

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

[Ce(Sm)]_xSn_{1-x} Se SİSTEMİNİN MÜRƏKKƏB YARIMKEÇİRİCİ KRİSTALLARINDA KİNETİK HADİSƏLƏR

İxtisas: 2220.01 – Yarımkəçiricilər fizikası

Elmi sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Vəfa Ələfsər qızı Abdurahmanova**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı-2022

Dissertasiya işi, Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunun
“Bionanostrukturlar fizikası” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbəri: Fizika elmləri doktoru, dosent
Nadir Məmməd oğlu Abdullayev

Rəsmi opponentlər: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Rauf Mədət oğlu Sərdarlı

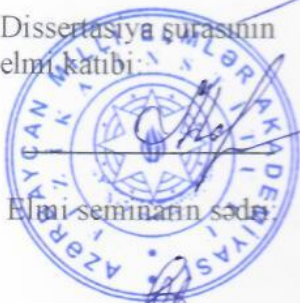
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Həmzə Səməd oğlu Seyidli

Fizika elmləri doktoru, dosent
Nadir Allahverdi oğlu Abdullayev

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya
Komissiyasının Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu 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,
dosent
Tələt Rzaqulu oğlu Mehdiyev

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Son zamanlar elm və texnikanın inkişafı bərk cisimlər fizikası qarşısında müasir elektronika texnologiyalarının tələbatını ödəyə bilən yeni mürəkkəb birləşmə və bərk məhlulların kompleks şəkildə öyrənilməsini problem kimi qoyur. Bu yeni alınmış maddələr ekoloji və iqtisadi cəhətdən səmərəli olmalıdır. Bu mənada fizikanın üstünlük verilən sahələrindən biri də defektli kristal və mürəkkəb elektron quruluşuna, yüksək termoelektrik effektivliyi əmsalına malik, sərt istismar şəraitinə davamlı olan yarımkeçiricilərin tədqiqidir. Yarımkeçirici xassələrə malik olan birləşmələrin fiziki xassələrinin tədqiq edilməsi, temperatur, təzyiq, radiasiya kimi xarici təsirlərlə bu fiziki xassələrin dəyişmə mexanizminin müəyyən edilməsi, müasir kondensə olunmuş hal fizikasının əsas tədqiqat istiqamətlərindən biridir. Uzun illər ərzində aparılmış elmi-tədqiqat işlərinin nəticələrindən məlumdur ki, yarımkeçirici birləşmələrin kristallarında mövcud olan defektlər onların fiziki xassələrinə əsaslı təsir göstərir. Ona görə də müxtəlif şəraitlərdə və ion radiusları müxtəlif olan element atomları ilə qismən əvəzləmələrin aparılması yolu ilə yarımkeçirici birləşmələrin və onların bərk məhlullarının fiziki xassələrinin dəyişmə mexanizminin müəyyən edilməsi çox vacibdir. Sm və Ce atomlarının ion radiusları arasındakı fərq $Sm_{1-x}Ce_xSnSe_2$ birləşmələrinin fiziki xassələrində özünü göstərir.

Tədqiqatlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, Sn atomlarının qismən nadir torpaq elementləri (NTE) ilə əvəzləmələrinin aparılması nəticəsində fərqli fiziki xassələr göstərə bilən materialların alınması mümkündür. Məsələn, Sm elementi ilə qismən əvəzləmələrin aparılması ilə sintez edilmiş $(SnSe)_{1-x}(SmSe)_x$ ərintilərinin $77 \leq T \leq 700K$ temperatur oblastında tədqiqi göstərir ki, tərkibdə Sm atomlarının konsentrasiyası artdıqca bu yarımkeçiricidə xassələrin xarakteri dəyişir. $x > 0.25 \text{ mol\%}$ olduqda p -tip keçiricilik n -tip keçiriciliyə çevrilmiş olur.

Tədqiqatın obyektı və predmeti:

Tədqiqat obyektləri olaraq indiyə qədər tam öyrənilməmiş Ln-Sn-Se (Ln=Ce,Sm) sistemlərinin üçqat birləşmələri ($SmSnSe_2$,

CeSnSe₂) və Ln_xSn_{1-x}Se tipli (Ce_xSn_{1-x}Se, Sm_xSn_{1-x}Se) bərk məhlullarıdır.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri.

SnSe əsasında SmSnSe₂, CeSnSe₂ üçlü birləşmələri və Ce_xSn_{1-x}Se, Sm_xSn_{1-x}Se bərk məhlullarında istilik, elektrik və qalvanomaqnit xassələrin tədqiqi, praktik əhəmiyyət kəsb edən yeni yüksək termoelektrik effektivinə malik materialın alınmasıdır.

Dissertasiya işinin mövzusu və məqsədinə uyğun olaraq aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

1. SnSe, SmSnSe₂, CeSnSe₂ birləşmələri və Ce_xSn_{1-x}Se, Sm_xSn_{1-x}Se bərk məhlul kristallarının alınması üçün texnologiyanın seçilməsi;

2. Sintez edilmiş SnSe, SmSnSe₂, CeSnSe₂ birləşmələri və Ce_xSn_{1-x}Se, Sm_xSn_{1-x}Se bərk məhlulları kristallarında rentgenfaza analizinin aparılması, alınan nəticələrin fiziki-kimyəvi təhlili əsasında qəfəs parametrlərinin təyin edilməsi;

3. Tədqiq edilən nümunələrin (SnSe, SmSnSe₂, CeSnSe₂, Ce_xSn_{1-x}Se, Sm_xSn_{1-x}Se) geniş temperatur intervalında kinetik parametrlərinin təyini;

4. Alınan SmSnSe₂, CeSnSe₂ birləşmələri və Ce_xSn_{1-x}Se, Sm_xSn_{1-x}Se bərk məhlullarının keçiricilik tipinin dəqiqləşdirilməsi və praktik əhəmiyyət kəsb edən tərkiblərin təyin olunması;

Tədqiqat metodları:

Bricmen-Stokbarger metodu ilə tərkiblərin monokristalları göyərdilmişdir. Alınmış kristalların quruluşlarının təyin edilməsi üçün otaq temperaturunda və normal şəraitdə rentgen difraksiyası metodu ilə quruluş faza analizləri aparılmışdır. Dissertasiya işinin məqsədinə uyğun olaraq Diferensial termik analiz, Rentgen quruluş analizi, D8 ADVANCE tipli difraktometr və Perkin Elmer STA6000 Kalorimetr cihazlarından, çoxfazlı sistemlər üçün riyazi hesablama metodlarından istifadə edilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan müddəalar:

1. SnSe birləşməsi əsasında olan sistemlərdə (SmSnSe₂, CeSnSe₂ və Ce_xSn_{1-x}Se, Sm_xSn_{1-x}Se) elektron proseslərində iki növ yükdaşıyıcıların iştirak etməsi.
2. SnSe əsasında bərk məhlullarda (Ce_xSn_{1-x}Se, Sm_xSn_{1-x}Se) NTE-

aşqar atomlarının donor aşqar mərkəzləri yaratması.

3. SnSe əsasında bərk məhlullarda ($Ce_xSn_{1-x}Se$, $Sm_xSn_{1-x}Se$) yükdaşıyıcıların səpilmə mexanizminin daxil edilən NTE (Ce, Sm) atomlarının təbiəti və miqdarından asılı olması.
4. Ln-Sn-Se ($Ce_xSn_{1-x}Se$, $Sm_xSn_{1-x}Se$) sistemlərində baş verən elektron və fonon proseslərində akustik fononlardan səpilmə ilə yanaşı polyarizəlanmış fononlardan səpilmənin də müəyyən rolunun olması.
5. $CeSnSe_2$ və $SmSnSe_2$ birləşmələrinin fiziki xassələrinin dəyişməsinin daxil edilən Ce və Sm metal atomlarının valentliyinin dəyişməsindən asılılığı.
6. $(SnSe)_{1-x}-(CeSe)_x$ sistemi bərk məhlullarında yüksək termoelektrik effektivliyinin alınması.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

1. Kompensasiya olunmuş yarımkeçirici kristallar ($SmSnSe_2$, $CeSnSe_2$, $Ce_xSn_{1-x}Se$, $Sm_xSn_{1-x}Se$) alınmış və göstərilmişdir ki, $(SnSe)_{99,80}-(CeSe)_{0,20}$ və $(SnSe)_{99,75}-(SmSe)_{0,25}$ tərkiblərinin keçiricilik tipi temperaturdan asılı olaraq p-dən n-ə dəyişir.
2. Göstərilmişdir ki, aşqarların konsentrasiyasından asılı olaraq $Ce_xSn_{1-x}Se$ kristallarında yükdaşıyıcıların səpilmə mexanizmi dəyişir. $T=77-100K$ temperatur intervalında yürüklük $\mu_H \sim T^{1,5}$, $T=180-310K$ oblastında $\mu_H \sim T^{-1,8}$, $T > 320 K$ oblastında isə $\mu_H \sim T^{-1,6}$ qanunu ilə dəyişir, yəni aşağı temperatur oblastında ionlaşmış aşqar və neytral atom mərkəzlərindən səpilmə, yuxarı temperatur oblastında isə akustik və optik fononlardan səpilmə üstünlük təşkil edir.
3. Müəyyən olunmuşdur ki, $Ce_xSn_{1-x}Se$, $Sm_xSn_{1-x}Se$ bərk məhlullarında aşqarın miqdarından asılı olaraq elektrik keçiriciliyi artır, termo e.h.q və istilikkeçirmə əmsalları isə qismən azalır.
4. $CeSnSe_2$ və $SmSnSe_2$ üçlü birləşmələrində aşqarın miqdarından asılı olaraq elektrik keçiriciliyinin azalması, istilik keçirmə əmsalının isə artdığı göstərilmişdir. Termo e.h.q-nin əmsalı üçün $CeSnSe_2$ birləşməsində azalma, $SmSnSe_2$ birləşməsində isə artma müşahidə olunmuşdur.
5. $Ce_xSn_{1-x}Se$ və $Sm_xSn_{1-x}Se$ bərk məhlullarında elektrofiziki

xassələrin tədqiqi ilə yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, aktivləşmə enerjisi təyin edilmişdir.

