

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

Ge-Si <Ga, Sb, Ni> MÜRƏKKƏB AŞQARLANMIŞ BƏRK MƏHLULLARININ ALINMASI VƏ ELEKTRİK XASSƏLƏRİ

İxtisas: 2220.01– Yarımkəçiricilər fizikası

Elmi sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Elnarə Məhərrəm qızı İslamzadə**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı-2021

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun "Yarımkeçiricilərdə aşqarlar" laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor

Hüsnü Xəlil oğlu Əjdərov

Rəsmi opponətlər:

AMEA-nın müxbir üzvü,
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Oktay Əbil oğlu Səmədov

Əməkdar elm xadimi, fizika-riyaziyyat elmləri
doktoru, professor
Eldar Mehralı oğlu Qocayev

Fizika üzrə elmlər doktoru, professor
Mayıl Məsim oğlu Tağıyev

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının 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 üzrə elmlər doktoru, dosent
Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva

Elm seminarı sədri:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, dosent
Tələt Rzaqulu oğlu Mehdiyev



İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi.

Tərkib komponentləri elektron sənayesinin baza maddələri olan Si-Ge bərk məhlullarının kəsilməz sırasının klassik sistemi tətbiqi əhəmiyyətinə görə yarımkeçirici bərk məhlulların geniş sırasında əsas yeri tutur. Bu istiqamətdəki elmi işlərin aktuallığı və üstünlüyü materialın fundamental parametrlərinin və çox sayda elektroaktiv aşqarların xarakteristikalarının bərk məhlulun sadəcə tərkibini dəyişməklə kəsilməz dəyişilməsinə nail olma imkanına söykənir.

Ədəbiyyat məlumatlarına əsasən, Si-Ge kristallarının geniş istifadəsinin potensial sferasına termoelektrik generatorların infraqırmızı şüalanmasının dəyişən zonalı qəbuledicilərin, optoelektron cihazların geniş sırasının, epitaksiya üçün altlıqların, günəş elementlərinin, foto və qamma detektorlarının yaradılması daxildir. Bu hal verilən tərkibli və elektroaktiv aşqarların konsentrasiasının tənzimlənən səviyyəsinə malik keyfiyyətli kristalların alınmasına və onların elektron tərkibinin öyrənilməsinə dair işləri tədqiq etməyə cəlb edir.

Son illərdə Si-Ge həcmi kristallarının Çoxralski, Bricmen, zona əritmə və onların müxtəlif modifikasiya edilmiş üsulları ilə alınmasında əhəmiyyətli nailiyyətlər əldə edilmişdir. Si-Ge kristallarının xarakteristikaları və yarımkeçirici parametrlərini və onlarda dayaz və dərin aşqar mərkəzlərin spektrinin öyrənilməsinə bir çox işlər həsr olunmuşdur. Bərk məhlulun kristallaşması zamanı ərintinin tərkibində tipik dayaz aşqarların seqreqasiyasının dəyişməsi qanunauyğunluğu ilə bağlı məsələlər aktual tədqiqat mərhələsindədir. Tərkibində tez diffuziya edən elektroaktiv aşqarların olduğu mürəkkəb aşqarlanmış Si-Ge kristallarının elektron xassələri az öyrənilmişdir. Bu materiallara kristal qəfəsdə maddənin elektron köçürmə xassələrinə əhəmiyyətli təsir göstərən əlavə elektroaktiv komplekslərin yaranması imkanı xüsusi maraq kəsb edir. Digər tərəfdən, matrisdə sürətli diffuziyaedici aşqarın mövcudluğu uyğun temperaturalarda termik emal yolu ilə geniş

intervalda kristalın elektron xassələrini dəqiq idarə etməyə imkan verir.

Dissertasiya işi tipik dayaz aşqarlar və dərin mərkəzlərin tez diffuziyaedici atomları ilə mürəkkəb aşqarlanmış Si-Ge bərk məhlullarının alınması və tədqiqi üzrə AMEA-nın Fizika İnstitutunun elmi-tədqiqat, plan işləri çərçivəsində yerinə yetirilmişdir.

İşdə dayaz akseptor (Ga) və donor aşqarlarla (Sb), həmçinin, tez diffuziyaedici Ni atomları ilə mürəkkəb aşqarlanmış $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 \leq x \leq 0,15$) həcmi kristallarının alınması və tədqiq olunan materiallarda əsas aşqar hallarının spektrinin və elektrik köçürmə hadisələrinin xarakteristikasının müəyyən olunmasına yönəlmiş kompleks məsələlər həll edilmişdir. Qeyd edək ki, ikiqat yüklü akseptor aşqarı Ni-in seçilməsi onun tədqiq edilən materialların elektrikköçürmə xassələrinə effektiv təsir göstərməsinə və kristalın matrisindəki digər aşqarlarla müxtəlif elektroaktiv komplekslər yaratmaq xüsusiyyətlərinə əsaslanır.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Tədqiqatın obyektı mürəkkəb aşqarlanmış germaniumabənzər $\text{Ge}_{1-x} - \text{Si}_x < \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} >$ bərk məhlul kristalları ($0 \leq x \leq 0,15$). Tədqiqatın predmeti kimi bu kristalların alınmasının müxtəlif texnologiyalarının araşdırılması və həmin kristalların elektrofiziki xassələrinin tədqiqi.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Tədqiqatın obyektı mürəkkəb aşqarlanmış germaniumabənzər $\text{Ge}_{1-x} - \text{Si}_x < \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} >$ bərk məhlul kristalları ($0 \leq x \leq 0,15$). Tədqiqatın predmeti kimi bu kristalların alınmasının müxtəlif texnologiyalarının araşdırılması və həmin kristalların elektrofiziki xassələrinin tədqiqi.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri.

Verilmiş tərkibli (x) və aşqarların konsentrasiyasında dayaz (Ga, Sb) və dərin (Ni) aşqarlar ilə mürəkkəb legirə olunmuş $\text{Ge} < \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} >$ və $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} >$ kristallarının alınması. Əsas aşqar halların spektrinin dəyişmə xüsusiyyətlərini, elektrik köçürmə xarakteristikalarını və termoemal olunmuş bu materialların kristallarında elektroaktiv komplekslərin yaranması şərtlərini müəyyənləşdirmək.

Qoyulan məqsədə nail olmaq üçün işdə aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

1. Pfan yaxınlaşması və binar sistemlər üçün virtual mühit modeli çərçivəsində ərintidən konservativ və qeyri-konservativ metodlarla göyərdilmiş Ge və Ge-Si kristalında əsas komponentlərin (bərk məhlullar üçün) və Ga , Sb aşqarlarının aksial konsentrasiya paylanması üçün nəzəri təsviri.
2. Komponentlərin və aşqarların verilmiş aksial konsentrasiya paylanmasında $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x <\text{Ga}, \text{Sb}> (0 \leq x \leq 0,30)$ kristallarının göyərdilməsi üçün optimal metodları və texnoloji parametrləri təyin etmək.
3. $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x <\text{Ga}, \text{Sb}> (0 \leq x \leq 0,30)$ mürəkkəb aşqarlanmış kristalların ənənəvi və modifikasiya edilmiş Bricsmen həmçinin, ərintinin istiqamətlənmiş konsentrasiyon ifrat soyutma üsulu ilə göyərdilmə metodikalarının işlənib hazırlanması.
4. Nümunələrin yüksək temperaturalarda termoemalı və ardıcıl tablama nəticəsində diffuziya yolu ilə nikellə legirlənmə metodlarının işlənməsi.
5. Holl əmsalının temperatur asılılığının və elektrik keçiriciliyinin eksperimental qiymətlərinə əsasən $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x <\text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni}> (0 \leq x \leq 0,15)$ nümunələrində 77-350 K temperatur intervalında kristallarda aşqarların konsentrasiyasının müxtəlif nisbətlərində əsas aşqar halların spektrini həmçinin elektron və dəşiklərin yürüklüyünü təyin etmək və materialların termoemalının bu xarakteristikalarına təsirini öyrənməsi.
6. Germaniumabənzər mürəkkəb aşqarlanmış $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x <\text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni}>$ kristallarının alınmasına və elektrik xassələrinə aid bütün eksperimental nəticələrin təhlilini və izahını bu istiqamət üzrə mövcud olan nəzəriyyələr əsasında izah edilməsi.

Tədqiqatın metodları.

Müxtəlif metodlarla göyərdilmiş $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x (0 \leq x \leq 0,15)$ kristallarına aid elmi işlərin analizi və sistemləşdirilməsi aparılıb. Mürəkkəb aşqarlanmış $\text{Ge-Si} <\text{Ga}, \text{Sb}> (0 \leq x \leq 0,30)$ kristallarında əsas komponentlərin və aşqarların konsentrasiya paylanması üçün virtual

mühit modeli çərçivəsində riyazi modernləşdirilmə tərtib olunub. Ənənəvi və modernləşdirilmiş Bricmen metodu ilə göyərdilmiş $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} > (0 \leq x \leq 0,15)$ nümunələrində elektrik xassələrinin müəyyənləşdirilməsi üçün təcrübi üsul kimi Xoll ölçmələri istifadə olunub.

