

Измерения удельного сопротивления легированных азотом монокристаллов алмаза типа Ib методом Ван дер Пау с контактами Ti–Pt в интервале температур 573–1000 К

© С.Г. Буга¹, Г.М. Квашнин¹, М.С. Кузнецов¹, Н.В. Корнилов¹, Н.В. Лупарев¹, М. Яо²

¹Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, 108840 Москва, Троицк, Россия

²Государственная ведущая лаборатория сверхтвердых материалов, Цзилинь университет, 130012 Чанчунь, КНР

E-mail: buga@tisnum.ru

Поступила в Редакцию 20 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 2 июня 2023 г.

Принята к публикации 26 июня 2023 г.

Методом Ван дер Пау в диапазоне температур 573–1000 К определены значения удельного электрического сопротивления квадратных алмазных пластин, легированных азотом в виде *C*-центров с концентраций 5; 55; 140 млн⁻¹. По результатам анализа первичных данных измерений рассчитаны значения удельного сопротивления в приближении точечных омических Ti–Pt-контактов, а также с учетом реальных размеров треугольных угловых контактов. Установлено, что вплоть до значения температуры 930 ± 50 К расхождения в значениях удельного сопротивления, полученные тремя различными способами анализа экспериментальных данных, не превышают 3–7%. Ti–Pt-контакты могут быть пригодны для применения в микроэлектронных и квантовых оптоэлектронных устройствах на основе алмазов, легированных азотом.

Ключевые слова: полупроводниковый алмаз *n*-типа, легирование азотом, омические контакты, удельное сопротивление.

DOI: 10.21883/FTP.2023.05.56206.4748

1. Введение

Полупроводниковые монокристаллы алмаза и многослойные структуры на их основе находят все более широкие области применений в электронике, квантовой оптоэлектронике и сенсорике [1–13]. Например, легированные бором алмазы используются в силовых и высокочастотных диодах Шоттки [1–4], а также в преобразователях энергии β -излучения радиоактивных изотопов в электрическую энергию [5]. В биполярных алмазных полупроводниковых устройствах чаще всего используются слои, объемно-легированные бором с дырочным типом проводимости, и слои с электронным типом проводимости, легированные фосфором [6]. В настоящее время фосфор является основной легирующей примесью донорного типа, поскольку энергия активации атомов фосфора в решетке алмаза ниже, чем у других донорных атомов, и варьируется в диапазоне 0.3–0.5 эВ в зависимости от концентрации и степени компенсации [14]. Другим основным легирующим элементом донорного типа в алмазе является азот в виде одиночных атомов замещения (*C*-центры), но их энергия активации значительно больше, 1.7 эВ [15,16], что существенно ограничивает использование таких алмазов в активной электронике. Тем не менее монокристаллы алмаза, легированные азотом в виде *C*-центров (тип Ib в общепринятой классификации алмазов [17,18]), широко используются в качестве подложек для изготовления многослойных алмазных структур различного типа. Главным образом

это связано с тем, что процессы роста азотсодержащих монокристаллов алмаза хорошо отработаны и их стоимость существенно ниже по сравнению с высокочистыми нелегированными алмазами. При этом, несмотря на большую энергию активации азотных доноров, алмазы типа Ib уже эффективно используются не только в качестве пассивных элементов конструкции, но и в качестве активных слоев униполярных и биполярных устройств, работоспособных при комнатной температуре [7,8]. Благодаря высокой термической, химической, радиационной стойкости и механической прочности полупроводниковые алмазы представляют собой перспективные материалы для высокотемпературной и экстремальной электроники. В этой связи остаются актуальными исследования электрических и оптоэлектронных свойств различных легированных синтетических монокристаллов алмаза в широком диапазоне температур от криогенных до 800–900 К и более. Кроме того, металлические контакты необходимы к квантовым оптоэлектронным устройствам и сенсорам на основе азот-вакансионных центров, таких как однофотонные источники света, квантовые компьютеры и средства телекоммуникации [9,10], сверхчувствительные магнитометры, спиновые гироскопы и т.п. [11–13]. Применение наноразмерных металлических контактов к таким устройствам на основе легированных азотом алмазов важно для развития их функциональных параметров. В связи с этим изготовление металлических контактов к алмазам типа Ib и исследование их характеристик остается актуальной проблемой.

