

Разработка технологии и исследование сверхвысокочастотных переключателей на основе 4H-SiC $p-i-n$ -диодов

© А.А. Лебедев,¹ А.В. Кириллов,² Л.П. Романов,² А.В. Зубов,³ А.М. Стрельчук¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² ЗАО „Светлана-Электронприбор“,
Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 9 июля 2019 г.

В окончательной редакции 9 июля 2019 г.

Принято к публикации 13 августа 2019 г.

Разработана технология СВЧ $p-i-n$ -диодов на основе карбида кремния (SiC). С использованием данных диодов изготовлены переключатели для трехсантиметрового диапазона. Показано, что разработанные приборы по величине рабочей мощности примерно в 10 раз превышают рабочую мощность переключателей на базе Si-диодов при одинаковой толщине базы, равной 5 μm . Намечены пути дальнейшей оптимизации технологии данных приборов.

Ключевые слова: карбид кремния, СВЧ диоды, модуляторы, переключатели, аттенюаторы.

DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48820.268-19

Введение

Благодаря большой ширине запрещенной зоны, высокой термической, химической и радиационной стойкости SiC является перспективным материалом для создания полупроводниковых приборов [1–6]. Ранее нами была продемонстрирована возможность создания переключателя на основе 4H-SiC $p-i-n$ -диодов в диапазоне частот ~ 10 GHz. Целью настоящей работы была разработка технологии изготовления и конструкции SiC $p-i-n$ -диодов для устройств приборов СВЧ диапазона: переключателей, модуляторов, аттенюаторов и фазовращателей.

4H-SiC $p-i-n$ -диоды были изготовлены на основе эпитаксиальной структуры 4H-SiC, производства компаний CREE (США) [7] и Ascatron (Швеция) [8]. Данные структуры представляли из себя n^+ -подложку с концентрацией доноров (Nd–Na) $\sim 1-2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, толщиной 360 μm с двумя последовательно выращенными эпитаксиальными слоями: n -(Nd–Na $\sim 0.4-2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, толщиной 7–15 μm) и p^+ (Na–Nd $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$).

Технология

Для снижения сопротивления диода подложка утоньшалась шлифовкой до толщины $\sim 120-130 \mu\text{m}$. До формирования мезоструктур на поверхности эпитаксиальных слоев с помощью взрывной фотолитографии создавались алюминиевые маски диаметром 40–200 μm . Мезоструктуры высотой $\sim 2 \mu\text{m}$ формировались методом плазмохимического травления в плазме $\text{SF}_6 + \text{O}_2$

на установке Plasmalab-100. Выбранный режим травления (0.5 nm/min) обеспечивал ровную поверхность, а угол наклона меза составлял $72-75^\circ$ к поверхности кристалла. Затем поверхность мезоструктур окислялась при 1100°C в атмосфере влажного кислорода в течение 120 min, при этом формировалась пленка защитного окисла толщиной порядка 10 nm. Перед напылением пленка окисла удалялась, обеспечивая очистку поверхности.

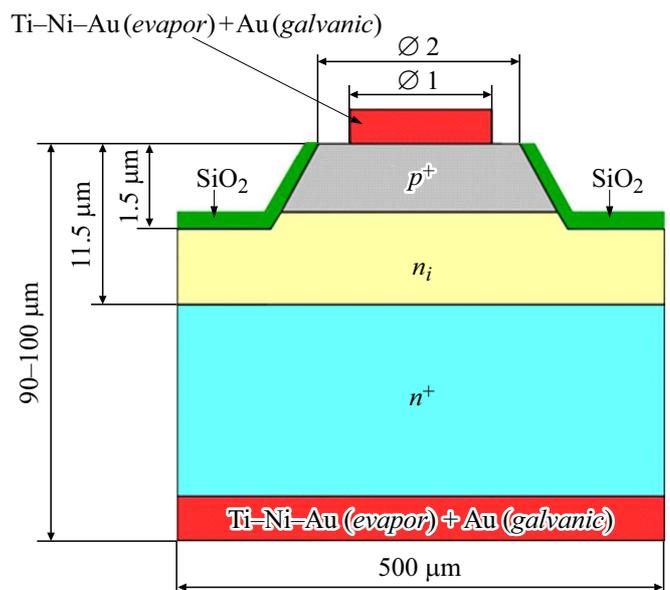


Рис. 1. Общий вид полученного 4H-SiC $p-i-n$ -диода. Для всех размеров мезоструктур диаметр омического контакта (Ø_1) был на 10 μm меньше диаметра меза (Ø_2).

