

ИССЛЕДОВАНИЯ СПИН-ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МАГНИТНЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ MnBi_2Te_4 МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

© 2025 г. А. А. Максимов^{1,*}, И. И. Тартаковский¹, Н. А. Абдуллаев^{2,3},
Н. Т. Мамедов^{2,3}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела
имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

²Институт физики Министерства науки и образования, Баку, Азербайджан

³Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

*E-mail: maksimov@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 27.09.2024 г.

После доработки 18.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

В широком температурном диапазоне выполнены экспериментальные исследования спектров комбинационного рассеяния света в монокристаллах топологических магнитных изоляторов MnBi_2Te_4 . Обсуждается влияние спин-фононного взаимодействия на изученные спектры при температурах ниже температуры антиферромагнитного фазового перехода.

Ключевые слова: спин-фононное взаимодействие, топологический магнитный изолятор, комбинационное рассеяние света, антиферромагнитный фазовый переход.

DOI: 10.31857/S0367676525020217, EDN: CVRSYC

ВВЕДЕНИЕ

Реализация магнитного порядка в функциональных квантовых материалах [1, 2] создает богатую платформу для исследования фундаментальных спиновых явлений, примерами которых являются и недавно открытые магнитные топологические материалы [3–5]. Такие материалы имеют большие перспективы для применения в спинтронике, устройствах магнитной памяти и квантовых информационных технологиях. Введение магнетизма в топологические изоляторы открывает щель в топологических поверхностных состояниях, что, в свою очередь, может приводить к различным новым топологическим квантовым состояниям, таким как аномальный квантовый эффект Холла или состояние аксионного изолятора. В легированной хромом пленке топологического изолятора $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ наблюдался аномальный квантовый эффект Холла, но при очень низких температурах, не превышающих 30 мК [6], что было связано с неоднородным распределением магнитных атомов, из-за чего магнитная щель нерегулярно менялась вдоль поверхности образца [7]. Слоистые кристаллы MnBi_2Te_4 демонстрируют при температурах около 25.4 К переход в антиферромагнит-

ное магнитоупорядоченное состояние [4], что является первым экспериментальным примером внутреннего магнитного порядка в трехмерных топологических изоляторах и можно надеяться, позволит наблюдать упомянутые выше квантовые состояния при более высоких температурах.

Такой эффективный способ включения магнетизма в топологические изоляторы, приводящий к большой величине магнитной щели и однородному магнитному упорядочению, что реализуется в кристаллах MnBi_2Te_4 , привлек большой интерес к исследованиям физических свойств этих кристаллов. В работах [8–10] подробно изучались спектры комбинационного рассеяния (КР) света в кристаллах магнитных топологических изоляторов MnBi_2Te_4 в широком диапазоне температур, включая области магнитного упорядочения, с целью обнаружения возможного влияния магнот-фононного взаимодействия на частоты фононов и их интенсивностей в КР света. Однако, проявления спин-фононного взаимодействия в спектрах КР света, которые упоминались в работах [8,9] были противоречивыми, и скорее всего свидетельствовали о недостаточной точности экспериментальных измерений в этих работах, на что было указано в работе [10].

В настоящей работе приведены новые данные о температурных особенностях зависимостей спектров КР монокристаллов MnBi_2Te_4 , полученные с использованием полупроводникового лазера с длиной волны возбуждающего света 785 нм, и которые могут свидетельствовать о влиянии спин-фононного взаимодействия на изученные спектры.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследованные монокристаллы MnBi_2Te_4 имели форму тонких пластинок с линейными размерами до нескольких миллиметров и толщиной примерно 50–100 мкм. Технология выращивания монокристаллов MnBi_2Te_4 подробно описана в [4]. Спектры КР света в кристаллах MnBi_2Te_4 исследовались при возбуждении HeNe лазером с длиной волны излучения 633 нм или полупроводниковым лазером с длиной волны 785 нм. Лазерное излучение мощностью, не превышающей величины около 10 мВт, фокусировалось на однородном участке поверхности образца в пятно диаметром около 100 мкм, при такой плотности мощности возбуждающих лазеров не наблюдались изменения спектров КР при сравнительно длительных временах накопления сигнала с продолжительностью до получаса. Образцы монокристаллов помещались в оптический гелиевый криостат с регулируемой температурой от 4.2 К до комнатной с точностью около 0.1 К. Спектры КР регистрировались в направлении, близком к нормали к поверхности образца с помощью спектрального прибора DilorXY 500 в случае возбуждения HeNe лазером, либо со значительно более высоким спектральным разрешением на спектрографе модели M522 с помощью фильтра VLP02-785-12.5, позволяющим, начиная с частоты примерно 20 см^{-1} , регистрировать КР света в стоксовой области спектра при возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны излучения 785 нм. Спектральные приборы были оснащены охлаждаемыми CCD детекторами.