Müdafiyə çıxarılan əsas müddəalar.

1. Pfan yaxınlaşmasında və binar sistemlər üçün virtual mühit modeli çərçivəsində $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 \leq x \leq 0,30$) külçəsində komponentlərin (Ge,Si) və aşqarların (Ga,Sb) aksial konsentrasiya paylanması üçün alınmış riyazi ifadələr, ərintidən $< 5,5 \text{ mm/saat}$ sürəti ilə göyərdilmiş kristallar üçün təcrübi nəticələri kifayət qədər yaxşı təsvir edir.
2. Ərintidən konservativ və qeyri – konservativ yolla göyərdilmiş Ge – Si kristallarında əsas komponentlərin və aşqarların konsentrasiya profillərinin riyazi modelləşməsi verilmiş tərkibli kristalların alınması üçün optimal metod və texnoloji parametrləri müəyyən edir.
3. Diffuziya metodu ilə Ni-lə onun maksimal həll olma temperaturunda (1150K) diffuziya üsulu ilə legirə olunmuş $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} > (0 \leq x \leq 0,15)$ kristallarda əsas aşqar hallarının spektri, bu materiallarda aşqarlayıcı elementlərin hər birinə uyğun spektrlərin cəmindən ibarətdir.
4. Ge-Si $< \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} >$ kristallarının 1050-1080K temperaturda termoemalı matrisdə səviyyələri nikelin birinci akseptor səviyyəsindən aşağıda yerləşən əlavə dərin akseptor kompleksləri (DAK) yaradır. Bərk məhlullar üçün virtual kristal modelinə uyğun DAK-ın aktivasiya enerjisi matrisdə silisiumun miqdarı artdıqca artır. Bu səviyyələr üçün ən uyğun model $\text{Ni}_5\text{-Ga}_5$ və $\text{Ni}_4\text{-Ga}_5$ cütündən ibarət komplekslərdir.
5. Kristalların 770-1150K intervalında ardıcıl termiki emalı materialın elektron xassələrini dəqiq idarə etməyə imkan verir.
6. $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} >$ kristallarında sərbəst yükdaşıyıcıların 77-300K intervalında yürüklüyünə aid təcrübi nəticələrin hamısı üç əsas: fononlardan, ərintinin nizamsızlıqlarından və aşqar

ionlarından səpilmə mexanizminin additivliyi yaxınlaşması çərçivəsində nəzəriyyə ilə qənaətbəxş dərəcədə yaxşı izah olunur.

Tədqiqatın elmi yeniliyi.

Pfan yaxınlaşmasında ərintidən modifikasiya edilmiş Bricmen, zona əritmə üsulu, ərintinin istiqamətlənmiş konsentrasiion ifrat soyutma və ikiqat qidalandırma üsulları ilə göyərdilmiş Ge-Si bərk məhlullarının külçələrində komponentlərin (Ge,Si) və dayaz aşqarların (Ga, Sb) konsentrasiya paylanmasına, həmçinin bərk məhlulların hibrid metodla göyərdilməsinin dinamikasına dair riyazi məsələlər həll edilib.

$\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 \leq x \leq 0,30$) kristallarının Ga, Sb aşqarları ilə idarə edilən kompleks aşqarlanması və kristalların göyərdilməsi metodikası işlənmişdir. Aşqarların göstərilən konsentrasiyasında ($10^{15} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$) verilmiş tərkibli (x) həcmi $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ kristalları göyərdilmişdir.

Göstərilmişdir ki, Ni-lə onun maksimum həll olma temperaturunda (1150K) diffuziya üsulu ilə legirə olunmuş $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ <Ga,Sb,Ni> ($0 \leq x \leq 0,15$) kristallarında əsas aşqar halların enerji spektri bu materiallarda hər bir legirə olunmuş aşqar elementlərin uyğun spektrlərinin cəmindən ibarətdir.

Müəyyən olunmuşdur ki, Ge-Si <Ga,Sb,Ni> kristalların 1050-1080K temperaturdan tablanması matrisdə enerji səviyyəsi nikelin birinci akseptor səviyyəsindən aşağıda yerləşən əlavə akseptor mərkəzinin yaranmasına gətirir. Bu mərkəzlər üçün ən uyğun model Ni_s və Ga_s aşqarlarının əvəzedici atomları cütündən ibarət $\text{Ni}_s \text{ Ga}_s$ və ya Ni_i düşünürlərarası atomlarından və Ga_s -in əvəzedici atomlar cütündən ibarət $\text{Ni}_i \text{ Ga}_s$ komplekslərdir.

$\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ <Ga, Sb, Ni> kristallarında sərbəst yükdaşıyıcıların 77-300 K intervalında yürüklüyünün bütün eksperimental nəticələri matrisdə elektron və deşiklərin səpilməsinin üç əsas mexanizminin: qəfəs rəqslərindən, bərk məhlulun ərintisinin nizamsızlıqlarından və

ionlaşmış aşqar mərkəzlərindən səpilməsinin additivliyi yaxınlaşması çərçivəsində nəzəri olaraq kifayət qədər yaxşı izah olunur.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti.

Yuxarıda qeyd olunduğu kimi, Si-Ge kristallarının potensial istifadə sahəsi çox genişdir. Bu baxımdan işdə işlənmiş matrisdə əsas komponentlərin və aşqarların verilmiş konsentrasiya profilləri tərkibi ilə mürəkkəb aşqarlanmış həcmli $\langle \text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x \rangle$ kristallarının göyərdilməsi metodikası perspektivlidir. Bu metodikalar müxtəlif yarımqəçirici materialşünaslıq mərkəzlərində və laboratoriya praktikasında bərk məhlulların aşqarlanmış kristallarının əritidən konservativ və qeyri – konservativ metodlarla göyərdilməsi üçün müvəffəqiyyətlə istifadə oluna bilər. Beləliklə, verilmiş parametrlərlə legirlənmiş kristalların göyərdilməsi üçün optimal texnoloji parametrlər, işdə təqdim olunmuş riyazi münasibətlər əsasında uyğun modelləşmə ilə müəyyən olunur.

$\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ $\langle \text{Ga, Sb, Ni} \rangle$ ($0 \leq x \leq 0,15$) kristallarında əsas aşqar hallarının spektri bu kristallardan həm varizon, həm də spektrin infraqırmızı oblastında selektiv qəbuledicilərin yaradılması üçün istifadə edilməsi imkanını göstərir.

Mürəkkəb aşqarlanmış kristalların yüksək temperaturalarda (500 – 1150 K) termik emalı tez diffuziya olunan Ni aşqarının nəzərə almaqla, aşqar hallarının spektrinə, aşqarların effektiv konsentrasiyasına və matrisdə sərbəst yükdaşıyıcıların yüüklüyünə təsiri, yarımqəçiricinin elektrik xassələrini geniş diapazonda dəqiq idarə edilməsini mümkün edir.

Aprobasiyası və tətbiqi.

İşin əsas nəticələri «Кристаллофизика XXI века» V Beynəlxalq Elmi Konfransda (Moskva, 2013); “Novel Semiconductor Materials and structures” Beynəlxalq konfransda (Bakı 2013); altıncı beynəlxalq konfransda «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» (Moskva, 2015); "Opto, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası" beynəlxalq konfransında (Bakı 2015); akademik

H.B. Abdullayevin 100 illik yubileyinə həsr olunmuş “Modern Trends in Condensed Matter Physics MTCMP – 2018”, beynəlxalq konfransında (Bakı 2018) müzakirə edilmişdir

Nəşr olunmuş elmi işlər: **Dissertasiyanın əsas materialları 15 publikasiyada dərc edilmişdir ki, onlardan 8 - i məqalə,(onlardan 3-ü SCI siyahısına daxil olan impakt faktorlu jurnallarda) və 5 konfrans materialıdır.**

Dissertasiya işinin quruluşu, həcmi və əsas məzmunu. Dissertasiya girişdən, dörd fəsildən, əsas nəticələrdən ibarət olub, 163 səhifəlik və ümumi işarə sayı 160 357 olan kompüter mətnində şərh olunmuşdur. İşdə titullar 375, mündəricat 1932, giriş 12 831, dissertasiyanın əsas məzmunu 120 466, nəticə 2388 simvoldan ibarətdir. İstinad olunmuş ədəbiyyat siyahısı 135 sayda addan ibarətdir. Dissertasiyanın məzmununa 42 şəkil, 3 cədvəl daxildir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə, dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, tədqiqatın məqsədi, alınmış nəticələrin elmi yeniliyi və praktiki əhəmiyyəti, eləcədə müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar qeyd edilmişdir. Dissertasiyanın fəsillərinin məzmununu xarakterizə edən məlumatlar qısa şərh olunmuşdur.

