DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.12y

УДК: 539.3/.6

ЭЛЕКТРОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ НЕЛЕГИРОВАННОГО ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОГО АЛМАЗА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ДЫРОЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

В.О. Тимошенко, Д.Д. Приходько, С.А. Тарелкин, С.И. Жолудев, Н.В. Лупарев, Н.В. Корнилов

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

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, 108840
Московский физико-технический институт (НИУ), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская область, 141701
E-mail: timoshenko.vo@phystech.edu*, dmitrii.prikhodko@phystech.edu

Сергей Александрович Тарелкин (ORCID 0000-0002-7278-3046), Сергей Иванович Жолудев (ORCID 0000-0002-9407-6836), Николай Викторович Лупарев (ORCID 0000-0002-2450-9771), Николай Владимирович Корнилов (ORCID 0000-0001-6449-4562)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, 108840
E-mail: sergey.tarelkin@gmail.com, s.i.zholudev@gmail.com, luparev@gmail.com, nvkor@bk.ru

Использование нелегированного монокристаллического алмаза в качестве материла для изготовления детекторов высокоэнергетических частиц и различных типов ионизирующего излучения ограничивается наличием фоновой проводимости, вызванной примесью бора, что приводит к высокому темновому току в структурах типа металл-полупроводник-металл или металл-диэлектрик-металл. В данной работе исследуется возможность подавления фоновой проводимости в нелегированном гомоэпитаксиальном алмазе с помощью облучения алмаза небольшими дозами электронов высокой энергии (3,5 МэВ). Объектом исследования стали монокристаллы алмаза с концентрацией примесей менее 10^{14} см$^{-3}$, но обладающие удельным сопротивлением при комнатной температуре ~5 кОм·см. Образцы были подвергнуты электронному облучению с дозами $2\cdot10^{15}$ см$^{-2}$ и 10^{16} см$^{-2}$. Контроль результатов осуществлялся с помощью анализа температурной зависимости электрофизических свойств материала и вольт-амперных характеристик образцов детекторов из него. Полученные в работе результаты показывают, что облучение эффективно снижает проводимость алмаза на несколько порядков. Исследования температурных зависимостей электрофизических параметров подтверждают стабильность материала после облучения в диапазоне температур до 1000 К, что делает возможным создание омических контактов в детекторных структурах без ухудшения характеристик. Измерения вольт-амперных характеристик демонстрируют существенное уменьшение темнового тока детекторов после облучения. Кроме того, величина темнового тока облученных образцов с омическими контактами, обладающими повышенной механической и температурной стабильностью, сопоставима с результатами для необлученных образцов с контактами Шоттки. Полученные данные открывают перспективы разработки детекторов на основе гомоэпитаксиального алмаза, устойчивых к экстремальным условиям эксплуатации.

Ключевые слова: нелегированный алмаз, детектор, электронное облучение

Для цитирования:
Тимошенко В.О., Приходько Д.Д., Тарелкин С.А., Жолудев С.И., Лупарев Н.В., Корнилов Н.В. Электронное облучение нелегированного гомоэпитаксиального алмаза для подавления дырочной проводимости. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 9. С. 53–59. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.12y.

For citation:
Timoshenko V.O., Prikhodko D.D., Tarelkin S.A., Zholudev S.I., Luparev N.V., Kornilov N.V. Electron irradiation of an undoped homoepitaxial diamond to suppress hole conductivity. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 9. P. 53–59. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.12y.

