

Применение технологии реактивного ионно-плазменного травления для управления чувствительностью 4H-SiC-фотодиодов

© А.В. Афанасьев¹, В.В. Забродский², В.А. Ильин¹, В.В. Лучинин¹, А.В. Николаев²,
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: a_afanasjev@mail.ru

Поступила в Редакцию 30 июня 2022 г.

В окончательной редакции 3 августа 2022 г.

Принята к публикации 12 августа 2022 г.

Исследована возможность повышения чувствительности 4H-SiC p^+n-n^+ -фотодиодов путем варьирования толщины p^+ -приемной области методом реактивного ионно-плазменного травления. Показано, что утонение верхнего эпислоя мезаэпитаксиального фотодиода этим методом с использованием в качестве маски металла контактов позволяет управлять как максимальной чувствительностью, так и спектральной зависимостью чувствительности фотодиодов. При этом не наблюдается заметного ухудшения темновых электрических характеристик.

Ключевые слова: 4H-SiC, p^+n-n^+ -фотодиод, УФ-диапазон, p^+ -слой, РИПТ, чувствительность.

DOI: 10.21883/FTP.2022.10.53962.9926

1. Введение

Интерес к эффективным фотопреобразователям, работающим в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, постоянно растет. Высокая востребованность приборов этого класса для широкого спектра приложений в аэрокосмической, военной, медицинской и биологической областях сформировала еще в начале 2000-х годов направление „ультрафиолетовая фотоэлектроника“ [1]. Особую позицию в данном сегменте занимают фотоприемники (ФП), изготовленные на основе широкозонных полупроводников (нитридов металлов III группы, карбида кремния и алмаза), которые благодаря фундаментальным параметрам материала обеспечивают возможность „видимослепого“ детектирования излучения [2]. Гексагональные полиитипы карбида кремния (особенно 4H) успешно применяются для решения этой задачи. На основе 4H-SiC изготавливаются фотодиоды с барьером Шоттки, как в вертикальном [3,4], так и в планарном [5] исполнениях, а также наиболее востребованные $p-n$ -фотодиоды [6] и лавинные (APD) фотодиоды [7]. Известно, что одним из важнейших направлений исследований и разработок является поиск оптимальных вариантов конструкции ФП, который обеспечивал бы оптимальное сочетание малых темновых токов, высокой фоточувствительности (квантового выхода) и быстродействия [8]. Обеспечение высокой чувствительности (особенно в коротковолновой УФ-области) будет определяться свойствами внешнего фотоприемного слоя (обычно p^+) и в первую очередь его толщиной [9], которая должна быть минимальна, а также наличием или отсутствием на нем антиотражающего покрытия [10]. Результаты наших предварительных исследований показали, что 4H-SiC-фотодиоды, выпол-

ненные на основе эпитаксиальных структур с ультратонкими (< 0.1 мкм) внешними p^+ -слоями, характеризовались большими ($> 10^{-8}$ А) обратными токами. По-видимому, это является следствием высокотемпературного отжига — необходимой операции для формирования низкоомных контактов к p - и n -областям 4H-SiC [11]. В результате такой термообработки формируются протяженные интерметаллические области высокой проводимости, пронизывающие насквозь тонкий p^+ -слой. Это приводит к исчезновению $p-n$ -переходов в локальных областях прибора и, как следствие, к линейной ВАХ. Поэтому толщина p^+ -слоя должна быть ≥ 0.4 мкм [12]. Одним из возможных путей решения указанной проблемы может быть локальное утонение фотоприемных областей при сохранении исходной толщины p^+ -слоев, находящихся под омическими контактами. Следует отметить, что ввиду исключительной химической стойкости карбида кремния единственным возможным технологичным методом его травления является технология реактивного ионно-плазменного травления [13].

