

4H-SiC-фотодиоды с микронаноструктурированной поверхностью приемной области

© А.В. Афанасьев¹, В.В. Забродский², В.А. Ильин¹, А.В. Серков¹, В.В. Трушлякова¹, Д.А. Чигирев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: avafanasev@etu.ru

Поступила в Редакцию 20 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 14 апреля 2025 г.

Принята к публикации 17 апреля 2025 г.

Исследована возможность применения метода реактивного ионно-плазменного травления для формирования широкополосных антиотражающих структур на поверхности фотоприемных областей p^+-n-n^+ -фотодиодов на основе 4H-SiC. Показано, что в процессе травления при использовании алюминиевых масок с толщинами ~ 50 нм наряду с утончением верхнего p^+ -эпислоя на его поверхности за счет эффекта микромаскирования SiC формируется самоупорядоченная профилированная структура с доминирующим острым рельефом 600–800 нм. Ее наличие позволяет повысить внешний квантовый выход 4H-SiC-фотодиодов.

Ключевые слова: 4H-SiC, p^+-n-n^+ -фотодиод, УФ диапазон, микропрофилирование, реактивное ионно-плазменное травление — РИПТ, Al-маска, чувствительность, внешний квантовый выход — ВКВ.

DOI: 10.61011/FTP.2025.01.60499.7633

1. Введение

Карбид кремния (SiC) благодаря уникальной совокупности свойств (большая ширина запрещенной зоны, высокая напряженность электрического поля пробоя, высокая теплопроводность, химическая, термическая и радиационная стойкость) является полупроводниковым материалом для создания высокоэффективных силовых, СВЧ и оптоэлектронных приборов ультрафиолетового (УФ) диапазона. Известно, что УФ SiC-фотоприемники (ФП), выполненные на гексагональных поли типах, были одними из первых коммерчески доступных SiC-электронных устройств, продемонстрированных еще в 1990-х годах. В настоящее время УФ SiC-фотодетекторы реализованы на основе всех известных типов фотодиодных структур: Шоттки, металл–полупроводник–металл, $p-i-n$, металл–изолятор–полупроводник, структур лавинных фотодиодов как в дискретном, так и в матричном исполнении [1]. Тем не менее продолжают исследования по разработке новых вариантов конструкции ФП, которые обеспечивают оптимальное сочетание малых темновых токов, высокой чувствительности (внешнего квантового выхода) и быстродействия [2].

В УФ области спектра чувствительность ФП определяется свойствами внешнего слоя (для SiC-фотодиодов — обычно p^+). В первую очередь его толщиной, которая должна быть минимальной, так как поглощенные кванты излучения в основном будут регистрироваться в области объемного заряда ФП и на расстоянии диффузионной длины от ее края [3]. С другой стороны, известно, что потери на отражение в 4H-SiC-ФП во всем

спектральном диапазоне их чувствительности (380 нм и менее) составляют $> 20\%$ [1]. Поэтому для повышения эффективности SiC-ФП наряду с уменьшением глубины залегания $p-n$ -перехода создание антиотражающих покрытий путем формирования многослойных просветляющих структур [4] или изменения морфологии поверхности является важной задачей. Модификация поверхности карбида кремния может быть реализована методом кратковременного электрохимического травления, формирующего тонкий слой пористого SiC, наличие которого увеличивает эффективность ФП [5,6]. В работе [7] исследовалась возможность повышения чувствительности p^+-n -фотодиодов на основе 4H-SiC путем варьирования толщины фотоприемных p^+ -областей методом реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ), где в качестве маски использована композиция Ni/Al. Следует отметить, что в данной работе не рассматривался эффект микронаноструктурирования поверхности карбида кремния в процессе РИПТ [8]. Он обусловлен двумя основными механизмами.

Первый механизм сводился к следующему. Травление тонкого (десятки нанометров) слоя алюминия на финишных этапах процесса приводит к образованию микроостровковой структуры маски с нарушением ее сплошности. При этом свободная от металла поверхность SiC травится с более высокой по сравнению с металлом скоростью, что приводит к формированию микрорельефа.