ELECTRON IRRADIATION OF AN UNDOPED HOMOEPITAXIAL DIAMOND TO SUPPRESS HOLE CONDUCTIVITY

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

Vera O. Timoshenko (ORCID 0009-0006-6137-864X)*, Dmitrii D. Prikhodko (ORCID 0000-0002-6516-6592)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials of National Research Centre «Kurchatov Institute», Tsentralnaya street, 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia
E-mail: timoshenko.vo@phystech.edu* dmitrii.prikhodko@phystech.edu

Sergey A. Tarelkin (ORCID 0000-0002-7278-3046), Sergey I. Zholudev (ORCID 0000-0002-9407-6836), Nikolay V. Luparev (ORCID 0000-0002-2450-9771), Nikolay V. Kornilov (ORCID 0000-0001-6449-4562)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, National Research Centre «Kurchatov Institute», Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia
E-mail: sergey.tarelkin@gmail.com, s.i.zholudev@gmail.com, luparev@gmail.com, nvkor@bk.ru

The use of undoped single-crystal diamond as material for the manufacture of detectors for high-energy particles and various types of ionizing radiation is limited by background conductivity caused by boron impurities, leading to high dark currents in such metal-semiconductor-metal or metal-dielectric-metal structures. This study explores the possibility of reducing background conductivity in undoped homoepitaxial diamond through irradiation with low doses of high-energy electrons (3,5 MeV). We studied single-crystal diamonds with impurity concentrations below 10^{14} cm^{-3} nevertheless demonstrating resistivity of ~5 kΩ·cm at room temperature. The samples were irradiated with electron doses of ~$2\cdot10^{15}$ cm^{-2} and ~10^{16} cm^{-2}. The results were monitored by analyzing the temperature dependence of the material's electrophysical properties and the current-voltage characteristics of detector samples made from it. The obtained results show that irradiation effectively reduces diamond conductivity by several orders of magnitude. Studies of the temperature dependences of electrophysical parameters confirm the material's stability after irradiation in the temperature range up to 1000 K, enabling the fabrication of ohmic contacts in detector structures without degradation of their characteristics. Measurements of current-voltage characteristics demonstrate a significant reduction in the dark current of a detector after irradiation. Moreover, the dark current of the irradiated samples with ohmic contacts, which exhibit enhanced mechanical and thermal stability, is comparable to that of non-irradiated samples with Schottky contacts. The obtained data open prospects for developing homoepitaxial diamond-based detectors resistant to extreme operating conditions.

Keywords: undoped diamond, detector, electronic irradiation

ВВЕДЕНИЕ

Алмаз является перспективным широкозонным полупроводниковым материалом для применения в электронике благодаря своим исключительным физическим свойствам, таким как большая ширина запрещенной зоны, высокая подвижность свободных носителей заряда и высокая радиационная стойкость [1-4]. Нелегированный монокристаллический алмаз, полученный методом химического осаждения из газовой фазы (CVD), широко используется для создания детекторов для различных типов излучения и частиц высокой энергии, включая УФ-излучение [5], рентгеновские лучи [6], нейтроны [7], протоны [8-10], α-, β- и γ-частицы [11-13]. Для того, чтобы детектор обладал наилучшими характеристиками (чувствительностью, быстродействием), материал должен обладать как можно

лучшим кристаллическим качеством и химической чистотой. Это необходимо для достижения наименьшей концентрации электрически активных центров, которые могут действовать как ловушки или рассеивающие центры для свободных носителей заряда и снижать эффективность сбора носителей заряда.

В недавних исследованиях [14] в нелегированном CVD алмазе была обнаружена проводимость ~5 кОм·см, вызванная фоновой примесью бора в концентрации ~10^{13} $см^{-3}$. Материал с такой фоновой проводимостью не подходит для создания детекторов частиц высокой энергии, так как даже крайне низкая концентрация бора приводит к высокому темновому току детектора. Исходя из этого, был сделан вывод, что необходимо найти способ подавления фоновой проводимости.

Наиболее простым для применения способом подавления фоновой проводимости детектора при небольшой концентрации свободных носителей является использование контакта Шоттки [15, 16]. Приложенное на контакт напряжение вытесняет свободные носители заряда из материала, тем самым превращая его в диэлектрик. Однако, за счет того, что, как правило, контакт Шоттки является металлической пленкой на поверхности полупроводника, он сильнее подвержен механической деградации в ходе эксплуатации. Например, металлическая пленка может отслаиваться при циклическом нагреве-охлаждении за счет разницы в коэффициенте температурного расширения материалов, а также под воздействием ионизирующего излучения. Кроме того, контакт Шоттки обладает недостатками с точки зрения электрофизических процессов. В частности, при приложении высокого электрического поля происходит инжекция носителей из металла в полупроводник, что приводит к более раннему развитию лавинного пробоя [17].

