

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

TETRADİMİT STRUKTURLU 3D TOPOLOJİ İZOLYATORLARDA AŞAĞITEZLİKLİ PLAZMA HƏYƏCANLANMALARİ VƏ ZONALARARASI OPTİK KEÇİDLƏR

İxtisas: 2220.01 – Yarımkəçiricilər fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Elvin Hüseynağa oğlu Əlizadə**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2024

Dissertasiya işi Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: akademik
Nazim Timur oğlu Məmmədov

Rəsmi opponetlər: AMEA-nın müxbir üzvü, Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, dosent
Namiq Sərdar oğlu Cəlilov

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,
professor,
Tariyel Hümbət oğlu İsmayılov

fizika üzrə fəlsəfə doktoru,
Behbud Hüseyn oğlu İbrahimov

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının, Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 nömrəli Dissertasiya şurası.

Dissertasiya şurasının sədri: akademik
Arif Məmməd oğlu Həşimov

Dissertasiya şurasının elmi katibi: fizika elmləri doktoru, dosent
Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva

Elmi seminarın sədri: fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, dosent
Tələt Rzaqulu oğlu Mehdiyev



İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

İşin aktuallığı və mövzunun işlənmə dərəcəsi.

Müasir yarımkeçiricilər fizikasının ən aktual problemlərindən biri də Dresselhaus və Raşba tipli¹ güclü spin-orbit qarşılıqlı təsirinə malik qeyri-maqnit və maqnit yarımkeçiricilər kimi kvant materiallarında, o cümlədən topoloji izolyatorlar², səthin və həcmnin elektron hallarının xarici elektromaqnit sahəsinə cavabın öyrənilməsidir.

Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 və Sb_2Te_3 kimi tetrademit strukturlu ikili yarımkeçiricilər spin-holl effektinin həyata keçirildiyi qeyri-maqnit 3D topoloji izolyatorlardır³. Üçlü maqnit yarımkeçiricilər $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$, eləcə də $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ kimi tetrademit strukturlu 3D maqnit topoloji izolyatorlardır və artıq anomal kvant spin effekti göstərir⁴.

İtkisiz enerjini nəqli (və ya məlumatın) həyata keçirilməsi üçün hər iki halda yarımkeçiricinin səthi elektronlarının səpələmədən, məcburi topoloji mühafizəsi ilə yanaşı, qeyri-maqnit topoloji izolyatorlarda zamanın dövrüyəsinə görə simmetriya ilə təmin edilir və maqnit topoloji izolyatorlarda onun pozulması halında həmin simmetriya ilə birlikdə güclü spin-orbit qarşılıqlı təsirin (SOI) və qadağan olunmuş zonanın inversiyasının olması zəruri amildir.

Üçlü yarımkeçirici BiTeI və quruluşu tetrademitdən bir qədər fərqli olan, lakin oxşar atom tərkibli və Raşba tipli spin parçalanma⁵

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.

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.

ilə BiTeI-SbTeI bərk məhlulları təzyiç altında topoloji fazanın həyata keçirilməsi üçün perspektivli⁶ və həm də böyük praktik maraq doğuran⁷ materiallardır.

Materialın elektronlarının xarici elektromaqnit sahəsinə reaksiyası Maksvell tənliyi ilə verilir ki, bu da dielektrik funksiya adlanan mütənasiblik əmsali vasitəsilə materialda yaranan sahəni xarici sahə ilə əlaqələndirir. Dielektrik funksiyanın elektronların xarici elektromaqnit sahəsinə reaksiyasına bütün kvant keçidlərinin ümumi töhfəsini əks etdirən mürəkkəb ikinci dərəcəli tenzordur⁸ və materialın spesifik elektron zona strukturu daxilində mümkün olan bütün zonalararası, daxili zonalararası və zonadaxili keçidləri əhatə edir.

İlk iki növ keçidlər elektron dalğa vektorunu dəyişdirmədən baş verir, onlar düz olan zonalararası və ya daxili zonalararası sıxlığı ilə müəyyən edilir və materialın xüsusi elektron zona strukturun səviyyələrinə mütənasibdir.

Üçüncü növ keçidlər dalğa vektorun dəyişməsi ilə baş verir, dolayı xarakter daşıyır və elektromaqnit dalğa enerjisinin sərbəst yük daşıyıcılar tərəfindən udulması ilə bağlıdır. Belə udulmanın baş verdiyi foton tezliyinə ekranlaşdırılmış plazma tezliyi deyilir. Dielektrik funksiyanın real hissəsinin sıfır dəyərinə uyğundur. Bu tezlikdən başlayaraq, dielektrik funksiyanın xəyali hissəsi, sərbəst yük daşıyıcıların işığın udulması faktını əks etdirən tezliyin azalması ilə kəskin şəkildə artır. Sərbəst yük daşıyıcı plazmanın həyəcanlanması plazmonların həyəcanlanması ilə xarakterizə olunduğunu vurğulamaq vacibdir. Bose statistikasına tabe olan və mənfə işarə ilə götürülmüş tərs dielektrik funksiyanın xəyali hissəsinin spektrində pik kimi özünü göstərən

⁶ Ereameev, 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.

⁸Mamedov, 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.

kvazirəciklər.

Ümumiyyətlə, işığın yük daşıyıcılarının plazması tərəfindən udulması və plazmonların spektri materialın zona quruluşu ilə mürəkkəb şəkildə bağlıdır.

Yarımkeçiricilərdə iki növ plazmon var: yüksək tezlikli və aşağı tezlikli. Birincisi, qadağan olunmuş zona ilə müqayisədə böyükdür, valent elektronların yük sıxlığında dalğalanmalardan qaynaqlanır. Aşağı tezlikli plazmonlar kvazi-sərbəst keçirici elektronlar və valentlik zonadakı dəşiklərlə əlaqələndirilir.

Məxsusi yarımkeçiricilərdə aşağı tezlikli plazma çoxkomponentli ola bilər, yəni yük işarəsi (elektronlar və dəşiklər), effektiv kütlə, zona və ya vadi sayı (çox zonalı və ya çox vadili yarımkeçiricilər) ilə fərqlənən müxtəlif növ yük daşıyıcılarından ibarət ola bilər. Bu, əlavə modaların yaranmasına səbəb olur və daxili yarımkeçiricilərin elektron dəşik plazmasında plazmonların iki qolu var. Onlardan birində elektronlar və dəşiklər antifazada hərəkət edir. Digərində isə aşağı tezlikdə elektronlar və dəşiklər eyni fazada hərəkət edir və dispersiya qanunu akustik xarakter daşıyır (akustik plazmon).

Cırılşmaya uğramış və ya qismən cırılşmaya uğramış yarımkeçiricilər üçün vəziyyət bir qədər sadələşdirilmişdir. Bu zaman aşağı tezlikli plazma ya keçiricilik zonanın elektronları, ya da valent zonanın dəşikləri ilə əlaqələndirilir ki, bu da bu işdə tədqiq olunan topoloji izolyatorlar və Raşba yarımkeçiricilərindəki vəziyyətə tam uyğun gəlir.

