

## ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ n-ТИПА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И. Б. Крынецкий<sup>1</sup>, Н. П. Шабанова<sup>2</sup>, В. П. Мартовицкий<sup>2</sup>,  
С. Ю. Гаврилкин<sup>2</sup>, В. И. Коваленко<sup>2</sup>, А. В. Варлашкин<sup>2</sup>

*При тензометрическом исследовании монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  n-типа в постоянных магнитных полях до 6 Тл в диапазоне температур 7–23 К обнаружено слабое отрицательное тепловое расширение (ОТР) в базисной плоскости. ОТР растет при повышении напряженности поля и зависит от его ориентации относительно тригональной оси с. В параллельном оси с магнитном поле 6 Тл линейный коэффициент ОТР достигает  $-7 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  и минимум длины образцов образуется при температуре 13 К, где обнаружен также максимум холловской концентрации носителей заряда. Найденная магнитоупругая аномалия может быть связана с состоянием топологического изолятора.*

**Ключевые слова:** отрицательное тепловое расширение, магнитное поле, эффект Холла, коррелированная электронная система, топологический изолятор.

Отрицательное тепловое расширение (ОТР) при низких температурах демонстрируют различные кристаллические структуры [1–7]. Немонотонная температурная зависимость коэффициента теплового расширения (КТР) может быть связана не только с особенностями структуры и фононного спектра [2, 3], но и с влиянием коррелированной электронной системы на динамику кристаллической решетки [1]. В частности, ОТР слоистых соединений объясняется возбуждением мембранных колебаний решетки [2, 3], вместе с тем, исследования в магнитном поле [4, 5] и другие эксперименты [3, 6, 7] обнаруживают присутствие электронного механизма ОТР, связанного с образованием

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, 1.

<sup>2</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: shaban@sci.lebedev.ru.

волн зарядовой (ВЗП) и спиновой (ВСП) плотности. Поиск подобных аномалий представляет интерес для  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , имеющего слоистую структуру [8], где возможно проявление поверхностных коррелированных электронных состояний и спиновой поляризации топологического изолятора (ТИ) [9–11]. В работе представлено исследование низкотемпературного теплового расширения и транспортных характеристик  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  в магнитном поле.

Монокристаллы материала двух серий выращены методом Бриджмена из компонента в соотношении, близком к стехиометрическому. Методом скола из кристаллических слитков получены пластины с толщинами  $d$  порядка 0.1 мм. Согласно рентгенодифрактометрическим данным они являются монокристаллами с ромбоэдрической структурой и параметрами решетки  $a = 4.144 \text{ \AA}$  и  $c = 28.658 \text{ \AA}$  в гексагональном базисе. Плоскость пластин совпадает со сколом по базисной плоскости (0001).

Образцы серии 1 и 2 показали  $n$ -тип проводимости металлического характера в диапазоне температур ( $T$ ) 1.5–300 К с удельным сопротивлением вдоль базисной плоскости  $\rho_{xx}(1.5 \text{ К})$  0.3 и 0.33 мΩ·см, отношением сопротивлений  $\rho_{xx}(300 \text{ К})/\rho_{xx}(1.5 \text{ К})$  1.4 и 1.5 и концентрацией носителей заряда  $n(300 \text{ К})$ , определенной из эффекта Холла,  $5.8 \cdot 10^{19}$  и  $3.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , соответственно.

Тепловое расширение измерялось в диапазоне температур 7–40 К с помощью тензометрического dilatометра с чувствительностью по относительной линейной деформации  $\Delta L/L$  не хуже  $5 \cdot 10^{-7}$  по мостовой схеме относительно плавленого кварца [6]. Датчик деформации приклеивался на плоскость скола образцов. Магнитное поле  $H$  прикладывалось перпендикулярно ( $H \parallel c$ ) или параллельно ( $H \parallel ab$ ) этой плоскости вдоль датчиков деформации. Их магнетосопротивление вносит погрешность не выше  $1 \cdot 10^{-7}$  [4]. Измерительная кривая  $(\Delta L(T)/L)^*$  относительного изменения длины образцов  $\Delta L(T)/L$  при изменении температуры включает малый сигнал от кварца с КТР порядка  $-10^{-7} \text{ К}^{-1}$ , на который вносилась поправка [6].