Решить данные проблемы позволяет более стабильный химически и термически омический контакт, создание которого в случае широкозонных полупроводников обычно связано с возникновением прочных химических связей между полупроводником и материалом контакта. Так, один из распространенных способов изготовления омического контакта к алмазу заключается в напылении тонкого слоя титана, который при отжиге образует переходный карбидный слой, обеспечивающий лучшую адгезию к материалу по сравнению с напылением металла, не образующего карбид. Слой титана затем покрывается слоем платины и, при необходимости, золотом для защиты от окисления. Кроме того, во многих исследованиях показано, что омическим также является графитизированный электрод [18, 19] на поверхности алмаза, который становится более предпочтительным для использования в детекторных структурах. Преимущество такого электрода заключается в отсутствии атомов тяжелых металлов, которые могут приводить к дополнительному поглощению и искажению энергетического спектра при регистрации высокоэнергетичных частиц.

Омический контакт не образует потенциального барьера между материалом контакта и полупроводником, а, значит, темновой ток такого детектора будет определяться электропроводностью полупроводника. В случае детекторов на основе алмаза мы получаем, что для обеспечения минимального темнового тока в структуре металл-полупроводник-металл с омическим контактом, необходимо достичь минимальной электропроводности алмаза.

Причиной относительно большой электропроводности в нелегированном CVD алмазе оказалась фоновая примесь бора в концентрации ~1 ppb [14]. Для подавления дырочной проводимости в полупроводниках применяется метод компенсации материла донорными центрами [20]. Этот подход может быть реализован несколькими способами, одним из которых является синтез материала с контролируемым добавлением донорной примеси до концентрации, максимально близкой к концентрации акцепторов в материале. В случае алмаза донорной примесью является азот и необходимо, чтобы его концентрация слегка превышала концентрацию бора (акцептора), так как донорный центр азота обладает энергией ионизации ~1,7 эВ и дает пренебрежимо малое количество свободных электронов. В первых исследованиях на эту тему было показано, что малая добавка азота позволяет получить непроводящий CVD слой n- в диодных структурах [21].

Другим способом подавления проводимости является облучение алмаза электронами высокой энергии (3,5 МэВ), которое может быть осуществлено непосредственно перед применением детекторов и позволяет добиться результата без вмешательства в процесс синтеза. Из литературы известно, что электронное облучение алмаза позволяет уменьшить концентрацию оптически активного бора за счет его электрической компенсации глубокими центрами вакансионной природы [22]. Однако исследования были проведены только для сравнительно высоких концентраций бора и доз облучения, и для контроля результатов использовались спектры ИК поглощения.

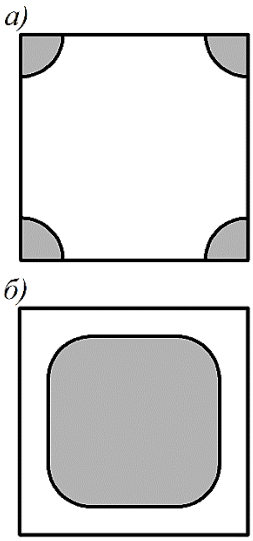

Рис. 1. Геометрия контактов для измерений а) электрофизических характеристик материала и эффекта Холла, б) вольт-амперных характеристик детектора
Fig. 1. Geometry of contacts for measurements of a) the electrophysical characteristics of the material and the Hall effect, б) the I-V characteristics of the detector

Целью данной работы было исследование подавления фоновой проводимости нелегированного кристаллического CVD алмаза с помощью облучения высокоэнергичными электронами с малой дозой. Контроль результатов осуществлялся с помощью анализа температурной зависимости электрофизических свойств материала и вольтамперных характеристик (ВАХ).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРЕМЕНТА

В данной работе исследовались электрофизические характеристики CVD алмазов в зависимости от дозы облучения 3,5 МэВ электронами. Электрофизические свойства контролировались 2-мя методами: удельная электропроводность и эффект Холла в геометрии Ван-дер-Пау и 2-контактная ВАХ в вертикальной (детекторной) геометрии.

