

**AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI
FİZİKA İNSTİTUTU**

Əlyazma hüququnda

MOBİL VAHAB OĞLU KAZIMOV

**GaSb-CrSb EVTEKTİK KOMPOZİTİNDƏ ELEKTRİK
YÜKÜNÜN VƏ İSTİLİYİN DAŞINMA MEXANİZMLƏRİ**

2220.01- Yarımkəçiricilər fizikası

**Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim
edilmiş dissertasiyanın**

A V T O R E F E R A T I

BAKI – 2017

Dissertasiya işi Azərbaycan MEA Fizika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər:

Fizika üzrə elmlər doktoru

R.N.Rəhimov

Rəsmi opponetlər:

Fizika üzrə elmlər doktoru

N.A. Abdullayev

**Fizika-riyaziyyat elmləri
doktoru, professor**

Y.Q. Nurullayev

Aparıcı təşkilat : Azərbaycan MEA Radiasiya Problemləri İnstitutun
“Yarımkəçiricilərin radiasiya fizikası” laboratoriyası

Dissertasiyanın müdafiəsi « ____ » _____ **2017-ci il, saat ____ da**
Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun nəzdində
fəaliyyət göstərən D 01. 011 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Bakı ş, H. Cavid pr., 131, Az-1143.

E-mail: director@physics.science.az

Dissertasiya işi ilə AMEA Fizika İnstitutunun elmi kitabxanasında
tanış olmaq olar.

Avtoreferat « ____ » _____ **2017-ci ildə göndərilmişdir.**

D.01.011 Dissertasiya Şurasının

**Elmi katibi, Fizika- riyaziyyat elmləri
doktoru, professor**

D.H.Arslı

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı. Mikroelektron sənayenin inkişafı onun tələblərini ödəyən və xassələri idarə oluna bilən yeni materialların yaradılması ilə sıx bağlıdır. Bu baxımdan korroziyaya və xarici zərbələrə davamlılığı, keyfiyyətli səthə malik olması kompozit materialların sənayenin bütün sahələrində geniş tətbiqinə imkan yaradıb. Kompozit material dedikdə bir neçə komponentdən təşkil olunan və aralarında kəskin sərhəd olan qeyri bircins bütöv material başa düşülür. Kompozit matris adlanan əsas elementdən və qatqı adlanan doldurucu elementdən ibarət olur. Matris kompozitin monolitliyini təmin edir, materialın formasını və qatqıların qarşılıqlı paylanma istiqamətini saxlayır, gərginliyi həcm üzrə bərabər paylayır. Kompozitin fiziki xassələri matris və qatqıların nisbətindən asılı olaraq dəyişir. Son onilliklərdə həm yarımkeçirici xassələri və həm də metal xassələri özündə cəmləşdirən 3d-keçid metalları və III-V qrup birləşmələri əsasında alınan evtektik kompozitlərə maraq artmış və onlar sabit tərkibə və təkrarlanan xassələrə malik ferromaqnit və ya antiferromaqnit material kimi sürətli yaddaş sistemlərin yaradılması üçün perspektivli material sayılır. Belə evtektik kompozitlərdə maqnit ionların miqdarının kiçik olması onlardan az qatılıqlı maqnit yarımkeçiricilər kimi istifadəsinə imkan yaradır. Bu sinif evtektik kompozitlərdə metal qatqılar eynə şəkildə matrisdə paralel düzülərək bərabər paylandığından, özlərini qeyri-bircins yarımkeçirici kimi aparır və onların fiziki xassələri metal çubuqların həndəsi formasından, ölçüsündən, sıxlığından və fazalar arası zonalardan asılı olur.

GaSb-CrSb evtektik kompozitində matris elementi olan GaSb birləşməsi III-V qrup binar yarımkeçiricilər sırasında bir sıra xüsusiyyətlərinə görə daha çox öyrənilən birləşmədir. Yükdaşıyıcıların az effektiv kütləyə və yüksək yürüklüyə malik olması səbəbindən GaSb əsaslı quruluşlar lazer diodların, fotoqəbuledicilərin, istilik dalğaların detektorlarında, tenzometrik və fotoelektrokimyəvi çeviricilərdə, heteroqəçidlərin və rezonans tunel diodların yaradılması üçün potensial imkanlara malikdir. GaSb-CrSb evtektik kompozitinə ikinci komponent kimi daxil olan CrSb birləşməsi antiferromaqnit xassəyə malikdir və spintronika üçün perspektivli material sayılır. Bu baxımdan GaSb-CrSb evtektik kompoziti az qatılıqlı maqnit material sayılır. Cırılaşmış yarımkeçirici və maqnit xassələrini özündə cəmləşdirən GaSb-CrSb evtektik kompozitinin alınması, onun mikrostrukturunun, kristal quruluşunun və kinetik

parametrlərinin tədqiqi həm elmi cəhətdən, həm də praktiki tətbiq cəhətdən əhəmiyyət kəsb edir.

GaSb-CrSb evtektik kompozitində elektrik yükünün daşınma hadisələrini öyrənməklə fazalar arası sərhəddə baş verən proseslər araşdırıla bilər. Kompozitdə istilik keçiriciliyini öyrənməklə istiliyin daşınma mexanizmi, fononların müxtəlif kvazizərrəciklər və kristal qəfəsindəki müxtəlif defektlərlə qarşılıqlı təsiri haqqında məlumat almaq mümkündür.

