

Электронные свойства топологического изолятора $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$

© Ю.Е. Коваленко¹, М.В. Якушев^{1,2,3}, В.И. Гребенников¹, М. Орлита⁴, С.Г. Титова⁵,
К.А. Кох^{6,7,8}, О.Е. Терещенко^{8,9}, Т.В. Кузнецова^{1,3}

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
620108 Екатеринбург, Россия

² Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук,
620990 Екатеринбург, Россия

³ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002 Екатеринбург, Россия

⁴ Национальная лаборатория сильных магнитных полей (LNCMI),
38042 Cedex 9 Гренобль, Франция

⁵ Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук,
620016 Екатеринбург, Россия

⁶ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

⁷ Кемеровский государственный университет,
650000 Кемерово, Россия

⁸ Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

⁹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: yulya.khatchenko@mail.ru

Поступила в Редакцию 15 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 20 июня 2024 г.

Принята к публикации 20 июня 2024 г.

Структурные и электронные свойства тонких слоев монокристаллов топологического изолятора $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$ исследовались методами рентгеновской дифракции и магнитооптической спектроскопии. В спектрах пропускания, измеренных при 4.2 К, обнаружен резкий край полосы поглощения, а также осцилляции Фабри-Перо, позволившие оценить ширину запрещенной зоны $E_g \approx 374$ мэВ и коэффициент преломления $n \approx 8.5$. Приложение магнитного поля с напряженностью до 11 Тл привело к существенному уменьшению амплитуды осцилляций, что было связано с эффектом Фарадея. Оценена постоянная Верде $V \approx 10^3$ град/см · Тл.

Ключевые слова: топологический изолятор, $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$, магнитооптика, спектр пропускания.

DOI: 10.61011/FTP.2024.04.58543.6332H

1. Введение

Топологические изоляторы — это новый класс квантовых материалов, активно изучаемый в последние годы. Эти материалы являются изоляторами в объеме, но имеют топологически защищенные спин-поляризованные проводящие состояния на поверхности [1] с дисперсионными соотношениями в виде конуса Дирака, что открывает для таких материалов большие перспективы применения в спинтронике [2] и квантовой электронике [3].

Большинство недавних исследований топологических изоляторов связано с их нетривиальными свойствами. Однако их объемные электронные свойства могут также быть весьма необычными [4,5]. Интерес к объемным свойствам этих материалов обусловлен также их высокими эксплуатационными характеристиками в термоэлектрических устройствах.

В данной работе структурные и электронные свойства монокристаллов топологического изолятора $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$, выращенного вертикальным методом Бриджмена, исследовались

методами рентгеновской дифракции и магнитооптической спектроскопии.

2. Объекты и методика эксперимента

Монокристаллические образцы $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$ были выращены вертикальным методом Бриджмена [6]. Фазовая чистота и кристаллическая структура выращенного материала исследовалась методом рентгеновской дифракции (XRD) при комнатной температуре на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 Maxima (CuK_α -излучение, графитовый монохроматор, диапазон 2θ от 5 до 95° с шагом 0.02° и временем счета 12 с на шаг).

Спектры пропускания в энергетическом диапазоне от 0.2 до 0.5 эВ при 4.2 К получены с использованием спектрометра Bruker IFS 66v/S FTIR с глобаром в качестве источника света и кремниевым болометром в качестве детектора в Национальной лаборатории сильных магнитных полей (LNCMI, Гренобль, Франция). Пленки толщиной ~ 10 мкм отслаивались от монокристаллического

образца перпендикулярно оси c и затем помещались на медную фольгу с вырезанными в центре отверстиями размером около 1×1 мм. Спектры магнито-пропускания измерялись на сверхпроводящем магните до 11 Тл в конфигурации Фарадея со светом, распространяющимся вдоль оси c .

