

# Измерения проводимости алмаза, легированного бором, на постоянном и переменном токе

Н.Н. Жогаль  
Санкт-Петербургский  
государственный

электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия  
nikita2000.27@mail.ru

А.В. Соломникова  
Санкт-Петербургский  
государственный

электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия  
zubann@yandex.ru

В.И. Зубков  
Санкт-Петербургский  
государственный

электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия  
vzubkovspb@mail.ru

**Аннотация** — В работе изучались спектры проводимости образцов монокристаллического алмаза на переменном и постоянном токе. Измерения проводились с помощью комплекса спектроскопии адмиттанса на базе криогенной зондовой станции. Обработка полученных данных состояла из построения графиков Аррениуса, нахождения энергии активации носителей заряда с примесного уровня, и моделировании графиков проводимости.

**Ключевые слова** — спектроскопия адмиттанса, проводимость, полупроводниковый алмаз, энергия активации примеси

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря таким свойствам как большая ширина запрещённой зоны (5.5 эВ), высокое поле пробоя (10 МВ/см), высочайшая теплопроводность среди твердых тел (~3000 Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>), алмаз имеет потенциал развития и применения в экстремальной (высоковольтной, высокотемпературной) электронике, а также при создании солнечно-слепых оптоэлектронных устройств. Недавно нашими коллегами продемонстрирована генерация терагерцового излучения в монокристаллах алмаза, легированного азотом [1]. По прогнозам, легированные бором монокристаллы алмаза могут показать еще более высокую интенсивность индуцированной терагерцовой эмиссии, что весьма привлекательно для применений в нанофотонике. Электрические исследования важнейших характеристик алмаза (в том числе, энергии активации примеси) имеют долгую историю, при этом измерения температурной зависимости проводимости на постоянном токе являлись первым диагностическим методом [2-3]. Однако сделанные на основе этих экспериментов более 20 лет назад выводы о механизмах проводимости в алмазе следует пересмотреть, т.к. появились более прецизионные методы исследования (спектроскопия адмиттанса) и более качественные образцы (монокристаллический легированный бором алмаз). Целью данной работы является измерение спектров проводимости образцов монокристаллического алмаза на постоянном и переменном токе для нахождения энергии активации примеси и сравнения двух методик.

## 2. ОБРАЗЦЫ

В работе изучался набор диодных структур на монокристаллическом алмазе с различной концентрацией примеси бора. Образец 1 выращен методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на нелегированной подложке, полученной методом

высоких давлений, высоких температур (НРНТ), рис. 1а. Толщина алмазного CVD слоя 2,5 мкм. Для проведения электрических измерений платиновые контакты были нанесены для формирования диодов Шоттки в латеральной геометрии. Стоит отметить, что НРНТ пластины до недавнего времени использовались только как подложки для последующих процессов эпитаксии, и только около 5 лет назад НРНТ кристаллы стали легировать в процессе роста для получения из них полноценных приборных структур. Образец 2, исследуемый в данной работе, это именно такая многосекторная пластина, выпиленная из НРНТ кристалла таким образом, чтобы захватить 2 области с различной степенью легирования бором (визуально это проявляется в различных оттенках синего цвета). На ней металлические контакты сформированы в виде вертикальных диодов Шоттки, рис. 1б.

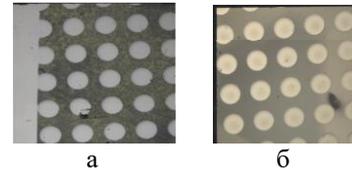


Рис. 1. Исследуемые образцы

## 3. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования проводились на измерительном комплексе спектроскопии адмиттанса на базе криогенной зондовой станции [4]. Измерительный комплекс интегрирует несколько установок. Зондовая станция JANIS CCR10 (рис. 2а) обеспечивает герметичное пространство для удержания вакуума вокруг объекта измерения, а также имеет защиту от механических колебаний внешней среды посредством пневморазвязки. Насосная станция Pfeiffer (рис. 2б), включающая форвакуумный и турбомолекулярный насосы, создаёт вакуум, необходимый для обеспечения достижения широкого диапазона температур. После достижения нужного давления (ниже 10<sup>-5</sup> мбар) запускается криогенная установка. Температура контролируется с помощью двух температурных контроллеров LakeShore 331 и 336. Электрические измерения проводятся с помощью LCR-метра Agilent E4980A. Основным методом исследования на переменном токе была температурная и частотная спектроскопия проводимости. Измерения проводились в температурном диапазоне от 26 до 440 К при частотах от 1 кГц до 2 МГц. Для реализации метода измерения сопротивления на постоянном токе дополнительно использовался цифровой мультиметр Agilent 34410A.



Рис. 2. Зондовая станция JANIS (а) и насосная станция Preiffer (б)

Высокочастотная проводимость  $G$  зависит от частоты  $\omega$  и температуры следующим образом [5]:

$$G(T) \sim \frac{e_n(T)\omega^2}{e_n^2(T) + \omega^2} S \left( \frac{\varepsilon\varepsilon_0 q N^+}{2U} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $e_n(T)$  – скорость эмиссии носителей заряда с энергетического уровня,  $N^+$  – концентрация ионизованных примесных центров при данной температуре,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $q$  – элементарный заряд,  $U$  – напряжение, подаваемое на образец. Максимум спектра проводимости достигается при  $e_n = \omega$ .