Dissertasiya işinin məqsədi GaSb-CrSb evtektik kompozitin termodinamik parametrlərinin təyini, elektrik yükünün və istiliyin daşınma mexanizmlərinin araşdırılması, parametrlərin idarə olunması yolları və tətbiq imkanlarını müəyyən etməkdir.

Bu məqsədi həyata keçirmək üçün aşağıdakı məsələlər qoyulmuşdur:

- GaSb-CrSb evtektik kompozitin müxtəlif kristallaşma sürətləri ilə (0.3mm/dəq; 0.6mm/dəqiqə və 1mm/dəqiqə) sintezi;
- Nümunələrin attestasiyası: rentgen-faza analizi; elektron mikroskopun tətbiqi ilə mikrostrukturun öyrənilməsi; rentgen spektroskopu ilə tərkib elementlərin təyini; Raman spektrin analizi;
- Diferensial darama kalorimetrləri (STA və DSC) ilə ərimənin başlanğıc və son nöqtələrinin təyini, termodinamik parametrlərin (xüsusi istilik tutumu, entropiya, entalpiya, Gibbs enerjisi) hesablanması;
- GaSb-CrSb evtektik kompozitin elektrik keçiriciliyi, Hall effekti, istilik keçiriciliyi və termoelektrik hərəkət qüvvəsinin tədqiqi; kinetik parametrlərdə yaranan xüsusiyyətlərin araşdırılması;
- Effektiv mühit nəzəriyyəsi əsasında eksperimental nəticələrin aproksimasiyası;
- GaSb-CrSb evtektik kompozitin tətbiq olma imkanlarını müəyyən etmək.

Elmi yeniliklər

- GaSb-CrSb kompozitdə mikrostruktur tədqiqatları aparılaraq diametri 1.4mkm, uzunluğu 30-50mkm olan çubuq şəkilli qatqıların matrisdə paralel düzülərək bərabər paylandığı; ayrı-ayrı fazalarda element tərkibi müəyyən edilərək matrisin Ga və Sb elementlərindən,

iyinə şəkilli qatqıların isə Cr, Sb və cüzi miqdarda Ga atomlarından təşkil olunduğu göstərilib.

- Diferensial darama kalorimetrində istilik selinin dəyişmə sürətinə əsasən xüsusi istilik tutumu, entalpiya, entropiya və Gibbs enerjisi hesablanıb; Diferensial termik analiz ilə ərimənin başlanğıc və son nöqtələri üçün uyğun olaraq 943 K və 965 K müəyyən olunub.

- GaSb-CrSb kompozitin elektrik keçiriciliyində yaranan anizotropluğu temperaturdan asılı olaraq azalıb yox olması metal çubuqların qısa qapama xüsusiyyətinin azalması ilə bağlıdır; 385÷555K temperatur bölümündə elektrik keçiriciliyinin azalması dəşiklərin tükənməsi ilə, daha yuxarı temperaturlarda isə artması elektrik yükün tipinin dəyişməsi ilə bağlıdır. 600÷700K temperatur bölümündə elektrik keçiriciliyin temperatur asılılığında müşahidə olunan anomaliya CrSb çubuqlarında yaranan maqnit keçidi ilə bağlıdır.

- GaSb-CrSb evtektik kompozitində 200K temperaturdan yuxarıda yaranan əlavə istilik keçiriciliyi ionlaşma enerjisinin rezonansla ötürülməsi ilə bağlı olduğu göstərilib.

İşin elmi və praktik əhəmiyyəti

- GaSb-CrSb evtektik kompoziti üçün alınmış təcrübi nəticələr qeyri-bircins yarımkeçiricilər nəzəriyyəsinin təkmilləşdirilməsinə gətirəcək.

- GaSb-CrSb evtektik kompoziti az qatqılı maqnit yarımkeçirici kimi daha stabil xarakteristikalara malik olduğundan mikroelektronikanın elektrotexniki qurğularında çeviricilər, toplayıcı və açarlar üçün matris elementlərin yaradılmasında perspektivli material kimi təklif olunur.

Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar

- Elektron mikroskopu və rentgen spektroskopu ilə aparılan tədqiqatlarla GaSb-CrSb evtektik kompozitin mikrostrukturunu, matrisdə və metal fazada, həmçinin metal faza ilə yarımkeçirici matris arasındakı sərhəddə elementlərin miqdarının təyini və morfoloji xəritəsi;

- Diferensial termik analizlə GaSb-CrSb evtektik kompozitində ərimənin başlanğıc və son temperaturlarının təyini; istilik tutumun temperatur asılılığının çıxarılması; 700±20 K-də müşahidə olunan pikin CrSb birləşməsində mövcud olan II növ faza keçidi ilə izahı;

- Kinetik parametrlərdə müşahidə olunan anizotropluğu yarımkeçirici matrisdə nizamlı düzülüş metal iynələrin qısa qapamaq xüsusiyyəti ilə bağlı olması; kompoziti müxtəlif sürətlərlə sintez etməklə metal iynələrin ölçülərini və sıxlığını dəyişib kinetik parametrləri idarə oluna bilən materialların yaradılmasının mümkünlüyü;

- GaSb-CrSb evtektik kompozitin cırılmış yarımkeçirici xüsusiyyətinə malik olması - elektrik keçiriciliyin temperatur asılılığında müşahidə olunan dəyişikliyin elektrik yükünün tipinin dəyişməsi ilə bağlılığı; elektrik keçiriciliyin temperatur asılılığında müşahidə olunan anomaliyanın CrSb çubuqlarında baş verən maqnit keçidi ilə bağlılığı;

- GaSb-CrSb evtektik kompozitin istilik keçiriciliyində səpilmə mexanizmlərin müəyyən olunması; fononların nöqtəvi defektlərdən və sərhəddən səpilməsi, üçfononlu normal və atılma proseslərin istilik müqavimətindəki rolu; $T > 200\text{K}$ temperaturlarda ionizasiya enerjisinin daşınması ilə bağlı istilik daşıma mexanizmin aşkar olunması.

