

УДК 621.315.592

В. И. Зубков, А. В. Соломникова, А. А. Егоренков  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Температурная зависимость концентрации носителей заряда в алмазе, легированном бором, с учетом зависимости энергии активации от концентрации

*Методами спектроскопии адмиттанса исследовались образцы монокристаллического полупроводникового алмаза, легированного бором до различных концентраций. Были измерены вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики образцов. Температурные спектры проводимости использовались для нахождения энергии активации примеси бора в алмазе. Вольт-фарадные характеристики, снятые при различных температурах и частотах тестового сигнала, использовались для определения профилей концентрации основных носителей заряда по глубине образцов. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют снижение энергии активации бора в алмазе с 340 до 220 эВ при увеличении степени легирования на два порядка: с  $5 \cdot 10^{16}$  до  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что хорошо коррелирует с данными, имеющимися в научной литературе. Также был проведен расчет температурной зависимости концентрации носителей заряда в алмазе, легированном бором, для образцов с различным уровнем легирования и с учетом зависимости энергии активации от концентрации. Полученные экспериментальные и теоретические данные хорошо согласуются друг с другом.*

### Спектроскопия адмиттанса, легированный бором алмаз, концентрация носителей заряда, энергия активации

В последнее десятилетие усилия ученых и разработчиков направлены на исследование и развитие новых приборов на широкозонных полупроводниках: карбиде кремния, соединениях нитридов, полупроводниковом алмазе [1]–[4]. Уже сейчас разработанные полупроводниковые приборы высокочастотной и экстремальной электроники нового поколения значительно превзошли по многим параметрам традиционные приборы на Si и GaAs.

На данный момент алмаз является наиболее перспективным материалом для использования в микроэлектронике. Он обладает уникальными свойствами в сравнении со многими другими полупроводниками: ширина запрещенной зоны 5.45 эВ; высокая подвижность носителей заряда –  $4500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  для электронов и  $3800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  для дырок [5]; высокая напряженность поля пробоя –  $10^6 \dots 10^7 \text{ В/см}$ . Теплопроводность алмаза, составляющая  $22 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  при комнатной температуре, – рекордная среди всех материалов. На

основе поликристаллических и наноалмазов изготавливаются тепловые радиаторы с удельной поверхностной теплоемкостью в десятки раз выше стандартных. На монокристаллическом алмазе изготовлены диоды Шоттки, развивается технология производства полевых транзисторов. Детекторы излучения на основе алмаза могут применяться в экстремальных условиях для детектирования УФ, рентгеновского,  $\gamma$ -излучения,  $\alpha$ -частиц, электронов, ионов, нейтронов и других частиц в диапазоне энергий от 5.5 эВ до гигаэлектронвольт.

Известно, что нелегированный алмаз – это диэлектрик. Полупроводниковые свойства он приобретает в результате легирования. Наиболее часто в качестве примеси в алмазе встречаются бор, фосфор и азот. Используя примесь бора, можно создавать алмазные диоды и транзисторы, но ввиду низкой степени ионизации бора в алмазе (бор – глубокая примесь) необходима высокая степень легирования (вплоть до  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ). При

таких значениях концентрации примеси подвижность дырок падает и обычно не превышает  $20 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Для увеличения их подвижности предлагается изготавливать предельно узкие  $\delta$ -легированные слои толщиной порядка 1 нм с концентрацией бора свыше  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , чтобы большая часть дырочного тока протекала без рассеяния в чистом алмазе. Изготовление такого  $\delta$ -слоя с подвижностью носителей  $>100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  чрезвычайно сложно технически и пока еще не осуществлено [6].

В Санкт-Петербургском электротехническом университете «ЛЭТИ» на факультете электроники, в том числе в Ресурсном центре «Физика твердого тела и материаловедение для радиоэлектронных и телекоммуникационных систем», уже несколько лет активно исследуются электрофизические характеристики монокристаллических алмазных пластин [7]–[8]. Начало этим работам было положено в 2013 г. участием СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород) в совместных работах по договору «Полупроводниковый CVD алмаз для мощных и высокочастотных электронных приборов» в рамках Мегагранта Минобрнауки России по Постановлению правительства РФ № 220 [9]. Руководитель проекта – крупный американский специалист в области выращивания синтетических алмазов проф. Дж. Батлер.

