

ДВУСЛОЙНЫЕ ПЛАСТИНЫ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА, ЛЕГИРОВАННЫХ АЗОТОМ, ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДИОДОВ ШОТТКИ *n*-ТИПА**С.Г. Буга, А.С. Галкин, М.С. Кузнецов, Н.В. Корнилов,
Н.В. Лупарев, Д.Д. Приходько, С.А. Тарелкин, В.Д. Бланк**

Сергей Геннадьевич Буга (ORCID 0000-0001-7977-695X)*, Артем Сергеевич Галкин (ORCID 0000-0003-3411-2708), Михаил Сергеевич Кузнецов (ORCID 0000-0002-0485-7744), Николай Владимирович Корнилов (ORCID 0000-0001-6449-4562), Николай Викторович Лупарев (ORCID 0000-0002-2450-9771), Дмитрий Дмитриевич Приходько (ORCID 0000-0002-6516-6592), Сергей Александрович Тарелкин (ORCID 0000-0002-7278-3046), Владимир Давидович Бланк (ORCID 0000-0002-6070-4080)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: buga@tisnum.ru *, sergei_buga@mail.ru

Впервые изготовлен и исследован вертикальный алмазный диод Шоттки с электронным типом проводимости на основе двуслойной монокристаллической пластины синтетического алмаза, легированного азотом, в которой тонкий рабочий слой слаболегированного азотом алмаза был выращен методом химического осаждения из газовой фазы гомоэпитаксиально на сильнолегированной азотом подложке, вырезанной в плоскости {100} из монокристалла, выращенного методом роста на затравке при высоком давлении и температуре. Концентрация азота в виде одиночных атомов замещения (С-центров) в рабочем слое, выращенном из газовой фазы, составляла 0,5 ррт, толщина слоя 10 мкм, толщина подложки с концентрацией азота ~ 200 ррт была 400 мкм. Шесть контактов Шоттки диаметром 0,6 мм были изготовлены магнетронным напылением слоя платины толщиной 200 нм через контактную маску. Сплошной омический контакт был изготовлен на подложке также магнетронным напылением через контактную маску слоя Ti толщиной 5 нм с последующим высокотемпературным отжигом в вакууме для образования карбида титана, и последующим нанесением слоя Pt толщиной 200 нм для предотвращения окисления карбида титана на воздухе. Вольт-амперные характеристики изготовленных диодов исследованы в диапазоне напряжений (-200 В) – (+200 В) при температурах до 650 °С. Напряжение открытия изготовленной диодной структуры составляет ~30 В, максимальный ток каждого диода в открытом состоянии достигает 1 мА при U=200 В, при этом обратный ток при T=525-650 °С не превышает 0,1 мкА. Наибольшее значение коэффициента выпрямления составило ~10⁴.

Ключевые слова: синтетический алмаз, легирование азотом, диод Шоттки *n*-типа, электрические свойства

Для цитирования:

Буга С.Г., Галкин А.С., Кузнецов М.С., Корнилов Н.В., Лупарев Н.В., Приходько Д.Д., Тарелкин С.А., Бланк В.Д. Двуслойные пластины из синтетических монокристаллов алмаза, легированных азотом, для высокотемпературных диодов шоттки *n*-типа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 27–33. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.7y.

For citation:

Buga S.G., Galkin A.S., Kuznetsov M.S., Kornilov N.V., Luparev N.V., Prikhodko D.D., Tarelkin S.A., Blank V.D. Double-layer plates from synthetic diamond single-crystals doped with nitrogen for high-temperature *n*-type schottky diodes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 27–33. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.7y.

DOUBLE-LAYER PLATES FROM SYNTHETIC DIAMOND SINGLE-CRYSTALS DOPED WITH NITROGEN FOR HIGH-TEMPERATURE *n*-TYPE SCHOTTKY DIODES

S.G. Buga, A.S. Galkin, M.S. Kuznetsov, N.V. Kornilov,
N.V. Luparev, D.D. Prikhodko, S.A. Tarelkin, V.D. Blank

Sergey G. Buga (ORCID 0000-0001-7977-695X)*, Artem S. Galkin (ORCID 0000-0003-3411-2708), Mikhail S. Kuznetsov (ORCID 0000-0002-0485-7744), Nikolai V. Kornilov (ORCID 0000-0001-6449-4562), Nikolai V. Luparev (ORCID 0000-0002-2450-9771), Dmitrii D. Prikhodko (ORCID 0000-0002-6516-6592), Sergei A. Tarelkin (ORCID 0000-0002-7278-3046), Vladimir D. Blank (ORCID 0000-0002-6070-4080)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: buga@tisnum.ru *, sergei_buga@mail.ru

