Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 8, с. 541 – 546 © 2026 г. 25 апреля

Комбинационное рассеяние света и спин-фононное взаимодействие в кристаллах магнитных топологических изоляторов $MnBi_2Te_4$

А. А. Максимов[+1)], *И. И. Тартаковский*[+], *Н. А. Абдуллаев*[*×], *З. С. Алиев*[*], *Н. Т. Мамедов*[*× 1)]

[+]*Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН, 142432 Черноголовка, Россия*

[*]*Бакинский государственный университет, AZ1148 Баку, Азербайджан*

[×]*Институт физики, AZ1141 Баку, Азербайджан*

Поступила в редакцию 6 марта 2026 г.
После переработки 16 марта 2026 г.
Принята к публикации 16 марта 2026 г.

Экспериментально изучены спектры комбинационного рассеяния света в кристаллах магнитных топологических изоляторов $MnBi_2Te_4$ при различных температурах от гелиевых до комнатной. Обнаружены и впервые подробно исследованы особенности поведения фонона A_{1g}^2 симметрии при температурах ниже и выше температуры антиферромагнитного фазового перехода в $MnBi_2Te_4$, которые демонстрируют сильное влияние на частоту фонона и его интенсивность спин- фононного взаимодействия с магнитными степенями свободы топологического изолятора.

DOI: 10.7868/S3034576626040161

В последнее время магнитные топологические изоляторы являются объектами значительного научного интереса. Известно, что введение магнетизма в обычный немагнитный топологический изолятор может приводить к возникновению целого ряда интересных и технологически перспективных явлений [1, 2].

Особое внимание привлекают исследования относительно недавно открытых [3–5] собственных топологических изоляторов с упорядоченными магнитными моментами внедренных магнитных атомов. Среди них на сегодняшний день наиболее интенсивно изучаемым магнитным топологическим изолятором являются кристаллы $MnBi_2Te_4$ [6]. Они имеют слоистую структуру из семислойных Te-Bi-Te-Mn-Te-Bi-Te двумерных блоков, связанных взаимодействием Ван дер Ваальса, и обладают пространственной группой симметрии $R\bar{3}m$ [4, 7]. При температуре $T_N \approx 25$ K в кристаллах $MnBi_2Te_4$ наблюдается антиферромагнитный фазовый переход, при этом магнитные моменты Mn^{2+} имеют ферромагнитное упорядочение внутри каждого семислойного блока и антиферромагнитное между соседними блоками. Сосуществование нетривиальной топологии зон и слоистого антиферромагнетизма в $MnBi_2Te_4$ приводит к тому, что в ультратонких пленках этого материала наблюдаются фазы аномального квантового эффекта Холла [8] и аксионного изолятора [9, 10] для нечетного и четного числа семислойных блоков, соответственно.

Обсуждаемые перспективы применения магнитных топологических материалов в спинтронных устройствах, фотонике, квантовой информации должны быть основаны на исследованиях взаимодействий между магнитными и другими, связанными степенями свободы [11, 12]. Большая величина магнитной щели и однородное магнитное упорядочение, которые реализуются в магнитном топологическом изоляторе $MnBi_2Te_4$, привлекают большой интерес к исследованиям различных физических свойств данной системы. В частности, много работ было посвящено исследованиям фононов и их взаимодействиям со спиновыми возбуждениями в этих кристаллах [13–17].

При исследованиях температурных зависимостей спектров комбинационного рассеяния (КР) света в кристаллах $MnBi_2Te_4$ при температурах выше и ниже температуры T_N антиферромагнитного фазового перехода с целью обнаружения возможного влияния спин-фононного взаимодействия на частоты фононов и их интенсивности в работах [14–16] основное внимание уделялось изучению поведения низкочастотного фонона A_{1g}^1 ($\sim 49\,\text{см}^{-1}$ при низкой температуре). В работах [14, 15] указывалось на слабое $\sim 0.3\,\text{см}^{-1}$ отклонение частоты A_{1g}^1 фонона в этих кристаллах при $T < T_N$ от стандартного ангармонического температурного поведения фононов [18], при этом наблюдаемый на экспериментах знак от-

1)e-mail: maksimov@issp.ac.ru; n.mamedov.physics@bsu.edu.az

клонения был различен. В принципе, можно было бы пытаться различный знак отклонения частоты A^1_{1g} фонона объяснить разной толщиной образцов, исследованных в этих работах [13]. Однако тщательные измерения температурного поведения частоты A^1_{1g} фонона кристаллов $MnBi_2Te_4$ показали, что она может быть описана стандартной ангармонической моделью, не учитывающей спин-фононного взаимодействия, с точностью до $\pm 0.1\,\text{см}^{-1}$ [16].