В ходе выполнения работ по проекту было показано, что для легированного бором алмаза важно учитывать особенность данной примеси изменять энергию активации в зависимости от концентрации [10]. При низких концентрациях бора ( $N_B < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) его энергия активации  $E_A$  составляет 370 мэВ – это значение общепринято в качестве справочного, но с увеличением концентрации оно монотонно уменьшается, приближаясь к нулю при  $N_B \sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Хотя концентрационная зависимость  $E_A$  наблюдается и в других полупроводниковых материалах, такой огромный интервал изменения энергии активации наблюдается только для бора в алмазе.

В данной работе исследовались образцы синтетического монокристаллического алмаза, легированного бором до различных концентраций, и рассматривалась зависимость энергии активации от уровня легирования. Экспериментальные данные сопровождаются соответствующими расчетами.

**Исследуемые образцы.** Нами исследовался набор образцов монокристаллического полупроводникового алмаза, однородно легированных бором. Образцы представляли собой как монокристаллические пластины, выращенные методом НРНТ (high pressure high temperature) в ООО «New Diamond Technologies» (образцы D111 и IL), так и эпитаксиальные структуры, выращенные методом CVD (chemical vapor deposition) на НРНТ подложке (серия «В»). Все образцы были легированы бором в процессе роста.

В образцах серии «В» в качестве подложки использовался монокристаллический алмаз с ориентацией (100), на который наносился эпитаксиальный легированный бором слой толщиной порядка 1 мкм. Гомоэпитаксиальный алмазный слой был выращен в МРАСVD-реакторе (ИПФ РАН), работающем на частоте 2.45 ГГц и смеси газов  $\text{H}_2 + \text{CH}_4$  [11]. Размер образцов составлял  $3 \times 3 \text{ мм}$ . Концентрация бора в образцах изменялась от  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Для проведения измерений электрофизических параметров на образцы были нанесены круглые платиновые контакты Шотки диаметром от 133 мкм до 1 мм, а также платиновые омические контакты. Контакты были нанесены в ЦМИДе, «ЛЭТИ». Использование контактов Шотки меньшего размера дает возможность более подробного исследования структуры. Кроме того, в случае больших контактов возрастают активные токи через структуру и растет вероятность захвата контактом участка структурного несовершенства. Эксперименты показали, что на образцы с большой степенью шероховатости платиновые контакты наносятся худшего качества, что в итоге затрудняет адмиттансные исследования.

Примененная разносторонняя диагностика исследуемых структур позволила составить целостную картину о каждом образце, его морфологии, концентрации носителей заряда и о виде ВАХ и ВФХ.

**Экспериментальные результаты.** *Морфология поверхности.* Морфология поверхности исследуемых образцов измерялась на автоматизированном атомно-силовом микроскопе SOLVER NEXT компании NT-MDT (Россия). Для сканирования поверхности алмазов были выбраны специальные зонды с супертвердым покрытием серии DCP 01 (diamond coated), производитель – NT-MDT.

На рис. 1, а представлен типичный скан морфологии поверхности (размером  $30 \times 30 \text{ мкм}$ ) для образцов алмаза, выращенных методом НРНТ. На

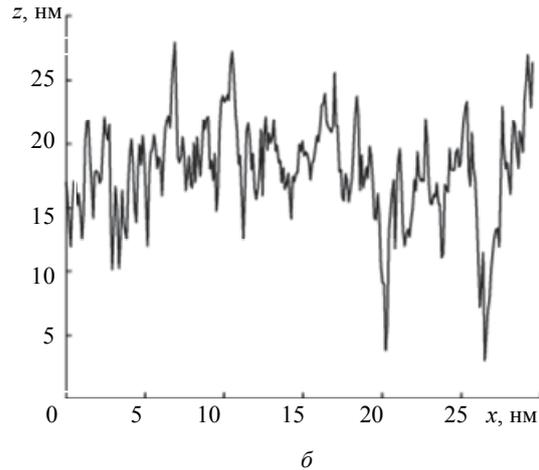
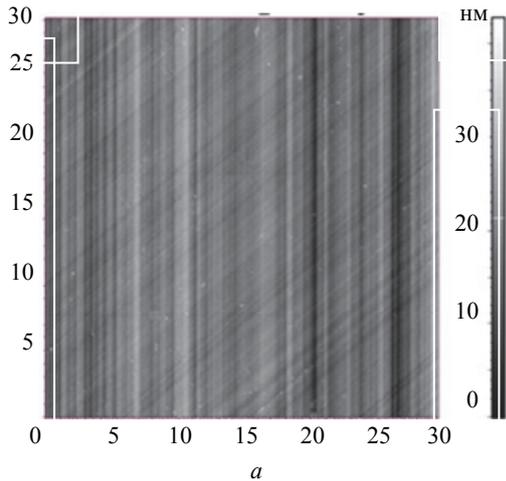