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

3.1. Рентгеновская дифракция

Для аттестации кристаллической структуры методом Ритвелда использовался программный пакет GSAS-II [7]. Порошковые дифрактограммы, представленные на рис. 1, показали, что материал не содержит вторичных фаз, кристаллическая структура соответствует известным данным [8]: пространственная группа $R\bar{3}m$, параметры элементарной ячейки $a = 4.1848(3) \text{ \AA}$, $c = 29.9094(8) \text{ \AA}$, координаты атомов: Sb ($3m, 000.3931$), Te ($3m, 000.7860$), Se ($3m, 000$). Высокий немонотонный фон на рис. 1 обусловлен стеклянной подложкой и малым количеством образца. Эти причины также приводят к относительно высокому фактору расходимости $\omega R_p = 3.34\%$, степень соответствия $\chi^2 = 2.13$.

4. Магнитооптические измерения

На рис. 2 представлены спектры пропускания в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле 11 Тл. Наблюдается резкий край полосы поглощения, позволяющий оценить ширину запрещенной зоны $E_g \approx 374$ мэВ. Также наблюдаются значительные осцилляции Фабри-Перо, указывающие на малую толщину образца и высокую степень параллельности его верхней и нижней поверхности. Видно, что применение магнитного поля оказывает значительное влияние на осцилляции Фабри-Перо.

Чтобы количественно оценить изменения, вызываемые магнитным полем, выделим осциллирующую часть путем вычитания монотонной составляющей I_{sm} и нормировки на нее: $I_{FP} = (I - I_{sm})/I_{sm}$. На рис. 3 показан результирующий спектр осцилляций I_{FP} в диапазоне от 310 до 364 мэВ при разных значениях магнитного поля.

Видно, что магнитное поле существенно ослабляет интенсивность осцилляций Фабри-Перо. Вблизи края полосы поглощения ослабление становится больше. Мы связываем это ослабление с фарадеевским вращением плоскости поляризации света, распространяющегося через образец. Несмотря на то что в эксперименте использовался неполяризованный свет, фарадеевское вращение влияет на интенсивность пропускания за счет самоинтерференции: прошедшие волны складываются со своими отражениями от верхней и нижней границ образца. Отраженные волны отличаются от напрямую

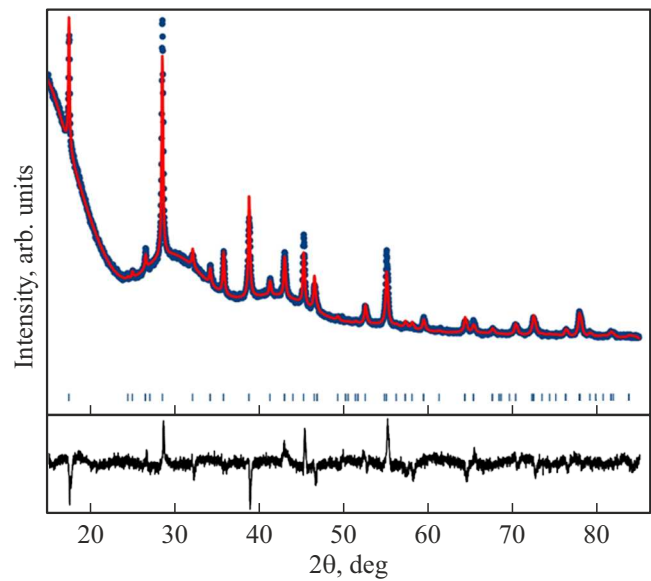


Рис. 1. Экспериментальная (кружки) и расчетная (красная линия) дифрактограммы, а также разность между ними (черная линия внизу). Брэгговские максимумы показаны вертикальными штрихами. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

