

УДК 669.765:537.312.6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛА ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА Bi_2Te_3

¹Чистяков В.В., ¹Вишняков А.А., ¹Емельянова С.М., ¹Перевозчикова Ю.А.,
²Доможирова А.Н., ¹Дякина В.П., ¹Марченкова Е.Б., ^{1,2}Марченков В.В.

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург;

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, e-mail: wchist@imp.uran.ru

Выращен монокристалл топологического изолятора Bi_2Te_3 высокой степени чистоты, с отношением сопротивлений $\rho_{293\text{K}}/\rho_{4.2\text{K}} \approx 25$. Исследованы электро- и магнитосопротивление, эффект Холла монокристалла топологического изолятора Bi_2Te_3 в температурном диапазоне 4.2 – 80 К и в магнитных полях до 10 Т, определен тип носителей заряда и рассчитана их концентрация. Измерения электро- и магнитосопротивления, а также эффекта Холла и проводились по общепринятой 4-контактной методике на постоянном токе с коммутацией направления электрического тока и внешнего магнитного поля. Обнаружены особенности в поведении электронного транспорта, которые можно объяснить возможным проявлением «металлического» характера проводимости приповерхностного слоя топологического изолятора Bi_2Te_3 , а также существенным вкладом в проводимость (сопротивление) процессов электрон-фононного рассеяния носителей тока.

Ключевые слова: топологические изоляторы, электрические и гальваномагнитные свойства, монокристаллы

ELECTRICAL AND GALVANOMAGNETIC PROPERTIES OF Bi_2Te_3 TOPOLOGICAL INSULATOR SINGLE CRYSTAL

¹Chistyakov V.V., ¹Vishnyakov A.A., ¹Emelyanova S.M., ¹Perevozchikova Yu.A.,
²Domozhirova A.N., ¹Dyakina V.P., ¹Marchenkova E.B., ^{1,2}Marchenkov V.V.

¹M.N. Miheev Institute of Metal Physics of UB RAS, Ekaterinburg;

²Ural Federal University, Ekaterinburg, e-mail: wchist@imp.uran.ru

A single crystal of a high-purity topological insulator Bi_2Te_3 with a resistivity ratio $\rho_{293\text{K}}/\rho_{4.2\text{K}} \approx 25$ was grown. The electro- and magnetoresistance, the Hall Effect of a single crystal of the topological insulator Bi_2Te_3 in the temperature range 4.2 – 80 K and in magnetic fields up to 10 T are investigated, the type of charge carriers is determined and their concentration is calculated. Measurements of the electro- and magnetoresistivity, as well as the Hall Effect, were carried out according to the conventional 4-contact DC technique with the commutation of the direction of the electric current and the external magnetic field. Specific features in the behavior of electron transport that can be explained by the possible manifestation of the «metallic» nature of the conductivity of the near-surface layer of the topological insulator Bi_2Te_3 are revealed, as well as by an important contribution to the conductivity (resistance) of electron-phonon scattering processes of current carriers.

Keywords: topological insulators, electrical and galvanomagnetic properties, single crystals

В настоящее время к новым направлениям развития науки и техники можно отнести микро- и наноэлектронику и спинтронику. Для приборов и устройств наноэлектроники и спинтроники необходимы новые функциональные материалы с уникальными физическими свойствами, в частности, с высокой степенью спиновой поляризации носителей заряда. Одними из таких перспективных материалов являются топологические изоляторы (ТИ), которые представляют собой новый класс веществ с нетривиальной топологической зонной структурой, возникающей из-за сильного спин-орбитального взаимодействия [3]. В этих соединениях наблюдается характерная для изолятора энергетическая щель в объеме материала и защищенные бесщелевые проводящие состояния на его поверхности. Жесткая связь между направлениями импульса и спина электрона приводит к возникновению спиновой поляризации носите-

лей заряда и возможности протекания спин-поляризованного тока вблизи поверхности ТИ практически без потерь [4].

Поскольку такие материалы представляют огромный интерес как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения, то синтез особо чистых и совершенных объемных монокристаллов ТИ, а также всестороннее исследование их физических свойств представляет большой интерес. Цель данной работы – синтез высокосовершенного монокристалла ТИ Bi_2Te_3 и изучение его электрических и гальваномагнитных свойств в сильных магнитных полях.

Материалы и методы исследования

Теллурид висмута Bi_2Te_3 имеет ромбическую симметрию с пространственной группой $R\bar{3}m$ [5]. В элементарной ячейке содержатся три формульных единицы. Теллурид висмута имеет слоистую структуру, образованную повтором пяти сильно связанных атомных слоев Te-Bi-Te-Bi-Te . Слои ориентирова-

ны перпендикулярно оси c . Пятикратные слои связаны слабым взаимодействием Ван-дер-Ваальса.