Согласно расчетам, выполненным в работе [14], влияние спин-фононного взаимодействия на частоты фононов и их интенсивности в спектрах КР света особенно сильно для фононов A_{1g} симметрии и практически ненаблюдаемо для фононов E_g симметрии. При этом наиболее сильные эффекты, согласно этим расчетам, должны были наблюдаться для активного в КР фонона A^2_{1g}. Однако при использовании возбуждающих лазеров с длинами волн 532 и 633 нм [14–16] полоса фонона A^2_{1g} проявляется в спектрах КР как слабое плечо на фоне значительно более сильной полосы фонона E^3_g. Поэтому провести исследования температурного поведения интенсивности и спектрального положения этого фонона было практически невозможно. В работе [17] использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 785 нм, который позволил получить спектры КР кристаллов $MnBi_2Te_4$ со значительно лучшим спектральным разрешением.

В настоящей работе были подробно изучены спектры КР света в кристаллах магнитных топологических изоляторов $MnBi_2Te_4$ в широком диапазоне температур, как выше, так и ниже температуры магнитного упорядочения T_N. Основное внимание было уделено измерению спектров КР света с высоким спектральным разрешением. При возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны излучения 785 нм были получены и подробно изучены хорошо разрешенные спектры КР света в области полос E^3_g и A^2_{1g} фононов кристаллов $MnBi_2Te_4$, что позволило сравнить особенности их температурного поведения и сделать выводы о возможном влиянии спин-фононного взаимодействия на изученные спектры.

Исследовались монокристаллы $MnBi_2Te_4$, имеющие форму тонких пластинок с толщиной (∼ 50–100 мкм) и линейными размерами до нескольких миллиметров. Монокристаллы выращивались по технологии, подробно описанной в [4, 19]. Спектры КР света в кристаллах $MnBi_2Te_4$ регистрировались с различных участков свежесколотой поверхности образца с целью проверить его однородность. Типичные использованные в наших экспериментах размеры пятна возбуждающего лазера, сфокусированного на однородном участке поверхности образца, имели диаметр ∼ 100 мкм. Мощность лазерного излучения (обычно $\lesssim$ 15 мВт) выбиралась такой, чтобы не вызывать изменений регистрируемых спектров КР при многократных повторениях и длительных (до получаса) временах экспозиции. Образцы помещались в оптический криостат в парах гелия с регулируемой температурой от 4.2 K до комнатной с точностью ∼ 0.1 K. Спектры КР света регистрировались в направлении близком к нормали к поверхности образца с помощью спектральных приборов, оснащенных охлаждаемыми CCD детекторами и решетками 1800 штрихов/мм.

На рисунке 1 показаны спектры КР монокристаллов $MnBi_2Te_4$, полученные при комнатной температуре с помощью лазеров с различными длинами волн возбуждения λ_{exc}. В кристаллах $MnBi_2Te_4$, принадлежащих к пространственной группе $R\bar{3}m$ с точечной группой симметрии D_{3d} в Γ точке зоны Бриллюэна, наблюдается 6 активных в КР мод, $3A_{1g}$ симметрии и 3 двукратно вырожденных колебания E_g симметрии [14–16, 20]. Спектральные позиции этих колебаний отмечены на рис. 1 стрелками.