Tədqiq olunan bütün materiallar yük daşıyıcılarının yüksək konsentrasiyası olan dar zonalı yarımkeçiricilərdir. Bu səbəbdən, qorunan plazma tezliyi və qadağan olunmuş zona böyüklükdə müqayisə edilə bilər, bu da əsas udma kənarına yaxın dielektrik funksiyanın mürəkkəb tezlik asılılığına səbəb olur. Məhz bu tezlik oblastında topoloji cəhətdən qorunan Dirak səthi halları yerləşir. Və onların praktiki funksionallığı, məlum olduğu kimi, toplu elektron səviyyələrin xüsusi spektri və dalğa funksiyalarının topoloji təbiəti ilə əvvəlcədən müəyyən edilir². Bununla əlaqədar olaraq, qadağan edilmiş boşluğa yaxın olan həcmi elektron səviyyələr arasında optik keçidlərlə bağlı bir sıra

suallar qalır, hətta Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 və Sb_2Te_3 kimi artıq klassik, diamaqnit 3D topoloji izolyatorlar üçün də həll edilməmişdir⁸. Bu yaxınlarda kəşf edilmiş və temperaturdan və tərkibindən asılı olaraq paramaqnit, antiferromaqnit və ya ferromaqnit topoloji izolyatorları $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$, burada $n = 0, 1, 2, \dots$, həmçinin $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ və Raşba yarımkeçiriciləri ümumiyyətlə zəif araşdırılmışdır.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri.

Bu dissertasiyanın məqsədi Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (burada $n = 0, 1, 2, \dots$), MnSb_2Te_4 , $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ və $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ ($x = 0, 0.05$ və 0.1) kimi topoloji cəhətdən qeyri-trivial və ya topologiya baxımdan perpektiv yarımkeçiricilərin elektromaqnit dalğalarının ultrabənövşəyi, görünən, infraqırmızı, yaxın infraqırmızı, orta infraqırmızı və uzaq infraqırmızı poton enerji spektrlərini əhatə edən optik xassələrini öyrənməkdir.

Bu məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı vəzifələri həll etmək lazım idi:

1. Dissertasiyanın mövzusu üzrə mövcud ədəbiyyatın, o cümlədən nəzəri əsərlərin təhlilini aparmaq;
2. Təcrübə tədqiqatlar, o cümlədən spektroellipsometrik ölçmələrin aparılması.
3. Öyrənilən obyektlərin dielektrik funksiyasını və itki funksiyasını bərpa etmək.
4. Xüsusi hallarda, ekranlaşmış plazma tezliyinin temperaturdan asılılığının ətraflı tədqiqatlarının aparılması.

Tədqiqat metodları:

- Spektroskopik ellipsometriya, dielektrik funksiyası da daxil olmaqla, geniş foton enerjilərində optik parametrləri təyin etmək üçün beynəlxalq səviyyədə йэигд щдгтькю əsas alətdir.
- Tədqiq olunan materialların ellipsometrik parametrlərinin dəqiq təsviri üçün müxtəlif modellərin sınaqdan keçirilməsi və optimal dielektrik funksiya modelinin tapılması.
- Optik keçidlərin dielektrik funksiyaya töhfəsini müəyyən etmək üçün zonalararası hal sıxlığının kritik nöqtələrinin təhlili.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar.

• Cırlaşmış və ya qismən cırlaşmış tədqiq edilən topoloji qeyri-trivial yarımkeçiricilərinin Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (burda $n = 0, 1, 2, \dots$), MnSb_2Te_4 , $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ və $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ ($x=0, 0.05$ və 0.1) dielektrik funksiyası, 0.05 - 6.4 eV-luq foton enerji diapazonunda çəp zonadaxili və düz zonalarası optik keçidlər hesabına formalaşır və optik həddə itki funksiyası yük daşıyıcıların plazma həyəcanlanmasına və zonalarası udma nəticəsində itkilərə uyğundur.

• MnBi_2Te_4 topoloji antiferromaqnitində ekranlaşmış plazma tezliyinin anomal temperaturdan asılılığı, keçiricilik zonada iki zonanın elektron sıxlığının qarışdırılmasının və Fermi-Dirak paylanmalarına temperatur effektinin təsirinin nəticəsidir.

• Raşba enerjisi aşağı keçiricilik zonalарına nisbətən Fermi səviyyəsinin enerji mövqeyindən böyük olduğunda, $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ bərk məhlulunun x tərkibinin dəyişməsi ilə Bi-un qismən Sb ilə əvəzlənməsi ilə keçiricilik zonada subzonaarası keçidlər bölgəsində dielektrik funksiyanın xəyali hissəsinin maksimumunun yerdəyişməsi Raşba spin parçalanmasının dəyərindəki dəyişikliyə uyğundur.

Tədqiqatın elmi yeniliyi.

1. Dünya səviyyədə dielektrik funksiyasını alınmasına tanınmış beynəlxalq standart olan spektroskopik ellipsometriyadan istifadə edərək, ilk dəfə Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ (burda $n = 0, 1, 2, \dots$), MnSb_2Te_4 və $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$, eləcə də , topoloji perspektivli Rashbov yarımkeçiriciləri BiTeI , $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ və $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$ üçölçülü topoloji izolyatorlar materialların foton enerjilərinin geniş diapazonunda (0.05 - 6.4 eV) dielektrik funksiyalar alınmışdır.

2. MnBi_2Te_4 topoloji antiferromaqnitinin keçiricilik zonanın dibindən yuxarı yerləşən ağır fermionlar zonanın olmasını fərz əsasında, yarımkeçiricilərdə əvvəllər müşahidə olunmayan və ilk dəfə aşkar edilmiş temperaturun azalması ilə ekranlaşdırılmış plazma tezliyində artımın müşahidə olunduğu model uğurla sınaqdan keçirildi.

3. İlk dəfə olaraq göstərilir ki $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ indeksi n $1 \leq n \leq 6$ diapazonunda, faktor qrupu analizinin nəticələri ilə və Raman səpələnməsində aktiv vibrasiya modlarının sayının təcrübi müşahidələrinin nəticələri arasında aşkar edilmiş kəmiyyət uyğunsuzluğu, yeddi qatlı MnBi_2Te_4 paketləri arasında beş qatlı Bi_2Te_3 atom paketlərinin sayının artması ilə vibrasiya modların cırlaşma ilə əlaqələndirilir.

4. Göstərilmişdir ki, sadə Drude modeli Lorentz osilatorları ilə kombinasiyada tədqiq edilən bütün materiallar üçün müxtəlif düşmə bucaqlarında alınan plazma udma kənarı oblastnda ellipsometrik ölçmələri yaxşı təsvir edir.

5. İlk dəfə göstərilmişdir ki, elektron zonaların Raşba-parçalanmış budaqları arasında optik keçidlər (daxili zonalararası düz keçidlər) pik şəklində görünür. Həmin budaqlarda eyni dispersiyaya malik sahələrin olması səbəbindən baş verir. Bu, spektroskopik ellipsometriyadan istifadə edərək spin parçalanmasını təyin etmək üçün birbaşa yol açır.

6. Aşkar edilmişdir ki, infraqırmızı spektr oblastında tədqiqat obyektləri plazmonika materiallarının xassələrini nümayiş etdirir. Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ ($n = 0, 2$ üçün) və $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ üçölçülü topoloji izolyatorlarda həcmi və səthi plazmon polaritonlarının dispersiyaları alınmışdır.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti.