6. Bərk məhlullarda termik işləmə maddənin istilikeçiriciliyini yaxşılaşdırır, sıxlığını isə artırır.
7. $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{CeSe})_x$ sistemi əsasında $T=360-600\text{K}$ temperatur intervalında termoelektrik effektivliyi $Z \approx 2,7 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ tərtibində olan yeni material (termogenerator materialı) alınmışdır.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti:

Tədqiq etdiyimiz mürəkkəb yarımkeçirici kristallarında (SmSnSe_2 , CeSnSe_2 , $\text{Ce}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$, $\text{Sm}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$) müxtəlif hadisə və effektlər: iki növ yükdaşıyıcı, müxtəlif aşqar konsentrasiyasında və müxtəlif temperaturalarda tip keçiriciliyinin (p-dən n-ə) dəyişməsi müşahidə olunmuşdur. $\text{Ce}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$ və $\text{Sm}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$ sisteminin kristallarında yükdaşıyıcıların konsentrasiyası idarə olunandır və kristallarda Ce və Sm element aşqarlarının miqdarı artdıqca $T=77-800\text{K}$ temperaturunda elektrik keçiriciliyinin və istilik keçirmə əmsalının qiyməti nəzərə çarpan dərəcədə azalır. Tərkiblər üçün yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi və səpilmə mexanizmi araşdırılmışdır. Dissertasiya işində alınmış nəticələr mürəkkəb yarımkeçiricilərdə elektron və fonon proseslərinin məlum nəzəriyyələrlə uzlaşdırılmasında istifadə oluna bilər.

CeSe-SnSe və SmSe-SnSe sistem ərintilərinin tərkibini variasiya etməklə yük və istilik daşıyıcıları parametrlərini tənzimləmə qanunauyğunluğu müəyyənləşdirilmiş, CeSnSe_2 və SmSnSe_2 kimi yeni üçlü birləşmə alınmışdır, onların kristallik quruluşları, elementar qəfəs parametrləri təyin edilmişdir.

Sərt istismar şəraitində fiziki xassələrini saxlayan, radiasiyaya davamlı, orta temperatur oblastında yüksək termoelektrik effektivliyinə malik ərintilər termogeneratorların hazırlanması üçün çox əhəmiyyətli material kimi təklif olunur.

Tədqiqatın aprobeşiyası və tətbiqi:

Dissertasiya işində alınmış əsas nəticələri, respublika və beynəlxalq səviyyəli konfranslarda müzakirə edilmişdir:

- BDU-nun 95 illik yubileyinə həsr olunmuş “Fizikanın müasir problemləri” VIII Respublika konfransı (Bakı-2014).

- BDU-nun “Fizikanın Aktual Problemləri” Respublika Elmi konfransı (Bakı-2015).
- BMU-də (Qafqaz Universiteti) ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 92-ci ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların III Beynəlxalq Elmi Konfransı (Bakı-2015).
- BMU-də (Qafqaz Universiteti) ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 96-ci ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların III Beynəlxalq Elmi Konfransı (Bakı-2019).
- Кабардино-Балкарский Государственный Университет, Микро и нанотехнологии в электронике, Международной научно-технической конференции (Нальчик-2019)

Nəşrlər: Dissertasiya işinin mahiyyətini əks etdirən əsas nəticələr 11 məqalə (onlardan 4 ədədi SCI siyahısına daxil olan impakt faktorlu jurnalda) və 5 konfrans materialında dərc olunmuşdur.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı:

Dissertasiya işi Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunun “Bionano strukturlar fizikası” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Tədqiqatın strukturu və həcmi:

Dissertasiya işi girişdən, dörd fəsildən, əsas nəticələrdən, 120 sayda istinad edilmiş ədəbiyyat siyahısından ibarət olmaqla, 171 səhifədə şərh olunmuşdur. Dissertasiya işində 18 cədvəl, 61 şəkil vardır. Şəkillər cədvəllər və istinad edilmiş ədəbiyyat siyahısı istisna olmaqla, giriş 11692, I fəsil 22985, II fəsil 37252, III fəsil 70984, IV fəsil 85788, nəticə 1760, ixtisarla və şərti işarələr isə 467 işarədən ibarətdir. Dissertasiya işinin ümumi həcmi 231412 işarədən ibarətdir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə dissetrasiya işinin ümumi xarakteristikası, mövzusunun aktuallığı və perspektivləri, işin məqsədi, həll olunacaq əsas məsələlərin qoyuluşu, dissertasiya işi üzrə aparılmış tədqiqat nəticələri əsasında əldə edilmiş yeniliklər, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, onların nəzəri və praktiki əhəmiyyəti, aprobasiya və nəşr,

qeyd olunmuşdur.

Birinci fəsildə SnSe-LnSe (Ln=Sm,Ce) sistemlərində yaranan birləşmələrin kristal quruluşları haqqında olan ədəbiyyat materilları və temperaturdan asılı olaraq onlarda baş verən quruluş dəyişiklikləri fiziki-kimyəvi baxımdan təhlil edilmiş və mövzunun aktuallığı əsaslandırılmışdır.

İkinci fəsildə tədqiq edilən Ce-Sn-Se və Sm-Sn-Se sistemi bərk məhlulları və onların əsasında yaranan üçlü birləşmələrin alınması texnologiyası, fiziki-kimyəvi analizi və kinetik parametrlərin təyini üsulları haqqında məlumat verilmişdir. Obyektlərinin alınması üçün mövcud olan texnoloji üsulların şərhilə yanaşı alınan nümunələr üzərində aparılan eksperimentlərin yerinə yetirilmə qaydaları və buraxılan xətalər haqqında məlumat da şərh olunmuşdur. Bu fəsildə həmçinin sistemlərin hal diaqramlarının analizi, qəfəs parametrləri haqqında məlumatlar ətraflı izah edilmişdir.

Üçüncü fəsildə SnSe və onun əsasında alınmış CeSnSe₂, SmSnSe₂ üçqat birləşmələrinin elektrofiziki xassələrinin tədqiqi, əsas parametrlərinin hesablanması, alınan nəticələrin, eləcə də bununla bağlı bəzi kristallokimyəvi məsələlərin geniş şəkildə şərhilə verilmişdir.

Yarımkəçirici materiallarda kinetik effektlərin öyrənilməsi, onların qadağan olunmuş zolağının termik eni, yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, yürüklüyü, effektiv kütləsi kimi əsas parametrlərinin hesablanması, yükdaşıyıcıların enerji spektrinin quruluşu, eləcə də onların səpilmə mexanizmi haqqında məlumat əldə etməyə imkan verir. Tədqiqatlar T=77-800K temperatur intervalında aparılmışdır. Aparılan eksperimental tədqiqatlar və onların təhlilindən alınan nəticələr bu fəslin əsasını təşkil edir.

SnSe birləşməsinin termo e.h.q-nin temperatur asılılığı araşdırılmış və müəyyən olunmuşdur ki, yükdaşıyıcıların konsentrasiyası artdıqca T=77-520K intervalında termo e.h.q-nin qiyməti artır. Aşağı konsentrasiyalı nümunədə ($N_01 - p_{77} = 0,52 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-3}$) temperatur artdıqca termo e.h.q-nin qiyməti monoton artır, qalan nümunələrdə ($N_02 - p_{77} = 0,64 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-3}$, $N_03 - p_{77} = 1,32 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-3}$, $N_04 - p_{77} = 2,1 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-3}$) isə termo e.h.q-nin artma sürəti 1 N_0 -li nümunədə olduğu kimi temperaturun artması ilə uzlaşmır. Temperatur intervalının orta qiymətində 2 N_0 -li nümunədə S(T) minimuma

malikdir, 3 və 4 №-li nümunələrdə isə həmin minimum yüksək temperatur sahəsinə tərəf yerini dəyişir, sonra yenə temperaturdan asılı olaraq yüksəlir (artır).

Holl effektinin temperaturdan asılılığı bir sıra xüsusiyyətlərə malikdir. Bir ($p_{77}=0,52 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-3}$) və iki ($p_{77}=0,64 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-3}$) nömrəli nümunələrdə temperatur 110K-dən 150K-nə qədər artdıqca Holl əmsalı əvvəlcə 14,8 və 18 sm^3/Kl -a qədər artır, sonra uyğun olaraq 9.6 və 8,0 sm^3/Kl -a qədər azalır. Konsentrasiyası bir və iki nömrəli nümunələrdəkinə nisbətən az olan 3 və 4 №-li nümunələrdə də Holl sabiti temperaturdan asılı olaraq çox zəif dəyişir. 200K temperatura qədər Holl əmsalı artır sonra müntəzəm olaraq azalır, lakin göstərilən temperatur intervalında bu əmsal keçiricilik işarəsini dəyişmir. Holl əmsalının temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi termo e.h.q-nin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsinə uyğun olur.