Вторым возможным механизмом формирования рельефа является следующий. В результате химических реакций компонентов плазмы с поверхностью, подвер-

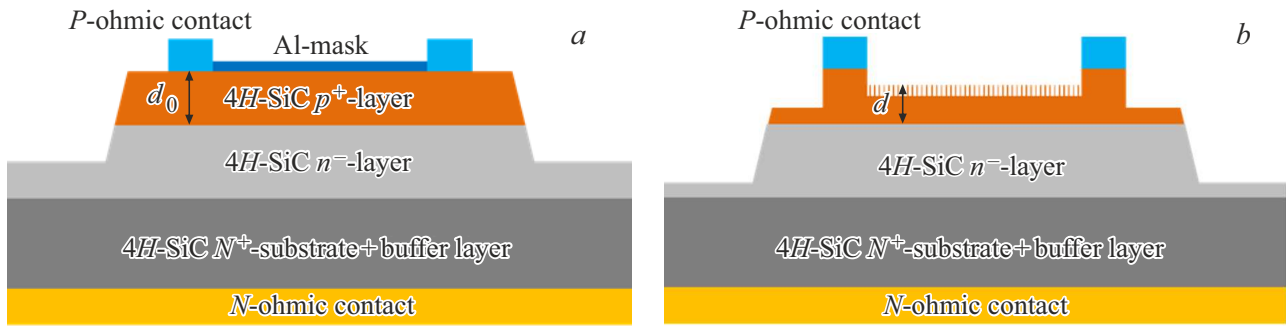


Рис. 1. Мезаэпитаксиальный фотодиодный 4H-SiC-чип: исходная структура с алюминиевой маской (a); после РИПТ (b).

гаемой травлению, образуются не только удаляемые из реакционного объема летучие соединения, но и нелетучие соединения в виде наночастиц, которые могут осаждаться плазмой на поверхность SiC. Например, при РИПТ SiC в среде $\text{SF}_6\text{-O}_2\text{-Ar}$ с использованием алюминиевой маски возможны реакции с образованием летучих фторидов алюминия и нелетучих фторуглеродных и алюмооксидных соединений, которые вызывают эффект микронаномаскирования [9]. Оптимизация параметров режимов травления и подбор толщин алюминиевых масок позволяют формировать на поверхности SiC массивы микронаноразмерных острий высокой плотности [10]. Их наличие может как увеличивать чувствительность ФП за счет уменьшения коэффициента отражения, так и уменьшать ее за счет увеличения поверхностных центров рекомбинации и диффузного рассеяния света.

В настоящей статье, являющейся продолжением работы [7], представлены результаты исследований влияния на фотоэлектрические свойства 4H-SiC ФП массивов микронаноразмерных острий, сформированных методом РИПТ на поверхностях фотоприемных площадок (ФПП) с использованием Al-маскирующих покрытий различной толщины.

2. Методика эксперимента

Фотодиоды были изготовлены на $p^+ - n - n^+$ -эпиструктурах на основе 4H-SiC, полученных CVD-методом на n^+ -подложках диаметром 100 мм со следующими толщинами и уровнями легирования слоев:

- верхний p^+ -слой ($d_0 = 2$ мкм, $N_a - N_d > 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$);
- дрейфовый n -слой (10 мкм, $N_d - N_a < 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$);
- буферный n^+ -слой (2 мкм, $N_d - N_a > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Конструкция и технологический маршрут изготовления SiC-ФП были идентичны описанному в работе [7] (рис. 1, a). После проведения измерений вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарядных (ВФХ) характеристик (рис. 2) пластина была разрезана на чипы и были выделены три группы образцов (см. таблицу). На ФПП образцов групп 2 и 3 через соответствующие контактные маски были нанесены тонкие пленки алюминия толщиной $d_{\text{Al}} = 50$ и 100 нм соответственно (рис. 1, a).