Монокристалл Bi_2Te_3 был выращен методом Бриджмена-Стокбаргера и имеет отношение сопротивлений при комнатной температуре к гелиевой $\rho_{293\text{K}}/\rho_{4.2\text{K}} \approx 25$ [2]. Это свидетельствует о высокой степени чистоты и совершенства монокристалла. Образец для исследований представлял собой пластину, ориентированную перпендикулярно кристаллографической оси c , с размерами $0.5 \times 2 \times 5$ мм³. Измерения электро- и магнитосопротивления, а также эффекта Холла и проводились по общепринятой 4-контактной методике на постоянном токе с коммутацией направления электрического тока и внешнего магнитного поля в интервале температур от 4.2 до 80 К, в магнитных полях до 10 Т.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости электросопротивления $\rho(T)$ монокристалла Bi_2Te_3 в отсутствие внешнего поля. Видно, что $\rho(T)$ имеет «металлический» ход, т.е. возрастает с увеличением температуры.

Внешнее магнитное поле приводит к существенному возрастанию величины сопротивления (рис. 2), хотя вид температурной зависимости $\rho_{xx}(T)$ при этом практически не меняется. На рис. 3, а показаны полевые зависимости магнитосопротивления $\Delta\rho_{xx}/\rho_0 = (\rho_{xx} - \rho_0)/\rho_0$ (где ρ_{xx} и ρ_0 – сопротивление в магнитном поле и в его отсутствие) при $T = 4.2$ К. Видно, что магнитосопротивление $\Delta\rho_{xx}/\rho_0$ монотонно возрастает с полем по закону, близкому к линейному в полях свыше 2 Т, достигая значения около 2100 % в поле 10 Т.

С увеличением температуры магнитосопротивление падает и при $T = 80$ К $\Delta\rho_{xx}/\rho_0$ становится около 300 % в поле 10 Т, все еще

оставаясь достаточно большой величиной (рис. 3, б).

На вставке рис. 4 показаны полевые зависимости холловского сопротивления ρ_{xy} монокристалла Bi_2Te_3 при $T = 4.2$ К. Видно, что сопротивление Холла линейно возрастает с магнитным полем и имеет отрицательный знак. Это означает, что основным типом носителей заряда являются электроны, а линейный характер зависимости $\rho_{xy}(B)$ позволяет определить нормальный коэффициент Холла $R_0 = \rho_{xy}/B$ и оценить концентрацию носителей тока n , используя следующую формулу (см., напр., [1])

$$R_0 = 1/e \cdot n \cdot c, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, а c – скорость света.

Измерения полевых зависимостей $\rho_{xy}(B)$ показали, что они имеют линейный вид во всем исследованном интервале температур. Поэтому были измерены температурные зависимости сопротивления Холла $\rho_{xy}(T)$ и при помощи формулы (1) определена концентрация носителей тока n . Температурные зависимости $n(T)$ представлены на рис. 4. Видно, что при $T = 4.2$ К концентрация $n \approx 3.76 \cdot 10^{18}$ см⁻³, которая возрастает с температурой, достигая значения $5.02 \cdot 10^{18}$ см⁻³ при $T = 80$ К. Т.е. концентрация носителей заряда возрастает, а проводимость (сопротивление) падает (возрастает) с увеличением температуры.

Такое необычное поведение $n(T)$ и $\rho(T)$ можно объяснить возможным проявлением «металлического» характера проводимости приповерхностного слоя ТИ Bi_2Te_3 , а также существенным вкладом в проводимость (сопротивление) процессов электрон-фононного рассеяния носителей тока.

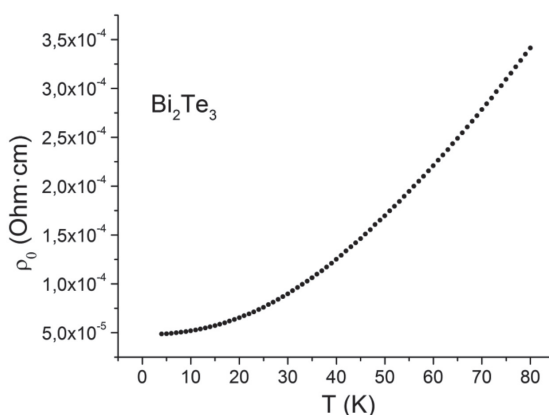


Рис. 1. Температурная зависимость электросопротивления монокристалла Bi_2Te_3 без магнитного поля

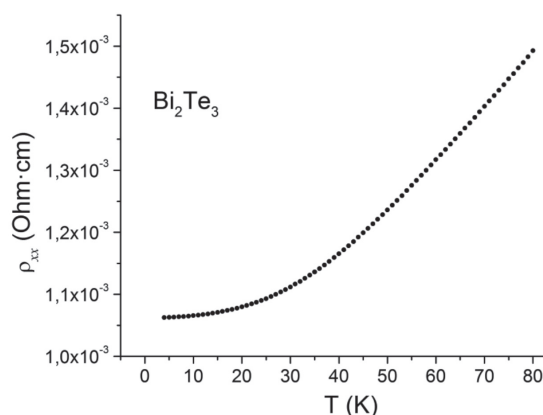


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления монокристалла Bi_2Te_3 в поле 10 Т

