

УДК 537.31

ЭФФЕКТ СЛАБОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ В НОВЫХ МАГНИТНЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ $MnBi_4Sb_5Te_4$

Н.А.АБДУЛЛАЕВ^{1,2}, Х.В.АЛИГУЛИЕВА^{1,3}, В.Н.ЗВЕРЕВ⁴, З.С.АЛИЕВ¹,
И.Р.АМИРАСЛАНОВ^{1,2}, М.Б.БАБАНЦЫ^{2,5}, С.М.БАГИРОВА¹, Е.НАЛИЕВА¹,
И.А.НАСИБОВ¹, Н.Т.МАМЕДОВ¹

Институт физики НАН Азербайджана¹
AZ1143, г. Баку, пр. Г.Джавида, 131

Азербайджанский Государственный Университет²
AZ1022, г. Баку, пр. Бакиханова, 23

Сумгаитский государственный университет³
AZ5008, г. Сумгаит, 43-й квартал

Институт физики твердого тела РАН⁴
142432, г. Черноголовка, Моск. обл., ул. Академика Осипяна
Институт катализа и неорганической химии НАН Азербайджана⁵
AZ1143, г. Баку, пр. Г.Джавида, 113
abnadr@mail.ru

Получена: 07.01.2021
Принята к печати: 25.02.2021

РЕФЕРАТ

Получены новые магнитные топологические изоляторы твердого раствора $MnBi_4Sb_{1-x}Te_4$. Изучена электропроводность слоистого соединения $MnBi_4Sb_{1-x}Te_4$ в плоскости слоев и в направлении перпендикулярном слоям в широкой области температур 1,4-300К. Обнаружено, что в обоих направлениях в интервале температур 50-300К наблюдается «металлический» характер температурной зависимости удельного сопротивления. Ниже температур $T \sim 50$ К величина удельного сопротивления возрастает и зависимость $\rho(T)$ демонстрирует перегиб при $T \sim 23$ К. Возрастание сопротивления в этом температурном интервале обусловлено спиновыми флуктуациями и происходящим фазовым переходом парамагнетик-антиферромагнетик. Ниже температуры 23К возрастание сопротивления обусловлено квантовыми интерференционными поправками к проводимости, что подтверждается данными исследования магнитосопротивления.

Ключевые слова: топологический изолятор, антиферромагнетик, рентгеновская дифракция, рамановское рассеяние, электропроводность, эффект Холла, магнитосопротивление

ВВЕДЕНИЕ

Хотя топологические изоляторы впервые были предсказаны в 1980-х годах, однако экспериментально были обнаружены и исследованы, начиная с 2007 года [1-3]. Топологические изоляторы - соединения, на поверхностях которых наблюдается металлический характер проводимости, а в объеме - изоляторы (диэлектрики). Проводящие свойства поверхности яв-

ляются следствием сильного спин-орбитального взаимодействия, которое приводит к возникновению спин-расщепленных топологических поверхностных состояний с дисперсией так называемого дираковского типа, то есть линейной зависимостью энергии от импульса, как в графене.

В [4] методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES, angle-resolved photoemission spectroscopy) показано

существование конусов Дирака в соединении Bi_2Se_3 . Авторами [5,6] методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением было доказано существование конусов Дирака в соединениях Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 . Таким образом, кристаллы Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 , являющиеся компонентами высокоэффективных термоэлектрических преобразователей, оказались еще и классическими топологическими изоляторами. Практической интерес к топологическим изоляторам обусловлен тем, что поверхностные состояния защищены симметрией обращения времени от рассеяния на немагнитных примесях и дефектах и поэтому носители заряда в этих состояниях могут двигаться вдоль поверхности объемного материала почти без потери энергии. Таким образом, возможно осуществление бездиссипативного переноса заряда. Обобщение полученных экспериментальных и теоретических работ по решению нового класса кристаллов - топологических изоляторов - приведено в 2010 году в обзоре J.E.Moore [7].