For the first time, a vertical Schottky diamond diode with an electronic type of conductivity was manufactured and investigated on the basis of a two-layer single-crystal plate of synthetic diamond doped with nitrogen, in which a thin working layer of low-nitrogen-doped diamond was grown by the chemical vapor deposition method homoepitaxially on a heavily nitrogen-doped substrate cut in the plane {100} from a single crystal grown by the method of high-pressure-high-temperature growth on the seed. The concentration of nitrogen in the form of single substitution atoms (C-centers) in the working layer, grown by the chemical vapor deposition method, was 0.5 ppm, the layer thickness was 10 μm , the thickness of the substrate with a nitrogen concentration of ~ 200 ppm was 400 μm . 6 Schottky contacts with a diameter of 0.6 mm were made by magnetron sputtering of a platinum layer with a thickness of 200 nm through a contact mask. A rectangular ohmic contact was made to the substrate also by magnetron sputtering through a contact mask of a 5 nm thick Ti layer, followed by high-temperature annealing in vacuum to form titanium carbide, and subsequent deposition of a Pt layer with a thickness of 200 nm to prevent oxidation of titanium carbide in air. The current-voltage characteristics of the manufactured diodes were studied at a bias range of (-200 V) – (+200) V at temperatures up to 650 °C. The opening voltage of the manufactured diode structure is ~ 30 V, the maximum current of each diode in the open state reaches 1 mA at $U = 200\text{V}$, while the reverse current at $T = 525\text{-}650$ °C does not exceed 0.1 μA . The highest rectification coefficient value was $\sim 10^4$.

Key words: synthetic diamond, nitrogen doping, n-type Schottky diode, electrical properties

ВВЕДЕНИЕ

Вертикальные алмазные диоды Шоттки обладают высокими эксплуатационными характеристиками [1, 2], а кроме того, потенциально должны иметь наиболее высокую термостойкость по сравнению со всеми другими полупроводниковыми материалами. Основной легирующей примесью в алмазе является бор, одиночные атомы замещения которого являются акцепторами электронов с энергией активации 0,37 эВ. Наиболее исследованной стабильной донорной примесью являются атомы фосфора, с энергией активации около 0,6 эВ [3, 4], но доступные концентрации фосфора в алмазе, получаемые методами роста из газовой фазы (CVD), существенно ниже возможных концентраций бора, что не позволяет изготавливать вертикальные диоды Шоттки с высокой плотностью тока в открытом состоянии. Кроме того, процесс роста высококачественных легированных фосфором алмазов

достаточно сложен и требует применения высокотоксичного газа фосфина как источника фосфора, что служит сдерживающим фактором развития промышленных технологий.

Альтернативным донорным допантом в алмазе является азот, который легко встраивается в решетку алмаза, но одиночные атомы замещения азота в алмазе отличаются значительно более высоким потенциалом ионизации – 1,7 эВ [5, 6]. Поэтому традиционно легирование азотом не рассматривается как эффективный способ создания алмазов с электронным типом проводимости. Тем не менее, недавние исследования возможности создания полупроводниковых структур с легированными азотом CVD-слоями алмаза [7, 8] показывают перспективность работ в этом направлении. В области температур ниже 50К наблюдается снижение реальной части электрического импеданса сильнолегированных азотом монокристаллов алмаза, что свидетельствует о наличии свободных

носителей заряда-электронов и при низких температурах [9].

В работе [10] нами впервые описаны вертикальные алмазные диоды Шоттки на основе двуслойной монокристаллической пластины синтетического алмаза, легированного азотом. В настоящей статье детально описана методика изготовления диодов такого типа и проанализированы их вольт-амперные характеристики при температурах до 650 °С.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходная алмазная пластина кристаллографической ориентации {100} размером 8,0×4,0×0,4 мм³ была вырезана из монокристалла, выращенного методом температурного градиента при высоком давлении и температуре (TG-HPHT-метод) при давлении 5,5 ГПа и температуре 1500 °С [11] в системе С-Fe-Ni-Co без геттера азота для обеспечения легирования азотом, адсорбированным в ростовой шихте из окружающей воздушной среды, аналогично [12] (рис. 1а). ИК спектр поглощения в области двухфононного поглощения (1400-2700 см⁻¹) и азотных примесных центров (1000-1350 см⁻¹) был