Tədqiqatın nəzəri əhəmiyyəti ondan ibarətdir ki, əldə edilmiş bir sıra təcrübələr, o cümlədən əvvəllər yarımkeçiricilər fizikasının baxış sahəsində olmayan effektlər dissertasiya işində nəzəri sınaqdan keçirilmiş və əldə edilmiş nəticələr arasında qənaətbəxş razılıq əldə edilmişdir. Tədqiqatın praktiki əhəmiyyəti topoloji izolyatorların elektron spektrinin və spintronika, topotronika, səpələnməsiz enerji ötürülməsi və kvant hesablamalarında istifadə üçün topoloji perspektivli Rashba yarımkeçiricilərinin böyük resursları ilə bağlıdır.

Tədqiq olunan materiallarda təmiz van der Waals təbəqələrarası birləşmə eyni zamanda həm sırf topoloji səth elektron hallarının mövcudluğunu, həm də səthin atomik hamarlığını təmin edir. İşçi səthin atom hamarlığı işıq enerjisini

plazmon-polyariton enerjisinə çevirmək üçün yüksək keyfiyyət amilinə nail olmaq üçün ilkin şərtidir. Bu səbəbdən və spektrin infraqırmızı bölgəsində bu işdə əldə edilən nəticələr işığında, tədqiq olunan materialların xüsusiyyətləri effektiv plazmonik cihazlarda tətbiq tapa bilər. Dispersiya, nüfuz dərinliyi və plazma həyəcanlanmasının yayılması haqqında biliklər topoloji vəziyyətin araşdırılması sistemlərinin inkişafı və yaradılması üçün tələbləri müəyyən etməyə imkan verir.

Dielektrik funksiyası və kritik nöqtələrin təhlili haqqında məlumatlar, zona strukturu haqqında məlumatlar ilə birlikdə, zon strukturunu dəqiq tənzimləməyə, müəyyən edilmiş xüsusiyyətlərə və topoloji hala malik strukturların işlənməsini və layihələndirilməsini sürətləndirməyə imkan verir.

İddiaçının şəxsi töhfəsi.

Şəxsi töhfə optik ölçmələrin fərdi icrasından, optik modelləşdirmədən və topoloji izolyatorların təhlilindən ibarətdir. O, optik təcrübələrdə fəal iştirak edib, xüsusi proqram təminatından istifadə etməklə əldə edilən məlumatları müstəqil şəkildə emal edib və nəticələrin hərtərəfli təhlilini həyata keçirib. Təhlil yanaşması yarımkeçiricilərdə struktur və fiziki prosesləri birləşdirən müasir konsepsiyalara əsaslanırdı.

Aprobasiyası və tətbiqi.

Dissertasiyada təqdim olunan nəticələr beynəlxalq konfranslarda aprobasiya olunub: “International Conference on Ternary and Multinary Compounds” ICTMC-21 (Kolorado, ABŞ, 2018), “International Conference on Spectroscopic Ellipsometry” ICSE-8 spektroskopik ellipsometriya Beynəlxalq konfransı (İspaniya, Barselona, 2019) və “akademik M.H. Shahtakhtinski-nin 90 illik yubileyinə həsr olunmuş konfrans” (Azərbaycan, Bakı, 2022). Əhəmiyyətli nəticələr “International Conference on Spectroscopic Ellipsometry” ICSE-9 konfransında (Çin, Barselona, 2022) təqdim edilmişdir. Təqdim olunan materiallar elmi ictimaiyyətdə ciddi maraq doğurmuş, konfransın materiallarına əsasən beynəlxalq jurnalların xüsusi buraxılışlarında rəyçilərdən yüksək qiymət almış və çoxlu sitatlar verilmiş məqalələr dərc edilmişdir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı.

Dissertasiya işi Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunun “Spektroskopik ellipsometriya” laboratoriyasında aparılmışdır.

Nəşr olunmuş əsərlər.

Dissertasiyanın əsas materialları 17 nəşrdə, onlardan 11 məqalə (8-i impakt faktorlu xarici jurnallarda, 2-si isə Q1 səviyyəli jurnalda olmaqla) və 5 tezis beynəlxalq konfranslarda dərc edilmişdir. Həmmüəllifsiz çap olunmuş iki əsər (1-i impakt faktorlu resenziyalı xarici jurnalda olmaqla). Nəşrlər beynəlxalq elmi ictimaiyyətdə ciddi maraq doğurmuş, dissertasiyanın yazıldığı vaxt “Google Scholar” sistemində bütün nəşrlər üzrə sitatların ümumi sayı 100-a çatmış, şəxsi H indeksi isə 6 olmuşdur.

Dissertasiyanın strukturu və həcmi.

Dissertasiya işi giriş 10 səhifə (15462), I fəsil 15 səhifə (20071), II fəsil 18 səhifə (23638), III fəsildən 40 səhifə (40463), IV fəsil 35 səhifə (30907), nəticələr 2 səhifə (1569), qısaldılmış adlar və şərti işarələr (1296) və bibliografiyadan (101 mənbə olmaqla), ümumi həcmi (156308) 170 səhifədən ibarətdir.

İŞİN QISA MƏZMUNU

Girişdə mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, dissertasiyanın mövzusu və tədqiqat obyektləri təqdim edilmiş, tədqiqatın məqsədi və həlli nəzərdə tutulan əsas vəzifələr, müdafiəyə təqdim edilmiş elmi müddəalar, elmi yeniliyi və praktiki əhəmiyyəti göstərilmiş, dissertasiyanın qısa məzmunu izah edilmişdir.

“Bərk cismin dielektrik funksiyası və onun tədqiqi üsulları” adlı **birinci fəsil** bərk cisimdə elektromaqnit dalğasının reaksiyasına, dielektrik funksiyasının tərifinə və onun öyrənilməsi üsullarına həsr edilmişdir.

Bərk cismin dielektrik funksiyası elektromaqnit sahəsinin kristal qəfəsdəki elektronlar və atomlarla qarşılıqlı təsirini təsvir

edir. Bu, kristalın simmetriyasından asılıdır və izotrop və anizotrop hallar üçün ifadə edilə bilər. Bölmə kristalın simmetriyasından asılı olaraq izotrop və anizotrop hal üçün bərk cisimdə dielektrik funksiyasını təqdim edir və təsvir edir.

Optik keçidlər bölməsində dielektrik funksiyasının dispersiya xüsusiyyətlərinin genezisi təsvir edilmiş, dielektrik funksiyasının çıxarılması üçün müvafiq optik modelin qurulması üsulları əks olunmuşdur. Modelləşdirmə üçün ossilyator funksiyalarından istifadə olunur. Tədqiqatda modelləşdirmə üçün Lorentz və Drude ossilyatorlarından istifadə olunub. Dielektrik funksiyasında optik keçidlərin töhfəsini nəzərə almaq üçün Lorentz ossilyatorundan, sərbəst yük daşıyıcıları ilə əlaqəli töhfəsini nəzərə almaq üçün isə Drude ossilyatorundan istifadə olunur^{9,10}.

Buraxılma spektroskopiyası və əks olunma spektroskopiyadı əsasında olan ölçmələrdən dielektrik funksiyanın alınması üsulları, onların üstünlükləri və məhdudiyyətləri təqdim edilmişdir.

