

**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО
ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ АЛМАЗНЫХ СЛОЕВ НА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ
АЛМАЗНУЮ ПОДЛОЖКУ, ЛЕГИРОВАННУЮ АЗОТОМ**

С.А. Тарелкин, Н.В. Корнилов, М.С. Кузнецов, Н.В. Лупарев, С.Ю. Мартюшов, В.О. Тимошенко

Сергей Александрович Тарелкин (ORCID 0000-0002-7278-3046)*, Николай Владимирович Корнилов (ORCID 0000-0001-6449-4562), Николай Викторович Лупарев (ORCID 0000-0002-2450-9771), Степан Юрьевич Мартюшов (ORCID 0000-0002-0496-2982), Михаил Сергеевич Кузнецов (ORCID 0000-0002-0485-7744)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов – НИЦ «Курчатовский институт», ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: sergey.tarelkin@gmail.com, nvkor@bk.ru, luparev@gmail.com, mart@tisnum.ru, mikuz@yandex.ru

Вера Олеговна Тимошенко (ORCID 0009-0006-6137-864X)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов – НИЦ «Курчатовский институт», ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Московский физико-технический институт (НИУ), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация, 141701

E-mail: timoshenko.vo@phystech.edu

В данной работе исследованы особенности формирования и свойств алмазных структур, предназначенных для преобразования энергии бета-распада радиоактивного изотопа ^{63}Ni в электрическую энергию. Были выращены алмазные подложки с различной концентрацией азота (300 ppm и 60 ppm) методом температурного градиента при высоких давлениях (TG-HPHT). Анализ показал, что высокое содержание азота приводит к значительному увеличению количества структурных дефектов в подложках. На подготовленных алмазных подложках методом химического осаждения из газовой фазы синтезированы гомоэпитаксиальные слои с низким содержанием примесных центров и изготовлены диоды Шоттки n-типа. Подробно исследованы электрические свойства диодов при воздействии бета-излучения при температурах выше комнатной. Показано, что гомоэпитаксиальные слои на подложках с высокой концентрацией азота наследуют структурные дефекты, которые приводят к высоким токам утечки в диодах и делают такие диоды непригодными для создания эффективных преобразователей энергии. В то же время диоды, изготовленные на подложках с концентрацией азота 60 ppm, обеспечивают низкий ток утечки и эффективное преобразование энергии при температурах до 500 °С. Максимальная электрическая мощность составила 170 мВт при КПД около 1%. Результаты демонстрируют важность оптимизации уровня легирования азотом и кристаллического качества подложек для создания эффективных и долговечных радиоизотопных преобразователей энергии с использованием алмазных PiN структур.

Ключевые слова: SPN-диод, легированный алмаз, вертикальный диод, диод Шоттки

**FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF HOMOEPITAXIAL CHEMICAL DEPOSITION
OF THIN DIAMOND LAYERS
ON A NITROGEN-DOPED SINGLE-CRYSTAL DIAMOND SUBSTRATE**

S.A. Tarelkin, N.V. Kornilov, M.S. Kuznetsov, N.V. Luparev, S.Yu. Martyushov, V.O. Timoshenko

Sergey A. Tarelkin (ORCID 0000-0002-7278-3046)*, Nikolay V. Kornilov (ORCID 0000-0001-6449-4562), Mikhail S. Kuznetsov (ORCID 0000-0002-0485-7744), Nikolay V. Luparev (ORCID 0000-0002-2450-9771), Stepan Yu. Martyushov (ORCID 0000-0002-0496-2982)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials – NRC “Kurchatov Institute,” Centralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: sergey.tarelkin@gmail.com, nvkor@bk.ru, luparev@gmail.com, mart@tisnum.ru, mikuz@yandex.ru

Vera O. Timoshenko (ORCID 0009-0006-6137-864X)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials – NRC “Kurchatov Institute,” Centralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Reg., 141701, Russia