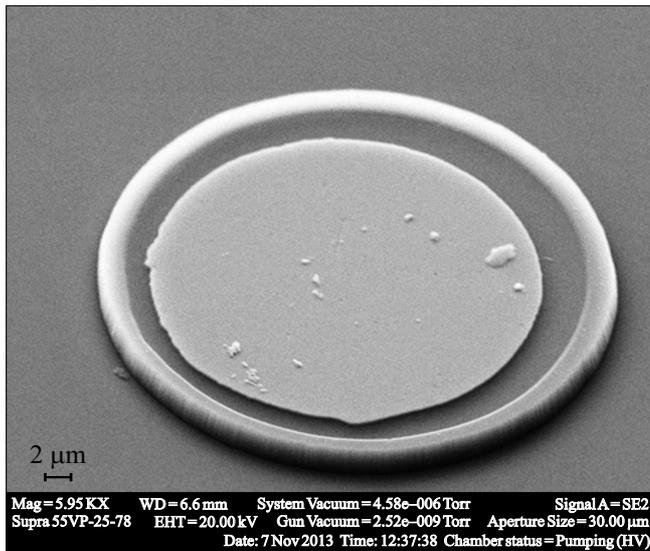


Рис. 2. Внешний вид структуры $p-i-n$ -диода.

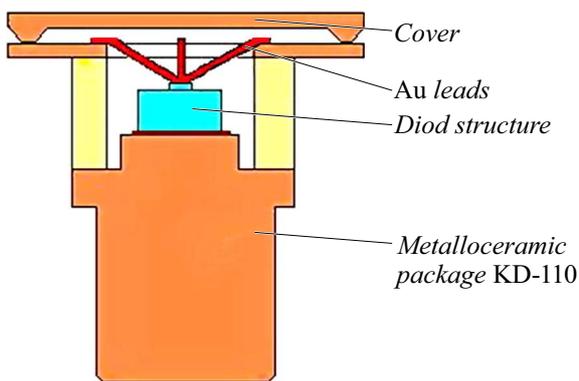


Рис. 3. Конструкция корпусного SiC $p-i-n$ -диода.

Для создания омических контактов к p^+ -слою на его поверхность напылялись слои металла, Al/Ti/Ni толщиной 50/50/200 nm. Контакты к n^+ -подложке получали напылением металлизации, Ti/Ni/ толщиной 40/250 nm. Напыление металлов проводилось на установке электронно-лучевого напыления. Далее проводилась процедура отжига при температуре 1050°C в течение 60 s в высокоом вакууме. При этом формировались низкоомные омические контакты с контактным сопротивлением $6-7 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ (p^+ -тип) и $1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ (n^+ -тип). Диаметры формируемых контактов были на 10 μm меньше диаметра мезаструктуры. Для последующей пайки проводилось усиление металлизации напылением Ti/Au на обе стороны с последующим гальваническим осаждением золота $\sim 2-3 \mu\text{m}$.

Структура полученного чипа диода представлена на рис. 1 и общий вид структуры на рис. 2.

После резки пластины на отдельные чипы размером около 1 mm² проводилась отбраковка по обратному пробивному напряжению. Затем чипы паялись припо-

ем золото-олово в стандартные металлокерамические корпуса КД-110. Вывод от p^+ -контакта осуществлялся термокомпрессией золотой проволоки диаметром 30 μm . Конструкция корпусного диода показана на рис. 3.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Измерения пробивных напряжений полученных диодов показали, что утечки на уровне 10 μA начинались при напряжении 600 V независимо от толщины базы (7–15 mm). Отдельные структуры имели пробивное напряжение ≥ 1000 V. Детальное исследование причин пробоя показало, что утечки происходят по боковой поверхности мезаструктуры. Вначале наблюдалось искрение по поверхности, затем развивался необратимый пробой. Дальнейшее улучшение характеристик прибора может быть, по-видимому, достигнуто за счет снижения напряженности электрического поля на поверхности полупроводника. Например, за счет создания компенсированных приповерхностных областей и покрытия поверхности диодной структуры кремнийорганическим компаундом ГКН.