Spektroskopik ellipsometriya üsulunun, dielektrik funksiyanı əldə etmək üçün bütün dolayı üsullardan ən birbaşası kimi xüsusiyyətləri və üstünlükləri ətraflı təqdim edilmişdir. Spektroskopik ellipsometriya üsulu işığın nümunə ilə qarşılıqlı təsirdən sonra polyarlaşma vəziyyətinin dəyişməsinə öyrənməklə optik parametrləri almağa imkan verir. Hazırda ellipsometriya konfigurasiyalarının geniş çeşidi mövcuddur. Ellipsometrlər əsasən iki kateqoriyaya bölünür: fırlanan optik elementləri olanlar və fotoelastik modulyatorları olanlar.

Fırlanan optik elementləri olan ellipsometrlər arasında fırlanan analizator və kompensatorla RCA (Rotating-Compensator - Analizator) konfigurasiyası son vaxtlar getdikcə

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.

populyarlaşır. Bu konfigurasiya bütün Stoks parametrləri haqqında məlumatı çıxarmağa imkan verən tam optik təcrübə həyata keçirməyə imkan verir. Cari işdə J.A. Woollam M2000DI və IR-Vase RCA spektroskopik ellipsometrindən istifadə edilmişdir. Bu ellipsometrlər 0.05 eV-dən 6.3 eV-ə qədər geniş spektral diapazonda ölçmə aparmağa imkan verir. Perpendikulyar hissədə zondlama işıq şüasının diametri 250 μm olmuşdur.

İkinci fəsildə “Topoloji vəziyyət, 2D və 3D topoloji izolyatorlar (TI)” topoloji vəziyyəti təsvir edilir və tədqiq olunan topoloji izolyatorların siyahısı verilir. Topoloji material riyazi olaraq sıfırdan fərqli topoloji invariant ilə xarakterizə olunur. Topoloji izolyatorlar həcm dalğa funksiyalarının topoloji təbiətinə görə yaranan özünəməxsus kənar və ya səth halları ilə xarakterizə olunan maddənin yeni kvant vəziyyətini təmsil edir. Bunlar adi izolyatorlar kimi qadağan olunmuş zonaya malik olan, lakin kənarlarında və ya səthində qorunan keçirici vəziyyətlərə malik olan materiallardır. Bu vəziyyətlər spin-orbital qarşılıqlı əlaqəsi və zamanın əks simmetriyası sayəsində mümkündür. Topoloji izolyatorların iki xüsusi xassəsi var: pozulmalara qarşı müqavimət və qadağan olmuş zonasız kənar vəziyyətinin olması. Qeyri-maqnit topoloji izolyatorlar iki xarakterik xüsusiyyətə malikdir; həyacanamalara davamlıdırlar və zona boşluqsuz kənar səviyyələrin Dirak spektrinə (elektron enerjisinin dalğa vektorundan xətti asılılığı olan spektr) malikdirlər. Maqnit topoloji izolyatorlarda kənar səviyyələrin Dirak spektrində maqnit boşluğu açılır.

Fəsildə 2D və 3D topoloji izolyatorlarının təsnifatının xüsusiyyətləri təqdim olunur. Tetradimit tipli quruluşa malik Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), MnSb_2Te_4 , $\text{MnSb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Te}_4$ və $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ ($x=0, 0.05$ və 0.1) 3D topoloji izolyatorların icmalı təqdim olunmuşdur.

Fəsildə $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ -da (burada $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$)

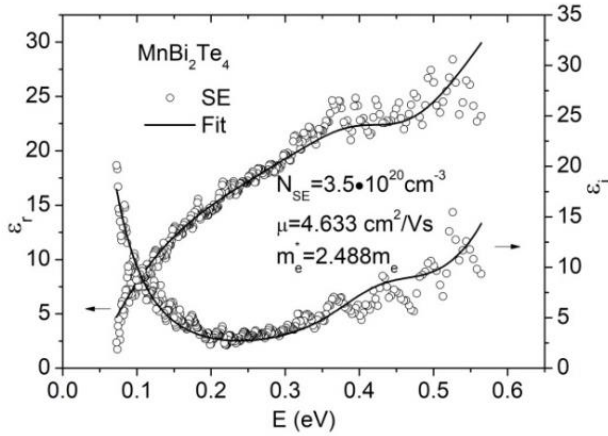
Raman səpələməni öyrənilməsinin nəticələri təqdim olunur^{11,12}. Burada n yeddi qatlı $MnBi_2Te_4$ paketlər arasında yerləşən beş qatlı Bi_2Te_3 paketlərinin sayını göstərir. Qəfəsdəki atomların sayının n artması ($n = \infty$ istisna olmaqla) hesabına bu materiallarda Raman aktiv modlarının artması ilə sayında gözlənilən artım əvəzinə, müəyyən edilmişdir ki, onların sayı və simmetriyası $n = 1, 2, 3, 4, 5$ və $n = \infty$ (Bi_2Te_3) olan birləşmələr üçün modları eynidir. Başqa sözlə, $MnBi_2Te_4 \cdot n(Bi_2Te_3)$ enerji baxımından Raman səpələnməsində aktiv vibrasiya spektrinə malik təbii cırlaşmış heterostrukturudur.

“0.05-0.7 eV foton enerji diapazonunda Tİ-ın dielektrik funksiyası” adlı **üçüncü fəsil** üçölçülü topoloji izolyatorlar üçün 0.05 eV-dən 0.7 eV-ə qədər foton enerji diapazonunda spektroskopik ellipsometriya ilə ölçülən tetradimit tipli struktura malik Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $MnBi_2Te_4 \cdot n(Bi_2Te_3)$ ($n = 0, 2$) и $MnSb_{1.5}Bi_{0.5}Te_4$ və $Bi_{1-x}Sb_xTeI$ ($x=0, 0.05$ və 0.1) birləşmələrinin optik parametrlərinin tədqiqinə həsr edilmişdir.

Müəyyən edilmişdir ki, dielektrik funksiyası sərbəst yük daşıyıcılarında əks olunma və udma üçün xarakterik xüsusiyyətlər nümayiş etdirir. Dielektrik funksiyaya daşıyıcıların plazması (çəp zonadaxili keçidlərdən) tərəfindən işıqın udulması ilə əlaqəli töhfənin olması, Drude və Lorentz ossilyatorları (şəkil 1) əsasında qurulmuş modeldən istifadə etməklə təsdiq olunub. Bu plazmanın (plazmonların) kvant həyəcanlamaları itki funksiyası üzərində 0.089 eV enerjisində xarakterik pik şəklində görünür (şəkil 2).