E-mail: timoshenko.vo@phystech.edu

In this paper, we study the formation and properties of diamond structures designed to convert the beta decay energy of the radioactive isotope ^{63}Ni into electrical energy. Diamond substrates with different nitrogen concentrations (300 ppm and 60 ppm) were grown using the temperature gradient high-pressure thermonuclear technique (TG-HPHT). Analysis showed that a high nitrogen content leads to a significant increase in the number of structural defects in the substrates. Homoepitaxial layers with a low impurity content were synthesized using chemical vapor deposition on the diamond substrates. Then n-type Schottky diodes were manufactured by metal contacts deposition. The electrical properties of the diodes were studied when exposed to beta radiation. It was shown that substrates with a high nitrogen concentration inherit structural defects, which lead to high leakage currents and make such substrates unsuitable for creating efficient energy converters. At the same time, substrates with a nitrogen concentration of 60 ppm provide low leakage current and efficient energy conversion at temperatures up to 500 °C. The maximum electrical power was 170 pW with an efficiency of about 1%. The results demonstrate the importance of optimizing the nitrogen doping level and the crystalline quality of the substrates for creating efficient and durable radioisotope energy converters.

Keywords: doped diamond, CVD diamond, Schottky diode, betavoltaic

Для цитирования:

Тарелкин С.А., Корнилов Н.В., Кузнецов М.С., Лупарев Н.В., Мартюшов С.Ю., Тимошенко В.О. Особенности технологии гомоэпитаксиального химического осаждения тонких алмазных слоев на монокристаллическую алмазную подложку, легированную азотом. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 9. С. 60–65. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.11y.

For citation:

Tarelkin S.A., Kornilov N.V., Kuznetsov M.S., Luparev N.V., Martyushov S.Yu., Timoshenko V.O. Features of the technology of homoepitaxial chemical deposition of thin diamond layers on a nitrogen-doped single-crystal diamond substrate. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 9. P. 60–65. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.11y.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях растущей потребности в компактных и высокоэффективных источниках энергии особое внимание уделяется разработке технологий, позволяющих преобразовывать энергию распада радиоактивных изотопов в электрическую энергию [1-3]. Отдельно выделяют источники на основе преобразования энергии бета изотопов, т.к. бета радиация является наиболее безопасной для человека и при этом меньше разрушает структуру полупроводникового преобразователя прямого действия [4, 5]. Одним из перспективных материалов для таких преобразователей является алмаз. Благодаря своим уникальным физическим свойствам – высокой теплопроводности, радиационной стойкости и устойчивости к химическим воздействиям – алмазные структуры могут выступать в роли иде-

ального материала для создания энергоэффективных и долговечных устройств на основе изотопных источников [6].

Большое количество исследований посвящено использованию униполярных алмазных устройств для силовой электроники (диоды Шоттки и транзисторы) [7-9], и показано, что диодные структуры хорошо подходят для прямого преобразования энергии бета-распада изотопов (алмазная батарейка) [10, 11]. Благодаря большой ширине запрещенной зоны и хорошей чистоте материала достигается низкий ток утечки и высокая (близкая к 100%) эффективность сбора зарядов (вторичных электрон-дырочных пар). Однако общий КПД преобразования оказывается небольшим (до 10%) из-за низкой высоты барьера Шоттки на интерфейсе алмаз-металл [12]. Переход к PIN структурам позволил бы увеличить высоту барьера до 4 В, что поз-

воляет говорить о КПД преобразования вплоть до 29% [13]. Алмазные PIN структуры в настоящий момент обычно создают с использованием роста алмаза из газовой фазы с добавлением фосфора для создания материала n-типа [14]. Хорошие результаты по легированию фосфором достигаются только с использованием монокристаллических подложек с ориентацией (111) или (113) [15]. Такие подложки сложнее обрабатывать, и их латеральный размер меньше, чем у пластин (001) из-за геометрических особенностей роста алмазных монокристаллов. Однако для создания донорной проводимости также возможно использование алмазных слоев или подложек, легированных азотом [16, 17].

