

Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника

УДК 621.382.22

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-1-41-51>

Характеристики *pin*-структуры с дискретно металлизированной поверхностью *i*-области

А. А. Даниленко¹, А. Д. Иванов¹, В. Л. Иванов³, В. В. Марочкин²,
Н. И. Михайлов^{1✉}, В. В. Перепеловский¹

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

² Pixpolar Oy, Espoo, Finland

³ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉miknikiv51@gmail.com

Аннотация

Введение. В настоящее время интерес к совершенствованию *pin*-структур продолжает оставаться в центре внимания разработчиков электронных устройств. К устройствам, в которых используются такие структуры, можно отнести энергонезависимую память, устройство защиты от статического напряжения, *pin*-диоды с регулируемыми характеристиками и др. Однако вопросу управления характеристиками *pin*-структур посредством использования дискретной металлизации на поверхности *i*-области уделено недостаточное внимание.

Цель работы. Исследование влияния дискретной металлизации поверхности *i*-области на статические и динамические характеристики *pin*-структуры, компенсацию дефектов, управление эффективностью *pin*-фотодетектора.

Материалы и методы. Исследуемая *pin*-структура состоит из *p*+области, легированной бором; *n*+области, легированной фосфором; *i*-области, легированной фосфором; полуизолирующей подложки; металлизации подложки; управляющего затвора из поликремния; слоя диэлектрика из оксида кремния. Двумерный численный анализ распределения потенциала, концентрации свободных носителей заряда и токов выполнялся в среде Synopsys Sentaurus TCAD.

Результаты. Выполнен двумерный анализ дискретно металлизированных *pin*-структур. Определены напряжения, подаваемые на затворы *i*-области, компенсирующие влияние дефектов, образованных электронным облучением. Проведено моделирование четырех структур *pin*-фотодетектора, в которых управляющие затворы выполнены в виде структуры металл-диэлектрик-полупроводник. Показана возможность увеличения чувствительности *pin*-фотодетектора подачей соответствующих потенциалов на затворы.

Заключение. Исследовано влияние дискретной металлизации *i*-области *pin*-структуры. Предложен метод коррекции характеристик облученного *pin*-диода до исходных характеристик. Тем самым появляется возможность использования таких диодов в электронике с высокими требованиями к работе в зонах с повышенной радиацией. Предложена конструкция фотодетектора повышенной чувствительности с управляющими затворами на поверхности *i*-области и с разделением структуры низколегированной *i*-области на две области *p*- и *n*-типов проводимости.

Ключевые слова: *pin*-диод управляемый, *pin*-диод программируемый, МДП-затворы *i*-области, Synopsys Sentaurus TCAD

Для цитирования: Характеристики *pin*-структуры с дискретно металлизированной поверхностью *i*-области / А. А. Даниленко, А. Д. Иванов, В. Л. Иванов, В. В. Марочкин, Н. И. Михайлов, В. В. Перепеловский // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-41-51

Благодарности. Авторы выражают благодарность И. А. Толкачеву за проведение расчетов в пакете моделирования TCAD Synopsys.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.09.2019; принята к публикации после рецензирования 28.01.2020; опубликована онлайн 28.02.2020



The Characteristics of the *pin*-Structure with a Discrete Metallic Surface *i*-Region

Alexander A. Danilenko¹, Alexander D. Ivanov¹, Vladimir L. Ivanov³,
Vladislav V. Marochkin², Nikolay I. Mikhailov^{1✉}, Vadim V. Perepelovskiy¹

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Pixpolar Oy, Espoo, Finland

³ITMO University, St Petersburg, Russia

✉ miknikiv51@gmail.com

Abstract

Introduction. Currently, an interest in improving *pin*-structures continues to be the focus of attention of developers of electronic devices. Devices that use controlled *pin*-structures include: non-volatile memory, static voltage protection device, *pin*-diodes with adjustable characteristics, etc. However, insufficient attention is paid to the issue of controlling the characteristics of *pin*-structures by using discrete metallization on the surface of *i*-region.

Aim. Investigation of the influence of discrete metallization of the surface of *i*-region on static and dynamic characteristics of *pin*-structure, defect compensation, and efficiency control of the *pin*-photodetector.

Materials and methods. The *pin*-structure under study consisted of *p*⁺-boron-doped region; *n*⁺-phosphorus-doped region; *i*-phosphorus-doped region; semi-insulating substrate; metallization of the substrate; polysilicon control gate; and a silicon oxide dielectric layer. Two-dimensional numerical analysis of the potential distribution, of the concentration of free charge carriers and currents was performed in the Synopsys Sentaurus TCAD environment.

Results. Two-dimensional analysis of discretely metallized *pin*-structures was performed. The stresses applied to the gates of *i*-region that compensated the influence of defects formed by electron irradiation were determined. Four *pin*-photodetector structures were modeled, in which the control gates were performed in the form of metal–dielectric–semiconductor structure. The possibility of increasing the sensitivity of the *pin*-photodetector by applying the corresponding potentials to the gates was demonstrated.

Conclusion. An effect of discrete metallization of *i*-region of the *pin*-structure was investigated. A method for correcting of the characteristics of the irradiated *pin*-diode to the initial characteristics was proposed. It makes possible to use such diodes in electronics with high requirements for operating in areas with high radiation. The design of a high-sensitivity photodetector with control gates on the surface of *i*-region and with the structure of low alloy *i*-region split into two regions (*p*- and *n*-type conductivity) was proposed.