В отличие от их немагнитных аналогов, магнитные топологические изоляторы могут иметь зазоры на некоторых поверхностях, что делает возможным наблюдение ряда уникальных физических явлений, таких как квантовый аномальный Холл (QAH), магнитоэлектрический эффект, аксионная электродинамика, майорановские фермионы и др. [8-11]. Магнитные топологические изоляторы востребованы и в новой области современной электроники - спинтронике, в основном, в средствах переноса, записи и хранения информации [12]. Ранее для наблюдения этих уникальных эффектов исследователями в основном применялось легирование классических топологических изоляторов, например, типа Bi_2Te_3 магнитными примесями Mn, Cr, Fe и др. Однако, такое легирование обладало существенными недостатками. Главные недостатки при легировании топологических изоляторов магнитными примесями это: а) неоднородное легирование вызывает проблемы с воспроизводимостью результатов в разных точках кристалла; б) легирование нарушает топологичность, из-за нарушения симметрии обращения времени.

Выше было отмечено о возможности осуществления в топологических изоляторах бездиссипативного переноса заряда. Однако, практическое наблюдение этого эффекта сталкивается с большими трудностями. Дело в том, что в топологических изоляторах наряду с поверхностными носителями заряда в еще большей концентрации имеются в наличии объемные носители заряда с обычными механизмами рассеяния заряда, которые доминируют в суммарном механизме переноса заряда. Для устранения объемных носителей заряда необходимо, чтобы уровень Ферми находился в запрещенной зоне. Такой корректировки (tuning) положения уровня Ферми можно добиться легированием или использованием твердых растворов. В настоящей работе получены и исследованы электрические и гальваномагнитные свойства магнитного топологического изолятора твердого раствора $MnBi_4Sb_5Te_4$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Технология получения магнитных топологических изоляторов семейства $MnBi_4Te_4(Bi_2Te_3)_x$ подробно описана в работе [13]. $MnBi_4Sb_5Te_4$ кристаллизуется в слоистую структуру с осью c перпендикулярной плоскости слоев. На Рис.1 приведена рентгеновская дифрактограмма для соединения $MnBi_4Sb_5Te_4$. Определенный параметр решетки в направлении оси c равен примерно 41Å, как и в $MnBi_4Te_4$.

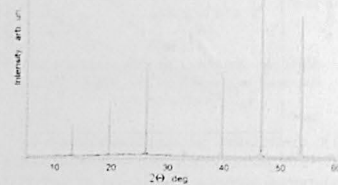


Рис.1
Рентгеновская дифрактограмма соединения $MnBi_4Sb_5Te_4$.

Электрические и гальваномагнитные (эффект Холла и магнитосопротивление) эффекты в слоистых кристаллах $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ были изучены стандартным четырёхзондовым методом по селективной методике на переменном токе частотой 20.5 Гц с использованием Lock In Amplifier - SR830. Величина тока не превышала 1 mA. Температурные исследования проводились в широкой области температур 1.4-300K. Сильные магнитные поля до 90kЭ были получены с помощью сверхпроводящего соленоида. Образец при гальваномагнитных измерениях помещался в центр соленоида.

Анизотропия электропроводности в слоистых кристаллах $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ была изучена усовершенствованным комбинированным четырёхзондовым методом P.Schnabel, пригодным для образцов, приготовленных в виде тонких пластинок. Такие пластинки легко получить из слоистых материалов путём их естественного слоения в плоскости параллельной слоям. Четыре контакта попарно наносятся на противоположные поверхности изучаемого образца в прямоугольной геометрии [14,15]. На Рис.2 показаны температурные зависимости удельного сопротивления в плоскости слоёв ρ_{xx} и в направлении перпендикулярном слоям ρ_{zz} соединения $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ в широкой области температур 1.5-300K.