Holl yürüklüyünün temperaturdan asılılığı Holl əmsalının temperaturdan asılı olaraq dəyişməsinə analogidir. Cərəyan daşıyıcılarının az konsentrasiyalı nümunələrində (Nümunə 1 və 2) temperaturdan asılı olaraq Holl yürüklüyünün monoton azalması müşahidə olunur, 3 və 4 nömrəli nümunələrdə 160-210K temperatur intervalında Holl yürüklüyü ($\mu_H(T)$) çox da böyük olmayan ekstremumdan keçir.

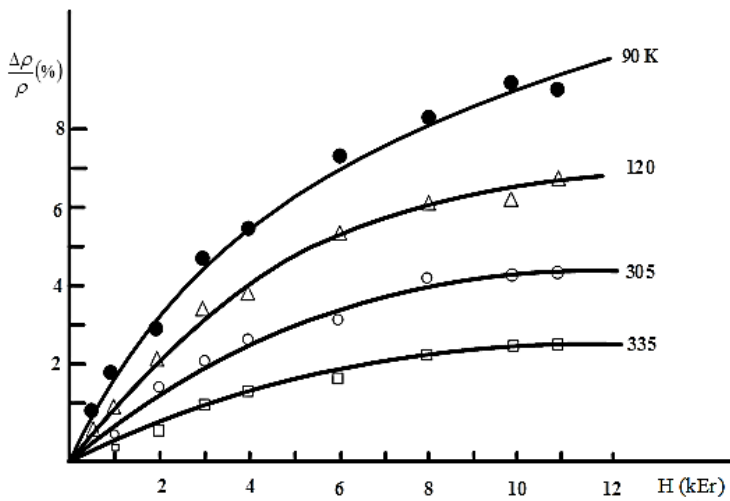
CeSnSe₂ birləşməsinin elektrofiziki ($\sigma(T)$, $R(T)$, $\Delta\rho/\rho_0$, $\mu_H(T)$) xassələri geniş temperatur ($T=77-780\text{K}$) intervalında öyrənilmişdir.

CeSnSe₂ nümunəsində Holl əmsalı və elektrik keçiriciliyi $T=300-800\text{K}$ temperatur intervalında ölçülmüşdür. Müəyyən olunmuşdur ki, Holl əmsalı mürəkkəb formada dəyişir, bu isə CeSnSe₂ birləşməsinin energetik zona quruluşunun mürəkkəb olduğunu göstərir. Elektrik keçiriciliyinin ($\sigma(T)$) temperatur asılılığını təqribən üç temperatur oblastına bölmək olar: 1-ci oblast $T=300-445\text{K}$ temperatur intervalında σ -nin qiyməti zəif, monoton artır. Bu oblast aşqar keçiriciliyi oblastı adlanır. Bu oblastda yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta E_{g1} \approx 0,14\text{eV}$ tərtibindədir; 2-ci temperatur oblastı $T=445-588\text{K}$ temperatur oblastını əhatə edir. Bu oblastda yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta E_{g2} \approx 0,44\text{eV}$ tərtibindədir; 3-cü oblast $T \geq 588\text{K}$ temperatur oblastını əhatə edir. Bu oblastında

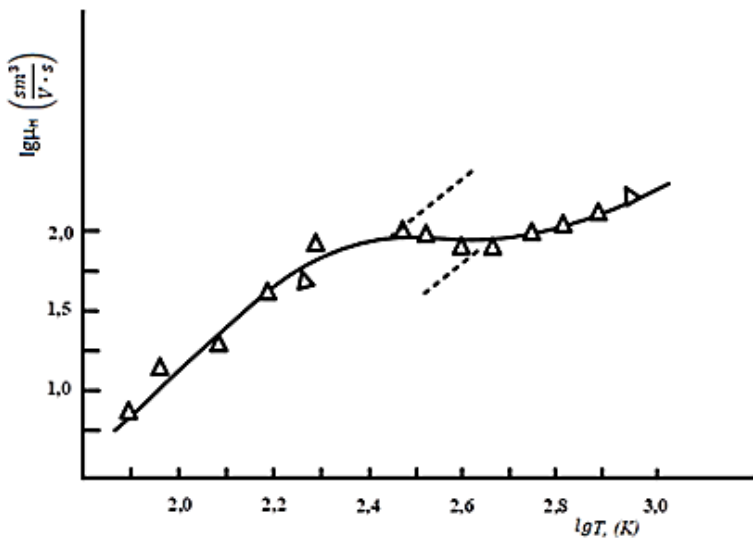
yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta E_{g3} \approx 0,88 \text{ eV}$ tərtibindədir ki, bu da bu da termik qadağan olunmuş zonanın qiymətini xarakterizə edir ($n \approx p$).

Nümunədə iki növ (yüngül və ağır) yükdaşıyıcılar və eləcə də akseptor deşiklər (yüngül və ağır) mövcuddur. Kristalda yaranan maqnit müqavimətinin qiyməti ikinci növ yükdaşıyıcıların konsentrasiyasından asılı olaraq dəyişir. Təcrübədə CeSnSe_2 birləşməsinin $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ - müqavimətin dəyişməsinin maqnit sahəsindən asılılığına müxtəlif temperatur qiymətlərində baxılmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, maqnit sahəsinin $H=11000 \text{ Er}$ qiymətində və $T=305 \text{ K}$ temperaturda $\frac{\Delta\rho}{\rho}=0,084$ -dir, yəni müqavimətin artımı $8,4\%$ təşkil edir. Başqa sözlə nümunənin elektrik keçiriciliyinin qiyməti maqnit sahəsində $\sim 8,4\%$ azalır. Şəkil (1)-dən görüldüyü kimi yuxarı temperaturlarda $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ qiyməti qismən azalır. Tətbiq etdiyimiz maqnit sahəsi CeSnSe_2 -nümunəsi üçün zəif maqnit sahəsidir ($\mu^2 H^2 \ll 1$) və $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ -qiymətləri verilmiş maqnit sahəsində özünün doyma halını almır. Maqnit müqavimətinin temperatur asılılığında işarəsinin dəyişməsi müşahidə olunur. Maqnit müqavimətinin işarəsinin dəyişməsi nümunədə müxtəlif növ yükdaşıyıcıların olduğunu və tədqiqat apardığımız temperatur intervalında ($T=300-600 \text{ K}$) yükdaşıyıcıların səpilmə mexanizminin iki dəfə dəyişdiyini göstərir.

Təcrübədə Holl əmsalını təyin etməklə onda olan aşqar konsentrasiyasını, kompensasiya və cırılma dərəcəsini qiymətləndirmək mümkündür. Təcrübə göstərir ki, tədqiqat apardığımız $T=300-830 \text{ K}$ temperatur intervalında $R(T)$ iki dəfə maksimumdan keçərək dəyişir. CeSnSe_2 birləşməsinin $T=77-700 \text{ K}$ temperatur intervalında Holl əmsalının qiyməti ölçülərək onun əsasında sərbəst yükdaşıyıcıların temperatur asılılığı $n(T)$, $\mu_H(T)$ -Holl yürüklüyü və $r(T)$ səpilmə mexanizminin təbiəti araşdırılmışdır. $T=300-500 \text{ K}$ temperatur intervalında $R_x = \text{const}$ şərtini ödəyir. $T=560 \text{ K}$ temperaturunda özünün maksimum qiymətini alır və temperaturun sonrakı artımında kəskin azalma müşahidə olunur. Holl əmsalının belə mürəkkəb formada dəyişməsi CeSnSe_2 birləşməsinin energetik zona quruluşunun



Şəkil 1. CeSnSe₂ kristalında maqnit müqavimətinin sahənin intensivliyindən asılılığı



Şəkil 2. CeSnSe₂ kristalında Holl yürüklüyünün temperatur asılılığı

mürəkkəb olduğunu göstərir.

Yarımkəçirici materiallarda materialın təmizlik dərəcəsinə və kristallik quruluşuna, onda olan defektlərə qarşı həssas olan parametrlərdən biri də yükdaşıyıcıların Holl yürüklüyüdür.

Təcrübələr göstərir ki, Holl yürüklüyü (μ_H) temperaturla tərs mütənasibdir ($\mu_H \sim T^{-1}$). Bu isə öz növbəsində yükdaşıyıcıların səpilmə mexanizmini xarakterizə edir.

CeSnSe₂ birləşməsi üçün $\mu_H = \bar{R}\sigma_0$ qiymətlərində istifadə edərək μ_H –Holl yürüklüyünün $T=77$ -700K temperatur intervalında $\mu_H(T)$ asılılığı qurulmuş və analiz edilmişdir (şəkil 2). Şəkildən görüldüyü kimi temperaturun artması ilə μ_H əmsalının qiyməti qismən artır, $T \geq 560$ K temperaturunda bu artım qismən intensivləşir. $T=300$ -550K temperatur intervalında $\mu_H \sim T^{2,25}$, $T \geq 560$ K temperaturunda isə $\mu_H \sim T^{3/2}$ qanunu ilə dəyişir. Bu isə keçiricilikdə qismən sıçrayışlı keçiricilik mexanizminin olması ilə bağlıdır. Bu da öz növbəsində CeSnSe₂ birləşməsində kovalent-ion rabitəsinin olmasından, ionluq dərəcəsiindən və eyni zamanda qarışıq tip keçiriciliyinin də olmasını göstərir.