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектры проводимости образцов были измерены во всем доступном интервале температур (рис. 3). Видно, что амплитуды спектров проводимости  $G/\omega(T)$  образца 1 почти не зависят от частоты измерений  $f$  и составляют 50 пФ. Кривые сдвигаются в область более высоких температур с увеличением частоты, что характерно для термоэлектронной эмиссии.

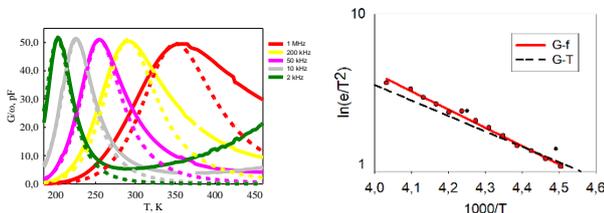


Рис. 3. Экспериментальные и промоделированные (пунктир) спектры проводимости образца 1 (а); графики Аррениуса из частотных (G-f) и температурных (G-T) спектров проводимости (б)

Альтернативно измерялись частотные спектры проводимости при варьировании температуры. Из графиков  $G/\omega(T)$  и  $G/T(\omega)$  строились графики Аррениуса в координатах  $\ln(\omega/T^2) = f(1/T)$  и вычислялись энергии активации носителей заряда с примесного уровня ( $E_A$ ), рис. 3б. Концентрации основных носителей заряда ( $p$ ) оценивались из вольт-фарадных характеристик. Для образца 1  $p=10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $E_A=220\pm 20 \text{ мэВ}$ , для образца 2  $p=10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $E_A=312\pm 10 \text{ мэВ}$ . Эти данные хорошо совпадают с имеющимися в литературе и наглядно иллюстрируют уменьшение энергии активации при увеличении степени легирования алмаза бором [3]. Для верификации полученных результатов проведено моделирование экспериментальных спектров с использованием данных, полученных из графиков Аррениуса (рис. 3б), видно хорошее совпадение экспериментальных и промоделированных спектров.

Измерения проводимости на постоянном токе позволяют найти энергию активации глубокого уровня при анализе графика удельной проводимости (сопротивления) от обратной температуры, который обычно делится на 2 участка [2]:

$$1/\sigma = 1/\sigma_1 + 1/\sigma_2, \quad (2)$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – проводимость, при доминирующей концентрации дырок в валентной зоне и компенсирующих доноров  $N_D$ , соответственно.

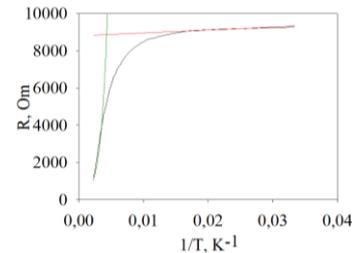


Рис. 4. График зависимости сопротивления от обратной температуры для образца 1: экспериментальные данные - чёрная линия, аппроксимации по формуле (2) - зелёная и красная линии

Энергия активации, рассчитанная из измерений на постоянном токе, составила 90 мэВ для образца 1 и 250 мэВ для образца 2. Эти данные могут содержать большую погрешность из-за невозможности достижения в нашей установке высоких температур. Также в этом методе есть вероятность ошибки в подборе участков экспериментальных кривых для аппроксимации, что показывает устарелость этого метода. Реализуемые на нашей установке измерения проводимости на переменном токе более прецизионны и имеют результатом точно определенные параметры образцов.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены и проанализированы способы измерения проводимости на постоянном и переменном токе на примере образцов монокристаллического алмаза. Измеренные значения энергии активации на переменном токе ближе к ожидаемым, что показывает, что данный метод более точный и современный.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chizhov, P.A. Photoconductive terahertz generation in nitrogen-doped single-crystal diamond / P.A. Chizhov, M.S. Komlenok, V.V. Kononenko, V.V. Bukin, et. al. // Opt. Lett. – 2022. – Vol. 47(1). – P.86-89.
- [2] Borst, T. H. Boron-Doped Homoepitaxial Diamond Layers: Fabrication, Characterization, and Electronic Applications / T. H. Borst and O.Weis. // Phys. Stat. Sol. – 1996. –Vol. 154(1). – P.433–444.
- [3] Lagrange, J. P. Activation energy in low compensated homoepitaxial boron-doped diamond films / J.P. Lagrange, A. Deneuville, E. Gheeraert// Diam. Relat. Mater. – 1998 – Vol.7(9). – P.1390-1393.
- [4] Zubkov, V. I. Temperature admittance spectroscopy of boron doped chemical vapor deposition diamond / V. I. Zubkov, O. V. Kucheroва, S. A. Bogdanov, A. V. Zubkova, J. E. Butler, V. A. Piyin, A. V. Afanas'ev, and A. L. Vikharev// Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol.118(14). – P.145703.
- [5] Зубков, В. И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса / В. И. Зубков. – Санкт-Петербург: Издательство «Элмор», 2007. – 229 с.