Рис. 1

поверхности наблюдаются явные следы полировки в двух направлениях. На соответствующем профиле поверхности вдоль заданной горизонтальной линии (рис. 1, б) заметны волнообразные бугры с чередующимися размерами от 3 до 7 мкм. Эти бороздки представляют собой следы от полировки дисками с алмазной крошкой. В целом, измерения морфологии поверхности различных образцов показали, что качество подготовки поверхности находится на высоком уровне, среднеарифметическая шероховатость для большинства образцов составляла не более 15 нм, что по данным ГОСТ 2789–59 соответствует самому высокому, 14-му классу чистоты поверхности. В дальнейшем на этих подложках успешно выращивались CVD эпитаксиальные слои монокристаллического алмаза.

**Адмиттансные исследования.** Адмиттансные исследования, включающие вольт-амперные характеристики (ВАХ), вольт-фарадные характеристики (ВФХ), а также частотные и температурные спектры проводимости и емкости были проведены в широких интервалах частот, температур и приложенных смещений. Измерения проводились на уникальном диагностическом комплексе спектроскопии адмиттанса, имеющемся в распоряжении РЦ ФТТ. Комплекс полностью автоматизирован и предназначен для измерения электрофизических параметров образцов (в том числе пластин диаметром 2”) в интервале температур от 15 до 475 К, приложенных смещений ( $\pm 40$  В) и частот тестовых сигналов (от 25 Гц до 2 МГц) [12]. Способ определения параметров полупроводниковых структур, лежащий в основе программного обеспечения комплекса, запатентован участниками научной группы [13].

**Вольт-амперные характеристики.** На рис. 2 представлен типичный вид вольт-амперной характеристики легированных образцов для различных температур (300...400 К).

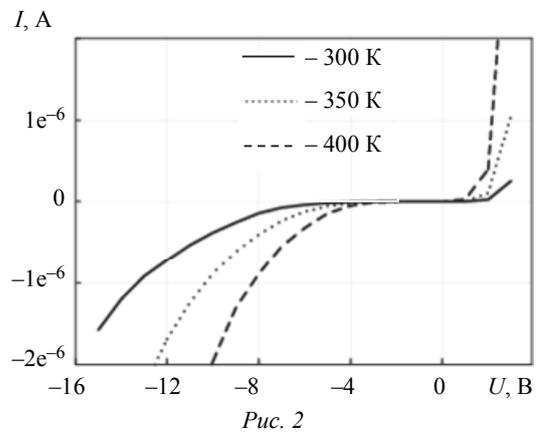


Рис. 2

Видно, что ВАХ представляет собой типичную ВАХ диода Шоттки с напряжением отсечки  $U_{отс} = 0.7$  В.

**Вольт-фарадные характеристики и профили концентрации носителей заряда по глубине структуры.** На рис. 3 представлены типичные экспериментальные вольт-фарадные характеристики образцов в координатах Мотта–Шотки  $1/C^2 - U$  (где  $C$  – емкость образца, измеренная при напряжении  $U$ ) для различных частот тестового сигнала при температуре 300 К (а) и для различных температур при частоте 100 кГц (б).

Все вольт-фарадные характеристики в данном диапазоне напряжений имели квазилинейный вид, что позволяет перейти к дифференцированию и получению профилей концентрации носителей заряда. В случае неоднородно легированного полупроводника дифференцирование вольт-фарадной зависимости по напряжению приводит к следующему выражению для профиля концентрации  $N$  носителей заряда:

$$N(w) = \frac{C^3}{q\epsilon\epsilon_0 S^2} \left( \frac{dC}{dU} \right)^{-1},$$

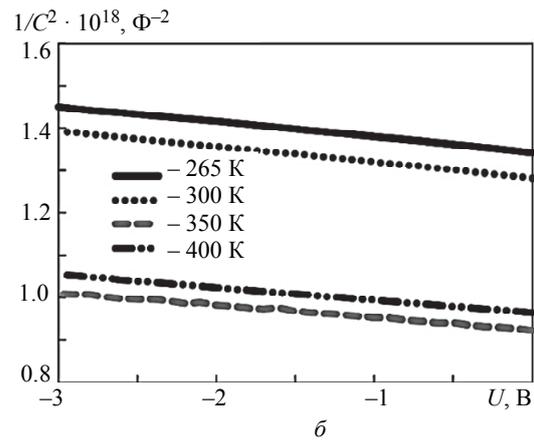
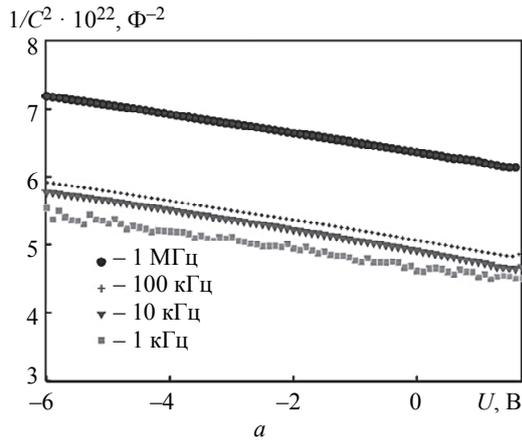