SmSnSe₂ birləşməsinin elektrofiziki parametrləri $T=300$ –600K temperatur intervalında öyrənilmişdir. SmSnSe₂ birləşməsinin elektrik keçiriciliyinin $\sigma(T)$ və Holl əmsalının $R(T)$ temperatur asılılıqları mürəkkəbdir. Elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığı $T=456$ –560K temperatur intervalında minimumdan keçir və temperaturun sonrakı qiymətlərində artır. Aşqar keçiriciliyi oblastında ($T=300$ –420K) σ -nın qiyməti monoton artır və yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta E_I = 0,24$ eV tərtibindədir. Bu temperatur intervalında Holl əmsalının qiyməti maksimumdan keçərək azalır. $T=300$ –420K temperaturunda yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta E_{g1} = 0,24$ eV və bu temperatur intervalında $n < N_{d1}$ şərti ödənilir. 2-ci temperatur intervalı $T=500$ –625K-də $\Delta E_{g2} = 0,53$ eV və bu intervalda $n < N_{d2}$ şərti ödənilir. Üçüncü temperatur intervalında $T > 630$ K yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta E_{g2} = 0,75$ eV tərtibindədir ki, bu da termik qadağan olunmuş zonanın qiymətini xarakterizə edir ($n \approx p$).

SmSnSe₂ birləşməsinin Holl yürüklüyü (μ_H) temperaturun artması ilə mütənasib artır. (μ_H) asılılığı $T=300$ –380K temperatur intervalında $\mu_H \sim T^{2,0}$, $T=380$ -460K-də $\mu_H \sim T^{0,2}$, $T=460$ –480K-də

intensiv artım $\mu_H \sim T^{3.5}$ qanunu ilə dəyişmə müşahidə olunur. Temperaturun sonrakı artımında analogi təkrarlama: $\mu_H \sim T^{1.8}$ qanunu ilə dəyişmə müşahidə olunur. Beləliklə, müəyyən olunmuşdur ki, SmSnSe_2 birləşməsində yükdaşıyıcıların Holl yürüklüyü mürəkkəb formada dəyişir. Buna səbəb birinci növbədə Sm element atomlarının dəyişkən valentli olması (Sm^{2+} , Sm^{3+}) və nümunənin ionluq dərəcəsinin keyfiyyətə dəyişməsidir.

SmSnSe_2 üçlü birləşməsinin ümumi istilikkeçiriciliyinin, qəfəs istilikkeçiriciliyinin və istilik müqavimətinin temperatur asılılıqlarını araşdırmaqla birləşmədə yaranan defektlərin qəfəs istilikkeçiriciliyinə təsiri müəyyənləşdirilmişdir.

Ölçmələr nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki, SmSnSe_2 birləşməsinin ümumi istilikkeçirmə əmsalı temperaturun artması ilə azalır. $T=520-540\text{K}$ temperatur intervalında $\chi(T)$ asılılığında anomal dəyişmə müşahidə olunur. Videman-Frans qanununa görə müəyyən olunmuşdur ki, elektron istilik keçiriciliyi (χ_c) $T=300\text{K}$ temperaturunda ümumi istilikkeçiriciliyin 1,1%-ni təşkil edir. Temperaturun artması ilə χ_c qiymətində zəif artma müşahidə olunur və $T=600\text{K}$ -də, $\chi_c \approx 1,57\%$ təşkil edir. Tədqiqat apardığımız temperatur intervalında ($T=300-620\text{K}$) ümumi istilikkeçirmə əmsalının qiymətini əsasən qəfəs və elektron istilikkeçiriciliyi təşkil edir ($\chi_{\text{üm}} = \chi_q + \chi_{\text{el}}$). Qəfəs istilikkeçiriciliyin tərs qiyməti istilik müqaviməti hesablanmış və müəyyən olunmuşdur ki, $T=300-490\text{K}$ temperatur intervalında xətti dəyişməsi müşahidə olunur. $T > 500\text{K}$ temperaturunda xətti asılılıqdan kənara çıxmalar qeydə alınmışdır. SmSnSe_2 üçlü birləşməsində $\chi_q(T)$ asılılığı $T=300-480\text{K}$ temperatur intervalında $\chi_q \sim T^{-1.1}$ və $T > 540\text{K}$ -də isə $\chi_q \sim T^{-0.67}$ qanunu ilə dəyişir.

Ölçmələrdən görüldüyü kimi χ -nın qiyməti kiçikdir və $T=490-500\text{K}$ temperatur intervalı istisna olmaqla temperaturun artması ilə monoton azalma müşahidə olunur. χ -nın qiymətinin az olması birləşmədə Sm atomlarının rolu ilə bağlı olduğu ehtimal edilir.

Cədvəl-1-də otaq temperaturunda ana maddə (SnSe) və üçlü birləşmələrin bəzi fiziki parametrlərinin təcrübədən alınan qiymətləri verilmişdir.

Cədvəl 1: SnSe, CeSnSe₂ SmSnSe₂ birləşmələrinin bəzi kinetik parametrləri (T=300K)

Nümunə lər	σ Om ⁻¹ sm ⁻¹	R sm ³ / Kl	p, (n) sm ⁻³	μ_H sm ² / V·s	S mkV/ K	$\chi \cdot 10^{-3}$ Vt/ sm·K	Mikro bərklilik MPa
SnSe	8,21	7,8	0,8·10 ¹⁸	64	510	18,7	
CeSnSe ₂	3,03	-3,8	-1,64·10 ¹⁸	11,5	-375	22,4	2100
SmSnSe ₂	3,31	13,83	0,45·10 ¹⁸	46	670	21,6	2520

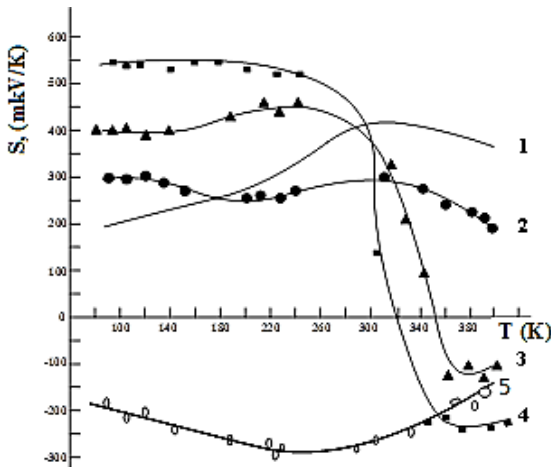
Dördüncü fəsil bərk məhlulların elektrofiziki, termoelektrik xassələrinin tədqiqi və tədqiq etdiyimiz tərkiblərdə (Ce_xSn_{1-x}Se, Sm_xSn_{1-x}Se) defektlərin yaranma səbəbləri və onların istilikkeçiriciliyinə təsirindən alınan nəticələrin qısa xülasəsi verilmişdir.

SnSe binar birləşməsi termoelektrik material hesab olunur. Bununla yanaşı, nisbətən böyük termik qadağan olunmuş zolaq ($E_g \approx 0,92\text{eV}$) bu material termoelektrik və optik xassələrə malik aralıq xüsusiyyətlərin olmasına gətirir və bu isə cərəyan daşıyıcılarının konsentrasiyasının $10^{16} - 10^{20}\text{sm}^{-3}$ aralığında geniş intervalda dəyişdirilməsinə imkan verir. Termoelektrik effektivliyinin artırılması üçün mümkün yollardan biri bu materialların müxtəlif ağır element atomları ilə aşqarlanmasıdır. Bu yolla termo *e.h.q.və* keçiriciliyin müyyən qədər artırılmasına habelə defektlərdən fononların səpilməsi hesabına istilik keçiriciliyinin qiymətinin azalmasına nail olmaq mümkündür. Yuxarıda göstərilənləri nəzərə alaraq Ce_xSn_{1-x}Se birləşmələrinin elektrofiziki xassələrinin konsentrasiyadan asılılığı T=77–400K temperatur intervalında öyrənilmişdir.

Ce_xSn_{1-x}Se (x≤0,035) bərk məhlullarında elektrik keçiriciliyinin serium (Ce) metal elementinin miqdarından asılılığı T=300K-də tədqiq edilmişdir. Elektrik keçiriciliyinin qiyməti x-in miqdarından asılı olaraq x≤0,02 intervalında mütənasib azalır və x=0,02 konsentrasiyasında minimumdan keçərək artır, σ -nın bu formada dəyişməsi Ce elementinin miqdarının artması ilə tərkiblərdə qalay elementinə məxsus vakant mərkəzlərinin qismən tutulması və

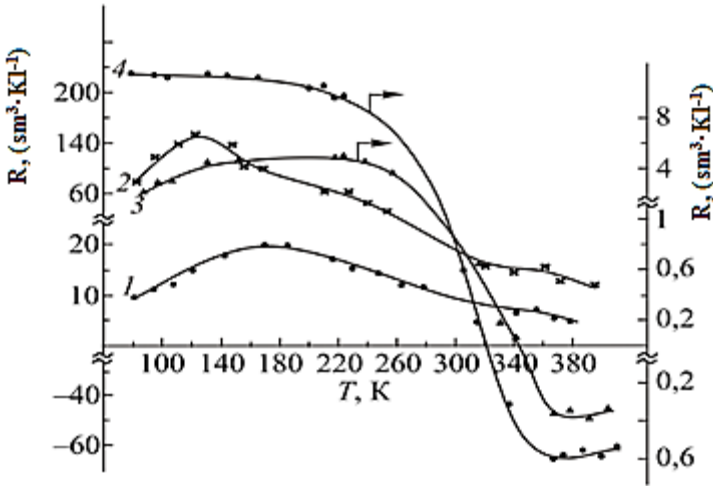
nəticədə yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının azalması ilə bağlıdır. Ce metal aşqarının sonrakı artımında tərkiblərdə antiquruluş defektlərin yaranması kəskin azalır və tərkiblərin elektrik keçiriciliyi artır.