Keywords: *pin*-controlled diode, *pin*-programmable diode, MOS gates of the *i*-region, Synopsys Sentaurus TCAD

For citation: Danilenko A. A., Ivanov A. D., Ivanov V. L., Marochkin V. V., Mikhailov N. I., Perepelovskiy V. V. The Characteristics of the *pin*-Structure with a Discrete Metallic Surface *i*-Region. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-41-51

Acknowledgments. The authors are grateful to I. A. Tolkachev for performing calculations in the TCAD Synopsys simulation package.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 11.09.2019; accepted 28.01.2020; published online 28.02.2020

Введение. Управляющие затворы на поверхности *i*-области *pin*-диода привлекают внимание исследователей как с точки зрения расширения функциональных возможностей, так и в связи с интеграцией таких устройств. Опубликовано не-

сколько работ, в которых рассматривались *pin*-диоды с дискретной металлизацией *i*-области. Изменение времени переключения управляемых *pin*-структур рассматривалось в [1]. Управляемые затвором *pin*-диоды также применяются при ан-

тистатической защите интегральных микросхем [2]. Развитием этого направления является интегрирование управляемых *pin*-структур. Так, на основе *pin*-структуры реализована энергонезависимая память [3]. Интегрирование управляемой *pin*-структуры в энергонезависимую память рассмотрено в [4, 5]. В последнее время получило распространение использование в *pin*-структурах 3D-затворов [6].

Известны исследования влияния радиации на приборы и устройства. Например, в [7] исследовалась деградация кремниевых n^+n-p^+ -структур в результате воздействия высокоэнергетического ($10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-2}$) электронного/протонного облучения. Целью работы [8] было исследование влияния дозы электронного облучения на вольт-амперную характеристику (ВАХ) и низкочастотные шумы (токовые и $1/f$) 4H-SiC *pin*-диодов.

В [9] исследованы изменения ВАХ и барьера Шотки диода *p*-типа в зависимости от дозы электронного облучения. В процессе облучения могут меняться кристаллическая структура и электрические свойства полупроводника. В некоторых ситуациях это делается намеренно, чтобы точно скорректировать быстродействие, емкость. В [10–12] представлено влияние на динамические характеристики диодов облучения высокоэнергетическими частицами. Иногда, наоборот, излучение вызывает нежелательные изменения характеристик [13]. В последнее время было опубликовано несколько работ [14–16], в которых исследовалось влияние металлических электродов, находящихся на поверхности *i*-области, на свойства *pin*-диода.

Настоящая статья посвящена моделированию кремниевых *pin*-диодов с дискретно металлизированной поверхностью. Исследовано влияние дефектов, вызванных электронным облучением *pin*-диода, на вид ВАХ и время открытия диода. Выполнена коррекция статических и динамических характеристик *pin*-диода посредством задания необходимых потенциалов на затворы *pin*-структуры. Определены напряжения, подаваемые на затворы для компенсации влияния дефектов.

Наряду с исследованием влияния дискретной металлизации на характеристики *pin*-диода в статье приведены результаты исследования влияния металлических электродов, находящихся на поверхности *i*-области, на чувствительность фотодетектора на основе *pin*-структуры. Исследованы четыре различные конструкции *pin*-фотодетекторов,

в которых плавающие затворы выполнены в виде структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП). Исследовано влияние геометрии затворов и потенциалов, поданных на них, на чувствительность фотодетектора. Кроме того, изучалось влияние разделения структуры низколегированной *i*-области на две низколегированные области *p*- и *n*-типа проводимости на чувствительность *pin*-фотодетектора. Моделирование исследованных устройств выполнялось в среде Synopsys Sentaurus TCAD.

Результаты моделирования *pin*-диода. Программная среда Synopsys Sentaurus TCAD позволяет описывать ловушки, возникающие в результате облучения, которые создают дополнительные энергетические уровни в запрещенной зоне, а также учитывать захват и хранение пространственного заряда на ловушках. В статье исследовано влияние электронного облучения на ВАХ и характеристики открытия *pin*-структуры. Рассматривалась полностью облученная структура, в силу чего она характеризуется однородным распределением ловушек с параметрами, соответствующими электронному облучению [17]. Для предварительного анализа и моделирования была выбрана структура, представленная на рис. 1. В процессе моделирования подбирались геометрические размеры управляющих электродов и потенциалы на них с целью наиболее эффективного влияния на ВАХ *pin*-диода и время переключения.

На рис. 2 показаны ВАХ для исходной и подвергнутой электронному облучению *pin*-структуры в диапазоне от 0 до 1.7 В. В разработанной структуре с дискретной металлизацией поверхности обеспечивается компенсация вклада ловушек на ВАХ *pin*-диода посредством подачи напряжения на затворы. Положительное напряжение действует аналогично ловушкам, и угол наклона ВАХ уменьшается, а при отрицательном напряжении возникает обратная ситуация и появляется возможность компенсировать вклад дефектов в ВАХ. Напряжения разных знаков, поданные на затворы, позволяют достичь лучшего результата по коррекции ВАХ *pin*-структуры. При подаче отрицательного напряжения на затвор G1 $U_{G1} = -5.2 \text{ В}$ и положительного напряжения на затвор G3 $U_{G3} = 5.2 \text{ В}$ достигается максимальное увеличение крутизны ВАХ. В процессе исследования обнаружено, что зависимость компенсирующих напряжений на затворах структуры от концентрации дефектов близка к линейной.

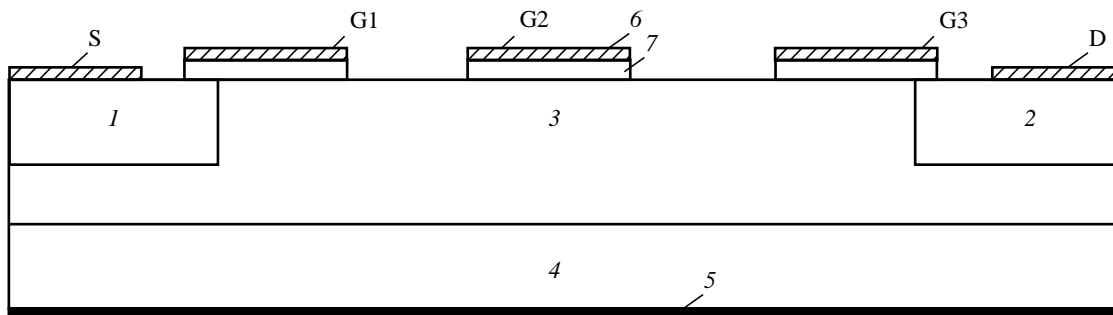


Рис. 1. Топология исследуемого *pin*-диода: S – исток; G1–G3 – затворы; D – сток; 1 – p^+ -область, легированная бором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 2 – n^+ -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 3 – n -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 4 – полуизолирующая подложка; 5 – металлизация подложки; 6 – управляющий затвор из поликремния толщиной 4 нм; 7 – слой диэлектрика из диоксида кремния толщиной 1.8 нм

