

АЛМАЗНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ pn ДИОДЫ ШОТТКИ С ПРЕЦИЗИОННО ЛЕГИРОВАННЫМ АЗОТОМ СЛОЕМ n⁻**В.О. Тимошенко, Д.Д. Приходько, С.А. Тарелкин, Н.В. Корнилов, Н.В. Лупарев, А.В. Голованов**

Вера Олеговна Тимошенко (ORCID 0009-0006-6137-864X)*, Дмитрий Дмитриевич Приходько (ORCID 0000-0002-6516-6592)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, 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*, dmitrii.prikhodko@phystech.edu

Сергей Александрович Тарелкин (ORCID 0000-0002-7278-3046), Николай Владимирович Корнилов (ORCID 0000-0001-6449-4562), Николай Викторович Лупарев (ORCID 0000-0002-2450-9771), Антон Владимирович Голованов (ORCID 0000-0002-6070-4080)

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

E-mail: sergey.tarelkin@gmail.com, nvkor@bk.ru, luparev@gmail.com, anton.golovanov@phystech.edu

В данной работе были проведены эксперименты, направленные на оптимизацию вертикальных Шоттки pn диодов с концентрацией азота в n⁻ слое <10¹⁷ ррб за счет изменения концентрации бора в подложке и толщины слоя. Были изготовлены Шоттки pn диоды, представляющие собой легированную бором алмазную подложку толщиной 250 – 300 мкм и линейными размерами 2,5 – 4 мм, полученную методом температурного градиента при высоких давлении и температуре, на которой методом осаждения из газовой фазы был выращен слабелегированный азотом слой с толщиной приблизительно 5 мкм и концентрацией азота в нем ~1 – 10 ррб. Концентрация бора в подложке варьировалась от 2 до 100 ррб. Площадь электрических контактов составляла 6,25 мм². Были исследованы вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики диодов. Вольт-фарадные характеристики показали независимость емкости диодов на среднелегированной подложке от запирающего напряжения, что говорит о полном обеднении дрейфового слоя диода. Это подтверждает, что данные диоды являются pn Шоттки диодами. Максимальное интегральное значение прямого тока было ограничено сопротивлением подложки и составило 0,1 А при 10 В и площади Шоттки контакта 6,25 мм². Это значительно ниже рекордных характеристик алмазных Шоттки диодов. Была обнаружена прямая зависимость концентрации бора в выращенном слое и концентрацией бора в подложке. Таким образом сделан вывод о том, что для достижения максимально низких концентраций донорных центров в n- слое и предотвращения перекомпенсации их акцепторами необходимо использовать легированные бором подложки с концентрацией бора ~10¹⁷ см⁻³.

Ключевые слова: SPN-диод, легированный алмаз, вертикальный диод, диод Шоттки**Для цитирования:**Тимошенко В.О., Приходько Д.Д., Тарелкин С.А., Корнилов Н.В., Лупарев Н.В., Голованов А.В. Алмазные вертикальные pn 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.**For citation:**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. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 10. P. 73–79. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.11y.

DIAMOND VERTICAL PN SCHOTTKY DIODES WITH PRECISION NITROGEN-DOPED n⁻ LAYER

V.O. Timoshenko, D.D. Prikhodko, S.A. Tarelkin, N.V. Kornilov, N.V. Luparev, A.V. Golovanov

Vera O. Timoshenko (ORCID 0009-0006-6137-864X)*, Dmitrii D. Prikhodko (ORCID 0000-0002-6516-6592)
Technological Institute of Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya 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*, dmitrii.prikhodko@phystech.edu

Sergey A. Tarelkin (ORCID 0000-0002-7278-3046), Nikolay V. Kornilov (ORCID 0000-0001-6449-4562), Nikolay V. Luparev (ORCID 0000-0002-2450-9771), Anton V. Golovanov (ORCID 0000-0002-4409-9589)

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

E-mail: sergey.tarelkin@gmail.com, nvkor@bk.ru, luparev@gmail.com, anton.golovanov@phystech.edu