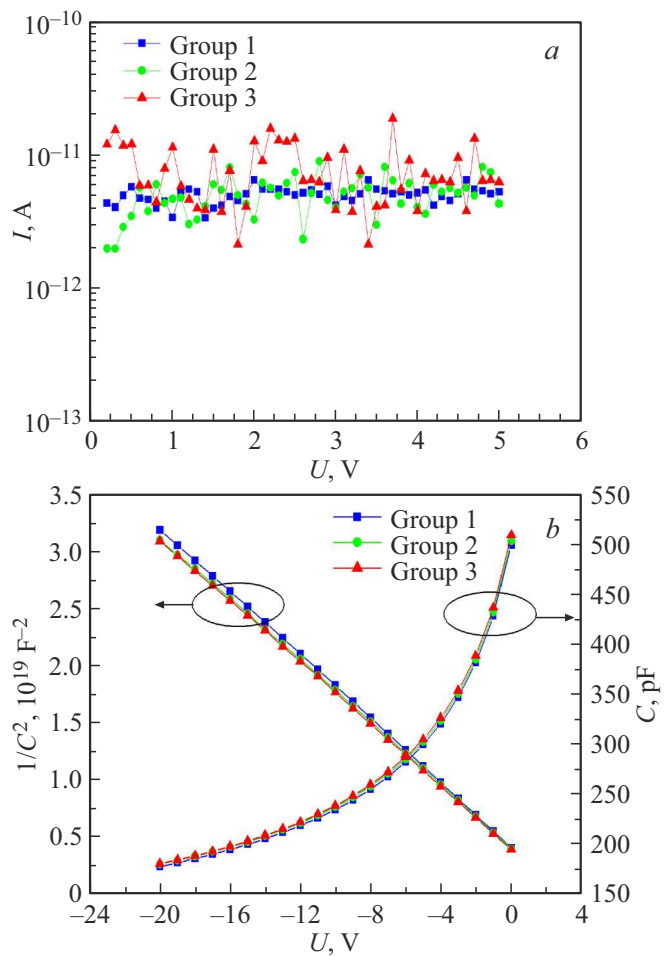


Рис. 2. Темновые ВАХ (a) и ВФХ ($f = 1$ МГц) (b) 4H-SiC-фотодиодов (образцы групп 1–3).

Выбор таких толщин, режимов осаждения алюминия и РИПТ основан на результатах исследований [10], продемонстрировавших возможность формирования массивов SiC-микронаноострий.

Учитывалось, что размер зерна металлического маскирующего покрытия играет важную роль в процессах модификации поверхности SiC методом РИПТ, так как