Образцы

В данной работе исследовались алмазные монокристаллы, выращенные методом осаждения из газовой фазы (CVD) на установке Plassys BJS 150 CVD. Из монокристаллов, полученных в одном синтезе, были вырезаны три квадратные пластины #1, #2 и #3 размером 4×4×0,5 мм. На протяжении процесса роста параметры были следующими: температура подложки – 850±15 °С, мощность СВЧ излучения – 2,7 кВт, газовая смесь – H_2/CH_4 в соотношении 24/1 при давлении газа 180±5 мбар. Скорость роста составила ~ 1,5 – 2 мкм/ч.

Для измерения температурной зависимости проводимости была выбрана геометрия Ван-дер-Пау (рис. 1а). Были изготовлены омические контакты по стандартной технологии: магнетронное напыление титана и платины с последующим отжигом при температуре 700 °С. Перед изготовлением омического контакта образец полировался и отжигался в атмосфере при 650 °С.

Для снятия ВАХ были использованы как омические контакты (для облученных образцов), так и контакты Шоттки (для необлученных образцов) в виде прямоугольника со скругленными углами (рис. 1б). Перед напылением контакта Шоттки образцы отжигались в атмосфере при температуре 650 °С, а затем их поверхность обрабатывалась в плазме SF_6 в течение 20 мин.

Образец #3 являлся образцом сравнения и представлял собой детектор с контактом Шоттки в конфигурации, представленной на рис. 1б.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Измерения электрофизических свойств были проведены на установке для измерения эффекта Холла LakeShore HMS 7707 с высокотемпературной камерой Linkam-TS1200, работающей в температурном диапазоне 300 – 1000 К.

Измерения удельного сопротивления и эффекта Холла были проведены по методу Ван-дер-Пау с усреднением протекания тока по всем геометриям, а также с изменением полярности магнитного поля (±1 Т). Данный режим позволяет учитывать возможное несовершенство геометрии образца.

Исследование вольтамперных характеристик детекторов было проведено с использованием источника высокого напряжения Fug DC Power Supply и пикоамперметра Keithley 6485. Исследования проводились в диапазоне напряжений -600 – 600 В.

Электронное облучение образцов проводилось с помощью установки L&W research. Энергия электронов составила 3,5 МэВ, максимальный ток пучка 250 мкА, максимальная мощность 800 Вт. Доза облучения составляла ~$2\cdot10^{15}$ см$^{-2}$ и ~10^{16} см$^{-2}$ для образцов #1 и #2 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первую очередь были исследованы характеристики исходного материала. Удельное сопротивление образцов #1 и #2 при комнатной температуре составило ~6 кОм·см (рис. 2, кривые 1). Анализ температурных зависимостей показал, что основной причиной проводимости образцов являются нескомпенсированные акцепторные центры, а именно – бор. Более подробные исследования аналогичного материала проводились в работе [14].

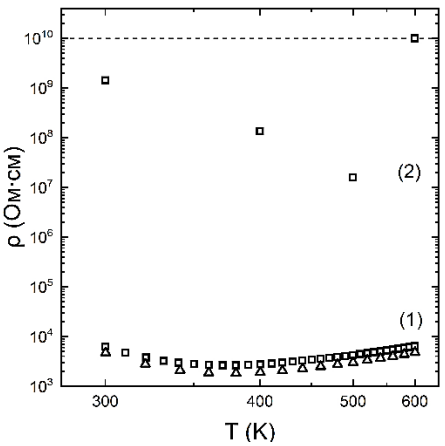

Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления образцов #1 (квадраты) и #2 (треугольники). Кривые (1) и (2) демонстрируют удельное сопротивление образцов до и после облучения соответственно. Тип зависимости (1) соответствует температурной активации примесных центров бора в алмазе [23]. При температуре 600 К и выше удельное сопротивление образца #1 после облучения превысило верхний порог измерительной системы в 10 ГОм·см (пунктирная горизонтальная прямая). Удельное сопротивление образца #2 после облучения превышало порог измерительной системы во всем диапазоне 300 – 1000 К

