

07.2

Высоковольтные лавинные 4H-SiC-диоды с охранной полуизолирующей областью

© П.А. Иванов, М.Ф. Кудояров, Н.М. Лебедева, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 26 ноября 2020 г.
В окончательной редакции 26 ноября 2020 г.
Принято к публикации 14 декабря 2020 г.

Изготовлены высоковольтные 4H-SiC-диоды с контролируемым лавинным пробоем при обратном напряжении 1460 V. Для устранения краевых эффектов на периферии диодов формировалась полуизолирующая область с помощью облучения высокоэнергетическими (53 MeV) ионами аргона. Изготовленные диоды функционируют при плотностях лавинного тока $\sim 10^3$ A/cm²; лавинное сопротивление составляет не более $0.03 \Omega \cdot \text{cm}^2$. При длительности импульсов тока 4 μs лавинная энергия, рассеиваемая диодами до отказа (вследствие вторичного теплового пробоя), и локальный температурный перегрев составляют 5 J/cm² и 850°C соответственно.

Ключевые слова: карбид кремния, диод, охранный контур, лавинный пробой.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.06.50760.18637

Высоковольтные полупроводниковые приборы на основе карбида кремния политипа 4H (4H-SiC) в последнее время все активнее разрабатываются и внедряются в силовую электронику [1]. Ключевой проблемой при создании высоковольтных 4H-SiC-приборов является необходимость устранения краевых эффектов, вызывающих преждевременный краевой пробой.

Ранее нами была показана возможность создания в *n*-4H-SiC с концентрацией доноров $\sim 10^{16}$ cm⁻³ приповерхностных полуизолирующих *i*-слоев толщиной $\sim 10 \mu\text{m}$ с помощью облучения высокоэнергетическими (53 MeV) ионами аргона [2]. При комнатной температуре удельное сопротивление облученных аргоном *i*-слоев составляет $\sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$. Показано, что за компенсацию донорной проводимости ответственны радиационные дефекты, закрепляющие положение равновесного уровня Ферми на глубине 1.1–1.2 eV ниже дна зоны проводимости 4H-SiC.

TCAD-моделирование высоковольтных (~ 1000 V) 4H-SiC-диодов показало высокую эффективность краевой *i*-области в качестве охранный контура [3].

В настоящей работе изготовлены и исследованы 4H-SiC-диоды с краевой *i*-областью (рис. 1). Диоды изготавливались на основе пластины 4H-SiC *n*-типа с выращенной на ней эпитаксиальной $p^+ - p - n_o - n^+$ -структурой: p^+ -слой имеет толщину 1 μm и концентрацию акцепторов 10^{19} cm⁻³; *p*-слой имеет толщину 2 μm и концентрацию акцепторов $8 \cdot 10^{16}$ cm⁻³; n_o -слой имеет толщину 5.5 μm и концентрацию доноров $8 \cdot 10^{15}$ cm⁻³; n^+ -слой имеет толщину 1 μm и концентрацию доноров $5 \cdot 10^{18}$ cm⁻³.

До процесса облучения постростовая технология изготовления диодов включала стандартные операции: формирование сплошного катодного омического контакта к

n-подложке (контактный металл — Ni), формирование анодных омических контактов к p^+ -слою (контактный металл — Al/Ti; площадь контактов 1 mm²), реактивно-ионное травление меза-структур в плазме NF₃.

Для маскирования объема диодов от потока ионов при облучении на анодные контакты осаждались никелевые столбики высотой 10–12 μm (групповая технология гальванического осаждения никеля детально описана в работе [4]). Далее проводилось облучение 53 MeV ионами аргона на УНУ „Циклотрон ФТИ“.

После облучения пластина с дискретными диодами разрезалась на отдельные чипы размером 2 × 2 mm. Чипы напаивались в металлостеклянные корпуса с последующим присоединением проволочных анодных выводов. Поверхность чипов покрывалась электроизоляционным лаком, имеющим высокую электрическую прочность.

Обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись с помощью схемы „разблокированного ин-

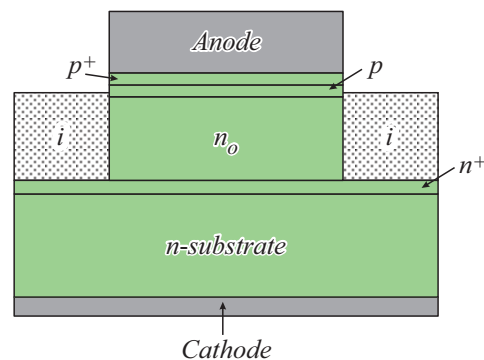


Рис. 1. 4H-SiC $p^+ - p - n_o - n^+$ -диод с краевой полуизолирующей областью.