Рис. 3

где  $q$  – элементарный заряд;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная и  $S$  – площадь образца. При этом толщина области объемного заряда  $w$ , соответствующая емкости при определенном напряжении,

$$w = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{C}$$

Профиль распределения концентрации основных носителей заряда по глубине слаболегированного образца D111 при комнатной температуре приведен на рис. 4. Видно, что образец равномерно легирован, средняя концентрация основных носителей заряда (дырок) составляет  $3.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  на глубине 1.4...1.45 мкм.

$$P \cdot 10^{16}, \text{ см}^{-3}$$

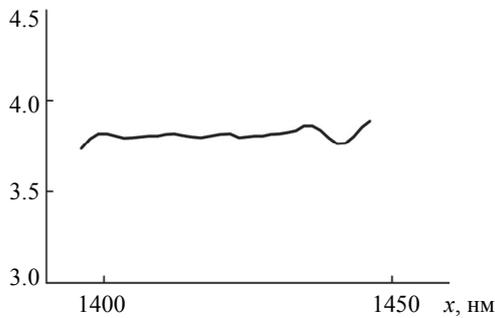


Рис. 4

Спектры емкости и проводимости и энергия активации примеси бора. Для всех образцов были измерены спектры емкости и проводимости во всем доступном интервале температур  $T$ . Высококачественная проводимость  $G$  и, соответственно, емкость  $C$  структуры зависят от частоты  $\omega$  и температуры следующим образом [14]:

$$G(T) \sim \frac{e_n(T) \omega^2}{e_n^2(T) + \omega^2} S \left( \frac{\epsilon \epsilon_0 q N^+}{2U} \right)^{1/2},$$

$$C(T) \sim \frac{e_n^2(T)}{e_n^2(T) + \omega^2} S \left( \frac{\epsilon \epsilon_0 q N^+}{2U} \right)^{1/2},$$

где  $e_n(T)$  – скорость эмиссии носителей заряда с энергетического уровня, а  $N^+$  – концентрация ионизованных примесных центров при данной температуре.

Данные проведенных экспериментов показывают, что для всех образцов спектры проводимости имели характерный вид: амплитуды пиков почти не зависят от частоты и составляют 3...5 пФ, они расположены в диапазоне температур 150...300 К. На рис. 5 показаны типичные температурные спектры приведенной проводимости ( $G/\omega$ ) и емкости ( $C$ ) исследуемых образцов. Видно, что происходит ожидаемый сдвиг кривых проводимости в область более высоких температур с увеличением частоты. Это служит отличительной чертой термоэлектронной эмиссии.

Очевидно, что примесные уровни с разными энергиями активации имеют различные динамические характеристики, давая отдельные пики в температурном спектре проводимости. Пик проводимости и в то же время перегиб температурной зависимости емкости структуры (показан вертикальными штрихованными линиями на рис. 5) наблюдаются при условии  $e_n = \omega$ .

На основе определения по спектрам  $G/\omega - T$  положения пиков и соответствующих им частот можно вычислить энергию активации носителей заряда с примесного уровня с помощью построения графика в координатах Аррениуса  $\ln(\omega/T^2) = f(1/T)$ . На рис. 6 представлены графики Аррениуса для нескольких исследованных образцов. На основании графиков были рассчитаны энергии активации носителей заряда с примесного центра бора, которые для разных образцов изменялись в диапазоне 210...320 мэВ.