3-cü şəkildə müxtəlif tərkiblər üçün $Ce_xSn_{1-x}Se$ bərk məhlullarının termo e.h.q-nin (S) temperaturdan asılılığı verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi $T=77-200K$ temperatur intervalında Ce aşqarının miqdarının artması $x=0,005$ tərkibli nümunədə S -in qiymətini nisbətən azaldır ($S=(300 \rightarrow 260)mkV/K$); digər $x=0,01$ və $x=0,02$ (№5) S -in qiyməti mütləq qiymətcə artır. Qrafikdən görüldüyü kimi $x \geq 0,01$ olan nümunələrdə müxtəlif temperaturlarda (№3- $x=0,01$ və №4- $x=0,015$) uyğun olaraq S -in işarəsinin p-dən n-ə dəyişməsi baş verir. 5 nömrəli nümunə ($x=0,02$) isə n-tip keçiricidir və S -in qiyməti mütləq qiymətcə $T \approx 260K$ temperaturunda maksimumdan keçərək azalır. Şəkil 4-də $T=77-400K$ temperatur intervalında №2, №3 və №4 nömrəli nümunələr üçün Holl əmsalının $R(T)$ temperaturdan asılılığı verilmişdir. Birinci nümunədə (Ce aşqar atomu olmayan qalay monoselenid) Holl əmsalının temperaturdan asılılıq əyrisi $\sim 180K$ temperaturda geniş maksimuma malikdir.



Şəkil 3. $Ce_xSn_{1-x}Se$ - $x=0$ (№1); $x=0,005$ (№2); $x=0,01$ (№3);
 $x=0,015$ (№4); $x=0,02$ (№5) sistem ərintilərinin termo.e.h.q-nin
 temperatur asılılığı

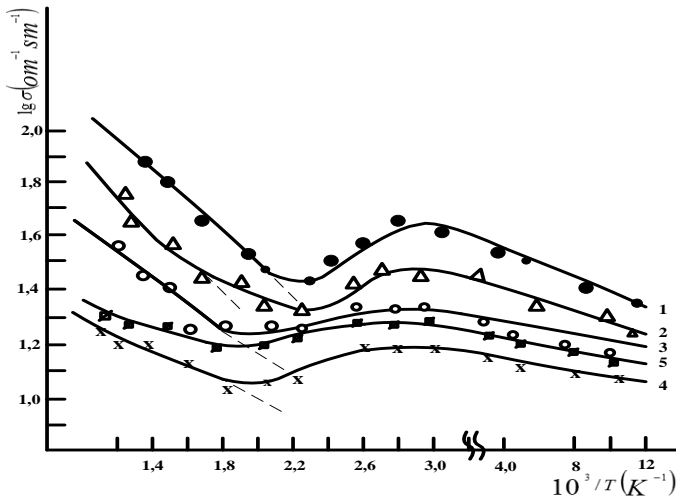
Ce atomlarının $Ce_xSn_{1-x}Se$ sisteminə az miqdarda daxil edilməsi (nümunə №2, $x=0,005$) $R(T)$ amplitudunda nəzərə çarpan artıma gətirib çıxardır və temperatur maksimumlarının vəziyyəti aşağı temperatur tərəfə sürüşür (120K-ə qədər). Qeyd edək ki, №1 və №2 nümunələri üçün Holl əmsalı bütün öyrənilmiş temperatur intervalında işarəni dəyişmir (p -tip keçiricilik). Yuxarıda qeyd olunan nümunələrdən fərqli olaraq №3 və №4 nümunələrinin $R(T)$ əyrlərində maksimumlar müşahidə olunmur. Aşağı temperaturlarda 240–260K-ə qədər Holl əmsalının temperaturdan asılılığı “yayla” əmələ gətirir, daha sonra isə temperaturun növbəti artımında $R(T)$ asılılığının amplitudu kəskin aşağı düşür və Holl əmsalı işarəsini əks istiqamətdə dəyişir (340 K-də №3 nümunəsi üçün və 320K-də №4 nümunəsi üçün). №3 və №4 nümunələrdə Holl əmsalının işarəsinin dəyişməsinə tədqiq olunan sistemdə keçiricilik növünün p -tipe n -tipə dəyişməsi kimi şərh edilə bilər.



Şəki 4. $Ce_xSn_{1-x}Se$, $x = 0$ (№1); $0,005$ (№2); $0,01$ (№3) ; $0,015$ (№4) sistemlərində Holl əmsalının temperaturdan asılılığı

Şəkil 5-də tədqiq edilən nümunələrin elektrik keçiriciliyinin $T=77-400K$ intervalında temperaturdan asılılıq qrafikləri verilmişdir.

Şəkildən görüldüyü kimi SnSe birləşməsindən $Ce_xSn_{1-x}Se$ bərk məhlullarına keçid zamanı elektrik keçiriciliyi nəzərə çarpan dərəcədə azalır və $\sigma(T)$ asılılığı ($\sigma_{SnSe}(T)$) asılılığından kəskin fərqlənir. Sesium komponentinin artması ilə aşqarların aktivləşmə enerjisi azalır. Başlangıç nümunədə (№1) yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta E_1=0,67eV$ -a bərabərdir. İki nömrəli nümunədə (№2) $\Delta E_2=0,53eV$, üç nömrəli nümunədə (№3) $\Delta E_3=0,06eV$, dörd nömrəli nümunədə isə $\Delta E_4=0,03eV$ -a bərabərdir. Beləliklə, $Ce_xSn_{1-x}Se$ sistemində aşqar konsentrasiyasının artması ilə yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi nəzərə çarpan dərəcədə azalır. Şəkil 5-dən görüldüyü kimi nümunə №3 və №4-də ($x=0,01$ və $0,015$) temperaturun $T=200-320K$ intervalında $\lg\sigma(1/T)$ -nin minimumu müşahidə olunur. Bu aşqar yükdaşıyıcıların tam ionlaşması, yürüklüyün temperaturdan asılı olaraq azalması ilə əlaqədardır. Temperaturun növbəti artımında keçiriciliyin qiyməti artır. Qrafikdən görüldüyü kimi $T=300-460K$ temperatur oblastunda yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $E_{g3}\approx 0,63eV$ -dur, bu da termik qadağan olunmuş zonanın eninin qiymətini xarakterizə edir. (3-cü əyri).



Şəkil 5. $Ce_xSn_{1-x}Se$ $x = 0$ (№1); $0,005$ (№2); $0,01$ (№3); $0,015$ (№4); $0,02$ (№5) sistemlərində elektrik keçiriciliyin temperatur asılılığı

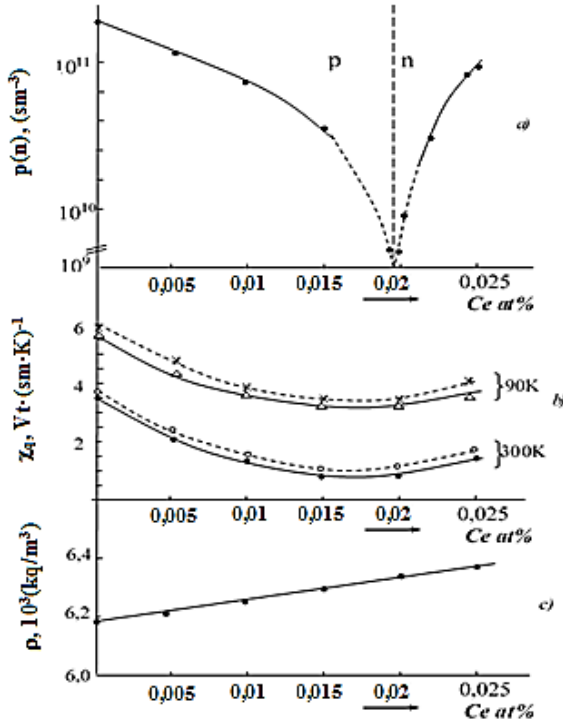
Buradan göründüyü kimi termik qadağan olunmuş zonanın eni ana maddələrinə nisbətən $Ce_xSn_{1-x}Se$ bərk məhlulunda xeyli azalmışdır. Bu isə onu göstərir ki, $x=0,005$ tərkibli nümunədən fərqli olaraq $x=0,05$ at% Ce olan nümunədə Ce-un miqdarı artıqca əlavə enerji səviyyələri yaranır və bu da fiziki xassələrə öz təsirinin göstərir.

Tədqiq edilən nümunələrdə yükdaşıyıcıların yürüklüyünün temperaturdan asılılığı araşdırılmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, yükdaşıyıcıların aşqar konsentrasiyadan asılı olaraq səpilmə mexanizmi temperaturun qiymətinə görə bir-birindən nəzərə çarpan dərəcədə fərqlənir. İkinci nümunədə ($N\text{№}2$, $x=0.005$) yükdaşıyıcıların yürüklüyü $T=77-100K$ temperatur intervalında $\mu_H \sim T^{1.5}$, $T=180-310K$ intervalında $\mu_H \sim T^{1.8}$, $T>320K$ oblastında isə $\mu_H \sim T^{1.6}$ qanunu ilə dəyişir. Səpilmə mexanizmi müxtəlif temperatur oblastlarından asılı olaraq ionlaşmış mərkəzlərdən optik fononlara dəyişir. Beləliklə, $T=77-180K$ temperatur intervalında yükdaşıyıcılar eyni zamanda həm ionlaşmış, həm də qismən neytral atom mərkəzlərindən səpilir. Temperaturun artması ilə akustik və optik fononlar ($N\text{№}3$ və $N\text{№}4$ -də) səpilmədə iştirak edirlər və optik fononların səpilmə intensivliyi artır.