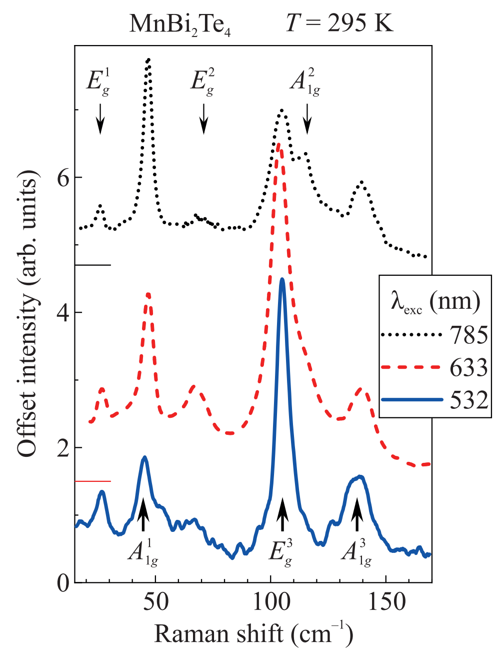

Рис. 1. (Цветной онлайн) Спектры КР света кристалла $MnBi_2Te_4$ при комнатной температуре, полученные при различных длинах волн λ_{exc} возбуждающего лазера: сплошной спектр – 532 нм, штриховой – 633 нм и точечный – 785 нм. Спектры сдвинуты по оси интенсивности для наглядности. Стрелками указаны позиции 6 активных в КР мод, 3A$_{1g}$ и 3E$_g$ симметрии

Верхний спектр на рис. 1 получен с высоким спектральным разрешением ($\lesssim 0.2\,\text{см}^{-1}$) при возбуждении образца полупроводниковым лазером с длиной волны излучения $\lambda_{\text{exc}} = 785$ нм на спектрографе модели M522 с помощью фильтра VLP02-785-12.5, позволяющим, начиная с частоты $\gtrsim 15\,\text{см}^{-1}$, регистрировать спектры КР света в стоксовой области. Видно, что спектральные позиции близких по частоте фононов E_g^3 и A_{1g}^2 хорошо разрешаются в этом спектре. Другие спектры на этом рисунке получены на тройном спектрографе для исследования КР света DilorXY 500. Спектр при $\lambda_{exc} = 633$ нм регистрировался в стандартном режиме работы DilorXY 500 с вычитанием дисперсии на первых двух спектрографах прибора, при этом обеспечивалось спектральное разрешение $\sim 0.5\,\text{см}^{-1}$ [16]. Нижний спектр на рис. 1 при $\lambda_{\text{exc}} = 532$ нм получен в режиме сложения дисперсий всех спектрографов DilorXY 500 с использованием узкополосного фильтра для подавления рассеянного лазерного света, что также приводило к высокому спектральному разрешению ($\sim 0.2\,\text{см}^{-1}$).

Как видно из рис. 1, само по себе высокое спектральное разрешение не дает возможности проследить за температурным поведением полосы фонона A_{1g}^2 в кристаллах $MnBi_2Te_4$. Сильная зависимость относительных интенсивностей полос различных фононов в спектрах КР света от длины волны возбуждающего лазера λ_{exc}, связанная, по-видимому, с различными резонансными условиями возбуждения для различных фононов, приводит к тому, что для исследования влияния изменений температуры на интенсивность и частоту фонона A_{1g}^2 в кристаллах $MnBi_2Te_4$ оптимальным является использование лазера с $\lambda_{\text{exc}} = 785$ нм.

Пример спектров КР света в области высокочастотных фононов в кристаллах $MnBi_2Te_4$, измеренных при различных температурах ниже и выше температуры антиферромагнитного фазового перехода T_N, показан на рис. 2. Наиболее существенные изменения на представленных спектрах КР света при изменении температуры от 4.3 до 35 К заключаются в изменении относительной интенсивности полос КР на фононах E_g^3 и A_{1g}^2. При практически неизменной интенсивности КР фонона E_g^3 в этом температурном интервале наблюдается заметное увеличение интенсивности рассеяния фонона A_{1g}^2 при температурах ниже температуры антиферромагнитного фазового перехода $T_N \approx 25$ К.

