

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМЫ И
МЕЖЗОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ В 3D
ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ СО СТРУКТУРОЙ
ТЕТРАДИМИТА**

Специальность: 2220.01 – Физика полупроводников

Отрасль науки: Физика

Соискатель: **Ализаде Эльвин Гусейнага оглы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии

Баку – 2024

Диссертационная работа выполнена в Институте физики
Министерства Науки и Образования Азербайджанской
Республики.

Научный руководитель: академик
Мамедов Назим Тимур оглы

Официальные оппоненты: член-корреспондент НАНА, доктор
физико-математических наук, доцент
Джалилов Намиг Сардар оглы

доктор физико-математических наук,
профессор
Исмаилов Тариел Гумбат оглы

доктор философии по физике
Ибрагимов Бехбут Гусейн оглы

Диссертационный совет Высшей Аттестационной Комиссии
при Президенте Азербайджанской Республики, действующий
на базе Института физики Министерства Науки и Образования
Азербайджанской Республики под номером ED 1.14

Председатель
диссертационного
совета: академик


_____ **Гашимов Ариф Мамед оглы**

Ученый секретарь
диссертационного совета: доктор наук по физике, доцент


_____ **Мехдиева Рафига Забил кызы**

Председатель научного
семинара

доктор физико-математических
наук, доцент

_____ **Мехдиев Талат Рзагулу оглы**



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и степень изученности темы.

Одной из наиболее актуальных задач современной физики полупроводников является исследование реакции электронных состояний поверхности и объёма на внешнее электромагнитное поле в квантовых материалах, таких как немагнитные и магнитные полупроводники с сильным спин-орбитальным взаимодействием по типу Дрессельхауза и Рашбы¹, в том числе топологические изоляторы².

Бинарные полупроводники со структурой тетрадимита, такие как Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 , являются немагнитными трёхмерными (3D) топологическими изоляторами³, в которых реализуется спин-холл эффект. Тройные магнитные полупроводники со структурой тетрадимита, такие как $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$, где $n = 0, 1, 2, \dots$, а также $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ являются магнитными 3D топологическими изоляторами, в которых реализуется уже аномальный квантовый спин-холл эффект⁴.

В обоих случаях, помимо обязательной топологической защиты электронов поверхности полупроводника от рассеяния, которая обеспечивается в немагнитных топологических изоляторах симметрией относительно обращения времени, а в случае ее нарушения в магнитных топологических изоляторах, этой же симметрией в паре с трансляцией, необходимым фактором для реализации бездиссипативного транспорта

¹ Bihlmayer, G. Rashba-like physics in condensed matter. / P. Noël, D.V. Vyalikh, E. V. Chulkov, and A. Manchon // Nat. Rev. Phys., -2022, - 4, -642–659

² Ando, Y. J. Topological Insulator Materials // Phys. Soc. Jpn., – 2013, 82 (10), – p. 102001/1-36.

³ Niesner, D. Unoccupied topological states on bismuth chalcogenides./ Th. Fauster, S. V. Eremeev, T. V. Menshchikova, Yu. M. Koroteev [et al.] // Phys. Rev. B, -2012, -86, -205403.

⁴ Otrokov, M. M. Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator / I.I. Klimovskikh, H. Bentmann, D. Estyunin [et al.] // Nature, -2019, - 576, -416.

энергии (или информации) является сильное спин-орбитальное взаимодействие (COB) и наличие инвертированной запрещенной зоны.

Тройные полупроводники BiTeI и твердые растворы BiTeI-SbTeI со структурой несколько отличной от структуры тетрадимита, но с похожим атомным составом и рекордным спиновым расщеплением Рашбовского типа⁵ являются перспективными материалами для реализации топологической фазы под давлением⁶ и также представляют огромный практический интерес для спинтроники⁷.

Реакция электронной подсистемы материала на внешнее электромагнитное поле задается уравнением Максвелла, связывающим поле возникающее в материале с внешним полем через коэффициент пропорциональности, который носит название диэлектрической функции. Диэлектрическая функция является комплексным тензором второго порядка⁸, который отражает совокупный вклад всех квантовых переходов в реакцию электронной подсистемы на внешнее электромагнитное поле и включает в себя все межзонные, межподзонные и внутризонные переходы, возможные в рамках конкретной электронной зонной структуры рассматриваемого материала.

Переходы первых двух типов происходят без изменения волнового вектора электрона, являются прямыми и пропорциональны межзонной или межподзонной плотности состояний, задаваемой конкретной электронной зонной

⁵ Ishizaka, K. Giant Rashba-type spin splitting in bulk BiTeI / M.S. Bahramy, H. Murakawa, M. Sakano [et al.] a // Nat. Mater., -2011, -10, -521–526.

⁶ Ereemeev, S.V. Two- and three-dimensional topological phases in BiTeX compounds/I.A. Nechaev, E.V. Chulkov // Phys. Rev. B, -2017, -96, -155309

⁷ Zhang, Peng. Tunable intrinsic spin Hall conductivity in BiTeI by applying hydrostatic pressure./ Zimo Zhou, Shunbo Hu, Heng Gao, Yin Wang//J. Appl. Phys., -2022, -132 (20), -203903.

⁸ Mamedov, N. Infrared spectroscopic ellipsometry and optical spectroscopy of plasmons in classic 3d topological insulators / E. Alizade, Z. Jahangirli, Z. Aliev, N. Abdullayev [et al.] // JVST B, - 2019, - 37(6), - 062602.

структурой материала.

Переходы третьего типа происходят с изменением волнового вектора, являются непрямыми и связаны с поглощением энергии электромагнитной волны свободными носителями. Частота фотона, на которой происходит такое поглощение, носит название экранированной плазменной частоты. Ей соответствует нулевое значение действительной части диэлектрической функции. Начиная с этой частоты, мнимая часть диэлектрической функции с уменьшением частоты резко возрастает, отражая факт поглощения света свободными носителями. Важно подчеркнуть, что колебания плазмы свободных носителей характеризуются возбуждением плазмонов; квазичастиц, которые подчиняются статистике Бозе и проявляют себя в виде пиков в спектре мнимой части обратной диэлектрической функции, взятой со знаком минус.

В общем случае, поглощение света плазмой носителей заряда и спектр плазмонов сложным образом связаны с зонной структурой материала.

В полупроводниках существует два типа плазмонов – высокочастотные и низкочастотные. Первые, энергия которых велика по сравнению с шириной запрещенной зоны, обусловлены колебаниями плотности заряда валентных электронов. Низкочастотные же плазмоны связаны с квазисвободными электронами проводимости и дырками валентной зоны.