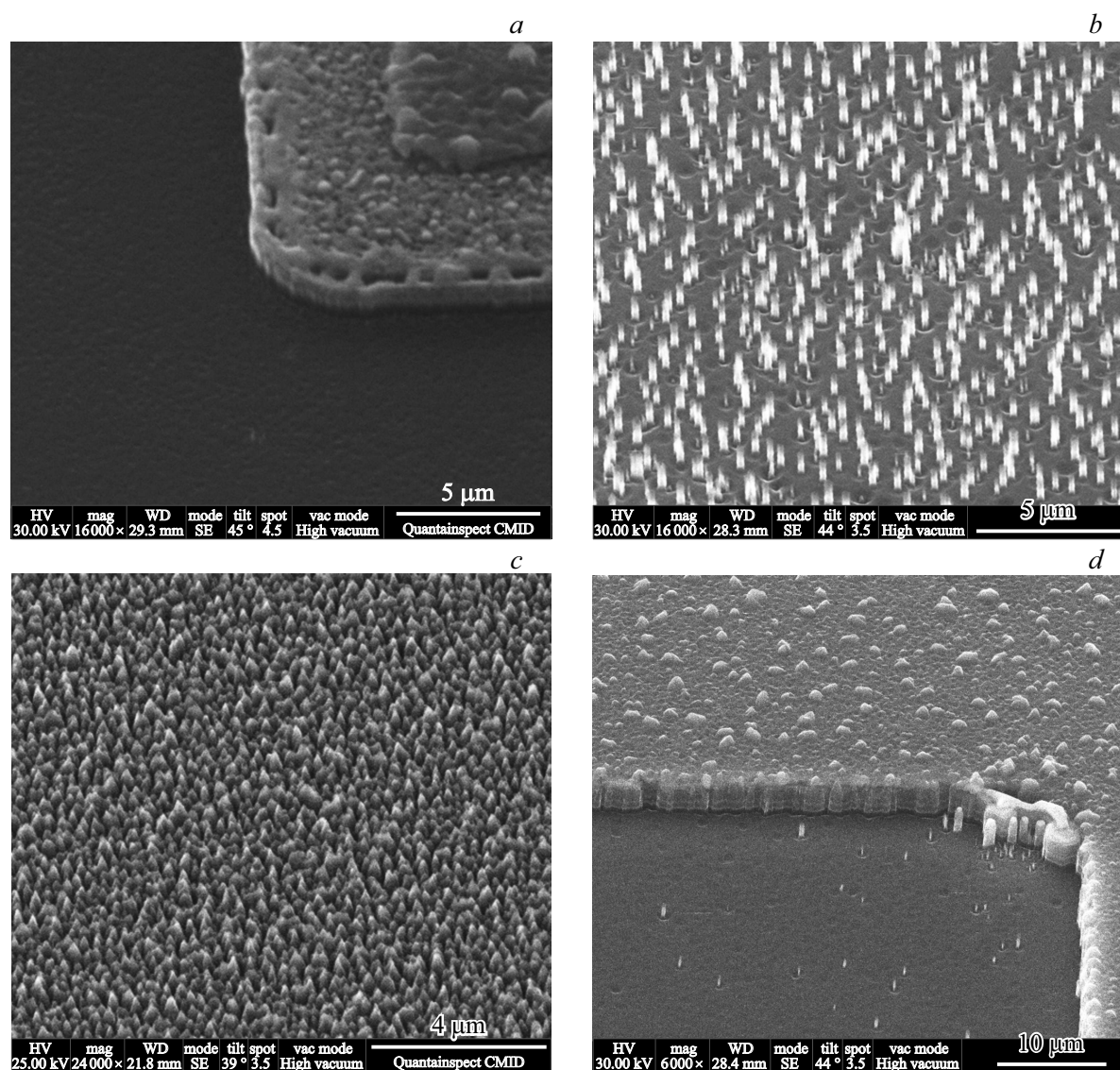


Рис. 3. РЭМ-изображения поверхностей фотоприемных площадок SiC-ФП: *a* — образец группы 1 (приэлектродная область ФПП); *b* — образец группы 2; *c* — образец группы 3; *d* — образец из работы [7] (приэлектродная область ФПП).

Распределение SiC-ФП по группам

Номер группы образцов	d_{Al} , нм	РИПТ	d , мкм
1	0	—	2
2	50	+	1.2
3	100	+	1.2
Работа [7]	0	+	1.2

на начальных этапах РИПТ травление идет между зернами и чем их размер меньше, тем выше плотность микроострий на единицу площади. Поэтому для получения тонкопленочного покрытия с характерным размером зерен 30–40 нм нанесение алюминия осуществлялось методом магнетронного распыления, который позволяет

формировать поликристаллические пленки металла с зерном такого размера.

Процесс РИПТ образцов групп 2, 3, обеспечивающий селективность травления $Al/SiC = 1/15$ и скорость травления $SiC < 0.1$ мкм/мин, был реализован на ICP-установке „Caroline-15“ в следующем режиме: температура процесса — 25 °C; давление в рабочей камере — 1.2 Па; среда — $SF_6:O_2:Ar$ (соотношение компонентов 4:1:2 соответственно); мощность ICP-источника — 350 Вт; ВЧ-мощность — 200 Вт. Время травления образцов было подобрано так, чтобы обеспечить суммарную толщину p^+ -слоя $d = 1–1.2$ мкм (рис. 1, *b*), что позволяет провести сравнение характеристик с образцами, полученными нами в работе [7] (см. таблицу).