То, каким образом фононы взаимодействуют с антиферромагнитным порядком и, соответственно, возможные изменения интенсивности КР конкретного фонона за счет спин-фононного взаимодействия, в первом приближении определяется тем, как сильно колебания атомов, связанные с этим фононом, модулируют межслойное обменное взаимодействие магнитных ионов в слоистых кристаллах $MnBi_2Te_4$. Поскольку в этих кристаллах колебания атомов в фононах E_g симметрии происходят в плоскости, а в фононах A_{1g} симметрии, напротив, перпендикулярно слоям, то естественно, что именно фононы E_g симметрии практически не участвуют в спин-фононном взаимодействии, а наибольший эффект от этого взаимодействия ожидается, согласно выполненным расчетам, именно для фонона A_{1g}^2 [14].

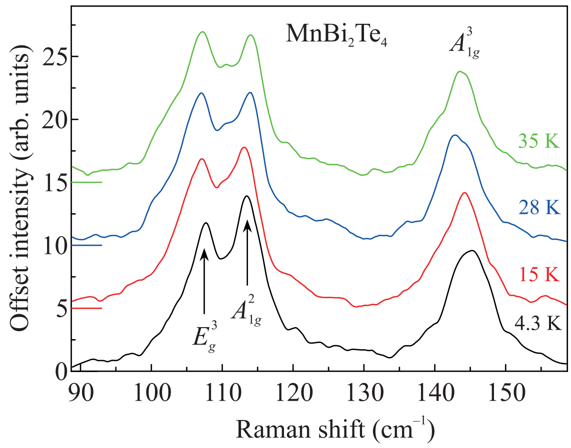

Рис. 2. (Цветной онлайн) Спектры КР кристалла $MnBi_2Te_4$, измеренные при различных температурах ниже и выше температуры антиферромагнитного фазового перехода T_N. Спектры сдвинуты по оси интенсивности для наглядности. Длина волны возбуждающего лазера $\lambda_{\text{exc}} = 785$ нм

На рисунке 3 показаны зависимости отношения интенсивности КР света $I(A_{1g}^2)$ на фононе A_{1g}^2 к КР интенсивности $I(E_g^3)$ фонона E_g^3 от температуры. Зависимости получены при измерении спектров КР света с различных участков поверхности кристалла $MnBi_2Te_4$ (рис. 3a и 3b). Общим в этих зависимостях является то, что отношение интенсивностей слабо зависит от температуры T при температурах выше температуры антиферромагнитного фазового перехода T_N, а, начиная с этой температуры и при $T \lesssim T_N$ наблюдается увеличение относительной величины интенсивности КР A_{1g}^2 фонона на ~ 15–20 %.

Следует отметить, что сама величина отношения $I(A_{1g}^2)/I(E_g^3)$ несколько различается в различных участках кристалла (рис. 3a и 3b), что свидетельствует о наличии некоторой неоднородности исследуемого образца. Одной из причин такой неоднородности может быть разная степень перемешивания атомов подрешеток марганца и висмута в кристаллах

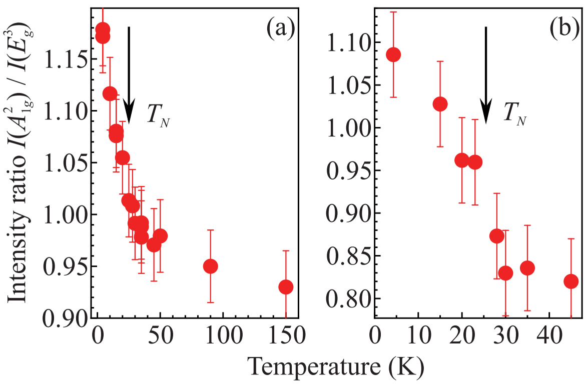

Рис. 3. (Цветной онлайн) Температурная зависимость отношения интесивностей полос КР света на фононах A^2_{1g} и E^3_g симметрии $I(A^2_{1g})/I(E^3_g)$ в различных участках кристалла $MnBi_2Te_4$. $\lambda_{exc} = 785$ нм

