

06.2

Микроволновые переключатели на 4H-SiC $p-i-n$ -диодах

© А.В. Блудов, Н.С. Болтовец, К.В. Василевский, А.В. Зоренко,
К. Зекентес, В.А. Кривуца, Т.В. Крицкая, А.А. Лебедев

НИИ „Орион“, Киев, Украина
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Institute of Electronic Structure and Laser, Microelectronics Research Group,
Foundation for Research and Technology-Hellas, Heraklion, Greece

Поступило в Редакцию 30 апреля 2003 г.

Рассмотрены вопросы моделирования и создания микроволнового модулятора на 4H-SiC $p-i-n$ -диодах. Впервые приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований микроволновых характеристик 4H-SiC $p-i-n$ -диодов и параметров микрополоскового модулятора на их основе в диапазоне частот от 1 до 10 GHz. В исследованных схемах включения диодов получены значения потерь пропускания $0.8 \div 8$ dB и развязки $-15 \div -18$ dB. Полученные экспериментальные значения параметров модуляторов в основном определяются параметрами диодов и хорошо согласуются с расчетом.

Микроволновые модуляторы на кремниевых $p-i-n$ -диодах обеспечивают время переключения от единиц наносекунд до миллисекунд и коммутацию СВЧ-мощности от сотен милливатт до единиц киловатт. Однако модуляторы с временами переключения $1 \div 10$ ns обеспечивают коммутацию СВЧ-мощности не более нескольких сотен милливатт. Кроме того, рабочая температура кремниевых $p-i-n$ -диодов не превышает 125°C [1]. Достигнутый уровень параметров является предельным и определяется уже параметрами кремния.

Совокупность функциональных свойств карбида кремния и уровень развития технологии диодных структур p^+-n-n^+ -типа создают реальные предпосылки для создания микроволновых переключателей с быстродействием $2 \div 10$ ns и коммутируемой мощностью от сотен ватт до киловатт и рабочей температурой до 500°C [2,3]. В этой статье проведены результаты моделирования микроволновых модуляторов на SiC $p-i-n$ -диодах для определения требований к параметрам эквивалентной схемы диода и исследований созданных на основе

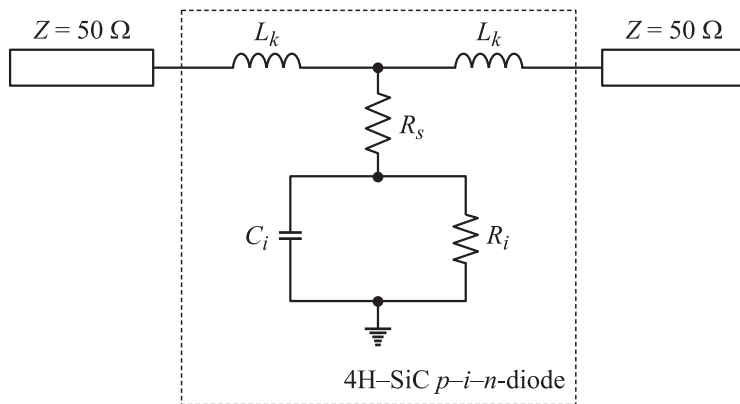


Рис. 1. Эквивалентная схема модулятора на $p-i-n$ -диоде. Для режимов пропускания и запирания изменялись значения R_F, C_i (V_{ar} — блок переменных).

моделирования прототипов микроволновых модуляторов, работающих в диапазоне частот $1 \div 10$ GHz.

С помощью созданной нами модели диода [4] проведен анализ эквивалентной схемы микрополоскового модулятора при параллельном включении диода в линию передач. Эквивалентная схема модулятора приведена на рис. 1. Модулятор рассматривался в виде двух участков линии передач TL_1 и TL_2 и параллельно включенного в линию диода (4H-SiC $p-i-n$ -диод). Для обеспечения подачи смещения в линию включены блокировочные емкости C_3 и C_4 . Модель диода представлена в виде прямого сопротивления i -области (R_{Fi}), емкости $p-n$ -перехода (C_i), сопротивления потерь R_s , индуктивности двух монтажных проводов (L_1 и L_2), с помощью которых верхний электрод (анод) диода соединен с микрополосковой линией передач. Анализ проведен для частот 1, 3 и 10 GHz. На рис. 2 приведены результаты измерений и моделирования параметров СВЧ-диодов. Величина развязки в рассматриваемой схеме включения определяется в основном прямым сопротивлением диода и практически не зависит от частоты. Для обеспечения развязки 20 и 25 dB необходимо иметь прямое сопротивление диода 1.6 и 0.5 Ohm соответственно. Потери в переключателе зависят от