получен на Фурье-ИК-спектрометре VERTEX 80v/Hyperion 2000 Bruker (рис. 1б). Форма спектра в диапазоне волновых чисел 1000-1350 см⁻¹ свидетельствует о том что это линии поглощения азота в виде одиночных атомов замещения (С-центры) [13, 14], а сравнение амплитуды основной линии 1135 см⁻¹ с амплитудой линий двухфононного поглощения позволило определить концентрацию С-центров 200±10 ppm по формуле (1) из [13]:

$$N_C [\text{ppm}] = 25\alpha_{1135} [\text{cm}^{-1}]. \quad (1)$$

На фото рис. 1а видны более светлые участки диагональных полос – ростовые секторы {100}, концентрация С-центров в которых в 5-10 раз ниже, чем в остальных более желтых областях - ростовых секторах {111}. Такая неравномерность легирования связана с особенностью захвата примесных атомов в процессе роста кристалла на затравке методом TG-HPHT. Пластина была механически отполирована, и затем на ней был выращен монокристаллический алмазный слой методом гомоэпитаксиального роста из газовой фазы (MPCVD-процесс) толщиной 50 мкм с низким содержанием азота в смеси метана и водорода. Детально методика и условия CVD-роста описаны в работе [15].

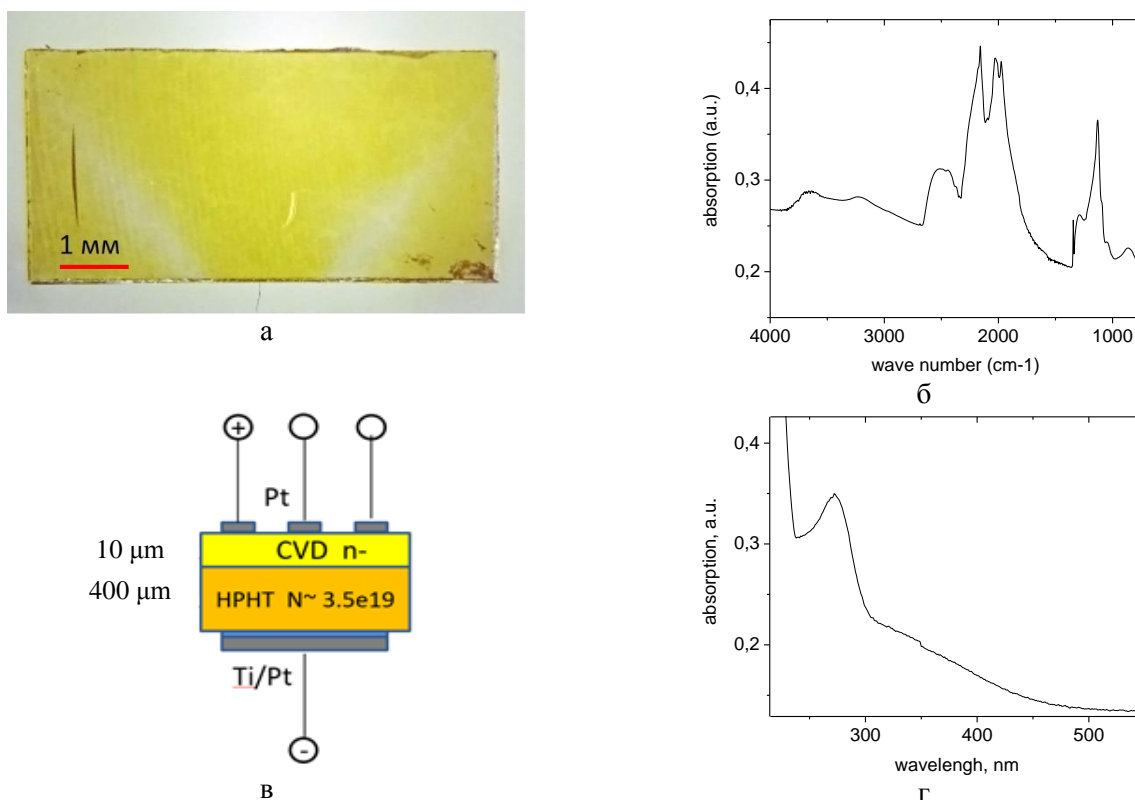


Рис. 1. (а) Исходная пластина среза {100} синтетического монокристалла алмаза, легированного азотом, выращенного методом TG-HPHT; (б) ИК спектр пластины в области собственного двухфононного поглощения и поглощения С-центрами азота; (в) схема двуслойной алмазной пластины с металлическими контактами; (г) спектр поглощения CVD-слоя в УФ- и видимом диапазоне

Fig 1. (a) The initial {100} cut plate of a synthetic single crystal of nitrogen-doped diamond grown by the TG-HPHT method; (б) the IR spectrum in the range of diamond's two-phonon absorption and absorption by nitrogen C-centers; (в) sketch of a two-layer diamond plate with metal contacts; (г) absorption spectrum of the CVD layer in the UV and visible range