Дифференциальное сопротивление R_d (рис. 4) корпусированных структур (при токах 5–10 mA) составляло около 10 Ω . При токах 100 mA сопротивление диодов уменьшалось до 1–1.5 Ω , что вполне приемлемо для работы в СВЧ устройствах.

Было проведено измерение ВАХ корпусированных $p-i-n$ -диодов в диапазоне температур. Корпусированный диод нагревался в атмосфере на нагреваемом основании (столике). Контролировалась температура столика (термопарой). Температурное поведение ВАХ диода при прямом и обратном смещении показано на рис. 5.

Поведение обратного тока достаточно характерно для 4H-SiC $p-i-n$ -структур. В частности, параметр J_0 генерационно-рекомбинационного тока в 4H-SiC $p-i-n$ -структурах составляет $\sim 10^{-4}$ A/cm² при 900 K, что достаточно близко экспериментально наблюдающемуся обратному току $\sim 10^{-6}$ A ($10^{-2}-10^{-1}$ A/cm²)

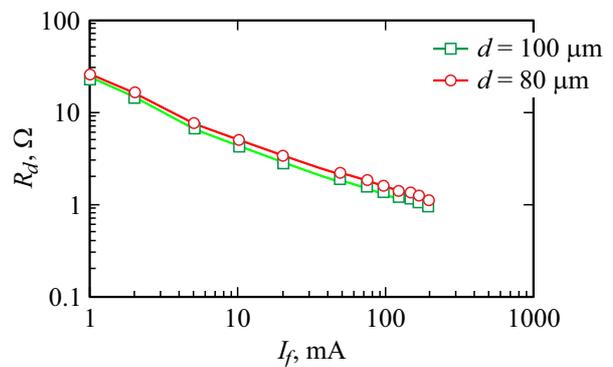


Рис. 4. Зависимость дифференциального сопротивления SiC $p-i-n$ -диодов от прямого тока.

при наибольшей температуре (которая составляла около 600°C) (рис. 5, б).

Высокочастотные исследования и испытания на высоком уровне СВЧ мощности были проведены на двух типах переключателей на базе волноводно-щелевой линии с применением бескорпусных SiC *p-i-n*-диодов и на базе волноводно-штыревой конструкции переключателя с применением корпусированных SiC *p-i-n*-диодов.

На рис. 6 приведены частотные характеристики потерь запирания и пропускания переключателей на волноводно-щелевой линии, собранных на базе SiC *p-i-n*-диодов с различным диаметром структуры и одинаковой толщиной n^+ подложки 360 μm.

Из представленных данных следует, что при увеличении диаметра подложки величина вносимого затухания увеличивается на 4 dB при одновременном увеличении потерь пропускания на 1.5 dB. При этом рост потерь пропускания связан с увеличением величины емкости структуры.

На рис. 7 приведены аналогичные характеристики переключателей на SiC *p-i-n*-диодах с диаметром структуры 80 μm, отличающихся толщиной подложки — 360 и 160 μm соответственно.