$Ce_xSn_{1-x}Se$ monokristallarının istilikkeçiriciliyi, sıxlığı yükdaşıyıcıların elastiki səpilməsi, tərkibdən cırılma dərəcəsi və parabolik zona çərçivəsində elektron və qəfəs istilikkeçiriciliyi hesablanmışdır.

Temperaturun artması ilə ümumi ($\chi_{\text{ü}}$) və qəfəs istilikkeçiriciliyi (χ_{q}) azalır. Bundan əlavə tərkiblərdə Ce miqdarı artıqca $\chi_{\text{ü}}$ və χ_{q} azalır. Bu azalmanı biz tərkiblərdə Ce-un miqdarından asılı olaraq əlavə səpilmə mərkəzlərinin yaranması ilə izah etmişik. Lakin termiki dəmləmə əksinə χ_{q} -in qiymətini artırır. Bununla bərabər tərkiblərdə serium elementinin miqdarı artdıqca sıxlığın artması müşahidə olunur.

6-ci şəkildə qəfəs istilikkeçiriciliyinin (χ_{q}), yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının, sıxlığın Ce-un miqdarından asılılığı verilmişdir. Şəkildə ümumi konsentrasiyanın serium miqdarından asılı olaraq dəyişməsinin qrafiki 6-cı şəkildə a-əyrisində göstərilmişdir.



Şəkil 6. $Ce_xSn_{1-x}Se$ sistemin qəfəs istilikkeçiriciliyinin (χ_q), konsentrasiyasının və sıxlığının Ce-un miqdarından asılılığı

Qrafikdən görüldüyü kimi $x=0,02$ at% Ce olan nümunədə keçiricilik tipi p -dən n -ə dəyişir. Eyni zamanda həmin tərkib ətrafında yükdaşıyıcıların konsentrasiyası və qəfəs (dəmləmədən əvvəl və sonra punktir) istilikkeçiriciliyi minimumundan keçərək dəyişir (6-cı şəkildə b-əyrisi).

$(SnSe)_{1-x}(SmSe)_x$ sistem ərintilərinin təcrübədən alınmış nəticələrinə əsasən tərkiblərdə SmSe komponentinin miqdarı artdıqca və $x \rightarrow 0,25$ at% SmSe qədər yükdaşıyıcıların konsentrasiyası azalır. SnSe kristalına Sm metalını SmSe formada əvəzetmə yolu ilə daxil etdikdə Sm miqdarından asılı olaraq dəşik konsentrasiyası azalır. n -tip tərkiblərin konsentrasiyası p -tip konsentrasiyaya nisbətən 60% yüksəkdir. $\geq 0,25$ at% SmSe tərkibli nümunələrdə tip keçiriciliyi p -dən

n -ə dəyişir, xüsusi müqavimət artır və $x \approx 0.25$ at% SmSe olan tərkibdə özünün maksimal qiymətini alır. Sm elementinin sonrakı artımında kəskin azalma müşahidə olunur. Bu azalma $x \geq 1$ at% SmSe-li nümunələrdə Sm-un miqdarından asılı olaraq monoton azalma yolu ilə zəifləyir. Təcrübədən aldığımız nəticələr göstərir ki, tərkiblərdə samariumun miqdarından asılı olaraq maddələrin sıxlığı nəzərə çarpacaq dərəcədə artır. Sıxlığın artması SnSe-nin elementar qəfəsinin böyüməsi ilə xarakterizə olunur. Bu zaman elementar özəyin həcmi və molekulların sayı dəyişmir.

Seçilmiş nümunələrdə termo e.h.q.-nin ($S(T)$) temperatur asılılığı tədqiqi göstərir ki, termo e.h.q.-si p -tip maddələrdə, n -tip maddələrə nəzərən keyfiyyətcə fərqli dəyişir. Belə ki, p -tip nümunələrin $S(T)$ asılılığı $T=77-400\text{K}$ temperatur intervalında zəif azalır və minimumdan keçərək $T=420-530\text{K}$ -də zəif ekstremum müşahidə olunur və temperaturun sonrakı artımında yenidən azalır. Müşahidə olunan minimum Sm-un miqdarından asılı olaraq aşağı temperatura doğru sürüşür. Digər tərəfdən, qrafiklərə əsasən p -tip nümunələrdə $x = 0.05$ at% ilə $T = 300\text{K}$ -də dəşiklərin konsentrasiyası 48%, $x = 0.10$ at% nümunədə isə təxminən bir tərtib azalmışdır. Deşik konsentrasiyasının azalması $x=0.25$ at% nümunəyə qədər davam edir. n -tip nümunələrdə isə əksinə, temperaturun artması ilə $S(T)$ asılılığında $x=1.00$ at% nümunədə $T=(77-400)\text{K}$ intervalında çox zəif artım müşahidə olunur və minimumdan ($T = 400-455$ K) keçərək artım sürəti qismən böyüyür. $x=3$ at% nümunədə tədqiqat apardığımız temperatur intervalında $T=(77-500)\text{K}$ -də $S(T)$ artım sürəti qismən zəif ($\nu_s \sim T^{0.1}$), sonrakı temperatur intervalında isə daha yüksək olub $\nu_s \sim T^{0.92}$ qanunu ilə dəyişir. Bu qeyri adi dəyişmə $(\text{SnSe})_{97.00}-(\text{SmSe})_{3.00}$ tərkibdə Sm-metalı hesabına rezonans halının intensivləşməsi ilə bağlı olduğu ehtimal olunur.

Holl əmsalının temperatur asılılığı da müxtəlif formada dəyişir. №2 nömrəli nümunədə $T=77-440\text{K}$ -də $R(S) \approx \text{const}$ olması deşik konsentrasiyasının sabitliyini göstərir. Temperaturun sonrakı artımında $T \approx 420\text{K}$ -də minimumdan keçərək zəif artım müşahidə olunur. Yuxarı temperaturda ($T \geq 500\text{K}$) $x=0,10$ at% tərkibli nümunədə R -in qiyməti qismən artır. $T=77-400\text{K}$ -də isə zəif azalma müşahidə olunur ki, bu da deşik konsentrasiyasının qismən sabitliyinə uyğun

gəlir. Nisbətən analogi hal $x=1.00\text{at}\%$ n -tip nümunədə də müşahidə olunur. Lakin burada $R(T)$ asılılığının azalması elektron konsentrasiyanın artması hesabına baş verir. (300-500)K-də konsentrasiyanın sabitliyi müşahidə olunur. $T=400\text{K}$ temperaturda $R(T)$ zəif və monoton artır. Bu artma SmSe komponentinin aktivləşməsi hesabına r -səpilmə mexanizminin böyüməsi və rezonans hadisəsinin aktivləşməsi hesabına baş verir. Yuxarı temperatur intervalında ($T \geq 420\text{K}$) $x=3\text{at}\%$ nümunədə göstərdiyimiz xassə daha qabarıq şəkildə özünü göstərir.

Nümunələrin elektrik keçiriciliyi $T=300-450\text{K}$ -də konsentrasianın ($x=0.05\text{at}\%$ nümunə istisna olmaqla) sabitliyi müşahidə olunur. $x=0.05\%$ $\text{at}\%$ nümunədə bu interval $T=300-400\text{K}$ temperaturu əhatə edir. Temperaturun sonrakı artımında yükdaşıyıcıların aktivləşməsi hesabına nümunələrin elektrik keçiriciliyi artır. Aşağı temperatur intervalında $T \leq 400\text{K}$ yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi minimumdan keçərək artır. $\sigma(T)$ asılılığında yaranan minimum yükdaşıyıcıların holl yürüklüyünün azalması ilə bağlıdır. $x=1,00\text{at}\%$ -li nümunənin $\sigma(T)$ asılılığında minimumdan keçid çox zəif və həmdə nisbətən yuxarı temperaturda ($T=530-600\text{K}$) baş verir. $T \geq 530\text{K}$ -də $\sigma(T)$ asılılığı intensivləşir və məxsusi keçiricilik oblastına keçir. Bu temperatur oblastında termik qadağan olunmuş zonanın eni $E_g \approx 0.8\text{eV}$ tərtibindədir. $x=3\text{at}\%$ -li nümunənin $\sigma(T)$ asılılığında keçiriciliyin doyma halı müşahidə olunmur və cırlaşmış yarımkeçirici xassə göstərir. n -tip nümunələr xassəcə p -tip nümunələrdən fərqlidir. n -tip nümunələrdə Sm metalının miqdarı çox olduğundan tərkiblərdə əlavə Sm-Sm atomları arasında qarşılıqlı təsir yaranır. Nəticədə bir tərəfdən deformasiya potensialı artır digər tərəfdən müxtəlif növ defektlər və vakant mərkəzlərinin tutulması isə maddənin sıxlığını artır.