Fig. 1. Topology of the *pin*-diode under study: S – source; G1–G3 – gates; D – drain; 1 – p^+ -area doped with boron with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 2 – n^+ -area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 3 – n -area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; 4 – semi-insulating substrate; 5 – metallization of the substrate; 6 – polysilicon control gate with a thickness of 4 nm; 7 – layer of silicon dioxide dielectric with a thickness of 1.8 nm

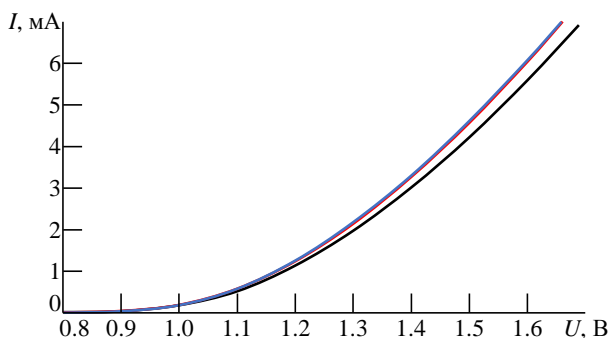


Рис. 2. Компенсация ВАХ *pin*-диода дополнительными затворами. Красная линия – исходная ВАХ диода; черная линия – ВАХ диода после облучения; синяя линия – ВАХ диода после облучения и компенсации смещением на затворах

Fig. 2. Compensation of the *pin*-diode current-voltage characteristics (CVC) with additional gates. Red line – the initial diode CVC; black line – diode CVC after irradiation; blue line – diode CVC after irradiation and gate compensation ($U_{G1} = -5.2 \text{ V}$; $U_{G2} = 0$; $U_{G3} = 5.2 \text{ V}$)

Дефекты в *pin*-структуре меняют скорость нарастания тока. Как следствие, требуется коррекция характеристики переключения для возвращения времени открытия к времени открытия бездефектного *pin*-диода. Как было показано в [18], характеристики переключения управляются затворами на поверхности *pin*-структуры. На рис. 1 отмечены затворы G1–G3, обеспечивающие коррекцию характеристик переключения, представленных на рис. 3. Крайние затворы (G1 и G3) обеспечивают регулировку тока и времени открытия, что позволяет управлять крутизной ВАХ и характеристиками переключения. Введение в модель среднего затвора G2 позволяет настраи-

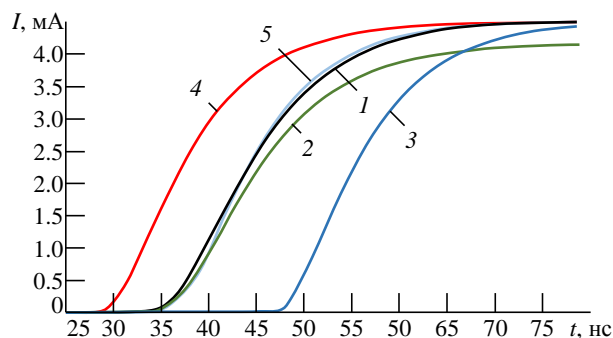


Рис. 3. Характеристики переключения *pin*-диода: 1 – исходного (без дефектов); 2 – облученного; 3 – облученного с увеличением времени открытия за счет напряжения на компенсирующем затворе ($U_{G2} = -0.8 \text{ В}$); 4 – облученного с уменьшением времени открытия за счет напряжения на компенсирующем затворе ($U_{G2} = 0.6 \text{ В}$); 5 – облученного с напряжениями на компенсирующих затворах ($U_{G1} = -5.2 \text{ В}$; $U_{G2} = -0.6 \text{ В}$; $U_{G3} = 5.2 \text{ В}$)

Fig. 3. Switching *pin*-diode characteristics: 1 – original (without defects); 2 – irradiated diode; 3 – irradiated diode with increasing opening time due to voltage at the compensating gate ($U_{G2} = -0.8 \text{ V}$); 4 – irradiated diode with decreasing opening time due to voltage at the compensating gate ($U_{G2} = 0.6 \text{ V}$); 5 – irradiated diode with compensating voltage at the compensation gates ($U_{G1} = -5.2 \text{ V}$; $U_{G2} = -0.6 \text{ V}$; $U_{G3} = 5.2 \text{ V}$)

вать время открытия. При подаче положительного смещения на G2 время открытия уменьшалось (рис. 3, 4, $U_{G2} = 0.6 \text{ В}$), при отрицательном – увеличивалось (рис. 3, 3, $U_{G2} = -0.8 \text{ В}$). Применение одновременно трех затворов дает возможность достаточно точно корректировать характеристику переключения *pin*-диода, что видно при

сравнении зависимостей 1, 2 и 3 на рис. 3. Результаты корректировки отображены зависимостью 5.

Таким образом, моделирование показало возможность коррекции характеристик *pin*-структуры, подвергнутой воздействию электронной радиации, путем нанесения на поверхность диода трех МДП-затворов и подачи на них необходимых потенциалов. К корректируемым характеристикам относятся ВАХ и характеристики открытия *pin*-структуры. Описанный метод позволяет скорректировать отклонение рабочих характеристик подвергнутого облучению диода до заводских характеристик, тем самым позволяет использовать такие диоды в электронике с высокими требованиями к работе в зонах с повышенной радиацией и обеспечивает более длительное использование устройства.

Исследовано влияние металлических электродов (затворов), находящихся на поверхности *i*-области, на чувствительность *pin*-фотодетектора. Исследованию подвергали четыре конструкции *pin*-фотодетекторов, в которых управляющие затворы выполнены в виде затворов со структурой металл–диэлектрик–полупроводник.