В настоящей работе исследовалась возможность повышения чувствительности p^+n -фотодиодов на основе 4H-SiC путем варьирования толщины фотоприемных p^+ -областей методом реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ) с использованием в качестве маски металла контактов (Ni/Al). Применение этой технологии требует экспериментальной проверки, поскольку наряду с очевидным влиянием уменьшения толщины p^+ -эпислоя, в процессе травления проявляется эффект микромаскирования поверхности 4H-SiC частицами металла маски. В результате плазменной обработки приповерхностной области формируется массив микронапоразмерных острий с поверхностной плотностью до

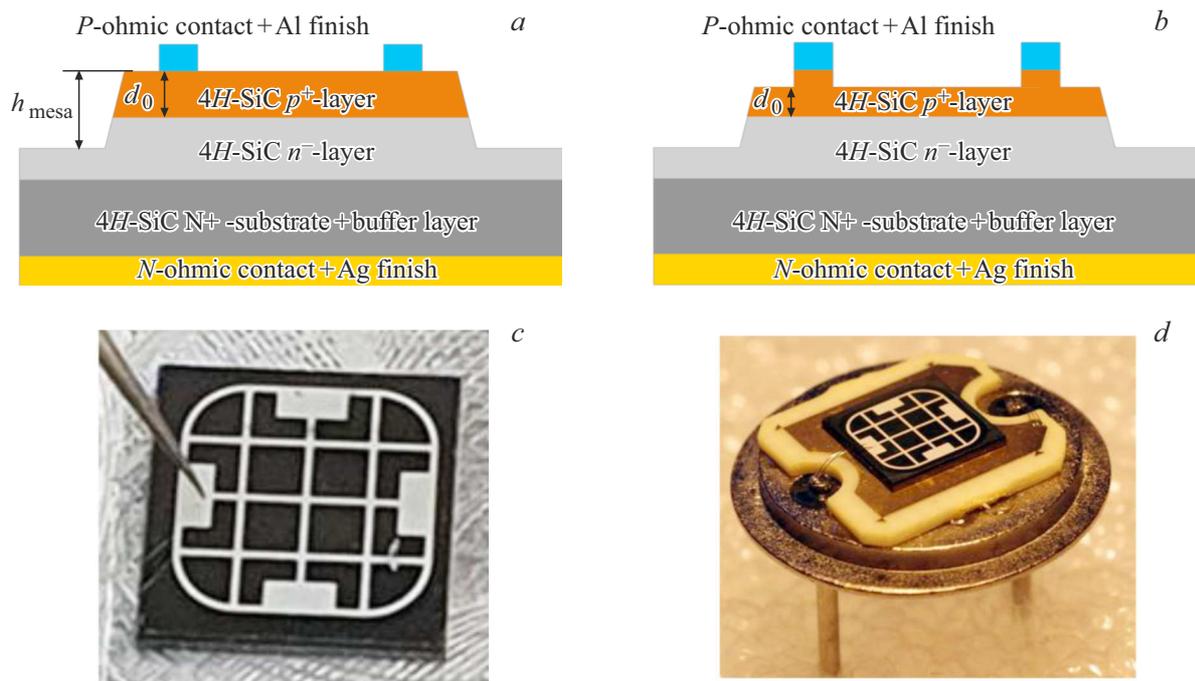


Рис. 1. Мезаэпитаксиальный 4H-SiC фотодиодный чип: исходная структура (a); после РИПТ (b); вид сверху (c); в корпусе, подготовленный к измерениям спектральных характеристик (d). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

10^8 см^{-2} [14]. Наличие такой поверхности может как увеличивать чувствительность фотоприемника за счет уменьшения коэффициента отражения, так и уменьшать ее за счет увеличения поверхностных центров рекомбинации и диффузного рассеяния света.

2. Методика эксперимента

4H-SiC-фотодиоды изготавливались на основе эпитаксиальных $p^+ - n - n^+$ -структур, полученных методом CVD на 150 мм n^+ -подложках. Дрейфовая n -область имела толщину 12 мкм и концентрацию нескомпенсированных доноров $N_d - N_a < 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Верхний p^+ -слой был легирован алюминием до уровня $N_a - N_d > 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1, a). Основываясь на опубликованных расчетных и экспериментальных данных [8–10], для обеспечения достаточно высокой исходной чувствительности и исключения объемных утечек в диодной структуре толщина p^+ -слоя d_0 была выбрана равной 2 мкм.