Для алмазов дырочного типа проводимости уже хорошо отработана технология изготовления омических металлических контактов с низким контактным сопротивлением. Для этого в основном применяется двух- или трехслойная металлизация на основе карбидообразующих металлов, в первую очередь титана с промежуточной высокотемпературной карбидизацией, и последующим нанесением слоев платины и золота [19–22]. Контакты, изготовленные таким же способом к алмазам донорного типа легирования, также являются в достаточно высокой степени омическими, но еще недостаточно информации о величине контактного сопротивления и влияния на него степени легирования алмазов. Таким образом, задача исследования электрических свойств монокристаллов алмазов *n*-типа в широком диапазоне температур до 1000 К и более, и изготовления к ним стабильных омических и выпрямляющих металлических контактов до сих пор остается актуальной.

Стандартным и удобным методом измерения удельного сопротивления и коэффициента Холла полупроводниковых материалов является четырехконтактный метод Ван дер Пау [23]. Для прецизионных измерений этим методом требуется изготовление низкоомных контактов. Однако в связи с незначительной работой выхода электронов в алмазах *n*-типа изготовление таких контактов, стабильных в диапазоне температур до 1000 К, остается сложной задачей.

Настоящая работа посвящена анализу влияния угловых Ti–Pt-контактов конечных размеров, изготовленных на поверхности тонких квадратных пластин синтетических монокристаллов алмазов типа Ib с различной концентрацией азота, на результаты измерения удельного сопротивления методом Ван дер Пау в диапазоне температур 573–1000 К.

2. Экспериментальные образцы и методики измерений

Исследования проводились на трех образцах, вырезанных из синтетических монокристаллов Ib с различной концентрацией азотных *S*-центров. Два исходных монокристалла были выращены методом температурного градиента при высоком давлении (TG-HPHT) [24,25]. Еще один — методом гомоэпитаксиального роста из газовой фазы (CVD-метод) [2,26] на подложке в виде пластины, вырезанной из монокристалла, изготовленного методом TG-HPHT. После CVD-роста подложка была отделена от выращенного слоя толщиной 0.25 мм методом лазерной резки. Все три образца в виде тонких пластин квадратной формы кристаллографической ориентации (100) были вырезаны из исходных кристаллов методом лазерной резки, а затем механически отполированы. Возможные поверхностные загрязнения, обусловленные механической полировкой, были удалены травлением в кипящей „царской водке“ в течение 2 ч с последующей

Размеры экспериментальных образцов, концентрации *S*-центров и относительная суммарная площадь металлических контактов *A*, %

Номер образца	Размеры, мм ³	<i>A</i> , %	<i>N_S</i> , млн ⁻¹
1	4.0 × 4.0 × 0.43	22	140
2	2.6 × 2.6 × 0.25	9	55
CVD	2.5 × 2.5 × 0.25	12	5

отмывкой в деионизованной воде и отжигом в атмосфере при $T = 680^\circ\text{C}$ в течение 20 мин.

Концентрация *S*-центров в пластинах, изготовленных из монокристаллов, выращенных HPHT-методом, определялась методом ИК-спектроскопии, а в пластине, изготовленной методом CVD, — по поглощению в видимом диапазоне [17]. Размеры образцов, концентрация *S*-центров и относительная суммарная площадь металлических контактов приведены в таблице.

После спектроскопических исследований на одной из больших поверхностей пластины площадью *S* через контактные маски методом магнетронного напыления наносились угловые Ti-контакты толщиной 5 нм. После этого для получения подслоя карбида титана производился отжиг при $T = 650^\circ\text{C}$ в течение 20 мин. Далее напылялся слой Pt толщиной 200 нм, который предотвращает окисление титана на воздухе и имеет хорошую адгезию при последующем нагреве в процессе измерений в диапазоне до 1000 К. К изготовленным контактным площадкам методом термокомпрессионной сварки приваривались электрические выводы в виде золотых проволочек диаметром 40 мкм. Фотографии изготовленных образцов с контактными площадками и приваренными микропроводами приведены на рис. 1. Для оценки степени влияния суммарной площади контактов *S_c* на точность определения реального удельного сопротивления ρ образцов были использованы коэффициенты относительной площади контактов $A = S_c/S$, которые приведены в таблице в % выражении.

Электрические измерения производились четырехконтактным методом Ван дер Пау с помощью установки LakeShoreTM Cryotronics 7707A HMS. Нагрев образцов производился в атмосфере аргона в герметичном нагревателе Linkam-1000TS, обеспечивающем максимальную температуру 1000°C.