В собственных полупроводниках низкочастотная плазма может быть многокомпонентной, то есть состоящей из носителей заряда разного типа, которые отличаются знаком заряда (электроны и дырки), эффективной массой, номером зоны или долины (многозонные или многодолинные полупроводники). Это приводит к возникновению дополнительных мод и к существованию в электронно-дырочной плазме собственных полупроводников двух ветвей плазмонов. В одной из них электроны и дырки движутся в противофазе. В другой, более низкочастотной, электроны и дырки движутся синфазно, а закон дисперсии имеет звуковой

характер (акустический плазмон).

Ситуация несколько упрощается для вырожденных или частично-вырожденных полупроводников. В этом случае, низкочастотная плазма связана либо с электронами зоны проводимости либо с дырками валентной зоны, что полностью соответствует ситуации в топологических изоляторах и Рашбовских полупроводниках, исследуемых в настоящей работе.

Все исследуемые материалы являются узкозонными полупроводниками с высокой концентрацией носителей заряда. По этой причине экранированная плазменная частота и ширина запрещенной зоны сравнимы по величине, что приводит к сложной частотной зависимости диэлектрической функции вблизи фундаментального края поглощения. Именно в этой частотной области располагаются топологически защищенные Дираковские поверхностные состояния. А их практическая функциональность, как известно, предопределяется конкретным спектром объемных электронных состояний и топологическим характером их волновых функций². В связи с этим, остается целый ряд вопросов, связанных с оптическими переходами между объемными электронными состояниями вблизи запрещенной щели, нерешенных даже для уже ставших классическими, диамагнитных 3D топологических изоляторов таких, как Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 ⁸. Недавно открытые и, в зависимости от температуры и состава, парамагнитные, антиферромагнитные или ферромагнитные топологические изоляторы $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$, где $n = 0, 1, 2, \dots$, а также $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ и Рашбовские полупроводники вообще слабо изучены в этом отношении.

Цель и задачи исследования.

Цель данной диссертации заключается в исследовании особенностей диэлектрической функции топологически нетривиальных или топологически перспективных полупроводников Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (где $n = 0, 1, 2, \dots$), MnSb_2Te_4 , $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ ($x=0, 0.05$ и 0.1), в области энергий фотона, охватывающей

ультрафиолетовый, видимый, и инфракрасный (ближний, средний и дальний) диапазон электромагнитных волн. Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующей литературы по теме диссертации, включая теоретические работы;
2. Провести экспериментальные исследования, включая спектроэллипсометрические измерения.
3. Восстановить диэлектрическую функцию и функцию потерь исследованных объектов.
4. В особых случаях провести детальные исследования температурной зависимости экранированной плазменной частоты.

Методы исследований:

- Спектроскопическая эллипсометрия, которая является основным международно-признанным инструментом для определения оптических параметров в широком интервале энергий фотона, в том числе и диэлектрической функции.
- Тестирования различных моделей и нахождение оптимальной модели диэлектрической функции для аккуратного описания эллипсометрических параметров исследуемых материалов.
- Анализ критических точек межзонной плотности состояний для определения вклада оптических переходов в диэлектрическую функцию.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

- Диэлектрическая функция вырожденных или частично вырожденных исследованных топологически нетривиальных полупроводников Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (где $n = 0, 1, 2, \dots$), MnSb_2Te_4 и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ ($x=0, 0.05$ и 0.1) в области энергий фотона от 0.05 эВ до 6.4 эВ, которые формируется непрямыми внутризонными и прямыми межзонными оптическими переходами, а функция потерь в оптическом пределе отвечает возбуждению плазмонов и потерям на межзонное поглощение.

• Аномальная температурная зависимость экранированной плазменной частоты в топологическом антиферромагнетике MnBi_2Te_4 является следствием смешивания электронной плотности двух зон в зоне проводимости и влияния эффекта конечных температур на распределения Ферми-Дирака.

• Смещение максимума мнимой части диэлектрической функции в области межподзонных переходов в зоне проводимости при частичной замене Bi на Sb с изменением состава x твёрдого раствора $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ соответствует изменению величины спинового расщепления Рашбовских состояний при выполнении условия: энергия Рашбы больше энергетического положения уровня Ферми относительно дна зоны проводимости.

Научная новизна исследований.

1. Впервые получены эталонные диэлектрические функции в широком диапазоне энергий фотона (0.05-6.4 эВ) для трёхмерных топологических изоляторов Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (где $n = 0, 1, 2, \dots$), MnSb_2Te_4 , и $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$, а также топологически -перспективных Рашбовских полупроводников BiTeI , $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ и $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$, используя спектроскопическую эллипсометрию, являющуюся глобально-признанным международным стандартом для определения диэлектрической функции материалов.

2. В предположении наличия зоны тяжелых фермионов выше дна зоны проводимости топологического антиферромагнетика MnBi_2Te_4 успешно протестирована модель, ранее не наблюдавшегося в полупроводниках и обнаруженного впервые эффект увеличения экранированной плазменной частоты с понижением температуры.

3. Впервые показано, что обнаруженное количественное несоответствие между результатами анализа фактор-группы и экспериментальными наблюдениями числа колебательных мод, активных в комбинационном (Рамановском) рассеянии $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ с индексом n в диапазоне $1 \leq n \leq 6$ является следствием вырождения колебательных мод с увеличением n

ростом n числа пятислойных атомных пакетов Bi_2Te_3 между семислойными пакетами MnBi_2Te_4 .

4. Показано, что модель Друде в совокупности с осцилляторами Лоренца хорошо описывает эллипсометрические данные в области края плазменного поглощения, полученные при различных углах падения для всех исследованных материалов.

5. Впервые показано, что оптические переходы между Рашба-расщепленными ветвями электронных зон (межподзонные вертикальные переходы) проявляются в виде пиков, вследствие наличия на этих ветвях участков с одинаковой дисперсией. Это открывает прямой путь для определения спинового расщепления методом спектроскопической эллипсометрии.

6. Впервые определены частотная дисперсия и время жизни объёмных плазмонов и поверхностных плазмон-поляритонов в трёхмерных топологических изоляторах Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (для $n = 0, 2$) и $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$.

Теоретическая и практическая значимость исследований.

Теоретическая значимость исследований подчеркивается тем фактом, что целый ряд полученных экспериментальных данных, включая эффекты, ранее не находившиеся в поле зрения физики полупроводников протестированы в диссертации теоретически и найдено удовлетворительное соответствие между результатами этого тестирования и эксперимента.

