

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

MƏXSUSİ VƏ GÜCLÜ AŞQARLANMIŞ $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,25$) BƏRK MƏHLULLARININ MONOKRİSTALLARININ QALVANOMAQNİT XASSƏLƏRİ

İxtisas: 2220.01-Yarımkeçiricilər fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Xəyalə Əjdər qızı Həsənova**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı-2021

Dissertasiya işi AMEA-nın Fizika İnstitutunun “Ferromaqnit maddələrin rezonans spektroskopiyası” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

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

Rəsmi opponetlər: fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Eldar Mehralı oğlu Qocayev

fizika elmləri doktoru, dosent
Nadir Allahverdi oğlu Abdullayev

fizika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Yusif İmrayıl oğlu Ahiyev

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının AMEA-nın Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

AMEA-nın həqiqi üzvü, fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor

_____ **Nazim Timur oğlu Məmmədov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

Fizika elmləri doktoru, dosent

_____ **Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva**

Elmi seminarın sədri:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor

_____ **Oqtay Bahadır oğlu Tağıyev**

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Son 25-30 ildə Bi-Sb ərintiləri infraqırmızı şualanma qəbuledicilərinin və radioelektron qurğularının termostatik elementlərinin yaradılmasında geniş tətbiq olunur. Tibb sahəsində və biologiyada orqanik toxuma kəsiklərini soyutmağa imkan verən yarımkeçirici soyuduculardan istifadə geniş yayılmışdır. Bi-Sb ərintiləri əsasında, monokristalların laylarının epitaksial göyərilməsi qurğularında, yüksəktemperaturlu ifratkeçiricilərin tədqiqində, vakuum texnikasında buxar yağ nasoslarının yağ buxarlarının dondurulması üçün və s. tətbiq olunan dərin soyuducu termoelektrik qurğular işlənilib hazırlanır. Bu materialın elmdə və texnikada tətbiqinin artması ilə əlaqədar olaraq, Bi-Sb ərintilərinin tədqiqinin aktuallığı heç bir şübhə doğurmur.

Bi-Sb ərintilərinin monokristallarının az miqdarda (0,5at. %-dən az) dördüncü (Sn, Pb) və altıncı qrup (Se, Te) elementləri ilə aşqarlanması ərintilərə müvafiq olaraq, akseptor və ya donor tipli elektrik keçiriciliyi verir. Beləliklə, bismut əsaslı ərintidə stibium və aşqarın konsentrasiyasını dəyişməklə, elm və texnikanın müxtəlif sahələri üçün bütöv bir yarımkeçirici monokristal ailəsini əldə etmək mümkündür.

Bismut və stibium yarımmetallarının kristalları oxşar quruluşa malikdirlər və normal vəziyyətdə laylardan ibarət romboedrik qəfəsdə kristallaşırlar. Hər qatda atomlar iki paralel müstəvidə yerləşirlər. Beləki, bir müstəvinin atomu ikinci müstəvidə üç yaxın qonşuya və bitişik layda böyük məsafədə üç qonşuya malikdir. İkiqat laylar arasında kimyəvi rabitə zəif Van-der-Vals, ikiqat layların daxilində isə kovalentdir.

Bi tipli kristalların quruluşunu təsvir etmək üçün (romboedrik qəfəsdən başqa) heksaqonal və səthəmərkəzləşmiş psevdokubik quruluşdan istifadə edilir .

Bismut və stibium elektron analoq olduqları üçün, kimyəvi rabitənin və kristal quruluşun eyni növ xüsusiyyətinə malikdirlər (fərq atom radiusunun ölçüsündədir və Bi və Sb üçün bu fərq cəmi ~ 7,5%-dir) və onlar bərk məhlulların kəsilməz ardıcılığını əmələ

gətirirlər. Stibiumun konsentrasiyasının artması ilə Bi-Sb sistemində kristallik quruluşun növü saxlanılmaqla, elementar özəyin parametrləri dəyişir. Bismutun stibium ilə aşqarlanması zamanı zona quruluşunun dəyişməsi baş verir. Məlumdur ki, stibiumun 2–3 at. % konsentrasiyasında Brilluen zonasının L-nöqtəsində yarıqsız vəziyyətə və energetik zonaların çevrilməsinə keçid yaranır. Stibiumun 6–7 at.% konsentrasiyasında isə yarımmetal-yarımkeçirici faza keçidi mövcuddur. Göstərilmiş tərkiblərdə qalvanomaqnit və termoelektrik xassələrin konsentrasiyadan asılılıqlarında bir sıra anomaliyalar müşahidə edilmişdir. Məsələn, 0–12,5 at.%Sb konsentrasiya intervalında Bi-Sb ərintilərinin elementar özək parametrlərini ölçməklə göstərilmişdir ki, helium temperaturlarında “c” parametrinin konsentrasiyadan asılılığı qeyri-xəttidir.

Göstərilmişdir ki, ərintilərin yarımmetal haldan yarımkeçirici hala keçid oblastında Veqard qanunundan kənara çıxma müşahidə olunur və bu da təbii olaraq, Bi-Sb sistemi bərk məhlullarının elektron spektrlərində əksini tapır.

Elementar Bi və Sb üçün yarımmetal davranışa səbəb olan, üst-üstə düşən xətlərin təbiəti müxtəlifdir.

$Bi_{1-x}Sb_x$ ərintilərinin tərkibindən asılı olaraq xətlər enerjisini kəskin dəyişir və “x”-in 0,07-dən 0,23-ə qədər olan qiymətlərində əsl yarımkeçirici hal müşahidə olunur. Darzolaqlı yarımkeçirici birləşmələrdə valent və keçiricilik zonalarının vəziyyəti enerjiyə görə çevrilir və buna müvafiq olaraq, səth vəziyyəti də dəyişir. Bundan əlavə, 111 və ya 001 bazis müstəvisi üçqat fırlanma simmetriyasına və Fermi enerjisini bir neçə dəfə keçən topoloji səth halına malikdir. Səth hallarında elektronlar üçün Fermi səthi kifayət qədər mürəkkəbdir. Lakin, topoloji səth hallarının tədqiqi üçün $Bi_{0,9}Sb_{0,1}$ tərkibi əlverişli material hesab edilmir. Müvafiq olaraq, yükdaşıyıcıların səpilmə mexanizmlərinin təyini aktual məsələyə çevrilir. Lakin, $Bi_{1-x}Sb_x$ ərintilərində yükdaşıyıcıların yüyürüklükləri haqqında məlumat almaq məqsədilə onların qalvanomaqnit xassələrinin analizi izoenergetik səthin mürəkkəb quruluşu səbəbindən mürəkkəbləşir.

Yarımmetalların, yarımkeçiricilərin və onların bərk məhlullarının donor və akseptor tipli qarışıqlarla aşqarlanması valent

zonasının yuxarı hissəsində və keçiricilik zonasının dib hissəsinin yaxınlığında daşıyıcıların enerji spektrinin strukturunu tədqiq etmək üçün geniş istifadə olunur. Belə ki, aşqarla qarışdırmaqla Fermi səviyyəsini əsasən ya elektronlarla, ya da deşiklərlə doldurmaq və bununla da zona parametrlərinin hesablamalarını sadələşdirmək mümkündür. Bununla belə qeyd edək ki, yuxarıda yerləşən enerji vadilərinin nə dərəcədə özlərini büruzə vermələrinə dair suallar aydın deyil.

Bismut təbiətdə monoizotop şəklində rast gəlindiyindən və bismutun atom kütləsi stibiumun atom kütləsindən 1,7 dəfə çox olduğundan, bismutun izovalent Sb ilə geniş konsentrasiya intervalında aşqarlanması fonon istilikkeçiriciliyinə, yəni bu aşqarlarda izotopik səpələnmənin təsiri ilə müqayisə edilə bilən fononların səpilməsinə təsirini öyrənmək üçün də əlverişli bir vasitədir. Bismutda və onun Sb ilə ərintilərdə valent və keçiricilik zonalarında halların kiçik sıxlığı, onları digər elektrik aktiv qarışıqlarla aşqarlamaqla, az tədqiq edilmiş uzaq enerji zonalarını daşınma hadisələrinə daxil etməyə imkan verir. Beləki, mürəkkəb və çoxekstremumlu enerji spektri olan ərintilərdə istilik və yük daşıyıcılarının səpilmə mexanizmlərinin tədqiqi maraqlıdır. Qeyd edək ki, məxsusi keçiricilik sahəsində müxtəlif energetik alt zonalara aid yükdaşıyıcıların elektron prosesində iştirakına dair ədəbiyyat məlumatları birmənalı deyil. Bu materialların texnolojiliyi (aşağı ərimə temperaturu, qabaqcıl qarışıqlardan təmizləmə üsulları və öz təsdiqini tapmış mükəmməl kristalların göyərilməsi üsulları) bismut, stibium və onların ərintilərinin eksperimental tədqiqi məsələsini asanlaşdırır. Bismut və onun stibium ilə ərintiləri həssas bolometr, gərginlik sensorları və maqnit sahə sayğacları qismində, eləcə də termoelektrik, termomaqnit və anizotrop enerji çeviricilərinin daxilində işçi elementlərin yaradılmasında geniş praktiki tətbiq sahəsinə malikdirlər. Qeyd etmək lazımdır ki, bu ərintilərin tədqiqi hələ də öz aktuallığını qoruyub saxlayır.