Расчет удельного сопротивления образцов ρ по первичным экспериментальным данным производился по методу Ван дер Пау тремя способами. В первом способе для расчета ρ_1 использовался собственный программный алгоритм установки LakeShoreTM Cryotronics 7707A HMS, который предполагает измерение образцов с „точечными“ угловыми омическими контактами, т.е. с суммарной площадью *S_c*, существенно меньшей площади образца, т.е. $A \ll 1$. В действительности в нашем эксперименте это условие в основном не выполнялось, что

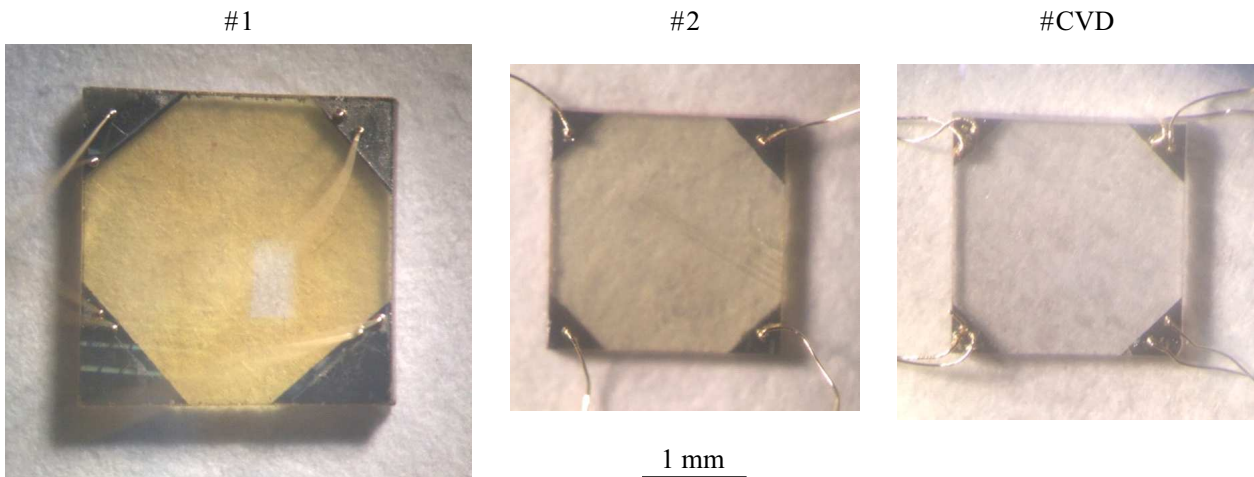


Рис. 1. Образцы квадратных пластин, вырезанные из монокристаллов алмаза, легированных азотом, с угловыми контактами различных размеров и с приваренными золотыми микропроводами для измерений удельного электрического сопротивления по методу Ван дер Пау.

заведомо приводило к дополнительной систематической погрешности в определении удельного сопротивления образцов.

Расчет ρ_2 вторым способом производился по уточненной формуле метода Ван дер Пау [23] с использованием полного набора полученных экспериментальных данных $R_{ij,kl}$:

$$\rho_2^{ij,kl} = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_{ij,kl} + R_{jk,li}}{2} \left[1 - \frac{\ln 2}{2} \left(\frac{R_{ij,kl} - R_{jk,li}}{R_{ij,kl} + R_{jk,li}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где d — толщина алмазной пластины. Индексы ij и kl циклично принимали значения 1, 2, 3, 4. Усреднение ρ_2 проводилось по всем четырем парам контактов.

Для определения ρ_3 третьим способом были использованы результаты моделирования распределений линий тока и эквипотенциальных поверхностей в исследуемых образцах с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics™. При моделировании учитывались реальные геометрические размеры всех контактных площадок и их взаимное расположение на каждом из образцов. Для расчета удельного сопротивления мы использовали линейное соотношение

$$R_{ij,kl} = \frac{U_{ij}}{I_{kl}} = \rho_2 F_{ij,kl}, \quad (2)$$

где U_{ij} — наведенная разность потенциалов между контактами i и j , I_{kl} — ток, задаваемый внешним источником через контакты k и l , $F_{ij,kl}$ — форм-фактор, зависящий от размеров, формы и местоположения контактов образца, ij и kl — циклично изменяющиеся от 1 до 4 индексы. Вначале при моделировании конкретного образца задавалось некоторое пробное значение удельного сопротивления, определенное 1-ым способом, например, ρ_0 . Затем определялись соответствующие ему значения

$R_{ij,kl}^0$. Далее форм-фактор образца рассчитывался по формуле

$$F_{ij,kl} = \frac{R_{ij,kl}^0}{\rho_0}. \quad (3)$$

Затем по формуле

$$\rho_{ij,kl}^{\text{exp}} = \frac{R_{ij,kl}^{\text{exp}}}{F_{ij,kl}} \quad (4)$$

рассчитывалось экспериментальное удельное сопротивление алмазной пластины для каждой четверки контактов (ij, kl). Окончательная величина ρ_3 определялась как среднее четырех значений $\rho_{ij,kl}^{\text{exp}}$.