В табл. 1 сведены полученные параметры исследованных образцов: средние концентрации носителей заряда при комнатной температуре,

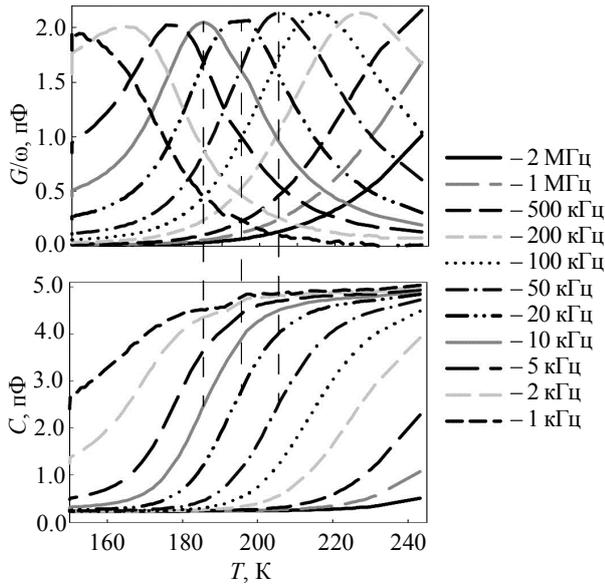


Рис. 5

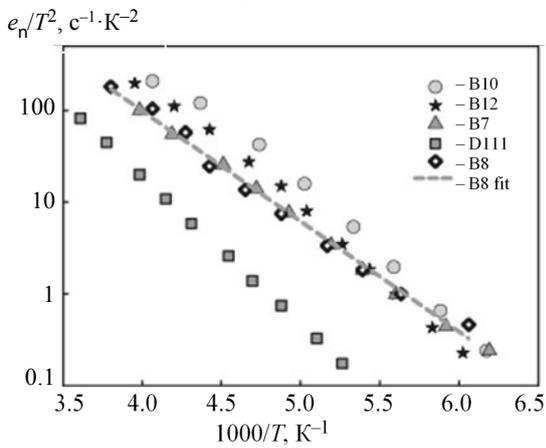


Рис. 6

полученные из анализа вольт-фарадных характеристик, и энергии активации примеси бора, полученные из анализа спектров проводимости.

Зависимость энергии активации бора от концентрации примеси. Полученные значения концентрации свободных носителей заряда (при 300 К) для набора исследованных образцов и соответствующие им энергии активации представим в графическом виде, нанеся на известную зависимость энергии активации бора от концентрации его атомов в алмазе [10], рис. 7. Заметим при этом, что на оригинальном графике по оси абсцисс представлена концентрация примеси бора, а в данной работе из вольт-фарадных характеристик

находилась концентрация основных носителей заряда. При определенных допущениях можно полагать идентичность данных параметров.

Видно, что полученные нами данные хорошо коррелируют с полученными ранее результатами других авторов.

**Расчет температурной зависимости концентрации носителей заряда.** За основу расчета было выбрано решение уравнения электронейтральности для полупроводника, содержащего две примеси *p*- и *n*-типов (бор и азот, соответственно):

$$n_0 + N_A^- = p_0 + N_D^+$$

Чтобы вычислить концентрацию носителей заряда в полупроводнике, нужно знать плотность разрешенных состояний в соответствующих зонах и вероятность заполнения уровней энергии.

Плотности разрешенных состояний для зоны проводимости и валентной зоны определяются следующим образом:

$$g_n(E) = 4\pi(2m_{dn}^*/h^2)^{3/2}(E - E_C)^{1/2},$$

$$g_p(E) = 4\pi(2m_{dp}^*/h^2)^{3/2}(E_V - E)^{1/2},$$

где  $E_C$  – дно зоны проводимости;  $E_V$  – потолок валентной зоны;  $h$  – постоянная Планка;  $m_{dn}^*$ ,  $m_{dp}^*$  – эффективная масса плотности состояний в зонах проводимости и валентной соответственно.

Вероятность заполнения уровня с энергией  $E$  определяется функцией Ферми–Дирака:

$$f_n(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)},$$

$$f_p(E, T) = 1 - f_n(E, T),$$

где  $E_F$  – энергия уровня Ферми.

Равновесные концентрации электронов и дырок определяются выражениями:

$$n_0 = N_C F_{1/2}\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right), \quad p_0 = N_V F_{1/2}\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right),$$

где  $N_C$  и  $N_V$  – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне соответственно, а  $F_{1/2}(E)$  – интеграл Ферми половинного индекса.