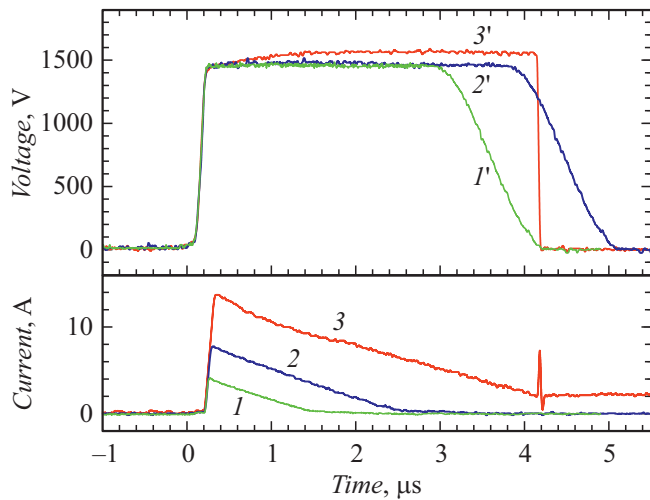


Рис. 2. Осциллограммы тока (кривые 1–3) и напряжения (кривые 1’–3’), измеренные в схеме UIS.

дуктивного переключения“ (в англоязычной литературе unclamped inductive switching, UIS). Схема UIS предназначена для пропуска через полупроводниковый диод импульсов лавинного тока треугольной формы с крутым фронтом нарастания (как правило, не более 100 ns) и временем спада в микросекундном диапазоне.

Через изготовленные 4H-SiC-диоды пропускалась серия одиночных импульсов лавинного тока; амплитуда тока в серии поднималась ступенями приблизительно по 0.5 А (сразу отметим, что диоды выдерживали без деградации импульсы тока амплитудой ~ 10 А и длительностью 4 μs). На каждом шаге двухканальным цифровым осциллографом записывались временные диаграммы напряжения на диоде и тока через него. На рис. 2 показаны осциллограммы, записанные для одного из диодов при трех амплитудах тока. По пиковым значениям тока и соответствующим им значениям напряжения строилась обратная ВАХ (рис. 3). Как видно, в диоде имеет место резкий пробой при напряжении 1460 В. На вставке к рис. 3 показана типовая прямая ВАХ, измеренная при токах до 10 А (плотность тока 10³ А/см²) с помощью цифрового характериографа Л2-100; запись проводилась в режиме однократного запуска развертки по напряжению. Как видно, напряжение открывания диодов составляет около 3 В, а дифференциальное сопротивление в открытом состоянии — около 0.3 Ω.

Для оценки эффективности работы охранного контура проводился расчет обратной ВАХ идеализированного одномерного диода с теми же параметрами структуры, что и у реальных диодов (использовался модуль ATLAS из программного пакета SILVACO TCAD). Из физических моделей, которые заложены в модуле ATLAS, использовались следующие: 1) модель низкополевой подвижности носителей тока [5] с параметрами для 4H-SiC из работы [6]; 2) модель насыщения дрейфовой скорости носителей тока [5] с параметрами для 4H-SiC

из работы [7]; 3) модель ударной ионизации [8] с параметрами для 4H-SiC из работы [9]; 4) модель генерации-рекомбинации Шокли–Рида–Холла [10] с параметрами для 4H-SiC, принятыми в ATLAS по умолчанию.

Как видно из рис. 3, экспериментальная и рассчитанная ВАХ практически идентичны: в режиме пробоя дифференциальное (лавинное) сопротивление диода составляет около 3 Ω (0.03 Ω · cm²), что свидетельствует о том, что лавинный пробой однороден по площади. Таким образом, эффективность работы охранного контура составляет практически 100%.

Выше было отмечено, что диоды безотказно выдерживали одиночные импульсы тока амплитудой ~ 10 А (пиковая мощность ~ 15 kW). Очевидно, что при увеличении тока в конце концов должен происходить отказ вследствие вторичного теплового пробоя. На рис. 2 продемонстрирован деструктивный тепловой пробой при пропуске импульса тока амплитудой 13.5 А. В момент времени, близкий к окончанию импульса, наблюдается резкий всплеск тока при уменьшении напряжения до нуля. Лавинная энергия (E_{max}), которая рассеивается диодом до того, как происходит отказ, рассчитывается следующим образом:

$$E_{max} = \int_0^{t^*} IU dt,$$

где t^* — момент времени, при котором происходит отказ. В нашем случае $E_{max} \approx 50$ мДж (5 Дж/см²). Измеренная величина E_{max} оказалась сравнимой с лучшими опубликованными ранее результатами. В частности, для 650-вольтовых 4H-SiC JBS-диодов с однородным лавинным пробоем удельная E_{max} при длительности импульса тока 4 μs также составляет 5 Дж/см² [11].