Moskva Fizika və Texnika İnstitutu (Rusiya), Twente Universiteti və Amsterdam Universitetindən (Hollandiya) bir qrup alim topoloji materiallardan birinin - stibium ilə aşqarlanmış keçirici

olmayan bismutun - öz həcmi daxilində ifratkeçirici cərəyan keçirmə qabiliyyətini müəyyən etmişdirlər. Massaçuset Texnologiya İnstitutunun (ABŞ) tədqiqatçıları müəyyən etmişlər ki, $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ bərk məhlullarının nazik təbəqəsi MIT professoru Mildred Dresselhausun iddia etdiyi kimi elektron keçiriciliyi Dirak konusu kimi tanınan xüsusiyyət nümayiş etdirir. Bismut, stibium və onların ərintilərinin nazik təbəqələrinin keçiriciliyində kvant ölçü effektinin eksperimental tədqiqi aparılmış və zəif lokallaşma və qarşılıqlı təsirlərin qatqısını ayırd etmək imkanı göstərilmişdir. Metal səth yaxınlığında güclü spin-orbital qarşılıqlı təsiri ilə potensial qradienti arasındakı əlaqə təyin edilmişdir.

Aparılan təcrübi işlər çoxluğu göstərdi ki, Bi-Sb ərintisində həm donor həm də akseptor aşqarlar ən aşağı temperaturalarda belə ionlaşmışdır və aşqar yükdaşıyıcıları isə sadəcə müvafiq zonaları doldururlar. Lakin, bu model kompensə olunmuş Bi kristallarında aşkar edilən qeyri-monoton müqavimətin və qarışıqın yükdaşıyıcılarının faydalı iş əmsalının temperaturdan asılılığını təkzib edir. Həmçinin, qurğuların parametrlərinin mükəmməlləşdirilməsi üçün tez-tez istifadə olunan aşqarların təsirinə tədqiqi aktualdır. Məsələn, Nerist-Ettingşauzen effekti əsasında soyuducuları buna misal göstərmək mümkündür.

Məlumdur ki, yuxarıda yerləşən vadilərdə elektronların səpilməsi, xüsusilə onlarda Fermi səviyyəsinin yerdəyişməsi, özünü aşqarlama dərəcəsinin artması ilə qalvanomaqnit xarakteristikalarında daha çox bürüzə verəcək. Buna görə də, $n\text{-Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ bərk məhlullarında elektronların əlavə enerji vadilərinin rolunu müəyyən etmək üçün, bu kristallarda qalvanomaqnit effektlərin tədqiqinin aktuallığı heç bir şübhə doğurmur.

Aşqarlanmış və məxsusi Bi-Sb ərintilərinin tədqiqinə həsr olunmuş nəzəri və təcrübi nəşrlərin analizi bu dissertasiya işinin hədəfini və məqsədini formalaşdırmağa imkan vermişdir.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Tədqiqat obyektı məxsusi və güclü aşqarlanmış $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,25$) bərk məhlullarının monokristallarıdır. Bu kristallar xarici təsirlərə qarşı həddindən artıq həssas olmaları səbəbindən maraqlı tədqiqat obyektinə çevrilmişlər. Tədqiqatın predmeti məxsusi və güclü aşqarlanmış $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$

($0 \leq x \leq 0,25$) bərk məhlullarının monokristallarının, qalvanomaqnit və lüminessensiya xassələridir. $Bi_{1-x}Sb_x$ monokristallarının qalvanomaqnit və optik xassələrinin öyrənilməsi darzolaqlı, aşağı müqavimətli, laylı strukturlu, $Bi_{1-x}Sb_x$ bərk məhlulları əsasında keyfiyyətli monokristalların göyərilməsi, onların fiziki xassələrinin tərkibdən asılılığı qanunauyğunluqlarının aşkara çıxarılması, eləcə də praktik tətbiq imkanlarının araşdırılması baxımından mühüm əhəmiyyətli xarakterə malikdir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri:

İşin məqsədi məxsusi və aşqarlanmış (Sn, Te) homogen bismut-stibium bərk məhlullarının monokristallarında yükdaşıyıcıların səpilmə prosesinin xüsusiyyətlərini və kristal quruluşun təhrifinin lüminessensiya spektrlərinə təsirini müəyyənləşdirməkdən ibarətdir.

Bu məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

- $Bi_{1-x}Sb_x$ ərintilərinin tərkibcə bircins və mükəmməl monokristallarının alınması;
- Tellur və qalayla aşqarlanmış $Bi_{1-x}Sb_x$ ərintilərinin tərkibcə bircins və mükəmməl monokristallarının alınması
- Alınmış $Bi_{1-x}Sb_x$: Te, Sn bərk məhlullarının qalvanomaqnit xassələrinin temperatur asılılıqlarının ($77K \leq T \leq 300K$) tədqiqi
- Sintez olunmuş $Bi_{1-x}Sb_x$ bərk məhlullarının fotolüminessensiya spektrlərinin tədqiqi

Tədqiqat metodları. Tədqiqat obyektini kimi aşağıdakı nümunələr götürülmüşdür:

- $Bi_{1-x}Sb_x$ ($x=0; 0.6; 0.8; 0.12; 0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.25$) monokristalları;
- Sn, Te ilə aşqarlanmış $Bi_{1-x}Sb_x$ monokristalları;

Tədqiqatda rentgenfaza analizi, DSK metodu, LS-55 lüminessensiya spektrometri və qalvanomaqnit əmsallarının ölçmə qurğusundan istifadə edilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar.

1. $Bi_{1-x}Sb_x$ bərk məhlullarının $x \leq 15at\%$ tərkiblərinin hamısında elektron sıxlığı Brilluen zonasının 3 ellipsoidində $x > 15at\%$ olduğu tərkiblərdə isə Brilluen zonasının 6 ellipsoidində cəmləşmişdir;

2. Deşiklərin müvafiq konsentrasiyasının elektron sıxlığı T və Γ -T vadilərində maksimaldır;
3. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ -də ($0,16 \leq x \leq 0,25$) deşiklərin Fermi səthi təqribən Brilluen zonasının Σ nötəsində yerləşən üç ümumi tipli ellipsoid ilə təsvir edilmişdir;
4. $0 \leq x \leq 0,25$ tərkibli $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ bərk məhlullarında stibiumun miqdarının artması ilə elektron ellipsoidinin meyletmə bucağı kiçilir;
5. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0,16 \leq x \leq 0,25$) ərintilərində deşiklərin ellipsoidləri $0 \leq x \leq 0,16$ tərkibli ərintilərdəki ellipsoidlərindən daha az anizotropdurlar;
6. Elektronların, yüngül və ağır deşiklərin konsentrasiyalarının temperatur asılılıqları, həmçinin Fermi səviyyəsi enerjisi, deşiklərin ağır və yüngül deşik zonaları arasında paylanması, elektron zonası ilə T-zonasının örtülməsi, habelə daşıyıcıların valent zonasından keçiricilik zonasına istilik sıçrayışı ilə əlaqəlidir.
7. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ -in bütün tərkiblərində həyacanlanma və luminessensiya spektrləri onlarda kooperativ Yan-Teller effektinə uyğun gələn vibron quruluşun olmasını göstərir.

Tədqiqatın elmi yeniliyi.

1. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ bərk məhlullarının elektron sıxlığı $x \leq 15\%$ olduğu halda Brilluen zonasının 3 ellipsoidində, $x > 15\%$ olduğu halda isə Brilluen zonasının 6 ellipsoidində cəmləşmişdir;
2. Deşiklərin müvafiq konsentrasiyasının elektron sıxlığı T və Γ -T vadilərində maksimaldır;
3. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,25$) ərintilərində elektron ellipsoidinin meyletmə bucağı x -in artması ilə azalır;
4. Elektronların, yüngül və ağır deşiklərin konsentrasiyalarının temperatur asılılıqları və Fermi səviyyəsi enerjisi deşiklərin ağır və yüngül deşik zonaları arasında paylanması, elektron zona ilə T-zonasının örtülməsi, həmçinin daşıyıcıların valent zonasından keçiricilik zonasına istilik sıçrayışı ilə bağlıdır;
5. Spektrin görünən və ultrabənövşəyi oblastında həyacanlanma və luminessensiya spektrləri, kooperativ Yan-Teller psevdoeffekti.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti:

Qalay və tellurla aşqarlanmış və məxsusi Bi-Sb sisteminin fiziki xassələri və termodinamik sabilliyinin təyini, bismut-stibium sistemi ərintilərinin (artıq praktikda tətbiq olunan tellur və qalayla aşqarlanmış bismut-stibium ərintiləri də daxil olmaqla) termoelektrik səmərəliliyinin artırılması üçün son dərəcə vacibdir.

