

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.16>

УДК: 537.6

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ОПТИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛА АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА $MnBi_2Te_4$

Б.М. Фоминых^{1,2}, А.Н. Перевалова¹, Е.Б. Марченкова¹,
Е.И. Шредер¹, С.В. Наумов¹, В.В. Марченков^{1,2}

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН
620108, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

² Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б.Н.
Ельцина, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 21

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2023 г.

Аннотация. Исследована анизотропия электросопротивления и оптических свойств монокристалла антиферромагнитного топологического изолятора $MnBi_2Te_4$. Показано, что электросопротивление $MnBi_2Te_4$, измеренное перпендикулярно плоскости $(00l)$ монокристалла, на порядок величины превышает сопротивление, измеренное в данной плоскости. Поведение оптической проводимости имеет качественно схожий характер для случаев, когда свет направлен на поверхность $(00l)$ и на поверхность, перпендикулярную плоскости $(00l)$. Показано, что оптический спектр $MnBi_2Te_4$ формируется преимущественно межзонными переходами носителей заряда.

Ключевые слова: антиферромагнитный топологический изолятор $MnBi_2Te_4$, монокристалл, анизотропия, электросопротивление, оптическая проводимость.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (темы «Спин» № 122021000036-3 и «Электрон» № 122021000039-4) при частичной поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (А.Н.П., СП-2705.2022.1).

Авторы для переписки: Фоминых Богдан Михайлович (fominykh@imp.uran.ru),
Марченков Вячеслав Викторович (bogdan.fominyh@mail.ru)

Введение

Топологические материалы привлекают большое внимание исследователей, поскольку являются перспективными для применения в приборах спинтроники, микро- и нанoeлектроники [1-3]. К таким материалам относят топологические изоляторы, в которых объем представляет собой изолятор или полупроводник, а на поверхности наблюдаются топологически защищенные металлические состояния [4, 5].

В последние годы интерес к подобным системам возрос благодаря открытию магнитного топологического изолятора MnBi_2Te_4 [6, 7]. Данное соединение кристаллизуется в ромбоэдрической структуре с пространственной группой $R\bar{3}m$. Кристаллическая структура MnBi_2Te_4 может быть представлена как чередующиеся атомные слои Te-Bi-Te-Mn-Te-Bi-Te, разделенные Ван-дер-ваальсовыми щелями (рис. 1). Магнитное упорядочение в MnBi_2Te_4 приводит к нарушению симметрии относительно обращения времени для поверхностей типа $(00l)$, что может открыть щель в точке Дирака. Это позволяет реализовывать новые квантовые состояния, такие как квантовый аномальный эффект Холла [8], аксионный изолятор и изолятор Черна [9], а также магнитный полуметалл Вейля с одной парой точек Вейля [10].

Электронная структура [11, 12], транспортные [13, 14], магнитные [13, 15] и оптические [16, 17] свойства антиферромагнитного топологического изолятора MnBi_2Te_4 достаточно активно исследуются. Однако анизотропия его физических свойств в настоящее время изучена не в полной мере. В частности, в работе [18] электро- и магнитотранспортные характеристики MnBi_2Te_4 были исследованы при температурах ниже 100 К.

Целью данной работы является поиск и исследование анизотропии в электросопротивлении MnBi_2Te_4 в широком интервале температур 5 до 300 К, а также в оптической проводимости при комнатной температуре.