После CVD-роста полученная двуслойная пластина была обрезана по краям до размеров $6,0 \times 4,0$ мм² методом лазерной резки [16], и торцевые поверхности были отполированы механически. Концентрация азота в выращенном CVD-слое была определена $\sim 0,5$ ppm по данным поглощения в УФ-диапазоне (максимум на длине волны 270 нм), рис. 1г, по методике [17]:

$$N_N[\text{ppm}] = 0,56 \cdot A_{270}[\text{см}^{-1}]. \quad (2)$$

Спектр был исследован на спектрометре Cary 4000 в геометрии просвета с торца CVD-слоя. Для расчета концентрации определялась высота пика (A_{270}) в районе 270 нм относительно базовой линии. За базовую линию берется спектр поглощения нелегированного алмаза типа IIa.

После исследования УФ-спектра толщина CVD-слоя была уменьшена до 10 мкм путем механической шлифовки и полировки. Таким образом, была изготовлена двуслойная легированная азотом алмазная структура типа n+/n- для последующего изготовления диода Шоттки n-типа.

На рис. 1в показана схема изготовленной двуслойной легированной азотом монокристаллической алмазной пластины с металлическими контактами для реализации вертикального диода Шоттки n-типа. Металлические контакты были изготовлены методом магнетронного напыления через контактные маски – омический Ti/Pt к подложке, и Pt контакт Шоттки к CVD слою. Слой титана толщиной 5 нм формирует карбид титана при вакуумном отжиге при $T = 700$ °С, что обеспечивает омический электрический контакт, а слой платины толщиной 200 нм предотвращает окисление поверхностного слоя титана в воздушной среде, а также служит контактной площадкой для последующей приварки золотых подводящих микропроводов толщиной 40 мкм методом компрессионной ультразвуковой пайки. Толщина слоя Pt для выпрямляющего контакта к CVD слою также составляла 200 нм. Был изготовлен сплошной омический контакт на поверхности сильнолегированного азотом HPHT слоя алмаза, и 6 круглых контактов Шоттки диаметром 0,6 мм на поверхности слаболегированного CVD слоя, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Таким образом была изготовлена структура вертикального диода Шоттки, в котором рабочим слоем является тонкий слаболегированный азотом CVD слой алмаза, а более толстый HPHT слой, помимо функции подложки для гомоэпитаксиального роста CVD слоя алмаза, обеспечивает хороший омический контакт, подобно тому, как делалось при изготовлении алмазных диодов Шоттки p-типа [1, 2]. Ранее нами были

измерены удельное сопротивление и концентрация свободных электронов в таких кристаллах алмаза, выращенных методом HPHT [18]. Удельное сопротивление в диапазоне 500-650 °С уменьшалось от 10^5 до $4 \cdot 10^3$ Ом см.

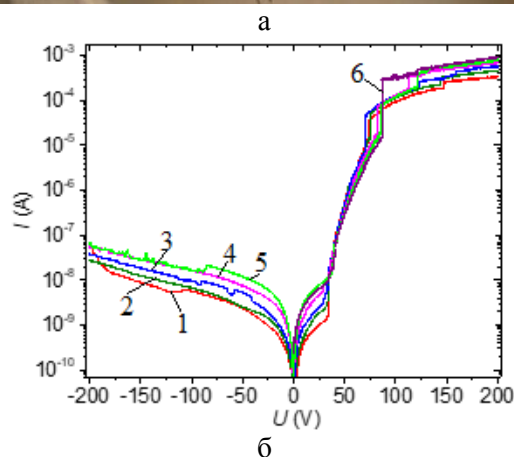
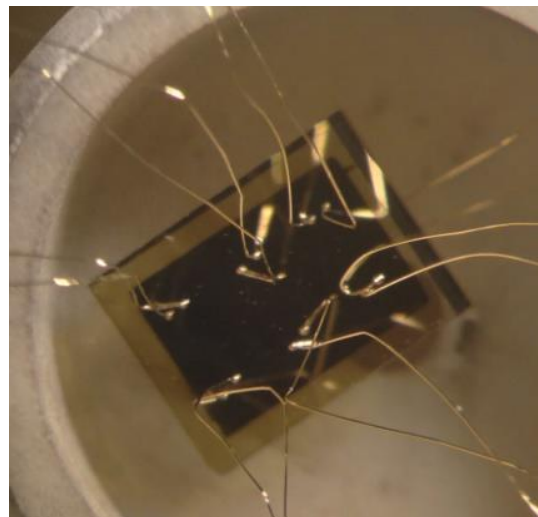


Рис. 2. (а) Двуслойная монокристаллическая пластина алмаза, легированного азотом, со сплошным нижним омическим контактом и 6 верхними контактами Шоттки с золотыми микропроводами в нагревательной ячейке; (б) вольт-амперные характеристики одного из диодов при температурах: 1- 525 °С; 2- 550 °С; 3- 575 °С; 4- 600 °С; 5- 625 °С; 6 – 650 °С