По результатам измерений в нулевом магнитном поле с точностью до малого сигнала от кварца при понижении температуры относительное изменение длины образцов вдоль базовой плоскости приближается к плато (рис. 1), в согласии с рентгеновскими исследованиями  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  [8]. Однако измерительная кривая теплового расширения в магнитном поле 6 Тл обнаруживает явный минимум, менее заметный в поле 3 Тл. На рис. 1 эти кривые смещены по оси ординат на величину, кратную  $-0.25 \cdot 10^{-5}$  для разделения. На вставке к рис. 1 показан линейный КТР образца  $\alpha = (dL/dT)/L$ , определенный по производной от измерительной кривой  $(\Delta L(T)/L)^*$  с поправкой на КТР кварца [6]. Из

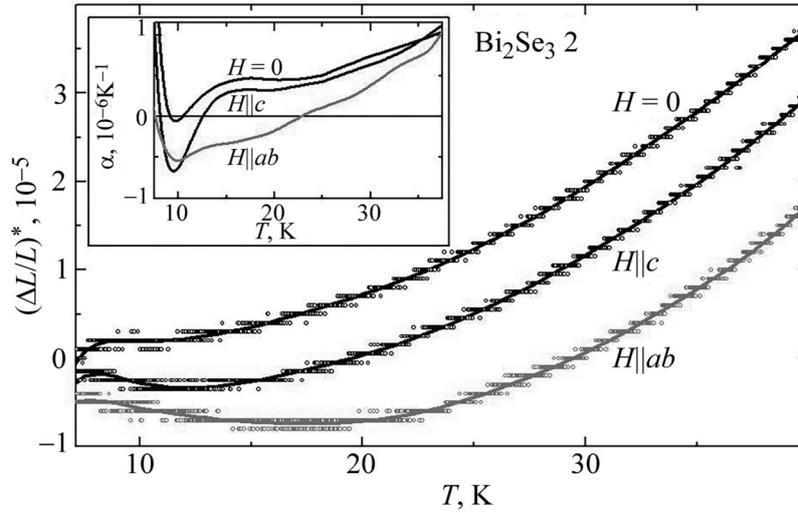


Рис. 1: Тепловое расширение вдоль базисной плоскости монокристалла  $Bi_2Se_3$  серии 2 относительно кварца в магнитном поле 0 и 6 Тл двух ориентаций. Вставка: температурная зависимость линейного КТР  $\alpha$  монокристалла с поправкой на КТР кварца.

рис. 1 видно, что в магнитном поле 6 Тл в ориентации  $H||c$  минимуму относительной деформации  $\Delta L(T)/L$  вдоль плоскости монокристалла отвечает температура 12–13 К, где  $\alpha = 0$ , ниже которой КТР отрицателен и достигает  $-7 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  при  $T \approx 9.5 \text{ K}$ . При ориентации  $H||ab$  область ОТР шире и минимум  $\Delta L(T)/L$  находится при  $T \approx 23 \text{ K}$ .

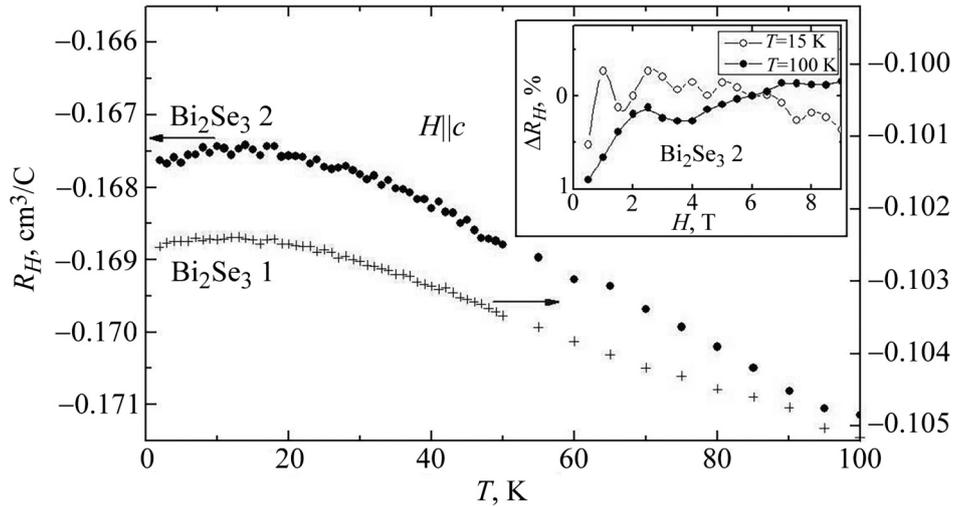


Рис. 2: Температурная зависимость коэффициента Холла монокристаллов  $Bi_2Se_3$  серии 1 и 2 в магнитном поле 9 Тл,  $H||c$ . Вставка: полевое изменение  $\Delta R_H$  коэффициента Холла относительно его значения в поле 6 Тл, в процентах.