Таким образом, в третьем способе при расчете ρ_3 не требуется выполнение условия $A \ll 1$. В результате моделирования были получены диаграммы распределения электрического потенциала V и линий плотности электрического тока J на поверхности всех исследованных образцов в диапазоне температур 573–1000 К. На рис. 2 приведены примеры таких распределений для образцов 1 (а) и 2 (б) при $T = 700$ К. Аналогичные распределения в объеме образцов незначительно отличаются от распределений на поверхности.

Красный и синий цвета на рис. 2 указывают на области с положительным и отрицательным потенциалом соответственно. Интенсивность цвета отображает величину потенциала в вольтах в соответствии с правой вертикальной цветовой шкалой. Белые протяженные области на рис. 2 — это области нулевого потенциала. Для образца 2 эта линия заметно смещена к электродам справа, площадь которых заметно больше площади контактов слева. Такая заметная неоднородность распределения потенциала в образце приводит к существенному различию в измеряемых наведенных потенциалах на смежных парах контактов. Помимо

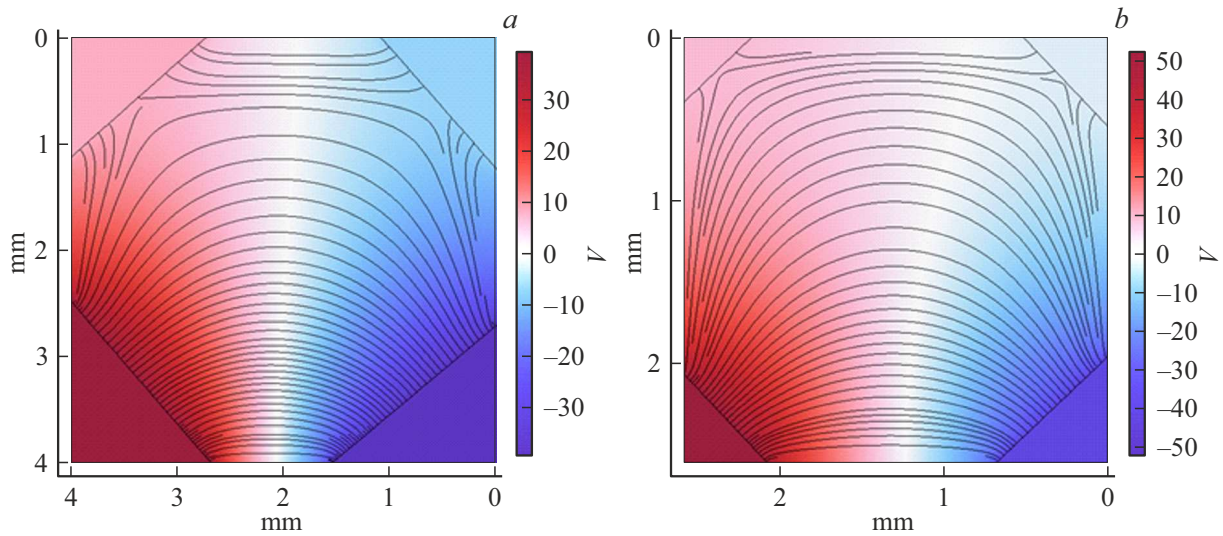


Рис. 2. Модели распределения электрического потенциала V и линий плотности тока J на поверхности образцов 1 (a) и 2 (b) при $T = 700$ К. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