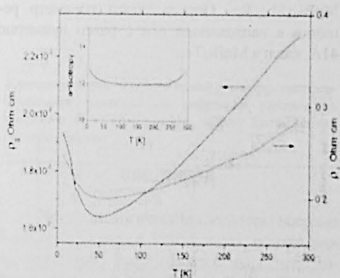


Рис. 2

Температурные зависимости удельного сопротивления в плоскости слоёв ρ_{xx} и в направлении перпендикулярном слоям ρ_{zz} соединения $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$.

На вкладке показана температурная зависимость анизотропии электропроводности ρ_{xx}/ρ_{zz} . Как видно, анизотропия электропроводности практически не меняется с температурой, что свидетельствует об одинаковом механизме переноса заряда в плоскости слоёв и в направлении перпендикулярном слоям.

Обратимся для более подробного анализа к электропроводности в плоскости слоёв. На Рис. 3 показана температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ соединения $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ в широкой области температур 1.4-300K.

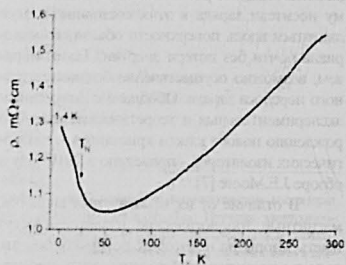


Рис. 3

Температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ соединения $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ в широкой области температур 1.4-300K.

Как видно из Рис.3, температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ в области температур 50-300K имеет характерный "металлический" ход: с уменьшением температуры величина удельного сопротивления уменьшается. Такая температурная зависимость характерна и для классического полупроводника Bi_2Te_3 [16], что обусловлено тем, что для этих кристаллов характерно при синтезе из расплава стехиометрического состава уже изначально наличие значительного количества собственных точечных дефектов структуры, т.н. агитсайтных дефектов и дефектов замещения. Поэтому изначально монокристаллы $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ имеют значительную концентрацию электронов. Для данного образца из

исследования эффекта Холла была получена концентрация примесей $n \approx 1.7 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Такая большая концентрация примесей формирует в запрещённой зоне значительное количество локальных состояний, образующих широкую примесную зону, перекрывающуюся с собственной зоной чистого кристалла. Поэтому при исследованиях электропроводности монокристаллов $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ наблюдается типичный "металлический" ход температурной зависимости удельного сопротивления. Далее, ниже температур $T \approx 50\text{K}$ величина удельного сопротивления возрастает и зависимость $\rho(T)$ демонстрирует перегиб при $T_0 \approx 23\text{K}$ (Рис. 3). Этот перегиб обусловлен фазовым переходом парамагнетик-антиферромагнетик и температура 23K является температурой Нееля. С дальнейшим понижением температуры величина удельного сопротивления продолжает возрастать в следствие локализации носителей заряда при низких температурах, что характерно для квантовой поправки к проводимости в приближении взаимодействующих электронов, обусловленной интерференцией амплитуд траекторий с самопересечением при рассеянии носителей на примесях и структурных дефектах (т.н. квантовая интерференционная добавка к проводимости или слабая локализация). При приложенном внешнем магнитном поле когерентность амплитуд рассеяния нарушается, интерференция амплитуд рассеяния разрушается и сопротивление уменьшается, т.е. наблюдается отрицательное магнитосопротивление (Рис. 4).

Следует отметить, что при температуре 5K уже в слабых магнитных полях до 5kЭ сопротивление падает с величины 1,25mΩ*cm до 1,05mΩ*cm (Рис. 4), что коррелирует с возрастанием сопротивления (Рис. 3). Это свидетельствует о том, что в данном случае мы наблюдаем эффект слабой локализации.

Также было исследовано влияние приложенных различных по величине внешних магнитных полей до 10kЭ на температурную зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$. Как видно из Рис.5, с возрастанием величины приложенного магнитного поля (от 0 до 10kЭ) увеличение сопротивления, вызванное локали-

зации, постепенно исчезает и отчетливо виден пик на $\rho(T)$, обусловленный фазовым переходом парамагнетик-антиферромагнетик.