Структура исходного *pin*-фотодетектора показана на рис. 4. Влияние затворов, расположенных на поверхности *i*-области, изучалось на фотодетекторе, структура которого представлена на рис. 5. В результате моделирования установлено, что протяженность затворов в направлении дрейфа носителей заряда и потенциалы на затворах существенно влияют на чувствительность *pin*-фотодетектора.

Следующим этапом исследований стало изучение влияния на чувствительность *pin*-фотодетектора разделения низколегированной *i*-области на две области *i-p*- и *i-n*-типов. Такая конструкция должна способствовать более эффективному разделению потоков электронов и дырок и, соответственно, снижать процесс рекомбинации. Исследуемые структуры представлены на рис. 6, 7.

Результаты моделирования *pin*-фотодетектора. В процессе моделирования изучались спектральные характеристики *pin*-фотодетекторов и распределение носителей заряда в *i*-области с учетом рекомбинации Шокли–Рида–Холла для четырех структур, представленных на рис. 4–7. Параметры исследованных структур приведены в подписях к рисункам. В структуре, представлен-

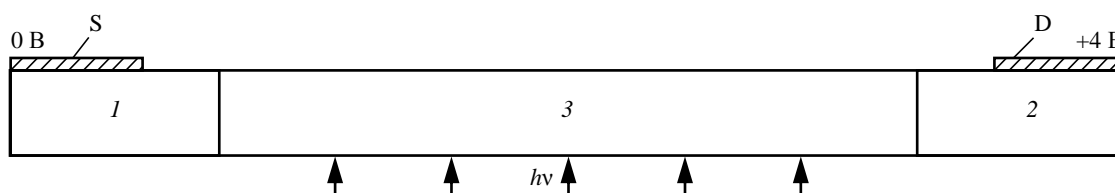


Рис. 4. Топология исходного *pin*-фотодетектора: S – исток; D – сток; 1 – p^+ -область, легированная бором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 2 – n^+ -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 3 – $i-n$ -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $h\nu$ – оптическое излучение

Fig. 4. Topology of the original *pin*-photodetector: S – source; D – drain; 1 – p^+ -area doped with boron with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 2 – n^+ -area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$;

3 – $i-n$ -area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $h\nu$ – optical irradiation

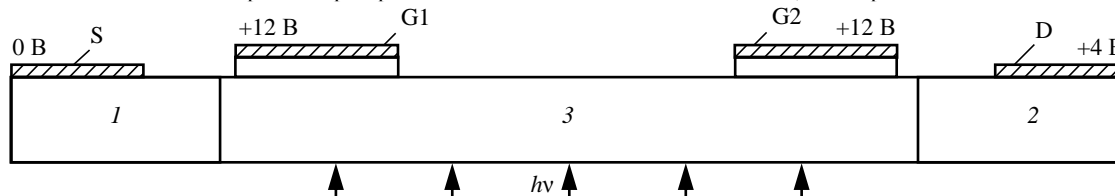


Рис. 5. Топология *pin*-фотодетектора с управляющими затворами: S – исток; G1, G2 – управляющие затворы; D – сток; 1 – p^+ -область, легированная бором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 2 – n^+ -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 3 – $i-n$ -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $h\nu$ – оптическое излучение. Толщина затворов 4 нм, толщина подзатворного диэлектрика 1.8 нм

Fig. 5. Topology of the *pin*-photodetector with control gates: S – source; G1, G2 – control gates; D – drain; 1 – p^+ -area doped with boron with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 2 – n^+ -area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 3 – $i-n$ -area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $h\nu$ – optical irradiation.

Gate thickness is 4 nm, gates dielectric thickness is 1.8 nm

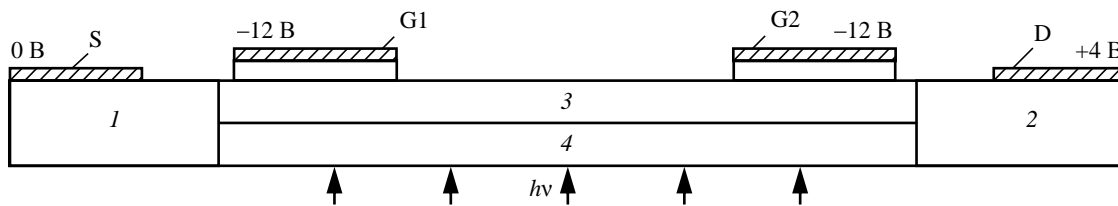


Рис. 6. Топология *pin*-фотодетектора с двухслойной структурой *i*-области и управляющими затворами: S – исток; G1, G2 – управляющие затворы; D – сток; 1 – p^+ -область, легированная бором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 2 – n^+ -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 3 – *i-p*-область, легированная бором с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 4 – *i-n*-область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $h\nu$ – оптическое излучение. Толщина затворов 4 нм, толщина подзатворного диэлектрика 1.8 нм

Fig. 6. Topology of the *pin*-photodetector with two-layer structure of the *i*-region and control gates: S – source; G1, G2 – control gates; D – drain; 1 – p^+ -area doped with boron with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 2 – n^+ -area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 3 – *i-p*-area doped with boron with a concentration of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; 4 – *i-n*-area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $h\nu$ – optical irradiation. Gate thickness is 4 nm, gates dielectric thickness is 1.8 nm

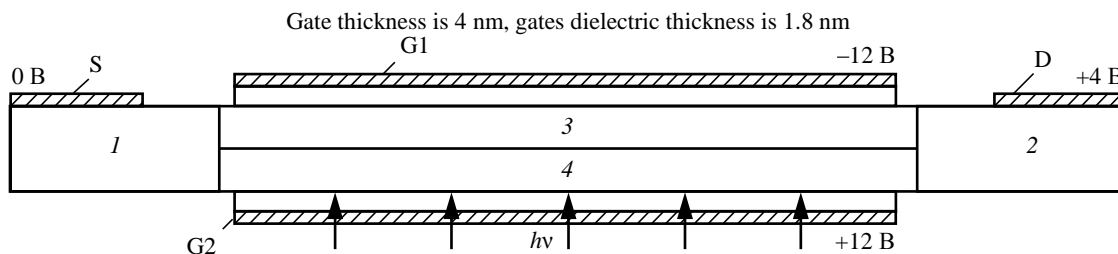


Рис. 7. Топология *pin*-фотодетектора с двухслойной структурой *i*-области и сплошными затворами сверху и снизу: S – исток; G1, G2 – управляющие затворы; D – сток; 1 – p^+ -область, легированная бором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 2 – n^+ -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 3 – *i-p*-область, легированная бором с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 4 – *i-n*-область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $h\nu$ – оптическое излучение. Толщина подзатворного диэлектрика 1.8 нм, толщина затворов 4 нм