Для изготовления многослойных PIN структур на основе подложек с азотом следует отработать технологию гомоэпитаксиального синтеза на таких подложках [18]. Данное исследование было направлено на определение влияния кристаллического качества и уровня легирования азотом алмазной Ib подложки на качество алмазного гомоэпитаксиального слоя, который вырастает на такой подложке. Кроме того, были проведены исследования режимов преобразования бета излучения от изотопа ^{63}Ni на модельных двуслойных пластинах со структурой диода Шоттки n-типа.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Алмазные подложки и их структура

Подложка n^+ представляет собой легированный азотом алмаз, выращенный методом температурного градиента при высоких температуре и давлении (TG-HPHT) с использованием аппарата высокого давления «тороид» в системе Fe-Co-C-N [19]. Контроль уровня легирования азотом осуществляли путем добавления геттера атмосферного азота (Al) в ростовую среду Fe-Co-C. Были выращены два типа HPHT алмазных монокристаллов #1 и #2 с разным содержанием азота: 300 ppm ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$) и 60 ppm ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Из алмазных монокристаллов с помощью установки лазерного раскроя были вырезаны прямоугольные пластины-подложки с линейными размерами $3,5 \times 3,5 \text{ мм}^2$ и толщиной 250 мкм и кристаллографической ориентацией (001). Пластины затем были отполированы и очищены от поверхностных загрязнений путем травления в кипящей смеси соляной и азотной кислот (3:1 по объему) в течение 2 ч с последующей промывкой в деионизированной воде и отжигом в атмосфере при $T = 680 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 мин.

Уровень легирования пластин был определен с помощью численного анализа спектров по-

глощения в ИК диапазоне [20] полученных с помощью ИК-фурье спектрометра Thermo Nicolet Nexus FTIR.

Для анализа исходного кристаллического качества пластин-подложек были проведены исследования их структурных особенностей. Карты фотолюминесценции при возбуждении УФ излучением были получены с помощью прибора DiamondViewTM. Картины рентгеновской топографии были получены методом рентгеновской дифракционной топографии Ланга при помощи рентгеновской топографической камеры Rigaku XRT-100 с использованием $\text{AgK}\alpha_1$ излучения в отражении (220).

Рост гомоэпитаксиальных слоев

На подложках с разным легированием в одном процессе были выращены гомоэпитаксиальные слои расчетной толщиной 30 мкм [21]. Для роста мы использовали установку Plassys BJS 150 CVD. На протяжении всего CVD роста параметры процесса были следующими: температура подложки – $850 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$, мощность СВЧ-излучения – 2,7 кВт, газовая смесь – H_2/CH_4 в соотношении 24/1 при давлении газа $180 \pm 5 \text{ мбар}$. Скорость роста i-слоя составила $\sim 1,3 \text{ мкм/ч}$. Использовался очиститель водорода, который обеспечивает концентрацию примесей не более 1 ppb. Чистота метана составляла 99,9999%. С учетом указанного соотношения водорода и метана, общая концентрация примесей в газовой смеси не превышает 5 ppb по отношению к углероду.

Изготовление электрических контактов

На нижнюю сторону подложки напылялся омический контакт Ti/Pt с отжигом $700 \text{ }^\circ\text{C}$ для формирования переходного слоя TiC. Такой подход широко применяется для изготовления омических контактов к алмазным слоям, легированным бором. Наши исследования показывают, что для средне- и сильнолегированных азотом слоев Ti/Pt контакты также позволяют получать омических контакт хорошего качества [17].

Перед напылением контакта Шоттки образцы отжигались в атмосфере при температуре $650 \text{ }^\circ\text{C}$, а затем их поверхность обрабатывалась в плазме SF_6 в течение 20 мин. Данный шаг необходим для терминации поверхности фтором, что обеспечит максимальную однородность высоты барьера Шоттки. Контакт Шоттки площадью 9 мм^2 был сформирован путем магнетронного осаждения Pt. Толщина платинового контакта была не более 20 нм, чтобы не вносить существенного поглощения энергии бета электронов от низкоэнергетич-

ного бета источника ^{63}Ni [11]. На рис. 1 представлена схема изготовленных диодов Шоттки.