Следует отметить, что большие времена накопления при регистрации спектров КР могут приводить к проявлению долгосрочной, пускай даже слабой, нестабильности калибровки спектральных приборов, что, в свою очередь, может вызывать дополнительную ошибку при определении частоты фонона при проведении экспериментов при различных температурах. Для повышения точности определения частоты фононов до величины примерно 0.1 см^{-1} одновременно с регистрацией спектров КР, в оптический путь установки посылался свет, сравнимой с интенсивностью КР света, от калибровочной Ne лампы низкого давления [10].

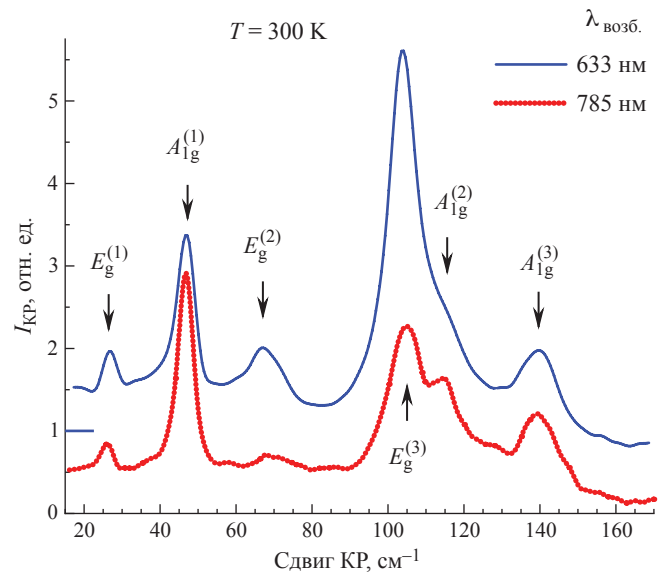


Рис. 1. Спектры КР кристалла MnBi_2Te_4 , полученные при комнатной температуре при возбуждении лазерами с различной длиной волны 633 и 785 нм. Спектры сдвинуты по шкале интенсивностей для наглядности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В парамагнитной фазе объемные монокристаллы MnBi_2Te_4 принадлежат к пространственной группе $R\bar{3}m$, с точечной группой симметрии D_{3d} в Γ точке Бриллюэна. В них наблюдаются 6 активных в КР света мод: 3 — A_{1g} симметрии и 3 двукратно вырожденных колебания E_g симметрии [8–11]. В магнитоупорядоченной фазе тензор КР света в MnBi_2Te_4 остается таким же, как и в немагнитной [12], и поэтому при низких температурах в спектрах КР наблюдаются фонные моды такой же симметрии.

На рис. 1 показаны спектры КР света в кристаллах MnBi_2Te_4 , измеренные при комнатной температуре с использованием различных лазеров для возбуждения. Верхней сплошной кривой показан спектр, полученный при возбуждении HeNe лазером с длиной волны 633 нм, а нижней точечной кривой — спектр КР при возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны излучения 785 нм. В обоих спектрах наблюдаются все 6 активных в КР фонных мод кристаллов MnBi_2Te_4 . Спектральные позиции фонных мод различной симметрии отмечены стрелками на рис. 1.

Спин-фононное взаимодействие, связанное с переходом в антиферромагнитную фазу, в спектрах КР кристаллов MnBi_2Te_4 может проявляться в зависимостях интенсивностей и спектрального поведения фонных мод при низких температурах ниже температуры фазового перехода примерно 25.4 К. Согласно расчетам, выполненным в работе [8], особенности в поведении интенсивностей и спектрального поведения должны проявляться для фононов A_{1g} симметрии, а наиболее

сильно — для фонона $A_{1g}^{(2)}$. Однако на рис. 1 видно, что фонон $A_{1g}^{(2)}$ на верхнем спектре проявляется лишь как плечо на фоне значительно более сильной полосы фонона $E_g^{(3)}$, что, естественно, делает практически невозможным провести исследования температурного поведения интенсивности и спектрального положения этого фонона со сколько-нибудь разумной точностью. Такое проявление фонона $A_{1g}^{(2)}$ в спектрах КР света является типичным при возбуждении лазерами с длиной волны генерации 633 нм и меньше, которые использовались в работах [8–10]. Поэтому в этих работах было уделено основное внимание изучению спектрального поведения более низкочастотного фонона $A_{1g}^{(1)}$ (см. рис. 1).