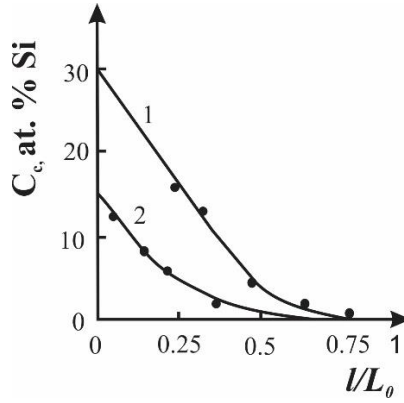
Birinci fəsil silisium, germanium kristallarının və onların bərk məhlullarının fundamental yarımkeçirici, eləcədə quruluş, aşqar xarakteristikalarına aid ədəbiyyat icmalına və əsas ədəbiyyat materiallarının analizinə həsr olunmuşdur. Bu klassik maddələrin energetik və kristal quruluşuna aid məlumatlar da verilmişdir. Müzakirə olunan kristallarda dərin və dayaz aşqar mərkəzlərin əsas energetik hallarının spektrinə və bu istiqamətdə nəzəriyyənin vəziyyətinə həsr olunmuş əsas işlər nəzərdən keçirilmişdir. Bu kristalların elektrikköçürmə xassələrinə, həmçinin matrisdə elektron və dəyişklərin yürüklüyü və əsas səpilmə mexanizmlərinə aid işlərin nəticələri təqdim olunmuş və təhlil edilmişdir.

İkinci fəsildə Ge-Si sisteminin bərk məhlullarının həcmi monokristallarının göyərdilməsinə aid texnologiyanın vəziyyətinin qısa

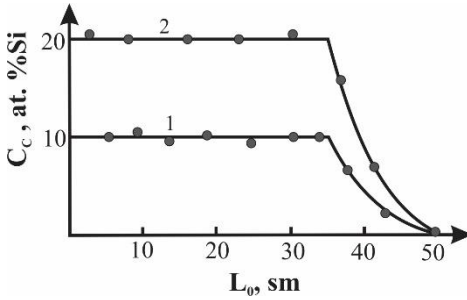
xarakteristikası verilib, bu kristalların ərintidən konservativ və qeyri-konservativ yolla göyərdilməsinə və aşqarlanmasına aid nəticələr təqdim olunmuşdur. Ge – Si sistemi bərk məhlul kristallarının ərintidən göyərdilmə texnologiyasının müasir vəziyyətini qısaca ümumiləşdirdikdə aşağıdakı nəticəyə gəlmək olar. Son 2-3 onilliklərdə əldə edilən uğurlar bütün bərk məhlulların kəsilməz sırası boyunca dəyişən və həmçinin daimi aksial tərkibdə Ge – Si monokristallarının alınmasına imkan verir. Texnologiyanın bu imkanları bu materialların elmi tədqiqatına olan tələbatları ödəyir. Burada materialların göyərdilmə sürətinin kiçik götürülməsi onun monokristallığının və homogenliyinin təmin edilməsi üçün lazımdır və bu bərk məhlul külçələrinin sənaye miqyasında alınması üçün sərfəli deyil. Məsələnin həlli Ge-Si monokristalının buta olmadan zona əritmə və Çoxraliski metodları əsasında tam avtomatlaşdırılmış texnologiya ilə mümkündür. Bu metodların tətbiqində kristallaşma cəbhəsində yüksək temperatur qradientinin alınmasının mümkünlüyü kifayət edən yüksək sürətlə ərintinin kristallaşması zamanı keyfiyyətli monokristalın göyərdilməsinə imkan verir.

İşdə $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 \leq x \leq 0,30$) kristalları silisium mayasından istifadə etməklə ənənəvi Bricmen üsulu ilə; ərintini verilmiş tərkibli Ge-Si külçəsi ilə qidalandırmaqla modifikasiya olunmuş Bricmen metodu ilə və ərintini istiqamətlənmiş konsentrasiyon ifrat soyudulma üsulu ilə göyərdilmişdir. Kristalların maksimal uzunluğu və diametri uyğun olaraq, 50 mm və 14 mm, böyümə sürətləri isə 1-4 mm/saatdır.

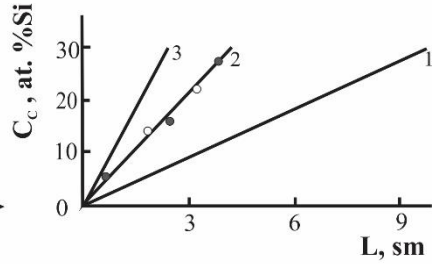
Şəkil 1-də nümunə üçün bu metodlarla yetişdirilmiş iki Ge-Si kristallarız boyunca Si-un konsentrasiya paylanması (C_c) xarakterik ayrıları təqdim edilmişdir. Dairələr və bütöv xətlərlə uyğun olaraq, təcrübi və nəzəri qiymətlər işarələnmişdir. C_c -in təcrübi qiymətləri Ge-Si bərk məhlullarının külçələrinin müxtəlif hissələrindən kristallaşma oxuna perpendikulyar istiqamətdə kəsilmiş qalınlığı ~ 1 mm olan disklərin sıxlığını ölçməklə müəyyən edilmişdir. Qeyd edək ki, Ge-Si nümunələrinin sıxlığı, Si ($\sim 2,33 \text{ q/sm}^3$) və Ge ($\sim 5,33 \text{ q/sm}^3$) sıxlıqları arasındakı fərqi böyüklüyü



A



B



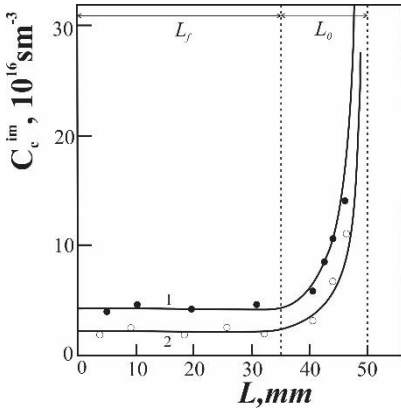
C

Şək. 1. Müxtəlif metodlarla göyərdilmiş iki Ge-Si kristallarının uzunluğu boyunca Si-un konsentrasiyasının paylanması: ənənəvi Bricmen metodu ilə (A); Ge-Si-qidalandırıcı çubuqlarından istifadə edərək modifikasiya olunmuş Bricmen metodu ilə (B) və ərintinin istiqamətlənmiş konsentrasiyon ifrat soyudulma metodu ilə (C). Dairələr – eksperimental, bütöv xətlər - Pfann yaxınlaşmasında hesablanmış nəzəri məlumatlardır. (A) – 1, 2 ayrıləri uyğun olaraq $\text{Ge}_{0.93}\text{Si}_{0.07}$ və $\text{Ge}_{0.973}\text{Si}_{0.027}$ ilkin tərkibli ərintilərdən göyərdilmiş kristallara uyğundur. Kristalların ümumi uzunluğu $L_0 = 40$ mm-dir. (B) – 1, 2 ayrıləri - müvafiq olaraq $\text{Ge}_{0.90}\text{Si}_{0.10}$ və $\text{Ge}_{0.80}\text{Si}_{0.20}$ mayalarının istifadəsi ilə yetişdirilmiş kristallara uyğundur. (C) – 1,2,3 düz xətləri müvafiq olaraq ərintidə $\partial T / \partial L = 10, 23$ və 40 K/sm-ə bərabər olan T qradiyentlərinin mövcud olduğu hallara uyğundur.

səbəbindən, tərkib dəyişmələrinə qarşı kifayət qədər həssasdır. Hər bir diskin sıxlığı hidrostatik metodla (havada və suda çəkilməklə) təyin edilmişdir. Göstərilən metodlarla göyərdilmiş bütün kristallarda komponentlərin aksial konsentrasiya paylanması nəzəri əyriləri Pfan yaxınlaşmasında alınan ifadələr əsasında hesablanmışdır. Şəkil 1-dən göründüyü kimi, Ge-Si kristallarının üç göyərdilmə metodunun hər biri (A, B və C) üçün külçənin uzunluğu boyu C_c -nin eksperimental və nəzəri qiymətləri bir-birilə yaxşı uzlaşır. Bu uzlaşma bütün texnoloji prosesdə kristallaşma cəbhəsində maye və göyərən kristal arasında faza tarazlığına yaxın şəraitin yaranmasını təsdiq edir. Şəkil 1-dən aydın olur ki, bu üç metodun birgə potensialı həm biricins, həm dəyişən (matris boyunca komponentlərin konsentrasiyasının xətti dəyişməsi də daxil olmaqla) tərkibli Ge-Si bərk məhlullarının kristallarını göyərtməyə imkan verir.