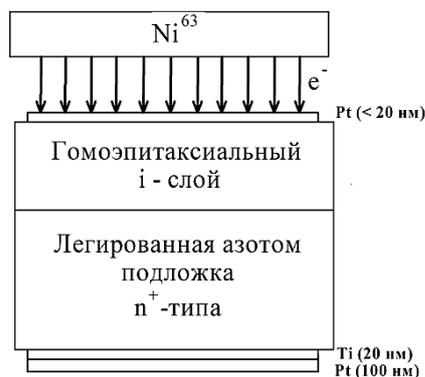


Рис. 1. Схема алмазного Шоттки диода n-типа с изотопом ^{63}Ni в качестве источника бета-электронов

Fig. 1. Scheme of the diamond n-type Schottky diode with ^{63}Ni as beta-electrons source

Исследование электрических свойств

Исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) диодов было проведено с использованием четырехзондовой схемы на установке Keithley 4200A-CSC. Нагрев диода до температур $600\text{ }^\circ\text{C}$ при исследовании ВАХ диодов производился в атмосфере аргона в герметичном нагревательном столе Linkam TS1200.

Для электрофизических свойств в режиме преобразования бета-электронов на контакт Шоттки размещали бета-источник закрытого типа в виде тонкой металлической пластины ($4\times 4\times 0,1\text{ мм}^3$) на основе ^{63}Ni (20% обогащения) производства РитверцTM.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе эксперимента были проведены исследования кристаллического качества пластин-подложек. Картины УФ фотолюминесценции и рентгенотопографии приведены на рис. 2. Из представленных карт хорошо видно, что в пластине-подложке #1 содержится большое количество протяженных структурных дефектов, которые затем могут быть унаследованы при гомоэпитаксиальном росте алмазного слоя на данной подложке.

После гомоэпитаксиального роста поверхность выращенных пленок имеет естественную картину, отражающую распределение ростовых дефектов. Сравнительные фотографии дефектов на поверхности выращенных пленок с разным увеличением приведены на рис. 3. Данные дефекты формируются в результате конкуренции процессов осаждения и травления во время роста. В области протяженных дефектов монокристалла травление происходит более интенсивно, что приводит к образованию «ямки травления». По количеству ямок

травления на выделенной площади кадра возможно оценить в общем случае плотность дислокаций в синтезированном материале [22]. Для исследованных образцов #1 и #2 плотности дислокаций отличаются на два порядка и составили: $10^6\text{-}10^7\text{ см}^{-2}$ и $10^3\text{-}10^5\text{ см}^{-2}$ соответственно.

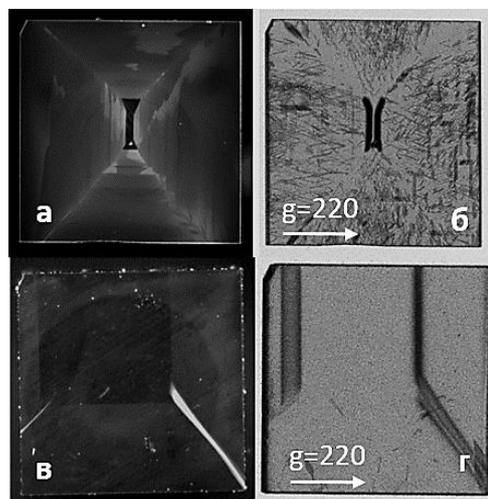


Рис. 2. Карты УФ фотолюминесценции (а, в) и рентгенотопографии (б, г) алмазных НРНТ пластин с различной концентрацией азота: #1 (300 ppm – а, б) и #2 (60 ppm – в, г)

Fig. 2. UV-photoluminescence (left) and X-ray topography (right) maps of diamond HPHT substrates with different nitrogen content: #1 (300 ppm – top) and #2 (60 ppm – bottom)