Практическая значимость исследований связана с огромными ресурсами электронного спектра топологических изоляторов и топологически перспективных Рашбовских полупроводников для применения спинтронике, топотронике, бездиссипативной передаче энергии и квантовом компьютеринге.

Чисто ван дер Ваальсовская межслоевая связь в исследованных материалах обеспечивает одновременно, как существование исключительно топологических электронных

состояний на ван дер Ваальсовской поверхности, так и атомную гладкость самой поверхности. Атомная гладкость рабочей поверхности является пререквизитом для достижения высокой добротности преобразования энергии света в энергию плазмон-поляритона. По этой причине и, в свете результатов, полученных в настоящей работе, свойства исследованных материалов в инфракрасной области спектра могут найти применение в высокоэффективных приборах плазмоники. Более того, знания о дисперсии, глубины проникновения и распространения плазменного возбуждения позволяют установить требования для разработки и создания систем пробирования топологического состояния.

Данные о диэлектрической функции и анализ критических точек, совместно с данными по зонной структуре позволяют произвести точную подстройку электронной зонной структуры, форсировать разработку и дизайн структур с заданными свойствами и топологическим состоянием.

Личный вклад соискателя.

Личный вклад заключается в индивидуальном выполнении оптических измерений, оптическом моделировании и анализе топологических изоляторов. Он активно участвовал в проведении оптических экспериментов, самостоятельно обрабатывал полученные данные с использованием специализированного программного обеспечения и осуществлял комплексный анализ результатов. Подход к анализу основывался на современных концепциях, связывающих структуру и физические процессы в полупроводниках, возникающие при воздействии электромагнитного излучения.

Апробация и применение.

Изложенные в диссертации результаты, обсуждались на международных конференциях International Conference on Ternary and Multinary Compounds ICTMC-21 2018-го года (Colorado, USA, 2018), международной конференции по спектроскопической эллипсометрии International Conference on Spectroscopic Ellipsometry ICSE-8 (Spain, Barselona, 2019),

конференция, посвящённая 90-летию академика М.Н. Shahtakhtinski (Азербайджан, Баку, 2022). Значимые результаты были представлены на конференции International Conference on Spectroscopic Ellipsometry ICSE-9 (China, Beijing, 2022). Представленные материалы вызвали интерес научного сообщества, а по материал конференции в специальных выпусках международных журналов опубликованы статьи, которые получили высокие оценки рецензентов и большое число цитирований.

Название организации, в которой выполнена диссертационная работа.

Диссертация была выполнена в лаборатории “Спектроскопическая эллипсометрия” Института Физики Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики.

Опубликованные работы.

Основные материалы диссертации были опубликованы в 17 публикациях, из них 9 статей (из них 8 в иностранных журналах с импакт-фактором, из них 2 работы в журнале уровня Q1), и 5 тезисов в международных тезисах. Две опубликованные работы без соавторов (из них 1 в рецензируемом иностранном журнале с импакт-фактором). Публикации вызвали интерес в международном научном сообществе, на момент написания диссертации суммарное число цитирований по системе Google Scholar достигло 94 по всем публикациям, а персональный индекс Хирша равен 6.

Объем, структура и основное содержание диссертации.

Диссертация состоит из 10 страниц введения (15462), 15 страниц I главы (20071), 18 страниц II главы (23638), 40 страниц III главы (40463), 35 страниц IV главы (30907), 2 страницы выводов (1569), 2 страниц список условных обозначений и сокращённых слов (1296) и списка литературы (101 источник), а общий объем (156308) составляет 172 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, представлены предмет и объекты исследования, указаны цель и основные задачи исследования, выносимые на защиту научные положения, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также изложено краткое содержание диссертации.

Первая глава «Диэлектрическая функция твёрдого тела и методы её исследования» посвящена отклику электромагнитной волны в твёрдом теле, определению диэлектрической функция и методы её исследования.

Диэлектрическая функция в твёрдом теле описывает взаимодействие электромагнитного поля с электронами и атомами в кристаллической решётке. Она зависит от симметрии кристалла и может быть выражена для изотропного и анизотропного случаев. В разделе представлена и описана диэлектрическая функция в твёрдом теле для изотропного и анизотропного случая в зависимости от симметрии кристалла.

Описан генезис дисперсионных особенностей диэлектрической функции в области оптических переходов. Методы моделирования и построения релевантной оптической модели для извлечения диэлектрической функции. Для моделирования применяются осцилляторные функции. В данной работе в моделях обращались к осциллятору Лоренца и Друде. Осциллятор Лоренца применяется для учёта вклада оптических переходов в диэлектрической функции, а осциллятор Друде для учёта вклада связанного со свободными носителями заряда^{9,10}.

⁹ Fujiwara, H. Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications // West Sussex, John Wiley & Sons Ltd., – 2007. – 388 p.

¹⁰ Tiwald, T. E. Application of IR variable angle spectroscopic ellipsometry to the determination of free carrier concentration depth profiles / D. W. Thompson, J. A. Woollam, W. Paulson, and R. Hance // Thin Solid Films, -1998, -661, -313.

Описаны методы извлечения диэлектрической функции из измерений на основе спектроскопии пропускания и спектроскопии отражения, их преимущества и ограничения.

Подробно описан метод спектроскопической эллипсометрии, особенности и преимущества как самого прямого из всех не прямых методов получения диэлектрической функции. Метод спектроскопической эллипсометрии позволяет извлечь оптические параметры, изучая изменение состояния поляризации света после взаимодействия с образцом. Существует большое разнообразие конфигураций эллипсометров на сегодняшний день. Они делятся на две категории: с вращательными оптическими элементами или с фотоэластичными модуляторами.

Среди эллипсометров с вращающимися оптическими элементами последнее время все актуальнее стала конфигурация RCA (Rotating - Compensator - Analyzer) с вращающимся анализатором и компенсатором. Данная конфигурация позволяет выполнить полный оптический эксперимент, что позволяет извлечь информацию обо всех параметрах стока. В работе использовался RCA спектроскопический эллипсометр J.A. Woollam M2000DI и IR-Vase. Данные эллипсометры позволили произвести измерения в широкой области спектра от 0.05 эВ до 6.4 эВ. Диаметр пробирующего светового пучка в перпендикулярном сечении составлял 250 мкм.