Таблица 1

Образец	B12	B10	B8	B7	B9	D111	IL
Концентрация дырок $p$ , см <sup>-3</sup>	$4 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$	$6.2 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$6.5 \cdot 10^{18}$	$(3-5) \cdot 10^{16}$	$6 \cdot 10^{17}$
Энергия активации $E_A$ , мэВ	$312 \pm 3$	$314 \pm 2$	$250 \pm 9$	$241 \pm 6$	$219 \pm 5$	$340 \pm 1$	$320 \pm 4$

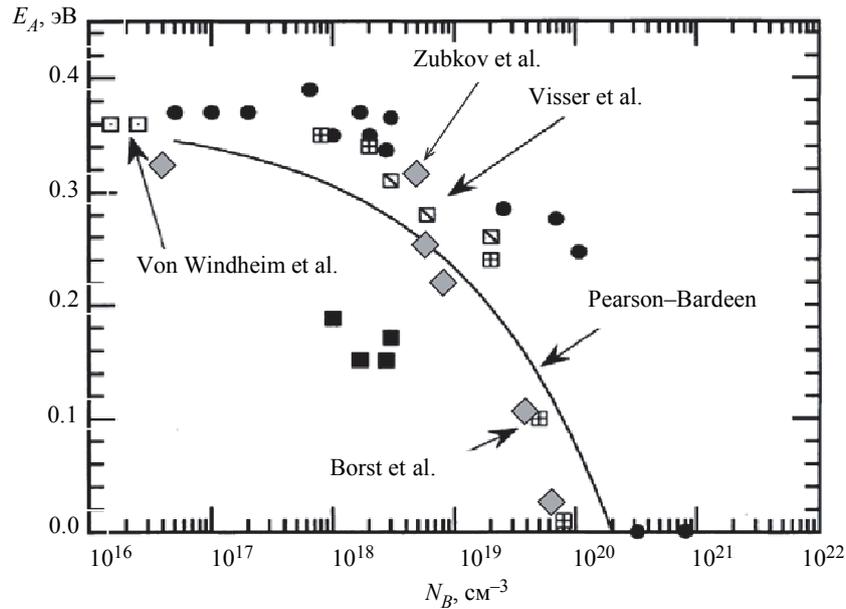


Рис. 7

Концентрация ионизированных доноров определяется вероятностью того, что донорный уровень свободен:

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + g_D \exp[(E_F - E_D)/kT]},$$

а ионизированных акцепторов – вероятностью того, что акцепторный уровень занят электроном:

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + (1/g_A) \exp[(E_A - E_F)/kT]},$$

где  $N_D$ ,  $N_A$  – концентрации доноров и акцепторов соответственно;  $E_D$ ,  $E_A$  – энергетические положения соответственно донорных и акцепторных уровней;  $g_D$ ,  $g_A$  – факторы вырождения донорного и акцепторного уровней.

Особенность уравнения электронейтральности – трудная сходимость решения из-за больших показателей в экспонентах. Для решения данной проблемы и упрощения расчета представим уравнение электронейтральности в логарифмическом виде:

$$\xi(E_F, T) = \ln \left( \frac{n(E_F, T) + N_A^-(E_F, T)}{p(E_F, T) + N_D^+(E_F, T)} \right),$$

где величина  $\xi$  обращается в 0, когда  $E_F$  принимает истинное значение. Находя таким образом значения уровня Ферми в различных точках температуры, можно вычислить соответствующую концентрацию носителей заряда.

Для численных расчетов концентрация компенсирующей примеси азота принималась равной  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а концентрация бора варьировалась в диапазоне  $10^{17} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 8 показаны ре-

зультаты расчета: (1) для справочной энергии активации примесного бора (0.37 эВ) и (2) для энергии активации 0.24 эВ, учитывающей представленную на рис. 7 зависимость  $E_A$  от  $N_B$ . Концентрация примеси бора здесь принята равной  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

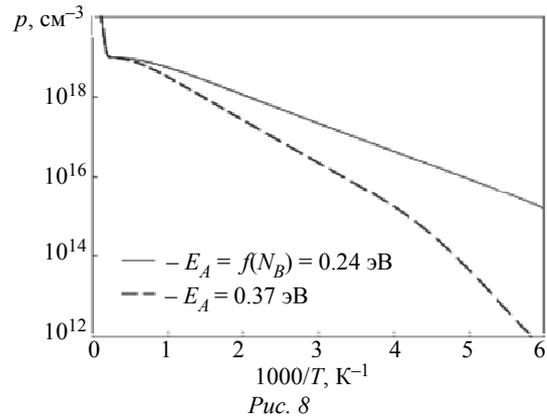


Рис. 8

Из сравнения полученных зависимостей видно, что при комнатной температуре концентрации носителей заряда отличаются примерно на 2 порядка при расчете без учета и с учетом концентрационной зависимости  $E_A$ , что критично. Таким образом, при моделировании приборов на полупроводниковом алмазе, легированном бором, необходимо учитывать изменение его энергии активации при увеличении степени легирования.

С учетом этого факта были рассчитаны зависимости отношения концентрации свободных носителей заряда от концентрации введенной в кристалл примеси бора  $p/N_B$  при заданной температуре. Зависимости для различных температур в интервале от 200 до 400 К и различных уровней легирования алмаза бором ( $N_B$ ) приведены на рис. 9.

