

УДК 669.765:537.312.6

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА Bi_2Se_3

© 2019 г. В. В. Чистяков¹, А. Н. Доможирова¹, Дж. Ч. Э. Хуанг², В. В. Марченков^{1,3,*}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

²Национальный университет Ченг Кунга, Тайнань, Тайвань

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”, Екатеринбург, Россия

*E-mail: march@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Измерено электросопротивление тонких пленок топологического изолятора (ТИ) Bi_2Se_3 толщиной от 10 до 75 нм в интервале температур от 4.2 до 300 К. Обнаружен размерный эффект в электропроводимости пленок Bi_2Se_3 , т.е. линейная зависимость проводимости пленки от ее обратной толщины. Высказано предположение, что подобный эффект может наблюдаться в других ТИ и системах с неоднородным распределением тока по сечению образца.

DOI: 10.1134/S0367676519070111

ВВЕДЕНИЕ

Для устройств спинтроники необходимы новые функциональные материалы с уникальными физическими свойствами. Одним из таких перспективных материалов являются топологические изоляторы (ТИ) [1], которые имеют нетривиальную топологическую зонную структуру, возникающую из-за сильного спин-орбитального взаимодействия [2]. ТИ имеет энергетическую щель в объеме, являясь изолятором или полупроводником, а также топологически защищенные проводящие бесщелевые состояния на своей поверхности. Жесткая связь между направлениями импульса и спином электрона приводит к возникновению спиновой поляризации носителей заряда и возможности спин-поляризованного тока, протекающего вблизи поверхности ТИ практически без потерь [3], что может быть использовано в спинтронных устройствах.

Известно, что соединение Bi_2Se_3 представляет собой ТИ [4–6]. Поскольку величина проводимости в объеме и вблизи поверхности таких материалов существенно различается, то, во-первых, в них должен наблюдаться “размерный” эффект – зависимость электропроводимости от поперечных размеров образца. Во-вторых, появляется возможность “разделить” проводимости объема и поверхности экспериментально, аналогично проведенному разделению в работе [7], где был исследован размерный эффект в про-

водимости монокристаллов вольфрама в условиях неоднородного распределения постоянного электрического тока по сечению проводника в магнитном поле. Цель настоящей работы – поиск и изучение размерного эффекта в электропроводимости тонких пленок ТИ Bi_2Se_3 .

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Тонкие пленки ТИ Bi_2Se_3 были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках Al_2O_3 и имели толщину 10, 20, 30, 40, 50 и 75 нм. Данные рентгено-дифракционного и элементного анализов показали, что синтезированные пленки имеют состав Bi_2Se_3 (см. [4, 5]). Измерения электросопротивления ρ проводились общепринятым 4-контактным способом на постоянном токе в интервале температур от 4.2 до 300 К. Для удобства интерпретации и обсуждения результаты исследований представлены в единицах проводимости σ , которую определяли, как $\sigma = 1/\rho$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку в ТИ проводимости в объеме и вблизи поверхности существенно различаются, ТИ может быть представлен в виде системы двух параллельно соединенных проводников: “металлической” поверхности и “полупроводникового”