İşin aprobeşiyası

Dissertasiyanın əsas nəticələri Respublika və Beynəlxalq Elmi konfranslarda məruzə olunaraq müzakirə edilmişdir:

Актуальные проблемы физики твердого тела, (ФТТ-2016), 22-25 октябрь, 2016 г., Минск, Беларусь;

International Conference on Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials –Thermam-2015 and 4nd Rostocker International Symposium, Baku, 17–18 September 2015;

1st International scientific conference of young scientists and specialists, 15-16 October, Baku-2014;

7th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, Chisinau, Moldova, September 16-19, 2014;

Gənc Tədqiqatçıların IV Beynəlxalq Elmi Konfransı, Qafqaz Universiteti, 29-30 Aprel 2016;

I International Scientific Conference of Young Researchers Devoted, BEU, Baku- 2017.

Dissertasiya işinin strukturu və həcmi :

Dissertasiya işi girişdən, 5 fəsildən, alınan nəticələrdən, 35 şəkildən və ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Dissertasiya işi istifadə olunmuş 147 adda ədəbiyyat siyahısı da daxil olmaqla 135 səhifədən ibarətdir.

İşin qısa məzmunu

Girişdə mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, işin məqsədi, elmi yeniliyi, alınan nəticələrin elmi və praktik əhəmiyyəti, müdafiəyə təqdim olunan əsas elmi müddəalar verilmişdir.

Birinci fəsil GaSb-CrSb evtektik kompozitin sintezi və attestasiyası verilib. GaSb-CrSb evtektik kompoziti sintez etmək üçün öncə GaSb və CrSb birləşmələri alınıb. GaSb-CrSb evtektik kompozitin sintezi iki mərhələdə aparılmış: 86.6 çəki % GaSb və 13.4 çəki % CrSb kvarts ampulaya doldurulur və 10^{-2} Pa təzyiqdə vakuum yaradılır. Ampula elektrik sobasında 1000K temperaturda 4 saat titrəyişlə saxlandıqdan sonra söndürülür və otaq temperaturunadək soyudulur. Sonrakı mərhələdə ampula şaquli Bricmen sobasına salınaraq istiqamətlənmiş kristallaşma aparılır. Kristallaşma sürəti 0.3mm/dəqiqə; 0.6mm/dəqiqə və 1mm/dəqiqə seçilmişdir.

Kristalların quruluş analizi “Advance-D8” difraktometrində $2\Theta=5\div 80$ dərəcə bucaq bölümündə $\text{CuK}\alpha$ - şüalanması ilə $\lambda = 1.5406\text{\AA}$ – də, 40 kv, 40 mA rejimində ovuntudan istifadə etməklə aparılmışdır. Rentgen difraksiyası əsasında GaSb-CrSb evtektik kompozitin və CrSb birləşməsinin qəfəs sabitləri və sinqoniyası təyin olunmuşdur. GaSb-CrSb evtektik kompozitin Rentgen spektrində müşahidə olunan intensiv xətlərin GaSb matrisinə, zəif xətlərin isə CrSb qatmalarına uyğun gəldiyi müəyyən edilərək sistemin ikifazlılığı təsdiq edilmişdir.

GaSb-CrSb kompozitin mikroanalizi iki tip elektron mikroskopunda aparılıb. 1mm/dəqiqə kristallaşma sürəti ilə göyərdilmiş kompozitlərin mikrostrukturunu “EDS system - Oxford Inca X-act” sistemi təchiz olunmuş “FEI Quanta FEG” mikroskopun istifadəsi ilə səthin mikroqrafikası alınmış, matrisdə və metal çubuqlarda element tərkibi təyin olunmuşdur.

GaSb-CrSb evtektik kompozitin 0.3mm/dəqiqə kristallaşma sürəti ilə göyərdilmiş nümunələrində mikrostruktur analizi Zeiss SigmaTM FESEM (Field Emission Scanning Elektron Microscope) darayıcı elektron mikroskopunda aparılaraq uzunluğu $30\div 50\mu\text{m}$ və diametri $\sim 1.4\mu\text{m}$ olan CrSb metal qatmaların kristallaşma istiqamətində GaSb matrisində nizamlı paylandığı müəyyən olmuşdur.