Sm metal atomlarının elektron konfigurasiyasının $4f^6 5d^0 6s^2$ olması dəyişkən valentli: iki və üç (Sm^{2+} , Sm^{3+}) valentlik yaradır. Samarium Sm^{3+} halı metallik xassə, Sm^{2+} halı isə yarımkeçirici xassə göstərir. Bu dəyişkən valentliyi kristalda olan defektlərin növündən və komponentlərin təbiətindən asılı olaraq dəyişir. Hər iki halda samarium metal atomları SmSe formasında donör tipli xassə göstərir. Digər tərəfdən samariumun $4f^6$ örtüyündə olan vakant mərkəzləri elektronlar üçün akseptor rolunu oynayır və tərkiblərdə Sm-un

miqdarı artdıqca ion potensialının yaratdığı sahədə güclənir və elektron sıxlığının yenidən paylanmasına səbəb olur.

$Ce_{0,05}Sn_{0,95}Se$ və $Sm_{0,05}Sn_{0,95}Se$ tərkibli nümunələrin termoelektrik parametrlərinin temperatur asılılıqları öyrənilmişdir.

$T=300-560$ K temperatur intervalında termo e.h.q-si sabitdir və temperaturun sonrakı artımında $S=360$ mkV/K-dən, $T=800$ K-də $S=205$ mkV/K-ə qədər monoton azalır. $T=300-560$ K temperatur intervalında elektrik keçiriciliyi monoton artır və temperaturun sonrakı artımında ($T=680-780$ K intervalında) nisbətən zəif artım müşahidə olunur. Uyğun olaraq ümumi istilikkeçirmə əmsalı tədqiqat apardığımız temperatur intervalında ölçülərək hesablanmış və alınan ilkin nəticələrə görə $Z=S^2\sigma/\chi$ kriteriyasına əsasən nümunənin Z -termoelektrik effektivliyi hesablanmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, $T=300-700$ K temperatur intervalında $Z=(2.45-2.72)\cdot 10^{-3}T^{-1}$ qiymətləri arasında dəyişir. Başqa sözlə desək nisbətən yuxarı temperaturlarda tərkibin Z effektivliyi qismən yaxşılaşır.

$Sm_{0,05}Sn_{0,95}Se$ nümunəsinin termo e.h.q-si $T=480$ K temperatúra qədər monoton artır və $S=360$ mkV/K maksimal qiymətini alır. Temperaturun sonrakı artımında monoton azalma müşahidə olunur və $T=800$ K-də $S=180$ mkV/K-ə qədər azalır.

Cədvəl 2: Nümunələrin $T=300$ K temperaturda bəzi kinetik parametrləri

Ln	$p(n)$, (sm^{-3})	σ (Om sm) ⁻¹	μ_H $sm^2/V\cdot san$	S mkV/K	χ , 10^{-3} Vt/sm· K	Z, 10^{-3} K ⁻¹
SnSe	$3,76\cdot 10^{18}$	97	163	430	18,7	0,96
$Ce_{0,005}Sn_{0,995}Se$	$3,4\cdot 10^{18}$	62	114	441	17,2	0,72
$Ce_{0,025}Sn_{0,975}Se$	$-1,1\cdot 10^{19}$	186	105	-382	15,4	1,76
$Ce_{0,050}Sn_{0,95}Se$	$-1,48\cdot 10^{19}$	217	98	-364	12,7	2,26
$Sm_{0,005}Sn_{0,995}Se$	-	-	-	-	-	-
$Sm_{0,25}Sn_{0,75}Se$	$-1,4\cdot 10^{19}$	328	146	-268	15,9	1,48
$Sm_{0,050}Sn_{0,95}Se$	$-1,0\cdot 10^{19}$	162	98	-225	14,7	0,71

$\text{Sm}_{0.05}\text{Sn}_{0.95}\text{Se}$ nümunəsinin istilikeçiriciliyinin (χ) və termoelektrik effektivliyinin (Z) temperatur asılılıqları da təyin olunmuşdur. Burada məqsəd tədqiq olunan tərkiblərin praktik əhəmiyyət kəsb edib etmədiyini müəyyən etməkdir. Qeyd edək ki, $\text{Sm}_{0.05}\text{Sn}_{0.95}\text{Se}$ tərkibli nümunənin termoelektrik xassələrinin temperatur asılılıqlarından görüldüyü kimi kinetik əmsallarının temperatur asılı olaraq müxtəlif formada dəyişir. Çox ehtimal ki, buna səbəb tərkibində olan müxtəlif növ dislokasiyaların olmasıdır. Bu tərkibin də termoelektrik parametrlərin qiymətlərindən istifadə edərək Z -termoelektrik effektivliyi təyin olunmuşdur.

Maddələrin elektrik keçiriciliyinə γ -şüalarının təsirini öyrənmək məqsədi ilə hər iki: p və n oblastlarından yükdaşıyıcıların konsentrasiyaları $p=4,1 \cdot 10^{17}$ və $n=7,8 \cdot 10^{17} \text{sm}^{-3}$ olan nümunələri presləmə üsulu ilə alınmışdır. İlkin parametrləri ölçüldükdən sonra maddələrin hər biri p_1 , p_2 , p_3 və n_1 , n_2 , n_3 olmaqla üç hissəyə bölünmüşdür. Bunlardan birinci p_1 və n_1 termik emalla ($T=673^\circ\text{C}$ və $t=72$ saat) digər ikisi p_2 və n_2 eyni şəraitdə və dozada $\text{MRX}_\gamma - 25$ izotoplu ^{60}Co mənbəyindən və $D_\gamma=20\text{kQr}$ ($E=0,31\text{MeV}$) tərtibində γ -şüalanma udulmasına, digər p_3 və n_3 nümunələri isə $D_\gamma=35\text{kQr}$ ($E=0,54\text{MeV}$) tərtibində udulmaya məruz qalmışdır.

Nümunələrin elektrik keçiriciliyi və digər kinetik parametrlər şüalanmadan sonra bir gün ərzində ölçülmüşdür. Aşağı dozalı şüalanmaya məruz qalmış ($E=0,31 \text{ Mev}$) 2-ci qrup nümunələrdə isə keçiricilik tiripindən asılı olaraq σ -nin dəyişməsi də müxtəlifdir: p -tip nümunədə şüalanmadan sonra σ -nın qiymətində qismən artım, n -tip nümunədə isə əksinə azalma müşahidə olunur. Nisbətən daha yüksək şüalanmaya ($E=0,54 \text{ Mev}$) məruz qalmış 3-cü qrup nümunələrə (p_3 və n_3) γ -şüalarının təsiri nisbətən yüksəkdir və verilmiş temperaturlarda $\sigma=f(\gamma)$ asılılığı radiasiya şüalanmasına məruz qalmış p -tip nümunənin elektrik keçiriciliyi 22% ($T=77\text{K}$) artır, n -tip nümunədə isə əksinə 14% azalır.

Beləliklə, təcrübədən aşağıdakı nəticə alınmışdır. Ce metalı ilə aşqarlanmış p - SnSe bərk məhlullarından: rütubətə, radiasiyaya davamlı və geniş temperatur intervalında işləyə bilən n -tip yeni tərkibdə yarımkəçirici termoelektrik material alınır. $\text{Ce}=0.05 \text{ at\%-li}$, $\text{Ce}_{0.05}\text{Sn}_{0.95}\text{Se}$ nümunənin termoelektrik effektivliyi yüksəkdir

($Z=2.7 \cdot 10^{-3} K^{-1}$) və termoelektrik material kimi termogeneratorların hazırlanmasında istifadə oluna bilər.

ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. SnSe-CeSe və SnSe-SmSe sistemlərinin qarşılıqlı təsirləri öyrənilmiş, nümunələrin kompleks fiziki-kimyəvi analizləri aparılaraq, həll olma oblastları müəyyənləşdirilmişdir. Bərk məhlul oblastında NTM konsentrasiyası artdıqca ərintilərdə mikrobərklik, sıxlıq, elementar qəfəs sabitlərinin zəif artımı müşahidə olunur. Bu sistemdə komponentlərin 1:1 nisbətində rombik sinqoniyada kristallaşan $CeSnSe_2$ ($a=8.94$, $b=8.97$, $c=6,90 \text{ \AA}$) və $SmSnSe_2$ ($a=8.83$, $b=8.90$, $c=6,80 \text{ \AA}$) üçlü birləşmələr alınmış, xüsusi texnoloji rejimdə kristalları yetişdirilmişdir.

2. $SmSnSe_2$ birləşməsinin elektrikkeçiriciliyinin temperatur asılılığı üç oblasta ayrılır. Birinci oblast aşqar keçiriciliyi oblastıdır, bu oblastda ($T=300-420K$) yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta\varepsilon_1=0,24eV$ tərtibindədir, İkinci oblast $T=500-625K$ temperatur intervalını əhatə edir və bu oblastda $\Delta\varepsilon_2=0,53eV$ -dur. Üçüncü oblast daha dərinədə yerləşmiş enerji səviyyələrindən nisbətən ağır elektronların keçiricilikdə iştirakı hesabına maddənin elektrik keçiriciliyinin intensivləşdiyi oblastdır ($T>630K$), bu oblastda aktivləşmə enerjisi $\Delta\varepsilon_3=0.75eV$ tərtibindədir ki, bu da termik qadağan olunmuş zonanın qiymətini xarakterizə edir ($n \approx p$). Əsasən ion və neytral atom mərkəzlərindən səpilmə üstünlük təşkil edir.