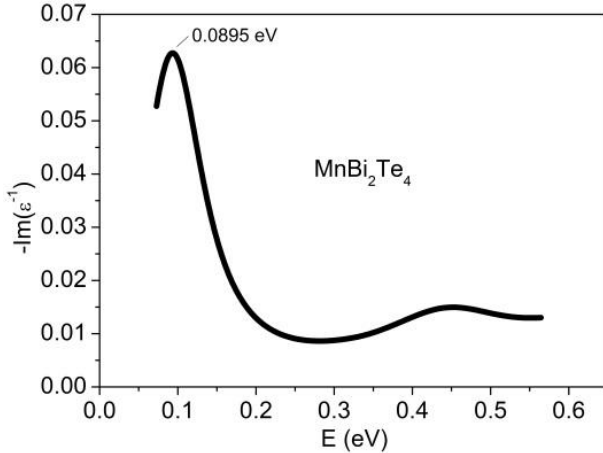
¹¹ Amiraslanov, I. R. Crystal structure and Raman-active lattice vibrations of magnetic topological insulators $MnBi_2Te_4 \cdot n(Bi_2Te_3)$ ($n=0, 1, \dots, 6$) / Z. S. Aliev, P. A. Askerova, E. H. Alizade [et al.] // Phys. Rev. B, -2022, -106, -184108

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



Şəkil 1. MnBi_2Te_4 üçün təcrübədən və Drude ilə Lorentz ossilyatorlarına əsaslanan modeldən alınan dielektrik funksiya

Tədqiq olunan topoloji və Raşba materiallarının parametrləri (yük daşıyıcılarının konsentrasiyası, onların effektiv kütləsi və yürüklüyü) qurulmuş optik model çərçivəsində dielektrik funksiyanın təhlili əsasında hesablanmışdır. Bu parametrlərin dəyərləri və ekranlaşmış plazma tezliyi Cədvəl 1-də verilmişdir.



Şəkil 2. MnBi_2Te_4 üçün itkli funksiyası

Cədvəl 1.

Yük daşıyıcısının konsentrasiyası, effektiv kütlə, yürüklüyü və ekranlaşmış plazma tezliyi

Birləşmə	Fəza qrupu	N_{Drude} (cm^{-3})	$m_{e,h}^*$	μ_{Drude} (cm^2/Vs)	ω_p^{scr} (cm^{-1})
n-Bi ₂ Se ₃	$R\bar{3}m$	2.2×10^{19}	0.15	540	689
n-Bi ₂ Se ₃	$R\bar{3}m$	2.5×10^{19}	0.16	513	738
p-Bi ₂ Te ₃	$R\bar{3}m$	1.27×10^{19}	0.162	316	~294
p-Sb ₂ Te ₃	$R\bar{3}m$	8.89×10^{19}	0.152	271	1055
p-Sb ₂ Te ₃	$R\bar{3}m$	1.19×10^{20}	0.189	213	10663
n-MnBi ₂ Te ₄	$R\bar{3}m$	3.5×10^{20}	2.488	4.633	532
n-MnBi ₆ Te ₁₀	$R\bar{3}m$	1.04×10^{20}	0.111	136	1225
p-MnSb _{1.5} Bi ₆ Te ₁₀	$R\bar{3}m$	4.5×10^{20}	0.368	40	1516
n-BiTel	$P3m1$	3.29×10^{19}	0.132	285	992
n - Bi _{0.95} Sb _{0.05} TeI	$P3m1$	6.17×10^{19}	0.263	99	975
n-Bi _{0.9} Sb _{0.1} TeI	$P3m1$	2.85×10^{19}	0.128	141	895

İnfraqırmızı əks etdirmə spektroskopiyadan istifadə edərək, Néel temperaturu $T_N \approx 25 \text{ K}$ olan topoloji antiferromaqnit MnBi₂Te₄-ün həcmi elektron xassələri tədqiq edilmişdir. Ekran edilmiş plazma tezliyində ω_p^{scr} temperaturun azalması ilə aşağı artım müşahidə edilmişdir (Şəkil 3).

Bu tezlik üçün ümumi qəbul edilmiş ifadə ilə tapılır [10]:

$$\omega_p^{scr} = \sqrt{\frac{Ne^2}{m^* \varepsilon_0 \varepsilon_\infty}} \quad (1)$$

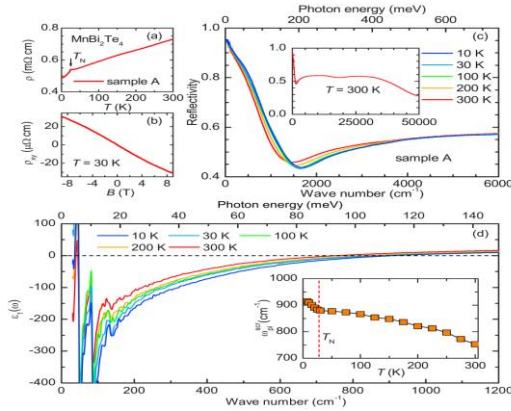
burada m^* yük daşıyıcıların effektiv kütləsidir, N müvafiq zonada yük daşıyıcıların konsentrasiyasıdır, ε_0 dielektrik sabitidir, ε_∞ yüksək tezlikli optik dielektrik nüfuzluğudur. Temperatur dəyişdikdə, ω_p^{scr} qiymətinə əhəmiyyətli töhfə verə biləcək parametr yük daşıyıcı konsentrasiyası N -dir, temperaturun azalması ilə azalan və (1) ifadəyə görə ω_p^{scr} azalmasına səbəb olur. Bu, adətən yarımkeçiricilərdə müşahidə olunan vəziyyətdir. Buna görə də, temperaturun azalması ilə ω_p^{scr} artması anomal bir hadisədir.

Zona strukturun Γ nöqtəsində effektiv kütləsi $0.12m_e$ olan $CB1$ səviyyəsinə əlavə olaraq, kifayət qədər yüksək sıxlığa malik və effektiv kütləsi $3m_e$ olan və $CB1$ -dan bir qədər yuxarıda yerləşən başqa bir $CB2$ zona var¹³¹³.

Ekranlaşmış plazma tezliyinin anomal temperatur davranışını izah etmək üçün iki model sınaqdan keçirildi:

- Bu fenomeni keyfiyyətcə izah edən, lakin sonradan məlum oldu ki, kəmiyyətcə izah etməyən iki Drude ossilyator əsasında fenomenoloji model.

- Ekranlaşdırılmış plazma tezliyini zona strukturun parametrləri ilə birbaşa əlaqələndirməyə imkan verən və təcrübələri yaxşı təkrarlayan qeyri-homogen Fermi qaz modeli.



Şəkil 3. (a) $MnBi_2Te_4$ elektrik müqavimətinin temperaturdan asılılığı; oxla $T_N \approx 25K$ -də antiferromaqnit keçidini göstərir; (b) $30K$ -də $MnBi_2Te_4$ birləşməsinin holl müqaviməti ρ_{xy} ; (c) infraqırmızı bölgədə əks etdirmənin temperaturdan asılılığı, əlavədə $300K$ -də əks etdirmənin 30 sm^{-1} -dən 50.000 sm^{-1} -ə qədər spektri; (d) $\epsilon_1(\omega)$ dielektrik funksiyanın real hissəsinin temperatur asılılığı, əlavədə $\epsilon_1(\omega_p^{SCR}) = 0$ -da əldə edilən ekranlaşma plazma tezliyinin temperatur

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.

asilılığı¹⁴.

İki Drude və Lorentz osilatorlarının cəmi kimi təqdim olunan fenomenoloji model aşağıdakı ifadə ilə təsvir edilir: $\epsilon(E) = \sum_j \epsilon_{j,Drude}(E) + \sum_i \epsilon_{i,Lorentz}(E)$. Bu metodu tətbiq edərkən məlum oldu ki, effektiv kütləsi $0.12m_e$ olan səviyyədən gələn töhfə $3m_e$ səviyyəsindən töhfəni üstələyir.

