

## Исследование фоновых концентрации бора и азота в CVD алмазе при помощи эффекта Холла

*Приходько Д.Д.<sup>1,2</sup>, Тимошенко В.О.<sup>1,2</sup>, Тарелкин С.А.<sup>1</sup>, Корнилов Н.В.<sup>1</sup>, Лупарев Н.В.<sup>1</sup>, Голованов А.В.<sup>1,2</sup>, Дроздова Т.Е.<sup>1</sup>, Бланк В.Д.<sup>1</sup>*

*dmitrii.prikhodko@phystech.edu*

<sup>1</sup> ФГБНУ ТИСНУМ, Троицк, Москва, Россия

<sup>2</sup> МФТИ (НИУ), Долгопрудный, Россия

Сегодня для получения монокристаллического алмаза максимальной химической чистоты используется метод синтеза из газовой фазы – CVD. Один из крупнейших мировых поставщиков сверхчистых алмазов – компания Element Six. В их материале гарантируется концентрация бора не выше 1 ppb, а концентрация азота не выше 5 ppb [1]. Данный уровень определяется в первую очередь пределом чувствительности оптических методов, а именно спектроскопии поглощения [2]. В данной работе нам удалось измерить концентрации бора и азота ниже 0,1 ppb при помощи электрофизических измерений.

Мы исследовали монокристаллы алмаза, выращенные методом CVD в ФГБНУ ТИСНУМ. Процесс синтеза предполагал наименьшее содержание каких-либо примесей в растущем кристалле, т.е. не производилось никакого намеренного легирования. Более того для синтеза использовался метан марки 6.0, а в линии подачи водорода установлен очиститель водорода до чистоты  $10^9$ . Исследование полученного материала оптическими методами (спектроскопия КРС, люминесценции, поглощения в ИК, УФ и видимом диапазонах) показало отсутствие каких-либо примесей. Несмотря на это, материал обладал заметной проводимостью порядка нескольких кОм·см.

Исследование эффекта Холла в зависимости от температуры в диапазоне 77 – 700 К показало, что обнаруженная проводимость является дырочной и источником свободных дырок являются центры, образуемые атомами бора в позиции замещения. Аппроксимация температурных зависимостей концентрации свободных носителей заряда позволила определить концентрацию бора, которая составила  $(1-2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (~0,1 ppb), а также его степень компенсации, т.е. концентрацию донорных центров. Наиболее вероятно, что донорными центрами являются С-центры, т.е. атомы азота в позиции замещения. В таком случае, концентрация азота составила  $(3-7) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (~0,02 – 0,05 ppb). Не до конца ясно то, как бор попал в ростовую камеру, а потом в алмаз. Мы предполагаем, что это могло произойти в результате травления металлических частей камеры, а металлы зачастую содержат достаточно большое количество бора в качестве примеси. Таким образом фоновая концентрация бора в алмазе может существенно зависеть от конкретной установки.

В результате данного исследования было показано, что, во-первых, эффект Холла является одним из наиболее чувствительных методов определения концентрации электрически активных центров при наличии проводимости материала. Во-вторых, показано, что стандартные технологии CVD синтеза алмаза позволяют добиваться чистоты по азоту лучше, чем  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . В-третьих, можно сделать вывод о том, что текущий уровень чистоты алмаза требует рассматривать данный материал как компенсированный полупроводник, в котором отсутствие проводимости может достигаться путем компенсации мелких акцепторных центров глубокими донорными.

### Ссылки

1. Element Six, "CVD diamond handbook", (2021). <https://e6cvd.com/us/diamond-book-download>.
2. T. Luo, L. Lindner, R. Blinder, M. Capelli, J. Langer, V. Cimalla, F.A. Hahl, X. Vidal, and J. Jeske, "Rapid determination of single substitutional nitrogen Ns0 concentration in diamond from UV-Vis spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.* 121(6), 064002 (2022).