

## CVD-алмазные структуры с $p$ – $n$ -переходом — диоды и транзисторы

© М.А. Лобаев, Д.Б. Радищев, А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, С.А. Богданов, В.А. Исаев, С.А. Краев, А.И. Охапкин, Е.А. Архипова, П.А. Юнин, Н.В. Востоков, Е.В. Демидов, М.Н. Дроздов

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: lobaev@appl.sci-ppov.ru

Поступило в Редакцию 9 октября 2024 г.  
В окончательной редакции 9 октября 2024 г.  
Принято к публикации 9 октября 2024 г.

Исследовано легирование алмаза бором и фосфором в плазмохимическом реакторе с ламинарным потоком газа. Получены слои алмаза, сильнолегированные бором и фосфором. Слои обладали низким удельным сопротивлением при высоком кристаллическом совершенстве. На основе таких слоев созданы структуры для формирования электронных приборов на алмазе. Исследовано несколько видов алмазных приборов: диод Шоттки,  $pn$ -диод Шоттки,  $p$ – $i$ – $n$ -диод и полевой транзистор. Получены высокие значения пробойных полей и плотностей тока в исследованных приборах.

**Ключевые слова:** CVD-алмаз, алмазные структуры, диод Шоттки,  $p$ – $i$ – $n$ -диод, полевой транзистор.

DOI: 10.61011/JTF.2025.03.59860.288-24

### Введение

В настоящее время алмаз является перспективным материалом для создания следующего поколения мощных и высокочастотных полупроводниковых приборов [1,2]. Алмаз обладает уникальными физическими свойствами: высокой подвижностью электронов ( $1000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ) [2,3] и дырок ( $2000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ) [2,4] при слабом легировании, высокой дрейфовой скоростью носителей заряда в сильных электрических полях ( $2.1 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ ) [5], рекордной теплопроводностью ( $22 \text{ W}/(\text{cm}\cdot\text{K})$ ) [6] и высоким пробойным полем ( $7\text{--}9 \text{ MV/cm}$ ) [7]. По совокупности своих физических свойств полупроводниковый алмаз существенно превосходит другие широкозонные материалы [8]. Основным недостатком алмаза являются глубокие энергетические уровни примесей —  $0.38 \text{ eV}$  [9] при легировании алмаза бором ( $p$ -тип проводимости) и  $0.57 \text{ eV}$  [10] при легировании алмаза фосфором ( $n$ -тип проводимости). Для таких энергетических уровней лишь очень малая часть легирующей примеси ионизована при комнатной температуре. При повышении концентрации легирующей примеси подвижность носителей заряда уменьшается из-за резко возрастающего рассеяния на нейтральных и ионизованных примесях [11,12]. При высоких уровнях легирования зонный тип проводимости в алмазе меняется сначала на прыжковый тип проводимости [13], а затем происходит переход на металлический тип проводимости [14], который наблюдался только при легировании алмаза бором. При легировании алмаза фосфором такого перехода достичь еще не удалось [15]. Поэтому сравнение характеристик алмаза при низком уровне легирования с другими полупроводниковыми материалами является не совсем корректным [16]. Действительно, при низком уровне легирования слои алмаза обладают достаточно

большим удельным сопротивлением. Для понижения сопротивления увеличивают уровень легирования. При этом понижается как подвижность носителей, так и пробойные характеристики. В работе [16] с учетом этих факторов сделан расчет параметров диода Шоттки, необходимых для получения низкого сопротивления диода и высоких пробойных напряжений. При этом результаты расчета отличаются от результатов, полученных для характеристик алмаза при низком уровне легирования.

При создании электронного прибора необходимо вырастить структуру, содержащую несколько слоев алмаза с различным уровнем легирования. Для этого наиболее подходит плазмохимический метод осаждения алмаза из газовой фазы — CVD (chemical vapor deposition) метод [17], так как он в отличие от других методов позволяет в слоистой алмазной структуре варьировать уровни легирования в широком диапазоне. Осаждение алмаза осуществляется в плазмохимических реакторах на основе СВЧ резонаторов, возбуждаемых на частоте  $2.45 \text{ GHz}$  [18]. Внутри резонатора создается плазма в газовой смеси при давлении  $30\text{--}500 \text{ Torr}$ . Газовая смесь состоит из водорода с небольшой добавкой метана. В результате достаточно сложной последовательности как объемных, так и поверхностных химических реакций на подложке осаждается CVD-алмаз. Для получения легированного алмаза в газовую смесь добавляются газы, содержащие бор или фосфор.

В настоящей работе представлены результаты исследования легирования алмаза бором и фосфором и создание алмазных структур, содержащих последовательность таких слоев. Приведены результаты создания и исследования прототипов нескольких электронных приборов, сформированных на алмазных структурах: диода Шоттки,  $pn$ -диода Шоттки,  $p$ – $i$ – $n$ -диода и полевого

транзистора. Исследованы транспортные характеристики этих приборов.

## 1. Методика эксперимента

Все эпитаксиальные слои структур, легированных бором и фосфором, выращивались в CVD-реакторе, разработанном в ИПФ РАН и подробно описанном в работе [19]. Реактор представляет собой цилиндрический СВЧ резонатор с размещенной на его оси кварцевой трубкой, через которую прокачивается рабочая газовая смесь. Внутри трубы расположен держатель подложки, над которым излучением магнетрона на частоте 2.45 GHz создается плазма. Конструкция реактора позволяет быстро (за время менее 10 s) менять состав газовой смеси. Нелегированный алмаз выращивался в газовой смеси  $\text{H}_2 + \text{CH}_4$  (отношение  $\text{CH}_4/\text{H}_2 = 0.1-1\%$ ). Для выращивания слоев, легированных бором и фосфором, в рабочую газовую смесь добавлялся диборан ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) или фосфин ( $\text{PH}_3$ ). Основным преимуществом используемого реактора по сравнению с другими CVD-реакторами является то, что в нем плазма поддерживается в ламинарном безвихревом потоке газа, что способствует меньшему загрязнению реактора легирующей примесью во время осаждения сильно легированных слоев алмаза.

Алмазные структуры, легированные бором и фосфором, выращивались на подложках из алмаза типа Па с кристаллографической ориентацией (001) размером  $3.5 \times 3.5 \times 0.5 \text{ mm}$ , полученных НРПТ (high pressure high temperature) методом [20]. Перед процессом роста подложки механически шлифовались до шероховатости поверхности 0.2 nm, измеряемой с помощью интерферометра белого света Zygo NewView 7300 на площади  $0.22 \times 0.22 \text{ mm}$ . Для удаления дефектов, внесенных шлифовкой, с подложки стравливался слой толщиной  $5 \mu\text{m}$  в ICP (inductive coupled plasma) плазме (Oxford Instruments, Plasmalab 80) [21]. В результате для выращивания эпитаксиальных слоев CVD-алмаза использовалась бездефектная подложка с атомарно гладкой поверхностью.