Dayaz aşqar mərkəzlər tədqiq etdiyimiz kristallara ərintidən göyərdilmə prosesində daxil edilmişdir. Bu ona görə mümkün olmuşdur ki, Ge-Si kristallarının ərimə temperaturunda aşqarların kifayət qədər yüksək həllolması (10^{19} sm^{-3} - 10^{20} sm^{-3}) müşahidə olunur. Kristallarda aşqarların paylanmasını və konsentrasiya səviyyəsini müəyyən edən parametrlər seqreqasiya əmsalıdır. Ge-da bu parametrlərin tarazlıq qiymətləri Ga, Sb üçün uyğun olaraq 0,087 və 0,003, Si -da isə 0,008 və 0,023-ə bərabərdir. Bu parametrlərin qiymətlərinin kiçik olması, ənənəvi yollarla ərintidən göyərdilmiş kristalların oxu boyunca aşqarların konsentrasiyanın əhəmiyyətli dərəcədə qradientə malik olmasına gətirir.

Şəkil 2-də ərintinin və qidalandırıcı külçələrin ilkin tərkibi uyğun olaraq $C_1^0=1.7 \text{ at\% Si}$ və $C_F=10 \text{ at\% Si}$ olduqda (şəkil 1(B)), modifikasiya olunmuş Bricmen metodu ilə göyərdilmiş Ge-Si kristallarının uzunluğu boyu Ga və Sb aşqarlarının konsentrasiya asılılığının (dairələrlə işarə edilmiş) xarakterik eksperimental əyriləri nümunə üçün göstərilmişdir. Qeyd edək ki, (Ga, Sb) aşqarları ligatur şəklində Ge və Si maddələri ilə birlikdə mayanın üstündəki tigeldə



Şək. 2. Şəkil 1(B) - də göstərilən iki kristalda Ga (1) və Sb (2) aşqarlarının konsentrasiya asılılığı: xətlər – (1) və (2) düsturlarına görə, silisiumun sabit (I) və dəyişkən (II) konsentrasiyaları [$C_l^{0,Ga} = 5.3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ və $C_l^{0,Sb} = 4.6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$] oblastları üçün hesablanmışdır.

yerləşdirilir. Aşqarların konsentrasiyası alınmış kristalların müxtəlif hissələrindən hazırlanmış nümunələrin Holl ölçmələrinə əsasən müəyyən edilmişdir. Ge-Si kristallarında aşqarların konsentrasiyasının aksial paylanması nəzəri olaraq Pfann yaxınlaşmasında və ikikomponentli sistemlər üçün virtual mühit modeli çərçivəsində həll edilmişdir. Bu halda kristalın göyərdilməsinin birinci və ikinci mərhələsinə (bax şəkl.1(B)) uyğun gələn aşağıdakı ifadələrdən istifadə edilmişdir:

$$C_c^{im} = C_l^{im} K_{im}^f = C_l^{0,im} K_{im}^f e^{-\gamma K_{im}^f} \quad (1)$$

$$C_c^{im} = C_l^{im} K_{im}^x = C_l^{0,im} K_{im}^x (1 - \gamma)^{K_{im}^x - 1} \quad (2)$$

(1) və (2) tənliklərində aşağıdakı işarələmələrdən istifadə edilmişdir: C_c^{im} – aşqarların göyərdilmiş kristalda konsentrasiyası; $C_l^{0,im}$, C_l^{im} – uyğun olaraq başlanğıc və cari kristallaşma anında aşqarların ərində konsentrasiyası; $K_{im}^x = C_c^{im} / C_l^{im}$ – aşqarın kristalın tərkibindən xətti asılı olan tarazlı seqreqasiya əmsalı; K_{im}^f – aşqarın $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ -nin ilkin qidalandırıcı külçənin tərkibinə uyğun seqreqasiya əmsalı; $\gamma = L/L_0$

– sonlu ərimə zonasının gətirilmiş uzunluğudur. (2) disturundakı $\gamma = L/L_0$ parametrinin qiyməti işdə alınmış aşağıdakı tənlikdən təyin olunur:

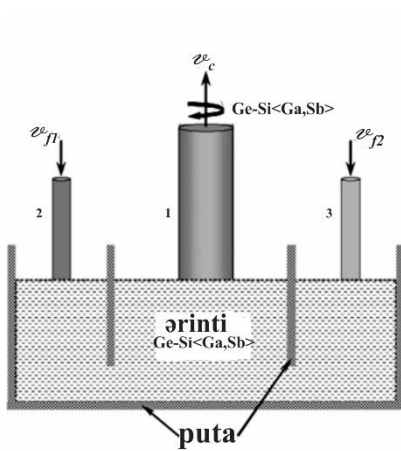
$$\gamma = \frac{L}{L_0} = 1 - \exp \left[\int_{C_l^{0,im}}^{C_l^{im}} \frac{dC_l^{im}}{C_l^{im} (1 - K_{im}^x)} \right] \quad (3)$$

Bu integralı hesablamaq üçün tələb olunan verilənlər kristallaşmanın ikinci mərhələsinin başladığı andan etibarən kristalın uzunluğu boyunca Si konsentrasiyasının paylanması asılılığından götürülmüşdür (Şəkil 1 (B)).

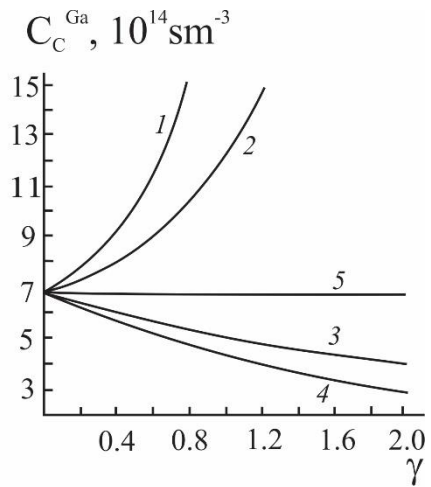
Şək. 2-də bütöv xətlərlə külçələrdə Ga və Sb-un konsentrasiya profillərin yekun hesablama ayrıləri göstərilmişdir. Birinci mərhələdə kristal boyunca aşqarların konsentrasiyası demək olar ki, dəyişməz olaraq qalır. Bu, birinci mərhələdə əsas komponentlər üzrə ərintinin həcmnin və tərkibinin sabitliyi, eləcədə Ga və Sb-un seqreqasiya əmsallarının qiymətlərinin kifayət qədər aşağı olması ilə əlaqədardır. Son mərhələdə ($L > L_f$) kristaldakı aşqarların konsentrasiyasının artması qanunauyğunluğu ənənəvi Bricmen metodu ilə alınmış kristallardakı analogi hala uyğundur. Göründüyü kimi, kristalın göyərməsinin həm 1-ci, həm də 2-ci mərhələsində nəzəri və eksperimental nəticələrin uzlaşması kifayət qədər yaxşıdır.

Ərintinin istiqamətlənmiş konsentrasiyon ifrat soyudulma metodu və ənənəvi Bricmen üsulu ilə göyərdilmiş Ge-Si kristallarında aşqarların paylanması ilə bağlı nəzəri və təcrübi məlumatların müqayisəsi də eyni nəticəyə gətirir.

İkinci fəsildə həmçinin, perspektivli metodlardan biri olan ərintidən ikiqat qidalandırma üsulu ilə göyərdilən Ge-Si kristallarında dayaz aşqarların konsentrasiya paylanmasının modelləşdirilməsi haqqında məlumatlar da təqdim edilmişdir. Şək. 3 (A)-da Ge-Si kristallarının bu üsulla göyərdilməsinin və aşqarlanmasının konseptual sxemi göstərilmişdir. Verilən tərkibli



A



B

Şək. 3. (A) – Aşqarlanmış Ge-Si monokristallarının ərintinin ikiqat qidalandırma üsulu ilə göyərdilməsi üçün istifadə edilən qurğunun sxemi: 1 - böyüyən monokristal; 2, 3 – Ge və Si qidalandırıcı çubuqları. (B) – Ərintinin ikiqat qidalandırılmasının müxtəlif rejimlərində göyərdilən $\text{Ge}_{0.75}\text{Si}_{0.25}$ kristallarında qallium aşqarının konsentrasiya profilləri: (1) – $\alpha + \beta = 0.25$, $\alpha = 0.197$; (2) – $\alpha + \beta = 0.5$, $\alpha = 0.215$; (3) – $\alpha + \beta = 1.25$, $\alpha = 0.268$; (4) – $\alpha + \beta = 1.50$, $\alpha = 0.285$; (5) – $\alpha + \beta = 0.933$, $\alpha = 0.245$.

Ge-Si <Ga, Sb> kristalının ərintidən göyərməyə başladığı andan ərintiyə eyni zamanda təmiz Si və Ge qidalandırıcı çubuqları daxil edilir. Kristallaşma və ərintinin qidalandırılma sürətlərinin nisbətinin müvafiq seçimində ərintidə və göyərən kristalda əsas komponentlərin konsentrasiyası sabit qalır. Ərintidən ikiqat qidalandırma yolu ilə göyərdilən $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ kristallarında Ga və Sb aşqarlarının paylanması məsələsinin riyazi həlli Pfan yaxınlaşmasında aşağıdakı düsturla ifadə olunur:

$$C_c^{im} = C_l^{im} K_{im}^x = C_l^{0,im} K_{im}^x [1 - \gamma(1 - \alpha - \beta)]^{\frac{(K_{im}^x + \alpha + \beta - 1)}{(1 - \alpha - \beta)}} \quad (4)$$

Yuxarıda qəbul edilmiş işarələmələrə əlavə olaraq, burada γ – ərintinin başlanğıc vahid həcmində kristallaşmış ərintinin payı, α və β – uyğun olaraq ərintinin ikinci (Si) və birinci (Ge) komponentləri ilə qidalanma sürətinin kristallaşma sürətinə nisbətidir.