In this work, we carried out the experiments to optimize vertical Schottky pn diodes with a nitrogen concentration in the n⁻ layer of <10 ppb by varying the boron concentration in the substrate and the layer thickness. Schottky pn diodes were manufactured, representing a boron-doped diamond substrate with a thickness of 250 – 300 μm and linear dimensions of 2.5 – 4 mm, obtained by the temperature gradient method at high pressure and temperature, on which a low nitrogen doped layer with a thickness of approximately 5 μm and a nitrogen concentration of ~1 – 10 ppb was deposited. The concentration of boron in the substrate varied from 2 to 100 ppm. The area of the electrical contacts was 6.25 mm². We investigated the current-voltage and capacitance-voltage characteristics of the diodes. The volt-farad characteristics showed the independence of the capacitance of diodes on the locking voltage, which indicates a complete depletion of the drift layer of the diode. This confirms that these diodes are pn Schottky diodes. The maximum integral forward current value was limited by the substrate resistance and amounted to 0.1 A at 10 V, with a Schottky contact area of 6.25 mm². This is significantly lower than the record characteristics of diamond Schottky diodes. In addition, a direct relationship between the concentration of boron in the grown layer and the concentration of boron in the substrate was revealed. Thus, it is concluded that in order to achieve the lowest possible concentrations of donor centers in the n⁻ layer and to prevent their overcompensation by acceptors, it is necessary to use boron-doped substrates with a boron concentration of ~10¹⁷ cm⁻³.

Key words: SPN-diode, doped diamond, vertical diode, Schottky diode

ВВЕДЕНИЕ

В современной электронике активно развивается направление, связанное с созданием диодных структур на основе алмаза. Одним из классических примеров таких структур является диод Шоттки, состоящий из легированных бором p⁺, p⁻ слоев и контакта Шоттки [1-8]. В таких диодах достигается высокое запирающее напряжение до 7,5 кВ [9-11], а также значения прямого тока до 10 А [12]. Однако, основным недостатком данной структуры является то, что значения прямого тока и запирающего напряжения тесно связаны друг с другом и определяют оптимальную геометрию активного слоя и концентрацию носителей в нем. Тол-

щина слоя определяет напряженность электрического поля при данном обратном напряжении. Если величина электрического поля превышает критическое поле лавинного пробоя в материале, то образуется электронная лавина, которая часто приводит к выходу диода из строя. С другой стороны, большая толщина активного слоя ограничивает проводимость диода в открытом состоянии, увеличивая резистивные потери энергии.

Для преодоления указанных ограничений была предложена структура SPN-диода, совмещающего в себе Шоттки и pn переход [13, 14]. Основным элементом такого диода является n⁻ слой, для которого толщину и концентрацию доноров подбирают так, что слой оказывается полностью

обедненным даже при отсутствии обратного смещения на контакте Шоттки. При приложении открывающего смещения на контакт Шоттки происходит инжекция дырок из сильно легированной p^+ подложки в рабочий слой, и реализуется дрейфовый ток. Таким образом, проводимость диода в открытом состоянии определяется концентрацией дырок в p^+ слое. При запирающем смещении поле равномерно падает на обедненном n^- слое и, следовательно, запирающее напряжение определяется толщиной n^- слоя и его критическим полем пробоя. Отличительной чертой таких диодов является то, что прямой ток и максимальное обратное напряжение прямо не зависят друг от друга, что представляет значительный интерес для разработки новых электронных устройств [15]. Другим преимуществом таких диодов является их независимость от глубины донорного уровня. В связи с ограничениями технологий производства алмазов, легированных фосфором в качестве донорной примеси, использование азота в качестве альтернативы представляет собой более простой и доступный вариант [16].

При реализации SPN-диодов удалось достичь рекордных значений плотности тока 4000 А/см^2 [13, 14], что свидетельствует о высоком потенциале данной технологии. Однако из-за маленьких площадей контактов интегральные значения достаточно далеки от необходимых для практического применения диодов в качестве силовых устройств. Кроме того, толщина n^- слоя в рассматриваемых диодах не превышала 100 нм и была связана с высокой концентрацией доноров в слое (более 10^{17} см^{-3}). Поэтому диоды не демонстрировали высоких запирающих напряжений (более 50 В). Одной из причин таких характеристик является планарная геометрия диодов (ток протекает вдоль тонких слоев p^+). В то же время реализация вертикальной геометрии диодов ограничивается низкой степенью совершенства кристаллической структуры сильно легированных бором подложек, что в свою очередь приводит к недостаточному кристаллическому качеству дрейфового слоя и, следовательно, к высоким токам утечки. Таким образом, для роста высококачественных кристаллических гомоэпитаксиальных слоев необходимо использовать легированные бором HPHT подложки с минимальным числом ростовых дислокаций и хорошо обработанной поверхностью [17-19].