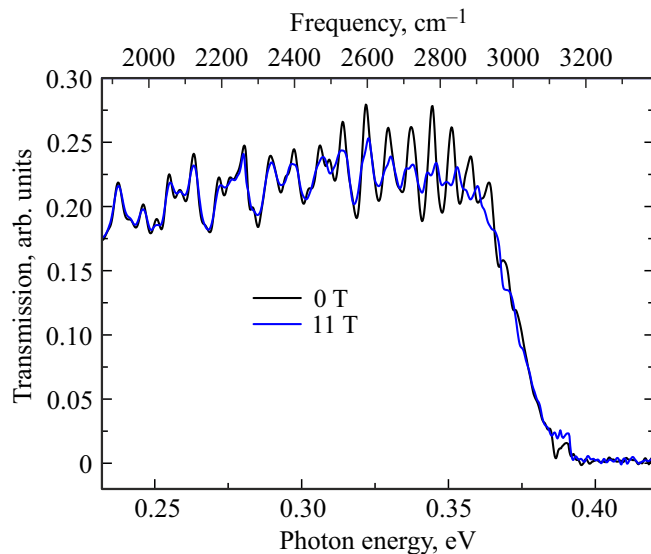


Рис. 2. Спектры пропускания, измеренные в магнитном поле 0 и 11 Тл.

прошедших волн фазами, а также углами поворота векторов поляризации.

Волну, распространяющуюся через образец толщиной d , опишем как $\Phi = e^{ikd}$, где ее комплексный волновой вектор $k = k' + ik'' = n\omega/c$ определяется комплексным коэффициентом преломления n , частотой света ω и скоростью света в вакууме c . Действительная часть k' описывает изменение фазы волны, мнимая часть k'' описывает изменение амплитуды волны. После прохождения образца толщиной d коэффициент пропускания

света T_{\pm} с правой (+) и левой (–) круговой поляризацией можно описать как

$$T_{\pm} = \frac{(1 - R^2)e^{i(k \pm b)d}}{1 - R^2e^{i2(k \pm b)d}}, \quad (1)$$

где $R = |R|e^{i\varphi}$ — коэффициент отражения от границ поверхностей, φ — сдвиг фазы отраженной волны относительно падающей, b — угол поворота вектора поляризации на единицу толщины образца. Угол поворота вектора поляризации ψ после прохождения образца толщиной d подчиняется закону Фарадея [9] и пропорционален магнитному полю B : $\psi = bd = V B d$, где V — постоянная Верде. Знаменатель получается как сумма прямой волны (амплитуда которой принимается за единицу) и волны после двойного отражения от двух границ.

Интенсивность пропускания линейно поляризованного света можно рассчитать как половину суммы квадратов модулей коэффициентов пропускания для света с правой и левой круговой поляризацией:

$$I = \frac{|T_+|^2 + |T_-|^2}{2} = \frac{1}{2} \sum_{\sigma=\pm 1} \frac{|(1 - R^2)|^2 e^{-2k''d}}{1 + |R^2 e^{-2k''d}|^2 - 2|R^2 e^{-2k''d}| \cos[2((k' + \sigma b)d + \varphi)]}, \quad (2)$$

где $\sigma = \pm 1$ для света с правой (+) и левой (–) круговой поляризацией.

В первом приближении интенсивность пропускания можно записать как

$$I \approx (1 - 2\text{Re}(R^2))e^{-2k''d} \times (1 + 2|R^2 e^{-2k''d}| \cos(2bd) \cos[2(k'd + \varphi)]). \quad (3)$$

Пусть $e^{-2k''d}$ будет константой η , тогда монотонную и осциллирующую части в ограниченном диапазоне k можно записать как

$$\langle I \rangle \approx (1 - 2\text{Re}(R^2))\eta, \quad (4)$$

$$I_{FP} \approx \frac{I - \langle I \rangle}{\langle I \rangle} = 2|R|^2 \eta \cos(2bd) \cos[2(k'd + \varphi)]. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что при применении магнитного поля амплитуда осцилляций должна убывать по закону:

$$A_B = A_0 \cos(2VBd), \quad (6)$$

где A_0 и A_B — амплитуда осцилляций при нулевом магнитном поле и в поле со значением B соответственно.