Измерение концентрации бора и фосфора в выращенных алмазных структурах проводилось методом ВИМС (вторично ионная масс спектроскопия) на приборе TOFSIMS-5 (IONTOF) с раздельными функциями ионных пучков „распыление–зондирование“. Распыление осуществлялось ионами  $\text{Cs}^+$  с энергией 1 keV, зондирование  $\text{Bi}_3^+$  с энергией 25 keV. Регистрировались отрицательные вторичные ионы. Для определения концентрации атомов бора и фосфора использовались несколько линий, соответствующих разным ионам этих элементов, что позволило существенно увеличить точность измерения. Для количественной калибровки применялись тестовые образцы из монокристаллического алмаза (100), имплантированные ионами бора и фосфора. Глубина кратеров травления для пересчета времени травления в глубину анализа измерялась на интерференционных

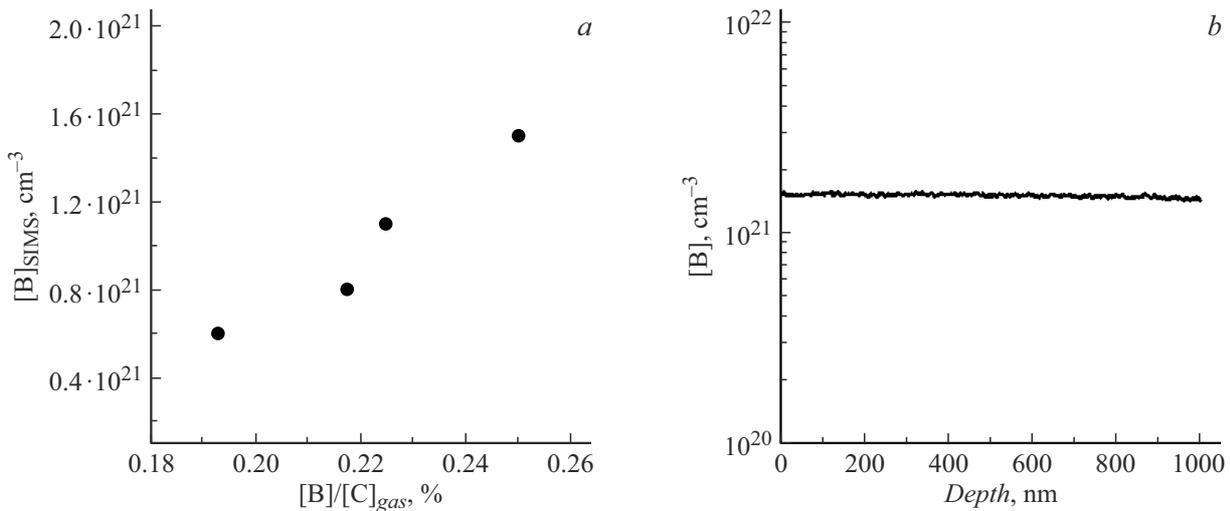
микроскопах белого света Talysurf CCI 2000 и Zygo NewView 7300.

## 2. Легирование алмаза

Для создания электронных приборов на алмазе необходимо вырастить структуру, состоящую из нескольких слоев с разным уровнем легирования. Для активных слоев требуемый уровень концентрации легирующей примеси находится в диапазоне  $10^{15}-10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , а для контактных слоев уровень концентрации легирующей примеси должен превышать  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Существует несколько методов легирования алмаза: ионная имплантация, метод температурного градиента при высоком давлении и температуре (НРПТ), CVD-метод осаждения в ректорах с горячими нитями и CVD-метод осаждения в ректорах с СВЧ резонаторами. Методом ионной имплантации удается легировать алмаз только бором, при этом значение удельного сопротивления выше, чем для слоев, получаемых CVD-методом, и при превышении пороговой дозы имплантации алмаз в отличие от кремния переходит в графит [1]. Метод высокого давления и температуры позволяет создавать толстые слои, легированные как бором, так и фосфором [22,23], но в этих слоях не удается получить высоких значений концентрации легирующей примеси. Так, при легировании бором максимальное значение концентрации примеси достигает величины  $10^{19}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , при этом минимальное удельное сопротивление составляет величину  $10 \Omega\cdot\text{cm}$  [22]. Легированные слои алмаза с наименьшим удельным сопротивлением удается получить только CVD-методом. В обоих типах CVD-реакторов (в микроволновом и с горячими нитями) удается получать слои, легированные бором с концентрацией  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  при удельном сопротивлении  $10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$ , и фосфором с концентрацией  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  с удельным сопротивлением  $70 \Omega\cdot\text{cm}$  [24]. При этом основным недостатком реакторов с горячими нитями является высокий уровень примесей металлов, который может оказывать влияние на характеристики электронных приборов.

### 2.1. Легирование алмаза бором

Легированию алмаза бором в процессе CVD-синтеза посвящено достаточно большое количество работ [24–27]. При легировании наблюдается высокое встраивание примесного атома бора в кристаллическую решетку алмаза, которая связана с близостью его ковалентного радиуса  $82 \text{ pm}$  к радиусу углерода  $77 \text{ pm}$ . Высокое встраивание затрудняет контролируемое легирование алмаза бором в диапазоне концентраций  $10^{15}-10^{17} \text{ cm}^{-3}$  из-за технических сложностей контроля малых газовых потоков и уровня загрязнения реактора бором в процессе его использования. При больших газовых потоках легирующей примеси в реакторе уровень легирования (концентрация примесного бора в



**Рис. 1.** Зависимость концентрации бора в эпитаксиальных CVD-слоях алмаза от содержания бора в газовой смеси (а). ВИМС профиль концентрации бора в легированном слое (b).

кристаллической решетке) насыщается. Для кристаллографической поверхности (001) насыщение наступает при уровне легирования  $1 \cdot 10^{21} - 3 \cdot 10^{21} cm^{-3}$ , при этом возрастает количество дефектов кристаллической решетки в легированных слоях, и они становятся не пригодными для создания приборных структур на их основе.

