

Проводимость пленок монокристаллического алмаза с бором

*Каган М.С.¹, Папроцкий С.К.¹, Хвальковский Н.А.¹, Алтухов И.В.¹, Родионов Н.Б.²,
Большаков А.П.³, Ральченко В.Г.³, Хмельницкий Р.А.⁴*

miskagan@mail.ru

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

² ТРИНИТИ, Москва, Троицк

³ ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

⁴ ФИ им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Исследована проводимость пленок монокристаллического алмаза, легированного бором, в интервале температур 74–580 К и в электрических полях до $5 \cdot 10^5$ В/см. Номинально нелегированные эпитаксиальные алмазные плёнки толщиной 10^{12} мкм выращены методом газофазного химического осаждения (CVD) на подложках из кристаллов алмаза с ориентацией (100), сильно легированных бором ($\sim 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³). Подложки получены методом высокого давления/высокой температуры (HPHT). Омические контакты из сплава Ni-W толщиной ~ 35 нм наносили методом магнетронного напыления. Для измерений вольтамперных характеристик (ВАХ) использовалось либо постоянное напряжение, либо треугольные импульсы напряжения с временем нарастания 0.5–100 мкс и частотой повторения 1 – 100 Гц (во избежание джоулева нагрева образцов при больших токах).

Определены механизмы ионизации акцепторной примеси бора электрическим полем. Установлено, что при комнатной температуре и выше из-за малой концентрации свободных дырок и большой энергии связи бора в алмазе ионизация происходит за счет эффекта Френкеля-Пула – понижения кулоновского барьера примеси в электрическом поле. При температурах от комнатной до ~ 500 К температурная зависимость проводимости $s(T)$ алмаза с бором подчиняется активационному закону, однако энергия активации значительно превышает энергию ионизации бора. При более высоких температурах проводимость насыщается из-за теплового опустошения акцепторов.

По зависимостям $s(T)$ определены концентрации свободных дырок и примесей, а также степень компенсации. Обнаружено, что примеси сильно компенсированы, вероятно, в результате самокомпенсации в процессе роста. Степень компенсации составляла 10^{-3} – 10^{-4} при концентрации примесей $\sim 10^{16}$ см⁻³. Такая самокомпенсация может возникать при CVD росте алмазных пленок. Примеси входят в растущий кристалл из газовой смеси СВЧ разряда, в которую атомы бора попадают за счет травления сильно легированной бором подложки, а донорная примесь – это азот из остаточного воздуха. Известно, что диффузия радикалов по поверхности является существенной стадией роста алмаза. При этом вероятность встраивания азота в решётку крайне мала. Азот может стабилизироваться на поверхности, в основном, в виде пар В-N в результате связывания радикалов бора и азота. Фактически это нейтральная "квазимолекула" нитрида бора, которая зарастает в процессе эпитаксии, что и приводит к самокомпенсации.

Из-за практически полной компенсации примесей возникает случайный кулоновский потенциал значительной амплитуды, который и вызывает увеличение энергии активации проводимости. По экспериментальным данным получена оценка величины случайного потенциала.

Работа выполнена в рамках госзадания.