GaSb-CrSb evtektik kompozitin konfokal Raman sistemində Raman spektrləri alınmışdır. Spektrlər “S&I Germany, based on Princeton Instruments, USA” spektrometrində 488nm, və 633nm dalğa uzunluqlu lazer şüaları və “Nanofinder 30” (Tokyo Instr., Japan) spektrometrində isə 532nm uzunluqlu həyəcanlandırıcı lazer şüaları tətbiq edilərək çəkilmişdir. Alınmış spektrlər GaSb birləşməsinin spektrləri ilə müəyisə

olunmuş və 230sm^{-1} , 240sm^{-1} tezlikli LO və TO fonon modalarına uyğun iki xəttin GaSb monokristalların uyğun olduğu, 111sm^{-1} və 148sm^{-1} tezlikli xətlərin isə Sb-Sb əlaqəsinə uyğun gəldiyi müəyyən olunub. CrSb birləşməsinin Raman spektrində də görünən xətlər də Sb-Sb əlaqəsinə uyğun gəlir. CrSb birləşməsinə uyğun xətlərin görünməməyi siqnalın zəifliyi ilə və ya Cr elementin elementar özəyində tək atomun olması ilə bağlı ola bilər (elementar özək tək atomlu olduqda optik rəqslər yaranmır).

İkinci fəsil GaSb-CrSb kompozitin və CrSb birləşməsinin termodinamiki tədqiqinə həsr olunmuşdur. GaSb-CrSb kompozitin və CrSb birləşməsinin $20\div 1000^{\circ}\text{C}$ temperatur bölümündə istilik selinin dəyişmə sürəti DSC, kütlənin dəyişməsi TG və DTA əyrisi “Perkin Elmer STA 6000” (Amerika) cihazında arqon atmosferində alınmış, arqon qazının axın sürəti 20 ml/dəq götürülmüşdür. Ölçülər qızma və soyuma rejimində aparılmışdır. Kompozit üçün ərimənin başlanğıc (943K) və son (965K) temperaturu, ərimənin entalpiyası (56.45808 C/q) müəyyən edilib.

Diferensial Darama Kalorimetri “NETZSCH DSC 204F1” cihazında tədqiqatlar $200\div 900\text{K}$ temperatur bölümündə arqon atmosferində aparılıb. Araşdırılan kompozit alüminium yuvacığda yerləşir. Etalon nümunə kimi safir götürülmüş, qızma sürəti 10K/dəq , təsirsiz qaz axınının sürəti 20ml/dəq , nümunənin çəkisi 40mq seçilmişdir.

İstilik selinin dəyişmə əyrisindən istilik tutumu, entropiya, entalpiya və Gibbs enerjisinin temperatur asılılığı hesablanmışdır. GaSb-CrSb evtektik kompozitin istilik tutumunun temperaturdan asılılığında $705\pm 20\text{K}$ -də müşahidə olunan pikin CrSb birləşməsində mövcud olan II növ faza keçidi ilə bağlı olduğu göstərilmişdir.

Üçüncü fəsildə elektrik keçiriciliyinin dörd zondlu ölçü metodu və istilik keçiriciliyin “stasionar istilik seli metodu” ilə ölçü qurğuların təsviri verilmişdir. Stasionar istilik seli metodu ilə istilik keçiriciliyin ölçü qurğusu eyni zamanda kinetik parametrləri - elektrik keçiriciliyi, Holl effekti, termoelektrik hərəkət qüvvəsini kompleks şəkildə tədqiq etmək üçün tətbiq olunur. Ölçmələr $80\div 700\text{K}$ temperatur bölümündə aparılır.

Elektrik keçiriciliyi ölçülərkən yol verilən xəta 2% , termoelektrik hərəkət qüvvəsində 5% və Holl əmsalında $8-10\%$ təşkil edir.

Stasionar istilik seli metodunda istilik nümunənin bir ucundan elektrik enerjisi kimi ötürülür və ondan keçən istilik seli bilavasitə ölçülür. Bu metodda nümunədən keçən istilik seli qiymətinə və istiqamətinə görə sabit qalır. Nümunənin səthindən baş verən istilik itkisi ondan axan istilik selinin cüzi hissəsini ($\sim 5\%$) təşkil etdiyindən nümunə boyunca temperaturun paylanması xətti götürmək olar. Qızdırıcı nümunənin uc hissəsinə

sarındığından ondan baş verən istilik itkiləri cüzi olur və istilik selinin 0.3-0.4%-ni təşkil edir. Naqillərdə baş verən istilik itkiləri nümunədən axan istilik selinin 1-2%-ni təşkil edir. İstilik keçiriciliyi ölçülərkən yol verilən xəta 80÷300K temperaturda 5% olmuşdur.

Dördüncü fəsil GaSb-CrSb evtektik kompozitin elektrik keçiriciliyi, termoelektrik hərəkət qüvvəsi və Holl əmsalının tədqiqinə həsr olunmuşdur. Metal iynələrin istiqamətindən asılı olaraq kinetik parametrlərdə anizotrop luq müşahidə olunmuşdur. Elektrik cərəyanı metal iynələr boyunca axdıqda qısaqapanma baş verdiyinə görə elektrik keçiriciliyin qiyməti digər istiqamətə nisbətən çox olur. 80K temperaturda

anizotrop luq dərəcəsi $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}=3$; 300K temperaturda isə $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}=2.8$ olur.