Нами было проведено исследование легирования алмаза бором при высоких уровнях легирования. При этом особое внимание уделялось получению слоев высокого качества с наименьшей шероховатостью поверхности и малым удельным сопротивлением. Алмазные слои, сильнолегированные бором, толщиной  $3-4 \mu m$  выращивались в реакторе при давлении газа 60 Торг и содержании метана в газовой смеси около 1%. На рис. 1, а показана полученная методом ВИМС зависимость концентрации бора в слоях от отношения В/С в газовой смеси. На рис. 1, b показан профиль концентрации бора в слое, полученном при отношении В/С в газовой смеси 0.25%. При дальнейшем увеличении содержания бора концентрация бора в слое практически не изменялась, а скорость роста алмаза, легированного бором, уменьшалась на порядок с  $1-2$  до  $0.1-0.2 \mu m/h$ , и сильно возрастала шероховатость поверхности. Для всех слоев, показанных на рис. 1, а, проводилось измерение электрофизических величин методом Холла и кривых качания для отражения (004) алмаза методом рентгеновской дифрактометрии на приборе Bruker D8 Discover. По сдвигу кривой качания слоя относительно кривой качания подложки определялась величина „структурной“ примеси бора, т.е. концентрация бора, заместившего углерод в решетке. При электрофизических измерениях регистрировался  $p$ -тип проводимости, удельное сопротивление уменьшалось от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-3} \Omega \cdot cm$  с ростом содержания бора в газовой смеси. Проведенные измерения „номинальной“ (ВИМС метод), „структурной“ (рентгеновской дифрак-

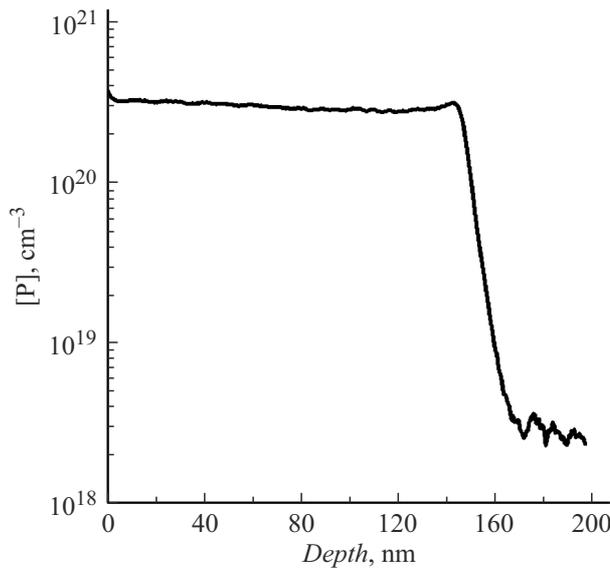
тометрия) и электрически активной (электрофизические измерения) концентраций бора в выращенных образцах показали их хорошее совпадение, т.е. в используемом режиме роста легированного алмаза практически весь встроившийся в алмаз бор был электрически активен.

Шероховатость поверхности алмазных слоев измерялась с помощью интерферометра белого света Zygo на площади  $0.22 \times 0.22 mm$ . Среднеквадратичная шероховатость поверхности на этой площади составляла величину  $0.3 nm$ . Среднеарифметическая шероховатость поверхности, измеренная вдоль произвольной линии, проведенной в области измерения среднеквадратичной шероховатости, составляла величину  $0.085 nm$ . Таким образом, в найденном режиме роста реализовывался рост кристалла алмаза в виде последовательного заполнения атомных плоскостей (step-flow) рост [28].

## 2.2. Легирование алмаза фосфором

Легирование алмаза фосфором в процессе CVD-синтеза является более сложной задачей по сравнению с легированием алмаза бором [29–31]. Это связано с большой разностью ковалентных радиусов фосфора ( $106 pm$ ) и углерода ( $77 pm$ ). В настоящее время наименьшее значение удельного сопротивления, полученное на подложках с кристаллографической ориентацией (111) [15], составляет величину  $70 \Omega \cdot cm$  при концентрации фосфора в алмазе  $10^{20} cm^{-3}$ . На подложках с ориентацией (001) в широком диапазоне концентраций примеси фосфора не удается получить заметного уровня проводимости.

Нами было проведено исследование легирования алмаза фосфором на подложках с кристаллографической ориентацией (111). В результате удалось найти режим, в котором достигается максимальная концентрация фосфора в алмазе. На рис. 2 показан профиль концентрации фосфора в выращенном слое, полученный при Р/С в



**Рис. 2.** ВМС профиль концентрации фосфора в легированном слое.

газовой смеси 50%, давлении 75 Торг и содержании метана в газовой смеси 0.1%. Концентрация фосфора в алмазе достигала величины  $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Электрофизические измерения, проведенные методом Холла, показали наличие n-типа проводимости в выращенном слое при удельном сопротивлении 5–7  $\Omega \cdot \text{см}$ .

В работе [32] был предложен способ создания на поверхности с кристаллографической ориентацией (001) областей, сильно легированных фосфором. На поверхности алмаза вытравливается канавка прямоугольной формы шириной несколько микрон и глубиной несколько сотен нанометров (рис. 3, *a*). Затем канавка зарастивалась сильно легированным фосфором слоем в режиме роста, при котором происходит рост алмаза только в направлении [111], скорость роста в направлении [001] в этом режиме близка к нулю. В результате в канавке создается область, сильно легированная фосфором с уровнем проводимости таким же, как и в сильно легированных фосфором слоях на поверхности с ориентацией (111). Нами была реализована эта технология [33]. На рис. 3, *b* показан профиль поверхности алмаза с вытравленной канавкой шириной 9  $\mu\text{m}$  глубиной 250 nm и длиной 100  $\mu\text{m}$ , а на рис. 3, *c* профиль поверхности после ее зарастивания в режиме роста для поверхности (111).

### 3. Легированные алмазные структуры

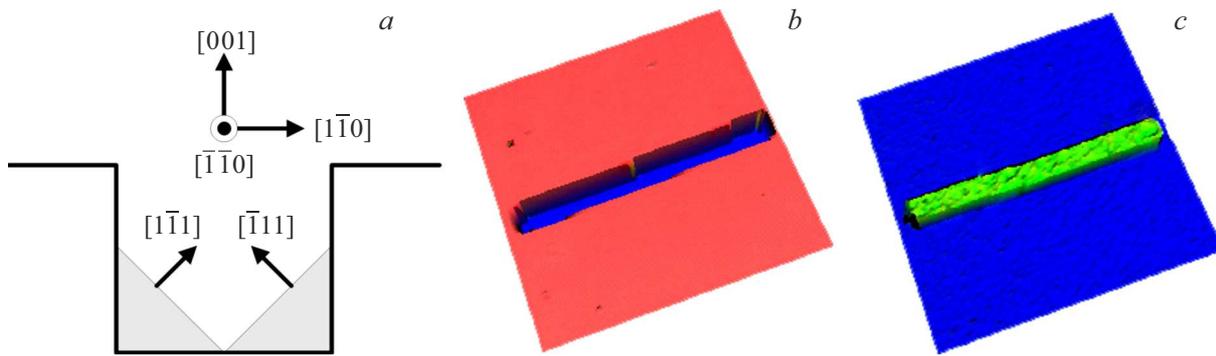
#### 3.1. Диод Шоттки

Одним из наиболее исследованных электронных приборов на алмазе является диод Шоттки [8,34–36]. Диод изготавливается в двух типах геометрий: в вертикальной и псевдовертикальной. При изготовлении диода в вертикальной геометрии используют НРНТ-подложку,