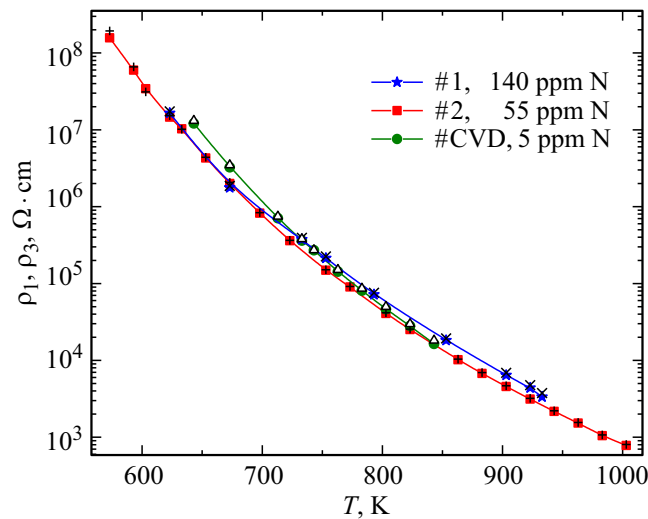


Рис. 3. Температурные зависимости удельных сопротивлений ρ_1 (цветные маркеры), полученные на установке LakeShoreTM Cryotronics 7707A HMS в приближении „идеальных точечных контактов“, и ρ_3 (черные маркеры), рассчитанные при моделировании в COMSOL MultiphysicsTM с учетом реальных размеров образцов и контактов.

неточечности контактов, это также приводит к дополнительной погрешности, вызванной их неодинаковыми размерами.

3. Экспериментальные результаты и их анализ

На рис. 3 приведены температурные зависимости удельного сопротивления исследованных образцов, определенные по методу Ван дер Пау, описанными выше способами 1 и 3.

Как видно из рис. 3, для всех трех измеренных образцов удельные сопротивления, определенные способами 1

и 3, очень близки друг к другу. Для более детального выяснения влияния размеров контактов и методов расчета на удельное сопротивление были построены температурные зависимости отношений ρ_2/ρ_1 , ρ_3/ρ_1 и ρ_3/ρ_2 (рис. 4). Расхождения между полученными зависимостями отображают влияние использованных в данной работе методик расчетов на величину определяемого удельного сопротивления образца.

Как видно из приведенных графиков на рис. 4, во всех трех образцах удельное сопротивление ρ_2 , рассчитанное по формуле (1) с использованием полного набора экспериментальных данных, несколько выше значений ρ_1 , определяемых с помощью встроенного алгоритма экспериментальной установки. Наибольшее