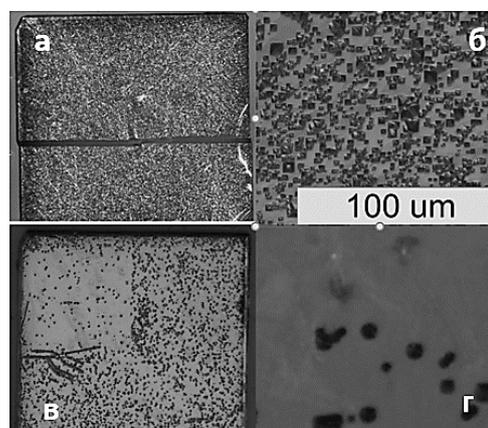


Рис. 3. Фото поверхности гомоэпитаксиальных пленок, выращенных на алмазных подложках с различным содержанием азота (#1 300 ppm – а, б и #2 60 ppm – в, г) с различным увеличением: а, в – полный вид пластины размером 3,5 мм и б, г – увеличенный участок пластины с масштабом 100 мкм

Далее были проведены исследования электрофизических характеристик диодов, изготовленных на образцах #1 и #2. На рис. 4 приведены вольт-

амперные характеристики диодов в режиме преобразования энергии бета-излучения, попадающего в преобразователь. Измерения, проведенные ранее на классических алмазных преобразователях (на основе алмазных диодов с бором р-типа [11]) с аналогичным источником от Ритверц™, показывают, что в режиме глубокого обеднения i-слоя достигается полный сбор вторичных электрон-дырочных пар, созданных при торможении бета-электронов. При этом ток генерации составлял примерно 1 нА.

В нашем случае для образца #1 с большим количеством дислокаций при температуре 400 °С ток глубокого обеднения не превышает 100 пА, а при температуре 500 °С этот ток составляет более 10 нА и определяется, вероятно, высокой утечкой через образец. Ток короткого замыкания (при $U = 0$ В) или ток холостого хода (I_{XX}) составляет для обеих температур не более $I_{XX} < 100$ пА. Можно сделать вывод, что образец не демонстрирует преобразования энергии бета-электронов, попадающих в него.

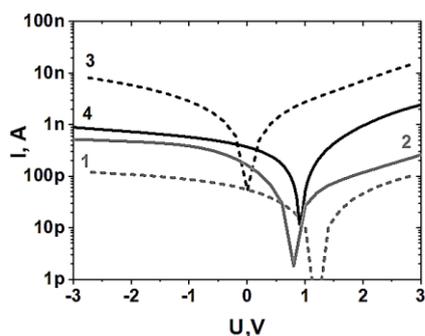


Рис. 4. Вольтамперные характеристики диодов Шоттки n-типа во время облучения модельным бета источником (нагрузочные кривые) для образцов #1 (кривые 1, 3) и #2 (2, 4) при температурах 400 °С (1, 2) и 500 °С (3, 4)

Fig. 4. Current-voltage characteristics of n-type Schottky diodes during irradiation with a model beta source (load curves) for samples #1 (dashed lines) and #2 (solid lines) at temperatures of 400 °С (gray lines) and 500 °С (black lines)

Для образца #2, напротив, уже при температуре 400 °С I_{XX} составлял 160 пА, а при $T = 500$ °С I_{XX} превышал 370 пА. Максимальная эффективность преобразования энергии (оптимальная нагрузочная точка) реализуется при напряжении 0,7 В и обеспечивает 170 пВт электрической мощности, что соответствует примерно 1% КПД преобразования.

ВЫВОДЫ

В результате работы были проведены исследования кристаллического качества алмазных пластин с разным уровнем легирования азотом (300 ppm и 60 ppm). Было обнаружено, что пластины с большим содержанием азота характеризуются

большим количеством протяженных кристаллических дефектов. Концентрация дислокаций в гомоэпитаксиальных пленках, выращенных на таких пластинах в одном процессе синтеза, отличается более чем на 2 порядка и составляет 10^6 - 10^7 см⁻² и 10^3 - 10^5 см⁻² соответственно. На подложках были изготовлены модельные диоды Шоттки n-типа. Диод на образце с большой концентрацией азота характеризуется большой утечкой и не демонстрирует преобразования энергии бета-излучения. В свою очередь, диод на основе алмазной подложки с концентрацией азота 60 ppm имеет малую утечку вплоть до высоких температур, превышающих 500 °С, и явно работает в режиме преобразования энергии бета-электронов.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что слишком высокая концентрация азота в алмазных кристаллах, выращенных по методу температурного градиента, приводит к развитию значительного количества структурных дефектов во время роста. Подложки, изготовленные из таких кристаллов, мало пригодны для создания многослойных гомоэпитаксиальных структур на них. Это происходит ввиду того, что практически все структурные дефекты наследуются растущим на подложке гомоэпитаксиальным слоем и затем приводят к высоким токам утечки или работают в виде центров захвата или рекомбинации носителей заряда.