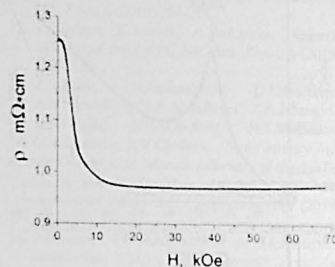


Рис. 4

Зависимость удельного сопротивления $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ от внешнего магнитного поля при температуре $T=5\text{K}$.

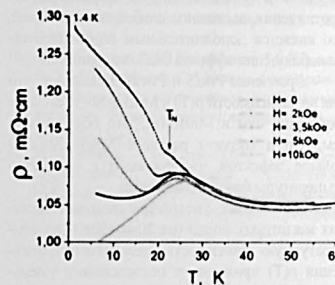


Рис. 5

Температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ в $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ при внешних магнитных полях 0-10kЭ.

Аналогичный пик на зависимости $\rho(T)$ наблюдался нами в монокристаллах $MnBi_2Te_4$ [17] (Рис. 6), также обусловленный магнитным фазовым переходом парамагнетик-антиферромагнетик. Возникновение пика обусловлено рассеянием носителей заряда на спиновых

флуктуациях при фазовом переходе парамагнетик-антиферромагнетик.

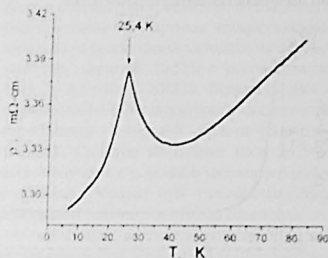


Рис. 6

Температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ в $MnBi_2Te_4$ [15].

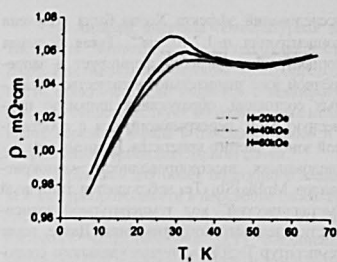


Рис. 7

Температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ в $MnBi_{0.9}Sb_{1.1}Te_4$ при внешних магнитных полях 20–60 кОэ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из Рис.5, приложенное поле в 5кОэ практически ликвидирует возрастание сопротивления, вызванное слабой локализацией, что является дополнительным подтверждением наблюдения эффекта слабой локализации.

Сравнение Рис.5 и Рис.6 показывает, что пик на зависимости $\rho(T)$ в $MnBi_{0.9}Sb_{1.1}Te_4$ более размытый, чем в $MnBi_2Te_4$. Это обусловлено тем, что в твердом растворе $MnBi_{0.9}Sb_{1.1}Te_4$ больше дефектов, что приводит к размытию температуры фазового перехода.

Дальнейшее увеличение величин внешних магнитных полей (от 20 до 60кОэ) на температурную зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ приводит к постепенному уменьшению пика на зависимости $\rho(T)$ (Рис.7), что свидетельствует о магнитном происхождении этой особенности. Необходимо, однако, отметить, что достаточно сильное магнитное поле 60кОэ не ликвидирует полностью пик на зависимости $\rho(T)$ в твердом растворе $MnBi_{0.9}Sb_{1.1}Te_4$, что указывает на достаточно сильное обменное взаимодействие.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики (гранты № EIF-BGM-4-RFTF-1/2017-21/04/1-M-02 и EIF/MQM/Elm-Tehsil-1-2016-1(26)-71/161).