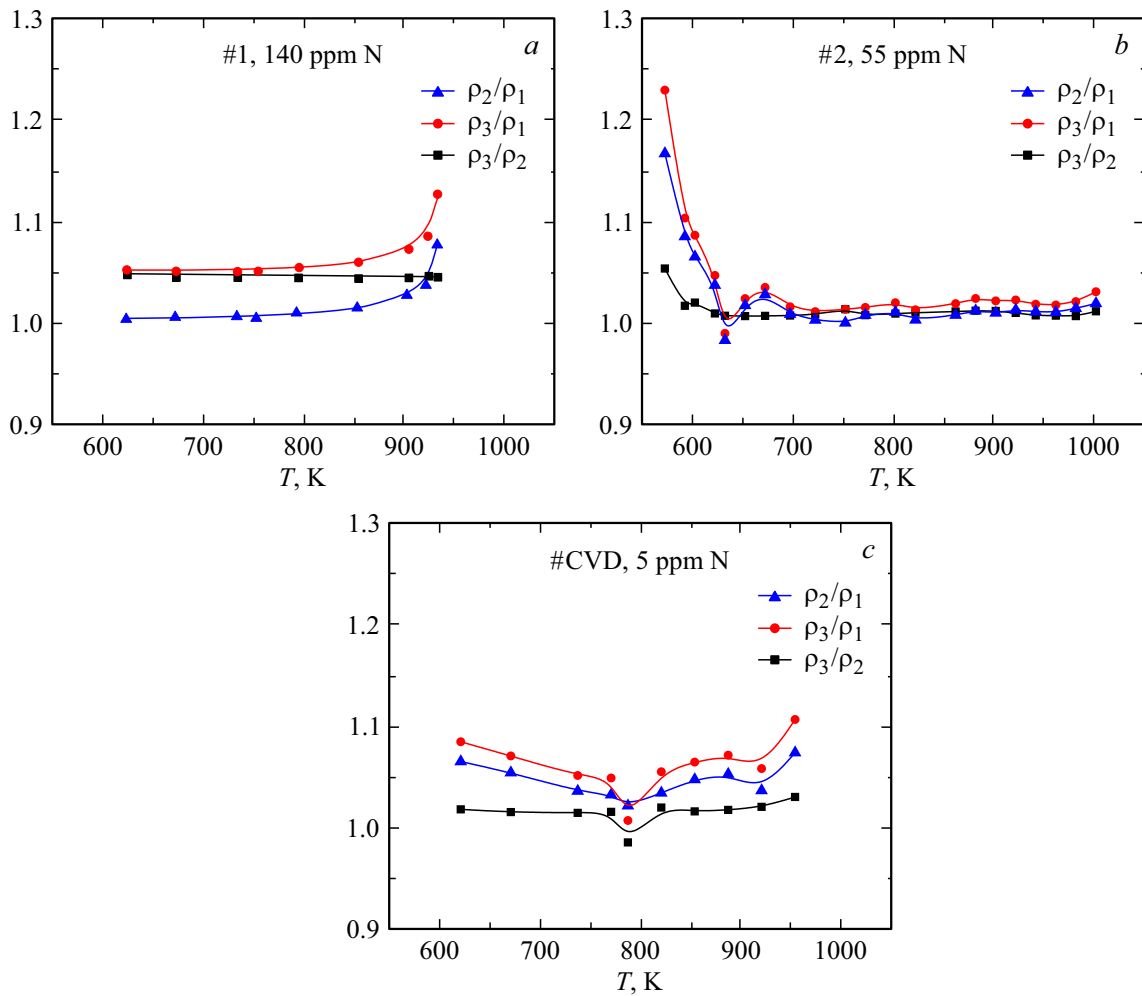


Рис. 4. Температурные зависимости отношений удельных электрических сопротивлений, полученных по методу Ван дер Пау тремя способами для трех исследованных образцов 1 (а), 2 (b) и CVD (с).

отклонение наблюдается на краях диапазонов измерений, особенно при $T < 600$ К для образца 2, что может быть обусловлено очень большим сопротивлением образца ниже этой температуры и большой погрешностью измерений из-за утечек тока в подводящих кабелях. При $T > 830$ К в образце CVD и при $T > 900$ К в образце 1 также наблюдается увеличение отношения ρ_2/ρ_1 до ~ 1.08 . После завершения экспериментов было выявлено частичное отслаивание металлизации контактов, что ухудшает их свойства. В зависимости от индивидуальных особенностей образцов этот процесс начинается при температурах 850–930 К. Основной причиной отслаивания является различие в коэффициентах теплового расширения алмаза и платины. Как правило, при температурах > 1030 К, происходит полное разрушение контактов. Между указанными температурными границами снизу (600–650 К) и сверху (850–930 К) для всех трех образцов величина ρ_2 больше ρ_1 на 1–5%. Минимальное наблюдаемое различие $\sim 1\%$ можно считать систематической погрешностью измерений самого прибора при выполнении обработки исходных

экспериментальных данных, поскольку в данных способах нахождения удельного сопротивления по методу Ван дер Пау применяются одинаковые допущения относительно формы измеряемых образцов и контактов к ним. Более высокие значения отклонений следует рассматривать как индивидуальные особенности каждого конкретного образца.

Наибольшее расхождение до 7% вне границ диапазонов измерений наблюдается при сравнении экспериментальных значений ρ_1 с расчетными значениями ρ_3 , полученными при моделировании с учетом реальных размеров контактов к образцам. Особенно это заметно для образца 1 (рис. 2, а). При этом систематически величина отношений ρ_3/ρ_2 меньше, чем ρ_3/ρ_1 для всех трех образцов. Отношения ρ_3/ρ_2 наиболее близки к 1. Максимальное значение отношения ~ 1.05 во всем диапазоне измерений наблюдается для образца 1 с наибольшими размерами контактов. Для образцов 2 и CVD эта величина составляет 1.01–1.03, за исключением отдельной точки 1.06 при $T = 573$ К в образце 2. Погрешность измерений до 5%, обусловленная конечностью размеров

и качеством контактов, является допустимой для таких измерений.