Исследования чувствительности образцов методом сравнения были проведены в режиме тока короткого

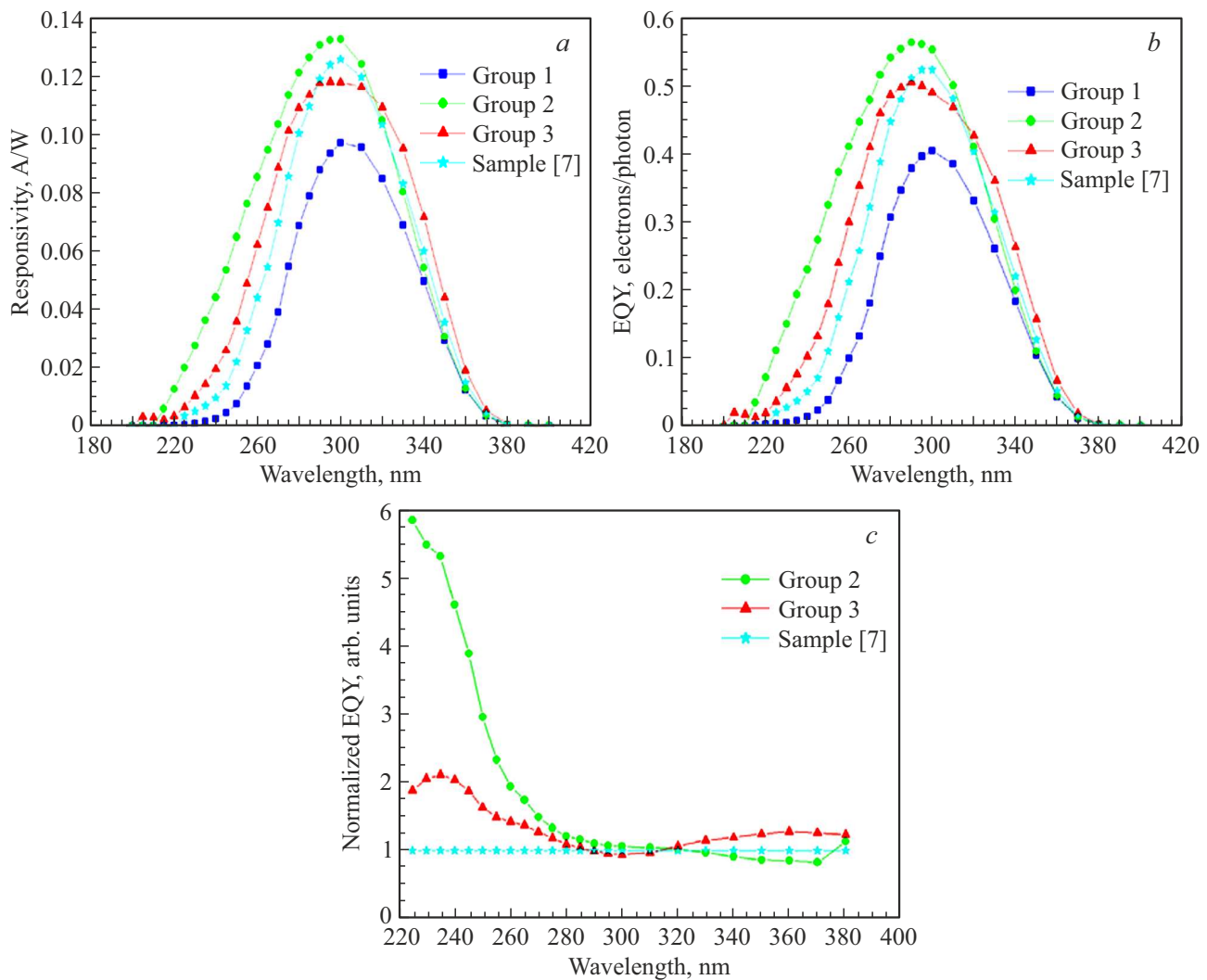


Рис. 4. Спектральные зависимости чувствительности (а), внешнего квантового выхода (b), нормированного к образцу [7] ВКВ 4H-SiC-фотодиодов.