Aprobasiyası və tətbiqi

Dissertasiya işinin əsas nəticələri AMEA Fizika İnstitutunun seminarlarında, International conference “Large scale research projects-2012 Materials science and informatics for high technologies” Baku-09-12 November 2012; “Fizikanın aktual problemləri” VII respublika elmi konfransının materialları Bakı-26 noyabr 2012; Университетская наука: актуальные вопросы, достижения и инновации, Международной научно-практической конференция” Пенза-30 сентябрь 2020; elmi konfranslarda məruzə və müzakirə edilmişdir.

Nəşr olunmuş elmi işlər. Dissertasiyanın əsas materialları 18 publikasiyada dərc edilmişdir ki, onlardan 15-i məqalə (o cümlədən 4-ü impakt faktorlu xarici elmi jurnal) və 3-ü konfrans tezisi. Alınmış nəticələr Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun elmi-tədqiqatları hesabatında dərc olunmuşdur.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı: Dissertasiya işi, Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun “Ferromaqnit maddələrin rezonans spektroskopiyası” laboratoriyalarında yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiya işinin quruluşu və həcmi. Dissertasiya işi girişdən, 4 fəsildən, nəticələrdən və 190 adda istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. İş həcmi 157 səhifədən – 113 çap səhifəsi mətn, 14 cədvəl, 50 şəkildən, ümumilikdə 233705 simvoldan ibarətdir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, tədqiqatın məqsədi ifadə edilmiş, elmi yeniliklər, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, praktiki əhəmiyyəti verilmişdir.

Dissertasiyanın birinci fəslində $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ərintilərinin, ərintidən bərk qidalandırıcı tətbiq etməklə, komponentlərinin əhəmiyyətli dərəcədə seqreqasiyasına malik olan, tərkibcə bircins və quruluşca mükəmməl monokristallarının alınmasına imkan verən sintez texnologiyasının, həmçinin Bi–Sb bərk məhlullarının monokristallarının sintez prosesində tellur və qalayla bərabər aşqarlanma metodikasının təsviri verilir .

Dissertasiyanın ikinci fəslində məxsusi $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ərintilərində Brilluen zonasının,elektron təbəqəsinin qurulmasına, enerji spektrinə və onların xüsusiyyətlərinə və qalvanomaqnit effektlərdə onların əks olunmasına, aşqar vəziyyətlərdə hərtərəfli sıxılma və temperatur şərtləri daxilində yükdaşıyıcıların səpilmə mexanizminin roluna dair təcrübi və nəzəri nəşrlərin analizi və qısa xülasəsi aparılmışdır. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ərintilərinin qalvanomaqnit xassələrinin temperatur asılılıqlarının ölçülmə metodikası təsvir olunmuş, $77\pm 300\text{K}$ temperatur intervalında tərkibində $0\div 0,25\text{at.}\% \text{Sb}$ olan bərk məhlullarda qalvanomaqnit əmsalların ölçmə nəticələri verilmiş, alınmış eksperimental nəticələr ətraflı təhlil olunmuşdur. Fəslin əvvəlində nümunənin nisbi orientasiyasından asılı olaraq zəif maqnit sahəsində on iki qalvanomaqnit əmsallarının təyin olunma metodikasına baxılmışdır.

$\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ərintilərində yükdaşıyıcıların energetik spektrinin parametrlərinin hesablanması qalvanomaqnit təcrübələrin nəticələri və həmçinin elektronların Fermi səthini 120^0 bucaq altında dönmə zamanı triqonal səthə nəzərən azca meyl etmiş bir-birinə keçən ümumi tipli L-elektronlar ellipsoidləri, dəşiklərin Fermi səthinin üç Σ -deşiklərin və üç L-deşiklərin ellipsoidləri və T-deşiklərin fırlanma ellipsoidləri ilə təqdim edən məlum publikasiyaların analizini nəzərə alan model çərçivəsində qurulmuşdur. Bu model çərçivəsində qalvanomaqnit əmsallarının komponentləri yüngül elektronların yürüklüyünün üç komponenti (μ_1, μ_2, μ_3), dəşiklərin yürüklüyünün

üç komponenti (v_1, v_2, v_3), elektron və deşik ellipsoidlərinin meyilmə bucağı φ_e, φ_d və N_e, N_d konsentrasiyaları ilə nəhayət, T-deşiklərin yüürlüyünün iki komponenti və onların konsentrasiyası N'_d ilə təyin olunurlar.

Seçilmiş model çərçivəsində, qalvanomaqnit effektləri və enerji spektri parametrləri arasında əlaqə aşağıdakı şəkildədir:

$$\begin{aligned}
\delta_{11,0} &= \frac{N_{e-e}}{2} (\mu_1 + \alpha_1^2 \mu_2 + \beta_1^2 \mu_3) + \frac{N_{g-e}}{2} (v_1 + \alpha_2^2 v_2 + \beta_2^2 v_3) + N_{g-e} v_1 \\
\delta_{33,0} &= N_{e-e} (\beta_1^2 \mu_2 + \alpha_1^2 \mu_3) + N_{g-e} (\beta_2^2 v_2 + \alpha_2^2 v_3) + N_{g-e} v_3 \\
-\delta_{231} &= -\frac{N_{e-e}}{2c} [\mu_2 \mu_3 + \mu_1 (\beta_1^2 \mu_2 + \alpha_1^2 \mu_3)] + \frac{N_{g-e}}{2c} [v_2 v_3 + v_1 (\beta_2^2 v_2 + \alpha_2^2 v_3)] + \\
&+ \frac{N_{g-e}}{c} v_1 v_3 \\
-\delta_{123} &= -\frac{N_{e-e}}{c} [\mu_1 (\alpha_1^2 \mu_2 + \beta_1^2 \mu_3)] + \frac{N_{g-e}}{c} [v_1 (\alpha_2^2 v_2 + \beta_2^2 v_3)] + \frac{N_{g-e}}{c} v_1^2 \\
\delta_{11,11} &= \frac{N_{e-e}}{8c^2} [\beta_1^2 \mu_2 (\mu_1 - \mu_3)^2 + \alpha_1^2 \mu_3 (\mu_1 - \mu_2)^2 + 3\alpha_1^2 \beta_1^2 \mu_1 (\mu_2 - \mu_3)^2] + \\
&+ \frac{N_{g-e}}{8c^2} [\beta_2^2 v_2 (v_1 - v_3)^2 + \alpha_2^2 v_3 (v_1 - v_2)^2 + 3\alpha_2^2 \beta_2^2 v_1 (v_2 - v_3)^2] \\
\delta_{11,22} &= \frac{N_{e-e}}{8c^2} [3\beta_1^2 \mu_2 (\mu_1^2 + \mu_3^2) + 3\alpha_1^2 \mu_3 (\mu_1^2 + \mu_2^2) + \alpha_1^2 \beta_1^2 \mu_1 (\mu_2 - \mu_3)^2 \\
&+ 2\mu_1 \mu_2 \mu_3] + \\
&+ \frac{N_{g-e}}{8c^2} [3\beta_2^2 v_2 (v_1^2 + v_3^2) + 3\alpha_2^2 v_3 (v_1^2 + v_2^2) + \alpha_2^2 \beta_2^2 v_1 (v_2 - v_3)^2 + \\
&2v_1 v_2 v_3] + \frac{N_{g-e}}{c^2} v_1^2 v_3 \\
\delta_{11,33} &= \frac{N_{e-e}}{2c^2} [(\mu_1 + \alpha_1^2 \mu_2 + \beta_1^2 \mu_3) \mu_1 (\alpha_1^2 \mu_2 + \beta_1^2 \mu_3)] + \\
&+ \frac{N_{g-e}}{2c^2} [(v_1 + \alpha_2^2 v_2 + \beta_2^2 v_3) v_1 (\alpha_2^2 v_2 + \beta_2^2 v_3)] + \frac{N_{g-e}}{c^2} v_1^3 \\
\delta_{33,11} &= \frac{N_{e-e}}{2c^2} (\beta_1^2 \mu_2 + \alpha_1^2 \mu_3) [\mu_2 \mu_3 + \mu_1 (\beta_1^2 \mu_2 + \alpha_1^2 \mu_3)] + \\
&+ \frac{N_{g-e}}{2c^2} (\beta_2^2 v_2 + \alpha_2^2 v_3) [v_2 v_3 + v_1 (\beta_2^2 v_2 + \alpha_2^2 v_3)] + \frac{N_{g-e}}{c^2} v_1^2 v_3 \\
\delta_{33,33} &= \frac{N_{e-e}}{c^2} \alpha_1^2 \beta_1^2 \mu_1 (\mu_2 - \mu_3)^2 + \frac{N_{g-e}}{c^2} \alpha_2^2 \beta_2^2 v_1 (v_1 - v_3)^2 \\
&- \delta_{23,23} = \frac{N_{e-e}}{2c^2} (\beta_1^2 \mu_2 + \alpha_1^2 \mu_3) [\mu_1 (\alpha_1^2 \mu_2 + \beta_1^2 \mu_3)] + \\
&+ \frac{N_{g-e}}{2c^2} (\beta_2^2 v_2 + \alpha_2^2 v_3) [v_1 (\alpha_2^2 v_2 + \beta_2^2 v_3)] + \frac{N_{g-e}}{2c^2} v_1^2 v_3 \\
\delta_{22,23} &= \frac{N_{e-e}}{4c^2} \alpha_1 \beta_1 \mu_1 (\mu_2 - \mu_3) (-\mu_1 + \alpha_1^2 \mu_2 + \beta_1^2 \mu_3) + \frac{N_{g-e}}{4c^2} \alpha_2 \beta_2 v_1 (v_2 - v_3) \\
&(-v_1 + \alpha_2^2 v_2 + \beta_2^2 v_3) \\
\delta_{23,22} &= \frac{N_{e-e}}{4c^2} \alpha_1 \beta_1 (\mu_2 - \mu_3) [\mu_2 \mu_3 - \mu_1 (\beta_1^2 \mu_2 + \alpha_1^2 \mu_3)] +
\end{aligned}$$

$$+ \frac{N_{g-e}}{4c^2} \alpha_2 \beta_2 (v_2 - v_3) [v_2 v_3 - v_1 (\beta_2^2 v_2 + \alpha_2^2 v_3)]$$