Образцы были выполнены в виде мезадиодов, где площадь фотоприемной области составляла 12 мм^2 . Меза высотой $h_{\text{mesa}} = 3.1 - 3.3 \text{ мкм}$ была получена методом РИПТ (рис. 1, a). На рис. 2 представлено РЭМ-изображение скола фотодиода, по которому определялись d_0 и h_{mesa} . Никелевые омические контакты к n^+ -подложке и Ni/Al контакты с сетчатой топологией к p^+ -слою были изготовлены по технологии, описанной в работе [11]. Финишная металлизация со стороны

n^+ -подложки и p^+ -слоя формировалась нанесением пленок Ag и Al соответственно толщиной 1 мкм.

После разделения пластины на чипы размером $4.3 \times 4.3 \text{ мм}$ и измерения темновых ВАХ фотодиодов (образцы группы 1) проводилось утонение p^+ -областей методом РИПТ с использованием слоя алюминиевой металлизации в качестве маски (рис. 1, b).

Процесс РИПТ 4H-SiC был реализован на ICP-установке „Caroline-15“.

Режим реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ) в среде $\text{SF}_6 - \text{O}_2 - \text{Ar}$ был подобран так, чтобы обеспечить скорость травления p^+ -слоя $0 \leq 0.2 \text{ мкм/мин}$. Дальнейшие исследования проводились на группах фотодиодных структур, где времена травления варьировались в диапазоне 0–10 мин (см. таблицу).

Исследования чувствительности образцов методом сравнения были проведены в фотогенераторном режиме в диапазоне длин волн 220–400 нм. В качестве

Распределение фотодиодов по группам в зависимости от времени РИПТ

№ группы образцов	Время РИПТ p^+ -слоя, мин
1	0
2	3
3	5
4	7
5	10

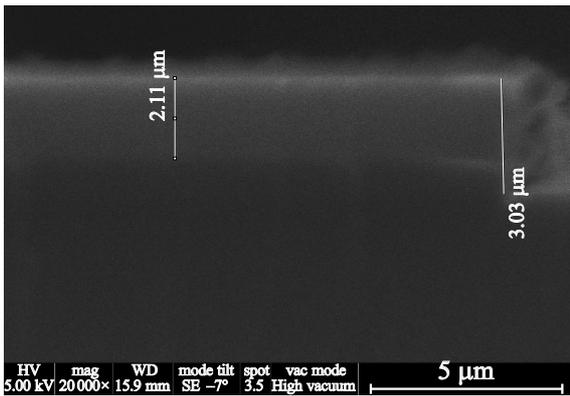


Рис. 2. РЭМ-изображение скола 4H-SiC-фотодиода в области мезы.

источника УФ излучения использовалась дейтериевая газоразрядная лампа ДДС-30. Монохроматор СФ-16 обеспечивал выбор длины волны. Регистрация фототока производилась пикоамперметром „Keithley 6485“. В качестве вторичного эталона чувствительности использовался кремниевый фотодиод, прокалиброванный во ВНИИОФИ (г. Москва). Чувствительность и внешний квантовый выход (ВКВ) исследуемого образца определялись в соответствии с выражениями:

$$S(\lambda)_{SiC} = S(\lambda)_{Si} \times (I(\lambda)_{SiC} - Id_{SiC}) / (I(\lambda)_{Si} - Id_{Si}), \quad (1)$$

$$EQY(\lambda)_{SiC} = (S(\lambda)_{SiC} \cdot h \cdot c) / (\lambda \cdot q), \quad (2)$$

где λ — длина волны, $I(\lambda)_{SiC}$ — ток, регистрируемый с образца при облучении УФ излучением, Id_{SiC} — темновой ток образца, $I(\lambda)_{Si}$ — ток, регистрируемый скалированного фотодиода при облучении УФ излучением, Id_{Si} — темновой ток калиброванного фотодиода, $S(\lambda)_{Si}$ — абсолютная чувствительность калиброванного фотодиода, $S(\lambda)_{SiC}$ — измеренная абсолютная чувствительность образца, $EQY(\lambda)_{SiC}$ — вычисленный ВКВ образца, q — заряд электрона, h — постоянная Планка, c — скорость света.