Fig. 2. (a) A two-layer single-crystal plate of nitrogen-doped diamond with a rectangular lower ohmic contact and 6 upper Schottky contacts with gold microwires in a heater; (b) volt-ampere characteristics of one of the diodes at temperatures of: 1- 525 °C; 2 – 550 °C; 3 – 575 °C; 4 – 600 °C; 5 – 625 °C; 6 – 650 °C

На рис. 2а приведена фотография изготовленной диодной пластины с золотыми электрическими подводящими микропроводами в нагревательном элементе системы Linkam-TS1000. Измерения ВАХ производились прибором Kethley 4200S в диапазоне напряжений от -200 В до +200 В.

Все изготовленные диоды обладают близкими вольт-амперными характеристиками (ВАХ).

На рис. 2б приведены типичные ВАХ одного из диодов.

Как видно из рис. 2б, напряжение открытия U_{on} диода составляет ~ 30 В, максимальный ток в открытом состоянии при $U = 200$ В достигает 1 мА, при этом обратный ток при $T = 525-650$ °С не превышает 0,1 мкА. При напряжении 65-85 В в прямом направлении наблюдалось скачкообразное увеличение тока примерно на один порядок величины с последующим выходом на достаточно линейный рост с увеличением приложенного напряжения в диапазоне 150-200 В с фиксированным значением сопротивления, величина которого понижается примерно в 5 раз с увеличением температуры от 500 до 650 °С.

Наибольшее значение коэффициента выпрямления составляет порядка 10^4 . Минимальное значение сопротивления в открытом состоянии R_{on} ~ 200 кОм, но эта величина может быть понижена до ~ 1 Ом, если уменьшить толщину подложки «lift-off» методом до 1 мкм, как это было реализовано нами в [1, 2], и при этом контакты нанести на всю площадь пластины (с небольшим отступом от краев для минимизации обратного тока утечки). Мы предполагаем, что высокое напряжение открытия обусловлено избыточной толщиной низколегированного CVD-слоя алмаза, превышающего толщину рабочего слоя обеднения барьера Шоттки. Это же балластное сопротивление дополнительно увеличивает сопротивление диода в открытом состоянии. В дальнейшем предполагается исследовать влияние толщины CVD-слоя на напряжение открытия диода и сопротивление в открытом состоянии.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе нами описана вертикальная алмазная структура диода Шоттки n -типа на основе двуслойной монокристаллической пластины синтетического алмаза, легированного азотом, в которой тонкий рабочий слой слаболегированного азотом алмаза был выращен методом CVD гомоэпитаксиально на сильнолегированной азотом подложке толщиной 400 мкм, вырезанной в плоскости (100) из монокристалла, выращенного TG-HPHT-методом. Обнаружена резко нелинейная ВАХ диодного типа. Слаболегированный азотом CVD-слой является рабочим слоем диода с барье-

ром Шоттки в контакте с платиной. Сильнолегированная подложка обеспечивает возможность изготовления омического контакта, но при этом увеличивает сопротивление диода в открытом состоянии. Для уменьшения балластного электрического сопротивления подложки ее толщина должна быть уменьшена до минимума, например, методом «lift-off», как это делалось нами ранее при изготовлении алмазных диодов Шоттки p -типа на основе двуслойных алмазных пластин, легированных бором [1, 2]. Кроме того, для уменьшения напряжения открытия и уменьшения сопротивления диода в открытом состоянии, целесообразно изготовить диоды с меньшей толщиной CVD-слоя и исследовать влияние толщины этого слоя на вольт-амперные характеристики, а также исследовать ВАХ диодов с другими металлами контакта Шоттки, как например, алюминием [19] или никелем.

Ранее в качестве полупроводниковых материалов для высокотемпературной электроники рассматривались, главным образом, карбид кремния и нитрид галлия с предельным значением температуры по физическим ограничениям 900 °С и 1300 °С, соответственно [20]. Реально в настоящее время развитие получили исследования и разработки элементов высокотемпературной электроники на основе SiC(4H) в области температур до 500 °С [21, 22].