385÷555K temperatur bölümündə elektrik keçiriciliyin temperatur asılılığında müşahidə olunan azalma, daha yuxarı temperaturlardakı artma elektrik yükün tipinin dəyişməsi ilə bağlıdır. 450K-dən yuxarı temperaturlarda elektron-deşik kompensasiyası artır və elektrik keçiriciliyi azalır. Tip dəyişdikdən sonra elektronların konsentrasiyası və yürüklüyü kəskin şəkildə artdığından keçiricilik sürətlə yüksəlir. Yüksək keçiricilik fonunda qısaqapanma effekti zəif olur və 555K temperaturda anizotrop luq müşahidə olunmur. 600÷650K temperatur bölümündə elektrik keçiriciliyi əyrisində müşahidə olunan əyilmə CrSb çubuqlarında baş verən maqnit keçidi ilə bağlı olduğu göstərilir.

GaSb-CrSb evtektik kompozitin alınmış $\ln\sigma = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ asılılığından qadağan olunmuş zonanın eni $\Delta E_g \approx 0,76$ eV kimi təyin olunmuşdur.

Holl əmsalı ölçülərkən həm elektrik cərəyanı, həm də Holl elektrik hərəkət qüvvəsi qısa qapana bilər. Ona görə də Holl əmsalı elektrik cərəyanının (I) metal iynələrə (x) perpendikulyar, maqnit sahəsinə (B) paralel istiqamətində (I×B) ölçülmüşdür. Otaq temperaturunda deşiklərin konsentrasiyası üçün $2 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-2}$ alınmışdır. GaSb-CrSb evtektik kompozitin Holl əmsalında inversiyanın (520K) GaSb birləşməsinə (560K) nisbətən 40K aşağıda baş verdiyi müəyyən olunmuşdur.

Anizotrop luq metal iynələrin və istilik selinin qarşılıqlı istiqamətindən asılı olaraq termoelektrik hərəkət qüvvəsinin temperatur asılılığında da

görünür. $\Delta T||x$ halında iynələrlə qısaqapanma hadisəsi termoelektrik

hərəkət qüvvəsini azaldır və anizotrop luq dərəcəsi $\alpha_{\perp}/\alpha_{\parallel}=2.4$ olur.

GaSb-CrSb evtektik kompoziti müxtəlif kristallaşma sürətləri ilə sintez olunarkən (0.3mm/dəqiqə; 0.6mm/dəqiqə və 1mm/dəqiqə) kristallaşma sürətindən asılı olaraq iynələrin ölçülərinin qismən dəyişməsi elektrik keçiriciliyinin qismən dəyişməsinə səbəb olur. GaSb-CrSb evtektik kompozitin termoelektrik hərəkət qüvvəsinin temperatur asılılığında dəyişmə elektrik keçiriciliyinə nisbətən daha çox olur. Kristallaşma sürəti 1mm/dəq və 0.3mm/dəq olduqda bu fərq 80 K temperaturda 18%, 300K temperaturda isə 9% olur.

Elektrik keçiriciliyin effektiv qiymətini təyin edərəkən fazalar-arası sərhəd bölgəsində yaranan qeyri-bircins zonanın rolu nəzərə alınmışdır. Hesablanmış nəticələrlə eksperimental bilgilər arasında yaxşı uyğunluq alınmışdır. Elektrik keçiriciliyin anizotrop luğuna səbəb olan qısaqapanma prosesində fazalararası zonalar mühüm rol oynadığı müəyyən olunmuşdur.

Beşinci fəsilə GaSb-CrSb kompozitin istilik keçiriciliyi mütləq stasionar metodla ölçülmüş və istilik keçiriciliyində iştirak edən daşıyıcı mexanizmlər - qəfəs, elektron, foton və ionlaşma enerjisinin rezonansla ötürülmə mexanizmləri haqqında müasir təsəvvürlər verilmişdir. GaSb-CrSb kompoziti üçün 80÷300K temperatur bölümündə istilik keçiriciliyi $K(T)\sim T^{-0.8}$ qanunu ilə azalır. İstilik selinin iynələrə paralel və perpendikulyar istiqamətində $K(T)$ asılılığında müşahidə olunan anizotrop luğun dərəcəsi 80K-də $K_{\parallel}/K_{\perp}=1.27$ olur (K_{\parallel} və K_{\perp} - uyğun olaraq istilik selinin iynələrə paralel və perpendikulyar istiqamətində istilik keçiriciliyi). Anizotrop luq dərəcəsi temperatur artıqca azalır və otaq temperaturunda K_{\parallel} və K_{\perp} bir-birindən fərqlənmişdir. İstilik keçiriciliyində müşahidə olunan anizotrop luğu izah etmək üçün müxtəlif istilik mexanizmləri araşdırılmışdır.

Elektronların payına düşən istilik keçiriciliyi Videman-Frans formulu ilə hesablanaraq cüzi olduğu ($0.005 K_{um}$) müəyyən olmuşdur. Ona görə də istilik keçiriciliyində baş verən dəyişikliklərin fonon prosesləri ilə bağlı olduğu qəbul edilmiş və GaSb-CrSb evtektik kompozitin istilik keçiriciliyinin temperatur asılılığında müşahidə olunan anizotrop luğun $W_{\perp x}$ istiqamətində uzununa uzundalğalı fononların fazalararası zonaların sərhədindən səpilməsi ilə bağlılığı göstərilmişdir, Kallaveyin relaksasiya modelindən istifadə olunaraq fononların payına düşən istilik keçiriciliyi hesablanmış və 80÷200K