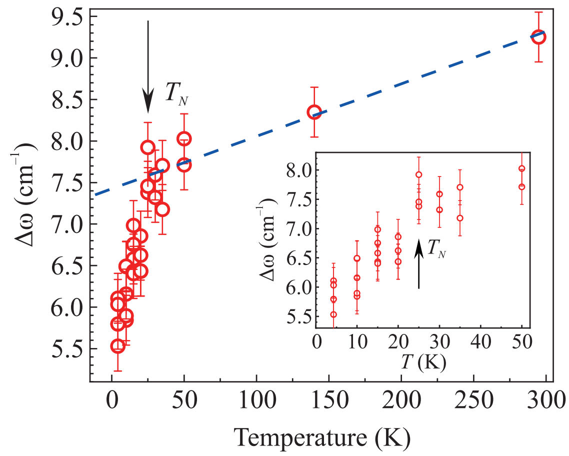

Рис. 4. (Цветной онлайн) Температурная зависимость разности частот КР полос фононов A^2_{1g} и E^3_g симметрии $\Delta\omega = \omega(A^2_{1g}) - \omega(E^3_g)$ в кристалле $MnBi_2Te_4$. На вставке увеличена низкотемпературная область зависимости $\Delta\omega(T)$. $\lambda_{exc} = 785$ нм

$MnBi_2Te_4$. Известно, что такое перемешивание атомов Mn и Bi, с одной стороны, часто бывает неоднородным по образцу [21], а с другой стороны, сильно влияет на физические свойства кристаллов и приводит, в частности, к изменению величины магнитной щели в дираковской точке этих топологических изоляторов [6, 21, 22].

Помимо изменений в интенсивности КР фононных полос, спин-фононное взаимодействие может проявляться и при изучении зависимости частоты фононов в кристаллах $MnBi_2Te_4$ от температуры [14–16]. При этом зависимость частот фононов $\omega(T)$ при изменении температуры T от гелиевых до комнатных, связанная с ангармонизмом, может быть хорошо описана с помощью формулы, учитывающей трехфононные взаимодействия [18]

$$\omega(T) = \omega_0 + A \times \left[1 + \frac{2}{\exp(\hbar\omega_0/2k_BT) - 1}\right], \qquad (1)$$

со своим параметрами низкотемпературной частоты ω_0 и константы ангармонизма A для каждого фонона, естественно. В формуле (1) $\hbar$ и k_B – постоянные Планка и Больцмана, а отношение A/ω_0 определяет наклон практически линейной зависимости $\omega(T)$ при высоких температурах. При низких температурах ($T \lesssim 50$ K) частоты фононов E^3_g и A^2_{1g} в кристаллах $MnBi_2Te_4$, согласно формуле (1), становятся практически постоянными.

На рисунке 4 точками представлена зависимость от температуры $\Delta\omega(T) = \omega(A^2_{1g}) - \omega(E^3_g)$ разности частот в спектрах КР света полос фононов A^2_{1g} и E^3_g симметрии в кристалле $MnBi_2Te_4$, полученная при обработки спектров, измеренных при различных температурах. Без учета спин-фононного взаимодействия эта зависимость, в соответствии с формулой (1), при низких температурах $T \lesssim 50$ K должна выходить на константу. Однако, как видно из данных, представленных на рис. 4, при температурах ниже температуры антиферромагнитного фазового перехода T_N слабая зависимость $\Delta\omega(T)$ при более высоких температурах сменяется значительно более резкой.

Это может быть связано с тем, что по причинам, обсуждавшимся выше, влияние спин-фононного взаимодействия на частоту фонона A^2_{1g} симметрии в кристаллах $MnBi_2Te_4$ должно быть существенно выше, чем для фонона E^3_g. Поэтому результаты, представленные на рис. 4, могут свидетельствовать в пользу того, что температурная зависимость частоты фонона A^2_{1g} за счет спин-фононного взаимодействия отклоняется в сторону меньших частот от простой ангармонической модели, описываемой формулой (1), при $T \lesssim T_N$ на величину не менее ~ 1 см$^{-1}$.