Во второй главе «Топологическое состояние. 2D и 3D топологические изоляторы (ТИ)» описываются топологическое состояние и перечисляются изучаемые топологические изоляторы. Топологический материал математически характеризуется ненулевым топологическим инвариантом. Топологические изоляторы представляют собой новое квантовое состояние материи, которое характеризуется своеобразными краевыми (в трехмерном 3D случае, поверхностными) состояниями, проявляющимися из-за топологического характера объемных волновых функций. Это материалы, которые имеют объемную запрещенную зону, как и

обычные изоляторы, но имеют защищенные проводящие состояния на их краях или поверхности. Немагнитные топологические изоляторы имеют две характерные особенности; обладают устойчивостью к возмущениям и обладают бесщелевым Дираковским спектром (спектром с линейной зависимостью энергии электрона от волнового вектора) краевых состояний. В магнитных топологических изоляторах, в Дираковском спектре краевых состояний открывается магнитная щель.

В главе приведены особенности классификации топологических изоляторов 2D и 3D. Прделан обзор исследуемых в работе 3D топологических изоляторов со структурой тетрадимита Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (где $n = 0, 1, 2, \dots$), $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ ($x=0, 0.05$ и 0.1).

В главе представлены результаты исследования Рамановского рассеяния в $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (где $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$)^{11,12}. Здесь n означает число пятислойных пакетов Bi_2Te_3 , расположенных между семислойными пакетами MnBi_2Te_4 . Вместо ожидаемого в этих материалах роста числа Раман-активных мод из-за увеличения количества атомов в элементарной ячейки с ростом n (за исключением $n = \infty$), было обнаружено, что количество и симметрия мод для соединений с $n=1,2,3,4,5$ и для $n = \infty$ (Bi_2Te_3) одинаковы. Иными словами, $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ представляет собой естественную гетероструктуру с многократно-вырожденным по энергии спектром колебаний активных в Рамановском рассеянии.

Третья глава «Диэлектрическая функция ТИ в области энергий фотона 0.05-0.7 эВ» посвящена изучению оптических параметров, измеренных спектроскопической

¹¹ Amiraslanov, I. R. Crystal structure and Raman-active lattice vibrations of magnetic topological insulators $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ ($n=0, 1, \dots, 6$) / Z. S. Aliev, P. A. Askerova, E. H. Alizade [et al.] // Phys. Rev. B, -2022, -106, -184108

¹² Aliev, Z.S. Spectroscopic Ellipsometry and Raman Spectroscopy of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ Solid Solutions with $x \leq 0.1$ / E.H. Alizade, D.A. Mammadov, J.N. Jalilli [et al.] // Thin Solid Films, - 2023, - 768, -139727

эллипсометрией, в области энергий фотона от 0.05 эВ до 0.7 эВ для трехмерных топологических изоляторов со структурой типа тетрадимит Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (где $n = 0, 2$) и $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ ($x=0, 0.05$ и 0.1).

Обнаружено, что диэлектрическая функция проявляет особенности, характерные для отражения и поглощения света свободными носителями заряда. Присутствие вклада поглощения света плазмой этих носителей или не прямых внутризонных переходов было подтверждено с использованием построенной модели, основанной на осцилляторах Друде и Лоренца (Рис. 1). Квантовые возбуждения этой плазмы (плазмоны), проявляются в виде характерного пика при энергии 0.089 эВ на функции потерь (Рис. 2).

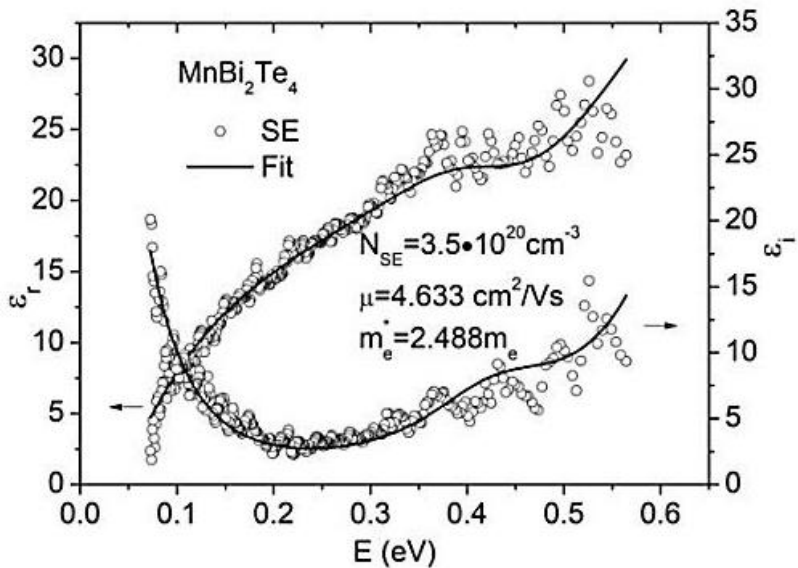


Рисунок 1. Диэлектрическая функция MnBi_2Te_4 полученная из эксперимента и из модели на основе осцилляторов Друде и Лоренца.

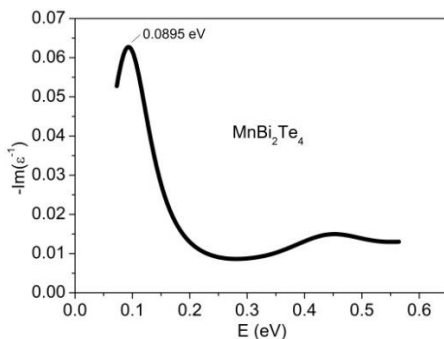


Рисунок 2. Функция потерь MnBi_2Te_4 .

На основе анализа диэлектрической функции в рамках построенной оптической модели были вычислены параметры (концентрация носителей заряда, их эффективная масса и подвижность) исследованных топологических и Рашбовских материалов. Значения этих параметров и экранированной плазменной частоты приведены в таблице 1

Таблица 1
Концентрации носителей заряда, эффективная масса, подвижность и экранированная плазменная частота

Соединение	Пространственная группа	N_{Drude} (cm^{-3})	$m_{e,h}^*$	μ_{Drude} (cm^2/Vs)	ω_p^{scr} (cm^{-1})
n- Bi_2Se_3	$R\bar{3}m$	2.2×10^{19}	0.15	540	689
n- Bi_2Te_3	$R\bar{3}m$	2.5×10^{19}	0.16	513	738
p- Bi_2Te_3	$R\bar{3}m$	1.27×10^{19}	0.162	316	~294
p- Sb_2Te_3	$R\bar{3}m$	8.89×10^{19}	0.152	271	1055
p- Sb_2Te_3	$R\bar{3}m$	1.19×10^{20}	0.189	213	10663
n- MnBi_2Te_4	$R\bar{3}m$	3.5×10^{20}	2.488	4.633	532
n- $\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$	$R\bar{3}m$	1.04×10^{20}	0.111	136	1225
p- $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_6\text{Te}_{10}$	$R\bar{3}m$	4.5×10^{20}	0.368	40	1516
n- BiTeI	$P3m1$	3.29×10^{19}	0.132	285	992
n - $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$	$P3m1$	6.17×10^{19}	0.263	99	975
n- $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$	$P3m1$	2.85×10^{19}	0.128	141	895

С помощью инфракрасной спектроскопии отражения исследованы объемные электронные свойства топологического антиферромагнетика MnBi_2Te_4 с температурой Нееля $T_N \approx 25 \text{ K}$ (Рис. 3). Наблюдалось увеличение экранированной плазменной частоты ω_p^{scr} с уменьшением температуры.