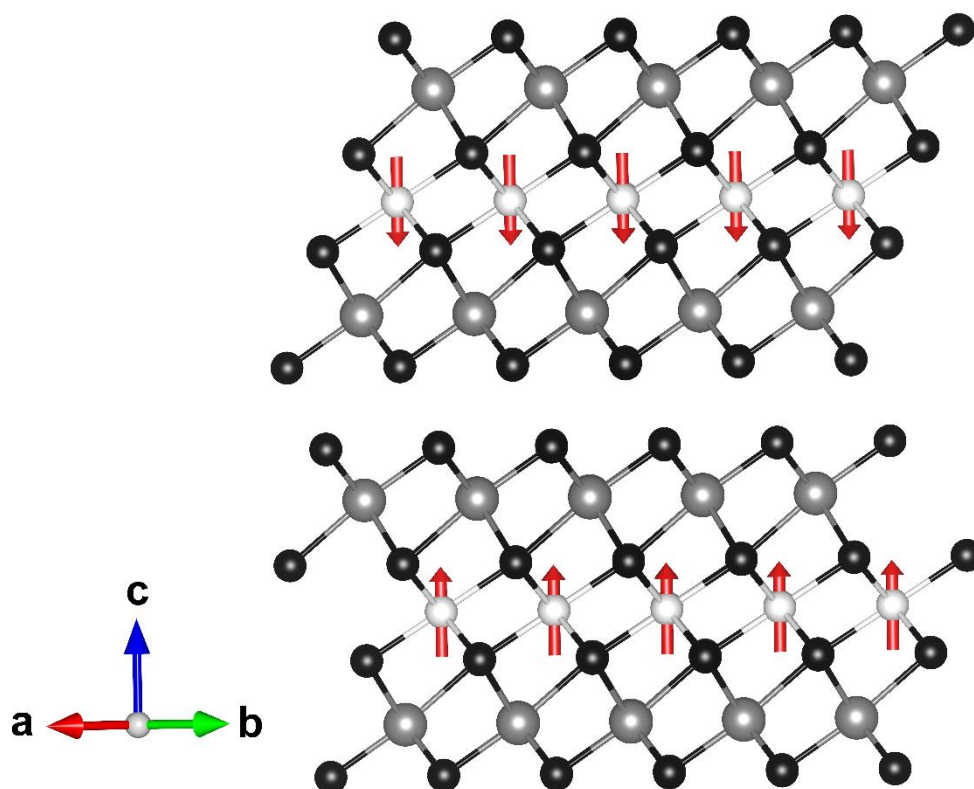


Рис. 1. Кристаллическая структура MnBi_2Te_4 . Черным цветом обозначены атомы теллура, серым - атомы висмута, белым - атомы марганца. Стрелки показывают направление магнитных моментов атомов марганца.

Образцы и методика эксперимента

Рост монокристалла MnBi_2Te_4 осуществлялся путем медленного охлаждения поликристалла соответствующего состава, синтезированного из стехиометрической смеси элементов, в узкой температурной области – между температурами начала плавления и затвердевания [19]. Для этого ампула с полукристаллическим MnBi_2Te_4 была нагрета до 700°C . Далее последовательно проводилось охлаждение до 610°C в течение 100 часов, до 600°C (100 часов), до 590°C (100 часов). Затем осуществлялась выдержка при температуре 590°C в течение 170 часов с последующей закалкой в воду.

Аттестация полученных образцов проводилась с помощью рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного микроанализа. На рис. 2(а) представлен фрагмент дифрактограммы, снятый с поверхности монокристалла MnBi_2Te_4 . Видно, что монокристалл обладает поверхностью, которая совпадает с

плоскостью $(00l)$. Микроструктура поверхности и химический состав монокристалла MnBi_2Te_4 были исследованы на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira SEM в Центре коллективного пользования (ЦКП) «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН. Как видно на рис. 2(б), полученный монокристалл MnBi_2Te_4 имеет слоистую структуру. Химический состав полученного монокристалла близок к стехиометрическому. Содержание Mn, Bi и Te по усредненным данным составляет 14.4, 27.9 и 57.7 ат.%.