Bir Drude ossilatorundan istifadə edərək, ellipsometrik ölçmələrin modelləşdirilməsi yük daşıyıcı konsentrasiyanın qiymətini $N_{Drude} = 3.5 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-1}$ və effektiv kütləni $m^* = 2.488m_e$ verdi. Effektiv kütlənin bu təcrübədən alınan qiyməti MnBi_2Te_4 ¹³ zona strukturu daxilində aşağı keçiricilik zonanın elektronları üçün hesablanmış $0.12m_e$ qiymətindən çox fərqlidir və iki ossilyator fenomenoloji yanaşmanın nəticələrini təsdiq etmir.

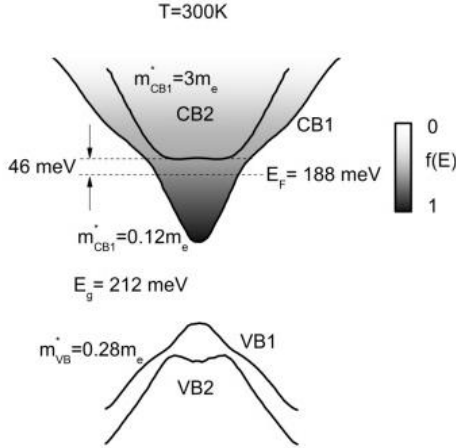
Qeyri-homogen Fermi qaz modeli təcrübədən alınan ($N_{Drude}m^*$) ilə $CB1$ və $CB2$ zonalarının onlara verdiyi töhfə ($N_{CB1}m_1^*$ və $N_{CB2}m_2^*$) arasında əlaqəni nəzərdə tutur:

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

burada $m^* = 2.488m_e$, $m_1^* = 0.12m_e$ və $m_2^* = 3m_e$. Otaq temperaturunda termodinamik tarazlıq vəziyyətində olan qeyri-homogen qazı təsvir edən və iterativ prosedurdan istifadə etməklə həll edilən tənlik Fermi səviyyəsinin $CB1$ keçiricilik zonanın dibinə nisbətən 188 meV dəyərində gətirib çıxarır. Fermi səviyyəsi ilə $CB2$ fərqi 42 meV və $N_{CB1} = 2.88 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ və $N_{CB2} = 6.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ qiymətləri $CB1$ və $CB2$ zonalarında üçün müvafiq olaraq effektiv yük və konsentrasiyası üçün (Şəkil 4). Fermi səviyyəsinin mövqeyinin tapılmış qiyməti 10^{20} cm^{-3} MnBi_2Te_4 -də elektron konsentrasiyasında elektronların bucaq fotoemissiyası üsulu ilə alınan təcrübə ilə praktiki olaraq üst-üstə düşür və 187 meV qiymətinə bərabərdir və Fermi səviyyəsi ilə $CB2$ arasındakı boşluq üçün qiymət

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

41 meV-dir¹⁵ və bizim halımız üçün 46 meV- dir (Şəkil 4).



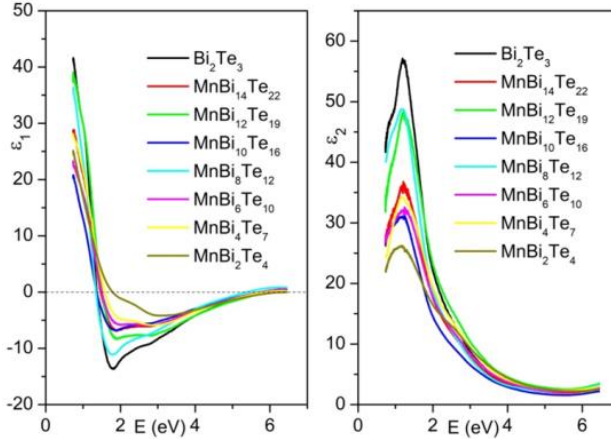
Şəkil 4. MnBi₂Te₄-ün Γ Y və Γ L boyunca hesablanmış zona strukturun sxematik təsviri¹³

Beləliklə, bu tədqiqat çərçivəsində mürəkkəb və güclü anomal temperatur asılılığı olan çoxzonalı aşağıenerjili cavab müəyyən olundu.

Təcrübə məlumatlarından hesablanmış plazmon polariton dalğalarının dispersiyaları təqdim olunur. Bi₂Se₃, Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, MnBi₂Te₄, MnBi₆Te₁₀ və MnSb_{1.5}Bi_{0.5}Te₄-də dielektrik funksiyasından həcmi plazmon-polariton və səthi plazmon-polariton dispersiyası müəyyən edilmişdir. Bütün bu parametrlər bu materialların plazmonikada perspektivli tətbiqi üçün vacibdir.

Dördüncü fəsildə, “0,7-6,4 eV foton enerji diapazonunda $T\bar{I}$ -m dielektrik funksiyası” üçölçülü tetradimit strukturlu Bi₂Se₃, Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, MnBi₂Te₄ \cdot n(Bi₂Te₃) (n = 0, 1, 2...), MnSb₂Te₄, MnSb_{1.5}Bi_{0.5}Te₄ və Raşba yarımkəçiriciləri Bi_{1-x}Sb_xTeI (x=0, 0.05 və 0.1) topoloji izolyatorlar üçün 0,7 eV-dən 6,4 eV-ə qədər foton enerji diapazonunda spektroskopik ellipsometriya ilə ölçülən optik parametrlərin tədqiqinin nəticələri təqdim edilir (Şəkil 5).

¹⁵Chen, Y. J. Topological Electronic Structure and Its Temperature Evolution in Antiferromagnetic Topological Insulator MnBi₂Te₄ / L. X. Xu, J. H. Li, Y. W. Li [et al.] // Phys. Rev. X, –2019, -9, -041040



Şəkil 5. Dielektrik funksiyasının həqiqi (sol) və xəyali (sağ) hissələri $MnBi_2Te_4 n(Bi_2Te_3)$ $n=0,1,2,3,4,5,6$ və $n=\infty$ (Bi_2Te_3). üçün

Kritik nöqtələrin analizi zonalararası optik keçidlərin dielektrik funksiyaya töhfəsi haqqında birinci elmi müddəanı sübut etdir (Cədvəl 2). $MnBi_2Te_4 n(Bi_2Te_3)$ içərisindəki $MnBi_2Te_4$ təbəqələri arasında Bi_2Te_3 laylarının sayının artması ilə, onların dielektrik funksiyası və onun ikinci törəməsi Bi_2Te_3 -ə bənzəməyə başlayır.

Cədvəl 2.