Как подробно разбиралось в статье [16], длительные времена экспозиции при получении спектров КР кристаллов магнитных топологических изоляторов $MnBi_2Te_4$ – около получаса в каждой температурной точке, часто являются препятствием для абсолютных измерений частот фононов с высокой точностью. Таким образом, в настоящей работе были выполнены подробные исследования различий в поведении спектров КР света, практически не взаимодействующего с магнитными степенями свободы фонона E^3_g симметрии [14] и фонона симметрии A^2_{1g} в широком интервале температур от 4.2 до 300 K. Благодаря использованию возбуждающего инфракрасного полупроводникового лазера с длиной волны излучения $\lambda_{\rm exc} = 785$ нм в качестве источника возбуждения КР света впервые были получены новые результаты по спектральным изменениям КР при температурах в области антиферромагнитного перехода топологического изолятора. Сравнение относительных интенсивностей (рис. 3) и разности частот (рис. 4) фононов E_g^3 симметрии и A_{1g}^2 симметрии позволяют утверждать, что наблюдаемые особенности поведения фонона A_{1g}^2 симметрии при температурах ниже температуры антиферромагнитного перехода свидетельствуют о его взаимодействии с магнитными степенями свободы в кристалле топологического изолятора $MnBi_2Te_4$.

Финансирование работы. Температурные исследования комбинационного рассеяния света выполнены за счет средств бюджета Института физики твердого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук, кристаллы $MnBi_2Te_4$ выращивались в рамках государственного бюджета Института физики Министерства науки и образования Азербайджана.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. M. Z. Hasan and C. L. Kane, "Colloquium: Topological insulators", Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
2. X. L. Qi and S. C. Zhang, "Topological insulators and superconductors", Rev. Mod. Phys. **83**, 1057 (2011).
3. Y. Tokura, K. Yasuda, and A. Tsukazaki, "Magnetic topological insulators", Nat. Rev. Phys. **1**, 126 (2019).
4. M. M. Otrokov, I. I. Klimovskikh, H. Bentmann et al. (Collaboration), "Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator", Nature **576**, 416 (2019).
5. S. Wimmer, J. Sánchez-Barriga, P. Küppers et al. (Collaboration), "Mn-Rich $MnSb_2Te_4$: A Topological Insulator with Magnetic Gap Closing at High Curie Temperatures of 45–50 K", Adv. Mater. **33**, 2102935 (2021).
6. A. Y. Vyazovskaya, M. Bosnar, E. V. Chulkov, and M. M. Otrokov, "Intrinsic magnetic topological insulators of the MnBi2Te4 family", Commun. Mater. **6**, 88 (2025).
7. D. S. Lee, T. H. Kim, C. H. Park, C. Y. Chung, Y. S. Lim, W. S. Seo, and H. H. Park, "Crystal structure, properties and nanostructuring of a new layered chalcogenide semiconductor, $Bi2MnTe_4$", CrystEngComm **15**, 5532 (2013).
8. Y. Deng, Y. Yu, M. Z. Shi, Z. Guo, Z. Xu, J. Wang, X.H. Chen, and Y. Zhang, "Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator $MnBi_2Te_4$", Science **367**, 895 (2020).
9. C. Liu, Y. Wang, H. Li, Y. Wu, Y. Li, J. Li, K. He, Y. Xu, J. Zhang, and Y. Wang, "Robust axion insulator and Chern insulator phases in a two-dimensional antiferromagnetic topological insulator", Nat. Mater. **19**, 522 (2020).
10. J. X. Qiu, B. Ghosh, J. Schütte-Engel et al. (Collaboration), "Observation of the axion quasiparticle in 2D $MnBi_2Te_4$", Nature **641**, 62 (2025).
11. A. Kirilyuk, A. V. Kimel, and T. Rasing, "Ultrafast optical manipulation of magnetic order", Rev. Mod. Phys. **82**, 2731 (2010).
12. L. Smejkal, Y. Mokrousov, B. Yan, and A. H. MacDonald, "Topological antiferromagnetic spintronics", Nat. Phys. **14**, 242 (2018).
13. L. Cheng, T. Xiang, and J. Qi, "Magnetic-order-mediated carrier and phonon dynamics in $MnBi_2Te_4$", Phys. Rev. Research **6**, 023073 (2024).
14. H. Padmanabhan, M. Poore, P. K. Kim et al. (Collaboration), "Interlayer magnetophononic coupling in $MnBi_2Te_4$", Nat. Commun. **13**, 1929 (2022).
15. J. Choe, D. Lujan, M. Rodriguez-Vega, Z. Ye, A. Leonardo, J. Quan, T. N. Nunley, L.-J. Chang, S.-F. Lee, J. Yan, G. A. Fiete, R. He, and X. Li, "Electron-Phonon and Spin-Lattice Coupling in Atomically Thin Layers of $MnBi_2Te_4$", Nano Lett. **21**, 6139 (2021).
16. А. А. Максимов, И. И. Тартаковский, З. С. Алиев, И. Р. Амирасланов, Н. А. Абдуллаев, В. Н. Зверев, З. А. Джахангирли, И. Ю. Скляднева, М. М. Отроков, Н. Т. Мамедов, Е. В. Чулков, "Температурные исследования спектров комбинационного рассеяния света в магнитных топологических изоляторах $MnBi_2Te_4$ и $MnSb_2Te_4$", Письма в ЖЭТФ **118**, 361 (2023) [A. A. Maksimov, I. I. Tartakovskii, Z. S. Aliev, I. R. Amiraslanov, N. A. Abdullaev, V. N. Zverev, Z. A. Jahangirli, I. Yu. Sklyadneva, M. M. Otrokov, N. T. Mamedov, and E. V. Chulkov, "Temperature Studies of Raman Spectra in $MnBi_2Te_4$ and $MnSb_2Te_4$ Magnetic Topological Insulators", JETP Lett. **118**, 357 (2023)].
17. А. А. Максимов, И. И. Тартаковский, Н. А. Абдуллаев, Н. Т. Мамедов, "Исследования спин-фононного взаимодействия в магнитных топологических изоляторах $MnBi_2Te_4$ методом спектроскопии комбинационного рассеяния света", Известия РАН, сер. Физическая **89**, 286 (2025) [A. A. Maksimov, I. I. Tartakovskii, N. A. Abdullaev, and N. T. Mamedov, "Studies of Spin–Phonon Interaction in Magnetic Topological Insulators $MnBi_2Te_4$ by Raman Spectroscopy", Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **89**, 276 (2025)].
18. M. Balkanski, R. F. Wallis, and E. Haro, "Anharmonic effects in light scattering due to optical phonons in silicon", Phys. Rev. B **28**, 1928 (1983).
19. 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, and E. V. Chulkov, "Novel ternary layered manganese bismuth tellurides of the MnTe-Bi_2Te_3 system: Synthesis and crystal structure", J. Alloys Compd. **789**, 443 (2019).