На рис. 4 представлено фурье-преобразование осцилляций Фабри-Перо, показанных на рис. 3. В спектре Фурье при 0 Тл преобладает гармоника с фурье-частотой 0.017 см, которая, согласно уравнению (5), соответствует оптической толщине $nd = 85$ мкм. Спектр Фурье также содержит другие гармоники из-за неоднородности

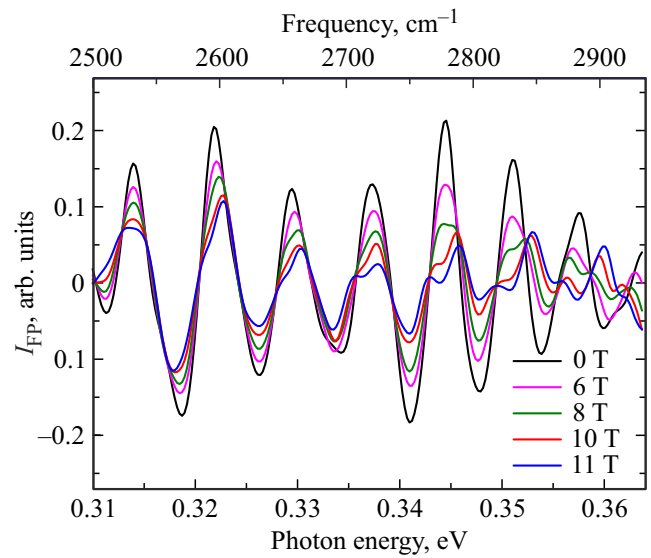


Рис. 3. Спектр осцилляций Фабри-Перо при разных магнитных полях.

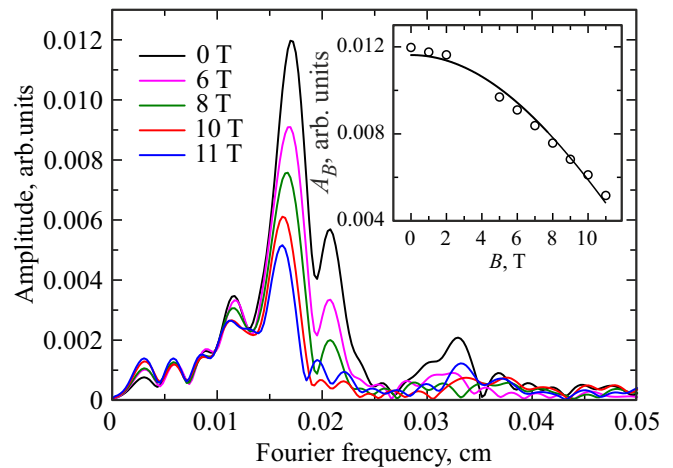


Рис. 4. Фурье-преобразование осцилляций Фабри-Перо при разных магнитных полях. На вставке показана зависимость амплитуды доминирующей гармоники от магнитного поля (кружки) и ее аппроксимация функцией (6) (сплошная линия).

образца по толщине d . При толщине образца 10 мкм получаем оценку показателя преломления $n \approx 8.5$. Полученное значение близко к $n \approx 6$ для Bi_2Se_3 [5].

На вставке к рис. 4 показана зависимость амплитуды доминирующей гармоники от магнитного поля и ее аппроксимация функцией (6). Аппроксимация позволяет оценить постоянную Верде $V \approx 10^3$ град/см · Тл, значение которой согласуется с полученным для Bi_2Se_3 [5].

5. Заключение

Исследованы структурные и электронные свойства тонких слоев монокристаллов топологического изолятора $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$ с помощью рентгеноструктурного анализа и магнитооптического пропускания.

Высокое структурное качество решетки с пространственной группой $R\bar{3}m$ и параметрами элементарной ячейки $a = 4.1848(3) \text{ \AA}$, $c = 29.9094(8) \text{ \AA}$ подтверждено методом рентгеновской дифракции.