Fig. 2. Temperature dependences of the resistivity of samples #1 (squares) and #2 (triangles). Curves (1) and (2) shows to the samples' resistivity before and after irradiation correspondingly. The type of dependence (1) matches the temperature activation of boron impurity centers in diamond. At a temperature of 600 K and above, the resistivity of sample #1 after irradiation exceeds the upper threshold of the measuring system, which is 10 GOhm·cm (dotted horizontal line). The resistivity of the sample #2 after irradiation exceeded the threshold of the measuring system in the entire range of 300 – 1000 K

Как упоминалось ранее, облучение образцов электронами высоких энергий позволяет подавить дырочную фоновую проводимость. Основываясь на вычислениях, приведенных в литературе [22], а также на технических возможностях используемого ускорителя, для образца #1 была выбрана минимально возможная доза ~$2\cdot10^{15}$ см$^{-2}$, а для образца #2 – ~10^{16} см$^{-2}$. Контроль дозы осуществлялся по поглощению в видимой области, в которой была измерена концентрация нейтральных вакансий V^0 (GR центров), образующихся в процессе облучения. Концентрация GR центров в образце #1 после облучения составила $3{,}4\cdot10^{15}$ см$^{-2}$, а в образце #2 – $1{,}6\cdot10^{16}$ см$^{-2}$.

Температурные зависимости электрофизических характеристик облученных образцов исследовались по двум причинам. Во-первых, повышение температуры приводит к дополнительной ионизации нескомпенсированных акцепторных центров в алмазе. Так мы определим наличие или отсутствие активационной зависимости, соответствующей атомам бора в алмазе. Во-вторых, это ответит на вопрос о температурной стабильности электрофизических свойств материала. Что важно, в частности, для напыления омических контактов, требующих термической обработки при 700 °С.

Облучение электронами с энергией 3,5 МэВ дозой ~$2\cdot10^{15}$ см$^{-2}$ привело к уменьшению электропроводности образца #1 при комнатной температуре приблизительно на 6 порядков. На рис. 2 (кривая 2) представлена температурная зависимость удельного сопротивления образца #1. Можем заметить, что тип зависимости (2) после облучения не совпадает с зависимостью до облучения (1). При увеличении температуры образца #1 выше 500 К удельное сопротивление превысило верхний порог измерительной системы (показан пунктирной линией на рис. 2). Стоит отметить, что дальнейшее увеличение температуры до 1000 К не привело к восстановлению проводимости, которое могло произойти из-за отжига вакансионных центров.

Удельное сопротивление образца #2, облученного дозой ~10^{16} см$^{-2}$, уже при комнатной температуре превысило верхний порог измерительной системы (показан пунктирной линией на рис. 2) и не опускалось ниже 10 ГОм·см на протяжении всего эксперимента в диапазоне температур 300 – 1000 К.

Важно подчеркнуть, что после облучения электронами с энергией 3,5 МэВ нам не удалось измерить эффект Холла ни на одном из образцов. Мы предполагаем, что это связано с очень малой концентрацией свободных носителей заряда.

Таким образом, показано, что электронное облучение позволяет значительно уменьшить фоновую проводимость алмаза. Результаты измерений подтверждают, что остаточная проводимость образцов после облучения не связана с активными центрами бора. А увеличение температуры до 1000 К не приводит к возвращению проводимости образцов. Данный факт подтверждает возможность изготовления Ti-Pt омического контакта уже после облучения образца.