temperatur bolumündə nəticələrin təcrübi nöqtələrlə üst-üstə düşdüyü göstərilmişdir. 200K-dən yuxarı temperaturlarda isə təcrübi nəticələr nəzəri qiymətlərdən yüksəkdir və 300K temperaturda bu fərq 30% təşkil edir. İstilik keçiriciliyinə əlavə pay verən mexanizmi izah etmək üçün Koşino və Andonun təklif etdikləri mexanizmdən istifadə olunub. Bu mexanizmin mahiyyəti belədir: qadağan olunmuş zonada bir neçə lokallaşmış donor (akseptor) səviyyə mövcud olduqda aşqar səviyyədəki elektron həyəcanlanaraq keçirici zonaya keçir və həmin anda digər elektron keçirici zonanadan rezonansla nisbətən dayaz donor səviyyəyə qayıdır. Belə keçid ionlaşma enerjisini bir donordan digərinə daşınmasına səbəb olur. Temperatur qradienti olduqda ionlaşma enerjisinin soyuq tərəfə daşınması baş verir. İstiliyin rezonansla daşınmasının yükdaşıyıcıların konsentrasiyadan asılı olması bu mexanizmin əsas xüsusiyyətidir. Aşqar keçiricilik zamanı ionlaşma enerjisinin rezonansla ötürülməsi zamanı yaranan istilik keçiriciliyini Koşino və Ando təklif etdikləri formula ilə hesablanıb. Ümumi istilik keçiriciliyi ($K_{üm}$) hesablanarkən elektronların (K_{el}), fononların (K_f) və rezonansın (K_R) hesabına yaranan istilik keçiriciliyi toplanmışdır: $K_{üm} = K_{el} + K_f + K_R$.

İynələrin paralel və perpendikulyar istiqamətlərində ümumi istilik keçiriciliyi fononların nöqtəvi defektlərdən və sərhəddən səpilməsi, üçfononlu normal və atılma prosesləri nəzərə alınaraq hesablanıb və $T > 200K$ temperaturlarda ionlaşma enerjisinin rezonansla ötürülmə mexanizminə nəzərə alınmasının vacibliyi göstərilmişdir. Hesablanmış qiymətlərin təcrübi qiymətlərlə yaxşı uzlaşdığı göstərilib.

Evtetik kompozitlərdə istilik selinin müxtəlif istiqamətlərində istilik keçiriciliyinin təcrübi qiymətləri effektiv mühit yaxınlaşması çərçivəsində də şərh olunmuşdur. Fazalararası zonaların həcmi fraksiyasının nəzərə alınması ilə aparılan hesablamalar və təcrübi bilgiler arasında uyğunluğun alınması göstərir ki, fazalararası zonalar, elektron proseslərində olduğu kimi, fonon proseslərində də mühüm rol oynayır və istilik keçiriciliyində anizotropiyanın yaranmasında rol oynayan başlıca amildir.

ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. Rentgen-faza analizi ilə GaSb-CrSb sistemin ikifazlılığı təsdiq edilmiş; elektron mikroskopu ilə mikrostruktur araşdırılaraq uzunluğu $30 \div 50 \mu\text{m}$ və diametri $\sim 1.4 \mu\text{m}$ olan metal çubuqların kristallaşma istiqamətində matrisdə nizamlı paylandığı müəyyən olunub; rentgen

spektroqrafı ilə element tərkibi müəyyən edilərək matrisin Ga və Sb atomlarından, metal çubuqların əsasən Cr, Sb və az miqdarda Ga atomundan təşkil olunduğu müəyyən edilib.

2. Nümunələrin diferensial termik analizi (DTA) aparılaraq ərimənin başlanğıc və son nöqtələri üçün uyğun olaraq 943 K və 965 K müəyyən olunub.

3. Diferensial darama kalorimetrində GaSb-CrSb evtektik kompoziti üçün istilik selinin dəyişmə sürətinə əsasən istilik tutumu, entalpiya, entropiya və Gibbs enerjisinin temperatur asılılıqları hesablanıb; $700 \pm 20\text{K}$ temperaturda istilik tutumun temperatur asılılığında müşahidə olunan pikin CrSb birləşməsində mövcud olan II növ faza keçidi ilə bağlı olduğu göstərilib.

4. GaSb-CrSb evtektik kompozitin elektrik keçiriciliyində metal çubuqların qısa qapamaq xüsusiyyəti ilə bağlı müşahidə olunan anizotropluğu dərəcəsi 80K temperaturda 3 olur və temperatur artdıqca azalır; 520K temperaturda GaSb-CrSb evtektik kompozitin Holl əmsalında baş verən inversiyadan sonra anizotropluğu yox olması metal çubuqlarda qısaqapanma dərəcəsinin azalması ilə bağlıdır.

5. $385 \div 555\text{K}$ temperatur bölümündə kompozitin elektrik keçiriciliyin temperatur asılılığında müşahidə olunan azalma cırlaşmış yarımkeçiricilərdə olduğu kimi dəşiklərin tükənməsi ilə, və daha yuxarı temperaturlarda artma yükdaşıyıcıların tipinin dəyişməsi ilə bağlıdır.

6. $600 \div 700\text{K}$ temperatur bölümündə elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığında yaranan anomaliya CrSb çubuqlarında yaranan maqnit keçidin yaranması ilə bağlı olduğu göstərilib. Temperaturun bu bölümündə antiferromaqnit qatqılarda (CrSb) maqnit faza keçidi baş verir və nizamlı maqnit düzülüşün nizamsız düzülüşlə əvəz olunması nəticəsində elektronların enerjisinin və ya yürüklüyünün artması elektrik keçiriciliyin güclü artımına gətirir.