Исследованные в диапазоне температур 525-650 °С вольт-амперные характеристики указывают на возможность работы алмазных диодов Шоттки n -типа на основе легированных азотом синтетических монокристаллов алмаза в условиях высоких температур.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00817, <https://rscf.ru/project/22-22-00817>.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-22-00817, <https://rscf.ru/project/22-22-00817>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bormashov V.S., Terentiev S.A., Buga S.G., Tarelkin S.A., Volkov A.P., Teteruk D.V., Kornilov N.V., Kuznetsov M.S., Blank V.D.** Thin large area vertical Schottky barrier diamond diodes with low on-resistance made by ion-beam assisted lift-off technique. *Diamond Rel. Mat.* 2017. V. 75. P. 78-84. DOI: 10.1016/j.diamond.2017.02.006.
2. **Bormashov V., Troschiev S., Volkov A., Tarelkin S., Korostylev E., Golovanov A., Kuznetsov M., Teteruk D., Kornilov N., Terentiev S., Buga S., Blank V.** Development of nuclear microbattery prototype based on Schottky barrier diamond diodes. *Phys. Stat. Sol. A.* 2015. V. 212. N 11. P. 2539-2547. DOI: 10.1002/pssa.201532214.
3. **Koizumi S., Umezawa H., Pernot J., Suzuki M.** Power Electronics Device Applications of Diamond Semiconductors. A volume in Woodhead Publ. Ser. in Electronic and Optical Materials. Elsevier: Woodhead Publ. 2018. 433 p.
4. **Stenger I., Pinault-Thaury M.-A., Temahuki N., Gillet R., Temgoua S., Bensalah H., Chikoidze E., Dumont Y., Barjon J.** Electron mobility in (100) homoepitaxial layers of phosphorus-doped diamond. *J. Appl. Phys.* 2021. V. 129. P. 105701. DOI: 10.1063/5.0044326.
5. **Farrer R.G.** On the substitutional nitrogen donor in diamond. *Solid State Commun.* 1969. V. 7. P. 685-687. DOI: 10.1016/0038-1098(69)90593-6.
6. **Heremans F.J., Fuchs G.D., Wang C.F., Hanson R., Awschalom D.D.** Generation and transport of photoexcited electrons in single-crystal diamond. *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 152102-1 – 152102-3. DOI: 10.1063/1.3120225.
7. **Matsumoto T., Mukose T., Makino T.** Diamond Schottky-pndiode using lightly nitrogen-doped layer. *Diamond Related Mater.* 2017. V. 75 P. 152 – 157. DOI: 10.1016/j.diamond.2017.03.018.
8. **Matsumoto T., Yamakawa T., Kato H.** Fabrication of inversion p-channel MOSFET with a nitrogen-doped diamond body. *Appl. Phys. Lett.* 2021. V. 119. P. 242105-1 - 242105-4. DOI: 10.1063/5.0075964.
9. **Буга С.Г., Квашнин Г.М., Кузнецов М.С., Лупарев Н.В., Трофимов С.Д., Галкин А.С.** Спектры электрического импеданса сильнолегированных азотом синтетических монокристаллов алмаза в диапазоне температур 10-400 К. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 28-36. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.1y.
10. **Буга С.Г., Корнилов Н.В., Кузнецов М.С., Лупарев Н.В., Приходько Д.Д., Тарелкин С.А., Бланк В.Д.** Высокотемпературные диоды Шоттки на основе монокристаллов алмаза, легированных азотом. 14 Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» CFPMS 2022. М.: Троицк. 7–9 июля 2022 г. С. 43.
11. **Blank V.D., Kuznetsov M.S., Nosukhin S.A., Terentiev S.A., Denisov V.N.** The influence of crystallization temperature and boron concentration in growth environment on its distribution in growth sectors of type IIb diamond. *Diamond Rel. Mater.* 2007. V. 16. P. 800 – 804. DOI: 10.1016/j.diamond.2006.12.010.
12. **Palyanov Y.N., Kupriyanov I.N., Khokhryakov A.F., Ralchenko V.G.** Chapter 17, Crystal Growth of Diamond. In: Handbook of Crystal Growth. Elsevier B.V. 2015. DOI: 10.1016/B978-0-444-63303-3.00017-1.
13. **Zaitsev A.M.** Optical properties of diamond: a data handbook, Berlin, New York: Springer. 2001. DOI: 10.1007/978-3-662-04548-0.