Следующий этап исследований заключался в изготовлении детекторного омического контакта в конфигурации, приведенной на рис. 1б, вместо геометрии Ван-дер-Пау. Были измерены вольтамперные зависимости образцов #1 и #2 до и после облучения (рис. 3), а также образца сравнения #3 с контактами Шоттки, для исследования одной из важнейших характеристик детектора, а именно величины темнового тока. До облучения ток утечки детекторов достиг верхнего предела измерительной системы в 100 мкА и определялся величиной сопротивления страховочного резистора. При таком уровне темнового тока детектор непригоден

для использования. Однако после облучения ток утечки образцов не превышал 1 нА в диапазоне напряжений от -600 В до +600 В, что потенциально позволяет использовать данные детекторы для регистрации ионизирующего излучения. Важно отметить, что облученные образцы с омическим контактом показывают такой же низкий темновой ток, как и необлученные образцы с контактом Шоттки, что говорит о том, что облучение нелегированного материала с фоновой проводимостью позволяет использовать омический контакт вместо контакта Шоттки, тем самым повышая стабильность работы детектора.

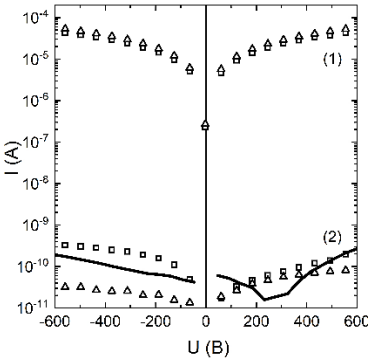

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики детекторов: (1) – зависимости образцов #1 (квадраты) и #2 (треугольники) до облучения. (2) – зависимости образцов #1 и #2 до облучения. Сплошной линией обозначена ВАХ детектора, изготовленного в одном синтезе с образцами #1 и #2, но с контактом Шоттки

Fig. 3. I-V characteristics of the detectors: (1) – dependences of samples #1 (squares) and #2 (triangles) before irradiation. (2) – dependnces of samples #1 and #2 before irradiation. A solid line indicates the I-V characteristic of a detector manufactured in the same synthesis with samples #1 and #2, but with a Schottky contact

ВЫВОДЫ

В результате исследований было доказано, что электронное облучение нелегированных CVD алмазов небольшими дозами электронов успешно подавляет фоновую электропроводность, вызванную активными центрами бора. Кроме того, электропроводность не восстанавливается при нагреве до температуры 1000 К, что позволяет изготавливать более стойкий омический контакт вместо контактов Шоттки в детекторных структурах. Данный факт расширяет диапазон эксплуатационных условий, а также дает потенциал для развития детекторных структур с графитизированной поверхностью в качестве электрода.

Важно отметить, что данный способ избавления от остаточной электропроводности является «самолечащим» для детектора. Так, детектор с высоким темновым током достаточно поместить на некоторое время под исследуемый поток ионизирующего излучения (при достаточно высокой энергии кванта), набрать необходимую дозу для подавления проводимости, а после этого уже начать измерения. Однако необходимо исследовать работу облученных детекторов с точки зрения быстродействия и эффективности сбора носителей.

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» НИЦ «Курчатовский институт» - ТИСНУМ.

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" NRC «Kurchatov Institute» - 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. **Prawer S., Aharonovich I.** Quantum information processing with diamond: principles and applications. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. Amsterdam: Elsevier/WP, Woodhead Publ. 2014. 330 p.
2. **Бормашов В.С., Тарелкин С.А., Буга С.Г., Волков А.П., Голованов А.В., Кузнецов М.С., Корнилов Н.В., Тетерук Д.В., Терентьев С.А., Бланк В.Д.** Электрические свойства высококачественных синтетических монокристаллов алмаза, легированных бором, и диодов Шоттки на их основе. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2017. V. 83. № 1. P. 36–42. **Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Buga S.G., Volkov A.P., Golovanov A.V., Kuznetsov M.S., Kornilov N.V., Teteruk D.V., Terentiev S.A., Blank V.D.** Electrical properties of high quality synthetic single crystal diamond, boron doped diamond and Schottky diodes on their bases. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostica Materialov.* 2017. V. 83. N. 1. P. 36–42 (in Russian).
3. **Zamboni I., Pastuović Ž., Jakšić M.** Radiation hardness of single crystal CVD diamond detector tested with MeV energy ions. *Diam. Relat. Mater.* 2013. V. 31. P. 65–71. DOI: 10.1016/j.diamond.2012.11.002.
4. **Krasilnikov A.V., Rodionov N.B., Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Vartapetov S.K., Sizov Y.E., Meschaninov S.A., Trapeznikov A.G., Rodionova V.P., Amosov V.N.,**