7. GaSb-CrSb evtektik kompozitin istilik keçiriciliyinin temperatur asılılığında müşahidə olunan anizotropluq $\Delta T \perp x$ istiqamətində uzununa uzundalğalı fononların fazalararası zonaların sərhədindən səpilməsi ilə bağlıdır.

8. GaSb-CrSb evtektik kompozitində 200K temperaturdan yuxarıda ionlaşma enerjisinin rezonansla ötürülmə mexanizmi ilə bağlı əlavə istilik daşıyıcı mexanizmin yarandığı göstərilib.

Dissertasiya mövzusunə aid elmi işlərin siyahısı

1. Rəhimov R.N., Məmmədov İ.X., Kazimov M.V., Araslı D.H., Xəlilova A.Ə., GaSb-CrSb evtektik kompozitinin alınması və strukturu // Journal Of Qafqaz University-Physics, 2013, v.1, No 2, pp.66-168
2. Rahimov R.N., Mammadov I.Kh., Kazimov M.V., Arasly D.H., Khalilova A.A., Structure and electrophysical properties of GaSb-CrSb eutectic composite // Moldavian Journal of the Physical Sciences, 2015, v.14, No 1-2 , pp.44-50
3. Araslı D.H., Rəhimov R.N., Kazimov M.V., Məmmədov İ.X., Xəlilova A.A., Mirzəyev M.N., Nağıyev C.Ə., GaSb-CrSb evtektik kompozitin termik analizi // AMEA-nın Xəbərləri, Fizika-Riyaziyyat və Texnika Elmləri Seriyası, Fizika və Astronomiya, c.35, №2, 2015, s.94-99
4. Rəhimov R.N., Məmmədov İ.X., Kazimov M.V., Araslı D.H., Xəlilova A.Ə., Yarımkeçirici metal tipli GaSb-CrSb evtektik kompozitin termodinamik xassələri // AMEA-nın Xəbərləri, Fizika-Riyaziyyat və Texnika Elmləri Seriyası, Fizika və Astronomiya, 2015, c.35, №5, s.104-107
5. Rəhimov R.N., Məmmədov İ.X., Araslı D.H., Xəlilova A.Ə., Kazimov M.V., GaSb-CrSb evtektik kompozitin istilik keçiriciliyində xüsusiyyətlər // AMEA-nın Xəbərləri, Fizika-Riyaziyyat və Texnika Elmləri Seriyası, Fizika və Astronomiya, 2016, c.36, №2, s.56-61
6. Rəhimov R.N., Məmmədov İ.X., Babayev S.S., Araslı D.H., Xəlilova A.A., Kazimov M.V., Qəribov R.Q., GaSb-CrSb evtektik kompozitin strukturu və Raman səpilməsi // AMEA-nın Xəbərləri, Fizika-Riyaziyyat və Texnika Elmləri Seriyası, Fizika və Astronomiya, Xəbərlər, 2016, c.36, №5, s.64-69
7. Rahimov R. N., Kazimov M.V., Arasly D.H., and Khalilova A.A., Mammadov I.Kh., Features of Thermal and Electrical Properties of GaSb-CrSb eutectic composite // Journal Ovonic Research, 2017, v.13, No. 3, pp. 113 – 118.
8. Rahimov R.N., Kazimov M.V., Mammadov İ.Kh., Arasly D.H., Khalilova A.A., Synthesis, structural study and transport properties of GaSb-CrSb eutectic composite / 7th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, Chisinau, Moldova, 2014, September 16-19, pp.102

9. Rahimov R.N., Kazimov M.V., GaSb-CrSb evtektik kompozitin elektrik xassələri, Gənc alim və mütəxəssislərin 7-ci Beynəlxalq Konfransı / Azərbaycan, Bakı-2014, s.217-218
10. Rahimov R.N., Mammadov I.Kh., Kazimov M.V., Arasly D.H., Khalilova A.A., Thermodynamic properties of semiconductor-metal type GaSb-CrSb eutectic composite / International Conference on Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials – Thermam-2015, Bakı, 17-18 september 2015, , pp. 100-101
11. Kazimov M.V., Rahimov R.N., GaSb-CrSb evtektik kompozitin istilik tutumu və faza keçidi / Qafqaz Universiteti, Gənc Tədqiqatçıların IV Beynəlxalq Elmi Konfransı, 29-30 Aprel 2016, s.46-48
12. Араслы Д.Г., Янукевич К.И., Рагимов Р.Н., Мамедов И.Х., Халилова А.А., Кязимов М.В., Ткаченко Т.М., Особенности тепловых свойств эвтектического композита GaSb-CrSb, Актуальные проблемы физики твердого тела / Международной научной конференции, 22-25 ноября 2016 года, Минск, Беларусь, с. 243-245
13. Kazimov M.V., Thermal Properties of GaSb-CrSb eutectic composite, I International Scientific Conference of Young Researchers Devoted / BEU, 2017, p.43-44

**МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА
И ТЕПЛА В ЭВТЕКТИЧЕСКОМ КОМПОЗИТЕ GaSb-CrSb.
РЕЗЮМЕ**

Данная работа посвящена получению эвтектического композита GaSb-CrSb при различных скоростях кристаллизации (0,3 мм/мин, 0.6мм/мин и 1 мм/мин), изучению структуры, механизмов переноса электрического заряда и тепла.