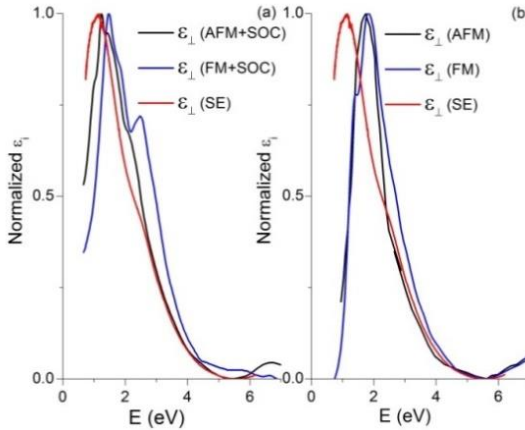
Tetradimit tipli strukturlarda zonalararası hal sıxlığının kritik nöqtələri

Birləşmə	Kritik nöqtə (eV)						
$MnBi_2Te_4$	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	
$MnBi_6Te_{10}$	0.85 2D	1.18 2D	1.27 2D	1.31 2D	1.53 2D	1.99 2D	2.08 2D
$MnBi_8Te_{13}$	0.75 2D	1.11 2D	1.19 2D	1.28 2D	1.40 2D	1.83 3D	
$MnBi_{10}Te_{16}$	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			

DFT hesablamalarından Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 və $MnBi_2Te_4$ üçün zona quruluşu təqdim olunmuş və hesablanmış dielektrik funksiyası təcrübədən alınmış funksiya ilə müqayisə edilmişdir.

DFT hesablamalarından və spektroskopik ellipsometriyadan əldə edilən $MnBi_2Te_4$ -ün dielektrik funksiyasının müqayisəsi göstərdi ki

spin-orbitin parçalanması nəzərə alınmaqla, aparılan hesablamalar təcrübəyə daha yaxın nəticələr verir(şək. 6).

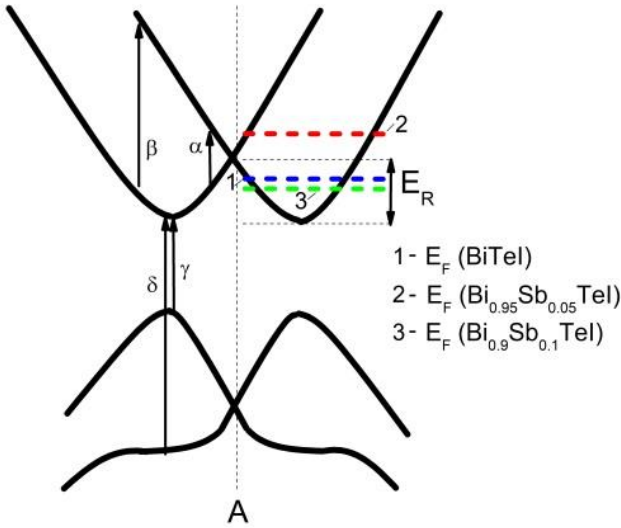


Şəkil 6. MnBi₂Te₄-ün təcrübədən və hesablamalardan dielektrik funksiyasının normallaşdırılmış xəyali hissəsi. Burada ϵ_{\perp} işığın elektrik vektorunun (E) optik oxa (C) nisbətən $E \perp C$ oriyentasiyasına uyğundur, SOC – spin-orbit qarşılıqlı təsirini nəzərə alınıb, AFM – antiferromaqnit faza, FM – ferromaqnit faza, SE – ellipsometriyadan alınan dielektrik funksiya.

Bi₂Se₃ və Sb₂Te₃, Bi₂Te₃⁸ zona strukturunun hesablanması nəticələrinə görə, n-Bi₂Se₃-də kvazi-sərbəst elektronların plazmasına birdən çox vadinin töhvəsi yalnız Fermi səviyyəli çox güclü cırılması ilə mümkündür. Fermi səviyyəsi keçiricilik zonanının dibindən 600 meV yuxarı olmalıdır, bu isə, tədqiq edilmiş n-Bi₂Se₃ nümunələrindən əldə edilmiş qiymətini xeyli üstələyir. Tamamilə fərqli bir vəziyyət p-Sb₂Te₃ və p-Bi₂Te₃ üçün xarakterikdir, hətta çox zəif cırılma belə, bir neçə valentlik zonanın dəşiklər plazmasına ayrı vadilərindən daşıyıcı töhvələrin qarışmasına səbəb olmalıdır. Bu deməkdir ki, (1) ifadəsindən müəyyən edilən dəşiklərin effektiv kütləsi, bir vadi halında və artan daşıyıcı konsentrasiyası ilə ekranlaşdırılmış plazma tezliyinə uyğun gələn effektiv kütlənin qiyməti dəyişə biləcəyini və həqiqi vəziyyətini əks etdirməyəcəkdir. Eyni zamanda, artan daşıyıcı

konsentrasiyası ilə zonalar yenidən normallaşması baş verə bilər ki, bu da effektiv kütlənin dəyişməsinə səbəb olmalıdır. Bununla belə, cırlaşmanın səviyyənin arması ilə, bu iki təsirin müəyyən etmək və ayırd etmək hazırkı işin əhatə dairəsi xaricindədir və əlavə tədqiqat tələb edir.

BiTeI, Bi_{0.95}Sb_{0.05}TeI və Bi_{0.9}Sb_{0.1}TeI kristallarının dielektrik funksiyası tədqiq edilmişdir. BiTeI zonalarının və optik keçidlərinin (zonadaxili istisna olmaqla) təşkilinin ümumi qəbul edilmiş modeli Şəkil 7-də⁵ təqdim edilmişdir. Keyfiyyət baxımından bu model Bi_{0.95}Sb_{0.05}TeI və Bi_{0.9}Sb_{0.1}TeI¹⁶ üçün tətbiq edilə bilər.



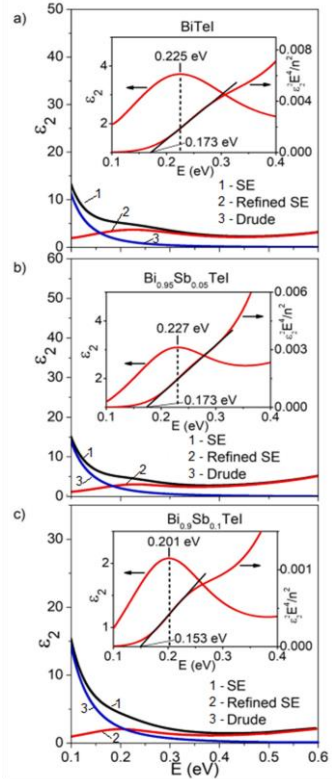
Şəkil 7. BiTeI zona quruluşunda optik keçidlər. Mavi, qırmızı və yaşıl rəngli nöqtəli xətlər müvafiq olaraq BiTeI, Bi_{0.95}Sb_{0.05}TeI və Bi_{0.9}Sb_{0.1}TeI-də Fermi səviyyəsinin mövqeyini göstərir.

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

BiTeI-də Fermi səviyyəsi (E_F) Şəkil 7-dən görüldüyü kimi, $4 \times 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ -dən az yük daşıyıcı konsentrasiyaları üçün Rashba enerjisi E_R -nin altında yerləşir və daha yüksək konsentrasiyalar üçün Fermi səviyyəsi E_R -dən yuxarıdadır. Bu səbəbdən daşıyıcı konsentrasiyası $3.3 \times 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ (Cədvəl 1) olan BiTeI-də Fermi səviyyəsi (Şəkil 7-də xətt 1) E_R -dən aşağıdır, amma konsentrasiyası $N = 6.25 \times 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ (Cədvəl 1) olan tədqiq olunan $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ -da (Şəkil 7-də xətt 2) E_R -dən yuxarıdadır, konsentrasiyası $N = 2.85 \times 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ (Cədvəl 1) olan $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$ -da (Şəkil 7-də xətt 3) isə enerji E_R -dən aşağıdır.