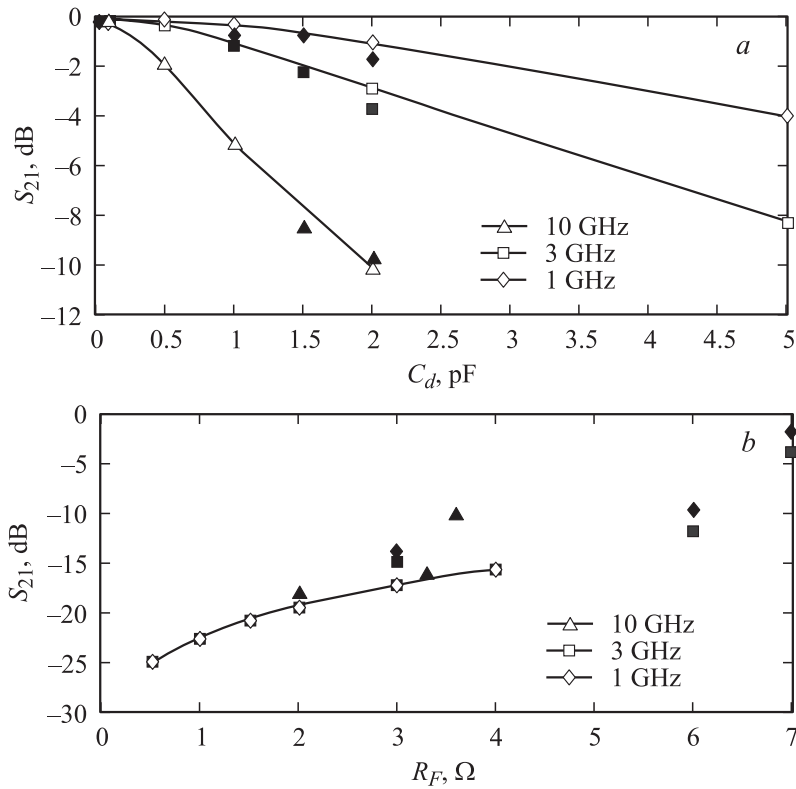


Рис. 2. Расчетные (незаштрихованные) и экспериментальные (заштрихованные) зависимости потерь пропускания в модуляторе от емкости C_i (a) и развязки от прямого сопротивления R_F $p-i-n$ -диода (b).

частоты и определяются в основном емкостью диода. Потери не более 1 dB могут быть получены на частотах 10, 3 и 1 GHz при емкостях диода не более 0,3, 1,0 и 2,0 pF соответственно.

В качестве переключающих диодов использовались 4H-SiC p^+-n-n^+ -диоды с диаметром мезаструктуры $60 \mu\text{m}$, описанные в [5]. Для определения параметров эквивалентной схемы SiC-диода исследовались зависимости прямого сопротивления (R_F) от тока на частотах 3

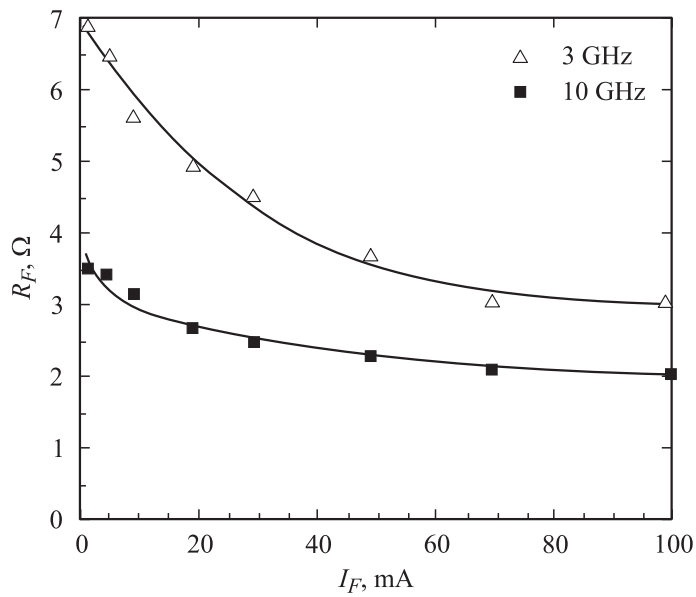


Рис. 3. Зависимости R_F от прямого тока 4H-SiC *p-i-n*-диода при $f = 10$ и 3.0 GHz.