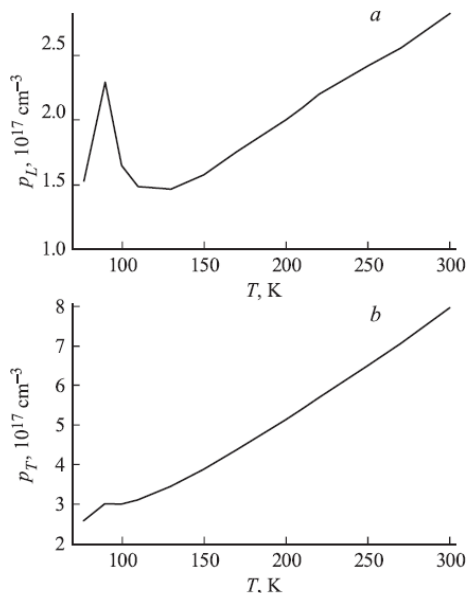
Burada N -yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, μ_i və v_i müvafiq olaraq, elektron və deşiklərin yürüklülüyünün tenzor komponentləri; α_1, β_1 və α_2, β_2 uyğun olaraq, elektron və deşik ellipsoidlərinin meyletmə bucaqlarının sinusları və kosinuslarıdır. Seçilmiş model zəif və orta maqnit sahələri oblastında zəif və aralıq maqnit sahəsində maqnit müqavimətinin anizotropiyasının asılılıqlarının ölçülməsi nəticələrinin interpretasiyası üçün istifadə olunmuşdur.

η -nı elektroneytrallıq tənliyindən təyin etməklə və alınmış nəticələri Holl əmsalının temperatur asılılığının hesablamalarının nəticələri ilə müqaisə etməklə, Fermi səviyyəsinin temperatur asılılığı ξ_F elektronların, yüngül p_L və ağır p_T deşiklərin konsentrasiyası, γ kütlələrin nisbəti alınmışdır.

Alınmış nəticələrin təhlili, aşağıdakı müddəaları fərz etməyə imkan verir:

- $\xi_F(T)$ asılılığının başlanğıc hissəsi ağır və yüngül deşik zonaları arasında deşiklərin yenidən paylanması ilə şərtləndirilmişdir. Sonra Fermi səviyyəsi T-zonasının elektron zonası ilə örtülməsindən asılı olaraq artır. Daha sonrakı enmə isə qadağan olunmuş zonanın eninin böyüməsi ilə əlaqəlidir.
- Deşik T-zonasının elektronların zonası ilə üst-üstə düşmə oblastında elektronların konsentrasiyası, temperatur artımının başlanğıc hissəsində onların örtülməsinin artması ilə artır. Daha sonra temperaturun artması ilə deşik zonasının elektron zonasından uzaqlaşması baş verir. Elektronların konsentrsiyalarının sonrakı artımı valent elektronlarının keçiricilik zonasına adi istilik sıçrayışı ilə əlaqəlidir.
- Yüngül deşiklərin konsentrasiyası (şək.1a) başlanğıc temperatur oblastında artır və L nöqtəsində yarıq kiçilir. Sonra isə elektron və deşik zonalarının ayrılması səbəbindən enir. Konsentrsiyanın sonrakı artımına səbəb elektronların valent zonasından keçiricilik zonasına istilik sıçramasıdır.
- Ağır deşiklərin konsentrasiyası ilkin olaraq, (şək.1b) T-zonasının elektron zonası ilə örtülməsi ilə artır. Sonra üst-üstə düşmənin azalması ilə enir. Konsentrsiyanın sonrakı artımı

valent zonasının elektronlarının keçiricilik zonasına istilik sıçraması səbəbindən baş verir. Beləliklə, $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x=0.06; 0.12$)-də Holl əmsalının temperatur asılılığının hesablamaları yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının artma mexanizmini və onların effektiv kütlələrinin temperaturdan asılılıqlarını müəyyən etməyə imkan verdi.



Şəkil 1. $\text{Bi}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ -da yüngül(a) və ağır(b) deşiklərin konsentrasiyalarının temperatur asılılıqları¹

Dissertasiyanın üçüncü fəslində 77÷300K temperatur intervalında qalay və tellurla aşqarlanmış $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ərintilərinə qalvanomaqnit əmsallarının tədqiqi nəticələri verilmiş, hesablamadan və təcrübədən alınmış nəticələr təfərrüatı ilə təhlil olunmuşdur. $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ -0,1at. % Sn, $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ -0,01at. %Sn ərintilərinin Holl əmsalı və xüsusi müqavimətinin temperatur asılılıqları qurulmuşdur.

¹ Таиров, Б.А., Гасанова, Х.А., Селим– Заде, Р.С. Температурная зависимость коэффициента Холла в системе $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x=0.06, 0.12$) //–Россия: Физика и Техника Полупроводников,–2016. т.50, №8,–с.1016–1020.

Aşqarlanmamış nümunələrdən fərqli olaraq həm xüsusi müqavimət, həm də Holl əmsalı asılılıqları qeyri-monton xarakter daşıyır. Bu tip asılılıqlar adi aşqar yarımkeçiriciləri üçün də xarakterikdir. Aşağı temperaturlarda keçiricilikdə dəşiklər əsas rol oynayır. Konsentrasiya praktiki olaraq sabit qalır, yüüklük isə temperaturdan asılı olaraq azalır. Buna xüsusi müqavimətin müəyyən bir temperatura qədər artması müvafiqdir. Sonrakı temperatur artımı ilə elektron və deşiklərin generasiyası başlayır. Bununla bərabər, yarımkeçiricidən fərqli olaraq, yarımmetalda eyni zamanda zonaların örtülməsi baş verir. Konsentrasiyanın dəyişməsi və xüsusilə yüngül elektronların generasiyası xüsusi müqavimətin azalmasına gətirib çıxarır. Xüsusi müqavimətin asılılıqlarında aşqarın konsentrasiyasının maksimum artması yarımkeçiricilərdə məxsusi keçiricilik oblastının yerdəyişməsinə analogi olaraq, daha yüksək temperatur istiqamətində yerini dəyişmişdir. Lakin, qeyd etmək lazımdır ki, xüsusi müqavimətin temperaturdan asılı olaraq, dəyişməsinə əsasən adi yarımkeçiricilərdə olduğu kimi qadağan olunmuş zonanın enini təyin etmək mümkün deyil. Çünki, o temperatur funksiyasıdır. Holl əmsalının temperatur asılılığı analogi qaydada izah olunur. Aşağı temperaturlarda Holl əmsalı deşiklərlə təyin olunur. Temperatur artdıqca prosesə daha yüksək yüüklüyə malik olan elektronlar da qoşulurlar və onların konsentrasiyaları artdıqca Holl əmsalı azalır. p-tip yarımkeçiricilərdə olduğu kimi, hələ məxsusi oblast başlamazdan əvvəl,

$$n_e \mu_e^2 = n_d \mu_d^2$$

şerti ödənildikdə Holl əmsalı sıfır olur.

Daha sonra temperaturun daha da artması ilə məxsusi oblastda, Holl əmsalı deşiklərə nisbətdə daha yüksək elektron yüüklüyünə uyğun gələn maksimum mənfi qiymətə çatır və nəhayət, hər zaman Holl əmsalının azalmasına səbəb olan konsentrasiyanın artması elektron qatqısının nisbi payının artması hesabına onun artımından üstün olmağa başlayır. Ona görə də məxsusi oblastda temperaturun sonrakı artımı zamanı Holl əmsalının qiyməti maksimal mənfi qiymətə çatır. Aşağı temperaturlarda isə (100K-ə qədər) Holl əmsalı temperaturdan

asılı olaraq artır. Bu artım keçiricilikdə iki növ dəşiklərin iştirakı ilə izah olunur. Lakin, yuxarıda verilmiş izahat dəşiklərin yürüklüyü altında onların iki zona üçün orta qiyməti götürülən halda qüvvədə qalır.