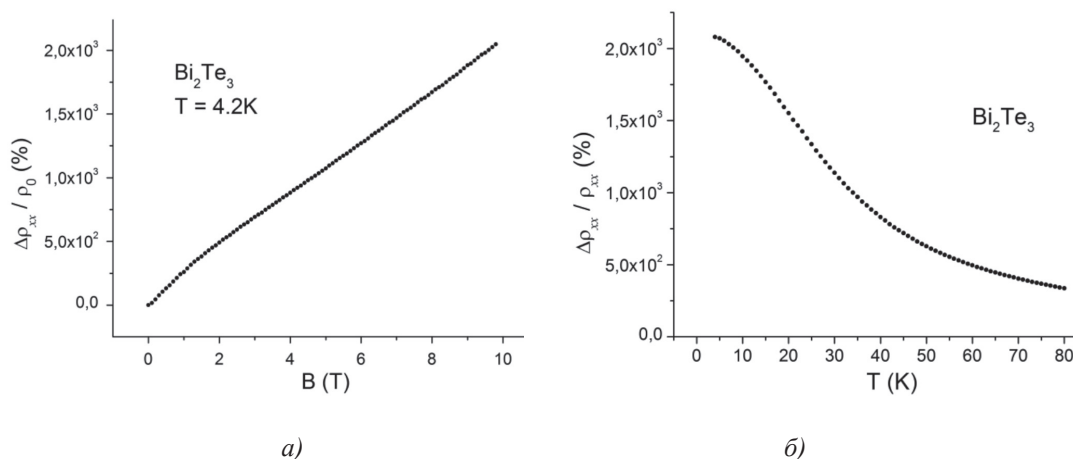


Рис. 3. а) Полевая зависимость магнитосопротивления $\Delta\rho_{xx}/\rho_0$ Bi_2Te_3 при $T = 4.2 \text{ K}$; б) Температурная зависимость магнитосопротивления $\Delta\rho_{xx}/\rho_{xx}$ Bi_2Te_3 в поле 10 T

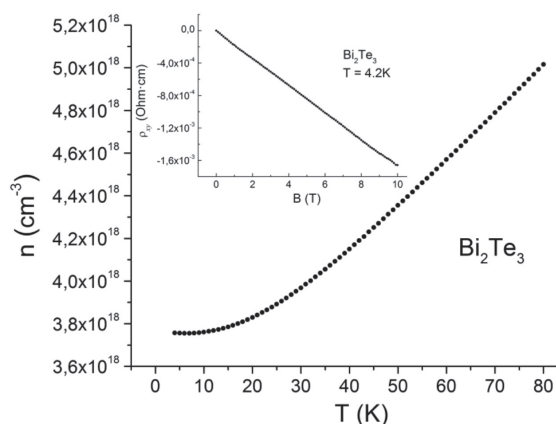


Рис. 4. Температурная зависимость концентрации носителей тока n монокристалла Bi_2Te_3 . На вставке показана полевая зависимость сопротивления Холла ρ_{xy} при $T = 4.2 \text{ K}$

Заключение

Таким образом, выращен монокристалл ТИ Bi_2Te_3 с отношением сопротивлений $\rho_{293\text{K}}/\rho_{4.2\text{K}} \approx 25$. Показано, что основным типом носителей в нем при низких температурах являются электроны с концентрацией порядка 10^{18} cm^{-3} , которая монотонно возрастает с ростом T . Величина проводимости (сопротивления) при этом уменьшается (возрастает), что отчасти могло бы быть проявлением «металлического» характера

проводимости в приповерхностном слое вблизи поверхности ТИ. Хотя, по-видимому, основной вклад при этом дает сильное электрон-фононное взаимодействие. Для выяснения роли «поверхности» и «объема» в проводимости таких материалов необходимы экспериментальные исследования на тонких пленках.

Работа выполнена по плановому государственному заданию (тема «Спин» № 01201463330) при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-17-2-12) и Правительства РФ (постановление № 211, контракт № 02. A03.21.0006).

Список литературы

1. Коуров Н.И. Гальваномагнитные свойства сплавов Гейслера Co_2YAl ($\text{Y}=\text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ni}$) / Коуров Н.И., Марченков В.В., Первозчикова Ю.А., Weber H.W. // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59. – С. 63.
2. Подорожкин Д.Ю. Исследование топологического изолятора Bi_2Te_3 методом ЯМР / Подорожкин Д.Ю., Чарная Е.В., Антоненко А., Мухамадьяров Р., Марченков В.В., Наумов С.В., Huang J.C.A., Weber H.W., Бугаев А.С. // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57. – С. 1698.
3. Hasan M.Z. Topological Insulators / Hasan, M.Z., Kane C.L. // Reviews of Modern Physics – 2010. – Vol. 82. – P. 3045.
4. Zhang H. Topological insulators in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 with a single Dirac cone on the surface / Zhang H., Liu C.-X., Qi X.-L., Dai X., Fang Z., Zhang S.-C. // Nature Physics – 2009. – Vol. 5. – P. 438.
5. Wong-Ng W. Topological insulators in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 with a single Dirac cone on the surface / Wong-Ng W., Jores H., Martin J., Zavalij P.Y., Yan Y., Yang J. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 82. – P. 107.