Общепринятое выражение для этой частоты имеет вид¹⁰

$$\omega_p^{scr} = \sqrt{\frac{Ne^2}{m^* \epsilon_0 \epsilon_\infty}} \quad (1)$$

где m^* — эффективная масса носителя, N — концентрация носителей в соответствующей зоне, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ_∞ — оптическая диэлектрическая проницаемость. При изменении температуры параметром, который может внести существенный вклад в значение экранированной плазменной частоты является концентрация носителей N , которая уменьшается с уменьшением температуры, и, согласно выражению (1), приводит к уменьшению ω_p^{scr} . Именно такая ситуация обычно наблюдается в полупроводниках. Поэтому увеличение ω_p^{scr} с понижением температуры является аномальным явлением.

В точке Γ зонной структуры, помимо зоны $CB1$ с эффективной массой $0.12m_e$, существует ещё одна расположенная выше зона $CB2$ с высокой плотностью состояний вследствие большой эффективной массы, порядка $3m_e$ ¹³. Для объяснения аномального температурного поведения ω_p^{scr} тестировались две модели:

- Феноменологическая модель двух осцилляторов Друде, качественно, но, как оказалось, не количественно объясняющая это явление.

- Модель неоднородного Ферми газа, которая позволяет непосредственно связать экранированную плазменную частоту

¹³ Jahangirli, Z., Electronic structure and dielectric function of Mn-Bi-Te layered compounds / E. Alizade, Z. Aliev, M. Otrokov [et al.] // JVST B, -2019, -37(6), -062910.

с параметрами зонной структуры и, как оказалось, аккуратно воспроизвести экспериментальные данные.

Моделирование спектроэллипсометрических измерений с помощью одного осциллятора Друде, дало значение концентрации носителей заряда $N_{Drude} = 3.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ и эффективной массы $m^* = 2.488m_e$. Это экспериментальное значение эффективной массы сильно отличается от ожидаемой величины $0.12m_e$, рассчитанной для электронов нижней зоны проводимости в рамках зонной структуры MnBi_2Te_4 ¹³ и не подтверждает результаты двух-осцилляторного феноменологического подхода, который приводит к эффективной массе меньшей чем $0.5m_e$.

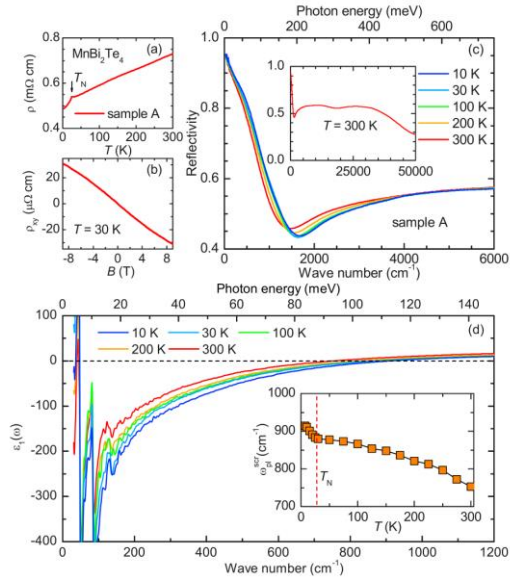


Рисунок 3. (a) Температурная зависимость электросопротивления соединения MnBi_2Te_4 . Стрелкой отмечен антиферромагнитный переход при $T_N \approx 25\text{K}$. (b) Холловское сопротивление ρ_{xy} соединения MnBi_2Te_4 при 30K . (c) температурная зависимость коэффициента отражения в

инфракрасной области, во вставке спектр коэффициента отражения от 30 см^{-1} до $50\,000 \text{ см}^{-1}$ при **300К**. (d) Температурная зависимость действительной части диэлектрической функции $\epsilon_1(\omega)$, во вставке экранированная плазменная частота, полученная при $\epsilon_1(\omega_p^{scr}) = 0$.¹⁴

Модель неоднородного Ферми газа, предполагает связь между экспериментальными данными ($N_{Drude}m^*$) и вкладу в них ($N_{CB1}m_1^*$ и $N_{CB2}m_2^*$) зон CB1 и CB2 в виде:

$$N_{Drude}m^* = N_{CB1}m_1^* + N_{CB2}m_2^* \quad (2)$$

где $m^* = 2.488m_e$, $m_1^* = 0.12m_e$ и $m_2^* = 3m_e$. Уравнение, описывающее неоднородный газ в состоянии термодинамического равновесия при комнатной температуре, и, решенное с использованием итерационной процедуры, приводит к значению 188 мэВ для положения уровня Ферми относительно дна зоны проводимости CB1, значению 46 мэВ для зазора между уровнем Ферми и зоной CB2, и значениям $N_{CB1} = 2.88 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $N_{CB2} = 6.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для эффективной концентрации заряда в зонах CB1 и CB2, соответственно (Рис.4). Найденное значение положения уровня Ферми (188 мэВ) практически совпадает с данными, полученными методом угловой фотоэмиссии электронов при значении концентрации электронов в MnBi_2Te_4 порядка 10^{20} см^{-3} , и равен значению 187 мэВ, а значение для зазора между уровнем Ферми и зоной CB2 составляет 41 мэВ¹⁵ и 46 мэВ в нашем случае (Рис.4). Таким образом, в рамках данного исследования обнаружен сложный и аномально зависящий от температуры многозонный низкоэнергетический отклик.