REFERENCES

1. **Bormashov V.S., Terentiev S.A., Buga S.G., Tarelkin S.A., Volkov A.P., Teteruk D.V., Kornilov N.V., Kuznetsov M.S., Blank V.D.** Thin large area vertical Schottky barrier diamond diodes with low on-resistance made by ion-beam assisted lift-off technique. *Diamond Rel. Mat.* 2017. V. 75. P. 78-84. DOI: 10.1016/j.diamond.2017.02.006.
2. **Bormashov V., Troschiev S., Volkov A., Tarelkin S., Korostylev E., Golovanov A., Kuznetsov M., Teteruk D., Kornilov N., Terentiev S., Buga S., Blank V.** Development of nuclear microbattery prototype based on Schottky barrier diamond diodes. *Phys. Stat. Sol. A.* 2015. V. 212. N 11. P. 2539-2547. DOI: 10.1002/pssa.201532214.
3. **Koizumi S., Umezawa H., Pernot J., Suzuki M.** Power Electronics Device Applications of Diamond Semiconductors. A volume in Woodhead Publ. Ser. in Electronic and Optical Materials. Elsevier: Woodhead Publ. 2018. 433 p.
4. **Stenger I., Pinault-Thaury M.-A., Temahuki N., Gillet R., Temgoua S., Bensalah H., Chikoidze E., Dumont Y., Barjon J.** Electron mobility in (100) homoepitaxial layers of phosphorus-doped diamond. *J. Appl. Phys.* 2021. V. 129. P. 105701. DOI: 10.1063/5.0044326.
5. **Farrer R.G.** On the substitutional nitrogen donor in diamond. *Solid State Commun.* 1969. V. 7. P. 685-687. DOI: 10.1016/0038-1098(69)90593-6.
6. **Heremans F.J., Fuchs G.D., Wang C.F., Hanson R., Awschalom D.D.** Generation and transport of photoexcited electrons in single-crystal diamond. *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 152102-1 – 152102-3. DOI: 10.1063/1.3120225.
7. **Matsumoto T., Mukose T., Makino T.** Diamond Schottky-pndiode using lightly nitrogen-doped layer. *Diamond Related Mater.* 2017. V. 75 P. 152 – 157. DOI: 10.1016/j.diamond.2017.03.018.
8. **Matsumoto T., Yamakawa T., Kato H.** Fabrication of inversion p-channel MOSFET with a nitrogen-doped diamond body. *Appl. Phys. Lett.* 2021. V. 119. P. 242105-1 - 242105-4. DOI: 10.1063/5.0075964.
9. **Buga S.G., Kvashnin G.M., Kuznetsov M.S., Luparev N.V., Trofimov S.D., Galkin A.S.** Electrical impedance spectra of heavily nitrogen-doped synthetic diamond single crystals in the temperature range 10-400 K. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2020. V. 63. N 12. P. 28-36 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.1y.
10. **Buga S.G., Kornilov N.V., Kuznetsov M.S., Luparev N.V., Prikhodko D.D., Tarelkin S.A., Blank V.D.** High-temperature Schottky diodes based on nitrogen-doped diamond single crystals. 14th International Conference "Carbon: fundamental problems of science, materials science, technology" CFPMS 2022. M.: Troitsk. July 7–9. 2022. P. 43 (in Russian).
11. **Blank V.D., Kuznetsov M.S., Nosukhin S.A., Terentiev S.A., Denisov V.N.** The influence of crystallization temperature and boron concentration in growth environment on its distribution in growth sectors of type IIb diamond. *Diamond Rel. Mater.* 2007. V. 16. P. 800 – 804. DOI: 10.1016/j.diamond.2006.12.010.
12. **Palyanov Y.N., Kupriyanov I.N., Khokhryakov A.F., Ralchenko V.G.** Chapter 17, Crystal Growth of Diamond. In: Handbook of Crystal Growth. Elsevier B.V. 2015. DOI: 10.1016/B978-0-444-63303-3.00017-1.
13. **Zaitsev A.M.** Optical properties of diamond: a data handbook, Berlin, New York: Springer. 2001. DOI: 10.1007/978-3-662-04548-0.