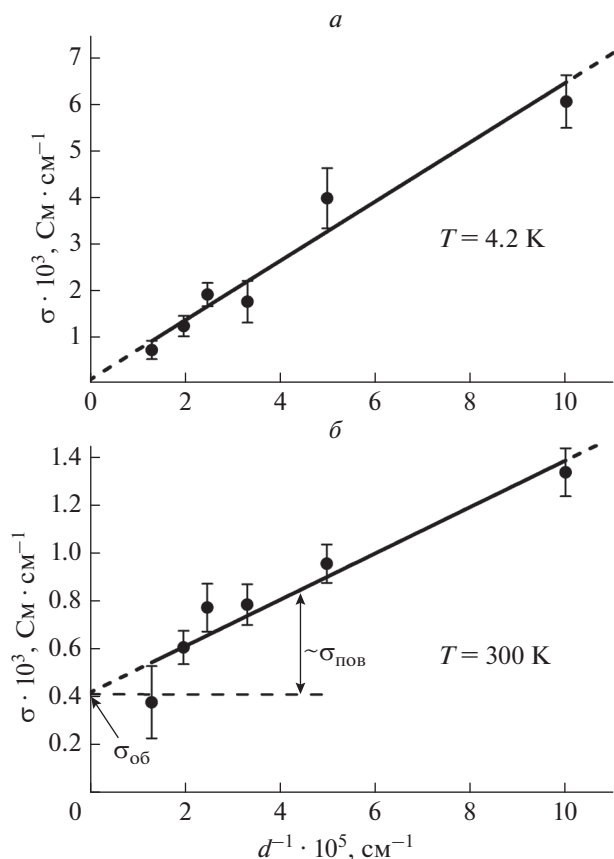


Рис. 1. Зависимость удельной проводимости σ от обратной толщины пленок Bi_2Se_3 : *a* – $T = 4.2$ К; *б* – $T = 300$ К. На рис. 1*б* показаны объемная проводимость $\sigma_{\text{об}}$, которая определяется экстраполяцией линейной зависимости на проводник бесконечной толщины, и поверхностная проводимость $\sigma_{\text{пов}}$, пропорциональная тангенсу угла наклона прямой.

объема (см. также работу [8] и ссылки в ней). Как было показано в [8], проводимость σ такой системы можно представить в виде:

$$\sigma \approx \sigma_{\text{пов}}(\delta/d) + \sigma_{\text{об}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{пов}}$ – поверхностная проводимость приповерхностного слоя толщиной δ , $\sigma_{\text{об}}$ – проводимость объема. Таким образом, должен наблюдаться размерный эффект: зависимость проводимости σ от обратной толщины пленки d^{-1} , т.е. $\sigma = f(d^{-1})$.

На рис. 1 представлены зависимости $\sigma = f(d^{-1})$ при 4.2 и 300 К. Видно, что размерный эффект – линейная зависимость проводимости от обратной толщины пленки, наблюдается во всем исследованном интервале температур: от низких температур (рис. 1*a*) и до комнатной (рис. 1*б*). Поскольку первый член в (1) пропорционален поверхностной проводимости $\sigma_{\text{пов}}$, а второй – объемная проводимость $\sigma_{\text{об}}$, то можно “разделить” $\sigma_{\text{пов}}$ и $\sigma_{\text{об}}$ (см. также рис. 1*б*). Учитывая данные работы [9], мы предполагали, что величина δ не превышает

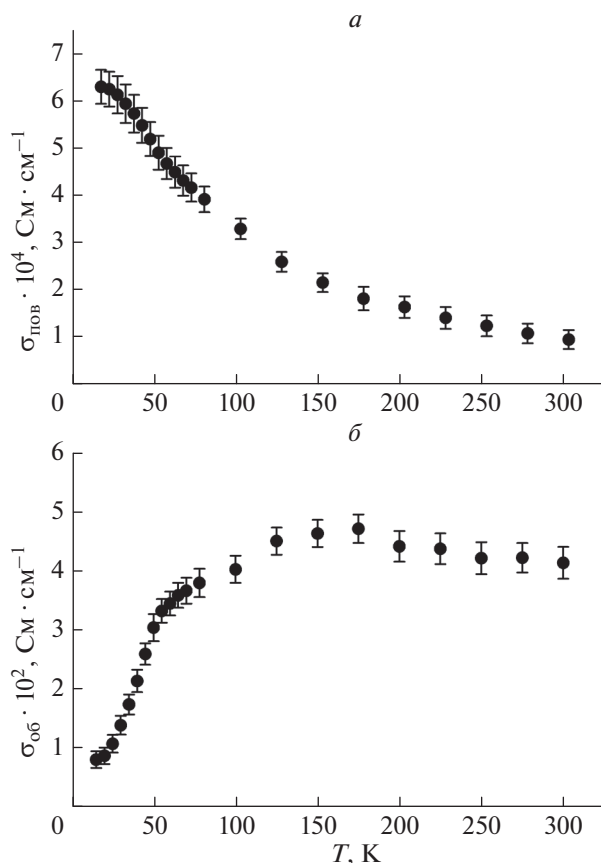


Рис. 2. Температурные зависимости поверхностной $\sigma_{\text{пов}}$ и объемной $\sigma_{\text{об}}$ проводимостей ТИ Bi_2Se_3 .