Целью данной работы является получение SPN-диодов в вертикальной геометрии с максимальной толщиной дрейфового слоя и площадью контакта $> 1 \text{ мм}^2$. Также в данной работе изучено

влияние концентрации бора в подложке на примесный состав выращенного дрейфового слоя.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы

На рис. 1 представлена схема изготовленных диодов. Подложка p^+ представляет собой легированный бором алмаз, выращенный методом температурного градиента при высоких температуре и давлении (TG-HPHT), из которого были вырезаны квадраты с линейными размерами 2,5-4 мм и толщиной 250-300 мкм. Легирование осуществлялось путем добавления аморфного порошка бора в ростовую среду Fe-Al-C. На полученной подложке методом плазмохимического осаждения из газовой фазы активированной сверхвысокочастотной плазмой (MP-CVD) был выращен слаболегированный азотом n^- слой. В дальнейшем его будем называть «CVD слой». Концентрация бора в подложках варьировалась от $3 \cdot 10^{17}$ до 10^{19} см^{-3} (2-100 ppm), а расчетная концентрация азота в CVD слое $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (1 ppb).

Для MP-CVD 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 ± 5 мбар. Легирование азотом осуществлялось путем добавления 0,01% смеси N_2/H_2 . Скорость роста составила $\sim 1,5\text{-}2 \text{ мкм/ч}$.

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. Площадь контактов Шоттки составила $6,25 \text{ мм}^2$. На нижнюю сторону подложки напылялся омический контакт Ti/Pt с отжигом $700 \text{ }^\circ\text{C}$ для формирования переходного слоя TiC.

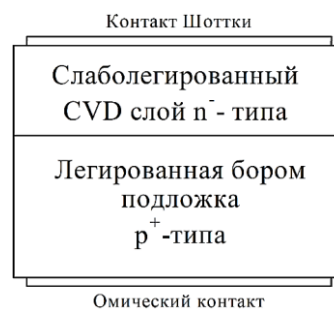


Рис. 1. Схема алмазного SPN-диода
Fig. 1. Scheme of the diamond SPN-diode

Экспериментальное оборудование

Исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов было проведено с использованием 4-х зондовой схемы на установке Keithley 4200A-CSC. Эта система обладает возможностью измерения характеристик в квазинепрерывном импульсном режиме, что позволяет установить время каждого измерения и интервалы между ними. При протекании большого тока в прямом направлении на образце выделяется ~ 1 Вт мощности в виде тепла. Для предотвращения нагрева диода и искажения ВАХ необходимо обеспечить хороший теплоотвод. Поэтому измерения проводились в импульсном режиме, а сам образец был размещен на массивной медной подложке, обеспечивающей эффективный отвод тепла. Также установка позволяет измерять вольт-фарадные характеристики диода в области обеднения, на основании которых были рассчитаны профили концентрации некомпенсированных акцепторов [20].

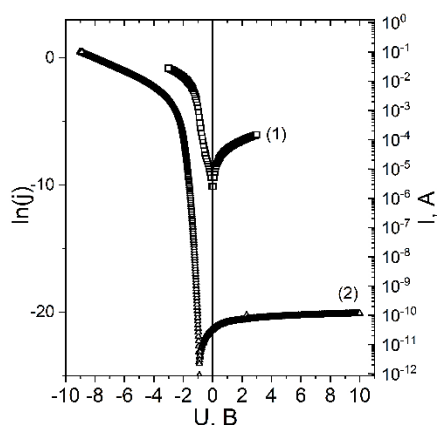


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики в прямом и обратном направлении для диодов А (1) и В (2); на левой оси отложен логарифм плотности тока с учетом площади контактов $0,0625 \text{ cm}^2$. При увеличении прямого напряжения, ток ограничивается сопротивлением подложки и контактов

