

Экспериментальное исследование $p-i-n$ -диодов на основе SiC в 3-сантиметровом диапазоне

© К.В. Василевский, П.Б. Гамулецкая*, А.В. Кириллов*, А.А. Лебедев, Л.П. Романов*, В.А. Смирнов*

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

* ЗАО „Светлана-Электронприбор“,
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 28 мая 2003 г. Принята к печати 2 июня 2003 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований $p-i-n$ -диодов на основе SiC в конструкции переключателя 3-сантиметрового диапазона на базе волноводно-щелевой линии. Получены значения потерь запирающего переключателя 18,5–23 дБ при токе управления 100 мА. Приведена сравнительная оценка последовательного сопротивления на частоте 10 ГГц и дифференциального сопротивления на низких частотах $p-i-n$ -диодов на основе Si и SiC.

Известно, что благодаря своим уникальным электрофизическим параметрам карбид кремния является перспективным материалом для силовой электроники [1]. Однако все еще большая плотность дефектов в эпитаксиальных структурах на основе SiC задерживает начало промышленного выпуска сильноточных приборов из этого материала. В то же время приборы СВЧ диапазона, имеющие малые геометрические размеры, проявляют характеристики, близкие к теоретическим, что приводит к стремительному развитию СВЧ техники на основе SiC.

В настоящей работе впервые проведены исследования переключателя на базе $p-i-n$ -диода из SiC в диапазоне частот ~ 10 ГГц. Для исследований были использованы чипы из $p-i-n$ -диодов 4H-SiC с диаметром меза-структуры 60, 80 и 100 мкм, которые были напаяны на золоченый медный держатель с размерами $0.6 \times 0.8 \times 2$ мм³. Технология изготовления чипов подробно описана в работе [2].

Исследования проводились в специально разработанной измерительной камере на базе волноводно-щелевой линии в диапазоне частот $f = 9-10$ ГГц (3-сантиметровый диапазон). Волновое сопротивление линии в месте включения диода в СВЧ тракт составляло 95 Ом. Последовательно с диодом включалась дополнительная емкость, величина которой была выбрана такой, чтобы при питании SiC-диода током от внешнего источника последовательный резонанс по СВЧ обеспечивался в диапазоне $f = 9-10$ ГГц. Так как на резонансной частоте реактивности скомпенсированы, щелевая линия при этом фактически шунтируется низким сопротивлением прямо-смещенного диода. При этом величина шунтирующего сопротивления потерь диода может быть определена по известному соотношению [3,4]

$$L_f = \left(1 + \frac{W}{2R_g}\right)^2,$$

где L_f — вносимое затухание, W — волновое сопротивление тракта, R_g — сопротивление потерь диода на СВЧ при прямом смещении.

На рис. 1 приведены зависимости сопротивления потерь диода на СВЧ R_g от величины тока управления чипов лавинно-пролетных диодов (ЛПД) из SiC для четырех образцов 8, 16, 18, 21 и типового планарного кремниевого $p-i-n$ -диода 3-сантиметрового диапазона. Из представленных данных следует, что сопротивление потерь SiC-диодов при прямом токе $I_f = 100$ мА примерно в 2 раза больше, чем для кремниевого $p-i-n$ -диода. Следует отметить слабую зависимость сопротивления потерь от тока управления. Так, при изменении тока управления от 1 до 100 мА (2 порядка) сопротивление потерь R_g изменяется в ~ 3 раза (от 5.4 до 1.7 Ом у кремниевого $p-i-n$ -диода и от 8.6 до 3.6 Ом у SiC-ЛПД).

Из представленных данных следует, что при токе 100 мА величина сопротивления потерь на СВЧ $p-i-n$ -диодов из SiC лежит в пределах 3.6–6.4 Ом, а при токе 1 мА в пределах 5–8.6 Ом.

На рис. 2 для этих же диодов приведены зависимости величины дифференциального сопротивления (R_d) на низкой частоте от величины прямого тока. Видно, что величина дифференциального сопротивления на низкой частоте примерно в 2 раза ниже по сравнению с сопротивлением потерь диодов на СВЧ в диапазоне

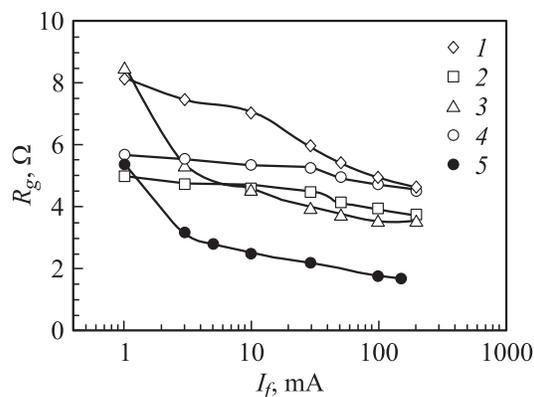


Рис. 1. Зависимости сопротивления потерь диодов на СВЧ от прямого тока. Номера образцов SiC-диодов: 1 — 8, 2 — 16, 3 — 18, 4 — 21. 5 — кремниевый $p-i-n$ -диод.