замыкания в диапазоне длин волн 200–400 нм по методике, описанной в работе [7].

3. Экспериментальные результаты

Темновые ВАХ для образцов всех типов были измерены с помощью пикоамперметра „Keithley 6487“. Значения обратных токов, измеренные в диапазоне 0–5 В, не превышали 100 пА (рис. 2, а). ВФХ образцов групп 2 и 3, измеренные на частоте 1 МГц, построены в координатах $C(U)$. Они практически совпадают с характеристикой исходного образца группы 1 (рис. 2), т.е. площади p – n -переходов (S_{p-n}) SiC-ФП не изменились. Вероятно, в процессе РИПТ периферийные участки верхнего p^+ -слоя, не закрытые Al-маской, не были полностью удалены (рис. 1, а). Из ВФХ, построенных в координатах $1/C^2(U)$ (рис. 2), в рамках модели резкого несимметричного p^+ – n -перехода при $S_{p-n} = 0.1514 \text{ см}^2$ определены

уровни легирования n -слоев для образцов 3 типов. Их значения составили $4\text{--}5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, что соответствует технологически заданным параметрам исходных 4H-SiC-эпиструктур.

Характеризация ФПП SiC-ФП осуществлялась методом РЭМ. Из рис. 3, а следует, что SiC-поверхность исходного образца (группа 1) не имеет микронаноразмерного рельефа. В образце сравнения из работы [7] явный микрорельеф после РИПТ также не наблюдается (рис. 3, d). В то же время на поверхности ФПП вблизи омических контактов к p^+ -области, выполненных из многокомпонентной структуры с верхним слоем из алюминия, присутствует незначительное количество микроострий. Вероятно, что при выбранном режиме РИПТ это может быть связано с дополнительным переосаждением алюминия и, как следствие, микронаномаскированием приэлектродных областей.

Из рис. 3 видно, что плотность микроострий существенно выше для образцов группы 3. При общей

толщине p^+ -слоя $d \approx 1.2$ мкм ФПП образцов групп 2 и 3 характеризовались развитым микрорельефом со средними высотами микроострий 0.6–0.8 и 0.5–0.6 мкм соответственно (рис. 3, *b, c*). Такой микрорельеф превышает диапазон длин волн, в котором работает SiC-ФП. Поэтому оптические свойства профилированной SiC-поверхности будут определяться только ее геометрией и не будут зависеть от длины волны.

Для спектральных измерений фотодиодные чипы образцов групп 1, 2 и 3 были помещены в металлоглазные корпуса на подкристалльные платы и разварены. На рис. 4, *a, b* представлены спектральные характеристики внешнего квантового выхода (ВКВ) этих образцов, а также p - n -фотодиода на основе 4H-SiC с p^+ -слоем толщиной $d \approx 1.2$ мкм [7]. В коротковолновой области (< 280 нм) спектральных характеристик по сравнению с образцом [7] значения чувствительности и ВКВ (EQY) выше для образцов групп 2 и 3. Из рис. 4, *c* видно, что значительное увеличение ВКВ наблюдается для образцов группы 2. Вероятно, уширение спектра и изменение положения пика спектральной характеристики для образцов этой группы связаны как с изменением формы микропрофиля на поверхности ФПП, так и с уменьшением толщины непрофилированной части p^+ -области ввиду существенно меньшей плотности микроострий по сравнению с образцами группы 3. В то же время для образцов группы 3, где по сравнению с группой 2 высота микроострий при более высокой их плотности была меньше на 100–200 нм, наблюдается уменьшение значения чувствительности в максимуме спектральной характеристики, а в длинноволновой части эффективность увеличивается на 20–30 % (рис. 4, *c*). Вероятно, наличие такой поверхности (рис. 3, *c*) уменьшает геометрический коэффициент отражения, что приводит к повышению ВКВ в диапазоне длин волн 320–380 нм. Однако, как и предполагалось ранее, существенного увеличения ВКВ в коротковолновой области не наблюдается из-за увеличения плотности поверхностных центров рекомбинации и диффузного рассеяния света.