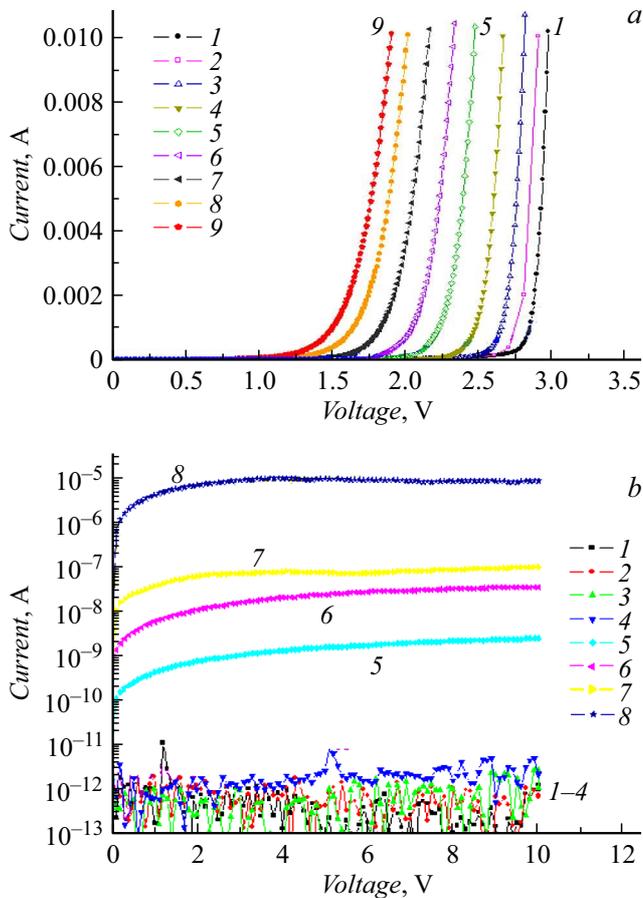


Рис. 5. Прямые (а) и обратные (б) ВАХ корпусированной 4H-SiC *p-i-n*-структуры при нагреве от 23 (кривые 1) до 600°C (кривые 9).

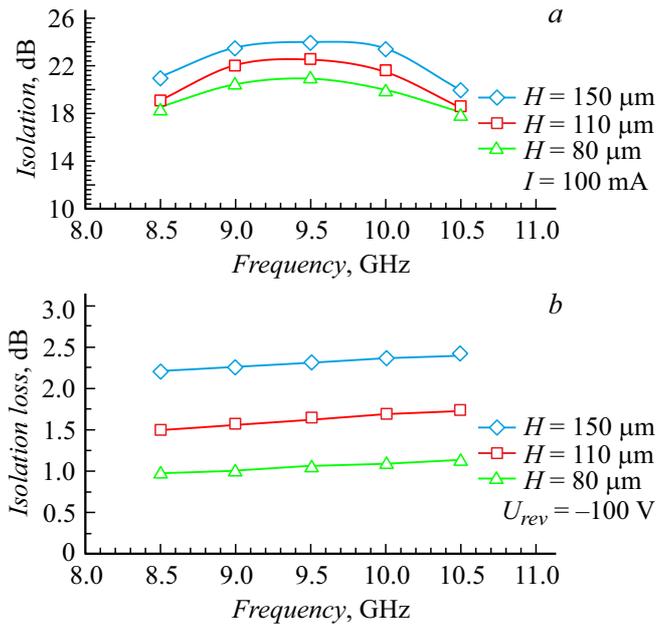


Рис. 6. Частотные характеристики потерь запирания и пропускания переключателей на волноводно-щелевой линии.

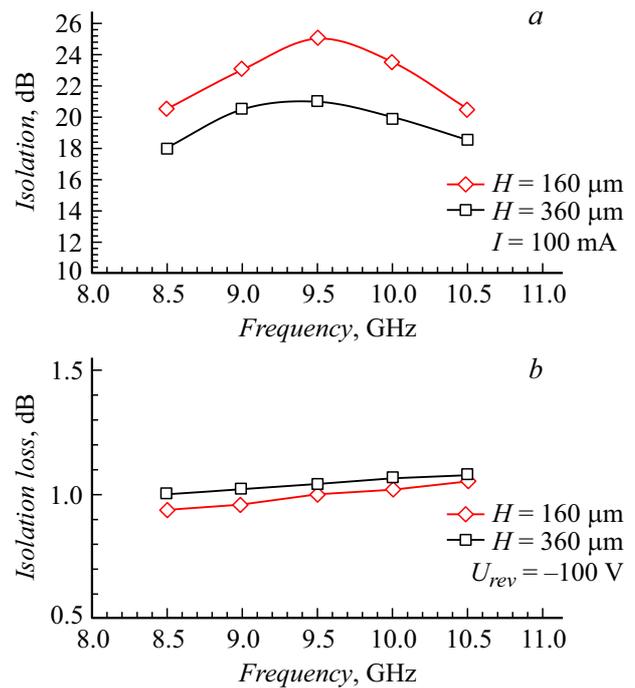


Рис. 7. Частотные характеристики потерь запирания и пропускания переключателей на SiC *p-i-n*-диодах с различной толщиной n^+ -подложки — 360 и 160 μm соответственно.