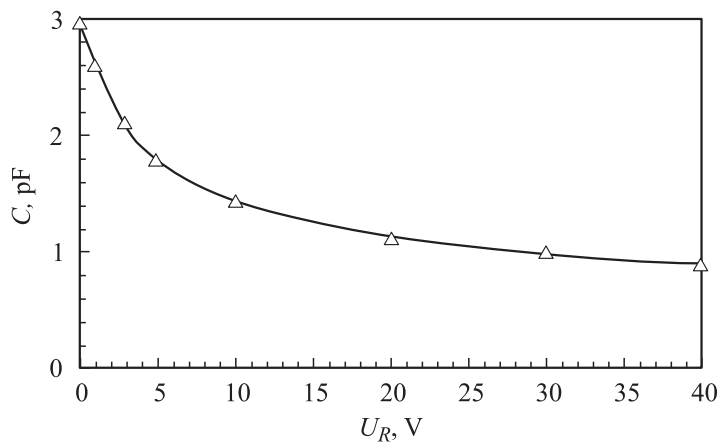


Рис. 4. Зависимость емкости 4H-SiC *p-i-n*-диода от обратного напряжения ($f = 1$ MHz).

и 10 GHz, емкости от обратного напряжения и индуктивности монтажа на частоте 10 GHz. Результаты измерений приведены на рис. 3, 4. Как видно из рисунков, СВЧ-сопротивление диода при прямых токах 50 mA находится в пределах $2 \div 4 \Omega$. Сопротивление на частоте 10 GHz существенно меньше, чем на 3 GHz. Емкость диодов на частоте 1 MHz при обратном смещении в интервале $0 \div 40 \text{ V}$ изменяется от 3 до 0.6 pF. Индуктивность выводов, измеренная на частоте 10 GHz, составляет 0.6 nH. Время обратного восстановления при переключении с прямого тока 10 mA на обратное напряжение 15 V составляет 3 ns. Время жизни неосновных носителей заряда, определенное из осциллограмм переключения диода в этих же режимах, составляет $7 \div 8 \text{ ns}$.

Экспериментальный образец переключающего устройства представлял собой отрезок микрополосковой линии передач с параллельно включенным диодом. Макет соединен с измерительным трактом с помощью микрополосково-коаксиального перехода. Результаты измерения параметров переключающего устройства на частотах 1, 3 и 10 GHz приведены на рис. 5. Максимальное значение развязки 18 dB получено на частоте 10 GHz, минимальные потери 0.8 dB получены на частоте 1 GHz. Наблюдается корреляция зависимостей развязки, прямого сопротивления (R_F), а также потерь пропускания от емкости. Значения потерь запирания на участке насыщения удовлетворительно коррелируют с величиной прямого сопротивления диода (сравнивались S_{21} и R_F при одинаковых значениях прямого тока). Полученные экспериментальные значения потерь пропускания и развязки при заданных значениях емкости и сопротивления диода (которые изменяются в зависимости от обратного напряжения и прямого тока) показаны на рис. 2 в виде экспериментальных точек. Значение потерь пропускания приемлемо согласуется с результатами, полученными при моделировании переключателя.

Достигнутый уровень параметров переключателей определяется уже в основном параметрами диодов. Для повышения уровня развязки и снижения потерь пропускания до значений, которые можно было бы использовать в радиотехнических устройствах, и чтобы полностью реализовать потенциальные возможности СВЧ-приборов на SiC, необходимо снижение прямого сопротивления диодов при рабочих режимах смещения до $0.5 \div 1.0 \Omega$, емкости диода при обратном смещении $0.1 \div 0.2 \text{ pF}$ для частоты 10 GHz, $0.5 \div 1.0 \text{ pF}$ для частоты 3 GHz и $1.5 \div 2 \text{ pF}$ для частоты 1 GHz.