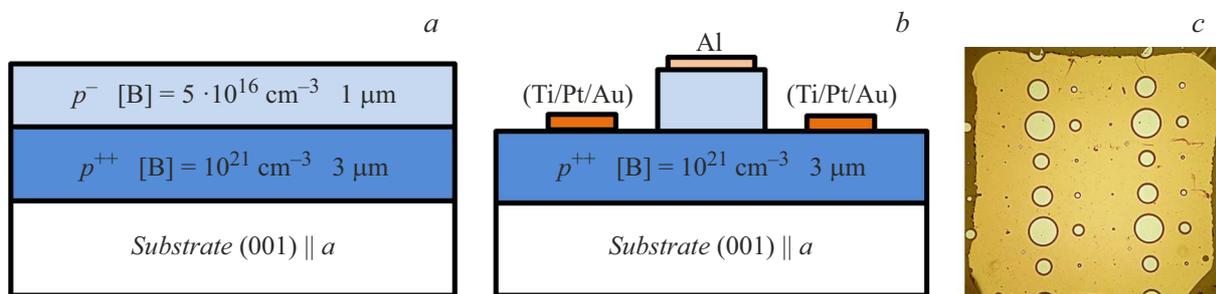
легированную бором. При изготовлении диода в псевдовертикальной геометрии на нелегированной НРНТ-подложке выращивают сильнолегированный слой алмаза. Как уже отмечалось, в легированных бором НРНТ-подложках не удается получить высоких уровней концентраций и низких значений удельного сопротивления [22]. Более того, в легированных бором НРНТ-подложках наблюдается большая плотность дислокаций — около  $10^6 \text{ см}^{-2}$  [37]. Поэтому перспективным выглядит создание диодов Шоттки в псевдовертикальной геометрии с использованием выращенных CVD-методом толстых сильно легированных алмазных слоев высокого кристаллического совершенства.

Структура, выращенная нами на непроводящей НРНТ-подложке, показана на рис. 4, *a*. Структура содержала два слоя: сильнолегированный бором слой толщиной 3  $\mu\text{m}$  и концентрацией  $10^{21} \text{ см}^{-3}$  и слаболегированный бором слой толщиной 1  $\mu\text{m}$  и концентрацией бора  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Для создания диода Шоттки в кислородосодержащей ИСР-плазме через металлическую маску вытравливалась мезоструктура для доступа к сильно легированному бором слою, на который наносились омические контакты Ti/Pt/Au (рис. 4, *b*). В качестве контакта Шоттки использовался алюминий. На рис. 4, *c* показана фотография поверхности алмаза с изготовленными диодами Шоттки.

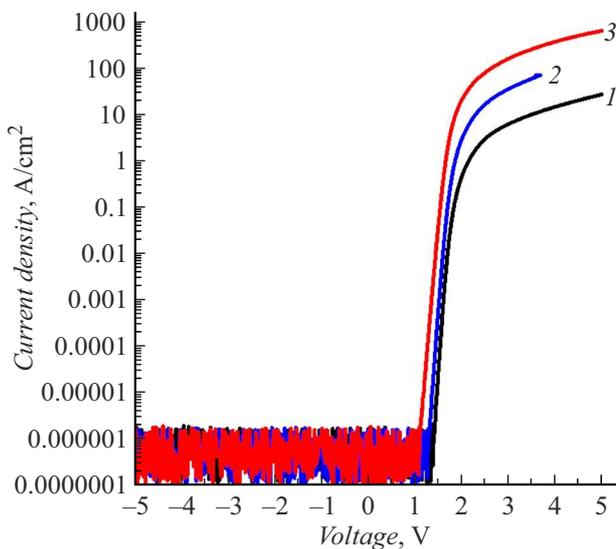
Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода, снятая при разных температурах образца, приведена на рис. 5. При напряжении 5 V плотность тока в прямом направлении в диоде диаметром 300  $\mu\text{m}$  достигала 30  $\text{A}/\text{cm}^2$  при комнатной температуре, при увеличении температуры до 110  $^\circ\text{C}$  плотность тока возрастала до 640  $\text{A}/\text{cm}^2$  из-за усиления термической активации примеси бора в слаболегированном слое. По приведенным ВАХ была сделана оценка величины барьера Шоттки и фактора идеальности диода. Величина барьера Шоттки была 1.8–1.9 eV, а фактор идеальности — 1.1. При включении диода в обратном направлении величина пробойного напряжения была 300 V, что соответствует пробойному полю 3  $\text{MV}/\text{cm}$ . Коэффициент выпрямления диода при напряжении  $\pm 5 \text{ V}$  превышал  $10^7$ . Следует отметить, что при включении диода в обратном направлении полученная плотность тока  $7 \cdot 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$  ( $5 \cdot 10^{-10} \text{ A}$ ) совпадала с пределом чувствительности измерительного прибора. Проведенные дополнительные измерения с более чувствительным прибором показали, что плотность обратного тока существенно ниже и составляет величину около  $10^{-11}$ – $10^{-10} \text{ A}/\text{cm}^2$  ( $10^{-14}$ – $10^{-13} \text{ A}$ ). Такая низкая плотность тока при включении диода в обратном направлении делает разработанный диод Шоттки перспективным при создании сверхчувствительных датчиков ионизирующего излучения, в которых этот ток определяет величину темнового тока датчика. Уменьшение темнового тока приводит к увеличению отношения сигнал/шум датчика ионизирующего излучения.



**Рис. 3.** Сечение канавки, вытравленной в алмазе. Стрелками показано направление роста алмаза в канавке (a). Профиль поверхности алмаза с вытравленной канавкой шириной  $9\ \mu\text{m}$  глубиной  $250\ \text{nm}$  и длиной  $100\ \mu\text{m}$  (b). Профиль поверхности алмаза с канавкой, заполненной алмазом, сильнолегированным фосфором (c).



**Рис. 4.** Схема алмазной структуры, состоящей из слоев с разным уровнем легирования (a). Схема диода Шоттки в псевдовертикальной геометрии (b). Фотография поверхности алмаза с изготовленными диодами Шоттки (c).



**Рис. 5.** ВАХ диода Шоттки диаметром  $300\ \mu\text{m}$  при разных температурах образца: 1 —  $21$ , 2 —  $51$ , 3 —  $110\ ^\circ\text{C}$ .