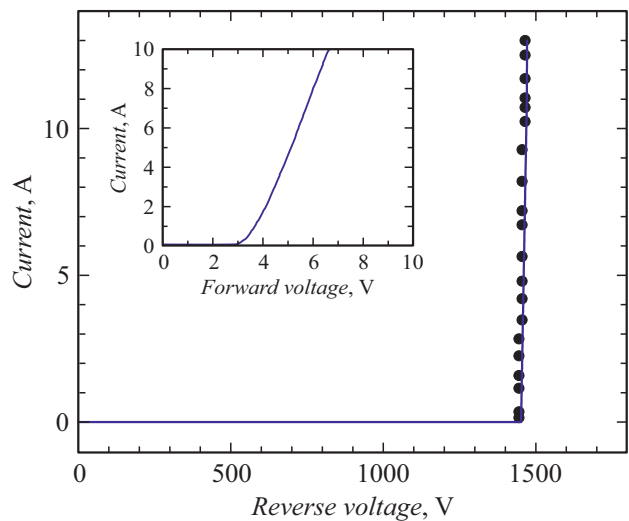


Рис. 3. Измеренная импульсная обратная ВАХ $p^+ - p - n_o - n^+$ -диода (точки) и рассчитанная обратная ВАХ идеализированного одномерного диода (сплошная линия). На вставке показана прямая ВАХ.

Известно, что лавинный пробой в $4H$ -SiC-диодах имеет положительный температурный коэффициент (см., например, работы [11,12]). Действительно, в нашем случае индикатором локального джоулевого разогрева было увеличение напряжения пробоя с 1460 В в начале импульса до 1577 В в максимуме (см. кривую 3' на рис. 2). Мы полагаем, что наиболее достоверное значение относительного температурного коэффициента напряжения пробоя составляет $K_U = 9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [11]. Если принять это значение, то в нашем случае локальный температурный перегрев оценивается величиной 850°C , что не противоречит данным, полученным с помощью численного моделирования нестационарного теплового процесса [11].

В заключение следует подчеркнуть, что решающим фактором в создании $4H$ -SiC-диодов, работоспособных в режиме мощного лавинного пробоя, стало создание высокоэффективного краевого охранного контура. В принципе полуизолирующий охранный контур может применяться не только для p - n -переходных диодов. Например, его можно использовать для JBS-диодов с интегрированной (p - n)-структурой Шоттки, для p -базовых биполярных транзисторов и для МОП-транзисторов (МОП — металл-оксид-полупроводник) с индуцированным n -каналом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Kimoto, J.A. Cooper, *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications* (Wiley-IEEE Press, 2014).
- [2] П.А. Иванов, М.Ф. Кудояров, М.А. Козловский, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, ФТП, **50** (7), 937 (2016).
- [3] П.А. Иванов, Н.М. Лебедева, ФТП, **55** (2), 201 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.02.50509.9537
- [4] П.А. Иванов, Н.М. Лебедева, Н.Д. Ильинская, М.Ф. Кудояров, Т.П. Самсонова, О.И. Коньков, Ю.М. Задиранов, ФТП, **55** (2), 188 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.02.50507.9528
- [5] D.M. Caughey, R.E. Thomas, Proc. IEEE, **55**, 2192 (1967).
- [6] Т.Т. Мнацаканов, М.Е. Левинштейн, Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков, ФТП, **38** (1), 56 (2004).
- [7] P.A. Ivanov, A.S. Potapov, T.P. Samsonova, I.V. Grekhov, Solid-State Electron., **123**, 15 (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2016.05.010>
- [8] S. Selberherr, *Analysis and simulation of semiconductor devices* (Springer-Verlag, 1984).
- [9] T. Hatakeyama, T. Watanabe, T. Shinohe, K. Kojima, K. Arai, N. Sano, Appl. Phys. Lett., **85** (8), 1380 (2004). <https://doi.org/10.1063/1.1784520>
- [10] С. Зи, *Физика полупроводниковых приборов* (Мир, М., 1984), т. 1.
- [11] A. Konstantinov, H. Pham, B. Lee, K.S. Park, B. Kang, F. Allerstam, T. Neyer, Solid-State Electron., **148**, 51 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.sse.2018.07.011>
- [12] R. Rupp, R. Gerlach, A. Kabakow, R. Schörner, C. Hecht, R. Elpelt, in *Proc. IEEE 26th Int. Symp. on power semiconductor devices & IC's* (IEEE, 2014), p. 67. <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2014.6855977>