Şək. 3(B)-də nümunə üçün 5 fərqli rejimdə ikiqat qidalandırma metodu ilə göyərdilmiş $\text{Ge}_{0.75}\text{Si}_{0.25}$ kristalında Ga aşqarının kristal boyunca konsentrasiya paylanması (4) tənliyinə əsasən hesablanmış və xarakterik ayrılər şəklində göstərilmişdir.

Bütün rejimlər üçün ərintidə olan aşqarların başlanğıc konsentrasiyası $1 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ olaraq qəbul edilir. Göründüyü kimi ərintinin ikiqat qidalanması halında, əsas komponentlərin verilmiş tərkibində kristalda Ga və Sb aşqarlarının konsentrasiya gradientini geniş intervalda idarə etmək imkanı yaranır. Ge-Si bərk məhlullarında həm əsas komponentlərin tərkibinə, həm də matrisdəki aşqarların konsentrasiya profilinə görə tamamilə bircins kristallarının alınmasının mümkünlüyü xüsusi əhəmiyyət kəsb edir (əyri 5).

İşdə, Ge-Si kristallarında Ga və Sb aşqarlarının konsentrasiya paylanmasının riyazi modelləşdirilməsinin bütün nəticələrinə əsaslanaraq, əsas komponentlərin tərkibi və aşqarların aksial paylanması (bircins paylanma da daxil olmaqla) üzrə öncədən verilmiş şərtlər daxilində bərk məhlulların aşqarlanmış monokristallarının alınma texnologiyaları arasında ərintinin ikiqat qidalandırma metodunun geniş imkanlara malik olması göstərilmişdir.

Üçüncü fəsildə nümunələrin ölçülməsi və termik emalı üsulları təsvir edilmişdir. Yarımqəçirici quruluşa malik Ge, Si və onların bərk məhlullarında sərbəst yükdaşıyıcılarının Holl-faktoru, həmçinin, bu materialların matrislərində Ni, Ga və Sb aşqar səviyyələrinin cırlaşma dərəcəsi və faktoru ilə bağlı məsələlər müzakirə olunmuşdur. Mürəkkəb aşqarlanmış $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 \leq x \leq 0.15$) kristallarının Holl əmsalının 77-300 K intervalında təcrübi nəticələrinə əsasən dərin aşqar mərkəzlərinin əsas enerji səviyyələri,

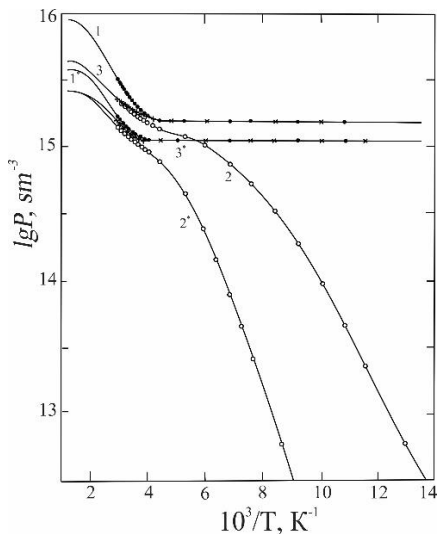
habelə, yüksək temperatur emalının bu halların spektrinə təsiri müəyyən edilmişdir. Mürəkkəb aşqarlanmış Ge-Si <Ni, Ga, Sb> kristallarında 850–1150 K temperatur intervalında termoemal yolu ilə elektronların və dəşiklərin konsentrasiyasını idarə etmək imkanının mümkünlüyü göstərilmişdir. Nümunələrin yüksək temperaturda termoemalı zamanı kristallarda Ga və Ni aşqarları arasında əlavə elektroaktiv komplekslərin yaranması şərtləri müəyyən edilmişdir.

Xoll ölçülərinin aparılması üçün ikinci fəsildə qeyd olunan üsullarla göyərdilmiş və aşqarlanmış Ge və Ge – Si çubuqları kristallaşma oxuna perpendikulyar olaraq disklərə bölünür. Disklərin qalınlığı 1-2 mm təşkil edir. Sonra bu disklərdən (1-2)x(2-3)x(10-14)mm³- ölçülərdə paralelepiped formasında nümunələr düzəldilir. Nümunələr cilalanmadan sonra distillə olunmuş su ilə yuyulur və HF:HNO₃:H₂O =4:1:1- nisbətində hazırlanmış qarışıqda 10-15 dəq kimyəvi aşılır. Distillə olunmuş su ilə yuduqdan sonra nümunələr yenidən 3 % -li qaynayan hidrogen - peroksid məhlulunda bir neçə dəqiqə kimyəvi aşılır. Nümunələrin belə kimyəvi işlənməsi Sn:In= 2:(1-2) materialın səthində 4,2-350 K temperatur intervalında yaxşı aqrezin lehimlənmədə mexaniki möhkəmliyini və kontaktın omikliyi təmin edir. Sn-In- ilə lehimlənmiş yerlərdə qoyulan omik kontaktlar mikropolyalnikin köməyi ilə qoyulur. Nümunələrin lehimlənməsi vakuumda 300-350 ° temperaturda 20-30 dəq ərzində aparılır. 60-350 K temperatur intervalında nümunələrdə Holl effektinin və elektrikkeçiriciliyinin temperatur asılılığının ölçməsinə istifadə edilmiş kriomaqnit sistem standart məsələlər aiddir. Burada 77 K – dən aşağı temperatur rejiminin nümunənin tutacağına yerləşdiyi maye azotla düyorda havanın sorulması yolu ilə alındığını qeyd etməklə kifayətlənirik. Elektrik keçiriciliyi və Holl ölçələri üçün klassik metoddan istifadə edilib buna görə biz ölçmələrin xətasının analizini aparmışıq. Holl əmsalının qiyməti 3000 ersted olan daimi maqnit sahəsində müəyyən edilib. Nəzərə alsaq ki, bu işdə elektrik keçiriciliyini və Holl əmsalını ölçmək üçün klassik metoddan istifadə edilib və biz ölçmələrin xətasının analizini aparmamışıq. Burada biz Holl əmsalının müəyyən edilməsində

ümumi xətanın $< 10\%$, elektrik keçiriciliyində isə $< 5\%$ olduğunu qeyd etməklə kifayətlənəcəyik.

Məlumdur ki, termik işlənmənin yarımkəçiricilərin elektrik xassələrinə təsirinin öyrənilməsinə yönələn tədqiqatlar iki məsələnin həllini tələb edir. Birinci məsələ idarə olunmayan aşqarların nümunənin səthinə düşməsinə minimumlaşdıran yüksək səviyyəli təmiz texnoloji əməliyyatın təmin edilməsi ilə bağlıdır. İkinci məsələ yüksək temperturlarda əriyən nümunələrin alçaq temperaturda və bərkiməsi şəraitin yaradılmasıdır. İkinci məsələnin həllinin vacibliyi verilmiş yüksək temperturlarda termik işlənmə zamanı tədqiq olunan materiallarda aşqar atomları, qəfəs qüsurları və matrisada müxtəlif komplekslərin yerinin dəqiq müəyyən edilməsi ilə bağlıdır.

Mürəkkəb aşqarlanmış Ge və Ge-Si kristallarında aşqar hallarının tədqiqinə istiqamətlənmiş işimizin əsas məqsədi aşqarların qarşılıqlı təsiri nəticəsində matrisdə yaranan əlavə elektroaktiv mərkəzlərin əmələ gəlməsi şərtlərini müəyyən etməkdir. Bunu nəzərə alaraq, bu istiqamətdəki nəticələrin qısa təqdimatı ilə kifayətlənirik. Göstərilmişdir ki, diffuziya metodu ilə maksimum həllolma temperaturunda (1150-1175 K) nikellə aşqarlanmış $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ (Ni , Ga , Sb) ($0 \leq x \leq 0.15$) kristallarında, qeyd olunan aşqarların konsentrasiya nisbətindən asılı olaraq, Holl ölçmələri zamanı yalnız bu aşqarların əvəzedici atomları ilə əlaqəli müxtəlif səviyyələr yaranır. Lakin 800-1100 K intervalında sonrakı termoemala məruz qalmış geniş sayda nümunələrdən alınan məlumatların təhlili göstərdi ki, 1020–1050 K intervalında tablanmış kristallarda Ni_5 -in birinci akseptor səviyyəsindən aşağıda əlavə səviyyələr yaranır. Holl ölçmələrində bu səviyyələr Ga -un konsentrasiyası 10^{16} sm^{-3} olan nümunələrdə, bu aşqarın akseptor səviyyəsiningüclü kompensasiyası olduğu halda müşahidə edilir. Şək. 4-də misal olaraq, iki belə nümunə – Ge (Ni , Ga , Sb) və $\text{Ge}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ (Ni , Ga , Sb) – üçün dəşik konsentrasiyasının (p) temperatur asılılıqları göstərilmişdir. Nikellə aşqarlamadan əvvəl hər iki nümunə dəşik keçiriciliyinə malik idi. Bu, N_{Ga}^* konsentrasiyası Ge -də $1,5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $\text{Ge}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ -də isə



Şək. 4. İki – Ge <Ga, Sb, Ni> (1 - 3) və Ge_{0.9}Si_{0.1} <Ga, Sb, Ni>

(1* - 3*) – nümunə üçün sərbəst dəşiklərin (p) konsentrasiyasının temperatur asılılığı: 1, 1* - nümunələr müvafiq olaraq 1150 və 1165 K temperaturda nikellə aşqarlandıqdan sonra; 2, 2* - müvafiq olaraq, 1020 və 1030 K temperaturda termoemaldan sonra; 3, 3* - 18 saat ərzində 560 K temperaturda tablamadan sonra. Bütöv xətlər eksperimental nəticələrlə ən yaxşı uzlaşan nəzəri hesablamalardır.