3. Экспериментальные результаты

Темновые вольт-амперные характеристики фотодиодных 4H-SiC-чипов до (образец 1) и после (образцы 3 и 5) РИПТ были измерены с помощью пикоамперметра „Keithley 6487“. Во всех случаях для прямых ветвей ВАХ экспоненциальный рост тока в диапазоне 10^{-11} – 10^{-2} А был пропорционален $\exp(qU/nkT)$ со значением коэффициента n , близким к 2 (рис. 3), что характерно для рекомбинационного механизма транспорта носителей в резких несимметричных 4H-SiC p - n -переходах [13]. Для образцов всех типов значения обратных токов при напряжениях до -5 В не превышали 20 пА (рис. 3), что приемлемо для фотоприемных структур большой площади без пассивации боковой

поверхности мезы, предназначенных для работы в фотогенераторном режиме.

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) были определены толщины p^+ -слоев (рис. 1, *b*) после РИПТ. Из рис. 4 видно, что отработанный режим „мягкого“ травления 4H-SiC позволяет обеспечить скорость удаления материала 0.15–0.16 мкм/мин.

Для спектральных измерений были использованы фотодиодные чипы образцов групп 1, 3, 5, которые были помещены в металлоглазненные корпуса на подкристалльные платы и разварены (рис. 1, *d*). На рис. 4 представлены спектральные зависимости токовой чувствительности и внешнего квантового выхода изготовленных образцов, а также фотодиодов с барьером Шоттки на основе Cr-4H-SiC [15]. Для фотодиодов на основе p^+ - n -переходов по мере утонения p^+ -слоя очевидна тенден-

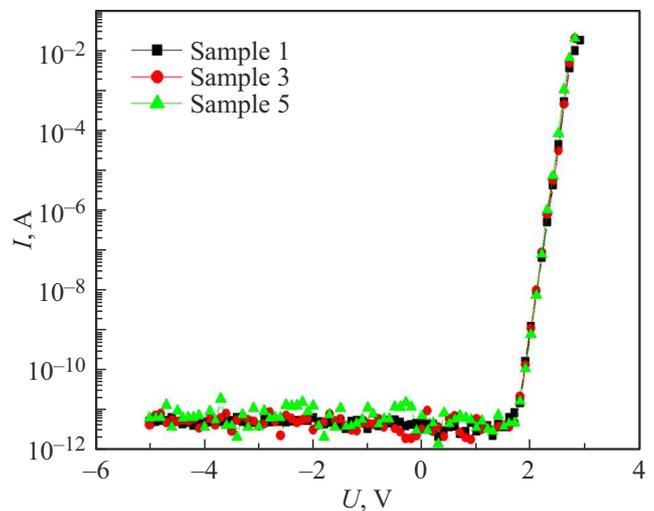


Рис. 3. Темновые ВАХ 4H-SiC фотодиодных чипов (образцы групп 1, 3, 5). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

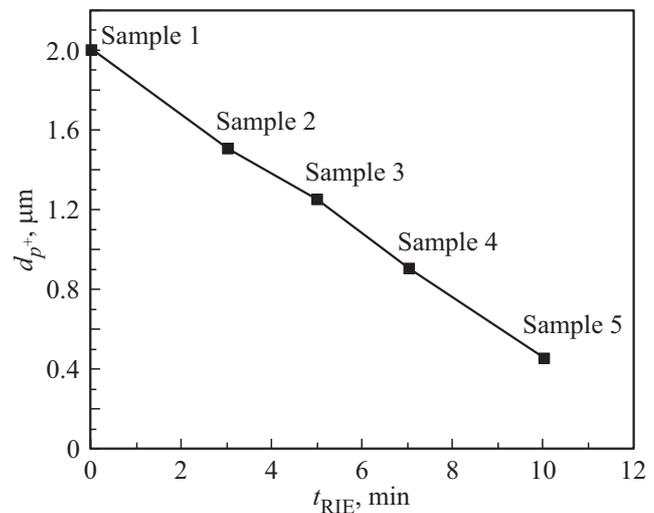


Рис. 4. Толщины p^+ -слоев, измеренные методом АСМ после травления с разными временами.