Рентгено-фазовым анализом подтверждена двухфазность система $(\text{GaSb})_{0.866}-(\text{CrSb})_{0.134}$. Исследованием микроструктуры металлографическим и сканирующим электронным микроскопом ("Zeiss SigmaTM Field Emission" и "FEI Quanta FEG") и элементного состава методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) подтверждено, что игольчатые металлические включения CrSb длиной 30÷50μm и диаметром 1.4μm в матрице GaSb ориентированы в направлении затвердевания и равномерно распределены.

В области температур 283÷1273K исследованы DTA, DSC и TG эвтектического композита GaSb-CrSb, определены температуры начала (943K) и завершения (965K) плавления композита. Рассчитаны энтропия (ΔS), энтальпия (ΔH) и энергия Гиббса (G) фазовых переходов, представлена температурная зависимость удельной теплоемкости. Наблюдаемые на зависимости удельной теплоемкости пики возможно связаны с магнитными переходами.

Исследованием температурных зависимостей электропроводности, эффекта Холла, термоэдс при взаимном направлении роста кристаллизации, электрического тока и магнитного поля в области температур 80÷750K показано, что короткозамыкающее действие металлических включений приводит к анизотропии этих параметров. Наблюдаемое изменение электропроводности и термоэдс при различных скоростях кристаллизации, связанное с изменением размеров включений, указывает на возможность управления параметрами исследуемого материала. Уменьшение электропроводности в интервале температур 385÷555K, а при высоких температурах их сильное увеличение связано с изменением типа проводимости. Изгиб в температурном интервале 600÷650K, по-видимому, связан с магнитным переходом.

Теплопроводность эвтектического композита GaSb-CrSb измерена в интервале температур 80-300К. Обнаруженная анизотропность при различных направлениях теплового потока и включений связана с сильным рассеянием длиноволновых фононов на границе включений при $W \perp x$. Рассмотрены механизмы переноса тепла в рамках модели Каллауэя. При вычислении теплопроводности учтено влияние точечных дефектов, трехфононных нормальных процессов и процессов переброса, а при температуре выше $T > 200\text{K}$, а также учтен механизм резонансной передачи энергии ионизации.

**ELECTRIC CHARGE TRANSPORT AND HEAT TRANSFER
MECHANISMS IN GaSb-CrSb EUTECTICS COMPOSITE**

SUMMARY

The thesis is devoted to obtaining a eutectic GaSb-CrSb composite at different crystallization rates (0.3 mm / min, 0.6 mm / min and 1 mm / min), structure study, electric charge transport and heat transfer mechanisms.

X-ray analysis showed that the $(\text{GaSb})_{0.866}(\text{CrSb})_{0.134}$ system is a two-phase eutectic composite, an investigation into the microstructure with a metallographic and scanning electron microscope (Zeiss Sigma TM Field Emission and FEI Quanta FEG) and elemental composition by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) is confirmed that in the GaSb matrix needle-like metallic inclusions of CrSb, 30-50 μm lengths and 1.4 μm in diameter, are oriented in the direction of solidification and distributed uniformly.

DTA, DSC and TG studies for GaSb-CrSb eutectic composite have been made in the 283÷1273K temperature range. The initial and final points of melting temperature are determined as 943K and 965K, respectively. The entropy (ΔS), the enthalpy (ΔH) and the Gibbs (G) energy for phase transitions are calculated and the temperature dependence of the specific heat is present. The peaks observed in the dependence of the specific heat are possibly associated with magnetic transitions.

An investigation of the temperature dependences of the electrical conductivity, the Hall effect, and the thermoelectric power in the direction of the growth of crystallization, electric current, and magnetic field in the temperature range 80÷750 K shows that the short-circuit effect of metallic inclusions leads to anisotropy of these parameters. The observed change in electrical conductivity and thermopower at different crystallization rates, associated with changes in the size of the inclusions, indicates the possibility of controlling the parameters of the material under study.

The decrease in electrical conductivity in the temperature range 385÷555 K, and at high values of temperatures, their strong increase is due to a change in the type of conductivity. The bending in the temperature range of 600÷650 K, apparently, is associated with a magnetic transition.

The thermal conductivity of the eutectic GaSb-CrSb composite was measured in the temperature range 80÷300 K. The observed anisotropy for

different directions of the heat flux and inclusions is associated with the strong scattering of long-wavelength phonons by the inclusion edges when $W \perp x$. The heat transfer mechanisms have been discussed in the framework of the Callaway model. Calculation of the thermal conductivity takes into account the influence of point defects, three-phonon normal and umklapp processes at temperatures above $T > 200\text{K}$, the mechanism of resonance transfer of ionization energy is also taken into account.

Kağız formatı: 60/84 16/1
Sayı: 100

AMEA-nın mətbəəsində çap olunmuşdur.

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

На правах рукописи

МОБИЛ ВАХАБ оглу КЯЗИМОВ

**МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА
И ТЕПЛА В ЭВТЕКТИЧЕСКОМ КОМПОЗИТЕ GaSb-CrSb**

2220.01– физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени доктора
философии по физике**

БАКУ - 2017