Verilənlərin müqaisəsi göstərir ki, tərkibdə qalay artdıqca maqnit müqavimətinin bütün komponentləri güclü surətdə azalır. Bu da təbii olaraq, yükdaşıyıcıların səpilməsinin artması, aşqarlama zamanı onların effektiv kütlələrinin dəyişməsi və müvafiq olaraq yürüklüyün azalması ilə izah olunur. Bu məlum olduğu kimi, maqnit müqavimətinin qiymətini təyin edir. Qeyd edək ki, eyni zamanda yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının artmasından asılı olaraq, elektrik keçiriciliyi kifayət qədər az dəyişir. L_a , L_s , T zonaları üçün yükdaşıyıcıların konsentrasiyası və yürüklük komponentlərinin qiymətləri, müxtəlif dərəcədə qalayla aşqarlanmış $Bi_{0,88}Sb_{0,12}$ monokristalları üçün Fermi səth modelinə müvafiqdir. Kinetik parametrlərin alınmış qiymətlərinin təhlilində hər şeydən öncə qeyd etmək lazımdır ki, hətta qalayla maksimal dərəcədə aşqarladıqda belə “birzonalı” vəziyyət əldə etmək mümkün olmur.

Tərkibdə 0,3 at.% qalay olduqda, elektronların konsentrasiyası dəşiklərin konsentrasiyasından 3 tərtib az olur. Lakin, yürüklükdə nisbi artım səbəbi ilə qalvanomagnit hadisələrində hətta elektronların belə kəmiyyəti də əhəmiyyətli rol oynayır.

Beləliklə, elektron komponenti olmadan, maqnit müqavimətinin komponentlərinin təqribi qiymətlərini izah etmək mümkün deyil.

Növbəti maraqlı fakt ondan ibarətdir ki, bismut–stibium ərintilərinin enerji spektrinin dəyişməsi sxeminə müvafiq olaraq, enerji şkalasına əsasən L ekstremumunun səviyyəsi T ekstremumu səviyyəsindən yuxarıda yerləşməsinə baxmayaraq aşqarlanmamış ərintilərdə olduğu kimi, müxtəlif qalay tərkibli ərintilərdə T ekstremumunda dəşiklərinin konsentrasiyası L ekstremumunda dəşiklərin konsentrasiyasından 8–10 dəfə yüksəkdir. Beləliklə, $Bi_{0,88}Sb_{0,12}$ ərintilərində bu ərintiləri qalayla aşqarlamaq yolu ilə “birzonalılıq” vəziyyətinə keçid bismutda olduğundan daha az əlçatandır. $Bi_{1-x}Sb_x$ ərintilərində yükdaşıyıcıların enerji spektrinin stibiumun konsentrasiyasından asılılıq sxeminə əsasən $0,15 < x < 0,22$

tərkibli yarımkəçirici ərintilər üçün minimal energetik yarıq L_a və Σ termləri ilə təyin olunur. Lakin, aşqarlanmamış ərintilərdə qalvanomaqnit effektlərinə L_a elektronlarının qatqısı o qədər böyükdür ki, valent zonasının strukturunu tədqiq etmək mümkün deyil. Buna görə də yuxarıda verilmiş intervalda stibium tərkibi və aşqarlayan qarışıq olan qalayın konsentrasiyasını götürməklə, “birzonalı” $Bi_{1-x}Sb_x$ ərintiləri almaq olar. Hansı ki, yükdaşıyıcıları yalnız aşqar keçiricilik oblastında Σ zonasının dəşikləridir. $Bi_{0,84}Sb_{0,16}$ və $Bi_{0,84}Sb_{0,16}-0,1\text{at.}\%Sn$ ərintiləri üçün $T=77\text{K}$ temperaturda qalvanomaqnit əmsallarının eksperimental və hesablanmış qiymətləri cədvəl formasında verilmişdir. $Bi_{0,84}Sb_{0,16}-0,1\text{at.}\% Sn$ ərintiləri üçün qalvanomaqnit əmsalları digər tədqiq edilən ərintilərdən çox fərqlənir: müqavimətin anizotropiyası $A=\rho_{33}/\rho_{11}=1,18$, Hall əmsalı $c=R_{123}/R_{231}=0,34$, maqnit müqaviməti $K=\sigma_{33,11}/\sigma_{11,33}=2,47$ –ə bərabərdir.

Aşqarlanmamış $Bi_{0,84}Sb_{0,16}$ ərintiləri üçün $A = 0,9$, $c=0,035$ və $K=31$. Qeyd edək ki, yekun nəticə bütün aşqarlanmamış yarımkəçirici $Bi_{1-x}Sb_x$ ərinti tərkibləri üçün xarakterikdir. Bu dəşik ellipsoidlərinin elektron ellipsoidlərindən daha az anizotrop olmasını hesab etməyə əsas verir. Çünki, aşqarlanmamış ərintilərdə daşınma hadisələrində əsas rolu elektronlar oynayır. Lakin, anizotropiya dərəcəsi və “birzonalı” vəziyyətin əldə olunması daha öncəkinə analogi olaraq, daşıyıcıların konsentrasiyalarının və zona parametrlərinin müvafiq hesablamalarını apardıqdan sonra təyin olunmalıdır. Parametrlərin hesablama nəticələri verilmişdir. Bu parametrlərə əsasən qalvanomaqnit əmsallarının hesablanmış və eksperimental qiymətləri cədvəldə müqayisə olunmuşdur. Zona parametrlərinin alınmış nəticələrinin təhlili, hər şeydən əvvəl bu faktları müəyyənləşdirir: qalayla aşqarlamaq yolu ilə birzonalı vəziyyətin əldə olunması, həmçinin, dəşik ellipsoidlərinin meyletməsi elektron ellipsoidlərinin meyletməsindən kifayət qədər çoxdur.

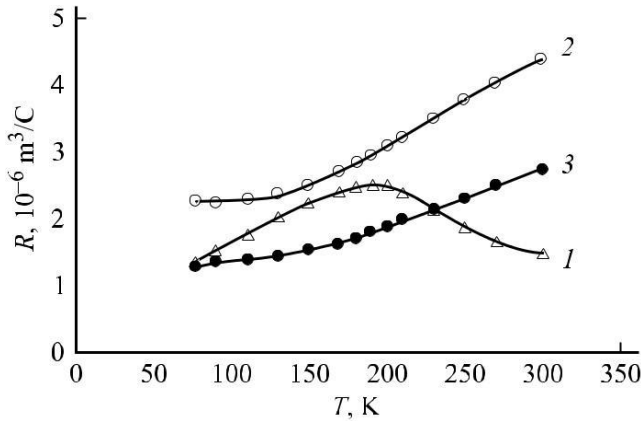
Növbəti maraqlı nəticə ondan ibarətdir ki, dəşik ellipsoidləri elektron ellipsoidlərindən daha az anizotropdurlar. Beləki, elektronların yüyürülüklərinin nisbəti $\mu_2/\mu_1=0,009$, dəşiklərin isə $v_2/v_1= 0,05$ –ə bərabərdir. Qeyd edək ki, izotrop relaksasiya

müddəti ehtimalında yürlüklüyün tərs qiyməti elektron və deşiklərin izoenergetik səth formasını xarakterizə edir. Qalvanomaqnit əmsalları və parsial yürlüklük arasında nisbət Brilluen zonasının nə T, nə də L ekstremumlarına xarakterik deyil. Buna görə də ehtimal olunur ki, tədqiq olunan ərinti üçün valent zonasının ekstremumu Brilluen zonasının Σ nöqtəsində yerləşir.

Tellurla aşqarlanmış $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ ərintiləri üçün xüsusi müqavimətin, Holl əmsalının və maqnit müqavimətinin temperatur asılılıqları qurulmuşdur. $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ -0,01 at.% Te ərintiləri üçün müqavimət temperaturdan asılı olaraq monoton artır və əmsalların və maqnit müqavimətinin temperatur asılılıqları hər iki əmsal üçün eyni olan və 190K-ə uyğun gələn maksimumlara malikdir. $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ -0,2at.%Te ərintisində bu komponentlər temperaturdan asılı olaraq monoton artır. 0,1 at.%Te-dan artıq tərkibə malik tərkiblər bütün temperatur intervalında bir tip yükdaşıyıcılara malikdir². Maqnit müqavimətinin və Holl əmsalının qeyri-adi gedışı xüsusi maraq kəsb edir. R-in analogi temperatur asılılığı n-tip keçiriciliyə malik digər yarımkeçiricilərdə də müşahidə olunmuşdur. Keçiricilik zonasında kvazilokal səviyyələr mövcud olduqda, onlar, müəyyən olunmuş temperaturdan başlayaraq, yükdaşıyıcılar üçün tələ rolunu oynayırlar. Eyni zamanda daşıyıcıların konsentrasiyası temperaturun artması ilə azalır, R və $\Delta\rho/H^2$ temperaturdan asılı olaraq artır. Bu kvazilokal vəziyyətlərin ionlaşması üçün kifayət edən enerji əldə olunduqda isə, konsentrasiya yenidən artır və müvafiq olaraq, R və $\Delta\rho/H^2$ azalır. Kvazilokal aşqar səviyyələrinin səciyyəvi xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, kvazilokal səviyyəyə və ya kvazilokal vəziyyətlər zolağına müvafiq Fermi enerji səviyyəsinə çatdıqda, konsentrasiya stabilləşməlidir. Yəni, sonrakı aşqar əlavə olunması və ya temperaturun artması, sərbəst elektronların konsentrasiyasının artmasına gətirib çıxarmalıdır və Fermi səviyyəsi kvazilokal səviyyə yaxınlığında stabilləşməlidir. Lakin, bizim təcrübələrdə elektronların