Контакты Ti–Pt хорошо зарекомендовали себя как омические и механически прочные для алмазов с дырочным типом проводимости [19–21], но в случае алмазов *n*-типа, легированных азотом, такой информации еще недостаточно. В связи с этим проведенные в данной работе исследования позволяют оценить пригодность изготовленных контактов Ti–Pt как с точки зрения их электрических свойств, так и с точки зрения термической стабильности. Сравнение результатов расчета удельного сопротивления ρ_2 в приближении „идеальных точечных контактов“ с ρ_3 , полученного путем численного моделирования распределения токов протекания и наведенных потенциалов в схеме Ван дер Пау, показывает хорошее согласие. Различие в значениях ρ_2 и ρ_3 в пределах 2–5% в широком диапазоне температур может быть обусловлено как реальными размерами контактов, так и их контактным сопротивлением. Влияние размеров угловых контактов на поверхности квадратных образцов на величину удельного сопротивления, полученного методом Ван дер Пау, было исследовано ранее в работе [27]. Показано, что коэффициент коррекции k , в нашем случае равный отношению ρ_3/ρ_2 , для контактов, подобных образцу 1, должен составлять ~ 1.03 , а для таких, как на образцах 2 и CVD, — ~ 1.015 . Такие значения очень близки к полученным в наших экспериментах, особенно для образцов 2 и CVD. Дополнительное отклонение $\sim 2\%$ для образца 1, возможно, обусловлено неидеальным качеством контактов. В целом значения 1.03 и 1.05 могут применяться как корректирующие факторы при измерениях удельного сопротивления методом Ван дер Пау образцов квадратной формы с треугольными угловыми Ti–Pt-контактами, аналогичными изготовленным на образцах 2, CVD и 1 соответственно, при обработке исходных экспериментальных данных по уточненной формуле метода Ван дер Пау (1). При использовании внутреннего алгоритма обработки данных в установке LakeShore™ Cryotronics 7707A HMS коэффициент коррекции составляет 1.03–1.07 в основном температурном диапазоне измерений, но может достигать значений 1.1–1.25 в начале и в конце диапазона 573–1000 К. Верхний температурный предел стабильной работы Ti–Pt-контактов к легированным азотом алмазам составляет 900 ± 50 К.

4. Заключение

Экспериментальные значения удельного электрического сопротивления ρ_1 трех экспериментальных образцов легированных азотом монокристаллов алмазов типа Ib в диапазоне температур 573–1000 К, определенные по методу Ван дер Пау программным алгоритмом установки LakeShore™ Cryotronics 7707A HMS в приближении точечных электрических контактов, в среднем на 3–7% меньше, чем рассчитанные ρ_3 в

программном пакете COMSOL Multiphysics™ с учетом их конечных размеров. Также значения ρ_1 в среднем на 3–5% меньше, чем рассчитанные величины удельного сопротивления ρ_2 для случая „идеальных“ точечных контактов, но с использованием более полного набора экспериментальных данных. Полученные на основании проведенных исследований значения коэффициента коррекции $k = \rho_3/\rho_2 = 1.02–1.05$ хорошо соответствуют теоретически рассчитанным ранее значениям 1.015–1.03 [27] для образцов любого типа. Это подтверждает высокую точность проведенного моделирования в легированных азотом полупроводниковых алмазах *n*-типа проводимости в широком диапазоне температур с концентраций С-центров азота 5–140 млн⁻¹ и, соответственно, удельных сопротивлений от $8 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^8$ Ом·см. Различие между экспериментальными и расчетными значениями удельных сопротивлений, достигающее 20% при $T < 630$ К, может указывать на влияние токов утечки через изоляционные материалы в схеме подключения образцов с электрическим сопротивлением более ~ 10 ГОм.

Контакты Ti–Pt пригодны для проведения электрических измерений легированных азотом Ib-алмазов методом Ван дер Пау ниже температуры 900 ± 50 К. Также контакты Ti–Pt можно предложить в качестве токовых и потенциальных терминалов в микроэлектронных и квантовых оптоэлектронных устройствах на основе алмазов типа Ib.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C.J.H. Wort, R.S. Balmer. *Materials Today*, **11**, 23 (2008).
- [2] S. Koizumi, H. Umezawa, J. Pernot, M. Suzuki. *Power Electronics Device Applications of Diamond Semiconductors. A volume in Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials* (Elsevier Ltd, Woodhead Publishing, 2018) p. 433.
- [3] N. Donato, N.C. Rouger, J. Pernot, G. Longobardi, F. Udre. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53** (9), 093001 (2019).
- [4] V.S. Bormashov, S.A. Terentiev, S.G. Buga, S.A. Tarelkin, A.P. Volkov, D.V. Teteruk, N.V. Kornilov, M.S. Kuznetsov, V.D. Blank. *Diamond Relat. Mater.*, **75**, 78 (2017).
- [5] V. Bormashov, S. Troschiev, A. Volkov, S. Tarelkin, E. Korostylev, A. Golovanov, M. Kuznetsov, D. Teteruk, N. Kornilov, S. Terentiev, S. Buga, V. Blank. *Phys. Status Solidi A*, **212** (11), 2539 (2015).
- [6] X. Zhang, T. Matsumoto, S. Yamasaki, C.E. Nebel, T. Inokuma, N. Tokuda. *J. Mater. Res.*, **36**, 4688 (2021).