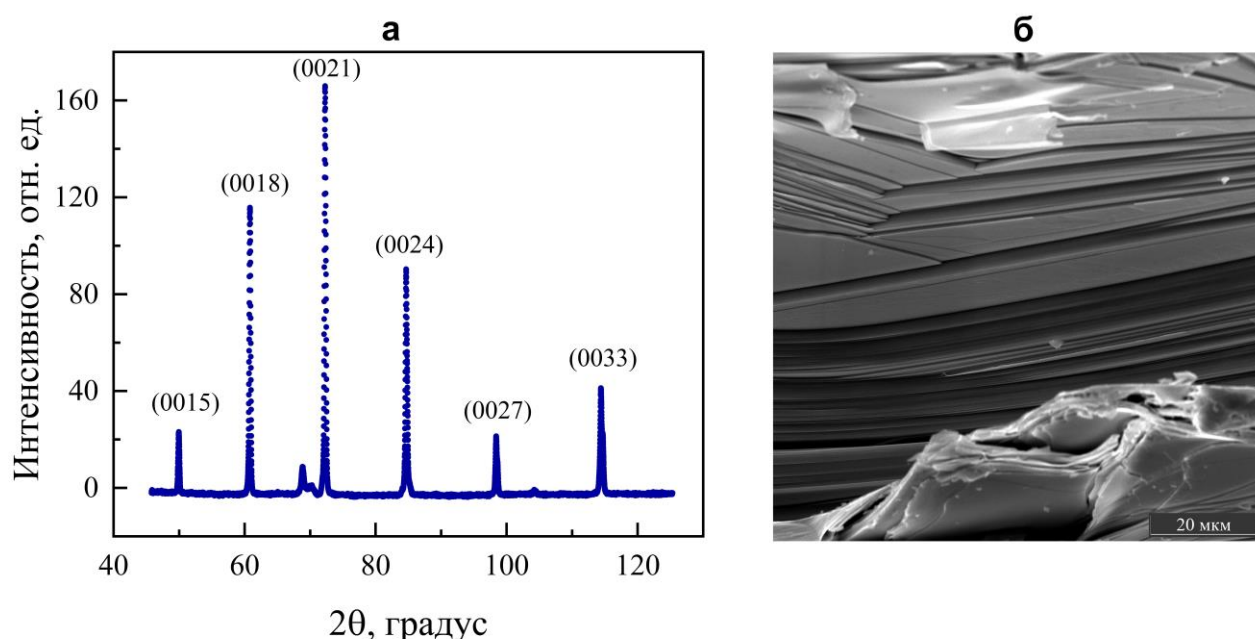


Рис. 2. (а) Фрагмент дифрактограммы с поверхности монокристалла MnBi_2Te_4 . (б) Изображение слоистой структуры монокристалла MnBi_2Te_4 , полученное методом сканирующей электронной микроскопии.

При измерении электросопротивления и оптических свойств MnBi_2Te_4 было рассмотрено два случая, которые для удобства обозначены как образец №1 и образец №2. В первом случае (образец №1), измерения электросопротивления проводились при протекании тока j в плоскости $(00l)$ монокристалла ($j \parallel (00l)$), а свет был направлен на поверхность, перпендикулярную плоскости $(00l)$. Во втором случае (образец №2) измерения электросопротивления проводились, когда ток j протекал перпендикулярно плоскости $(00l)$ монокристалла ($j \perp (00l)$), а свет был направлен на поверхность $(00l)$.

Электросопротивление было измерено четырехконтактным методом [20] в диапазоне температур от 5 до 300 К на универсальной установке для измерения физических свойств RPMS-9 в ЦКП ИФМ УрО РАН. Монокристалл MnV_2Te_4 в виде тонкой пластины был получен путем скалывания из полученного слитка.

Оптические постоянные – показатель преломления n и коэффициент поглощения k – были измерены эллипсометрическим методом Битти в диапазоне спектра от 0.155 до 3 эВ при комнатной температуре на воздухе. В случае образца №2 для оптических исследований использовалась сколотая блестящая поверхность; для образца №1 зеркальная поверхность была получена шлифованием на микропорошках карбида бора разной дисперсности и полированием на окиси хрома. По значениям n и k рассчитана оптическая проводимость $\sigma(\omega) = nk\omega/2\pi$ (ω – циклотронная частота световой волны). Глубина проникновения света δ , называемая также толщиной скин-слоя, оценена по формуле $\delta = c/\omega k$.