Khmelnitsky R.A., Kirichenko A.N. CVD-synthesis of detector quality diamond for radiation hardness detectors of ionizing radiation. *Tech. Phys.* 2022. V. 92. N 4. P. 503. DOI: 10.21883/TP.2022.04.53607.226-21.

5. **Liao M., Sang L., Teraji T., Imura M., Alvarez J., Koide Y.** Comprehensive Investigation of Single Crystal Diamond Deep-Ultraviolet Detectors. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2012. V. 51. N 9R. 090115. DOI: 10.1143/JJAP.51.090115.
6. **Talamonti C., Kanxheri K., Pallotta S., Servoli L.** Diamond Detectors for Radiotherapy X-Ray Small Beam Dosimetry. *Front. Phys.* 2021. V. 9. 632299. DOI: 10.3389/fphy.2021.632299.
7. **Angelone M., Verona C.** Properties of Diamond-Based Neutron Detectors Operated in Harsh Environments. *JNE.* 2021. V. 2. N 4. P. 422–470. DOI: 10.3390/jne2040032.
8. **Venturi N., Alexopoulos A., Artuso M., Bachmair F., Bäni L., Bartosik M., Beacham J., Beck H., Bellini V., Belyaev V., Bentele B., Bergonzo P., Bes A., Brom J.-M., Bruzzi M., Chiodini G., Chren D., Cindro V., Claus G., Collot J., Cumalat J., Dabrowski A., D'Alessandro R., Dauvergne D., de Boer W., Dorfer C., Dunser M., Eremin V., Forcolin G., Forneris J., Gallin-Martel L., Gallin-Martel M.-L., Gan K.K., Gastal M., Giroletti C., Goffe M., Goldstein J., Golubev A., Gorišek A., Grigoriev E., Grosse-Knetter J., Grummer A., Gui B., Guthoff M., Haughton I., Hiti B., Hits D., Hoeferkamp M., Hofmann T., Hosslet J., Hostachy J.-Y., Hügging F., Hutton C., Janssen J., Kagan H., Kanxheri K., Kasieczka G., Kass R., Kassel F., Kis M., Kramberger G., Kuleshov S., Lacoste A., Lagomarsino S., Lo Giudice A., Lukosi E., Maazouzi C., Mandic I., Mathieu C., Menichelli M., Mikuž M., Morozzi A., Moss J., Mountain R., Murphy S., Muškinja M., Oh A., Olivero P., Passeri D., Pernegger H., Perrino R., Picollo F., Pomorski M., Potenza R., Quadt A., Re A., Reichmann M., Riley G., Roe S., Sanz D., Scaringella M., Schaefer D., Schmidt C.J., Smith D.S., Schnetzer S., Sciortino S., Scorzoni A., Seidel S., Servoli L., Sopko B., Sopko V., Spagnolo S., Spanier S., Stenson K., Stone R., Sutera C., Taylor A., Tannenwald B., Traeger M., Tromson D., Trischuk W., Tuve C., Velthuis J., Vittone E., Wagner S., Wallny R., Wang J.C., Weingarten J., Weiss C., Wengler T., Wermes N., Yamouni M., Zavrtanik M.** Results on radiation tolerance of diamond detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. DOI: 10.1016/j.nima.2018.08.038.
9. **Berretti M.** The diamond time of flight detector of the TOTEM experiment. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 2017. V. 845. P. 29–32. DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.068.
10. **Crnjac A., Skukan N., Provatas G., Rodriguez-Ramos M., Pomorski M., Jakšić M.** Electronic Properties of a Synthetic Single-Crystal Diamond Exposed to High Temperature and High Radiation. *Materials.* 2020. V. 13. N 11. P. 2473. DOI: 10.3390/ma13112473.
11. **Dueñas J.A., de la Torre Pérez J., Martín Sánchez A., Martel I.** Diamond detector for alpha-particle spectrometry. *Appl. Radiat. Isot.* 2014. V. 90. P. 177–180. DOI: 10.1016/j.apradiso.2014.03.032.
