

# Электронные свойства сильно легированных бором монокристаллов алмаза<sup>1</sup>

Максимов Дмитрий Владимирович<sup>2</sup>

студент

Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

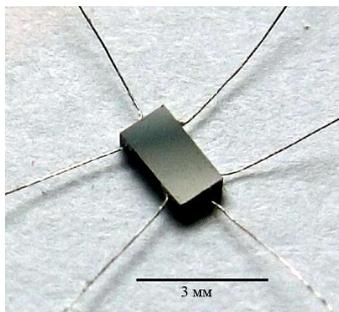
E-mail: maksimov\_dmitri@mail.ru

## Введение

В сильно легированных бором алмазных материалах сравнительно недавно обнаружена сверхпроводимость [1]. Сверхпроводящие образцы представляли собой либо поликристаллические алмазы, синтезированные при давлении 10-20 ГПа и температурах 2500 – 2800 К, либо алмазные плёнки, выращенные CVD-методом с СВЧ излучением. Этот метод роста алмазных пленок позволяет получать высокие концентрации примеси бора. В пленках с ориентацией поверхности (111) они могут быть на порядок больше, чем при ориентации (001). Размер кристаллитов в объемных образцах не превышал нескольких микрон. Краткий обзор методов получения поликристаллических алмазных порошков и пленок приведен в [2].

## Методика измерений и образцы

В настоящей работе были исследованы монокристаллы алмаза, выращенные на затравке методом температурного градиента при давлении  $P=5.5$  ГПа и  $T=1650$  К в системе Fe-Al-C-B, сильно легированные бором. Их линейные размеры составили 2-7 мм. На *рис.1* изображен образец, вырезанный из монокристалла алмаза. Температурные зависимости сопротивления измерялись по четырёхконтактной схеме в диапазоне температур от комнатной до 0.5 К. Полученная из эффекта Холла концентрация носителей заряда (дырок) для средне легированного образца составила  $\sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.



*Рис.1* Образец легированного бором монокристалла алмаза с контактами, приготовленный для измерения эффекта Холла и сопротивления

## Результаты измерений и их обсуждение

На *рис.2а* представлены зависимости относительного сопротивления от температуры для трёх монокристаллов с максимально высоким уровнем легирования. На *рис. 2б*, на примере образца №2, показана зависимость сопротивления образца до отжига и после ( $p=5.5$  ГПа,  $T=2220$  К) на участке температур от комнатной до  $\approx 110$  К. До отжига наблюдается активационная зависимость проводимости с энергией активации  $E_a \approx 50$  мэВ при температурах от комнатной до  $\approx 200$  К. После отжига активационный участок продлился до температуры  $\approx 110$  К, а энергия активации составила  $E_a=37.5$  мэВ. Энергия активации акцепторного уровня бора в алмазе составляет  $E_a=368$  мэВ по оптическим измерениям, однако из температурных зависимостей сопротивления наблюдаются и меньшие значения  $E_a$  [1]. Малое значение  $E_a$  в данном случае связано с образованием примесной зоны проводимости и смещением уровня Ферми.

<sup>1</sup> Данная работа поддержана грантом РФФИ № 05-02-17368-а.

<sup>2</sup> Автор выражает признательность профессору, д.ф.-м.н. Кульбачинскому В.А. за помощь в подготовке тезисов.

Характерной особенностью монокристаллов с максимальным уровнем легирования является следующая зависимость проводимости при температурах ниже  $\approx 50$  К:  $\sigma(T) = \sigma(0) + bT^{1/2}$ . Второй член выражения относится к квантовым поправкам к проводимости, связанным с электрон-электронным взаимодействием [2]. Степенная зависимость проводимости от температуры с показателем степени  $1/2$  (до отжига) свидетельствует о том, что концентрация дырок в образцах достигает величины близкой к критической при переходе металл-изолятор. Для сильнолегированных поликристаллических алмазов и алмазных пленок критическая концентрация составляет  $\sim 3 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$  [5,6]. После отжига образца зависимость проводимости от температуры в диапазоне 0.5-50 К существенно ослабляется: коэффициент  $b$  в выражении для проводимости уменьшается в 20 раз.

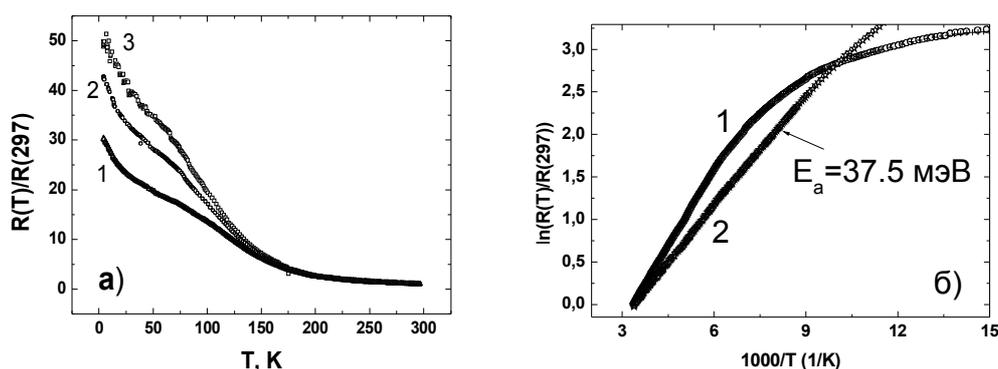


Рис.2 а - Температурная зависимость сопротивления образцов сильно легированных бором №1-№3. б - Зависимость относительного изменения сопротивления образца №2 от обратной температуры: до отжига (1) и после отжига (2)

Проведены низкотемпературные электрические измерения монокристаллов алмаза с концентрацией бора в диапазоне от  $\sim 10^{19}$  до  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . В области температур выше 110 – 200 К наблюдается активационный тип проводимости с энергией активации в диапазоне 30 – 90 мэВ. В двух образцах наблюдается прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка на участке температур 70 – 297 К. В монокристаллах с концентрацией бора  $\sim 10^{20}$  при  $T = 0.5 - 50\text{К}$  проводимость пропорциональна  $T^{1/2}$ . Это указывает на близость системы к границе перехода металл-изолятор. Монокристаллы алмаза с большей концентрацией бора данным методом получить не удастся, так как повышение концентрации бора в ростовой среде приводило к блокированию роста кристаллов.

### Литература

1. Е.А. Екимов, V.A. Sidorov, E.D. Bauer et al. (2004) Superconductivity in diamond // Nature, 428, p. 542.
2. В.Д. Бланк, Г.А. Дубицкий, В.А. Кульбачинский и др. (2004) Поликристаллические алмазные порошки и пленки // Российский Химический Журнал, т. XLVIII, №5, 90.
3. K. Thonke (2003) The boron acceptor in diamond // Semicond. Sci. Technol., 18, S20.
4. N. F. Mott (1990) Metal-Insulator Transitions // London: Taylor and Francis, 2nd ed.
5. Y. Takano, M. Nagao, I. Sakaguchi, M. Tachiki, T. Hatano, K. Kobayashi, H. Umezawa, H. Kawarada (2004) Superconductivity in diamond thin films well above liquid helium temperature // Appl. Phys. Lett., 85, 2851.
6. E. Bustarret, J. Kasmarcik, C. Marcenat et al. (2004) Dependence of the Superconducting Transition Temperature on the Doping Level in Single-Crystalline Diamond Films // Phys. Rev. Lett., 93, 237005.