Для изучения природы вызванного магнитным полем ОТР материала представляют интерес температурные и полевые зависимости параметров эффекта Холла. Измерения проводились в магнитном поле  $H\parallel c$ . Поперечное холловское сопротивление  $R_{xy}$  растет практически линейно при повышении напряженности поля в диапазоне 1–9 Тл и имеет отрицательный знак. Абсолютная величина коэффициента Холла  $R_H = R_{xy}(H)d/H$  снижается на 5–6% при охлаждении от 300 до 13–14 К, где зарегистрирован её минимум (рис. 2). Он отвечает максимуму  $n$  в соотношении  $R_H = (en)^{-1}$ , где  $e$  – заряд электрона. Тот факт, что эта особенность совпала по температуре с минимумом теплового расширения в магнитном поле  $H\parallel c$  (рис. 1), позволяет предположить, что максимум холловской концентрации носителей заряда обусловлен минимумом объема кристаллической решетки, хотя возможны иные интерпретации [10].

Хотя изменение коэффициента Холла  $\Delta R_H$  при изменении магнитного поля находится в пределах 1% (вставка к рис. 2), оно имеет особенности, которые могут иметь квантовую природу [10].

Полученных данных пока недостаточно, чтобы установить, каким электронным механизмом определяется вызванное магнитным полем ОТР монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Однако есть экспериментальные факты, указывающие на возможные магнитоупругие аномалии материала, связанные с состоянием ТИ. При ИК-спектроскопическом исследовании подобных монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  обнаружено анизотропное влияние внешнего магнитного поля на особенности оптической проводимости, отражающие особенности фононного и электронного спектров [11]. В частности, неожиданная для немагнитного материала полевая настройка резонанса Фано интерпретировалась как следствие магнитострикции в системе с сильным спин-орбитальным взаимодействием и присущим ТИ магнитоэлектрическим эффектом. Интересно также отметить влияние магнитного поля на спин-плазмоны, образующие связанные ВЗП и ВСП на поверхности ТИ [9], что, предположительно, может повлиять на динамику решетки.

Таким образом, в области низкотемпературного плато теплового расширения монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$   $n$ -типа вдоль базисной плоскости обнаружено слабое отрицательное тепловое расширение во внешнем магнитном поле, влияние которого носит анизотропный характер. Тот факт, что минимум относительной тепловой деформации образцов в магнитном поле  $H\parallel c$  сопровождается максимумом холловской концентрации носителей заряда, может свидетельствовать о минимуме объема кристаллической решетки. Мы полагаем, что аномальный магнитолевой отклик оптических спектров  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  [11],

связанный с сильным спин-орбитальным взаимодействием и состоянием ТИ, и обнаруженная нами магнитоупругая аномалия материала имеют общую природу.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП Минобрнауки РФ, соглашение № 14.575.21.0047 и РАН по программе “Актуальные проблемы физики низких температур”.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Hosomichi, Y. Xue, S. Naher, et al., *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **66**, 1583 (2005).
- [2] Н. А. Абдуллаев, *ФТТ* **43**, 697 (2001).
- [3] А. И. Дмитриев, В. М. Каминский, Г. В. Буторин и др., *ФТТ* **51**, 2207 (2009).
- [4] И. Б. Крынецкий, В. А. Кульбачинский, Н. П. Шабанова и др., *ЖЭТФ* **143**, 1005 (2013).
- [5] А. И. Головашкин, А. П. Русаков, *ФТТ* **49**, 1363 (2007).
- [6] И. Б. Крынецкий, В. А. Кульбачинский, М. В. Голубков и др., *ЖЭТФ* **146**, 618 (2014).
- [7] H. Negishi, Y. Kuroiwa, H. Akamine, et al., *Solid State Communications* **125**, 45 (2003).
- [8] X. Chen, H. D. Zhou, A. Kiswandhi, et al., *Appl. Phys. Lett.* **99**, 261912 (2011).
- [9] D. K. Efimkin, Yu. E. Lozovik, A. A. Sokolik, *Nanoscale Research Letters* **7**, 163 (2012).
- [10] J. G. Analytis, J. H. Chu, Y. Chen, et al., *Phys. Rev. B* **81**, 205407 (2010).
- [11] A. D. LaForge, A. Frenzel, B. C. Pursley, et al., *Phys. Rev. B* **81**, 125120 (2010).

Поступила в редакцию 4 июля 2017 г.