Fig. 2. IV characteristic in the forward and reverse directions for diodes A(1) and B(2). The logarithm of the current density is postponed on the left, taking into account the contact area of 0.0625 cm^2 . With an increase the forward voltage, the current is limited by the resistance of the substrate and contacts

Одной из причин утечки диодов могла оказаться слишком высокая концентрация акцепторов, а конкретно бора, в CVD слое. Для подтверждения этого предположения была построена модель вхождения атомов бора в алмаз в процессе CVD роста исходя из нескольких предположений: 1) бор в реакторе появляется в начале процесса в результате распыления материала подложки под действием ионов плазмы; 2) бор однородно распре-

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе эксперимента были проведены исследования с использованием стандартных для диодов Шоттки подложек с концентрацией бора $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ($\sim 100 \text{ ppm}$). Исходя из результатов моделирования, приведенных в статье [21], для получения SPN-диода с максимальной толщиной n^- слоя необходимо добиться минимально возможной концентрации доноров в этом слое. Таким образом, мы вырастили 13 мкм n^- слоя с расчетной концентрацией азота 10^{14} cm^{-3} (1 ppb). Однако, вольт-амперная характеристика диода А, представленная на рис. 2 (кривая 1), показала наличие высокой утечки, а вольт-фарадная характеристика сильно изменялась с напряжением, что говорит об отсутствии полностью обедненного n^- слоя. Данный факт указывает на то, что полученный диод является обычным диодом Шоттки.

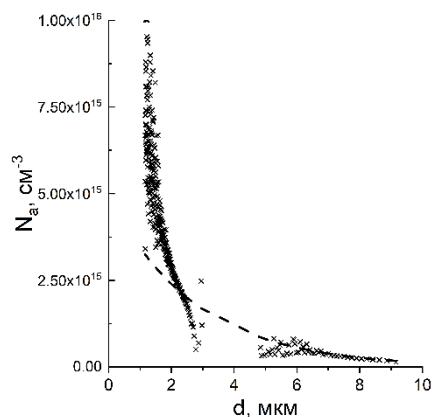


Рис. 3. Зависимость концентрации акцепторов в нелегированном CVD слое диода А от его толщины, полученная на основе вольт-фарадных характеристик диода; пунктирной линией обозначены результаты моделирования процесса роста CVD слоя

Fig. 3. Dependence of the concentration of acceptors in a weakly doped CVD layer of a diode A on its thickness, obtained on the basis the CV characteristic of the diode at different layer thicknesses (crosses); the dash line indicate an approximating model obtained by modeling the growth process of the CVD layer

деляется в газе; 3) концентрация бора в газе уменьшается с течением времени из-за непрерывного замещения газа потоками метана и водорода; 4) соотношение вероятности захвата атомов бора и углерода поверхностью растущего слоя принимается постоянным. Полученная зависимость профиля концентрации бора от толщины слоя была сопоставлена с аналогичными профилями, рассчитанными из вольт-фарадных характеристик (см. рис. 3).

Из зависимости, представленной на рис. 3, видно, что данная модель хорошо соотносится с экспериментальными данными. Таким образом, основным фактором, определяющим утечку в CVD слое, является повышенное содержание бора в дрейфовом слое. Соответственно, синтез CVD слоя на сильно легированных подложках с концентрацией бора 10^{19} см^{-3} ($\sim 100 \text{ ppm}$) не позволит достичь малой концентрации бора в слое. Следовательно, чтобы получить слой с n-типом проводимости, необходимо добавить более 10^{15} см^{-3} доноров (азота), что в свою очередь не позволит добиться большой толщины p-слоя.

Более того, в недавних исследованиях, проведенных нашей научной группой, было показано, что НРНТ подложки с концентрацией бора $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 2 \text{ ppm}$) имеют удельное сопротивление $\sim 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, которое не уступает сильно легированным подложкам [22, 23].

Таким образом, следующий этап эксперимента включал в себя синтез CVD слоя толщиной 5 мкм и расчетной концентрацией азота 10^{14} см^{-3} ($\sim 1 \text{ ppb}$) на подложке с концентрацией бора 10^{17} см^{-3} ($\sim 1 \text{ ppm}$).