Получены и охарактеризованы новые магнитные топологические изоляторы твердого раствора $MnBi_{0.9}Sb_{1.1}Te_4$. Из исследования анизотропии электропроводности выявлен одинаковый механизм переноса заряда в плоскости слоев и в направлении перпендикулярном слоям в широкой области температур 1,4–300К. Обнаружено, что в интервале температур 50–300К наблюдается «металлический» характер температурной зависимости удельного сопротивления. Ниже температур $T=50$ К величина удельного сопротивления возрастает и зависимость $\rho(T)$ демонстрирует перегиб при $T=23$ К. Возрастание сопротивления в этом температурном интервале обусловлено спиновыми флуктуациями и происходящим фазовым переходом парамагнетик-антиферромагнетик. Ниже температуры 23К возрастание сопротивления обусловлено эффектом слабой локализации, что подтверждается данными исследований влияния внешнего магнитного поля на электропроводность.

- M.König, S.Wiedmann, C.Brüne, A.Roth, H.Buhmann, L.W.Molenkamp, X.L.Qi, S.C.Zhang *Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe* *Quantum Wells Science*, **318** (2007) 766–770.
- L.Fu, C.L.Kane, E.J.Mele. *Topological insulators in three dimensions* *Phys. Rev. Lett.*, **98** (2007) 106803–106806.
- J.E.Moore, I.Balents. *Topological invariants of time-reversal-invariant band structures*. *Phys. Rev. B*, **75** (2007) 121306–121309.
- D.Hsieh, D.Qian, L.Wray. *A topological Dirac insulator in a quantum spin Hall phase*, *Nature*, **452** (2008) 970–974.
- Y.Xia, D.Qian, D.Hsieh, L.Wray, A.Pal, H.Lin, A.Bansil, D.Grauer, Y.S.Hor, R.J.Cava, M.Z.Hasan. *Observation of a large-gap topological-insulator class with a single Dirac cone on the surface*, *Nature Phys.*, **5** (2009) 398–402.
- H.Zhang, C.X.Liu, X.L.Qi, X.Dai, Z.Fang, S.C.Zhang. *Topological insulators in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 with a single Dirac cone on the surface*, *Nature Phys.*, **5** (2009) 438–442.
- J.E.Moore. *The birth of topological insulators*, *Nature*, **464** (2010) 194–198.
- C.Z.Chang, J.Zhang, X.Feng, J.Shen, Z.Zhang, M.Guo, K.Li, Y.Ou, P.Wei, L.L.Wang, Z.Q.Ji, Y.Feng et al. *Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator*, *Science*, **340** (2013) 167–170.
- Q.L.He, L.Pan, A.L.Stern, E.C.Burks, X.Che, G.Yin, J.Wang, B.Lian, Q.Zhou, F.S.Choi, K.Murata, X.Kou, Z.Chen, T.Nie et al. *Chiral Majorana fermion modes in a quantum anomalous Hall insulator superconductor structure*, *Science*, **357** (2017) 294–299.
- A.M.Essin, J.E.Moore, D.Vanderbilt. *Magneto-electric polarizability and axion electrodynamics in crystalline insulators*, *Phys. Rev. Lett.*, **102** (2009) 146805.
- R.Li, J.Wang, X.-L.Qiand, S.-C.Zhang. *Dynamical axion field in topological magnetic insulators*, *Nat. Phys.*, **6** (2010) 284–288.
- I.Y.Tokura, K.Yasuda, A.Tsukazaki. *Magnetic topological insulators*, *Nat. Rev. Phys.*, **1** (2019) 126–143.
- Z.S.Aliev, I.R.Amiraslanov, D.I.Nasonova, A.V.Shevelkov, N.A.Abdullayev, Z.A.Jahangirli, E.N.Orujlu, M.M.Otrokov, N.T.Mamedov, M.B.Babanly, E.V.Chulkov. *Novel ternary layered manganese bismuth tellurides of the $MnTe_2Bi_2Te_3$ system: Synthesis and crystal structure*, *Journal of Alloys and Compounds*, **789** (2019) 443–450.
- P.Schnabel. *Vierpunktmethode zur Messung der elektrischen Widerstands anisotropie*, *Zeits. Angew. Phys.*, **22** (1967) 136–140.
- Ф.Н.Абдуллаев, Т.Т.Керимова, Н.А.Абдуллаев. *Методика измерения удельных сопротивлений обрешоток слоистых кристаллов*, *Transactions of National Academy of Science of Azerbaijan series of physics-mathematical and technical sciences, Physics and Astronomy*, **XXV** №5 (2005) 83–94.
- Н.А.Абдуллаев, С.И.Касраманов, Т.Т.Керимова, К.М.Мустафаева, С.А.Несом. *Анизотропия проводимости в легированных монокристаллах Bi_2Te_3* , *Физика и техника полупроводников*, **43** (2009) 156–162.
- M.M.Otrokov, I.I.Klimovskikh, Z.S.Aliev, I.R.Amiraslanov, M.B.Babanly, N.T.Mamedov, N.A.Abdullayev, V.N.Zverev et al. *Prediction and observation of antiferromagnetic topological insulator*, *Nature*, **576** (2019) 416–422.