Fig. 7. Topology of the *pin*-photodetector with two-layer structure of the *i*-region and the and solid top and bottom control gates: S – source; G1, G2 – control gates; D – drain; 1 – p^+ -area doped with boron with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 2 – n^+ -area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 3 – *i-p*-area doped with boron with a concentration of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; 4 – *i-n*-area doped with phosphorus with a concentration of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $h\nu$ – optical irradiation. Gate dielectric thickness is 1.8 nm, gates thickness is 4 nm

ной на рис. 5, *i*-область сформирована путем легирования фосфором (*i-n*). Для разделения зарядов на оба затвора подается потенциал +12 В. Для разделения зарядов в структуре на рис. 6, где *i*-область легирована бором (*i-p*), на оба затвора подается потенциал –12 В. В структуре на рис. 7 для разделения зарядов на затвор G1, расположенный на *i-p*-области, подан потенциал –12 В, а на затвор G2, расположенный на *i-n*-области, – потенциал +12 В. Значения напряжений на затворах и стоке подобраны таким образом, чтобы обеспечивать наибольшее отличие характеристик модифицированных устройств от характеристик исходного фотодетектора (см. рис. 4).

При исследовании спектральных характеристик *pin*-фотодетекторов на сток подавался потенциал

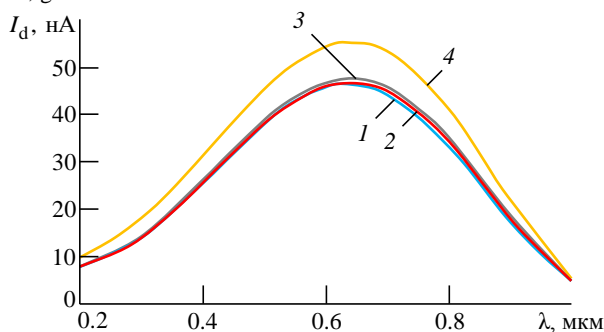


Рис. 8. Спектральные характеристики топологий *pin*-фотодетектора: 1 – исходного (см. рис. 4); 2 – с затворами без разделения *i*-области (см. рис. 5); 3 – с затворами и разделенной *i*-областью (см. рис. 6); 4 – со сплошными затворами и разделенной *i*-областью (см. рис. 7)

Fig. 8. Spectral characteristics for *pin*-photodetector topologies: 1 – initial (see fig. 4); 2 – with gates without *i*-area combining (see fig. 5); 3 – with continuous gates and combined *i*-area (see fig. 6); 4 – with continuous gates and combined *i*-area (see fig. 7)

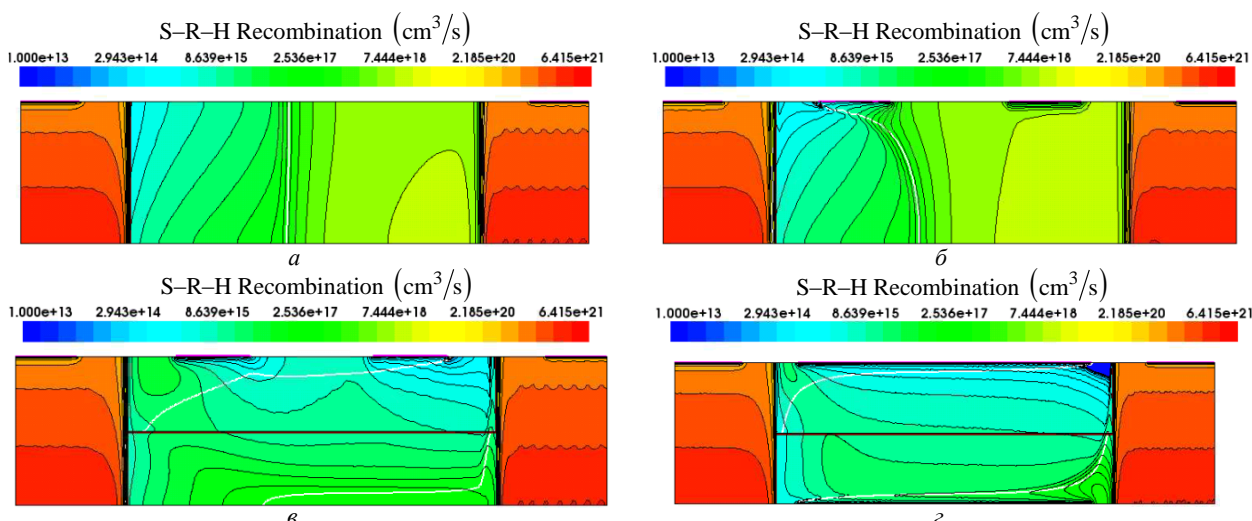


Рис. 9. Рекомбинация Шокли–Рида–Холла в исследованных топологиях *pin*-фотодетектора: *a* – исходной (см. рис. 4); *б* – с затворами без разделения *i*-области (см. рис. 5); *в* – с затворами и разделенной *i*-областью (см. рис. 6); *г* – со сплошными затворами и разделенной *i*-областью (см. рис. 7)

Fig. 9. Shockley–Read–Hall Recombination for the *pin*-photodetector topology under study: *a* – initial (see fig. 4); *б* – with gates without *i*-area combining (see fig. 5); *в* – with continuous gates and combined *i*-area (see fig. 6); *г* – with continuous gates and combined *i*-area (see fig. 7)

+4 В. Спектральный состав и интенсивность оптического излучения для всех топологий принимались одинаковыми. Результаты моделирования показаны на рис. 8. Из него следует, что спектральные характеристики исследованных фотодетекторов близки, при этом фототок (чувствительность к оптическому излучению) максимален в топологии *pin*-фотодетектора со сплошными и разделенной *i*-областью (рис. 7). Сравнение характеристик показывает, что применение затворов приводит к большему разделению электронов и дырок в *i*-области (рис. 8, кривые 1 и 2). Разделение *i*-области *pin*-фотодетектора на два слоя с разным типом проводимости в сочетании с протяженными затворами с двух сторон структуры (рис. 7) позволяет достичь большего фототока в сравнении со структурой, представленной на рис. 6.