4. Заключение

Технология РИПТ с использованием тонких (до 100 нм) пленок алюминия в качестве маскирующего покрытия позволяет создавать широкополосные антиотражающие слои на поверхностях фотоприемных областей 4H-SiC p^+-n-n^+ -фотодиодов. Установлено, что наиболее эффективным является применение Al-маски толщиной ~ 50 нм. Это позволяет контролируемо сформировать упорядоченный массив SiC-микроострий высотой 600–800 нм невысокой плотности и одновременно обеспечить в процессе РИПТ как утончение внешней фотоприемной p^+ -области, так и сформировать требуемый микрорельеф. Оба фактора дают вклад в существенный рост чувствительности SiC-ФП в С-УФ диапазоне. Применение алюминиевых масок толщиной ~ 100 нм

позволяет создать методом РИПТ на поверхности SiC высокоплотные массивы микроострий высотой < 500 нм и за счет уменьшения геометрического коэффициента отражения обеспечить повышение эффективности SiC-ФП во всем спектральном диапазоне его работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Stephen E. Sadow, Francesco La Via. *Advanced Silicon Carbide Devices and Processing* (IntechOpen, 2015).
- [2] Y. Hou, C. Sun, J. Wu, R. Hong, J. Cai, X. Chen, D. Lin, Z. Wu. *Electron. Lett.*, **55**, 216 (2019).
- [3] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, Е.В. Калинина, О.В. Константинов, А.О. Константинов, А. Hallen. *Письма ЖТФ*, **27**, 43 (2001).
- [4] F. Zhang, W. Yang, H. Huang, X. Chen, Z. Wu, H. Zhu, H. Qi, J. Yao, Z. Fan, J. Shao. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 251102 (2008).
- [5] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, Н.М. Коровкина, А.Ю. Савенко. *Письма ЖТФ*, **31**, 1 (2005).
- [6] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин. *Нано- и микросистемная техника*, **8** (85), 13 (2007).
- [7] А.В. Афанасьев, В.В. Забродский, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, А.В. Николаев, А.В. Серков, В.В. Трушлякова, Д.А. Чигирев. *ФТП*, **56**, 997 (2022).
- [8] T. Kimoto, J.A. Cooper. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications* (Singapore, John Wiley & Sons, Inc., 2014).
- [9] M. Lazar, H. Vang, P. Brosselard, C. Raynaud, P. Cremillieu, J.-L. Leclercq, A. Descamps, S. Scharnholtz, D. Planson. *Superlat. Microstr.*, **40**, 388 (2006).
- [10] A.V. Afanasyev, B.V. Ivanov, V.A. Ilyin, A.F. Kardo-Sysoev, M.A. Kuznetsova, V.V. Luchinin. *Mater. Sci. Forum*, **740–742**, 1010 (2013).

Редактор Г.А. Оганесян

4H-SiC photodiodes with micronanostructured receiving surface

A.V. Afanasev¹, V.V. Zabrodskiy², V.A. Ilyin¹,
A.V. Serkov¹, V.V. Trushlyakova¹, D.A. Chigirev¹

¹ St. Petersburg Electrotechnical University,
197022 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The possibility of using reactive-ion etching (RIE) to form broadband antireflective structures on the surface of photodetector areas of 4H-SiC p^+-n-n^+ -photodiodes was investigated. It is shown that during the RIE process utilizing aluminum masks (about 50 nm thick), along thinning of the upper p^+ -epilayer, a self-ordered profiled surface with a dominant sharp relief of 600–800 nm is formed due to the effect of micromasking of SiC surface. The formation of this microprofiled surface allows to increase the sensitivity and EQY of 4H-SiC photodiodes.