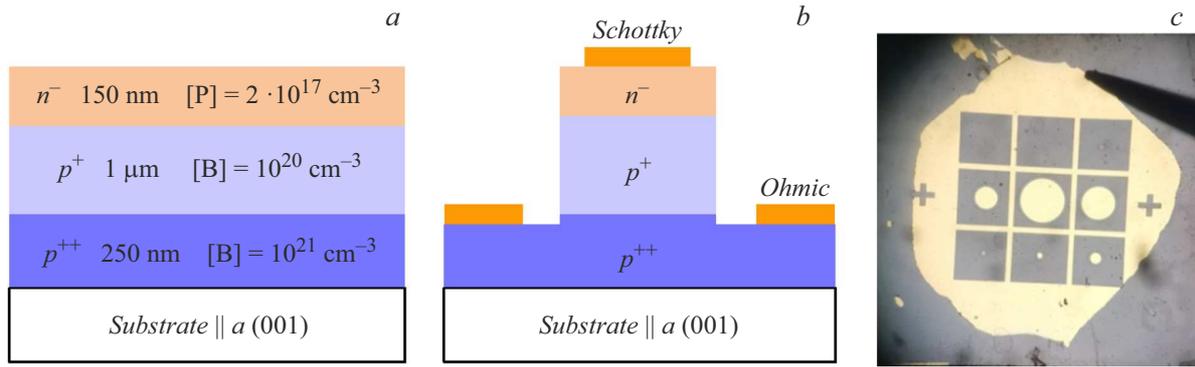
### 3.2. *pn*-диод Шоттки

Еще одним униполярным диодом на алмазе является *pn*-диод Шоттки (Schottky-*pn* diode) [38–40]. Основное отличие его от обычного диода Шоттки состоит в том,

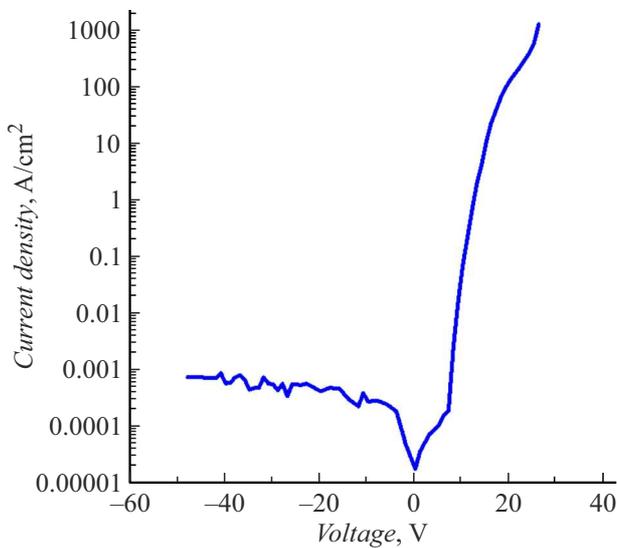
что активный слой легируют вместо бора фосфором с небольшой концентрацией. Толщину активного слоя и уровень легирования выбирают таким образом, чтобы фосфор в активном слое был полностью обеднен, и электроны проводимости не принимали участие в транспорте носителей заряда. Основное преимущество *pn*-диода Шоттки — в больших величинах пробойных полей при сохранении высокой плотности тока при включении диода в прямом направлении [39].

На рис. 6, a показана структура, выращенная нами на непроводящей НРНТ-подложке. Структура содержала три слоя: сильнолегированный бором толщиной  $250\ \text{nm}$  и концентрацией  $10^{21}\ \text{cm}^{-3}$ , легированный бором толщиной  $1\ \mu\text{m}$  и концентрацией  $10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ , и слаболегированный фосфором слой толщиной  $150\ \text{nm}$  и концентрацией фосфора  $2 \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ . Для создания *pn*-диода Шоттки вытравливалась мезоструктура для доступа к сильно легированному бором слою, на который наносились омические контакты Ti/Mo/Au (рис. 6, b). На поверхность слаболегированного слоя наносился состав Ti/Mo/Au, который при таких низких концентрациях фосфора образует на поверхности алмаза контакт Шоттки. На рис. 6, c показана фотография поверхности алмаза с изготовленными *pn*-диодами Шоттки.

На рис. 7 показана ВАХ диода. При напряжении  $20\ \text{V}$  в прямом направлении плотность тока в диоде достигала



**Рис. 6.** Схема алмазной структуры, состоящей из слоев, легированных бором и фосфором (а). Схема *pn*-диода Шоттки в псевдовертикальной геометрии (б). Фотография поверхности алмаза с изготовленными *pn*-диодами Шоттки (с).



**Рис. 7.** ВАХ *pn*-диода Шоттки.

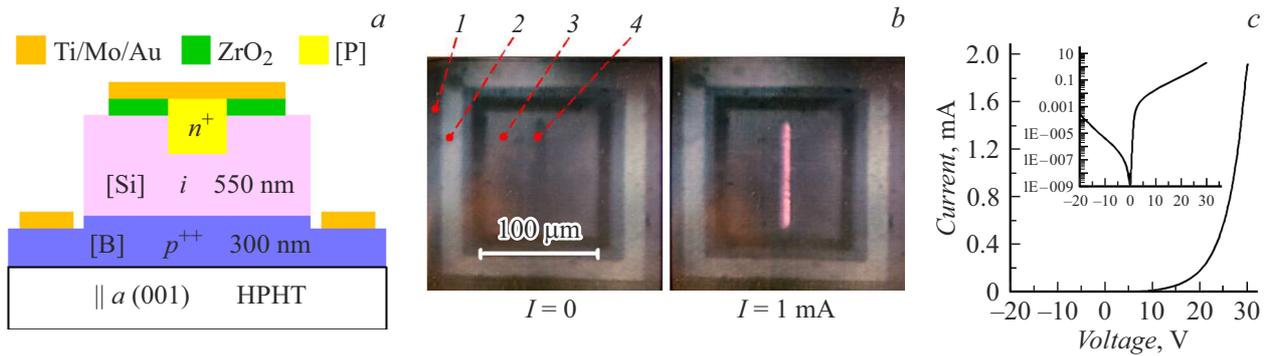
1 kA/cm<sup>2</sup> при комнатной температуре. По приведенным ВАХ была сделана оценка величины барьера Шоттки и фактора идеальности диода. Величина барьера Шоттки была 1.1–1.2 eV, а фактор идеальности — 8. При включении диода в обратном направлении величина пробойного напряжения была 90 V, что соответствует пробойному полю 6 MV/cm. Коэффициент выпрямления диода при напряжении ±20 V превышал 10<sup>7</sup>.