20. Н. А. Абдуллаев, И. Р. Амирасланов, З. С. Алиев, З. А. Джахангирли, И. Ю. Скляднева, Е. Г. Ализаде, Е. Н. Алиева, М. М. Отроков, В. Н. Зверев, Н. Т. Мамедов, Е. В. Чулков, "Динамика решетки Bi_2Te_3 и колебательные моды в рамановском рассеянии топологических изоляторов $MnBi_2Te_4 \cdot n(Bi_2Te_3)$", Письма в ЖЭТФ **115**, 801 (2022) [N. A. Abdullaev, I. R. Amiraslanov, Z. S. Aliev, Z. A. Jahangirli, I. Yu. Sklyadneva, E. G. Alizade, Y. N. Aliyeva, M. M. Otrokov, V. N. Zverev, N. T. Mamedov, and E. V. Chulkov, "Lattice Dynamics of Bi_2Te_3 and Vibrational Modes in Raman Scattering of Topological Insulators $MnBi_2Te_4 \cdot n(Bi_2Te_3)$", JETP Lett. **115**, 749 (2022)].

21. M. Garnica, M. M. Otrokov, P. C. Aguilar et al. (Collaboration), "Native point defects and their implications for the Dirac point gap at $MnBi_2Te_4$(0001)", npj Quantum Mater. **7**, 7 (2022).

22. H. Tan and B. Yan, "Distinct Magnetic Gaps between Antiferromagnetic and Ferromagnetic Orders Driven by Surface Defects in the Topological Magnet $MnBi_2Te_4$", Phys. Rev. Lett. **130**, 126702 (2023).