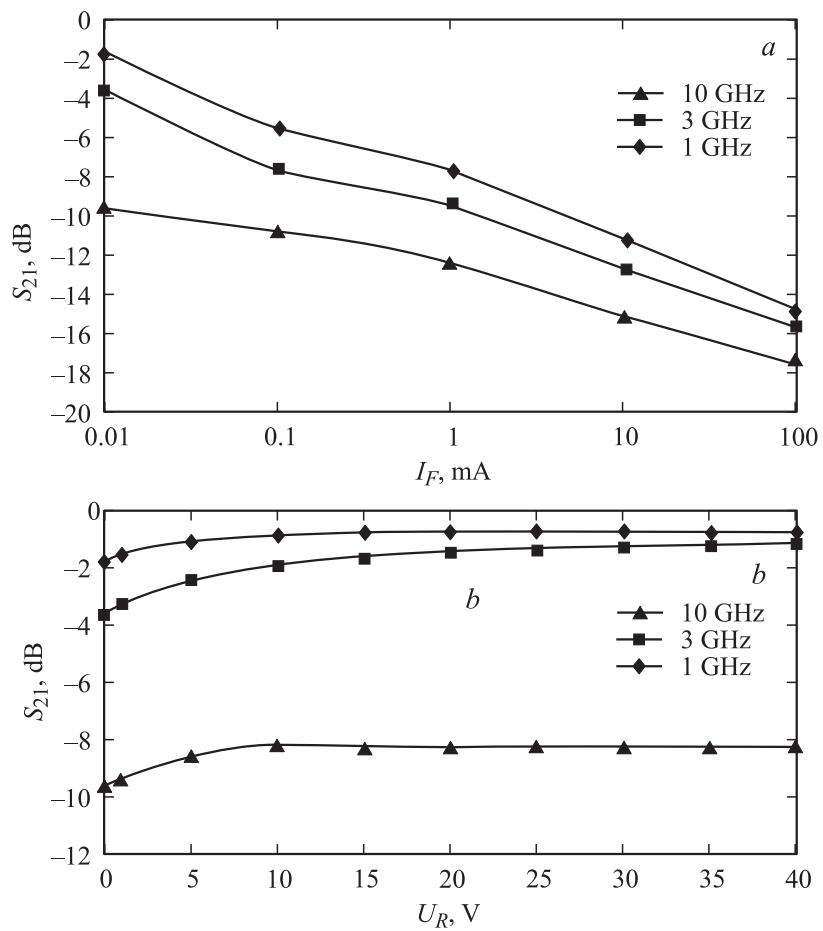


Рис. 5. Экспериментальные зависимости развязки в модуляторе от прямого тока (I_F) через диод (a) и потерь пропускания от обратного напряжения (U_R) (b) на разных частотах. Потери в микрополосковой линии с элементами смещения и разъемах менее 1.5 dB.

Закключение. Показана возможность создания СВЧ-модулятора на 4H-SiC $p^+ - n - n^+$ -диодах в диапазоне частот $1 \div 10$ GHz. Полученные экспериментальные значения потерь пропускания (0.8 dB на частоте 1 GHz) и развязка (-18 dB на частоте 10 GHz) удовлетворительно описываются моделью диода и определяются в основном достигнутым уровнем прямого сопротивления диодов (R_F) при заданных значениях емкости диода.

Работа выполнена при поддержке проектов INTAS 01-603 и NATO SfP-978011.

Список литературы

- [1] *Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды* / Справочник под ред. Б.А. Наливайко. Томск: МТП „Раско“, 1992.
- [2] *Лебедев А.А., Челмоков В.Е.* // ФТП. 1999. Т. 33. В. 9. С. 1096–1100.
- [3] *Robert J.Trew et al.* // Proceedings of the IEEE. 1991. V. 79. N 5. P. 598–619.
- [4] *Пакет* прикладных программ Advanced Design System 2002. Agilent Technologies.
- [5] *Vassilevski K., Zekentes K., Constantinidis G., Strel'chuk A.* // Solid State Electronics. 2000. V. 44. N 7. P. 1173–1177.