¹⁴ Bing, Xu. Infrared study of the multiband low-energy excitations of the topological antiferromagnet MnBi_2Te_4 / Y. Zhang, E. H. Alizade, Z. A. Jahangirli [et al.] // Physical Review B, - 2020, -103(12), -L121103

¹⁵ Chen, Y. J. Topological Electronic Structure and Its Temperature Evolution in Antiferromagnetic Topological Insulator MnBi_2Te_4 / L. X. Xu, J. H. Li, Y. W. Li [et al.] // Phys. Rev. X, -2019, -9, -041040

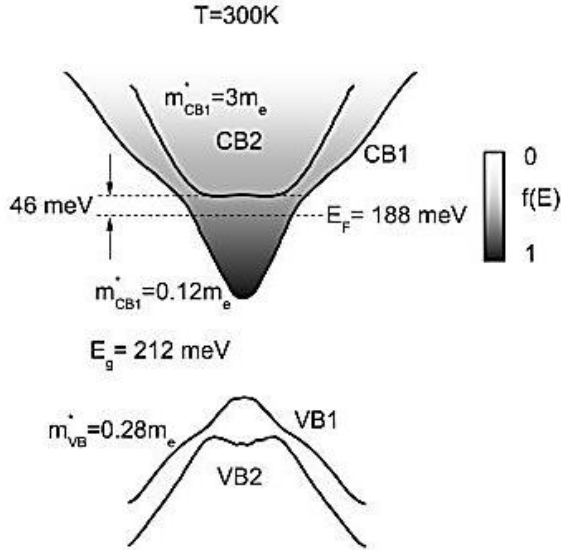


Рисунок 4. Схематическое представление расчетной объемной зонной структуры MnBi_2Te_4 вдоль ΓY и ΓL ¹³

Представлены дисперсии плазмон-поляритонных волн, рассчитанные по экспериментальным данным. В Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , MnBi_2Te_4 , $\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$ и $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ дисперсию объемного плазмон-поляритона и поверхностного плазмон-поляритона определяли по диэлектрической функции. Все эти параметры важны для перспективных приложений этих материалов в плазмонике.

В четвертой главе «Диэлектрическая функция ТИ в области энергий фотона 0.7-6.4 эВ» представлены результаты исследования оптических параметров, измеренных спектроскопической эллипсометрией, в области энергий фотона от 0.7 эВ до 6.4 эВ для трехмерных топологических изоляторов со структурой типа тетрадимит Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (где $n = 0, 1, 2, \dots$) (Рис. 5), MnSb_2Te_4 , $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ и Рашбовских полупроводников $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Te}$ ($x=0, 0.05$ и 0.1).

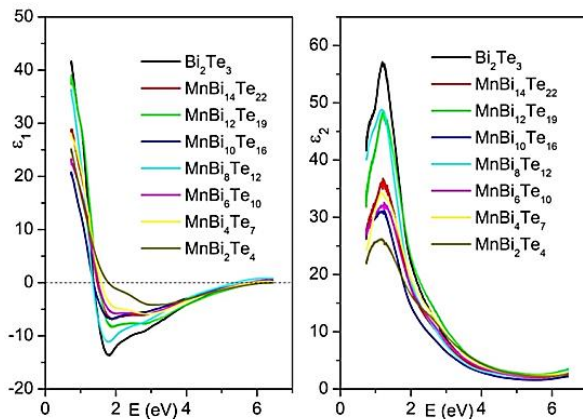


Рисунок 5. Действительная (слева) и мнимая (справа) компоненты диэлектрической функции $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ с $n=0,1,2,3,4,5,6$ и $n=\infty$ (Bi_2Te_3).

Произведённый анализ критических точек доказал утверждение первого научного положения о вкладе межзонных оптических переходов в диэлектрическую функцию (Таблица 2). Диэлектрическая функция и её вторая производная, с ростом числа n встроившихся слоёв Bi_2Te_3 между слоями MnBi_2Te_4 в $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ переходят в Bi_2Te_3 .

Таблица 2
Критические точки межзонной плотности состояний в структурах типа тетрадимит

Соединение	Критическая точка (eV)						
	0.82 2D	0.95 2D	1.26 2D	1.57 2D	2.24 2D		
MnBi_2Te_4	0.82 2D	0.95 2D	1.26 2D	1.57 2D	2.24 2D		
MnBi_4Te_7	0.91 2D	1.24 2D	1.42 2D	1.60 2D	1.80 3D	2.55 2D	
$\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$	0.85 2D	1.18 2D	1.27 2D	1.31 2D	1.53 2D	1.99 2D	2.08 2D
$\text{MnBi}_8\text{Te}_{13}$	0.75 2D	1.11 2D	1.19 2D	1.28 2D	1.40 2D	1.83 3D	
$\text{MnBi}_{10}\text{Te}_{16}$	1.14 2D	1.26 2D	1.44 2D	1.62 2D	1.82 3D		
Bi_2Te_3	0.98 2D	1.09 2D	1.26 2D	1.81 3D			

Приведена зонная структура для Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , MnBi_2Te_4 , рассчитанная из первых принципов, проведено сравнение рассчитанной диэлектрической функции с экспериментально измеренной.

Сравнение диэлектрической функции MnBi_2Te_4 полученной из DFT-расчётов и спектроскопической эллипсометрии показало (Рис. 6), что расчёты с учётом спин-орбитального расщепления дают результаты более близкие к экспериментальным.

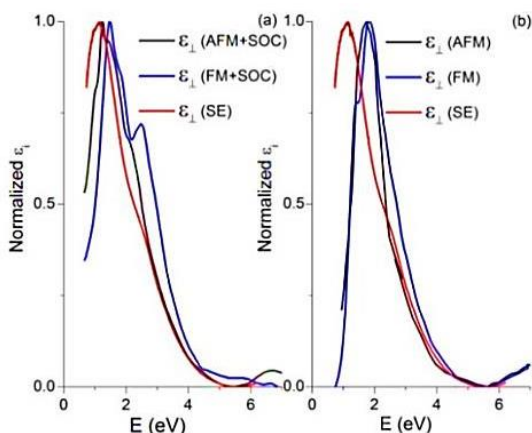


Рисунок 6. Нормализованная экспериментальная и рассчитанная мнимая часть диэлектрической функции MnBi_2Te_4 . Здесь ϵ_{\perp} соответствует ориентации $E \perp C$ электрического вектора (E) света относительно оптической оси (C), SOC – с учётом спин-орбитального взаимодействия, AFM – антиферромагнитная фаза, FM – ферромагнитная фаза, SE – полученная из эллипсометрии диэлектрическая функция.