$1,1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olan qallium aşqarının hesabına yaranmışdı. Nikellə aşqarlamadan sonra nümunələrin $p(T)$ asılılığına dair eksperimental məlumatlar (1 və 1* ayrıləri), müvafiq konsentrasiyaya malik Ga-un dayaz akseptor səviyyələri ilə şuntlanmış Ni_s-in birinci aktivasiya səviyyəsini nəzərə alan nəzəriyyə ilə kifayət qədər yaxşı izah edilir.

Şəkildən göründüyü kimi Ge və Ge_{0.9}Si_{0.1}, nümunələrinin müvafiq olaraq, 1020 və 1030 K-də termoemalı, hər iki nümunə üçün $p(T)$ ayrılərinin gedişində ciddi dəyişikliklərə səbəb olur (2 və 2* ayrıləri). Nümunələrdə iki fərqli səviyyənin aktivləşməsi ayrılərdən aydın görünür. Aşağı temperaturlarda p -nin T -dən asılı olaraq eksponensial azalması yarımkeçiricidə qismən kompensasiya olunmuş səviyyənin aktivləşməsi ilə əlaqədardır və bu, matrisdə əlavə dərin akseptorların (DA) yarandığına, eləcədə N_{Ga}^* konsentrasiyalı qallium akseptor səviyyələrinin tam kompensasiya olunduğuna dəlalət edir. Yuxarı temperaturlarda p -nin T -dən asılı olaraq artması Ni_s-in birinci səviyyəsinin ionlaşması ilə əlaqədardır.

Yuxarıda göstərilən şərtlər daxilində termoemala məruz qalan bütün mürəkkəb aşqarlanmış kristallarda əlavə DA meydana gəlməsi baş verir. Əlavə DA səviyyələri bizim tədqiq etdiyimiz bütün $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ga, Sb, Ni} > (0 \leq x \leq 0,15)$ nümunələrində ortaya çıxır.

Bu mərkəzlərin aktivləşmə enerjisi matrisdəki silisiumun konsentrasiyasından xətti asılı olaraq artır və $\text{Ge} - 75 \text{ meV}$, $\text{Ge}_{0.85}\text{Si}_{0.15} - 138 \text{ meV}$ təşkil edir.

Əlavə DA səviyyələrinin təbiətini müəyyən etmək üçün nümunələrin $\sim 550\text{-}570 \text{ K}$ temperaturda əlavə tablanması aparılmışdır. Müəyyən olundu ki, bu temperaturlarda nümunələrdə DA səviyyələri parçalanır və 18 saatlıq tablanma isə onların tamamilə yox olmasına gətirir. Şəkil 4-də, 3 və 3* əyriləri, baxılan nümunələrdə belə tablanmadan sonra dəşik konsentrasiyasının temperaturdan asılılığını nümayiş etdirir.

Göründüyü kimi, hər iki nümunə üçün eksperimental nəticələr, nümunələrin termoemalına uyğun temperaturlarda həll olan nikelin konsentrasiyasına bərabər $\text{Ni}_{\text{S-1}}$ -ci səviyyəsinin aktivasiyasını nəzərə alan nəzəriyyə ilə kifayət qədər yaxşı izah edilir. Qeyd edək ki, 1 və 1* əyrilərində olduğu kimi, burada da şuntlayıcı qallium atomlarının konsentrasiyaları uyğun olaraq Ge və $\text{Ge}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ -dakı ilkin N_{Ga}^* effektiv konsentrasiyalarla üst-üstə düşür. Çox sayda nümunələrdən əldə edilən nəticələrin təhlilinə əsasən, DA-ın yaranması, çox ehtimal ki, $\text{Ni}_{\text{S}}\text{Ga}_{\text{S}}$ və $\text{Ni}_{\text{I}}\text{Ga}_{\text{S}}$ cütlikləri ilə bağlıdır.

İşdə, aşqarların müxtəlif konsentrasiyalar nisbətində $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ga, Sb, Ni} > (0 \leq x \leq 0,15)$ kristallarında uyğun termoemaldan əvvəl və sonra, qadağan olunmuş zonada enerji səviyyələrinin yekun diaqramları təqdim olunmuşdur.

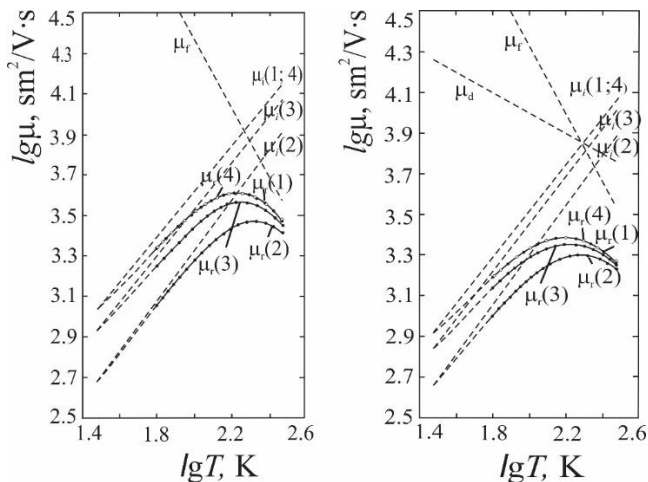
Dördüncü fəsildə $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ga, Sb, Ni} > (0 \leq x \leq 0,15)$ kristallarının elektrik köçürmə xassələrinin və termoemalın matrisdəki elektronların və dəşiklərin konsentrasiyasına və yüürlüyyə təsirinin tədqiqi barədə məlumatlar təqdim olunmuşdur. 77-300 K intervalında kristalların elektron və dəşik yüürlüklərinin temperatur asılılığından alınan eksperimental nəticələr, sərbəst yük daşıyıcıların səpilməsinin üç əsas mexanizminin (fononlardan,

ərintinin nizamsızlıqlarından və aşqar ionlarından) additivliyi yaxınlaşmasında kəmiyyətcə izah edilmişdir.

Materialın elektrik xüsusiyyətlərini müəyyən edən əsas parametrlər matrisdəki sərbəst elektron və dəşiklərin konsentrasiyası və yürüklüyüdür. Burada biz yarımkəçiricilərdə yükün köçürülməsini təyin edən əsas fiziki parametr – sərbəst yük daşıyıcıların yürüklüyünü nəzərdən keçirəcəyik. Bu parametrin qiyməti yarımkəçiricilərin konkret zona quruluşu, matrisdəki sərbəst elektronların və dəşiklərin akustik və optik fononlarla, eləcədə kristallik quruluşun qüsurları ilə qarşılıqlı təsiri ilə müəyyən edilir. Xüsusilə qeyd etmək lazımdır ki, bərk məhlulların kristallarında, matrisdə nanohəcmlər səviyyəsində tərkibin fluktuasiyaları səbəbindən sərbəst elektron və dəşiklərin ərintinin nizamsızlıqlarından əlavə səpilməsi baş verir.

Tədqiq etdiyimiz bütün kristallarda sərbəst yükdaşıyıcılarının yürüklülüynün eksperimental qiymətlərini təyin etmək üçün, Holl-əmsalının və elektrik keçiriciliyinin 77-300K intervalında ölçülmüş qiymətlərindən və həmçinin, Ge və Ge-Si-da elektronların (dəşiklərin) Holl-faktoruna aid ədəbiyyat məlumatlarından istifadə edilmişdir.