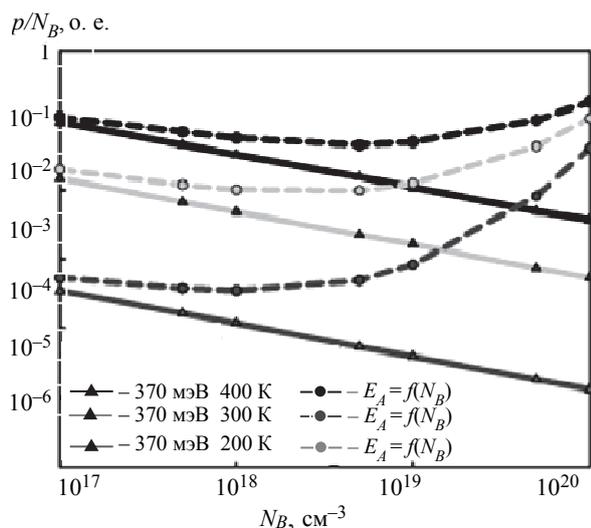


Рис. 9

При неизменной энергии активации полученные зависимости линейны (сплошные линии на рис. 9) с монотонным падением при увеличении концентрации примеси. Однако с учетом концентрационной зависимости  $E_A = f(N_B)$  наблюдается более сложный, нелинейный характер кривых. При концентрации выше  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  возникает прямо противоположная тенденция и отношение  $p/N_B$  испытывает существенный рост, так что при  $N_B = 10^{20} \text{ см}^{-3}$  это отношение оказывается близким к 5–10 % и практически не зависит от температуры. Причиной этого служит резкое снижение энергии активации (см. рис. 7) и, как результат, переход полупроводника в вырожденное состояние.

Набор образцов объемного и эпитаксиального монокристаллического алмаза, легированного бором, исследовался методами спектроскопии адмиттанса в широком частотном диапазоне. Были определены профили концентрации основных носителей заряда по глубине образцов в интервале температур 100...400 К. Была определена энергия активации примеси бора в образцах. Экспериментально показано снижение энергии активации примеси бора в алмазе от 340 до 220 мэВ при увеличении степени легирования на два порядка – с  $5 \cdot 10^{16}$  до  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Проведен теоретический расчет температурной зависимости концентрации носителей заряда в алмазе, легированном бором, с учетом зависимости энергии активации бора от его концентрации. Полученные экспериментальные и теоретические данные хорошо согласуются друг с другом. Проведенный расчет позволяет оценивать концентрацию носителей заряда при различной степени легирования алмаза бором в условиях различных температур.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института прикладной физики РАН и лично проф. А. Л. Вихареву за предоставленные образцы легированного бором CVD алмаза и компании «New Diamond Technology» и лично А. В. Колядину за предоставленные образцы НРНТ-алмаза. Также авторы выражают благодарность канд. техн. наук Д. Чигиреву (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») за нанесение металлических контактов на образцы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SiC-Diamond Materials: Wear-Resistant and Versatile / M. Herrmann, B. Matthey, S. Kunze, U. Petasch // *Ceramic Forum Int.* 2014. Vol. 91, № 10. P. E39–E43.
2. Are diamonds a MEMS' best friend? / Auciello O., Pacheco S., Sumant A., Gudeman C., Sampath S., Datta A. et al. // *IEEE Microwave Mag.* 2007. Vol. 8. P. 61–75.
3. Single crystal diamond for electronic applications / J. Isberg, J. Hammersberg, D. Twitchen, A. Whitehead // *Diamond and Related Materials.* 2003. Vol. 13. P. 320–324.
4. Васильев А. Г., Колковкий Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ-приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. М.: Техносфера, 2011.
5. Field J. E. Properties of natural and synthetic diamond. London: Academic Press, 1992.
6. Wort C., Balmer R. Diamond as an electronic material // *Materials Today.* 2008. Vol. 11. P. 22–28.
7. Temperature admittance spectroscopy of boron doped chemical vapor deposition diamond / V. Zubkov, O. Kucherova, S. Bogdanov, A. Zubkova, J. Butler, V. Ilyin et al. // *J. Appl. Physics.* 2015. Vol. 118. P. 145703.
8. На пути к дельта-легированному полупроводниковому алмазу / В. И. Зубков, М. Ф. Панов, А. В. Афанасьев, В. А. Ильин, А. В. Зубкова, И. А. Ламкин, J. E. Butler, А. Л. Вихарев, С. А. Богданов // *Нано- и микросистемная техника.* 2015. Т. 12, № 185. С. 22–31.
9. Пат. RU2624754 С2. Способ создания легированных дельта-слоев в CVD алмазе / М. А. Лобаев, А. Б. Мучников, А. Л. Вихарев, Д. Э. Батлер, А. М. Горбачев. Оpubл. 06.07.2017.
10. Lagrange J., Deneuville A., Gheeraert E. Activation energy in low compensated homoepitaxial boron-doped diamond films // *Diamond and Related Materials.* 1998. Vol. 7. P. 1390–1393.
11. Исследование свойств монокристаллического алмаза, выращенного из газовой фазы на подложках природного алмаза / А. А. Алтухов, А. Л. Вихарев, А. М. Горбачев, М. П. Духновский, В. Е. Земляков, К. Н. Зяблюк, А. В. Митенкин, А. Б. Мучников, Д. Б. Радищев, А. К. Ратникова, Ю. Ю. Федоров // *Физика и техника полупроводников.* 2011. Т. 45, № 3. С. 403.