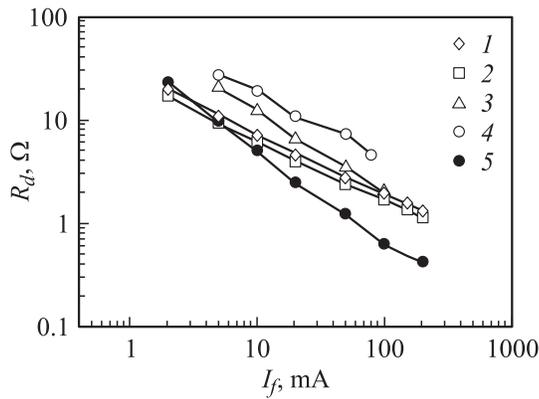


Рис. 2. Зависимости низкочастотного дифференциального сопротивления диодов от прямого тока. Номера образцов SiC-диодов: 1 — 8, 2 — 16, 3 — 18, 4 — 21. 5 — кремниевый $p-i-n$ -диод.

9–10 ГГц, что согласуется с известными результатами [5]. Отметим, что на низкой частоте при изменении тока от 1 до 100 мА (2 порядка) дифференциальное сопротивление изменяется в 30 раз, в то время как на СВЧ оно изменялось всего в 3 раза.

В таблице приведены результаты измерений на резонансной частоте 9.5 ГГц потерь запирающего переключателя при использовании в качестве переключающих элементов $p-i-n$ -диодов из SiC и типового кремниевый $p-i-n$ -диода.

Результаты измерения потерь запирающего

Образцы	$p-i-n$ -диоды из SiC						$p-i-n$ -диод из Si
	8	16	17	18	20	21	
L_f , дБ	20.4	22.3	18.5	23.0	19.7	20.6	28.6

Примечание. $I_f = 100$ мА, $f = 9.5$ ГГц.

Из представленных данных следует, что переключатель на базе типового кремниевый $p-i-n$ -диода вносит существенно большее затухание (28.6 дБ), что связано с меньшим последовательным сопротивлением потерь.

В работе не рассматривался вопрос о потерях пропускания переключателя (потери в обесточенном состоянии) ввиду того, что емкость структуры исследуемых SiC-диодов была совершенно неприемлема для 3-сантиметрового диапазона (единицы пФ), что приводило к большим потерям пропускания (от 3 до 10 дБ). Для сравнения: переключатель на базе типового кремниевый $p-i-n$ -диода с емкостью структуры 0.2 пФ имеет потери 0.5 дБ, т.е. на порядок ниже.

На основании полученных результатов исследования $p-i-n$ -диодов из SiC в СВЧ диапазоне можно сделать следующие выводы.

1) Сопротивление потерь исследованных образцов SiC-диодов в диапазоне 9–10 ГГц в 2–3.5 раза больше,

чем у типового $p-i-n$ -диода из Si, предназначенного для работы в этом же диапазоне.

2) Полученные значения последовательного сопротивления потерь SiC-диодов позволяют создать переключатель на базе волноводно-щелевой линии для диапазона 9–10 ГГц, обеспечивающей вносимое затухание 18.5–23 дБ, в то время как переключатель на базе рассмотренного выше кремниевый $p-i-n$ -диода обеспечивает в этом же диапазоне существенно большее затухание, 28.6 дБ.

3) В целом впервые показана применимость существующих $p-i-n$ -диодов из SiC в качестве СВЧ переключателей. Данные приборы имеют преимущества перед приборами на основе Si из-за больших рабочих температур и большей радиационной стойкости. Однако для создания переключателя на базе $p-i-n$ -диодов из SiC с такими же, как у Si-диодов, потерями запирающего необходимо в 2–3 раза уменьшить их дифференциальное сопротивление.

Работа выполнена при поддержке проектов ИНТАС 01-603 и НАТО SfP-978011.

Список литературы

- [1] А.А. Лебедев, В.Е. Челноков. ФТП, **33** (9), 1096 (1999).
- [2] K. Vasilevski, K. Zekentes, G. Constantinidis, A. Strel'chuk. Sol. St. Electron., **44** (7), 1173 (2000).
- [3] Г.Б. Дзехцер, О.С. Орлов. *P-I-N-диоды в широкополосных устройствах* (М., Сов. радио, 1970).
- [4] *СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет*, под ред. Н.В. Мольского, Б.В. Семеновского (М., Сов. радио, 1969).
- [5] В.А. Вайсблат. *Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах* (М., Радио и связь, 1987).

Редактор Л.В. Шаронова

Results of experimental investigation SiC $p-i-n$ -diodes in 3-cm range

K.V. Vasilevskii, P.B. Gamuletskaya*, A.V. Kirillov*, A.A. Lebedev, L.P. Romanov*, V.A. Smirnov*

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
* ZAO „Svetlana-Electronpribor Instrument“,
194156 St. Petersburg, Russia

Abstract Results of experimental research of SiC $p-i-n$ diodes in a design of the lock-out switch in 3-cm range are given on the basis of the fine-line. The values of losses of lock-out of the switch 18.5–23 dB are obtained at a current 100 mA. A comparative rating of the consecutive resistance of Si and SiC $p-i-n$ diodes on 10 GHz frequency and differential resistance of Si and SiC $p-i-n$ diodes at low frequencies is presented.