$\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ -da Fermi səviyyəsi E_R enerjisindən nəzərəcarpacaq dərəcədə yüksək olduğundan, daxili zonalararası keçidlər α -tipindən daha çox β -tipli olacaqdır. Buna görə $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ -da pikin mövqeyi bir qədər yüksək enerjilərə doğru sürüşür və yalnız BiTeI və $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{TeI}$ -da spin parçalanmasının müqayisəsi üçün adekvatdır, çünki onlar üçün Fermi səviyyəsi E_R enerjidən aşağıdır.

α - və ya β -keçidlərin enerjisi E_R dəyəri ilə müəyyən edilir. Onlar keçiricilik zonada eyni Rashba parçalanmış budaqları arasında yaranır və bir-birindən yalnız iştirak edən elektron vəziyyətlərin müxtəlif dispersiyası ilə fərqlənir. $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{TeI}$ -da sərbəst daşıyıcıların



Şəkil 8. Dielektrik funksiyanın xəyali hissəsi (1), Drude töhfəsindən təmizlənmiş dielektrik funksiyanın xəyali hissəsi (2) və Drude töhfəsi (3)

konsentrasiyası BiTeI və Bi_{0,9}Sb_{0,1}TeI ilə müqayisədə nəzərəcarpacaq dərəcədə yüksəkdir və Fermi səviyyəsi E_R enerjisindən yüksəkdir. Bu o deməkdir ki, Bi_{0,95}Sb_{0,05}TeI-da zona daxili keçidlər α -tipindən daha çox β -tiplidir. Buna görə də, Bi_{0,95}Sb_{0,05}TeI-da pik mövqeyi bir qədər yüksək enerjilərə doğru sürüşür və yalnız BiTeI və Bi_{0,9}Sb_{0,1}TeI-da spin parçalanmasının müqayisəsi üçün adekvatdır.

Onlar Drude töhfəsi (yəni, çəp zona daxili keçidlərindən) təmizlənmiş dielektrik funksiyanın xəyali hissəsində (şəkil 8, qırmızı xətlər) 0,1 ilə 0,4 eV foton enerji arasında, BiTeI, Bi_{0,95}Sb_{0,05}TeI və Bi_{0,9}Sb_{0,1}TeI üçün müvafiq olaraq 0.225 eV, 0,227 və 0,211 eV mərkəzi ilə geniş bir pik kimi görünür. BiTeI, Bi_{0,95}Sb_{0,05}TeI və Bi_{0,9}Sb_{0,1}TeI üçün Şəkil 6-dakı əlavələr birbaşa icazə verilən keçidlər üçün foton enerji asılılığının $[(\epsilon_2)^2 E^4]/n^2 \sim \alpha^2 E^2 \sim E-E_0$ -nın tam xətti qanuna uyğun olduğunu göstərir və E_0 0.173 və 0.153 eV-a bərabərdir. Başqa sözlə, Bi_{0,9}Sb_{0,1}TeI-də zona daxili keçidin BiTeI-dən 20 meV azdır. Bu gözlənilən nəticədir. Çünki, Sb Bi-dən daha yüngüldür və daha az spin parçalanmasına səbəb olur, və bunun nəticəsində Rəşba enerjisi də 20 meV azalır.

NƏTİCƏLƏR

1. Dar zonalı qismən cırlaşmış yarımkeçirici nümunələr Bi₂Se₃, Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, MnBi₂Te₄·n(Bi₂Te₃) (n = 0, 1, 2...), MnSb_{1,5}Bi_{0,5}Te₄ və Bi_{1-x}Sb_xTeI üçün elektromaqnit dalğaları spektrinin infraqırmızı diapazonunda $\sim 400 - 5600 \text{ sm}^{-1}$ spektroellipsometrik ölçmələr aparılıb və ellipsometrik parametrlər alınıb. [2,4,9,12,13,16]

2. Bi₂Se₃, Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, MnBi₂Te₄, MnBi₆Te₁₀, MnSb_{1,5}Bi_{0,5}Te₄ və Bi_{1-x}Sb_xTeI üçün Drude ossilyatoru çərçivəsində ellipsometrik parametrlərini yüksək dəqiqliklə təsvir edən optik model qurulmuşdur. [2,4,9,12,13,16]

3. Bi₂Se₃, Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, MnBi₂Te₄, MnBi₆Te₁₀, MnSb_{1,5}Bi_{0,5}Te₄ və Bi_{1-x}Sb_xTeI üçün dielektrik funksiyası bərpa olunub və yük daşıyıcılarının yürüklüyü və effektiv kütləsi müəyyən edilmişdir. [1-17]

4. Göstərilmişdir ki, Holl effekti ölçmələrindən təyin edilmiş yük daşıyıcılarının konsentrasiyasını ellipsometrik məlumatları optimallaşdırmaqla dəqiqləşdirilmək mümkündür. [2,9,12,14,16]

5. MnBi_2Te_4 -də zonadaxili və zonalararası keçidlərin parametrləri müəyyən edilmişdir. Otaq temperaturunda həcmi qadağan olunmuş zonanın eninin 0.212 eV nəzəri qiymətinə 0.200 eV yaxın olması göstərilmişdir. [7,8]

6. Çox fərqli effektiv kütlələri olan $0.12m_e$ və $3m_e$ keçiricilik zonanın iki daxili zonanın mövcudluğu və ekranlaşdırılmış plazma tezliyinin anomal temperaturdan asılılığı aşkar edilmişdir. Bu asılılığın nəzəri modeli qurulmuşdur. [7,8]

7. BiTeI və $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ -un $x = 0.05$ və 0.01 olan heksoqonal bərk məhlullarında spektroellipsometrik və Raman spektroskopiyası ölçmələri aparılmışdır. Göstərilmişdir ki, $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{TeI}$ bərk məhlulunda Bi qismən Sb ilə əvəz etdikdə keçiricilik zonasında zona daxili keçidlər oblastnda dielektrik funksiyasının xəyali hissəsinin maksimumunun yerdəyişməsi, Bi daha yüngül Sb- ilə əvəz edildikdə spin-orbital qarşılıqlı təsirinin qiymətinin azalması ilə əlaqələndirilir. [2,3]

Dissertasiyanın mövzusu üzrə çap olunmuş elmi işlərin siyahısı:

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. Otrikov [et al.] // ICSE-8 Abstract Book, - Barselona, - 2019, - 188
6. Amiraslanov, I.R. Crystal structure and raman active lattice vibrations of magnetic topological insulators MnBi_2Te_4 $n(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$ ($n = 0, 1, 6$) / 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. Otrikov [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

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. Ализде, 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



Dissertasiyanın müdafiəsi 21 fevral 2024 il tarixində saat 9:30 Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunda nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ1143, Azərbaycan, Bakı, H. Cavid pr., 131, Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Avtoreferatın elektron versiyası Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir

Avtoreferat 12 yanvar 2024 il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb:17.01.2024

Kağızın formatı: A5

Həcm: 36639

Tiraj: 30