БЛАГОДАРНОСТИ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда в рамках научного проекта №24-22-00385 (<https://rscf.ru/project/24-22-00385>) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов» ФГБНУ ТИСНУМ.

The present work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of scientific project RSF № №24-22-00385 (<https://rscf.ru/project/24-22-00385>) using the equipment from the Shared-Use Equipment Center “Research of Nanostructured, Carbon and Superhard Materials” FSBI TISNCM.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

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

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

1. **Ayodele O.L., Sanusi K.O., Kahn M.T.** Nuclear battery – a source of environmentally friendly energy. *JEDT*. 2018. DOI: 10.1108/JEDT-02-2017-0011.
2. **Prelas M., Boraas M.** Nuclear batteries and radioisotopes. NY: Springer Berlin Heidelberg. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-41724-0.
3. **Spencer M.G., Alam T.** High power direct energy conversion by nuclear batteries. *Appl. Phys. Rev.* 2019. V. 6. N 3. P. 031305. DOI: 10.1063/1.5123163.
4. **Zhou C., Zhang J., Wang X., Yang Y., Xu P., Li P., Zhang L., Chen Z., Feng H., Wu W.** Review—Betavoltaic Cell: The Past, Present, and Future. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2021. V. 10. N 2. P. 027005. DOI: 10.1149/2162-8777/abe423.
5. **Naseem M.B., Kim H.S., Lee J., Kim C.H., In S.-I.** Betavoltaic Nuclear Battery: A Review of Recent Progress and Challenges as an Alternative Energy Source. *J. Phys. Chem. C*. 2023. DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c00684.
6. **Xi S., Zhou C., Zhang Y., Li H., Wang L., Wang Z., Liu Z., Yi X., Li J.** The design of diamond metal/intrinsic/p-type Schottky-barrier-based cells for different radioactive β sources. *Appl. Phys. A*. 2024. V. 130. N 10. P. 753. DOI: 10.1007/s00339-024-07912-x.
7. **Polyakov A., Smirnov N., Tarelkin S., Govorkov A., Bormashov V., Kuznetsov M., Teteruk D., Buga S., Kornilov N., Lee I.-H.** Electrical Properties of Diamond Platinum Vertical Schottky Barrier Diodes. *Mater. Today: Proc.* 2016. V. 3. P. S159–S164. DOI: 10.1016/j.matpr.2016.02.027.
8. **Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Buga S.G., Volkov A.P., Golovanov A.V., Kuznetsov M.S., Kornilov N.V., Teteruk D.V., Luparev N.V., Terent'ev S.A., Blank V.D.** Electrical properties of high-quality synthetic boron-doped diamond single crystals and Schottky barrier diodes on their basis. *Inorg. Mater.* 2018. V. 54. N 15. P. 1469–1476. DOI: 10.1134/S0020168518150037.
9. **Donato N., Rouger N., Pernot J., Longobardi G., Udrea F.** Diamond power devices: state of the art, modelling, figures of merit and future perspective. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. V. 53. N 9. P. 093001. DOI: 10.1088/1361-6463/ab4eab.
10. **Bormashov V.S., Troshiev S.Yu., Tarelkin S.A., Volkov A.P., Teteruk D.V., Golovanov A.V., Kuznetsov M.S., Kornilov N.V., Terentiev S.A., Blank V.D.** High power density nuclear battery prototype based on diamond Schottky diodes. *Diam. Relat. Mater.* 2018. V. 84. P. 41–47. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.03.006.
11. **Bormashov V., Troshiev 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. Status Solidi A*. 2015. V. 212. N 11. P. 2539. DOI: 10.1002/pssa.201532214.