Согласно результатам расчета зонной структуры Bi_2Se_3 и Sb_2Te_3 , Bi_2Te_3 ⁸, вклад более чем одной долины в плазму квазисвободных электронов в $n\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ возможен только при очень сильном вырождении с уровнем Ферми порядка 600 мэВ над дном зоны проводимости, что сильно превышает достигнутое значение положения этого уровня в исследованных образцах $n\text{-Bi}_2\text{Se}_3$. Совсем другая ситуация характерна для p -

Sb_2Te_3 и p- Bi_2Te_3 , в которых даже очень слабое вырождение должно приводить к смешению вкладов носителей сразу от нескольких долин валентной зоны в дырочную плазму. Это означает, что эффективная масса дырок, определенная из выражения (1), не будет отражать таковую в случае одной долины и с ростом концентрации носителей значение эффективной массы, которое соответствует экранированной плазменной частоте может сильно изменяться. В тоже время, с ростом концентрации носителей может происходить перенормировка зон, что также должна приводить к изменению эффективной массы. Однако, выявление и разделение этих двух эффектов с увеличением уровня вырождения выходит за рамки настоящей работы и требует дополнительных исследований.

Исследована диэлектрическая функция кристаллов BiTeI , $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ и $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$. Общепринятая модель расположения зон и оптических переходов (кроме внутризонных) BiTeI представлена на рисунке 7⁵. Качественно эта модель сохраняется для $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ и $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$ ¹⁶.

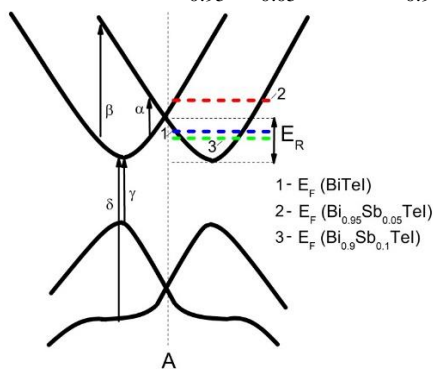


Рисунок 7. Оптические переходы в зонной структуре BiTeI . Пунктирные линии синего, красного и зеленого цветов показывают положение уровня Ферми в BiTeI , $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ и $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$ соответственно

¹⁶ Aliev, Z.S. Spectroscopic Ellipsometry and Raman Spectroscopy of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ Solid Solutions with $x \leq 0.1$ / E.H. Alizade, D.A. Mammadov, J.N. Jalilli [et al.] // Thin Solid Films, - 2023, - 768, - 139727

Для концентрации носителей заряда менее $4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ уровень Ферми (E_F) в BiTeI ($3.3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, таблица 1) расположен ниже энергии Рашбы E_R , как показано на рисунка 7 (линия 1 на рисунке 7). Для более высоких концентраций, как в случае $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ ($6.25 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, таблица 1), он расположен выше энергии E_R (линия 2 на рисунке 7). Для $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$ с концентрацией $2.85 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (таблица 1) он ниже E_R (линия 3 на рисунке 7).

Энергия α - или β -переходов определяется величиной E_R . Они возникают между одними и теми же Рашба расщепленными ветвями зоны проводимости и отличаются друг от друга только разной дисперсией вовлеченных электронных состояний.

В мнимой части (Рис. 8) диэлектрической функции, уточненной по вкладу Друде (т. е. при вычете внутрizonных переходов), они проявляются в виде широкого пика в диапазоне энергий фотонов от 0.1 до 0.4 эВ с центрами около 0.225, 0.227 и 0.211 эВ для BiTeI , $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ и $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$ соответственно.

Поскольку уровень Ферми в $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ заметно выше энергии E_R , межподзональные переходы будут преимущественно β -типа, а не α -типа. Поэтому положение пика в $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ слегка сдвинуто в сторону больших энергий и адекватными для

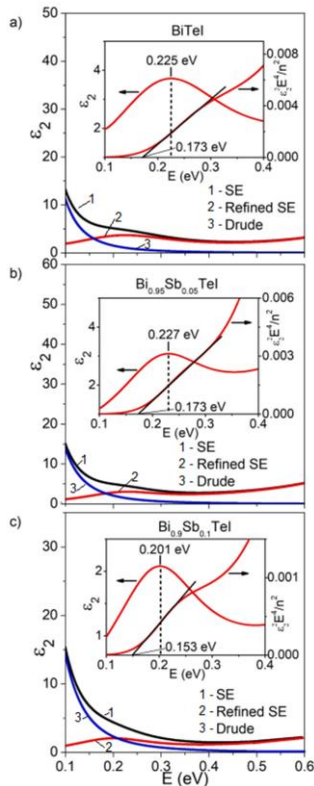


Рисунок 8. Мнимая часть диэлектрической функции (1), уточненная по вкладу Друде мнимая часть диэлектрической функции (2) и вклад Друде (3)

сравнения спинового расщепления являются только BiTeI и $\text{Bi}_{0,9}\text{Sb}_{0,1}\text{TeI}$, для которых уровень Ферми меньше энергии E_R .

Вставки на рисунке 6 иллюстрируют тот факт, что зависимость от энергии фотона $[(\epsilon_2)^2 E^4]/n^2 \sim \alpha^2 E^2 \sim E - E_0$ для прямых разрешенных индекс точно следует линейному закону с E_0 , равным 0.173 и 0.153 эВ для BiTeI , $\text{Bi}_{0,95}\text{Sb}_{0,05}\text{TeI}$ и $\text{Bi}_{0,9}\text{Sb}_{0,1}\text{TeI}$ соответственно. Другими словами, начало межподзонных переходов в $\text{Bi}_{0,9}\text{Sb}_{0,1}\text{TeI}$ меньше на 20 мэВ по сравнению с BiTeI . Это ожидаемый результат, поскольку Sb легче Bi и должен вызывать меньшее спиновое расщепление, а значит, энергия Рашбы также уменьшается на 20 мэВ.