$MnBi_{0.9}Sb_{1.1}Te_4$ YENI MAGNİTTOPOLOJİ İZOLYATORLARDA ZƏİF LOKALİZASIYA EFFƏKTİ

N.A.ABDULLAYEV, X.V.ALİGULIYEVA, V.N.ZVEREV, Z.S.ALIYEV, İ.R.ƏMİRASLANOV, M.B.BABANLI, S.M.BAĞIROVA, Ye.N.ƏLİYEVA, İ.A.NƏSİBOV, N.T.MAMEDOV

$MnBi_{0.9}Sb_{1.1}Te_4$ bərk məhlulün yeni maqnit topoloji izolyatorları alınmışdır. $MnBi_{0.9}Sb_{1.1}Te_4$ laylı birləşmənin elektrik keçiriciliyi təbəqələrin müstəvisində və təbəqələrə perpendikulyar istiqamətdə 1,4–300K geniş temperatur oblastında tədqiq edilmişdir. Hər iki istiqamətdə 50–300K temperatur oblastında xüsusi müqavimətin temperaturdan asılılığının "metal" xarakteri aşkar edilmişdir. $T=50$ K-dən aşağı temperaturda xüsusi müqavimətin artması və $\rho(T)$ asılılığında $T=23$ K-də sızılma müşahidə olunur. Bu temperatur oblastında müqavimətin artımı spin fluktuasiyaları və meydana gələn para-maqnit - antiferromaqnit faza keçidi ilə bağlıdır. 23K-dən aşağı temperaturda müşahidə olunan müqavimət artımı keçiriciliyə əlavə edilən kvant interferensiya düzülüşləri ilə əlaqədardır və bu maqnit müqavimətinin tədqiqatından alınan nəticələrə təsdiqlənir.

EFFECT OF WEAK LOCALIZATION IN THE NEW $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ MAGNETIC TOPOLOGICAL INSULATORS

N.A.ABDULLAYEV, Kh.V.ALIGULIYEVA, V.N.ZVEREV, Z.S.ALIYEV, I.R.AMIRASLANOV, M.B.BABANLY, S.M.BAGIROVA, Ye.N.ALIYEVA, I.A.NASIBOV, N.T.MAMEDOV

New magnetic topological insulators of $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ solid solution have been obtained. The electrical conductivity of the $MnBi_{0.5}Sb_{1.5}Te_4$ layered compound has been studied in the plane of the layers and in the direction of perpendicular to the layers in a wide temperature range of 1.4-300K. It was found that in both directions in the temperature range of 50-300K "metallic" character of the temperature dependence of the resistivity was observed. Below temperatures $T=50K$, the resistivity increased and the $\rho(T)$ dependence exhibited an inflection at $T=23K$. The increase in resistance in this temperature range was due to spin fluctuations and the ongoing paramagnetic-antiferromagnet phase transition. Below a temperature of 23K, the increase of resistance was due to quantum interference corrections to the conductivity, which was confirmed by the data from the study of magnetoresistance.