значение в 1 нм, соответственно при расчетах $\sigma_{\text{пов}}$ использовали значение $\delta = 1$ нм.

Согласно выполненным оценкам, при $T = 4.2$ К $\sigma_{\text{об}} \approx 0.5 \cdot 10^3$ и $\sigma_{\text{пов}} \approx 9.8 \cdot 10^4$ $\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$, а при $T = 300$ К $\sigma_{\text{об}} \approx 4.12 \cdot 10^2$ и $\sigma_{\text{пов}} \approx 0.97 \cdot 10^4$ $\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$. Это означает, что поверхностная проводимость $\sigma_{\text{пов}}$ почти в 200 раз выше, чем $\sigma_{\text{об}}$ при $T = 4.2$ К и более чем в 20 раз выше при $T = 300$ К. Соответственно, плотность электрического тока вблизи поверхности пленки на порядки величины (почти в 800 раз для $T = 4.2$ К и в 24 раза для $T = 300$ К) превышает плотность тока в ее объеме, как и должно быть для ТИ. Полученные результаты хорошо качественно согласуются с [6].

На рис. 2*a* и рис. 2*б* показаны температурные зависимости $\sigma_{\text{пов}}$ и $\sigma_{\text{об}}$. Видно, что $\sigma_{\text{пов}}$ уменьшается с ростом температуры, т.е. поверхность ведет себя как металл. Это может быть подтверждением наличия металлических проводящих состояний на поверхности ТИ, а $\sigma_{\text{об}}$ увеличивается с ростом температуры, что свойственно для полупроводников.

ВЫВОДЫ

Обнаружен размерный эффект в электропроводимости тонких пленок ТИ Bi_2Se_3 в виде линейной зависимости проводимости пленки от ее обратной толщины. Это позволяет “разделить” объемную и поверхностную проводимости при различных температурах. Показано, что проводимость вблизи поверхности пленки Bi_2Se_3 на порядки величины превышает проводимость в ее объеме. Соответственно, плотность тока вблизи поверхности исследованных пленок на 2 порядка превышает плотность тока в объеме.

По-видимому, подобные эффекты должны наблюдаться и в других ТИ и системах с неоднородным распределением постоянного тока по сечению образца.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России (тема “Спин”, № АААА-А18-118020290104-2) при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-52-52008) и Правительства Россий-

ской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhang H., Liu C.X., Qi X.L. et al.* // Nat. Phys. 2009. V. 5. P. 438.
2. *Xu S.Y., Belopolski I., Alidoust N. et al.* // Science. 2015. V. 349. P. 6248.
3. *Liu Z.K., Yang L.X., Sun Y. et al.* // Nat. Mat. 2016. V. 15. P. 27.
4. *Liu Y.H., Chong C.W., Jheng J.L. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. Art. № 012106.
5. *Liu Y., Chong C., Chen W. et al.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2017. V. 56. Art. № 070311.
6. *Bhattacharyya B., Sharma A., Awana V.P.S. et al.* // J. Phys. Cond. Mat. 2017. V. 29. Art. № 115602.
7. *Marchenkov V.V., Weber H.W.* // J. Low Temp. Phys. 2003. V. 132. P. 135.
8. *Marchenkov V.V., Chistyakov V.V., Huang J.C.A. et al.* // EPJ Web Conf. 2018. V. 185. Art. № 01002.
9. *Qi X.L., Zhang S.C.* // Rev. Mod. Phys. 2011. V. 83. P. 1057.