В спектрах пропускания в инфракрасной области при 4.2 К виден край полосы поглощения, позволяющий оценить ширину запрещенной зоны $E_g \approx 374 \text{ мэВ}$, а также осцилляции Фабри-Перо, используемые для оценки показателя преломления $n \approx 8.5$.

Применение магнитных полей ослабляет амплитуду осцилляций Фабри-Перо. Предполагается, что это обусловлено фарадеевским вращением плоскости поляризации света при прохождении образца в магнитном поле. Оценено среднее значение постоянной Верде $V \approx 10^3 \text{ град/см} \cdot \text{Тл}$ в диапазоне от 310 до 364 мэВ.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России по теме „Спин“ № 122021000036-3. Ю.Е. Коваленко благодарит Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН) за поддержку ее работы по государственному заданию Министерства образования и науки России по теме „Спин“, которая выполнялась в рамках молодежного проекта ИФМ УрО РАН № 32-23/мол. Рентгеновская дифракция выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России № 122013100200-2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.Z. Hasan, C.L. Kane. *Rev. Mod. Phys.*, **82**, 3045 (2010).
- [2] L. Fu, C.L. Kane. *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 096407 (2008).
- [3] J.E. Moore. *Nature*, **464**, 194 (2010).
- [4] M. Orlita, B.A. Piot, G. Martinez, N.K. Sampath Kumar, C. Faugeras, M. Potemski, C. Michel, E.M. Hankiewicz, T. Brauner, Č. Drašr, S. Schreyeck, S. Grauer, K. Brunner, C. Gould, C. Brüne, L.W. Molenkamp. *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 186401 (2015).
- [5] L. Ohnouteck, M. Haki, M. Veis, B.A. Piot, C. Faugeras, G. Martinez, M.V. Yakushev, C. Drasar, A. Materna, G. Strzelecka, A. Hruban, M. Potemski, M. Orlita. *Sci. Rep.*, **6**, 19087 (2016).
- [6] O.E. Tereshchenko, K.A. Kokh, V.V. Atuchin, K.N. Romanyuk, S.V. Makarenko, V.A. Golyashov, A.S. Kozhukhov, I.P. Prosvirin, A.A. Shklyayev. *JETP Lett.*, **94**, 465 (2011).
- [7] B.H. Toby, R.B. Von Dreele. *J. Appl. Cryst.*, **46**, 544 (2013).
- [8] T.L. Anderson, H.B. Krause. *Acta Cryst.*, **B30**, 1307 (1974).
- [9] H.S. Bennett, E.A. Stern. *Phys. Rev.*, **137**, A448 (1965).

Редактор Г.А. Оганесян

Electronic properties of the topological insulator $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$

Yu.E. Kovalenko¹, M.V. Yakushev^{1,2,3},
V.I. Grebennikov¹, M. Orlita⁴, S.G. Titova⁵,
K.A. Kokh^{6,7,8}, O.E. Tereshchenko^{8,9},
T.V. Kuznetsova^{1,3}

¹ Miheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620108 Ekaterinburg, Russia

² Institute of Solid-State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620990 Ekaterinburg, Russia

³ Ural Federal University, 620002 Ekaterinburg, Russia

⁴ National Laboratory for Intense Magnetic Fields (LNCMI), 38042 Grenoble Cedex 9, France

⁵ Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620016 Ekaterinburg, Russia

⁶ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

⁷ Kemerovo State University, 650000 Kemerovo, Russia

⁸ Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

⁹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The structural and electronic properties of thin layers of single crystals of the topological insulator $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$ were studied by X-ray diffraction and magneto-optical spectroscopy. A sharp edge of the absorption band and Fabry-Perot oscillations were revealed in the transmission spectra measured at 4.2 K which made it possible to estimate the band gap as 374 meV and the refractive index 8.5. The application of magnetic fields up to 11 T led to a significant decrease in the amplitude of the oscillations attributed to the Faraday effect with the Verdet constant of $10^3 \text{ degrees/cm} \cdot \text{T}$.