Результаты и обсуждение

На рис. 3(а) представлены температурные зависимости электросопротивления MnV_2Te_4 , измеренные для двух образцов. Видно, что все зависимости имеют металлический вид. С уменьшением температуры до ~ 35 К электросопротивление монотонно уменьшается. При более низких температурах на зависимостях $\rho(T)$ наблюдается пик с центром при 24 К (на рис. 3(б) показано вертикальной штриховой линией), который указывает на магнитный фазовый переход, что согласуется с предыдущими транспортными измерениями [18]. Отношение сопротивлений $\rho_{300\text{ К}}/\rho_{5\text{ К}}$, которое зависит от числа дефектов и примесей в кристалле, равно 2.7 и 2.2 для образца №1 и №2 соответственно. Отметим, что электросопротивление, измеренное перпендикулярно плоскости (00 l) монокристалла (образец №2), на порядок величины превышает величину ρ , измеренного в данной плоскости (образец №1). Увеличение электросопротивления может быть связано с дополнительными вкладами от рассеяния на границах слоев в случае образца №2.

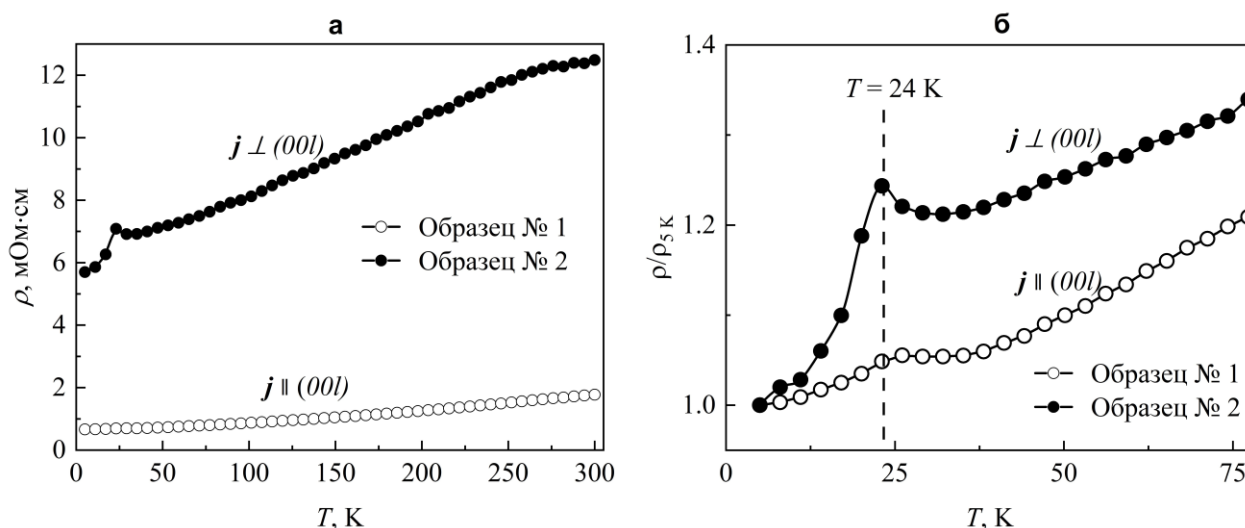


Рис. 3. Температурные зависимости электросопротивления (а) и относительного сопротивления ρ/ρ_{5K} (б), измеренного в плоскости слоев ($j \parallel (00l)$) монокристалла $MnVi_2Te_4$ и перпендикулярно плоскости слоев ($j \perp (00l)$). Положение температуры Нееля показано вертикальной штриховой линией на рис. 3(б).

