

## Особенности исследования АС и DC проводимости монокристаллического алмаза, легированного бором

Соломникова А.В.<sup>1</sup>, Емельянов И.Д.<sup>1</sup>, Савченко Г.С.<sup>1,2</sup>, Зубков В.И.<sup>1</sup>, Аверкиев Н.С.<sup>2</sup>

zubann@yandex.ru

<sup>1</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Переход к силовой электронике нового поколения на основе легированного бором монокристаллического алмаза требует прецизионного контроля ключевых приборных характеристик таких приборных структур - концентрации, подвижности свободных носителей заряда и энергии активации примеси. В данной работе впервые проведено детальное сравнение результатов измерений проводимости на переменном и постоянном токе в диапазоне температур от 25 до 470 К для набора образцов высококачественного монокристаллического алмаза с широким диапазоном легирования бором. Исследовался набор пластин размерами от 3х3 до 8х8 мм<sup>2</sup>, выращенных методами HPHT в кубическом прессе («New Diamond Technology», Санкт-Петербург) и CVD (ИПФ РАН, Н. Новгород). Для определения концентрации некомпенсированных атомов бора использовалась ИК-Фурье спектроскопия. Концентрация основных носителей заряда  $p$  рассчитывалась из вольт-фарадных характеристик и измерений методом Холла.

Энергия активации примеси  $E_A$  определялась методом многочастотной температурной спектроскопии адмиттанса (режим переменного тока (АС)) и из температурной зависимости сопротивления на постоянном токе (DC режим). Зарегистрировано уменьшение  $E_A$  от 370 мэВ (в режиме DC) и 325 мэВ (в режиме АС) до 100 мэВ с увеличением  $p$  от  $2 \cdot 10^{16}$  до  $4 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> для термоактивации в валентную зону и переход к прыжковому механизму проводимости с энергией активации 10-20 мэВ для образцов с  $p > 2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Экспериментально обнаружено, что энергия активации из DC измерений всегда превосходит  $E_A$ , полученную при АС измерениях. Мы объясняем существенное различие в получаемых значениях энергии активации, во-первых, принципиальным различием в физических основах этих методов и, во-вторых, наличием разного типа электрических контактов к образцам. В измерениях DC проводимости термодинамически равновесные свободные носители заряда собираются к омическим контактам в режиме тока проводимости при приложении небольшого тянущего поля. Адмиттансная спектроскопия является принципиально неравновесным методом, который требует формирования барьера Шоттки, вызывающего изгиб энергетических зон и эффект Пула-Френкеля. Прикладываемое к такой структуре переменное тестовое напряжение заставляет глубокий уровень перезаряжаться, а измерению прибором подлежат носители заряда, успевающие перезарядиться за время действия полупериода сигнала и создающие дополнительный ток смещения во внешней цепи. При этом АС измерения проводимости наиболее точно соответствуют условиям работы полупроводникового прибора, и эти динамические характеристики можно ожидать при работе реальных алмазных приборов. Для математического описания наблюдаемого эффекта занижения наблюдаемой энергии активации использовалось численное моделирование положения уровня Ферми и расчет поправки Пула-Френкеля.

Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2025-0007 (государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00003-24-00).