именно путем ограничения снизу плотности дырочного тока. В нашем случае плотность дырочного тока ограничивалась на уровне  $10^{-9} \text{ A/cm}^2$  (абсолютный ток 1 нА).

На рис. 4 пунктирной линией представлена рассчитанная обратная ВАХ. Как видно, напряжение лавинного пробоя одномерного  $p^+ - p - n_0 - n^+$ -диода, равное 1450 В, попадает в диапазон экспериментально измеренных значений, т.е. эффективность работы прямой фаски в качестве охранного контура близка к 100%.

**Импульсные обратные ВАХ (режим мощного лавинного пробоя).** Импульсные обратные ВАХ изготовленных диодов измерялись с помощью схемы, показанной на рис. 5 (в зарубежной литературе она получила название Unclamped Inductive Switching, UIS). Схема работает следующим образом. Источником питания служит конденсатор  $C$ , заряженный до напряжения  $V_0$ ; величина  $V_0$  выбирается намного меньше, чем напряжение пробоя диода ( $V_B$ ). Исходно к диоду (DUT) приложено обратное напряжение  $V_0$ ; это же напряжение приложено к стоку закрытого транзистора  $T$ . Когда транзистор  $T$  открывается импульсом напряжения  $V_G$  на затворе, конденсатор  $C$  разряжается через открытый транзистор, индуктивность  $L$  и сопротивление  $R_2$ . Максимальный ток в индуктивности  $L$  может варьироваться изменением длительности открытого состояния транзистора  $T$ . После закрывания транзистора  $T$  ток из него перебрасывается в диод вместе с последовательно включенным измерительным резистором  $R_3$ . При этом на диоде генерируется обратное напряжение, превышающее напряжение  $V_B$ . Далее по мере разряда индуктивности  $L$  ток падает, но напряжение остается выше  $V_B$ . И наконец, когда ток уменьшается практически до нуля, напряжение также снижается до исходной величины  $V_0$ .

Во время импульсных испытаний через диод пропусклась серия одиночных импульсов лавинного тока с

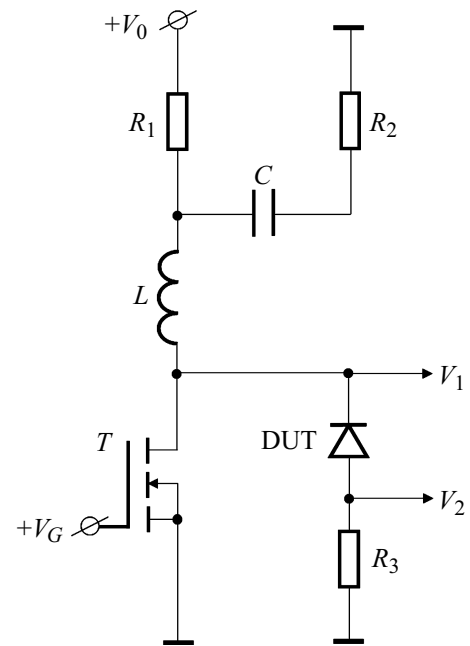


Рис. 5. Схема UIS.

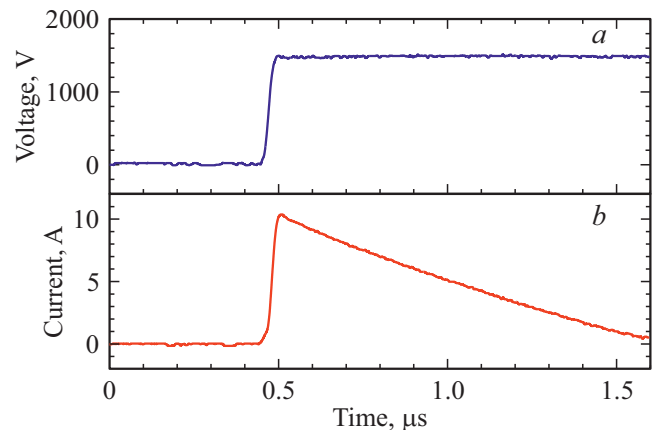
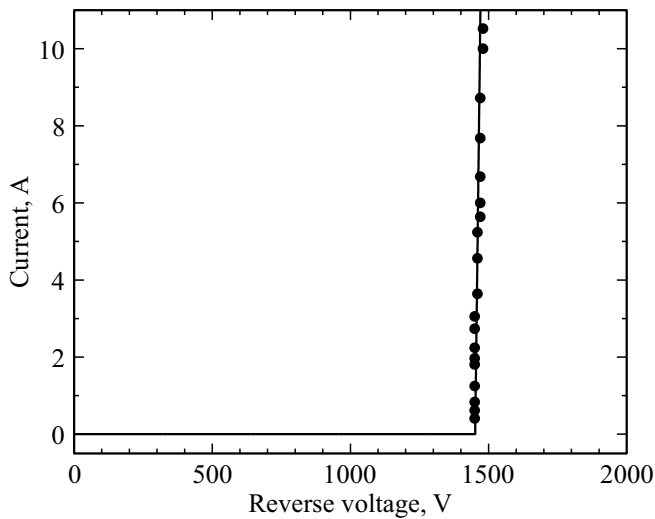


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (a) и тока (b), измеренные в схеме UIS.

нарастающей амплитудой. На каждом шаге двухканальным цифровым осциллографом записывались временные диаграммы напряжения на диоде ( $V = V_1 - V_2$ ) и тока через него ( $I = V_2/R_3$ ). Обратная ВАХ строилась по пиковым значениям напряжения и тока на осциллограммах (проводились курсорные измерения амплитуды импульсов).