² Гасанова, Х.А., Таиров, Б.А. Факторы Холла и магнитосапротивление многокристаллического сплава $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ легированным Те // Физика низких температур, –2015. т.41, №4, –с.389–392.

konsentrasiyası geniş diapazonda (10^{16} - 10^{20}sm^{-3}) dəyişir. Buna görə də maqnit müqavimətinin və Holl əmsalının temperatur asılılıqlarını izah etmək üçün yuxarıda yerləşən alt zonanın təsirini nəzərə almaq lazımdır. Yuxarıda yerləşən alt zona mövcuddursa, temperaturun artması ilə Fermi səviyyəsinin qiyməti keçiricilik zonasının minimumları arasındakı energetik yarığın qiymətinə çatdıqda, yəni daşıyıcılar böyük effektiv kütləyə və buna müvafiq olaraq da kiçik yürüklüyə malik olduqları yuxarıda yerləşmiş alt zonaya tam düşdükdə, ağır elektronların ρ_{ijk} və $\rho_{ij,kl}$ -ə qatqısı az olur və elektronların ikinci zonaya keçməsi nəticəsində effektiv konsentrasiya azalır və Holl və maqnit müqaviməti əmsalları artır.

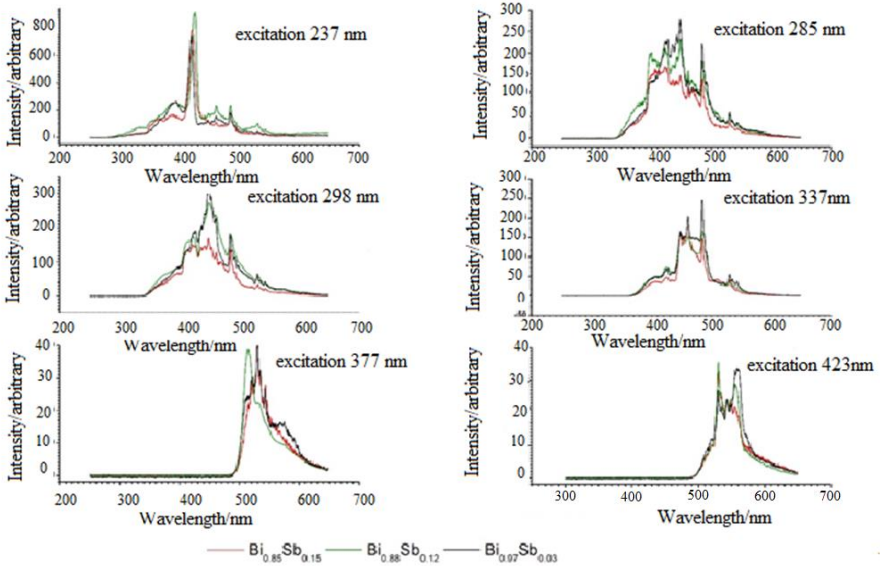


Şəkil 2. Holl əmsalının temperatur asılılıqları. 1 — $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12} + 0.01 \text{ at\% Te}$, 2 — $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12} + 0.1 \text{ at\% Te}$, 3 — $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12} + 0.2 \text{ at\% Te}$.

Dissertasiyanın dördüncü fəslində $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ -in luminessensiya tədqiqatlarının nəticələri, triqonal ox boyunca kristal qəfəsin təhrifini nəzərə alan modellərə əsaslanaraq, kooperativ Yan-Teller psevdoeffekti və titrəmli qarşılıqlı təsir, luminessensiya spektrlərinin interpretasiyası və xüsusiyyətlərinin təhlili verimişdir.

$\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}$, $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ və $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ ərintilərinin 300K temperaturda, 250nm-dən 650 nm-ə qədər diapazonda luminessensiya spektrləri (237 nm (5,231 eV), 285 nm (4,35 eV), 298

nm (4,16 eV), 337 nm (3,697 eV), 377 nm (3,299 eV), 423 nm (2,931 eV) dalğa uzunluğu aralığında otaq temperaturunda Monk-Giddison monoxromatorlu LS-55 spektrometrində tədqiq edilmişdir. Qeyd edək ki, həyacanlandırma mənbəyi kimi şualanma gücü 150Wt olan ksenon lampadan istifadə edilmişdir. Dalğa uzunluğunun verilmə dəqiqliyi $\pm 1,0\text{nm}$, dalğa uzunluğunun əks etdirmə dəqiqliyi $\pm 0,5\text{nm}$ -dir. Lorens-Qauss paylanması yolu ilə spektrlərin təhlili şəkil və cədvəl şəklində verilmişdir.



Şəkil 3. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ərintilərinin lüminessensiya spektrləri

Qeyd edək ki, Bi və Sb üçün yarımmetal davranışa səbəb olan üst-üstə düşən zolaqların təbiəti müxtəlifdir. Təcrübi olaraq sübut olunmuşdur ki, tərkibində bismut olan kristallik mühitlərin əksəriyyətinə qırmızı və göy lüminissensiya zolağı xarakterikdir. Tərkibində bismut olan materialların tədqiqinə dair toplanmış məlumatların təhlilindən, demək olar ki, göy və qırmızı lüminessensiya zolağının olmasına aid eksperimental sübutlar var: göy lüminessensiya ($\approx 400\text{-}500\text{nm}$) Bi^{3+} ionunun enegetik səviyyələri

arasında ${}^3P_1 \rightarrow {}^1S_0$ elektron keçidi nəticəsində yaranır, bununla bərabər qırmızı lüminessensiyanın yaranması Bi^{2+} ionu və ${}^2P_{3/2}(1) \rightarrow {}^2P_{1/2}$ keçidi ilə əlaqəlidir.

$Bi_{0.97}Sb_{0.03}$, $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ və $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ ərintilərində 300 K temperaturda 250nm–dən 650 nm–ə qədər diapazonda fotolüminessensiyanın eksperimental spektrlərindən alınmış elektron keçidlərinin enerjilərinin və psevdopotensial metodu ilə zona quruluşunun nəzəri hesablamalarının (enerji spektrlərini dəqiq qurmaq üçün, eksperimental olaraq tədqiq olunan optik udma spektrlərinə əsasən Bi və Sb psevdopotensiallarının yaxınlaşmasından istifadə olunmuşdur) müqayisəsi onlar arasında ilk yaxınlaşmadan yaxşı bir uzlaşma olduğunu göstərdi.

Bismut aşqarı ilə aşqarlanmış qeyri-üzvi birləşmələrin lüminessensiyasına aid əksər tədqiqatlarda əsas diqqət yük daşınması ilə daxili konfigurasiyalı d–d keçidlərə ayrılmışdır. Daxili konfigurasiyalı p–p keçidlər p–təbəqəsi qismən dolmuş sabit ionların olmaması səbəbindən praktiki olaraq tədqiq olunmamışdır.

Bi^{2+} və aşqar qarışığın lüminessensiyası $6s^26p^1 Tl^0$, Pb^+ p–p keçidi ilə izah olunmuşdur. $6s^26p^1(Bi^{2+})$ elektron konfigurasiyasında spin–orbital əlaqəsi hesabına iki vəziyyət mümkündür: əsas vəziyyət ${}^2P_{1/2}$ və həyacanlanmış vəziyyət ${}^2P_{3/2}$. Həyacanlanmış vəziyyət iki energetik səviyyəyə bölünür: əgər ion aşağı simmetriya koordinasiyalı yerdə yerləşirsə, ${}^2P_{3/2}(1)$ və ${}^2P_{3/2}(2)$. Spin–orbital əlaqəsi atom nömrəsi ilə güclü sürətdə artdığından, ağır elementlərdə p–p keçidlər spektrin görünən və yaxın infraqırmızı oblastlarında yerləşirlər.