12. **Xi S., Zhou C., Zhang Y., Li H., Wang L., Wang Z., Yi X., Li J.** Efficiency limit for diamond metal/intrinsic/p-type Schottky barrier-based betavoltaic cells. *Appl. Phys. Lett.* 2024. V. 125. N 17. P. 173502. DOI: 10.1063/5.0211678.
13. **Liu Y., Tang X., Xu Z., Hong L., Wang H., Liu M., Chen D.** Influences of planar source thickness on betavoltaics with different semiconductors. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2015. V. 304. N 2. P. 517–525. DOI: 10.1007/s10967-014-3879-2.
14. **Suzuki M., Sakai T., Makino T., Kato H., Takeuchi D., Ogura M., Okushi H., Yamasaki S.** Electrical characterization of diamond PiN diodes for high voltage applications: Electrical characterization of diamond PiN diodes. *Physica Status Solidi (a)*. 2013. V. 210. N 10. P. 2035–2039. DOI: 10.1002/pssa.201300051.
15. **Pinault-Thaury M.-A., Stenger I., Gillet R., Temgoua S., Chikoidze E., Dumont Y., Jomard F., Kociniowski T., Barjon J.** Attractive electron mobility in (113) n-type phosphorus-doped homoepitaxial diamond. *Carbon*. 2021. V. 175. P. 254–258. DOI: 10.1016/j.carbon.2021.01.011.
16. **Буга С.Г., Квашнин Г.М., Лупарев Н.В., Кузнецов М.С., 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. **Buga S.G., Kvashnin G.M., Luparev N.V., Kuznetsov M.S., Trofimov S.D., Galkin A.S.** Spectra of electrical impedance of nitrogen-heavily doped synthetic diamond monocrystals in the temperature range of 10–400 K. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 28–36. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.1y.
17. **Buga S.G., Kvashnin G.M., Kuznetsov M.S., Kornilov N.V., Luparev N.V., Prikhodko D.D., Terentiev S.A., Blank V.D.** Hall measurements on nitrogen-doped Ib-type synthetic single crystal diamonds at temperatures 550–1143 K. *Appl. Phys. Lett.* 2024. V. 124. N 10. P. 102107. DOI: 10.1063/5.0180183.
18. **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. **Buga S.G., Galkin A.S., Kuznetsov M.S., Kornilov N.V., Luparev N.V., Prikhodko D.D., Tarelkin S.A., Blank V.D.** Dual-layer wafers of synthetic nitrogen-doped diamond single crystals 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.
19. **Novel Aspects of Diamond: From Growth to Applications.** Ed. by N. Yang. Springer International Publishing Cham. 2019. V. 121. DOI: 10.1007/978-3-030-12469-4.
20. **Davies G.** Current problems in diamond: towards a quantitative understanding. *Phys. B: Condensed Matter*. 1999. V. 273–274. P. 15–23. DOI: 10.1016/S0921-4526(99)00398-1.
21. **Тимошенко В.О., Приходько Д.Д., Тарелкин С.А., Корнилов Н.В., Лупарев Н.В., Голованов А.В.** Алмазные вертикальные рп диоды Шоттки с прецизионно легированным азотом слоем n-. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 10. С. 73–79. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.11y. **Timoshenko V.O., Prikhodko D.D., Tarelkin S.A., Kornilov N.V., Luparev N.V., Golovanov A.V.** Diamond vertical pn Schottky diodes with precision nitrogen-doped n-layer. Proceedings of the Universities. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 10. P. 73–79. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.11y.
22. **Tsubouchi N., Mokuno Y., Shikata S.** Characterizations of etch pits formed on single crystal diamond surface using oxygen/hydrogen plasma surface treatment. *Diam. Relat. Mater.* 2016. V. 63. P. 43–46. DOI: 10.1016/j.diamond.2015.08.012.

Поступила в редакцию (Received) 09.01.2025

Принята к опубликованию (Accepted) 14.05.2025