Моделирование в среде Synopsys Sentaurus TCAD позволило изучить влияние рекомбинации Шокли–Рида–Холла на распределение носителей заряда в *i*-области *pin*-фотодетектора. На рис. 9 приведены результаты, полученные для четырех исследованных структур. Согласно полученным результатам моделирования при разделении *i*-области на две низколегированные части электроны и дырки проходят по полупроводникам *i-n* и *i-p*-проводимости соответственно, причем их разделение вертикальным полем сплошных затворов (топология по рис. 7) происходит более эффективно, чем при расположении затворов с одной стороны (топология по рис. 6) (рис. 9, *в* и *г*). В результате при топологиях с разделенной *i*-об-

ластью рекомбинация Шокли–Рида–Холла проявляется в меньшей степени, причем тем меньше, чем эффективнее разделяются носители полем затворов. Таким образом, введение слоев разного типа проводимости в *i*-области *pin*-фотодетектора в совокупности со сплошными затворами с двух сторон позволяет увеличить фототок в максимуме примерно на 20 % по сравнению с базовым *pin*-фотодетектором.

Обсуждение. В статье решается задача управления характеристиками *pin*-структуры с помощью затворов на поверхности *i*-слоя. Такого рода задачи встречаются при разработке энергонезависимой памяти, устройств защиты от статического напряжения, *pin*-диодов с регулируемыми характеристиками и др. Предложенный метод коррекции характеристик облученного *pin*-диода до исходных характеристик открывает возможность использования таких диодов в электронике с высокими требованиями к работе в зонах с повышенной радиацией.

Проведен 2D-расчет распределения концентрации свободных носителей заряда и потенциала в *pin*-структуре фотодетектора. На основании 2D-моделирования предложена топология фотодетектора повышенной чувствительности с управляющими затворами на поверхности *i*-области и с разделением структуры низколегированной *i*-области на две области с *p*- и *n*- типами проводимости. Проведенные исследования показывают эффективное влияние дискретной металлизации на поверхности *i*-области *pin*-структур на основные характеристики приборов.

Авторский вклад

Даниленко Александр Александрович – проведение расчетов в программе Synopsys Sentaurus TCAD; моделирование распределения концентрации свободных носителей заряда.

Иванов Алексей Дмитриевич – проведение расчетов токов в программе Synopsys Sentaurus TCAD.

Иванов Владимир Леонидович – обзор существующих публикаций в предметной области.

Марочкин Владислав Викторович – выбор и анализ численных моделей пакета Synopsys TCAD.

Михайлов Николай Иванович – обсуждение и анализ физических моделей *pin*-структур.

Перепеловский Вадим Всеволодович – введение в проблему; постановка задачи; обсуждение результатов.

Author's contribution

Alexander A. Danilenko, calculations in the program Synopsys Sentaurus TCAD; simulation of the of free charge carriers concentration distribution.

Alexey D. Ivanov, calculations of the current in the program Synopsys Sentaurus TCAD.

Vladimir L. Ivanov, a review of publications in the area of article subject.

Vladislav V. Marochkin, selection and analysis of calculation models of the package Synopsys TCAD.

Nikolay I. Mikhailov, discussion and analysis of the *pin*-structures physical models.

Vadim V. Perepelovsky, introduction and formulation of the problem; the results discussion.