- [7] T. Matsumoto, T. Mukose, T. Makino. *Diamond Relat. Mater.*, **75**, 152 (2017).
- [8] T. Matsumoto, T. Yamakawa, H. Kato, T. Makino, M. Ogura, X. Zhang, T. Inokuma, S. Yamasaki, N. Tokuda. *Appl. Phys. Lett.*, **119**, 242105 (2021).
- [9] S. Pezzagna, D. Rogalla, D. Wildanger, J. Meijer, A. Zaitsev. *New J. Phys.*, **13**, 035024 (2011).
- [10] L. Childress, R. Hanson. *MRS Bulletin*, **38**, 134 (2013).
- [11] L. Rondin, J.-P. Tetienne, T. Hingant, J.-F. Roch, P. Maletinsky, V. Jacques. *Rep. Progr. Phys.*, **77**, 056503 (2014).
- [12] V.V. Soshenko, S.V. Bolshedvorskii, O. Rubinas, V.N. Sorokin, A.N. Smolyaninov, V.V. Vorobyov, A.V. Akimov. *Phys. Rev. Lett.*, **126**, 197702 (2021).
- [13] E. Bernardi, R. Nelz, S. Sonusen, E. Neu. *Crystals*, **7**, 124 (2017).
- [14] I. Stenger, M.-A. Pinault-Thaury, N. Temahuki, R. Gillet, S. Temgoua, H. Bensalah, E. Chikoidze, Y. Dumont, J. Barjon. *J. Appl. Phys.*, **129**, 105701 (2021).
- [15] R. G. Farrer. *Solid State Commun.*, **7**, 685 (1969).
- [16] F.J. Heremans, G.D. Fuchs, C.F. Wang, R. Hanson, D.D. Awschalom. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 152102 (2009).
- [17] A.M. Zaitsev. *Optical properties of diamond: a data handbook* (Springer, Berlin–N.Y., 2001).
- [18] M.N.R. Ashfold, J.P. Goss, B.L. Green, P.W. May, M.E. Newton, C.V. Peaker. *Chem. Rev.*, **120** (12), 5745 (2020).
- [19] T. Tachibana, B.E. Williams, J.T. Glass. *Phys. Rev. B*, **45**, 11975 (1992).
- [20] M. Yokoba, Y. Koide, A. Otsuki, F. Ako, T. Oku, M. Murakami. *J. Appl. Phys.*, **81**, 6815 (1997).
- [21] Y.G. Chen, M. Ogura, S. Yamasaki, H. Okushi. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 860 (2005).
- [22] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдбург. *ФТП*, **41** (11), 1281 (2007).
- [23] I.J. van der Pauw. *Philips Res. Rep.*, **13**, 1 (1958).
- [24] Y.N. Palyanov, I.N. Kupriyanov, A.F. Khokhryakov, V.G. Ralchenko. *Cryst. Growth of Diamond*, Chap. 17 in *Handbook of Crystal Growth*, ed. by P. Rudolph (Elsevier B.V., 2015).
- [25] Y.N. Palyanov, Y.M. Borzdov, A.F. Khokhryakov, I.N. Kupriyanov. *A.G. Sokol. Cryst. Growth Des.*, **10**, 3169 (2010).
- [26] *Novel Aspects of Diamond. From Growth to Applications*, ed. by Nianjun Yang (Heidelberg, Springer Verlag GmbH, Germany, 2015).
- [27] I.J.R. Chwang, B.J. Smith, C.R. Crowell. *Solid State Electron.*, **17**, 1217, (1974).

Редактор Г.А. Оганесян

Measurements of resistivity of nitrogen-doped single crystals of type Ib diamond by the Van der Pauw method with Ti–Pt contacts in the temperature range 573–1000 K

S.G. Buga¹, G.M. Kvashnin¹, M.S. Kuznetsov¹, N.V. Kornilov¹, N.V. Luparev¹, M. Yao²

¹ Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, 108840 Moscow, Troitsk, Russia

² State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, 130012 Changchun, China

Abstract The electrical resistivity values of square diamond plates doped with nitrogen in the form of C-centers with concentrations of 5; 55; 140 ppm are measured by the Van der Pauw method in the temperature range of 573–1000 K. Based on the results of the analysis of the primary measurement data, the resistivity values are calculated in the approximation of point ohmic Ti–Pt contacts, as well as taking into account the actual dimensions of triangular angular contacts. It was found that up to the temperature limit of 930 ± 50 K the differences in the resistivity values obtained by three different methods of the experimental data analysis do not exceed 3–7%. Ti–Pt contacts may be used in microelectronic and quantum optoelectronic devices based on nitrogen-doped diamonds.