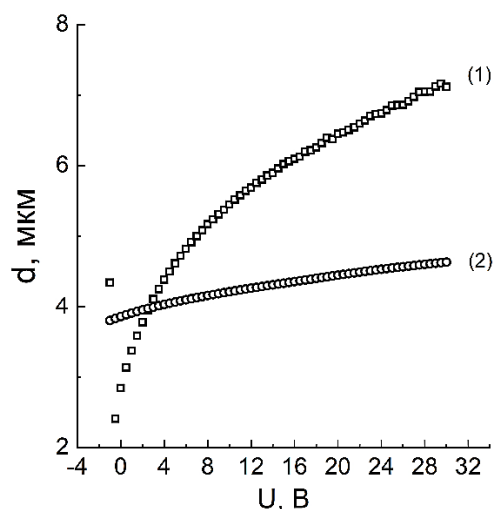


Рис. 4. Зависимости толщины обедненного слоя от запирающего напряжения, полученные из вольт-фарадных характеристик, для (1) диода А с концентрацией бора в подложке $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 100 \text{ ppm}$), расчетной концентрацией азота в CVD слое 10^{14} см^{-3} ($\sim 1 \text{ ppb}$) и площадью контактов $6,25 \text{ мм}^2$; (2) диода Б с концентрацией бора в подложке $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 1 \text{ ppm}$), расчетной концентрацией азота в CVD слое 10^{14} см^{-3} ($\sim 1 \text{ ppb}$) и площадью контактов $6,25 \text{ мм}^2$

Fig. 4. Dependences of the depleted layer thickness on locking voltage obtained from the CV characteristics for (1) diode A with a boron concentration in the substrate of $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 100 \text{ ppm}$), the calculated nitrogen concentration in the CVD layer of 10^{14} см^{-3} ($\sim 1 \text{ ppb}$), and the contact area of 6.25 мм^2 ; (2) diode B with a boron concentration in the substrate of $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 1 \text{ ppm}$), with an estimated nitrogen concentration in the CVD layer 10^{14} см^{-3} ($\sim 1 \text{ ppb}$) and a contact area of 6.25 мм^2

Отличительной характеристикой SPN-диодов, как было описано ранее, является полное обеднение дрейфового слоя даже при нулевом напряжении. А так как при приложении запирающего напряжения обеднения легированной подложки SPN-диода практически не происходит, то толщина обедненного слоя почти не изменяется при приложении напряжения. Из рис. 4 видно, что толщина обедненного слоя диода Б $\approx 4 \text{ мкм}$ (кривая 2) при нулевом напряжении, и мало меняется с изменением напряжения в пределах от -1 до 30 вольт. Исходя из этого, можно сделать вывод, что диод Б является SPN-диодом.

На рис. 2 представлены прямые и обратные ветви вольт-амперной характеристики диодов. Можно заметить, что открытие SPN-диода (2) похоже на открытие Шоттки диода (1), однако в обратную сторону ток утечки второго диода значительно меньше. Предельное значение тока в открытом состоянии определяется сопротивлением подложек и омического контакта. Сопротивление диода в открытом состоянии составляет порядка 100 Ом. Так как легированная бором подложка диода имеет сопротивление $\sim 1 \text{ Ом}$, можем сделать вывод, что основной вклад вносит сопротивление омического контакта к среднелегированной подложке. Одним из способов уменьшения контактного сопротивления и, соответственно, его влияния на вольт-амперную характеристики диода является рост тонкого слоя сильнолегированного бором алмаза на нижней поверхности подложки перед напылением омического контакта.

ВЫВОДЫ

В результате исследований был получен вертикальный SPN-диод, состоящий из среднелегированной бором НРНТ подложки и слабелегированного азотом CVD слоя с рекордной толщиной 5 мкм. Площадь контактов составила $6,25 \text{ мм}^2$, а интегральное значение прямого тока, которое было ограничено высоким сопротивлением контактов, имело значение 0,1 А. Кроме того, было показано, что концентрация бора в подложке оказывает сильное влияние на концентрацию акцепторов в слое, что необходимо учитывать в процессе синтеза слоя с очень низким уровнем легирования. Дальнейшие работы будут направлены на исследования максимального запирающего напряжения SPN-диодов и уменьшения сопротивления в прямом направлении.