14. Ashfold M.N.R., Goss J.P., Green B.L., May P.W., Newton M.E., Peaker C.V. Nitrogen in diamond. *Chem. Rev.* 2020. V. 120. N 12. P. 5745-5794. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00518.
15. Polyakov S.N., Denisov V.N., Lomov A.A., Shulpina I.L., Martyushov S.Yu., Kornilov N.V., Blank V.D. Large-size X-ray optics quality CVD diamond. *Physica Status Solidi - Rapid Res. Lett.* 2022. N 2200164. DOI: 10.1002/pssr.202200164.
16. Setzer A., Esquinazi P.D., Buga S., Georgieva M.T., Reinert T., Venus T., Estrela-Lopis I., Ivashenko A., Bondarenko M., Böhlmann W., Meijer J. Nanometers-thick ferromagnetic surface produced by laser cutting of diamond. *Materials.* 2022. V. 15. P. 1014-1021. DOI: 10.3390/ma15031014.
17. Chrenko R.M., Strong H.M., Tuft R.E. Dispersed paramagnetic nitrogen content of large laboratory diamonds. *Philosoph. Mag.* 1971. V. 23. N 182. P. 313-318. DOI: 10.1080/14786437108216387.
18. Буга С.Г., Кузнецов М.С., Лупарев Н.В., Приходько Д.Д., Тарелкин С.А., Терентьев С.А., Бланк В.Д. Исследование электрических свойств синтетических монокристаллов алмаза, легированных азотом в виде С-центров, в области температур 450-973К. Тез. докл. XIII Междунар. конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». М.: Трипик. 2021. С. 47-48.
19. Tarelkin S., Bormashov V., Korostylev E., Troschiev S., Golovanov A., Volkov A., Prikhodko D., Buga S., Teteruk D., Kornilov N., Kuznetsov M. Comparative study of different metals for Schottky barrier diamond betavoltaic power converter by EBIC technique. *Physica Status Solidi. A.* 2016. V. 213. N 9. P. 2492-2497. DOI: 10.1002/pssa.201533060.
20. Гуртов В.А. Твердотельная электроника. М.: Техносфера. 2008. 510 с.
21. Neudeck P.G., Spry D.J., Krasowski M.J., Prokop N.F., Beheim G.M., Chen L., Chang C.W. Yearlong 500 °C operational demonstration of up-scaled 4H-SiC JFET Integrated Circuits. In: Proc. 2018 IMAPs Int. High Temperature Electronics Conf. Albuquerque, NM, USA. 2018. P. 71-78. DOI: 10.4071/2380-4491-2018-HiTEN-000071.
22. Spry D.J., Neudeck P.G., Chang C.W. Experimental study on mitigation of lifetime-limiting dielectric cracking in extreme temperature 4H-SiC JFET Integrated Circuits”, Materials Science Forum. 2020. V. 1002. P. 1148-1155. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.1148.
14. Ashfold M.N.R., Goss J.P., Green B.L., May P.W., Newton M.E., Peaker C.V. Nitrogen in diamond. *Chem. Rev.* 2020. V. 120. N 12. P. 5745-5794. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00518.
15. Polyakov S.N., Denisov V.N., Lomov A.A., Shulpina I.L., Martyushov S.Yu., Kornilov N.V., Blank V.D. Large-size X-ray optics quality CVD diamond. *Physica Status Solidi - Rapid Res. Lett.* 2022. N 2200164. DOI: 10.1002/pssr.202200164.
16. Setzer A., Esquinazi P.D., Buga S., Georgieva M.T., Reinert T., Venus T., Estrela-Lopis I., Ivashenko A., Bondarenko M., Böhlmann W., Meijer J. Nanometers-thick ferromagnetic surface produced by laser cutting of diamond. *Materials.* 2022. V. 15. P. 1014-1021. DOI: 10.3390/ma15031014.
17. Chrenko R.M., Strong H.M., Tuft R.E. Dispersed paramagnetic nitrogen content of large laboratory diamonds. *Philosoph. Mag.* 1971. V. 23. N 182. P. 313-318. DOI: 10.1080/14786437108216387.
18. Buga S.G., Kuznetsov M.S., Luparev N.V., Prikhodko D.D., Tarelkin S.A., Terentiev S.A., Blank V.D. Investigation of the electrical properties of synthetic diamond single crystals doped with nitrogen in the form of C-centers in the temperature range 450-973K. Tez. report XIII Intern. Conf. "Carbon: fundamental problems of science, materials science, technology". Moscow: Troitsk. 2021. P. 47-48 (in Russian).
19. Tarelkin S., Bormashov V., Korostylev E., Troschiev S., Golovanov A., Volkov A., Prikhodko D., Buga S., Teteruk D., Kornilov N., Kuznetsov M. Comparative study of different metals for Schottky barrier diamond betavoltaic power converter by EBIC technique. *Physica Status Solidi. A.* 2016. V. 213. N 9. P. 2492-2497. DOI: 10.1002/pssa.201533060.
20. Gurtov V.A. Solid state electronics. M.: Technosfera. 2008. 510 p. (in Russian).
21. Neudeck P.G., Spry D.J., Krasowski M.J., Prokop N.F., Beheim G.M., Chen L., Chang C.W. Yearlong 500 °C operational demonstration of up-scaled 4H-SiC JFET Integrated Circuits. In: Proc. 2018 IMAPs Int. High Temperature Electronics Conf. Albuquerque, NM, USA. 2018. P. 71-78. DOI: 10.4071/2380-4491-2018-HiTEN-000071.
22. Spry D.J., Neudeck P.G., Chang C.W. Experimental study on mitigation of lifetime-limiting dielectric cracking in extreme temperature 4H-SiC JFET Integrated Circuits”, Materials Science Forum. 2020. V. 1002. P. 1148-1155. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.1148.

Поступила в редакцию 30.06.2022
Принята к опубликованию 23.08.2022

Received 30.06.2022
Accepted 23.08.2022