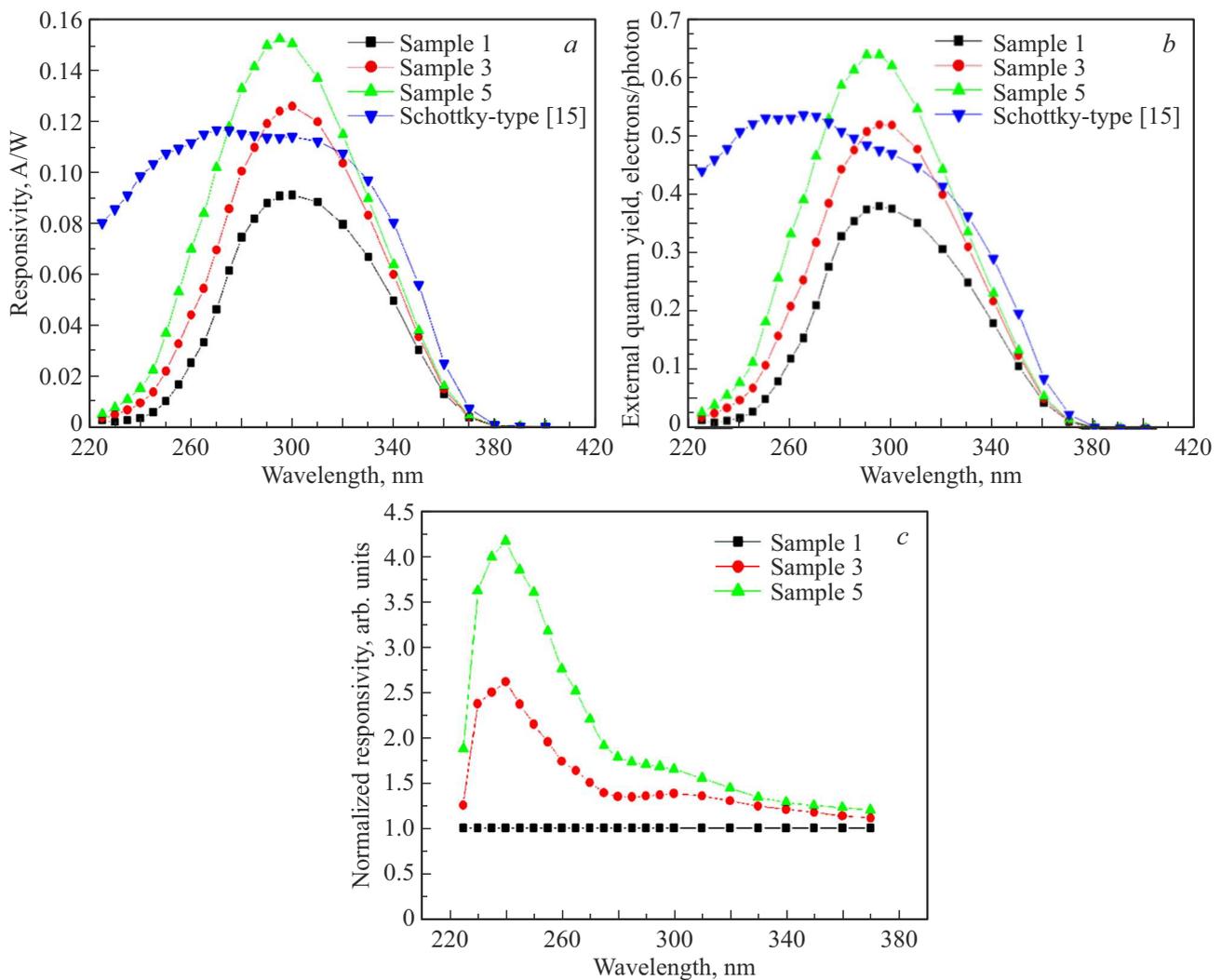


Рис. 5. Спектральные зависимости чувствительности (а), внешнего квантового выхода (б) и нормированной к образцу 1 чувствительности (с) 4H-SiC-фотодиодов.

ция к увеличению чувствительности и ВКВ. Как следует из данных, приведенных на рис. 5, при уменьшении толщины верхнего слоя фотодиода с 2 до 0.45 мкм значения чувствительности и ВКВ в области максимума (с 0.091 А/Вт до 0.156 А/Вт и с 0.38 электронов/фотон до 0.64 электронов/фотон соответственно), а также коротковолновой области увеличиваются весьма значительно. Следует отметить, что значения максимальной чувствительности и соответствующие им длины волн практически совпадают с результатами расчетов в [9,10]. Обращает на себя внимание тот факт, что даже при $d = 0.45$ мкм при отсутствии антиотражающих покрытий на длине волны 295 нм максимальные значения чувствительности и ВКВ равны 0.156 А/Вт и 0.64 электронов/фотон соответственно, что не уступает известным аналогам.