Şək.5-də nümunə üçün mürəkkəb aşqarlanmış Ge (A) və $\text{Ge}_{0.95}\text{Si}_{0.05}$ (B) kristallarında nikellə aşqarlandıqdan əvvəl və sonra, eləcədə nümunələrin ardıcıl termoemalı nəticəsində matrislərdə əlavə akseptor komplekslərin (AK) yaranması və parçalanması şərtləri də daxil olmaqla, elektronların yürüklülüynün temperatur asılılıqlarının xarakterik əyriləri göstərilmişdir. Eksperimental nəticələr işarələrlə göstərilib. Bütün nümunələr nikellə legirə olunmamışdan əvvəl və sonra, eləcədə nümunələrin sonrakı termoemalında elektron keçiriciliyinə malikdir. Bu, sürmənin effektiv konsentrasiyasının – $N_{Sb}^* = N_{Sb} - (N_{Ga} + 2N_{Ni})$ hesabına olur. Şək. 5-dən görüldüyü kimi, hər iki nümunədə, nikellə aşqarlandıqdan sonra elektronların yürüklüyü nəzərəcarpacaq dərəcədə azalır. Kristalların sonrakı



Şək. 5. Ge <Ga, Sb, Ni> (A) və Ge_{0.95}Si_{0.05} <Ga, Sb, Ni> (B) -də elektronların yürlüklüyünün (μ_e) temperatur asılılıqları. İşarələr eksperimental nəticələndir. Bütöv və punktir xətlər aşağıdakı şərtlər daxilində hesablanmış nəticələndir: μ_f - qəfəs rəqslərindən səpilmə; μ_d - ərintinin nizamsızlıqlarından səpilmə; μ_i (1), μ_i (2) - 1150 K-də nikel ilə aşqarlamadan əvvəl və sonra aşqar ionlarından səpilmə; μ_i (3), μ_i (4) - sonrakı 1050 və 770 K-da tablamladan sonra səpilmə; μ_r (1) – μ_r (4) - nikellə aşqarlamadan əvvəl və sonra, eləcədə sonrakı termoemallardan sonra elektronların yekun yürlüklüyü. μ_i (1) – μ_i (4) hesablanmış ayrıləri aşağıdakı aşqarların və əlavə akseptor komplekslərin konsentrasiyasına uyğundur: (A) – 1 - $N_{Sb}=5.28 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ga}=3.45 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$; 2 - $N_{Sb}=5.28 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ga}=3.45 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ni}=8.0 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$; 3 - $N_{Sb}=5.28 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ga}=3.21 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ni}=2.8 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $N_{AK}=2.4 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$; 4 - $N_{Sb}=5.28 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ga}=3.45 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ni}=0$, $N_{AK}=0$. (B) – 1 - $N_{Sb}=5.65 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ga}=4.22 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$; 2 - $N_{Sb}=5.65 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ga}=4.22 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ni}=5.8 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$; 3 - $N_{Sb}=5.65 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ga}=3.98 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ni}=2.8 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $N_{AK}=2.4 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$; 4 - $N_{Sb}=5.65 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ga}=4.22 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ni}=0$, $N_{AK}=0$.

termoemalı μ_e -nin artmasına səbəb olur və ~ 770 K-temperaturda sonuncu termoemaldan sonra elektronların yüürlüyünün μ_e qiyməti faktiki olaraq, nümunələrin Ni-lə aşqarlanmasından əvvəlki qiymət ilə üst-üstə düşür.

Bu istiqamətdə əldə edilmiş bütün eksperimental nəticələr aşağıdakı amilləri nəzərə almaqla interpretasiya edilmişdir:

- 77-300 K temperatur intervalında tədqiq olunan bütün kristallarda, dayaz Ga və Sb aşqarları tamamilə ionlaşır; Ni, kristallarda dərin ikiqat akseptor mərkəzləri yaradır;

- $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ni, Ga, Sb} >$ kristallarının 1050-1080 K temperaturda termoemalı onlarda, Ni atomunun da daxil olduğu, əlavə dərin akseptor komplekslərinin yaranmasına səbəb olur;

- $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ni, Ga, Sb} >$ bərk məhlullarının ~ 770 K temperaturda termoemalı, matrisdə ifrat doymuş nikel məhlulunun tam parçalanmasına səbəb olur;

- $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ga, Sb} >$ nümunələrinin 770-1150 K intervalında termoemalı kristalların elektrik xassələrinə təsir etmir. μ_e -nin T-dən asılılığını kəmiyyətə təhlil etmək üçün sərbəst elektronların aşağıdakı əsas səpilmə mexanizmlərindən istifadə edilmişdir: Ge üçün – fononlardan və aşqar ionlardan səpilmə; Ge-Si üçün – fononlardan, ərintinin nizamsızlıqlarından və aşqar ionlardan səpilmə. Eksperimentin nəticələri müxtəlif səpilmə mexanizmlərinin additivliyi yaxınlaşmasında interpretasiya edilmişdir. Eyni zamanda elmi mənbələrdən məlumdur ki, tədqiq etdiyimiz temperatur intervalında elektronların qəfəs rəqslərindən və ərintinin nizamsızlıqlarından səpilmə hallarında germaniumabənzər kristallarda yüürlük uyğun olaraq aşağıdakı ifadələrlə müəyyən edilir:

$$\mu_f = A_{\text{Ge-Si}} \cdot T^{-1.66} \text{ sm}^2 / \text{V} \cdot \text{san} \quad \mu_d = \beta \cdot T^{-0.5} \text{ sm}^2 / \text{V} \cdot \text{san}$$

Burada $A_{\text{Ge-Si}}$ və β əmsalları hər bir tərkib üçün sabit kəmiyyətlərdir. Elektronların aşqar ionlardan səpilməsi ilə məhdudlaşan μ_i yüürlüyü, keçirici zonada yerləşən elektronların tərəfindən aşqar

ionunun elektrik sahəsinin ekranlaşdırılmasını nəzərə alan, məlum Brooks-Herring düsturu ilə hesablanmışdır.

Şəkil 5-dən görüldüyü kimi həm Ge, həm də $\text{Ge}_{0.95}\text{Si}_{0.05}$ bərk məhlulları üçün, kristal emalının bütün texnoloji mərhələlərindən sonra hesablanmış və təcrübi nəticələr arasındakı uyğunluq kifayət qədər yaxşıdır. Bütün kristallarda, 1150 K -də nikellə legirə etdikdən sonra μ_r -in bütün T oblastında, əhəmiyyətli dərəcədə azalması diqqəti cəlb edir. Bu azalma, elektronun ikiqat ionlaşmış nikel atomlarından əlavə səpilməsi ilə əlaqədardır. 1050 K-də kristalların sonrakı termoemalı həm Ge, həm də Ge-Si-da μ_r -in artmasına səbəb olur. Bu halda matrisdəki elektronların yüüklüyünün artması, nikel atomlarının bir hissəsinin “oyundan” çıxması və bu aşqarın elektrik cəhətdən passiv vəziyyətə keçməsi ilə izah olunur. Kristalların 770 K temperaturda yekun termoemalı μ_r (1) ilə μ_r (4) praktiki olaraq üst-üstə düşməsinə səbəb olur ki, bu da bütün nikel atomlarının demək olar ki, tam “çökməsi” və tədqiq olunan materialların matrisində əlavə AK-ların parçalanması ilə əlaqədardır.

İşdə həmçinin mürəkkəb aşqarlanmış Ge <Ga, Sb, Ni> və germaniuma bənzər Ge- Si <Ga, Sb, Ni> bərk məhlul kristallarında Ni –aşqarının ikiqat akseptor təsirini və matrisdə əlavə akseptor komplekslərin yaranmasını nəzərə almaqla dəşiklərin yüüklüyünün temperatur asılılığının eksperimental qiymətlərinin analizləri təqdim olunub.

Nümunələrdə dəşiklərin yüüklüyünün eksperimental qiymətlərinin şərhı, elektronların yüüklüyündə olduğu kimi, baxılan temperatur sahəsində Ge – da sərbəst yükdaşıyıcıların əsas səpilmə mexanizmlərinin fononlarda və aşqar ionlarından, $\text{Ge}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ - kristallarında isə əlavə olaraq ərinti nizamsızlıqlarından olduğu nəzərə alınmaqla aparılıb.

Kristallarda yükdaşıyıcıların yüüklüyünün eksperimental qiymətləri ilə hesablanmış qiymətləri arasındakı uyğunluq həm elektron, həm də dəşik tipli Ge və germaniumabənzər tərkibli Ge-Si bərk məhlulları üçün səciyyəvidir.