ВЫВОДЫ

1. Получены эллипсометрические параметры образцов узкозонных частично вырожденных полупроводников Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , MnBi_2Te_4 , $\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$, $\text{MnSb}_{1,5}\text{Bi}_{0,5}\text{Te}_4$ и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ в инфракрасном диапазоне спектра электромагнитных волн $\sim 400 - 5600 \text{ см}^{-1}$. [2,4,9,12,13,16]
2. Построена оптическая модель для Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , MnBi_2Te_4 , $\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$, $\text{MnSb}_{1,5}\text{Bi}_{0,5}\text{Te}_4$ и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$, которая в рамках осциллятора Друде с высокой точностью описывает эллипсометрические параметры. [2,4,9,12,13,16]
3. Восстановлена диэлектрическая функция для Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , MnBi_2Te_4 , $\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$, $\text{MnSb}_{1,5}\text{Bi}_{0,5}\text{Te}_4$ и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ и определены подвижность и транспортная эффективная масса носителей заряда. [1-17]
4. Показана, что точность значений концентрации носителей заряда, определённых из измерений эффекта Холла может быть улучшена путём оптимизации эллипсометрических данных в области поглощения на свободных носителях. [2,9,12,14,16]
5. Определены параметры внутризонных и межзонных переходов в MnBi_2Te_4 . Оценена ширина объемной запрещенной зоны 0.212 эВ при комнатной температуре,

которая близка к теоретическому значению 0.200 эВ этой величины. [7,8]

6. Обнаружено наличие двух подзон зоны проводимости в антиферромагнитном MnBi_2Te_4 с сильно различающимися эффективными массами $0.12m_e$ и $3m_e$, и связанная с этим аномальная температурная зависимость экранированной плазменной частоты. Построена теоретическая модель этой зависимости. [7,8]
7. Получены спектроэллипсометрические параметры гексагональных твердых растворов BiTeI и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ с $x = 0.05$ и 0.1 . Показано, что смещение максимума мнимой части диэлектрической функции в области межподзонных переходов в зоне проводимости при частичной замене Bi на Sb с изменением состава x твёрдого раствора $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ связано с уменьшением величины спин-орбитального взаимодействия при замене Bi на более лёгкий Sb. [2,3]

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В РАБОТАХ

1. Abdullaev, N.A., Lattice Dynamics of Bi_2Te_3 and Vibrational Modes in Raman Scattering of Topological Insulators $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ / I.R. Amiraslanov, Z.S. Aliev, Z.A. Jahangirli [et al.] // *Jetp Lett.* – 2022, - 115, - 749–756
2. Aliev, Z.S. Spectroscopic Ellipsometry and Raman Spectroscopy of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ Solid Solutions with $x \leq 0.1$ / E.H. Alizade, S.S. Ragimov, N.A. Abdulayev, N.T. Mamedov // *ICSE-9 Abstract Book*, - 2022, - Beijing, - 194
3. Aliev, Z.S. Spectroscopic Ellipsometry and Raman Spectroscopy of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ Solid Solutions with $x \leq 0.1$ / E.H. Alizade, D.A. Mammadov, J.N. Jalilli [et al.] // *Thin Solid Films*, - 2023, - 768, -139727
4. Alizade, E. Surface plasmon polariton observation at narrow-gap semiconductor Bi_2Se_3 and Sb_2Te_3 // *AJP FIZIKA*, - XXVII (2), -38-40, 2021
5. Alizade, E.H. Electronic structure and dielectric function of Mn-Bi-Te layered compounds / S.N. Mammadov, Z.A. Jahangirli, M.M. Otrokov [et al.] // *ICSE-8 Abstract Book*, - Barselona, -2019, - 188
6. Amiraslanov, I.R. Crystal structure and raman active lattice vibrations of magnetic topological insulators $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ ($n = 0, 1, \dots, 6$) / Z. S. Aliev, P.A. Askerova, [et al.] // *Phys. Rev. B*, - 2022, - 106 (18), - 184108
7. Bing, Xu. Infrared study of the multiband low-energy excitations of the topological antiferromagnet MnBi_2Te_4 / Y. Zhang, E. H. Alizade, Z. A. Jahangirli [et al.] // *Physical Review B*, - 2020, -103(12), -L121103
8. Jahangirli, Z., Electronic structure and dielectric function of Mn-Bi-Te layered compounds / E. Alizade, Z. Aliev, M. Otrokov [et al.] // *JVST B*, -2019, -37(6), -062910.
9. Mamedov, N. Infrared spectroscopic ellipsometry and optical spectroscopy of plasmons in classic 3d topological insulators /

- E. Alizade, Z. Jahangirli, Z. Aliev [et al.] // JVST B, - 2019, - 37(6), - 062602.
10. Mamedov, N. Ternary compounds of Mn-Bi-Te family: electronic structure, optical properties and prospective application / Z. Jahangirli, I.R. Amiraslanov, Z.S. Aliyev, [et al.] // ITMC-21 Abstract Book, - 2018, -60
 11. Mamedov, N.T. Spectroscopic Ellipsometry and Ab-Initio Studies of MnBi_2Te_4 and $\text{MnBi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_4$: Dielectric Function and Free Carrier Plasma Edge / E.H. Alizade, Z.A. Jahangirli, Z.S. Aliev [et al.] // ICSE-9 Abstract Book, - 2022, - Beijing, - 194
 12. Mamedov, N.T. Infrared spectroscopic ellipsometry and optical spectroscopy of plasmons in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , and Sb_2Te_3 / E.H. Alizade, Z.S. Aliev, S.N. Mammadov [et al.] // ICSE-8 Abstract Book, - Barselona, - 2019, - 229
 13. Mamedov, N.T. Plasmons and interband optical transitions in BiTeI semiconductor / Z.S. Aliev, E.H. Alizade, S.N. Mammadov [et al.] // ICSE-8 Abstract Book, - Barselona, - 2019, -187
 14. Mamedov, N.T. Spectroscopic ellipsometry and free carrier plasma edge: topological insulator case / E.H. Alizade, Z.S. Aliev [et al.] // Proceedings of the 7th international conference MTP-2021: Modern trends in Physics Abstract Book, - 2021, -1, -Baku, -23-30 .
 15. Абдуллаев, Н. А. Динамика решетки Bi_2Te_3 и колебательные моды в рамановском рассеянии топологических изоляторов $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ / И. Р. Амирасланов, З. С. Алиев, З. А. Джахангирли [et al.] // Письма в ЖЭТФ, - 2022, -115(12), - 801-808
 16. Ализадэ, Э.Г. Исследование плазмонного резонанса в Bi_2Se_3 и Sb_2Te_3 методом инфракрасной спектральной эллипсометрии // Оптика и спектроскопия, - 2022, - 130, -2, -249-253
 17. Alizade, E. Plasmonic behaviors of $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ in ultraviolet (UV) ranges // AJP FIZIKA, - M.H. Shahtakhtinski, - 25-26, 2022

Защита диссертации состоится 21 октября 2024 г. в 9³⁰ часов на заседании Диссертационного Совета ED 1.14 действующий на базе Института Физики Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики.

Адрес: AZ1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г.Джавида, 131, Института Физики Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Физики Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Института Физики Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики

Автореферат разослан по соответствующим адресам 18 Октября 2024 года.

Подписано в печать: 17.01.2024

Формат бумаги: А5

Объем: 36493

Тираж: 70