Cədvəl 1–də bismut və stibiumun zona quruluşunun psevdopotensial hesablamalarına müvafiq lüminessensiyasının maksimumları qırmızı rənglə qeyd olunmuşdur. Lakin, gözlənilmədiyi kimi, $Bi_{0.97}Sb_{0.03}$, $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ və $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ birləşmələrinin fotolüminessensiya spektrləri "göy" (400–500) nm və "qırmızı" (590–640) nm spektral zolaqların parıldaması və onların örtülməsi ilə əlaqəli keçidlərin daha mürəkkəb mənzərəsinə malikdir³. Elektron keçidlərinin müşahidə olunan mənzərəsi bismut və stibiumun Sn, Pb

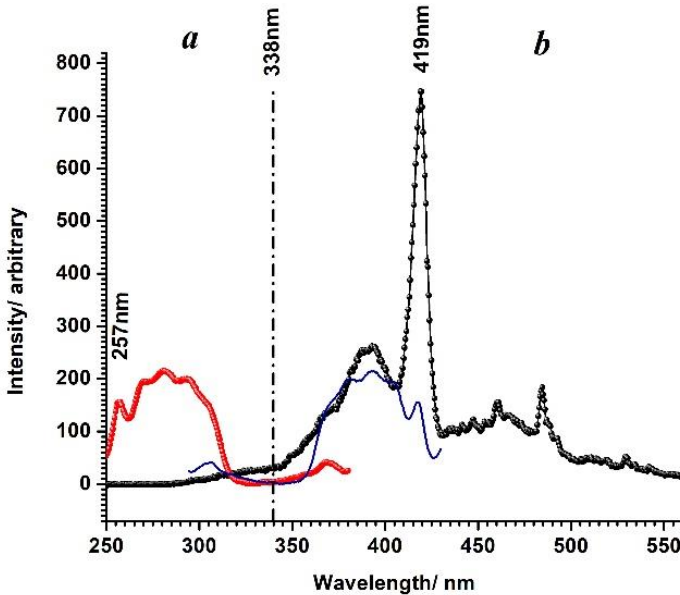
³ Mehdiyev, T.R., Gasanova, Kh. A. Absorption and luminescence in $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys // –Baku: Azerbaijan Journal of Physics, –2019, 25(4), –p.14–21

və Te, kimi ağır p–elementlər sırasına aid olması ilə əhəmiyyətli dərəcədə mürəkkəbləşir. Çünki, bu tip elementlər özlərinin bəzi birləşmələrində (məsələn, $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$) qrup nömrələrindən iki vahid az valentlik göstərilir. İnert cüt effekti adlanan bu hadisə metal ionlarının koordinasiya mühitinin pozulmalarında struktur olaraq müşahidə olunur. Üçvalentli Bi^{3+} və Sb^{3+} ionları $[\text{Xe}] 4f145d106s2$ və $[\text{Kr}] 4d105s2$ elektron koordinasiyalarına malikdir. Yəni, $6s_2$ cütü sferik orbitalda olmaması səbəbindən, ion mərkəzinə (hibridləşmiş sp–orbitalının yaranmasında olduğu kimi) nisbətən asimmetrik olaraq yerini dəyişdiyi üçün "stereokimyəvi aktiv" olur. Nəticədə müxtəlif tip struktur pozulmaları baş verə bilər. Digər tərəfdən, bismut və stibium ionlarının radiuslarına əsasən verilənlərin təhlilindən, asanlıqla onlar arasında böyük fərq olduğunu hiss etmək mümkündür.

Nəticə etibarlı ilə, təmiz başlanğıc komponentlərinə nisbətdə $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ bərk məhlullarının quruluşunun həndəsi təhrifləri, simmetriyanın azalmasına, cırlaşma vəziyyətlərinin parçalanmasına yəni, Yan–Teller effektinə və ya seçilmiş qarşılıqlı əlaqələrin hesaba alınması ehtiyacına gətirib çıxarır. Qeyd edək ki, Yan–Teller deformasiyasına məruz qalmış kristalların mümkün nöqtə qruplarının tam təsnifatı ədəbiyyatda verilmişdir. Nüvə ilə elektronların Yan–Teller (və ya seçilmiş) qarşılıqlı əlaqəsini təsvir etmək üçün, tez–tez potensial enerjinin səthlərinin formalizminə müraciət edilir.

Şəkil 4–də $\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}$ bərk məhlulunun (yarımmetal vəziyyət) həyəcanlanma spektri (a) və lüminessensiyası (b) verilmişdir. Levşinin güzgü simmetriyası prinsipinə əsasən, 257nm həyəcanlanma spektrinin spektral xəttinin maksimumu, 338nm nişanlamasına nəzərən, 419nm lüminessensiya maksimumuna uyğundur. Nişana nəzərən tərs güzgü çevrilməli həyəcanlanma spektri (göy rənglə işarələnmiş) lüminessensiya spektri ilə uzlaşır. Əgər ehtimal etsək ki, 257nm (4,82eV) maksimumu $^1\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$ Bi^{3+} keçidinə uyğun gəlir, onda bu halda 419nm (2.96eV) lüminessensiya spektri maksimumuna uyğun gələn $^3\text{P}_1 \rightarrow ^1\text{S}_0$ keçidi bismutun zona quruluşunun psevdopotensial hesablamalarına müvafiq olaraq, $\text{L}_s \rightarrow \text{L}_a$ simmetriya xəttində baş verir. Müşahidə olunan axın irəliləməsi 261nm–ə bərabərdir. Qeyd edək ki, $^3\text{P}_1 \rightarrow ^1\text{S}_0$ keçidi

yalnız $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ -in bütün tərkiblərində deyil, həmçinin, 298nm (4.16eV) və 337nm (3.678eV) şüalanma ilə həyəcanlandıqda lüminessensiya spektrlərində də müşahidə olunur. Çünki, $\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}$ -ün lüminessensiya spektrində 285nm (4,35eV), 298nm (4.16eV) və 337nm (3.678eV) həyəcanlanma zamanı təsdiq olunan, analogi, lakin, kiçik intensivlikli quruluş müşahidə olunur. Onların bir-birlərinə nəzərən yerləşmə ardıcılıqları uyğun gəlir: 1–2 spektrləri arasında 190meV; 2–3 spektrləri arasında (və ya 1–3 spektrləri arasında 270meV) 80 meV, hansı ki, rəqsi tezlik qiymətləri yaxındır və tamlıqla kooperativ YTPƏ, həmçinin, Con–Payerls keçidinin mövcudluğuna dəlalət edə bilər. Analogi struktur $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ -in spektrlərində 377nm və 423nm həyəcanlanma zamanı aşkar olunur. Onu da nəzərə almaq lazımdır ki, bütün tədqiq olunan tərkiblər üçün lüminessensiya spektrləri xaricən oxşardır.



Şəkil 4. $\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}$ bərk məhlulunun (yarımmetal vəziyyət) həyəcanlanma spektri (a) və lüminissensiyası (b)

Сәдвәл 1. $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, $\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}$, $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ вә $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ әрнтәләрндә 300 К температурда 250nm-650nm diapazonda lüminessensiya spektrләрндә мүшәhidә olunan elektron keçidlәрinin psevdopotensial metodu vasitәsilә nәzәri hesablamalarla müqaisәsi

Accounting		$\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$	$\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$	$\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}$
4	5			
		624,6		
		603,7	606,2	
		587,7	597,2	
		571,9	571,7	573,2
		565,4		568,2
		553,7		558,2
		549		549,0
		543,3	543,9	542,7
		534,8		534,6
		530,2	530,8	530
		519,6	519,8	520,3
		512,6	513,5	513,6
498,6	496,6	503	502,3	
492,7		491,6	491,9	491,9
		484,7	485,3	485,4
		469,1	466,8	467,6
		460,9	460,9	460,9
		446,6	448,4	447,8
		439,4	442,2	435,8
		428,9	425,5	426
420,6		421,4	423,3	419,3
	417,8	410,6	408,5	409,3
		397,2	395,5	396
387,7	371,4	382,2	377,5	384,9
362,7	362,7	364,4	366,4	372,7
343,5	346,4	349,6	353,5	350,0
			334,5	332,6

⁴ Абрикосов А.А., Фальковский Л.А. Теория электронного энергетического спектра металла с решеткой висмута // ЖЭТФ, 1962, т.43, с.1089-1101

⁵ Абрикосов А.А. Диэлектрическая проницаемость металлов типа висмута в инфракрасной области // ЖЭТФ, 1963, т.44, №6, с.2039-2057

$\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ -in lüminessensiya spektrlərində (şək.3) Bi və Sb-un lüminessensiya spektrlərinin üst-üstə düşmələrinin dəyişməsinə asanlıqla görmək mümkündür. Əgər, “göy” lüminessensiyanın mövcudluğu şübhə doğurmursa, onda zəif “qırmızı” lüminessensiyanın olması yalnız Bi və Sb ikivalentli vəziyyətdə olduqda mümkündür. Əlbəttə, ikivalentli Bi^{2+} və Sb^{2+} ionlarının nöqsanlı və ya aşqarlı mərkəzlərinin kiçik konsentrasiyalarının mövcudluğunu fərz edə bilərik. Xüsusən də cədvəl 1-dən göründüyü kimi, bunun üçün müvafiq keçidlər seçilə bilər. Lakin, bu tədqiqatların məqsədi yalnız $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ -də YTPe-nin kooperativ təsirini aşkar etmək olmuşdur.

Təəccüblüdür ki, elmi nəşrlərdə $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ərintilərinin görünən və ultrabənövşəyi oblastlarda elektron keçidləri ilə əlaqəli lüminessensiya spektrləri barədə məlumatlar demək olar ki, mövcud deyildir.