Хорошо известно, что зависимость частот фононов $\omega(T)$ при изменении температуры T от гелиевых до комнатных, связанная с ангармонизмом колебаний, может быть хорошо описана с учетом трехфононных процессов взаимодействия [13]:

$$\omega(T) = \omega_0 + \delta\omega \times \left[1 + \frac{2}{\exp(\omega_0/2T) - 1} \right]. \quad (1)$$

В формуле (1) $\omega_0 + \delta\omega$ — частота фонона при нулевой температуре, отношение $\delta\omega/\omega_0$ определяет наклон практически линейной зависимости $\omega(T)$ при высоких температурах. В работе [8] было сделано утверждение, что частота $A_{1g}^{(1)}$ фонона в кристаллах $MnBi_2Te_4$ при температурах ниже температуры перехода в антиферромагнитное состояние увеличивается на величину примерно 0.3 см^{-1} по сравнению с зависимостью, следующей из стандартной ангармонической модели, что связывалось авторами с проявлением спин-фононного взаимодействия. Ровно противоположное экспериментальное утверждение было сделано в работе [9], где наблюдалось примерно такое же по величине смягчение (уменьшение) частоты этого фонона при низких температурах. Следует отметить, что точность определения частоты исследуемого фонона в этих работах находилась на пределе экспериментальных возможностей, значительно превышая в том числе и спектральное разрешение. Более тщательные измерения спектральной зависимости фонона от температуры $A_{1g}^{(1)}$ с точностью $\pm 0.1 \text{ см}^{-1}$, выполненные в работе [10], показали, что температурная зависимость частоты этого фонона может быть описана стандартной ангармонической моделью с помощью формулы (1), в которой не учитывается спин-фононное взаимодействие.

Как уже отмечалось выше, более сильные эффекты проявления спин-фононного взаимодействия в спектрах КР кристаллов $MnBi_2Te_4$ ожидаются для фонона $A_{1g}^{(2)}$. Как видно из нижнего спектра КР на рис. 1, полученного с помощью

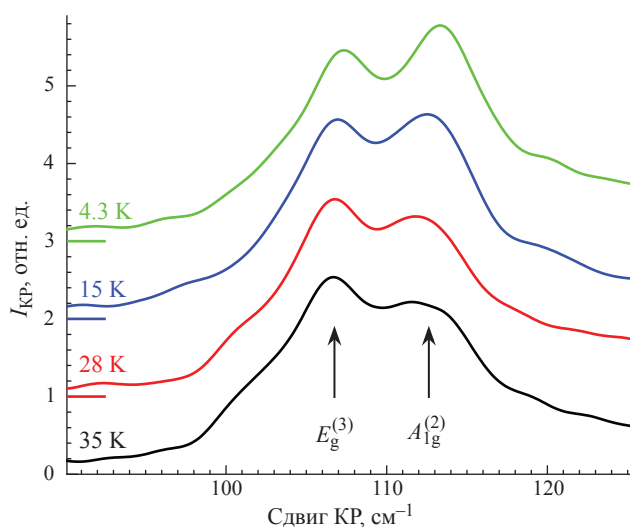


Рис. 2. Спектры КР кристалла $MnBi_2Te_4$, полученные при возбуждении лазером с длиной волны 785 нм, при различных температурах. Спектры сдвинуты по шкале интенсивностей для наглядности.

более длинноволнового полупроводникового лазера (785 нм), благодаря которому обеспечивалось значительно лучшее спектральное разрешение, полоса КР $A_{1g}^{(2)}$ фонона может быть уверенно выделена, даже несмотря на близость спектрального положения сильного фонона $E_g^{(3)}$.