### 3.3. *p-i-n*-диод

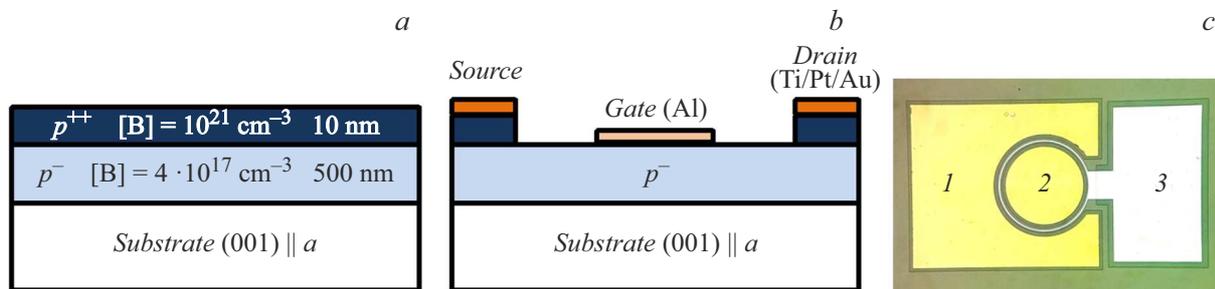
В алмазных *p-i-n*-диодах наибольшие значения плотности тока достигнуты при изготовлении диодов на подложках с кристаллографической ориентацией (111) [41,42] вследствие возможности сильного легирования алмаза фосфором для этой поверхности. При этом не удается получить высоких значений обратных напряжений из-за повышенной дефектности слоев, выращенных с кристаллографической ориентацией (111). Нами был предложен способ создания *p-i-n*-диода на

поверхности (001), где *n*-область представляет собой канавку прямоугольной формы, в которой селективно выращивается алмаз в режиме роста для поверхности (111) [33]. Ранее такие канавки использовались только для понижения контактного сопротивления к слоям, легированным фосфором, выращенным на поверхности (001) [43]. Одним из перспективных применений *p-i-n*-диода на алмазе является его использование в качестве источника одиночных фотонов [44]. Оптическое излучение в таком источнике формируется в результате электролюминесценции центра окраски, помещенного в *i*-области *p-i-n*-диода. Нами были проведены исследования электролюминесценции центров окраски азот-вакансия (NV-центр) в алмазном *p-i-n*-диоде [33], а также центра окраски кремний-вакансия (SiV-центр) в совмещенном диоде [45], представляющем собой параллельное соединение диода Шоттки и *p-i-n*-диода [46].

На рис. 8,а показана схема *p-i-n*-диода. Диод был сформирован из структуры, состоящей из сильно легированного бором слоя — *p*-область диода, и слоя, легированного кремнием — *i*-область диода (кремний в алмазе не является электрически активной примесью). Легирование кремнием проводилось для создания во внутренней области диода SiV-центров окраски. Для изоляции верхней части структуры от металлического контакта на нее наносился диэлектрик ZrO<sub>2</sub>. На рис. 8,б показаны фотографии *p-i-n*-диода при отсутствии тока и токе 1 mA, сделанные с помощью оптического микроскопа со стороны подложки. Светлая прямоугольная рамка 2 — омический контакт к *p*<sup>++</sup>-слою 1. Прямоугольная область 3 — омический контакт, нанесенный на мезоструктуру. Полоса в центре 4 — это *n*<sup>+</sup>-область диода. При протекании в диоде тока 1 mA (правая фотография) яркая светящаяся полоса — это область между *n*<sup>+</sup>-областью и *p*<sup>++</sup>-слоем, в которой происходит электролюминесценция SiV-центров. На рис. 8,с показана ВАХ *p-i-n*-диода. Диод открывался при напряжении 5 V. При напряжении 30 V в прямом направлении ток в диоде достигал величины 2 mA, что при ширине канавки 4 μm и длине 100 μm соответствует плотности тока 500 A/cm<sup>2</sup>. Насколько нам известно из



**Рис. 8.** Схема  $p-i-n$ -диода (а). Фотографии  $p-i-n$ -диода при отсутствии тока и токе 1 мА, сделанные с помощью оптического микроскопа со стороны подложки: 1 —  $p^{++}$ -слой, 2 — омический контакт Ti/Mo/Au к  $p^{++}$ -слою, 3 — омический контакт Ti/Mo/Au, нанесенный на мезоструктуру, 4 —  $n^+$ -область диода (b), ВАХ  $p-i-n$ -диода (c). Рисунок взят из работы [46].



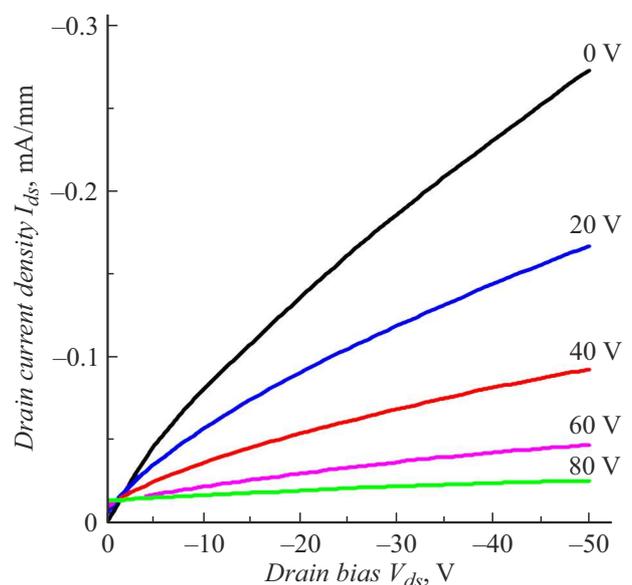
**Рис. 9.** а — схема алмазной структуры; b — схема полевого транзистора; с — фотография поверхности алмаза с изготовленным транзистором: 1 — исток, 2 — сток, 3 — затвор.

литературы, в  $p-i-n$ -диоде, изготовленных на подложках с ориентацией (001), такие высокие плотности тока еще не достигались. Получение высоких плотностей тока в  $p-i-n$ -диоде позволило существенно увеличить интенсивность излучения SiV-центров.

### 3.4. Полевой транзистор

В настоящее время наилучшие характеристики получены для полевых транзисторов на алмазе, использующих в качестве проводящего канала поверхностный гидрогенизированный (H-terminated) слой [47]. Однако параметры таких транзисторов ухудшаются со временем и деградируют при повышенных температурах [48]. Транзисторы с объемным проводящим каналом стабильны во времени, могут работать при высоких температурах, но их выходные характеристики уступают пока транзисторам на H-terminated слое.

На рис. 9, а показана структура, выращенная нами на непроводящей НРНТ-подложке. Структура содержала два слоя: слаболегированный бором слой толщиной 500 нм с концентрацией бора  $4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  и сильнолегированный бором слой толщиной 10 нм и концентрацией  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . Сильнолегированный слой использовался для понижения контактного сопротивления к слаболегированному слою. На него наносились омические контакты (Ti/Pt/Au). В области затвора сильнолегирован-



**Рис. 10.** Выходная характеристика транзистора.

ный слой стравливался в кислородосодержащей плазме. Затем на поверхность наносился затвор из алюминия (рис. 9, b). На рис. 9, с показана фотография поверхности алмаза с изготовленным полевым транзистором.