3. n -tip keçiriciliyə malik $CeSnSe_2$ birləşməsinin elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığı üç oblasta ayrılır: Birinci oblast aşqar keçiriciliyi oblastıdır, bu oblastda ($T=300-445K$) yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta\varepsilon_{g1} \approx 0,14eV$ tərtibindədir; İkinci oblast $T=385-588 K$ temperatur intervalına düşən oblastdır ki, bu oblastda aktivləşmə enerjisi $\Delta\varepsilon_{g2} \approx 0,44eV$ tərtibindədir; Üçüncü oblast məxsusi keçiricilik oblastıdır ($T \geq 588K$), bu oblastda yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi $\Delta\varepsilon_{g3} \approx 0,88eV$ təşkil edir, bu da termik qadağan olunmuş zonanın qiymətini xarakterizə edir. Elektrik keçiriciliyinin qiyməti maqnit sahəsində $\sim 8,4\%$ azalır. Maqnit müqavimətinin ($\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$) qiymətinin $T=430K$ temperaturunda işarəsini müsbətdən mənfiyə

dəyişməsi energetik zona quruluşunun mürəkkəb olduğunu, keçiricilikdə iki növ: ağır və yüngül yükdaşıyıcıların iştirak etdiyini göstərir.

4. $Ce_xSn_{1-x}Se$ ərintilərinin tərkibində seriumun miqdarı artıqca, Frenkel defektlərinin yaranması və yenidən paylanması ilə əlaqədar, yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, yürlüklüyü, aşqar oblastındakı aktivləşmə enerjisi azalır, sıxlığı artır, Holl əmsalının işarəsinin inversiyası aşağı temperatur oblastına tərəf sürüşür.

5. Aşqarların konsentrasiyasından asılı olaraq $Ce_xSn_{1-x}Se$ kristallarında yükdaşıyıcıların səpilmə mexanizmi dəyişir. $T=77-100$ K temperatur intervalında yürlüklük $\mu_H \sim T^{1,5}$, $T=180-310$ K oblastında $\mu_H \sim T^{-1,8}$, $T > 320$ K oblastında isə $\mu_H \sim T^{-1,6}$ qanunu ilə dəyişir, yəni aşağı temperatur oblastında ionlaşmış aşqar və neytral atom mərkəzlərindən, yuxarı temperatur oblastında isə akustik və optik fononlardan səpilmə üstünlük təşkil edir.

6. $Ce_xSn_{1-x}Se$ kristallarında istilik daşınmasında qəfəs istilikkeçiriciliyi üstünlük təşkil edir. İstilik müqaviməti fonon-fonon səpilməsi hesabına yaranır və istilik müqavimətinin artması fononların nöqtəvi defektlərdən səpilməsi ilə bağlıdır. Bərk məhlulda Ce miqdarının artması ilə qismən defektlərdən "təmizləmə" baş verir və serium olan tərkibdə sıxlığın bir qədər artması və istilik keçiriciliyinin azalması ilə müşayiət olunur. Uzun müddətli termik işləmə kristal quruluşun nizamlanmasına, nəticədə nümunələrin istilik keçiriciliyinin 12-20% artmasına gətirib çıxarır, lakin istilikkeçiriciliyinin temperatur asılılığının xarakteri dəyişməz qalır.

7. Aşağı dozalı ($D_y=20kQr$) şualanmaya məruz qalmış p-tip nümunələrdə şualanmadan sonra elektrikkeçiriciliyinin qiymətində qismən artım, n-tip nümunədə isə əksinə azalama müşahidə olunur. Nisbətən daha yüksək şualanmaya ($D_y=35kQr$) məruz qalmış p-tip nümunənin σ asılılığı 22% ($T=77K$) artır, n-tip nümunədə isə əksinə 14% azalır.

8. Müəyyən olunmuşdur ki, $Ce_{0,05}Sn_{0,95}Se$ tərkibli nümunənin termoelektrik effektivliyi otaq temperaturunda $Z=2,26 \cdot 10^{-3}K^{-1}$ -dir və temperaturun artması ilə 360-600K temperaturunda $Z=2,7 \cdot 10^{-3}K^{-1}$ tərtibində olur. Bu tərkibi nisbətən yuxarı temperaturda işləyə bilən termoelektrik generator materialı kimi təqdim edilir.

Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıdakı məqalə və tezislərdə dərc edilmişdir.

1. Tahirov, B.A. SmSnSe₂ birləşməsinin elektrik keçiriciliyi mexanizmi // M.İ. Murquzov, V.Ə. Abdurahmanova, Ş.S. İsmayılov // AJP FİZİKA, 2012, vol. XVIII №2, section Az. səh. 41,
2. Abdurahmanova, V.Ə. Serium və samarium elementləri ilə aşkarlanmış p-SnSe birləşməsinin termoelektrik xassələri // B.A. Tahirov, Ş.S. İsmayılov // BDU Fizikanın Müasir Problemləri. 2014. VIII konfrans materialları. 24-25 dekabr, s.119-122
3. Abdurahmanova, V.Ə. Ce_xSn_{1-x}Se kristallarının elektrik keçiriciliyi / S.Ə. Qədirova, Ş.S. İsmayılov, A.C. Nəsbli // BDU, Fizikanın aktual problemləri, Respublika elmi konfransının materialları, 2015 s. 132-136
4. İbrahimova, A.Ə. p-tip SnSe monokristallarında isti və qaynar yükdaşıyıcıların təbiəti / Ş.S. İsmayılov, V.Ə. Abdurahmanova // Gənc tədqiqatçıların III Beynəlxalq elmi konfransı 2015-Bakı.
5. Abdurakhmanova. V.A. Thermal conductivity of the (SnSe)_{1-x}-(SmSe)_x sistem alloys. // Modern trends in Physics. The event is sponsored by the Baku State University and State Agency of Alternative and Renewable Energy Source of the Republic of the Azerbaijan. Baku, 2017, 23-25.
6. Abdurahmanova, V.Ə. Ce₂SnSe₄ birləşməsinin elektrik və istilikkeçiriciliyi // N.M. Abdullayev, H.M. Əskərov, Ş.S İsmayılov, // AJP Fizika. 2018. Vol. XXIV, №3, section Az.october.
7. Abdurahmanova, V.Ə. Sm_xSn_{1-x}Se₂ sistem kristallarının elektrik keçiriciliyinə γ -şüalarının təsiri // N.M. Abdullayev, Ş.S. İsmayılov, // AJP Fizika. 2018. Vol. XXIV, №3, section Az.october.
8. Abdurahmanova, V.Ə. Samariumun Sm_xSn_{1-x}Se birləşmələrinin elektrofiziki xassələrinə təsiri // N.M. Abdullayev, H.M. Əskərov, Ş.S. İsmayılov, // AJP Fizika. 2018. Vol. XXIV, №2, section Az. İyul.
9. Исмаилов, Ш.С. Инверсия типа проводимости и термоэлектро движущийся сила в твердых растворах Ce_xSn_{1-x}Se / Р.И. Селимзаде, В.А. Абдурахманова, А.А. Садыгова // Кабардино-Балкарский Государственный Университет. Нальчик-2019. Микро и нанотехнологии в электронике, Международной научно-технической конференции. с.94-97

10. Abdurakhmanova, V.A. Electrophysical properties of the $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{SmSe})_x$ solid solutions at high and low temperature // N.M Abdullaev, Sh.S Ismailov // Modern Physics Letters B. 2019. Vol. 33, september 27,

11. Алиев, И.И. Физико-химические свойства, типы проводимости и термоэлектродвижущие силы в твердых растворах $\text{Ce}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$ // В.А. Абдурахманова, Ш.С. Исмаилов, А.А. Садыхова // Международный журнал прикладный и фундаментальных исследований-2019, №12, с.142-146

12. Abbasov, I.I. Concentration dependences of electrical conductivity and the Hall effect of the $\text{Ce}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$ single crystals // Sh.S. Ismailov, J.I. Huseynov, and V.A. Abdurakhmanova // Low Temperature Physics. 2019. vol 45, № 12, 1509–1513

13. Abdurahmanova, V.Ə. Termiki işləmənin Sm_2SnSe_4 kristalında termo e.h.q-nin və istilikkeçiriciliyin dəyişməsinə təsiri / BMU Gənc tədqiqatçıların III Beynəlxalq elmi konfransı Bakı 2019

14. Abdurahmanova, V.Ə. SnSe və $\text{Sm}_{1-x}\text{Ce}_x\text{SnSe}_2$ ($x = 0.02-0.5$) birləşmələrinin istilik xassələri // Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universitetinin xəbərləri. 2019, C.67, № 4

15. Ismailov, Sh.S. Effect of doping level and compensation on thermal conductivity in $\text{Ce}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$ solid solutions // J.I. Huseynov, M.A. Musaev, I.I. Abbasov, V.A. Abdurakhmanova // Low Temperature Physics. 2020, vol. 46, № 11, pp.1310-1317

16. Abdurakhmanova, V.A. The thermal properties of SnSe and $\text{Sm}_{1-x}\text{Ce}_x\text{SnSe}_2$ ($x = 0.02-0.5$) compounds // N.M. Abdullaev, Sh.S. Ismailov and M.N. Mirzaev // International Journal of Modern Physics B. 2020. 2050167 (7 pages),

Dissertasiyanın müdafiəsi 28 oktyabr 2022-ci il tarixində saat 14⁰⁰ Azərbaycan Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1143, Bakı şəh., H.Cavid pr., 131,

Dissertasiya ilə Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq olar.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 27 sentyabr 2022- ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 23.09.2022

Kağızın formatı: A5

Həcm 36913

Tiraj:100