Ожидается, что последующее утонение d до толщины 0.10–0.15 мкм позволит существенно повысить коротковолновую чувствительность приемников данного типа, которая может быть сопоставима с фотодиодами на

основе барьера Шоттки. В то же время следует дополнительно исследовать возможное влияние образующегося в результате РИПТ поверхностного слоя протяженностью в несколько десятков нанометров, который может оказать как положительное, так отрицательное влияние на чувствительность в диапазоне длин волн < 290 нм.

4. Заключение

В результате исследований показано, что утонение верхнего p^+ -слоя мезаэпитаксиального 4H-SiC-фотодиода типа p^+-n-n^+ методом РИПТ с использованием в качестве маски металла контактов позволяет управлять чувствительностью, ВКВ и их спектральными зависимостями. При этом не наблюдается заметного ухудшения темновых ВАХ фотодиодов. Представляется интересным исследовать влияние параметров массивов микронаноразмерных острий (плотность, линейные раз-

меры, форма) на фотоэлектрические свойства и быстродействие $4H$ -SiC-фотодиодов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. ФТП, **37**, 1025 (2003).
- [2] A. Sciuto, M. Mazzillo, S. Di Franco, F. Roccaforte, G. D'Arrigo. IEEE Photonics J., **7**, 6801906 (2015).
- [3] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, Е.В. Калинина, О.В. Константинов. ЖТФ, **78**, 86 (2008).
- [4] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, Н.М. Коровкина, А.Ю. Савенко. Письма ЖТФ, **31**, 1 (2005).
- [5] Z. Wu, X. Xin, Feng Yan, Jian Hui Zhao. Mater. Sci. Forum, **457-460**, 1491 (2004).
- [6] IFW Optronics, GmbH — www.ifw-optronics.de
- [7] M. Zhang, K. Wang, H. Jiang, R. Hong, Z. Wu. Electron. Lett., **52**, 1474 (2016).
- [8] H.Y. Cha, P.M. Sandvik. Jpn. J. Appl. Phys., **47**, 423 (2008).
- [9] Y. Hou, C. Sun, J. Wu, R. Hong, J. Cai, X. Chen, D. Lin, Z. Wu. Electron. Lett., **55**, 216 (2019).
- [10] C. Matthus, A. Burenkov, T. Erlbacher. Mater. Sci. Forum, **897**, 622 (2017).
- [11] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, А.В. Серков, Д.А. Чигирев. ФТП, **56**, 606 (2022).
- [12] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, С.А. Решанов, А.А. Романов, К.А. Сергушичев, А.В. Серков, Д.А. Чигирев. Нано- и микросистемная техника, **18** (5), 331 (2016).
- [13] T. Kimoto, J.A. Cooper. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications* (Singapore, John Wiley & Sons, Inc., 2014).
- [14] A.V. Afanasyev, B.V. Ivanov, V.A. Plyin, A.F. Kardo-Sysoev, M.A. Kuznetsova, V.V. Luchinin. Mater. Sci. Forum, **740-742**, 1010 (2013).
- [15] Е.В. Калинина, Г.Н. Виолина, В.П. Белик, А.В. Николаев, В.В. Забродский. Письма ЖТФ, **42**, 73 (2016).

Редактор А.Н. Смирнов

Application of reactive ion etching technology to control responsivity of $4H$ -SiC-photodiodes

A.V. Afanasev¹, V.V. Zabrodskiy², V.A. Ilyin¹, V.V. Luchinin¹, A.V. Nikolaev², 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 to increase the responsivity of $4H$ -SiC $p^+ - n - n^+$ -photodiodes by varying the thickness of the p^+ -epilayer has been studied. It is shown that the thinning of the upper epilayer by reactive ion etching with the use of metal contacts as a mask makes it possible to control both the maximum responsivity and the spectral dependence of the responsivity of photodiodes and does not lead to degradation of dark electrical characteristics.