Спектр оптической проводимости $\sigma(\omega)$ исследованных образцов представляет собой одну широкую полосу, в которой можно выделить двухпиковую структуру в области энергий (1.0-2.5) эВ (рис. 4(а)), что согласуется с предыдущими исследованиями для тонких пленок $MnVi_2Te_4$ [17]. Для двух образцов происходит лишь незначительное изменение энергетического положения и взаимной интенсивности пиков в двухпиковой структуре. Как известно, в пределе $\omega \rightarrow 0$ оптическая проводимость $\sigma(\omega)$ достигает статического значения σ_0 . На оси ординат отмечены значения статической проводимости $\sigma_0 = 1/\rho$ при комнатной температуре. Из рисунка следует, что с дальнейшим уменьшением энергии падающей световой волны в случае, когда свет направлен на поверхность (00l) монокристалла $MnVi_2Te_4$ (образец №2), ожидается дальнейшее уменьшение оптической проводимости. В случае, когда свет направлен на поверхность, перпендикулярную плоскости (00l) (образец №1), ожидается незначительное увеличение оптической проводимости. Наличие пиков на кривой оптической проводимости $\sigma(\omega)$ в инфракрасной области спектра свидетельствует о формировании низкоэнергетических щелей в зонном спектре соединения.

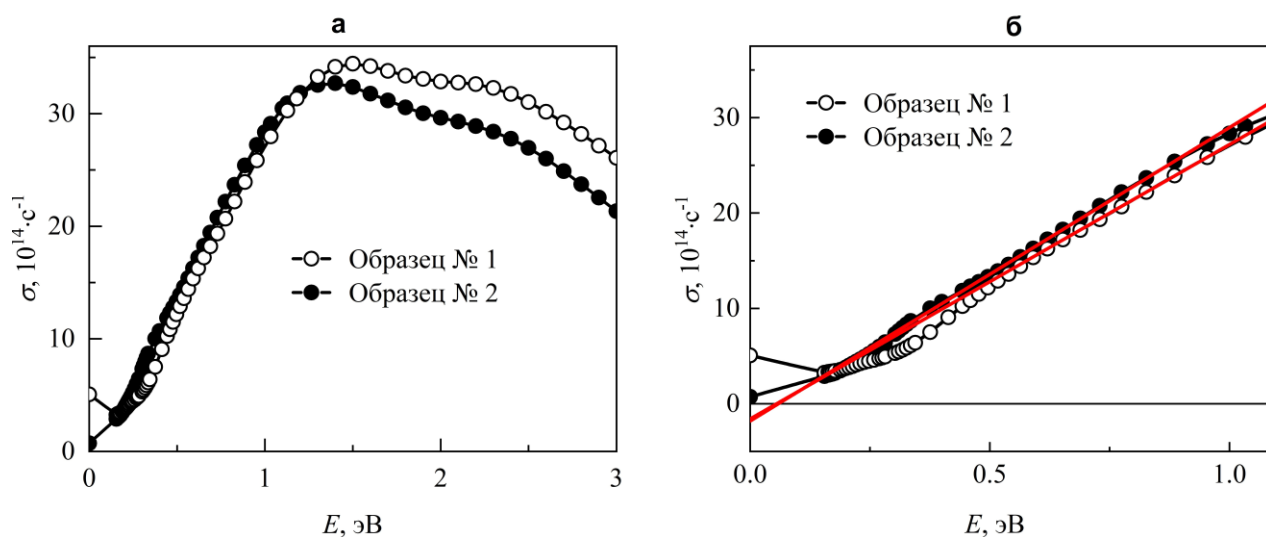


Рис. 4. (а) Дисперсия оптической проводимости $\sigma(\omega)$ монокристалла MnBi_2Te_4 . (б) Фрагмент дисперсии оптической проводимости $\sigma(\omega)$ при энергиях падающего света ниже 1.1 эВ. На оси ординат отмечены значения статической проводимости, полученной из данных по электросопротивлению при комнатной температуре.