Lüminessensiya spektrində eksperimental olaraq aşkar edilmiş bütün elektron keçidləri cədvəl 1-də verilmişdir.

NƏTİCƏ

1. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ bərk məhlullarının $x \leq 15\text{at}\%$ tərkiblərinin hamısında elektron sıxlığı Brilluen zonasının 3 ellipsoidində, $x > 15\text{at}\%$ tərkiblərində isə Brilluen zonasının 6 ellipsoidində cəmlənmişdir. Deşik konsentrasiyasına uyğun olan elektron sıxlığı Brilluen zonasının T və Γ -T vadilərində maksimumdur.
2. $0,16 \leq x \leq 0,25$ tərkibli $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ bərk məhlullarında dəşiklərin Fermi səthi ehtimalla Brilluen zonasının Σ nöqtəsində yerləşən ümumi tipli 3 ellipsoidlə təsvir edilmişdir. $0 \leq x \leq 0,25$ tərkiblərində stibiumun miqdarı artdıqda elektron ellipsoidlərinin meylətmə bucağı azalır. $0,16 \leq x \leq 0,25$ tərkibli bərk məhlullarda dəşik ellipsoidləri $0 \leq x \leq 0,16$ tərkiblərindəki dəşik ellipsoidlərindən az anizotropdurlar.
3. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ bərk məhlullarında elektronların, yüngül və ağır dəşiklərin konsentrasiyalarının temperaturdan asılılığı və həmçinin Fermi səviyyəsinin enerjiləri dəşiklərin ağır və

yüngül deşiklərin zonaları arasında paylanması, deşik T-zonasının elektronların zonası ilə örtülməsi və yükdaşıyıcıların valent zonadan keçirici zonaya keçidi ilə şərtlənir.

4. Fermi enerjisi asılılığının başlanğıc hissəsi ağır (BZ-T nöqtəsi) və yüngül (BZ-L nöqtəsi) deşik zonaları arasında deşiklərin yenidən paylanması ilə şərtləndirilmişdir.
5. Elektron zonasının T-zonası ilə örtülməsinin artması ilə Fermi səviyyəsi böyüyür. Maksimumun yaranması konkurent proseslə-qadağan olunmuş zonanın eninin artması ilə bağlıdır.
6. Deşik T-zonasının, elektronların zonası ilə üst-üstə düşmə oblastında elektronların konsentrasiyası, temperatur artımının başlanğıc hissəsində onların örtülməsinin artması ilə artır. Daha sonra temperaturun artması ilə deşik zonasının elektron zonasından uzaqlaşması baş verir. Elektronların konsentrsiyalarının sonrakı artımı valent elektronlarının keçiricilik zonasına adi istilik sıçrayışı ilə əlaqəlidir.
7. Temperatur artımının başlanğıc hissəsində L nöqtəsində yarığın kiçilməsi ilə yüngül deşiklərin konsentrasiyası artır və sonra isə deşik zonasının elektron zonasından uzaqlaşması ilə konsentrasiya azalır. Konsentrasianın sonrakı artımına səbəb elektronlarının valent zonasından keçiricilik zonasına istilik sıçrayışıdır.
8. Homogen Bi-Sb bərk məhlullarının kristal quruluşunun təhrifi luminessensiya spektrlərində maksimumların sürüşməsi və parçalanmasında müşahidə olunur.
9. $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ -in bütün tərkiblərinin hamısında həyacanlanma və luminessensiya spektrləri onlarda kooperativ Yan-Tellerin effektivinə uyğun gələn vibron quruluşun mövcudluğunu göstərir.

DİSSERTASIYANIN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİNİN ƏKS OLUNDUĞU MƏQALƏ VƏ TEZİSLƏR

1. Tairov, B.A. The peculiarities of scattering mechanism of charge carries in solid solutions $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x=0,3; 0,75$) at $T=77\text{K}$ / B.A Tairov, V.A. Abdurakhmanova, M.A. Aslanov, [et. al.] // –Baku:Azerbaijan Journal of Physics, –2011, 17(4), –p.34–37.
2. Таиров, Б.А., Гасанова, Х.А., Асланов, М.А. Междолинное рассеяние электронов в $\text{Bi}_{0,92}\text{Sb}_{0,08}$ // “Fizikanın Aktual Problemləri” VII respublika elmi konfransı, –Bakı: –26 noyabr, –2012, –с.61–62.
3. Yuzbashov, E.R., Tairov, B.A., Gasanova, Kh.A. Temperature dependence of thermoelectric power for $\text{Bi}_{0,94}\text{Sb}_{0,06}$ in the temperature range of 77–300K and Fermi energy of electrons: Pseudoparabolic model // Beynəlxalq konfrans “Boyük miqyaslı tədqiqat layihələri – 2012” Yüksək texnologiyalar üçün materialşünaslıq və informatika. –Bakı:– 09–12 noyabr, – 2012, –p.32–33.
4. Tairov, B.A., Gasanova, Kh.A. E33–7. Growth of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ solid solution single crystals doped by Tin and Tellurium // – Istanbul:Eurasian Universities Union Academic Journal, Winter 2012–2013, 1(2), –p.2147 – 2149.
5. Yuzbashov E.R., Tairov B.A., Gasanova Kh.A. Analysis of temperature dependence of kinetic coefficients of $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ alloy // –Baku: Azerbaijan Journal of Physics, 2013, 19(2), – p.75–77.
6. Yuzbashov, E.R., Tairov, B.A., Gasanova, Kh.A. Temperature dependence of thermoelectric power for $\text{Bi}_{0,94}\text{Sb}_{0,06}$ in the temperature range of 77–300 K and Fermi energy of electrons: pseudoparabolic model//–Baku: Transactions of Azerbaijan National Academy of Sciences Physics and Astronomy series,–2013, 33(5),–p.31–37.
7. Таиров, Б.А., Гасанова, Х.А. Галваномагнитные свойства легированных твердых растворов висмут–сурьма // –Баку: Проблемы энергетики, –2013. №4, –с. 55–61.

8. Tairov, B.A., Energy spectrum of charge carriers in single crystal alloys $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,25$) at temperature $T=77-300\text{K}$ / Bakir Tairov, Khayala Gasanova, Vusala Eminova [et. al.] // –Baku:Azerbaijan Journal of Physics,–2014, 20(1), –p.21–25.
9. Tairov, B.A., Gasanova, Kh.A. Energy spectrum and scattering mechanism of charge carriers in monocrystalline alloys $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0,25$) in the temperature range $T=77-300\text{K}$ //–Baku: Azerbaijan Journal of Physics, –2014, 20(2),–p. 12–20.
10. Гасанова, Х.А., Таиров, Б.А. Факторы Холла и магнитосопротивление многокристаллического сплава $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ легированным Те // Физика низких температур, –2015. т.41, №4, –с.389–392.
11. Гасанова, Х.А. Электрические и гальваномагнитные свойства сплавов Bi–Sb в интервале температур 77–300K / Х.А. Гасанова, Б.А.Таиров, М.А. Асланов [и др.] // –Баку: Проблемы энергетики –2015. №1, –с. 54–57.
12. Gasanova, Kh.A., Tairov, B.A. Hall and magnetoreistance factors of $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ single crystal doped with Te // Low Temperature Physics,–2015, 41(4),–p. 300-302.
13. Таиров, Б.А., Гасанова, Х.А., Селим-Заде, Р.И. Температурная зависимость коэффициента Холла в системе $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x=0,06, 0,12$) //–Россия: Физика и Техника Полупроводников,–2016. т.50, №8,–с.1016–1020.
14. Tairov, B.A., Gasanova, X.A., Selim-zade, R.I. Temperature Dependence of the Hall Coefficient in the $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ System ($x=0,06, 0,12$) // Semiconductors,– 2016, 50(8), –p. 996-1000.
15. Həsənova, X.Ə. $\text{Bi}_{0,97}\text{Sb}_{0,03}$ ərintisində udulma və lüminessensiya spektrləri //–Bakı: Azərbaycan Fizika Jurnalı – 2019. c. XXV, №4,–s.24–29.
16. Mehdiyev, T.R., Gasanova, Kh. A. Absorption and luminescence in $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloys // –Baku:Azerbaijan Journal of Physics, –2019, 25(4), –p.14–21.
17. Həsənova, X.Ə. $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ ərintisində udulma və lüminessensiya spektrləri // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika və Astronomiya bölməsi, – 2020. c.XL, №2, –s.188–193.

18. Мехтиев, Т.Р., Гасанова, Х.А. Спектры поглощения и люминесценции в $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ // Международной научно–практической конференции «Университетская наука: актуальные вопросы, достижения и инновации» Пенза: – 30 сентябрь, –2020, –с.10–14.

Dissertasiyanın müdafiəsi “_____” _____ 2021-ci il tarixində saat _____-da Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Az-1143, Bakı şəhəri, Hüseyn Cavid pr. 131

Dissertasiya ilə AMEA-nın Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat “_____” _____ 2021-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 23.09.2021
Kağızın formatı: A5
Həcm: 37649
Tiraj: 100 nüsxə