Список литературы

1. US Pat. 2006/0091490 A1. Int. Cl. Y01L 31/105 (2006.01). Self-aligned Gated *p-i-n* diode for Ultra-east Switching / Hung-Wei Chen, Wen-Chin Lee, Chih-Hsin Ko, Min-Hwa Chi, Chung-Hu Ke. Pub. Date: May 4, 2006.
2. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6d/6e/7c/8d3850eacfd42/CN110504325A.pdf> (дата обращения 25.02.2020).
3. US Pat. 8,466,505 B2. Int.Cl. H01L 29/788 (2006.01). Multi-level flash memory cell capable of fast programming / Li-Shyue Lai, Hung-Wei Chen, Wen-Chin Lee, Min-Hwa Chi. Pub. Date: Jun. 18, 2013.
4. US Pat. US 2019/0013316 A1. Int. Cl. H01L 27/102, H01L 29/51, H01L 29/739, H01L 23/538, H01L 27/11568, G11C 16/10, H01L 29/66, H01L 29/423, H01L 21/02, H01L 21/28, H01L 27/07 (2006.01). Gated Diode Memory Cells / Arup Bhattacharyya. Pub. Date: Jan. 10, 2019.
5. US Pat. 10,276,576 B2. Int.Cl. H01L 27/102; G11C 16/10; H01L 29/51; H01L 27/07; H01L 21/28; H01L 21/02; H01L 29/423; H01L 29/66; H01L; H01L 23/538; H01L 29/739 (2006.01.01); 27/11568 (2017.01.01). Gated Diode Memory Cells / Arup Bhattacharyya. Pub. Date: Apr. 30, 2019.
6. US Pat. 10,340,370 B2. Int.Cl. H01L 29/739; H01L 29/08; H01L 27/02; H01L 29/66; H01L 29/78; H01L 29/49 (2006.01.01). Asymmetric Gated Fin Field Effect Transistor (FET) (finFET) diodes / Hao Wang, Haining Yang, Xiaonan Chen. Pub. Date: July 2, 2019.
7. Deep Level Analysis of Radiation-induced Defects in Si Crystals and Solar Cells / M. Yamaguchi, A. Khan, S. J. Taylor, K. Ando, T. Yamaguchi, S. Matsuda, T. Aburaya // J. of Appl. Phys. 1999. Vol. 86, № 1. P. 217–223.
8. Влияние облучения электронами с энергией 0.9 МэВ на вольт-амперные характеристики и низкочастотные шумы 4H–SiC *pin*-диодов / В. А. Добров, В. В. Козловский, А. В. Мещеряков, В. Г. Усыченко, А. С. Чернова, Е. И. Шабунина, Н. М. Шмидт // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, вып. 4. С. 555–561.
9. Krishnan S., Sanjeev G., Pattabi M. Electron Irradiation Effects on the Schottky Diode Characteristics of *p-Si* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2008. Vol. 266, № 4. P. 621–624. doi: 10.1016/j.nimb.2007.11.049
10. Козлов В. А., Козловский В. В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35, вып. 7. С. 769–795.
11. Солдатенков Ф. Ю., Козлов В. А., Кудояров М. Ф. Применение протонного облучения для точной коррекции динамических характеристик сверхбыстродействующих высокочастотных силовых GaAs-A3B5 *p-i-n*-диодов // Сб. стат. IV Всерос. науч.-техн. конф. "Электроника и микроэлектроника СВЧ". Санкт-Петербург, 1–4 июня 2015 г.: в 2 т. Т. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. С. 74–78.
12. Axial Lifetime Control in Silicon Power Diodes by Irradiation with Protons, Alphas, Low- and High-energy Electrons / P. Hazdra, J. Vobecky, H. Dorschner, K. Brand // Microelectronics J. 2004. Vol. 35, № 3. P. 249–257. doi: 10.1016/S0026-2692(03)00194-0
13. Synergistic effects of NPN transistors caused by combined proton irradiations with different energies / X. Li, J. Yang, C. Liu, G. Bai, W. Luo, P. Lia // Microelectronics Reliability. 2018. Vol. 82. P. 130–135. doi: 10.1016/j.microrel.2018.01.010
14. Responsivity Improvement for Short Wavelengths Using Full-Gated PIN Lateral SiGe Diode / C. Novo, R. Bühler, R. Zapata, R. Giacomini // 31st Symp. on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro). Belo Horizonte, Brazil, 29 Aug.–3 Sept. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. doi: 10.1109/SBMicro.2016.7731366

15. Study of Device Physics in Impact Ionisation MOSFET using Synopsys TCAD tools / A. S. Shruthi, A. M. Archana, M. Ponni, P. Vaya // Intern. Conf. on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAЕСС). Bangalore, India, 10–11 Oct. 2014. Piscataway: IEEE, 2014. doi: 10.1109/ICAЕСС.2014.7002450

16. Калинина Е. В. Влияние облучения на свойства SiC и приборы на его основе // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41, № 7. С. 769–805.

17. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 832 p.

18. Программирование двухбитного *pin*-диода в среде Synopsys Sentaurus TCAD / А. А. Даниленко, А. В. Стрыгин, Н. И. Михайлов, В. В. Перепеловский, Я. Н. Паничев, В. В. Марочкин, В. Л. Иванов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. Т. 21, № 5. С. 51–59. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-51-59

Информация об авторах

Даниленко Александр Александрович – бакалавр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2018), студент 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – моделирование устройств микроэлектроники в среде Synopsys Sentaurus TCAD.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: arguna96@yandex.ru

Иванов Алексей Дмитриевич – бакалавр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2018), студент 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – моделирование устройств микроэлектроники в среде Synopsys Sentaurus TCAD.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: adivanov1@stud.eltech.ru

Иванов Владимир Леонидович – кандидат технических наук (1988), старший научный сотрудник, (1991), доцент кафедры теплофизики и теоретических основ теплохладотехники, Университет ИТМО (Университет информационных технологий, механики и оптики). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – моделирование объектов и систем управления, энергоресурсосберегающие технологии.

Адрес: Национальный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр., д. 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия
E-mail: v78432@mail.ru

Марочкин Владислав Викторович – кандидат физико-математических наук (2016, Финляндия), менеджер проектов в компании Pixpolar. Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – моделирование приборов твердотельной электроники.

Адрес: Pixpolar Oy, 10, Metallimiehenkuja, c/o Regus Kora, 02150, Espoo, Finland
E-mail: vladislav.marochkin@gmail.com

Михайлов Николай Иванович – кандидат физико-математических наук (1982), доцент (1985) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 25 научных публикаций. Сфера научных интересов – математическое и компьютерное моделирование полупроводниковых приборов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: miknikiv51@gmail.com

Перепеловский Вадим Всеволодович – кандидат физико-математических наук (1992), доцент (1995) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных публикаций. Сфера научных интересов – моделирование приборов твердотельной электроники.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: vperpelovsky@gmail.com

References

1. Chen Hung-Wei, Lee Wen-Chin, Ko Chih-Hsin, Chi Min-Hwa, Ke Chung-Hu. US Pat. 2006/0091490 A1. Int. Cl. Y01L 31/105 (2006.01). Self-aligned Gated *p-i-n* diode for Ultra-east Switching. Pub. Date: May 4, 2006.

2. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6d/6e/7c/8d3850eacfdc42/CN110504325A.pdf> (accessed 25.02.2020).