БЛАГОДАРНОСТИ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01087 (<https://rscf.ru/project/23-72-01087/>) с использованием

оборудования Центра коллективного пользования «Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов» ФГБНУ ТИСЧУМ.

The present work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of scientific project RSF № 23-72-01087 (<https://rscf.ru/project/23-72-01087/>) 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 a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Rouger N., Maréchal A. Design of Diamond Power Devices: Application to Schottky Barrier Diodes. *Energies*. 2019. V. 12. N 12. P. 2387. DOI: 10.3390/en12122387.
2. Umezawa H., Mokuno Y., Yamada H., Chayahara A., Shikata S. Characterization of Schottky Barrier Diodes on a 0.5-Inch Single-Crystalline CVD Diamond Wafer. *Diam.Relat. Mater.* 2010. V. 19. N 2–3. P. 208–212. DOI: 10.1016/j.diamond.2009.11.001.
3. Blank V.D., Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Buga S.G., Kuznetsov M.S., Teteruk D.V., Kornilov N.V., Terentiev S.A., Volkov A.P. Power High-Voltage and Fast Response Schottky Barrier Diamond Diodes. *Diam. Relat. Mater.* 2015. N 57. P. 32–36. DOI: 10.1016/j.diamond.2015.01.005.
4. Kobayashi A., Ohmagari S., Umezawa H., Takeuchi D., Saito T. Suppression of Killer Defects in Diamond Vertical-Type Schottky Barrier Diodes. *Jap. J. Appl. Phys.* 2020. V. 59. N. SG. P. SGGD10. DOI: 10.7567/1347-4065/ab65b1.
5. Ohmagari S., Yamada H., Tsubouchi N., Umezawa H., Chayahara A., Seki A., Kawaii F., Saitoh H., Mokuno Y. Schottky Barrier Diodes Fabricated on Diamond Mosaic Wafers: Dislocation Reduction to Mitigate the Effect of Coalescence Boundaries. *Appl. Phys. Lett.* 2019. V. 114. N. 8. P. 082104. DOI: 10.1063/1.5085364.
6. Teraji T., Fiori A., Kiritani N., Tanimoto S., Gheeraert E., Koide Y. Mechanism of Reverse Current Increase of Vertical-Type Diamond Schottky Diodes. *J. Appl. Phys.* 2017. V. 122. N 13. P. 135304. DOI: 10.1063/1.4994570.
7. Fiori A., Teraji T., Koide Y. Diamond Schottky Diodes with Ideality Factors Close to 1. *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 105. N 13. P. 133515. DOI: 10.1063/1.4897315.
8. 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. V. 65. N 11. P. 27–33. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.7y.
9. 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 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.7y.
9. Volpe P. N., Muret P., Pernot J., Omnès F., Teraji T., Jomard F., Planson D., Brosselard P., Dheilley N., Vergne B., Scharnholtz S. High Breakdown Voltage Schottky Diodes Synthesized on P-Type CVD Diamond Layer. *Phys. Status Solidi (a)*. 2010. V. 207. N 9. P. 2088–2092. DOI: 10.1002/pssa.201000055.
10. Butler J. E., Geis M. W., Krohn K. E., Lawless J., Deneault S., Lyszczarz T. M., Flechtner D., Wright R. Exceptionally High Voltage Schottky Diamond Diodes and Low Boron Doping. *Semicond. Sci. Technol.* 2003. V. 18. N 3. P. S67–S71. DOI: 10.1088/0268-1242/18/3/309.
11. Twitchen D. J., Whitehead A. J., Coe S. E., Isberg J., Hammersberg J., Wikstrom T., Johansson E. High-Voltage Single-Crystal Diamond Diodes. *IEEE Transact. Electron Devices*. 2004. V. 51. N 5. P. 826–828. DOI: 10.1109/TED.2004.826867.
12. Tarelkin S., Bormashov V., Buga S., Volkov A., Teteruk D., Kornilov N., Kuznetsov M., Terentiev S., Golovanov A., Blank V. Power Diamond Vertical Schottky Barrier Diode with 10 A Forward Current. *Phys. Status Solidi (a)*. 2015. V. 212. N 11. P. 2621. DOI: 10.1002/pssa.201532213.
13. Makino T., Tanimoto S., Kato H., Tokuda N., Ogura M., Takeuchi D., Oyama K., Ohashi H., Okushi H., Yamasaki S. Diamond Schottky P-n Diode with High Forward Current Density. *Phys. Status Solidi (a)*. 2009. V. 206. N 9. P. 2086–2090. DOI: 10.1002/pssa.200982228.
14. Makino T., Tanimoto S., Hayashi Y., Kato H., Tokuda N., Ogura M., Takeuchi D., Oyama K., Ohashi H., Okushi H., Yamasaki S. Diamond Schottky-Pn Diode with High Forward Current Density and Fast Switching Operation. *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. N 26. P. 262101. DOI: 10.1063/1.3159837.
15. Makino T., Kato H., Tokuda N., Ogura M., Takeuchi D., Oyama K., Tanimoto S., Okushi H., Yamasaki S. Diamond Schottky-pn Diode without Trade-off Relationship between On-resistance and Blocking Voltage. *Phys. Status Solidi (a)*. 2010. V. 207. N 9. P. 2105–2109. DOI: 10.1002/pssa.201000149.
16. Matsumoto T., Mukose T., Makino T., Takeuchi D., Yamasaki S., Inokuma T., Tokuda N. Diamond Schottky-Pn Diode Using Lightly Nitrogen-Doped Layer. *Diam. Relat. Mater.* 2017. V. 75. P. 152–154. DOI: 10.1016/j.diamond.2017.03.018.