На рис. 10 показана выходная характеристика транзистора. При нулевом напряжении на затворе (транзистор полностью открыт) плотность тока достигала значения  $0.27 \text{ mA/mm}$ , которое сравнимо с наилучшими плотностями токов, полученных для полевых транзисторов на алмазе с объемным каналом проводимости [49]. С увеличением напряжения на затворе ток в канале транзистора уменьшается, но транзистор не переключается полностью. Это связано с утечками в затворе транзистора.

## Заключение

Проведены исследования легирования алмаза бором и фосфором в плазмохимическом реакторе с ламинарным потоком газа. Получены слои, сильнолегированные бором с концентрацией  $6 \cdot 10^{20} - 1.5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , имеющие низкое удельное сопротивление от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-3} \Omega\text{-cm}$  на подложках с кристаллографической ориентацией (001). Проведенные измерения „номинальной“ (ВИМС метод), „структурной“ (рентгеновская дифрактометрия) и электрически активной (электрофизические измерения) концентраций бора в выращенных образцах показали их хорошее совпадение. Получены слои, сильнолегированные фосфором с концентрацией  $3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  и удельным сопротивлением  $5 - 7 \Omega\text{-cm}$  на подложках с кристаллографической ориентацией (111). На основе таких слоев были выращены структуры для формирования алмазных приборов: диода Шоттки,  $pn$ -диода Шоттки,  $p-i-n$ -диода и полевого транзистора. Получены высокие значения пробойных полей до  $6 \text{ MV/cm}$  и плотностей токов до  $1 \text{ kA/cm}^2$  в таких приборах.

Исследованные нами электронные приборы на алмазе уже в настоящее время имеют характеристики, делающие их потенциально востребованными для различных применений. Так, в диодах Шоттки получены высокие плотности тока, что делает их перспективными для использования в сборках силовой электроники. В диоде Шоттки, изготовленном в псевдовертикальной геометрии, удалось получить низкие плотности тока — менее  $10^{-11} \text{ A/cm}^2$  при включении диода в обратном направлении, что делает его перспективным при создании сверхчувствительных датчиков ионизирующего излучения. Получение слоев, сильнолегированных фосфором, позволило реализовать  $p-i-n$ -диоды с высокой плотностью тока, изготовленные на поверхности алмаза с кристаллографической ориентацией (001). Проведенное исследование электролюминесценции NV- и SiV-центров окраски в разработанных диодах показало перспективность их использования для создания источников одиночных фотонов на основе этих центров окраски.

## Финансирование работы

Исследования легирования алмаза бором и фосфором, создание алмазных структур для диода Шоттки,  $pn$ -диода

Шоттки,  $p-i-n$ -диода, полевого транзистора, а также исследования их электрических характеристик выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00309, <https://rscf.ru/project/22-12-00309>, подготовка алмазных подложек и изучение дефектности алмазной поверхности были выполнены в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № FFUF-2024-0032.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S. Koizumi, H. Umezawa, J. Pernot, M. Suzuki. *Power Electronics Device Applications of Diamond Semiconductors* (Woodhead Publishing, Sawston, UK, 2018)
- [2] N. Donato, N. Rouger, J. Pernot, G. Longobardi, F. Udea. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53**, 093001 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/ab4cab
- [3] J. Pernot, C. Tavares, E. Gheeraert, E. Bustarret, M. Katagiri, S. Koizumi. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 122111 (2006). DOI: 10.1063/1.2355454
- [4] V. Mortet, M. Daenen, T. Teraji, A. Lazea, V. Vorliceck, J. D'Haen, K. Haenen, M. D'Olienslaeger. *Diam. Relat. Mater.*, **17**, 1330 (2008). DOI: 10.1016/j.diamond.2008.01.087
- [5] P. Muret, P.-N. Volpe, T.-N. Tran-Thi, J. Pernot, C. Hoarau, F. Omnés, T. Teraji. *Diam. Relat. Mater.*, **20**, 285 (2011). DOI: 10.1016/j.diamond.2011.01.008
- [6] A.V. Inyushkin, A.N. Taldenkov, V.G. Ralchenko, A.P. Bolshakov, A.V. Koliadin, A.N. Katrusha. *Phys. Rev. B*, **97**, 144305 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevB.97.144305
- [7] P.-N. Volpe, P. Muret, J. Pernot, F. Omnés, T. Teraji, Y. Koide, F. Jomard, D. Planson, P. Brosselard, N. Dheilily, B. Vergne, S. Scharnholz. *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 223501 (2010). DOI: 10.1063/1.3520140
- [8] H. Umezawa. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **78**, 147 (2018). DOI: 10.1016/j.mssp.2018.01.007
- [9] E. Gheeraert, S. Koizumi, T. Teraji, H. Kanda, M. Nesladek. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **174**, 39 (1999). DOI: 10.1002/(SICI)1521-396X(199907)174:1<39::AID-PSSA39>3.0.CO;2-E
- [10] M. Katagiri, J. Isoya, S. Koizumi, H. Kanda. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 6365 (2004). DOI: 10.1063/1.1840119
- [11] J. Pernot, S. Koizumi. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 052105 (2008). DOI: 10.1063/1.2969066
- [12] J. Pernot, P.N. Volpe, F. Omnes, P. Muret, V. Mortet, K. Haenen, T. Teraji. *Phys. Rev. B*, **81**, 205203 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.81.205203
- [13] E.P. Visser, G.J. Bauhuis, G. Janssen, W. Vollenberg, W.J.P. van Enckevort, L.J. Giling. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **4**, 7365 (1992). DOI: 10.1088/0953-8984/4/36/011
- [14] Y. Takano. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **21**, 253201 (2009). DOI: 10.1088/0953-8984/21/25/253201
- [15] T. Matsumoto, H. Kato, T. Makino, M. Ogura, D. Takeuchi, H. Okushi, S. Yamasaki. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53**, 05FP05 (2014). DOI: 10.7567/JJAP.53.05FP05
- [16] D. Eon, J. Canas. *Diam. Relat. Mater.*, **136**, 110032 (2023). DOI: 10.1016/j.diamond.2023.110032
- [17] J. Asmussen, D.K. Reinhard. *Diamond Films Handbook* (NY, USA; Basel, Switzerland, 2002)