Nəticə

1. Modifikasiya olunmuş Bricmen zona əritmə və ərintinin istiqamətləndirilmiş konsentrasiyon ifrat soyudulma və ikiqat qidalandırma metodları ilə göyərdilmiş həcmli Ge-Si kristallarında matris komponentlərinin və kiçik aşqarların (Ga, Sb) konsentrasiyasının paylanması nəzəri problemləri Pfann yaxınlaşmasında həll edilmişdir.
2. Tam qarışmış ərinti yaxınlaşmasında, bütün ərintinin Tiller meyarı ilə monokristallığı təmin edən yeni hibrid üsulu ilə Ge-Si bərk məhlullarının böyümə dinamikası problemi həll edilmişdir.
3. Si mayasından və qidalandırıcı Ge-Si külçələrindən istifadə etməklə modifikasiya olunmuş Bricmen, ərintinin ani konsentrasiyon ifrat soyudulma üsulları üçün əsas komponentlərin və aşqarların konsentrasiyalarının verilmiş tərkibində Ge-Si kristallarının göyərdilməsi, həmçinin Ga və Sb aşqarları ilə kompleks aşqarlama metodikaları işlənmişdir.
4. Ərintidən 5,5 mm/s sürəti ilə göyərdilmiş kristallarda əsas komponentlərin və kiçik aşqarların aksial konsentrasiya profilinə dair eksperimental nəticələr tam qarışmış ərinti yaxınlaşmasında və binar sistemlərin maye və bərk fazalar üçün virtual mühit modeli çərçivəsində hesablamalar ilə kifayət qədər yaxşı uyğunlaşır.
5. Ni ilə onun maksimal həll olma temperaturunda (~ 1150 K) diffuziya üsulu ilə aşqarlanmış $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x\langle\text{Ga},\text{Sb},\text{Ni}\rangle$ ($0 \leq x \leq 0.15$) kristallarındakı ($0 \leq x \leq 0.15$) əsas aşqar səviyyələrinin enerji spektri hər bir aşqar elementin müvafiq spektrlərinin cəmindən ibarətdir.
6. Aşqarların konsentrasiyası 10^{15} - 10^{16} sm^{-3} olan mürəkkəb aşqarlanmış $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x\langle\text{Ga}, \text{Sb}\rangle$ kristallarının ~ 770 - 1150 K temperaturda tablanması materialın elektrik xassələrinə təsir etmir. $\text{Ge-Si}\langle\text{Ga},\text{Sb},\text{Ni}\rangle$ kristallarının 1050 – 1080 K temperaturda tablanması, matrisdə enerji səviyyəsi nikelin birinci akseptor səviyyəsindən aşağıda yerləşən əlavə akseptor

mərkəzlərinin yaranmasına gətirir. Bu mərkəzlər üçün ən etibarlı model, əvəzedici aşqar atomları Ni_s və Ga_s -dan ibarət Ni_sGa_s və ya düyünlərarası Ni_l və əvəzedici qallium atomlarından ibarət Ni_sGa_s kompleks cütlükləri sayılır.

7. 770-1150K intervalında termoemalı vasitəsilə $Ge<Ga,Sb,Ni>$ və germaniumabənzər $Ge-Si<Ga,Sb,Ni>$ kristalların elektron və dəşiklərin konsentrasiyası və yürüklüyünü geniş diapazonda dəqiq idarə etmək imkanı göstərilmişdir.
8. $Ge_{1-x}Si_x<Ga,Sb,Ni>$ ($0 \leq x \leq 0.15$) kristallarında 77-300K temperatur intervalında sərbəst yükdaşıyıcıların yürüklüyü elektron və dəşiklərin matrisdə üç əsas: qəfəs rəqslərindən, bərk məhlulun nizamsızlıqlarından və ionlaşmış aşqar mərkəzlərindən səpilmə mexanizmlərinin additivliyi yaxınlaşmasında nəzəriyyə ilə qənaətbəxş təsvir olunur.

Dissertasiyanın əsas nəticələri aşağıdakı nəşrlərdə öz əksini tapmışdır:

1. Исламзаде, Э.М. Электроактивный комплекс в сложнолегированном кристалле $Ge<Ga,Sb,Ni>$ / Э.М. Исламзаде, З.А. Агамалиев, З.М. Захрабекова [и др.] // Известия НАН Азербайджана, серия физико-математических и технических наук, - Баку: - 2013. 33(5), - с. 64-69.
2. Аждаров, Г.Х., Агамалиев, З.А., Исламзаде, Э.М., Кязимова, В.К. Гибридный метод выращивания однородных монокристаллов твердых растворов из расплава. Система германий-кремний // International Conference "Novel Semiconductor Materials and structures", - Baku: - 4-8 july, - 2013, - Fizika, - 2013, - XIX(2), - p 80-84.
3. Аждаров, Г.Х., Агамалиев, З.А., Исламзаде, Э.М. Гибридный метод выращивания однородных монокристаллов бинарных твердых растворов из расплава // V Международная научная конференция

- «Кристаллофизика XXI века», - Москва: - 28 октября–2 ноября, - 2013, - с.17.
4. Исламзаде, Э.М., Агамалиев, З.А., Захрабекова, З.М., Аждаров Г.Х. Акцепторный комплекс в термообработанном кристалле $\text{Ge}\langle\text{Ni},\text{Ga}\rangle$ / V Международная научная конференция «Кристаллофизика XXI века», - Москва: -28 октября–2 ноября, - 2013, - с.82.
 5. Azhdarov, G.Kh., Agamaliyev, Z.A., Islamzade, E.M. Hybrid Technique for Growing Homogeneous Single Crystals of Semiconductor Solid Solutions from melt // Crystallography Reports, - 2014, 59(3), - p. 442–445.
 6. Islamzade, E.M. Deep Acceptor Complex in Thermally Processed $\text{Ge-Si}\langle\text{Ga},\text{Ni}\rangle$ Crystals / E.M. Islamzade, Z.A. Agamaliyev, Z. M. Zakhrebekova [et al.] // Crystallography Reports, - 2014. 59(4), - p. 623-626.
 7. Агамалиев, З.А., Рамазанов, М.А., Исламзаде, Э.М., Аждаров, Г.Х. Условия роста однородно легированных монокристаллов полупроводниковых твердых растворов методом двойной подпитки расплава // BDU-nun Fizika Problemləri İnstitutunun yaradılmasının 10 illiyinə həsr olunmuş “Opto, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası” Beynəlxalq Konfransının materialları, - Bakı: - 17-26 dekabr, - 2015, - s. 264-267.
 8. Аждаров, Г.Х., Агамалиев, З.А., Исламзаде, Э.М. Распределение примеси Ga в твёрдых растворах Ge-Si, выращенных методом двойной подпитки расплава рост полностью однородных монокристаллов // Шестая международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», посвященная 90-летию со дня рождения профессора Ю.А. Скакова, - Москва: - 26 – 28 мая, - 2015, - с. 28.
 9. Агамалиев, З.А., Исламзаде, Э.М., Захрабекова, З.М., Аждаров, Г.Х. Электроактивный комплекс в сложнолегированных кристаллах $\text{Ge-Si}\langle\text{Ga}, \text{Ni}\rangle$ //

Шестая международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», посвященная 90-летию со дня рождения профессора Ю.А. Скакова, – Москва: - 26 – 28 мая, - 2015, - с. 27.

10. Agamaliyev, Z.A., Islamzade, E.M., Azhdarov, G.Kh. Modeling the Distribution of Ga and Sb Impurities in Ge-Si Single Crystals Grown by Double Feeding of the Melt // Crystallography Reports, -2016. v.61. - p. 327-330.
11. Аждаров, Г.Х., Агамалиев, З.А., Исламзаде, Э.М. Подвижность дырок в Ge и $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 < x \leq 0,13$), комплексно-легированных примесями $\langle \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} \rangle$ // - Баку: Известия НАН Азербайджана, серия физико-математических и технических наук, - 2018. с. XXXVIII, № 5, - с. 100-104.
12. Islamzade, E.M., Agamaliyev, Z.A., Azhdarov, G.Kh. Electron mobility in $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 < x \leq 0,13$) crystal complex doped by $\langle \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} \rangle$ impurities // - Baku: Azerbaijan Journal of Physics, Section:En, - 2018. XXIV (2), - p. 37-40.
13. Агамалиев, З.А., Исламзаде, Э.М., Аждаров, Г.Х. Условия роста полностью однородных монокристаллов при моделировании распределения примесей Ga и Sb в монокристаллах Ge-Si, выращенных методом двойной подпитки расплава // Akademik H.B. Abdullayev in 100 illiyinə həsr olunmuş “Modern Trends in Condensed Matter Physics MTCMP – 2018” beynəlxalq konfransının tezisləri, - Bakı: - 24-26 sentyabr, - 2018, - s. 28.
14. Исламзаде, Э.И. Электротранспортные характеристики комплексно легированных кристаллов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ $\langle \text{Ga}, \text{Sb}, \text{Ni} \rangle$ ($0 \leq x \leq 0,13$) с электронной проводимостью // - Баку: Известия НАН Азербайджана, серия физико-математических и технических наук, - 2019. XXXIX(5), - с. 78-84.
15. Исламзаде, Э.И. Основные энергетические состояния примесей в термообработанных сложнолегированных

кристаллах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x < \text{Ga, Sb, Ni} > (0 \leq x \leq 0,15)$ // - Баку:
Известия НАН Азербайджана, серия физико-
математических и технических наук, - 2020. XL(2), - с.
54-60.

Dissertasiyanın müdafiəsi "29" sentyabr 2021-ci il tarixində saat 14⁰⁰ AMEA Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ-1143, H. Cavid prospekti 131.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları AMEA-nın Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat "27" avqust 2021-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 23.08.2021

Kağızın formatı: A5

Həcmi: 37383

Tiraj: 30