17. **Shikata S.** Single Crystal Diamond Wafers for High Power Electronics. *Diam. Relat. Mater.* 2016. V. 65. P. 168–175. DOI: 10.1016/j.diamond.2016.03.013.
18. **Achard J., Issaoui R., Tallaire A., Silva F., Barjon J., Jomard F., Gicquel A.** Freestanding CVD Boron Doped Diamond Single Crystals: A Substrate for Vertical Power Electronic Devices. *Phys. Status Solidi (a)*. 2012. V. 209. N 9. P. 1651–1658. DOI: 10.1002/pssa.201200045.
19. **Kubota A., Nagae S., Motoyama S., Touge M.** Two-Step Polishing Technique for Single Crystal Diamond (100) Substrate Utilizing a Chemical Reaction with Iron Plate. *Diam. Relat. Mater.* 2015. V. 60. P. 75–80. DOI: 10.1016/j.diamond.2015.10.026.
20. **Schroder D.K.** Semiconductor Material and Device Characterization. IEEE Press. Wiley: Piscataway, NJ: Hoboken. 2006. 781 p. DOI: 10.1002/0471749095.
21. **Makino T., Kato H., Takeuchi D., Ogura M., Okushi H., Yamasaki S.** Device Design of Diamond Schottky-Pn Diode for Low-Loss Power Electronics. *Jap. J. Appl. Phys.* 2012. V. 51. N 9R. P. 090116. DOI: 10.1143/JJAP.51.090116.
22. **Приходько Д.Д., Тимошенко В.О., Тарелкин С.А., Кузнецов М.С., Лупарев Н.В., Бланк В.Д.** Степень компенсации акцепторов в легированном бором HPHT алмазе в разных секторах роста. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. V. 66. N 10. P. 38–43. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.7y.
23. **Приходько Д.Д., Тимошенко В.О., Тарелкин С.А., Кузнецов М.С., Лупарев Н.В., Бланк В.Д.** Compensation ratio of acceptor centers in different growth sectors of boron-doped HPHT diamond. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 10. P. 38–43 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.7y.
23. **Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Buga S.G., Kuznetsov M.S., Terentiev S.A., Semenov A.N., Blank V.D.** Electrical Properties of the High Quality Boron-Doped Synthetic Single-Crystal Diamonds Grown by the Temperature Gradient Method. *Diam. Relat. Mater.* 2013. V. 35. P. 19–23. DOI: 10.1016/j.diamond.2013.02.011.

Поступила в редакцию 24.04.2024

Принята к опубликованию 31.05.2024

Received 24.04.2024

Accepted 31.05.2024