12. **Berdermann E., Pomorski M., de Boer W., Ciobanu M., Dunst S., Grah C., Kiš M., Koenig W., Lange W., Lohmann W., Lovrinčić R., Moritz P., Morse J., Mueller S., Pucci A., Schreck M., Rahman S., Träger M.** Diamond detectors for hadron physics research. *Diam. Relat. Mater.* 2010. V. 19. N 5–6. P. 358–367. DOI: 10.1016/j.diamond.2009.11.019.
13. **Bennett P., Cirignano L.J., Kargar A., Kim H., Shah K.S.** CVD diamond for beta particle detection in a gamma-ray background. In: Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XX. Ed. by M. Fiederle, A. Burger, R.B. James, S. A. Payne. San Diego, United States: SPIE. 2018. 39 p. DOI: 10.1117/12.2323695.
14. **Prikhodko D.D., Timoshenko V.O., Tarelkin S.A., Kornilov N.V., Luparev N.V., Golovanov A.V., Drozdova T.E., Blank V.D.** Hall effect analysis of boron and nitrogen background concentration in undoped CVD diamond. *Appl. Phys. Lett.* 2024. V. 125. N 4. P. 042109. DOI: 10.1063/5.0197107.
15. **Faggio G., Messina G., Santangelo S., Prestopino G., Ciancaglioni I., Marinelli M.** Raman scattering in boron-doped single-crystal diamond used to fabricate Schottky diode detectors. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2012. V. 113. N 18. P. 2476–2481. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.06.012.
16. **Bossini E., Minafra N.** Diamond Detectors for Timing Measurements in High Energy Physics. *Front. Phys.* 2020. V. 8. P. 248. DOI: 10.3389/fphy.2020.00248.
17. **Card H.C., Rhoderick E.H.** The effect of an interfacial layer on minority carrier injection in forward-biased silicon Schottky diodes. *Solid-State Electron.* 1973. V. 16. N 3. P. 365–374. DOI: 10.1016/0038-1101(73)90011-7.
18. **Matsumoto T., Kato H., Tokuda N., Makino T., Ogura M., Takeuchi D., Okushi H., Yamasaki S.** Reduction of n-type diamond contact resistance by graphite electrode. *Phys. Rapid Res. Ltrs.* 2014. V. 8. N 2. P. 137–140. DOI: 10.1002/pssr.201308252.
19. **Salvatori S., Jaksic M., Rossi M.C., Conte G., Kononenko T., Komlenok M., Khomich A., Ralchenko V., Konov V., Provatas G.** Diamond Detector With Laser-Formed Buried Graphitic Electrodes: Micron-Scale Mapping of Stress and Charge Collection Efficiency. *IEEE Sensors J.* 2019. V. 19. N 24. P. 11908–11917. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2939618.
20. **Saha B., Garbrecht M., Perez-Taborda J.A., Fawey M.H., Koh Y.R., Shakouri A., Martin-Gonzalez M., Hultman L., Sands T.D.** Compensation of native donor doping in ScN: Carrier concentration control and p -type ScN. *Appl. Phys. Lett.* 2017. V. 110. N 25. P. 252104. DOI: 10.1063/1.4989530.
21. **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. **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 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.11y.
22. **Zaitsev A.M.** Optical properties of diamond: a data handbook. Berlin, New York: Springer. 2001. 502 p.
23. **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. Т. 66. Вып. 10. С. 38–43. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.7y. **Prikhodko D.D., Timoshenko V.O., Tarelkin S.A., Kuznetsov M.S., Luparev N.V., Blank V.D.** 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.

Поступила в редакцию (Received) 09.01.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 20.01.2025