- [18] F. Silva, K. Hassouni, X. Bonnin, A. Gicquel. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **21**, 364202 (2009). DOI: 10.1088/0953-8984/21/36/364202
- [19] A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, M.A. Lobaev, A.B. Muchnikov, D.B. Radishev, V.A. Isaev, V.V. Chernov, S.A. Bogdanov, M.N. Drozdov, J.E. Butler. *Phys. Status Solidi RRL*, **10** (4), 324 (2016). DOI: 10.1002/pssr.201510453
- [20] *New Diamond Technology*. Электронный ресурс. Режим доступа: ndtcompany.com
- [21] A.B. Muchnikov, A.L. Vikharev, J.E. Butler, V.V. Chernov, V.A. Isaev, S.A. Bogdanov, A.I. Okhapkin, P.A. Yunin, Y.N. Drozdov. *Phys. Status Solidi A*, **212** (11), 2572 (2015). DOI: 10.1002/pssa.201532171
- [22] V.S. Bormashov, S.A. Tarelkin, S.G. Buga, M.S. Kuznetsov, S.A. Terentiev, A.N. Semenov, V.D. Blank. *Diam. Relat. Mater.*, **35**, 19 (2013). DOI: 10.1016/j.diamond.2013.02.011
- [23] K. Boldyrev, S. Klimin, V. Denisov, S. Tarelkin, M. Kuznetsov, S. Terentiev, V. Blank. *Materials*, **15**, 9048 (2022). DOI: 10.3390/ma15249048
- [24] S. Ohmagari. *Functional Diamond*, **3** (1), 2259941 (2023). DOI: 10.1080/26941112.2023.2259941
- [25] A. Fiori, T. Teraji. *Diam. Relat. Mater.*, **76**, 38 (2017). DOI: 10.1016/j.diamond.2017.04.007
- [26] T. Teraji, H. Wada, M. Yamamoto, K. Arima, T. Ito. *Diam. Relat. Mater.*, **15**, 602 (2006). DOI: 10.1016/j.diamond.2006.01.011
- [27] P.-N. Volpe, J.-C. Arnault, N. Tranchant, G. Chicot, J. Pernot, F. Jomard, P. Bergonzo. *Diam. Relat. Mater.*, **22**, 136 (2012). DOI: 10.1016/j.diamond.2011.12.019
- [28] M. Ogura, H. Kato, T. Makino, H. Okushi, S. Yamasaki. *J. Cryst. Growth*, **317**, 60 (2011). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2011.01.010
- [29] S. Koizumi, T. Teraji, H. Kanda. *Diam. Relat. Mater.*, **9**, 935 (2000). DOI: 10.1016/S0925-9635(00)00217-X
- [30] H. Kato, S. Yamasaki, H. Okushi. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 222111 (2005). DOI: 10.1063/1.1944228
- [31] H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, H. Okushi. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, 6189 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/20/S05
- [32] H. Kato, T. Makino, M. Ogura, N. Tokuda, H. Okushi, S. Yamasaki. *Appl. Phys. Exp.*, **2**, 055502 (2009). DOI: 10.1143/APEX.2.055502
- [33] M.A. Lobaev, D.B. Radishev, S.A. Bogdanov, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, V.A. Isaev, S.A. Kraev, A.I. Okhapkin, E.A. Arhipova, M.N. Drozdov, V.I. Shashkin. *Phys. Status Solidi RRL*, **14** (11), 2000347 (2020). DOI: 10.1002/pssr.202000347
- [34] N. Rouger, A. Marechal. *Energies*, **12**, 2387 (2019). DOI: 10.3390/en12122387
- [35] A. Traore, P. Muret, A. Fiori, D. Eon, E. Gheeraert, J. Pernot. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 052105 (2014). DOI: 10.1063/1.4864060
- [36] V.D. Blank, V.S. Bormashov, S.A. Tarelkin, S.G. Buga, M.S. Kuznetsov, D.V. Teteruk, N.V. Kornilov, S.A. Terentiev, A.P. Volkov. *Diam. Relat. Mater.*, **57**, 32 (2015). DOI: 10.1016/j.diamond.2015.01.005
- [37] D. Prikhodko, S. Tarelkina, V. Bormashova, A. Golovanova, M. Kuznetsov, D. Teteruk, N. Kornilov, A. Volkov, A. Buga. *J. Superhard Mater.*, **41** (1), 24 (2019). DOI: 10.3103/S1063457619010039
- [38] T. Makino, S. Tanimoto, Y. Hayashi, H. Kato, N. Tokuda, M. Ogura, D. Takeuchi, K. Oyama, H. Ohashi, H. Okushi, S. Yamasaki. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 262101 (2009). DOI: 10.1063/1.3159837
- [39] T. Makino, H. Kato, N. Tokuda, M. Ogura, D. Takeuchi, K. Oyama, S. Tanimoto, H. Okushi, S. Yamasaki. *Phys. Status Solidi A*, **207** (9), 2105 (2010). DOI: 10.1002/pssa.201000149
- [40] T. Makino, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, H. Okushi, S. Yamasaki. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, 090116 (2012). DOI: 10.1143/JJAP.51.090116
- [41] K. Oyama, S.-G. Ri, H. Kato, M. Ogura, T. Makino, D. Takeuchi, N. Tokuda, H. Okushi, S. Yamasaki. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 152109 (2009). DOI: 10.1063/1.3120560
- [42] H. Surdi, F.A.M. Koeck, M.F. Ahmad, T.J. Thornton, R.J. Nemanich, S.M. Goodnick. *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **69** (1), 254 (2022). DOI: 10.1109/TED.2021.3125914
- [43] H. Kato, T. Makino, M. Ogura, N. Tokuda, K. Oyama, D. Takeuchi, H. Okushi, S. Yamasaki. *Phys. Status Solidi A*, **207** (9), 2099 (2010). DOI: 10.1002/pssa.201000148
- [44] N. Mizuochi, T. Makino, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, H. Okushi, M. Nothaft, P. Neumann, A. Gali, F. Jelezko, J. Wrachtrup, S. Yamasaki. *Nat. Phot.*, **6**, 299 (2012). DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.75
- [45] M.A. Lobaev, D.B. Radishev, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, S.A. Bogdanov, V.A. Isaev, S.A. Kraev, A.I. Okhapkin, E.A. Arhipova, E.V. Demidov, M.N. Drozdov. *Phys. Status Solidi RRL*, **17** (3), 2200432 (2022). DOI: 10.1002/pssr.202200432
- [46] M.A. Lobaev, D.B. Radishev, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, S.A. Bogdanov, V.A. Isaev, S.A. Kraev, A.I. Okhapkin, E.A. Arhipova, E.V. Demidov, M.N. Drozdov. *Appl. Phys. Lett.*, **123**, 251116 (2023). DOI: 10.1063/5.0178908
- [47] K. Hiram, H. Sato, Y. Harada, H. Yamamoto, M. Kasu. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, 090112 (2012). DOI: 10.1143/JJAP.51.090112
- [48] H. Kawarada, H. Tsuboi, T. Naruo, T. Yamada, D. Xu, A. Daicho, T. Saito, A. Hiraiwa. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 013510 (2014). DOI: 10.1063/1.4884828
- [49] J. Liu, T. Teraji, B. Da, H. Ohsato, Y. Koide. *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **67** (4), 1680 (2020). DOI: 10.1109/TED.2020.2972979