Изготовленные диоды выдерживали без деструкции одиночные импульсы лавинного тока с амплитудой, как минимум, 10 А и длительностью 1.2 мкс (рассеиваемая энергия 9 мДж). На рис. 6 показаны соответствующие осциллограммы напряжения и тока, свидетельствующие об обратимом характере лавинного пробоя. Пиковая плотность тока составляет  $10^3 \text{ A/cm}^2$  при напряжении 1480 В.



**Рис. 7.** Измеренная импульсная обратная ВАХ  $p^+-p-n_0-n^+$ -диода (точки) и рассчитанная обратная ВАХ идеализированного одномерного диода (сплошная линия).

На рис. 7 точками представлена построенная обратная ВАХ; на этом же рисунке сплошной линией показана обратная ВАХ идеализированного одномерного диода, рассчитанная с помощью TCAD-моделирования. Как видно, экспериментальная и рассчитанная ВАХ практически идентичны: в режиме пробоя дифференциальное сопротивление диода составляет  $\sim 3$  Ом, что свидетельствует о том, что пробой однороден по площади.

#### 4. Заключение

В работе продемонстрированы высоковольтные (1500 В) 4H-SiC  $p^+-p-n_0-n^+$ -диоды, способные к работе в режиме мощного контролируемого лавинного пробоя при плотностях тока  $\sim 10^3$  А/см<sup>2</sup>. Решающим фактором в достижении таких параметров стало создание высокоэффективного (100%) краевого охранного контура — прямой фаски.

Наряду с высокой эффективностью прямая фаска относительно проста в изготовлении: нет необходимости в литографии с высоким разрешением; не требуется проводить глубокого травления мезаструктур на всю толщину блокирующей  $n_0$ -базы (достаточно травления на глубину, равную суммарной толщине слоев  $p$ -типа); нет жестких требований к электрическим характеристикам пассивирующего диэлектрического покрытия.

Наконец, можно отметить, что прямая фаска может применяться не только для диодов с  $p^+-p-n_0-n^+$ -структурой. Например, для диодов с  $p^+-n_0-n^+$ -структурой и диодов Шоттки с  $n_0$ -базой может использоваться комбинированная защита: вначале на периферии таких диодов создается умеренно легированная  $p$ -область (например, с помощью имплантации бора), а затем формируется мезаструктура с прямой фаской.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] Т. Kimoto, J.A. Cooper. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications* (Wiley-IEEE Press, 2014).
- [2] А. Блихер. *Физика силовых биполярных и полевых транзисторов* (Л., Энергоатомиздат, 1986).
- [3] П.А. Иванов, О.И. Коньков, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов. *Письма ЖТФ*, **44**, 3 (2018).
- [4] Н.М. Лебедева, Н.Д. Ильинская, П.А. Иванов. *ФТП*, **54**, 207 (2020).
- [5] Н.М. Лебедева, Т.П. Самсонова, Н.Д. Ильинская, С.И. Трошков, П.А. Иванов. *ЖТФ*, **90**, 997 (2020).
- [6] D.M. Caughey, R.E. Thomas. *Proc. IEEE* **55**, 2192 (1967).
- [7] Т.Т. Мнацаканов, М.Е. Левинштейн, Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков. *ФТП*, **38**, 56 (2004).
- [8] P.A. Ivanov, A.S. Potapov, T.P. Samsonova, I.V. Grekhov. *Solid-State Electron.*, **123**, 15 (2016).
- [9] S. Selberherr. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices* (Springer Verlag, 1984).
- [10] T. Hatakeyama, T. Watanabe, T. Shinohe, K. Kojima, K. Arai, N. Sano. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 1380 (2004).
- [11] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1.

Редактор А.Н. Смирнов

#### High-voltage 4H-SiC based avalanche diodes with a negative bevel

P.A. Ivanov, N.M. Lebedeva, N.D. Il'inskaya, T.P. Samsonova, O.I. Kon'kov

Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** High-voltage 4H-SiC based avalanche  $p^+-p-n_0-n^+$ -diodes were fabricated. The diodes were designed as mesa-structures with gentle-slope walls forming the bevel of negative type. For negative beveling, selective dry etch process of SiC with a photo-resistive masking pad having a form of a sharp wedge at the edge was successfully used. The mesa's area and height are 1 mm<sup>2</sup> and 3.6 μm (which is slightly greater than the depth of the  $p-n_0$ -junction — 3 μm), respectively; the angle of the beveled wall is about 5 degrees. The  $I-V$  characteristics of fabricated diodes were measured. At forward current of 10 A, the differential resistance and voltage drop were measured to be 0.35 Ohm and 6.5 V, respectively. In reverse direction, the diodes demonstrated a sharp breakdown at voltages ranging from 1420 to 1500 V. By using a TCAD-simulation, the reverse  $I-V$  characteristic was calculated for an ideal one-dimensional diode possessing the same structure parameters. The avalanche breakdown voltage was calculated to be 1450 V. It means that the achieved efficiency of junction termination is close to 100%. The pulsed reverse  $I-V$  characteristics was measured. In avalanche breakdown regime, the differential resistance was measured to be about 3 Ohm which indicates that the avalanche current is uniformly distributed within the diode area. The diodes can withstand single current pulses of at least 10 A in amplitude (current density of  $10^3$  A/cm<sup>2</sup>) and 1.2 μs in time (avalanche energy is 9 mJ).