Из представленных данных следует, что при уменьшении толщины n^+ -подложки выигрыш в величине вносимого затухания составляет 4 dB, т.е. столько же, сколько и при увеличении диаметра структуры с 80 до 150 μm. При этом этот выигрыш достигается без увеличения

потерь пропускания в отличие от случая увеличения диаметра структуры.

Испытания разработанных СВЧ SiC $p-i-n$ -диодов на высоком уровне мощности показали способность выдерживать импульсную мощность до 2.4 kW в режиме запираия и до 1 kW в режиме пропускания. Основной характер отказов — поверхностный пробой $p-n$ -перехода, что свидетельствует о недостаточно высоком пробивном напряжении SiC $p-i-n$ -диодов.

Заключение

На основании результатов обследования образцов переключателей на базе SiC $p-i-n$ -диодов можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально показана возможность реализации на базе SiC $p-i-n$ -диодов следующих характеристик переключателей в 3-см диапазоне:

- потери запираия — 22–25 dB;
- потери пропускания — 0.7–1.0 dB;
- рабочая импульсная мощность в режиме запираия — 1.6–2.4 kW.

2. Полученные переключатели по величине рабочей мощности примерно в 10 раз превышают рабочую мощность переключателей на базе Si-диодов при одинаковой толщине базы, равной 5 μm .

3. Показано, что уменьшение толщины n^+ -подложки с 360 до 160 μm позволяет увеличить потери запираия переключателя на 4 dB, что приводит к уменьшению мощности, рассеиваемой в диоде и, следовательно, к увеличению рабочей мощности переключателя.

4. Для увеличения рабочей мощности переключателя в режиме пропускания необходимо существенно увеличить пробивное напряжение SiC $p-i-n$ -диодов до величины 1000 V и более.

5. При уменьшении толщины подложки до 100–120 μm при толщине n^+ -слоя 8–10 μm и увеличении величины обратного напряжения до 1500 V могут быть реализованы переключатели с рабочей импульсной мощностью до 4–5 kW.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Финансирование работы

Список литературы

- [1] Bludov A.V., Boltovets M.S., Vasilevski K.V., Zorenko A.V., Zakentes K., Lebedev A.A., Krivitsa V.A. // Mater. Sci. Forum. 2004. Vol. 457–460. P. 1089–1092.
- [2] Василевский В., Гамулецкая П.Б., Кириллов А.В., Лебедев А.А., Романов Л.П., Смирнов В.А. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 2. С. 242–243. [Vasilevskii V.V., Gamuletskaya P.B., Kirillov A.V., Lebedev A.A., Romanov L.P., Smirnov V.A. // Semiconductors. 2004. Vol. 38. N 2. P. 242–243.]

- [3] Гамулецкая П.Б., Кириллов А.В., Лебедев А.А., Романов Л.П., Смирнов В.А. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 4. С. 504–511. [Gamuletskaya P.B., Kirillov A.V., Lebedev A.A., Romanov L.P., Smirnov V.A. // Semiconductors. 2004. Vol. 38. N 4. P. 486–493.]
- [4] Vassilevski K.V. // Intern. J. High. Speed. Electron. Systems. 2005. Vol. 15. N 4. P. 899–930.
- [5] Hazdra P., Popelka S. // Phys. Stat. Sol. A. 2016. N 1–8. DOI 10.1002/pssa.201600447
- [6] Добров В.А., Козловский В.В., Мещеряков А.В., Усыченко В.Г., Чернова А.С., Шабунина Е.И., Шмидт Н.М. // ФТП. 2019. Т. 53. Вып. 4. С. 555–561. [Dobrov V.A., Kozlovski V.V., Mescheryakov A.V., Usychenko V.G., Chernova A.S., Shabunina E.I., Shmidt N.M. // Semiconductors. 2019. Vol. 53. N 4. P. 545–551.] DOI: 10.21883/FTP.2019.04.47457.9027
- [7] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.cree.com/>
- [8] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ascatron.com/>