Отметим, что на участке спектра (0.4-0.9) эВ оптическая проводимость σ линейно зависит от частоты падающего света (рис. 4(б)). Для топологических материалов было показано [21, 22], что линейный вклад в оптическую проводимость $\sigma(\omega)$ может наблюдаться при переходах, возникающих через конусы Дирака или Вейля. Ранее аналогичный линейный участок на кривой $\sigma(\omega)$ на участке спектра (0.5-0.8) эВ наблюдали для топологического изолятора $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ [23]. Авторы работы [23] показали, что линейный участок на экспериментальной зависимости $\sigma(\omega)$ монокристалла $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ хорошо описывается теоретически рассчитанной оптической проводимостью, которая не учитывает вклад от внутризонных переходов, и связан с совокупностью вкладов от переходов между зонами со сложным законом дисперсии в объеме.

В исследованном диапазоне спектра толщина скин-слоя δ в MnBi_2Te_4 изменяется от 0.026 мкм при $\lambda = 0.41$ мкм до (0.61-0.78) мкм при $\lambda = 8$ мкм, что намного превышает толщину «металлического» поверхностного слоя MnBi_2Te_4 , которая составляет около 1.4 нм [24]. Это свидетельствует о том, что наблюдаемый прямолинейный участок на кривой $\sigma(\omega)$ монокристалла MnBi_2Te_4 (рис. 4(б)) может быть не связан с бесщелевыми состояниями с

линейным законом дисперсии на поверхности, а обусловлен преимущественно вкладами от межзонных переходов в объеме материала.

Заключение

В результате проведенных исследований электросопротивления и оптической проводимости MnBi_2Te_4 получены следующие результаты:

1) Обнаружена анизотропия в электросопротивлении MnBi_2Te_4 , возникающая вследствие дополнительного вклада от рассеяния на границах слоев.

2) Установлено, что поведение оптической проводимости MnBi_2Te_4 имеет качественно схожий характер для случаев, когда свет направлен на поверхность $(00l)$ и на поверхность, перпендикулярную плоскости $(00l)$.

3) Показано, что спектр оптической проводимости MnBi_2Te_4 формируется межзонными переходами носителей заряда в изученном диапазоне спектра.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (темы «Спин» № 122021000036-3 и «Электрон» № 122021000039-4) при частичной поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (А.Н.П., СП-2705.2022.1).

Литература

1. Yue C. et al. Device applications of synthetic topological insulator nanostructures // Electronics. – 2018. – V. 7. – №. 10. – P. 225. <https://doi.org/10.3390/electronics7100225>
2. Liu C.W. et al. Development of topological insulator and topological crystalline insulator nanostructures // Nanotechnology. – 2020. – V. 31. – №. 19. – P. 192001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab6dfc>
3. Pesin D., MacDonald A. H. Spintronics and pseudospintronics in graphene and topological insulators // Nature materials. – 2012. – V. 11. – №. 5. – P. 409-416. <https://doi.org/10.1038/nmat3305>

4. Zhang H., Zhang S.C. Topological insulators from the perspective of first-principles calculations //physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters. – 2013. – V. 7. – №. 1-2. – P. 72-81. <https://doi.org/10.1002/pssr.201206414>
5. Moore J.E. The birth of topological insulators //Nature. – 2010. – V. 464. – №. 7286. – P. 194-198. <https://doi.org/10.1038/nature08916>
6. Lee D.S. et al. Crystal structure, properties and nanostructuring of a new layered chalcogenide semiconductor, Bi₂MnTe₄ //CrystEngComm. – 2013. – V. 15. – №. 27. – P. 5532-5538. <https://doi.org/10.1039/C3CE40643A>
7. Otrokov M.M. et al. Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator //Nature. – 2019. – V. 576. – №. 7787. – P. 416-422. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1840-9>
8. Deng Y. et al. Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator MnBi₂Te₄ //Science. – 2020. – V. 367. – №. 6480. – P. 895-900. <https://doi.org/10.1126/science.aax8156>
9. Liu C. et al. Robust axion insulator and Chern insulator phases in a two-dimensional antiferromagnetic topological insulator //Nature material. – 2020. – V. 19. – №. 5. – P. 522-527. <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0573-3>
10. Li J. et al. Intrinsic magnetic topological insulators in van der Waals layered MnBi₂Te₄-family materials //Science Advances. – 2019. – V. 5. – №. 6. – P. eaaw5685. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw5685>
11. Шикин А.М. и др. Модуляция энергетической запрещенной зоны в точке Дирака в антиферромагнитном топологическом изоляторе MnBi₂Te₄ как результат изменений поверхностного градиента потенциала //Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 161. – №. 1. – С. 126-136.
12. Макарова Т.П. и др. Влияние атомов Со на электронную структуру топологических изоляторов Bi₂Te₃ и MnBi₂Te₄. – 2022. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 161. – № 5. – С. 711-719.