На рис. 2 показаны спектры КР монокристалла $MnBi_2Te_4$ при различных температурах как выше, так и ниже температуры антиферромагнитного фазового перехода $T_N \approx 25.4 \text{ K}$. Видно, что при понижении температуры ниже температуры фазового перехода наблюдается увеличение интенсивности $A_{1g}^{(2)}$ фонона на величину около 20 % относительно интенсивности КР фонона $E_g^{(3)}$ симметрии. При температурах выше T_N это отношение интенсивностей очень слабо зависит от температуры, а вблизи антиферромагнитного фазового перехода начинает наблюдаться относительный рост интенсивности фонона $A_{1g}^{(2)}$ симметрии. Также можно обратить внимание на заметно разное поведение частот фононов $A_{1g}^{(2)}$ и $E_g^{(3)}$ в этом же температурном интервале. При этом относительная величина сдвига в спектральных положениях фононов $A_{1g}^{(2)}$ и $E_g^{(3)}$ значительно превышает величины эффектов, которые наблюдались, как утверждалось в работах [8, 9], для сдвига фонона $A_{1g}^{(1)}$ в кристаллах $MnBi_2Te_4$ при различных температурах. Такое поведение относительного роста интенсивности и спектрального поведения фонона $A_{1g}^{(2)}$ симметрии с температурой вблизи температуры антиферромагнитного фазового перехода можно объяснить проявлением спин-фононного поведения, которое наибо-

лее сильным образом должно проявляться именно для этого фонона [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами были выполнены детальные исследования спектров КР монокристаллов MnBi_2Te_4 при различных температурах с использованием полупроводникового инфракрасного лазера с длиной волны возбуждающего света 785 нм. Получены новые данные о температурных особенностях зависимостей интенсивности и спектрального поведения полосы КР фонона $A_{1g}^{(2)}$ симметрии, которые могут свидетельствовать о влиянии спин-фононного взаимодействия на изученные спектры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basov D.N., Averitt R.D., van der Marel D. et al. // *Rev. Mod. Phys.* 2011. V. 83. P. 471.
2. Cheong S.-W., Mostovoy M. // *Nature Mater.* 2007. V. 6. P. 13.
3. Tokura Y., Yasuda K., Tsukazaki A. // *Nature Rev. Phys.* 2019. V. 1. P. 126.
4. Otrokov M.M., Klimovskikh I.I., Bentmann H. et al. // *Nature*. 2019. V. 576. P. 416.
5. Wimmer S., Sanchez-Barriga J., Küppers P. et al. // *Adv. Mater.* 2021. V. 33. Art. No. 2102935.
6. Chang C.Z., Zhang J., Feng X. et al. // *Science*. 2013. V. 340. P. 167.
7. Lee I., Kima Ch.K., Lee J. et al. // *PNAS*. 2015. V. 112. P. 1316.
8. Padmanabhan H., Poore M., Kim P.K. et al. // *Nature Commun.* 2022. V. 13. P. 1929.
9. Choe J., Lujan D., Rodriguez-Vega M. et al. // *Nano Lett.* 2021. V. 21. Art. No. 6139.
10. Максимов А.А., Тартаковский И.И., Алиев З.С. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. 2023. Т. 118. № 5–6. С. 361; Maksimov A.A., Tartakovskii I.I., Aliev Z.S. et al. // *JETP Lett.* 2023. V. 118. No. 5. P. 357.
11. Абдуллаев Н.А., Амирасланов И.Р., Алиев З.С. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. 2022. Т. 115. № 12. С. 801; Abdullaev N.A., Amiraslanov I.R., Aliev Z.S. et al. // *JETP Lett.* 2022. V. 115. No. 5. P. 749.
12. Cracknell A.P. // *J. Phys. C. Solid State Phys.* 1969. V. 2. P. 500.
13. Balkanski M., Wallis R.F., Haro E. // *Phys. Rev. B*. 1983. V. 28. P. 1928.

Studies of spin-phonon interaction in magnetic topological insulators MnBi_2Te_4 by Raman spectroscopy

A. A. Maksimov^{a,*}, I. I. Tartakovskii^a, N. A. Abdullaev^{b,c}, N. T. Mamedov^{b,c}

^a*Osipyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

^b*Institute of Physics, Ministry of Science and Education, Baku, AZ1073 Azerbaijan*

^c*Baku State University, Baku, AZ1148 Azerbaijan*

*e-mail: maksimov@issp.ac.ru

Experimental studies of Raman scattering spectra in single crystals of topological magnetic insulators MnBi_2Te_4 have been performed in a wide temperature range. The influence of spin-phonon interaction on the studied spectra at temperatures below the antiferromagnetic phase transition temperature is discussed.

Keywords: spin-phonon interaction, topological magnetic insulator, Raman scattering, antiferromagnetic phase transition.