3. Lai Li-Shyue, Chen Hung-Wei, Lee WenChin, Chi Min-Hwa. US Pat. 8,466,505 B2. Int.Cl. H01L 29/788 (2006.01). Multi-level flash memory cell capable of fast programming. Pub. Date: Jun. 18, 2013.
4. Bhattacharyya A. US Pat. US 2019/0013316 A1. Int. Cl. H01L 27/102, H01L 29/51, H01L 29/739, H01L 23/538, H01L 27/11568, G11C 16/10, H01L 29/66, H01L 29/423, H01L 21/02, H01L 21/28, H01L 27/07 (2006.01). Gated Diode Memory Cells. Pub. Date: Jan. 10, 2019.
5. Bhattacharyya A. US Pat. 10,276,576 B2. Int.Cl. H01L 27/102; G11C 16/10; H01L 29/51; H01L 27/07; H01L 21/28; H01L 21/02; H01L 29/423; H01L 29/66; H01L; H01L 23/538; H01L 29/739 (2006.01.01); 27/11568 (2017.01.01) / Gated Diode Memory Cells. Pub. Date: Apr. 30, 2019.
6. Wang Hao, Yang Haining, Chen Xiaonan. US Pat. 10,340,370 B2. Int.Cl. H01L 29/739; H01L 29/08; H01L 27/02; H01L 29/66; H01L 29/78; H01L 29/49 (2006.01.01). Asymmetric Gated Fin Field Effect Transistor (FET) (fin-FET) diodes. Pub. Date: July 2, 2019.
7. Yamaguchi M., Khan A., Taylor S. J., Ando K., Yamaguchi T., Matsuda S., Aburaya T. Deep Level Analysis of Radiation-induced Defects in Si Crystals and Solar Cells. J. of Applied Physics. 1999, vol. 86, no. 1, pp. 217–223.
8. Dobrov V. A., Kozlovskii V. V., Meshcheryakov A. V., Usychenko V. G., Chernova A. S., Shabunina E. I., Schmidt N. M. Impact of the Electron Irradiation with the Energy of 0.9 MeV on Current-Voltage Characteristics and Low Frequency Noise in 4H-SiC *pin*-Diodes. Semiconductors/Physics of the Solid State. 2019, vol. 53, iss. 4, pp. 555–561. (In Russ.)
9. Krishnan S., Sanjeev G., Pattabi M. Electron Irradiation Effects on the Schottky Diode Characteristics of *p*-Si. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2008, vol. 266, no. 4, pp. 621–624. doi: 10.1016/j.nimb.2007.11.049
10. Kozlov V. A., Kozlovski V. V. The Semiconductor Doping with Radiation Induced Defects via Proton and α -Particle Irradiation. Semiconductors/Physics of the Solid State. 2001, vol. 35, iss. 7, pp. 769–795. (In Russ.)
11. Soldatenkov F. Yu., Kozlov V. A., Kudoyarov M. F. The Use of Proton Irradiation for Accurate Correction of the Dynamic Characteristics of Ultrafast High-Frequency Power GaAs-A3B5 *p-i-n* Diodes. Proc. of IV All-Russ. Scientific and Technical Conf. "Microwave Electronics and Microelectronics". SPb, 1–4 June 2015. Vol. 2. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2015, pp. 74–78. (In Russ.)
12. Hazdra P., Vobecky J., Dorschner H., Brand K. Axial Lifetime Control in Silicon Power Diodes by Irradiation with Protons, Alphas, Low- and High-energy Electrons. Microelectronics J. 2004, vol. 35, no. 3, pp. 249–257. doi: 10.1016/S0026-2692(03)00194-0
13. Li X., Yang J., Liu C., Bai G., Luo W., Lia P. Synergistic Effects of NPN Transistors Caused by Combined Proton Irradiations with Different Energies. Microelectronics Reliability. 2018, vol. 82, pp. 130–135. doi: 10.1016/j.microrel.2018.01.010
14. Novo C., Bühler R., Zapata R., Giacomini R. Responsivity Improvement for Short Wavelengths Using Full-Gated PIN Lateral SiGe Diode. 31st Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro). Belo Horizonte, Brazil, 29 Aug.–3 Sept. 2016. Piscataway, IEEE, 2016. doi: 10.1109/SBMicro.2016.7731366
15. Shruthi A. S., Archana A. M., Ponni M., Vaya P. Study of Device Physics in Impact Ionisation MOSFET using Synopsys TCAD tools. Intern. Conf. on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAIECC). Bangalore, India, 10–11 Oct. 2014. Piscataway, IEEE, 2014. doi: 10.1109/ICAIECC.2014.7002450
16. Kalinina E. V. Influence Irradiation on SiC Properties and Devices Based on It. Semiconductors/Physics of the Solid State. 2007, vol. 41, no. 7, pp. 769–805. (In Russ.)
17. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006, 832 p.
18. Danilenko A. A., Strygin A. V., Mikhailov N. I., Perepelovsky V. V., Panichev Y. N., Marochkin V. V., Ivanov V. L. Programming 2-Bit *pin* Diode In Synopsys TCAD. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, vol. 21, no. 5, pp. 51–59. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-51-59

Information about the Authors

Alexander A. Danilenko, bachelor's degree in electronics and nanoelectronics (2018), the 2nd year master degree student of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of one scientific publication. Area of expertise: modeling of microelectronics devices in the Synopsys Sentaurus TCAD environment.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: arguna96@yandex.ru

Alexey D. Ivanov, bachelor's degree in electronics and nanoelectronics (2018), the 2nd year master degree student of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of one scientific publication. Area of expertise: modeling of microelectronics devices in the Synopsys Sentaurus TCAD environment.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: adivanov1@stud.eltech.ru

Vladimir L. Ivanov, Cand. Sci. (Eng.) (1988), Senior Researcher (1991), Associate Professor of the ITMO University, Saint Petersburg. Author of more than 50 scientific publication. Area of expertise: modeling of objects and control systems, energy and resource-saving technologies.
Address: ITMO University, 9 Lomonosova Str., St Petersburg 191002, Russia
E-mail: v78432@mail.ru

Vladislav V. Marochkin, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2016), Project Manager at Pixpolar Oy (Finland). Author of 10 scientific publications. Area of expertise: modeling of solid-state electronics devices.
Address: Pixpolar Oy, 10 Metallimiehenkuja, c/o Regus Kora, Espoo 02150, Finland
E-mail: vladislav.marochkin@gmail.com

Mikhailov N. Ivanovich – Cand. Sci. (Phys.-Math.) (1982), Associate Professor (1985) of the Department of Physical Electronics and Technology of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of more than 25 scientific publications. Area of expertise: mathematical and computer modeling of semiconductor devices.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: miknikiv51@gmail.com

Perepelovsky V. Vsevolodovich – candidate of physical and mathematical Sciences (1992), associate Professor (1995) of the Department of Physical Electronics and Technology of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: modeling of solid-state electronics devices.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: vvperepelovsky@gmail.com