13. Шикин А.М. и др. Электронная, спиновая структура и магнитные свойства собственных антиферромагнитных топологических изоляторов семейства MnBi_2Te_4 (Bi_2Te_3) *m* (Миниобзор) //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 115. – №. 4. – С. 241-255.
14. Абдуллаев Н.А. и др. Механизм переноса заряда в новом магнитном топологическом изоляторе $\text{MnBi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_4$ //Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – №. 8. – С. 1062-1067.
15. Вальков В.В., Злотников А.О., Гамов А. Взаимосвязь магнетизма и топологии в MnBi_2Te_4 //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 118. – №. 5. – С. 330-337.
16. Köpf M. et al. Influence of magnetic ordering on the optical response of the antiferromagnetic topological insulator MnBi_2Te_4 //Physical Review B. – 2020. – V. 102. – №. 16. – P. 165139. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.165139>
17. Tomarchio L. et al. Electrodynamics of MnBi_2Te_4 intrinsic magnetic topological insulators //NPG Asia Materials. – 2022. – V. 14. – №. 1. – P. 82. <https://doi.org/10.1038/s41427-022-00429-w>
18. Lee S.H. et al. Spin scattering and noncollinear spin structure-induced intrinsic anomalous Hall effect in antiferromagnetic topological insulator MnBi_2Te_4 //Physical Review Research. – 2019. – V. 1. – №. 1. – P. 012011. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.1.012011>
19. Zeugner A. et al. Chemical aspects of the candidate antiferromagnetic topological insulator MnBi_2Te_4 //Chemistry of Materials. – 2019. – V. 31. – №. 8. – P. 2795-2806. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b05017>
20. Marchenkov V.V. et al. Temperature breakdown phenomenon in tungsten single crystals at high magnetic fields //Journal of low temperature physics. – 1995. – V. 98. – P. 425-447. <https://doi.org/10.1007/BF00752277>
21. Hosur P., Parameswaran S. A., Vishwanath A. Charge transport in Weyl semimetals //Physical review letters. – 2012. – V. 108. – №. 4. – P. 046602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.046602>

22. Bacsı A., Virosztek A. Low-frequency optical conductivity in graphene and in other scale-invariant two-band systems //Physical Review B. – 2013. – V. 87. – №. 12. – P. 125425. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.125425>
23. Zhukova E. S. et al. Infrared optical conductivity of Bulk Bi₂Te₂Se //Crystals. – 2020. – V. 10. – №. 7. – P. 553. <https://doi.org/10.3390/cryst10070553>
24. Chen Y. J. et al. Topological electronic structure and its temperature evolution in antiferromagnetic topological insulator MnBi₂Te₄ //Physical Review X. – 2019. – V. 9. – №. 4. – P. 041040. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.041040>

Для цитирования:

Фоминых Б.М., Первалова А.Н., Марченкова Е.Б., Шредер Е.И., Наумов С.В., Марченков В.В. Электросопротивление и оптическая проводимость монокристалла антиферромагнитного топологического изолятора MnBi₂Te₄. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. - № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.16>