12. Неразрушающая диагностика наногетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN методом температурной спектроскопии адмиттанса / О. В. Кучерова, В. И. Зубков, Е. О. Цвелев, И. Н. Яковлев, А. В. Соломонов // Заводская лаборатория. 2010. Т. 76, № 3. С. 24–28.

13. Пат. RU № 2437112. Способ определения параметров полупроводниковых структур. В. И. Зубков, О. В. Кучерова, И. Н. Яковлев. 2010. Оpubл. 20.12.2011.

14. Зубков В. И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб.: ООО «Техномедиа», Изд-во «Элмор», 2007. 220 с.

V. I. Zubkov, A. V. Solomnikova, A. A. Egorenkov  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## TEMPERATURE DEPENDENCE OF CARRIER CONCENTRATION IN BORON-DOPED DIAMOND WITH ACCOUNTING THE CONCENTRATION-DEPENDENT ACTIVATION ENERGY

*Single-crystal diamond samples doped with boron were investigated by admittance spectroscopy. Current-voltage and capacitance-voltage characteristics were measured. Temperature conductance spectra were used for calculation activation energy for boron impurity in diamond. Capacitance-voltage characteristics, measured at various temperatures and bias frequencies were used for obtaining free charge carrier concentration profiles into the depths of the samples. Experimental results demonstrate a decrease of boron activation energy from 340 to 220 meV at doping level increasing for two orders of magnitude – from  $5 \cdot 10^{16}$  до  $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , which correlates well with the literature data. Theoretical calculations of temperature dependence of carrier concentration in diamond doped with boron were carried out for samples of various doping levels taking into account the dependence of activation energy on concentration. The obtained experimental and theoretical data are in good agreement with each other.*

**Admittance spectroscopy, boron doped diamond, carrier concentration, activation energy**

УДК 620.179.16

К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Волновые процессы в слоистой микронеоднородной среде с неоднородными граничными условиями

*Рассмотрен вопрос о том, как с помощью измеренных параметров поверхностной волны определить характеристики неоднородной среды. В работе исследовано распространение поверхностных волн в микронеоднородной слоистой среде типа «сталь-графит» с неоднородными граничными условиями на границах слоев. Выведены и решены относительно волнового числа дисперсионные уравнения для продольной и поперечных вертикально и горизонтально поляризованных волн. Выведено дисперсионное уравнение для поверхностной волны, распространяющейся в упругом неоднородном полупространстве с заданными эффективными модулями упругости. В дисперсионное уравнение подставлены выражения продольной и поперечных волн, полученные для среды с неоднородностями, затем уравнение решено относительно волнового числа поверхностной волны. Построены графические зависимости полученных скоростей от относительной толщины слоя. Полученные зависимости используются применительно к задачам определения физико-механических характеристик неоднородной среды при контроле объекта поверхностной волной. Расчеты проводились для общей толщины слоя сталь-графит 1 мм на частоте ультразвука 1 МГц.*

**Дисперсионное уравнение, продольная волна, поперечная волна, поверхностная волна, неоднородная среда, скорость распространения**

В целом ряде практических задач современной акустики приходится иметь дело с распространением звука в слоистых трещиноватых или микронеоднородных средах. Микронеоднородными слоистыми средами называются неоднородные среды, составленные из содержащей сло-

истой среды и включений, причем размеры включений и расстояние между включениями малы по сравнению с длиной волны, распространяющейся в неоднородной среде. Если среда состоит из чередующихся слоев двух однородных и изотропных веществ, то она слоистая. В случае рассмот-