

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

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

İxtisas: 2220.01– Yarımqeçiricilər fizikası

Elmi sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Elnarə Məhərrəm qızı İslamzadə**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı-2025

Dissertasiyaşı Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun “Yarımqeçiricilərdə aşqarlar” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Hüsnü Xəlil oğlu Əjdərov

Rəsmi opponətlər: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Oktay Bahadur oğlu Tağıyev

Fizika elmlər doktoru, dosent
Mehriban Şirin qızı Həsənova

Fizika elmlər doktoru, professor
Cahangir İslam oğlu Hüseynov

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

Dissertasiya şurasının sədri:

Akademik
Arif Məmməd oğlu Həşimov

Dissertasiya şurasının
elmi katibi:

Fizika elmlər doktoru, professor
Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva

Elmi seminarın sədri:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,
professor
Hüseyn Behbud oğlu İbrahimov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Elektron sənayesinin baza maddələri olan Si-Ge bərk məhlulları cihazqayırma sənayesində əhəmiyyətli yer tutur. Bu istiqamətdə aparılan işlər daha çox bərk məhlulun tərkibini elektroaktiv elementlərlə aşqarlayaraq fiziki xassələrin idarə olunmasına yönəlmişdir.

Ədəbiyyat məlumatlarına əsasən, Si-Ge kristalları termoelektrik generatorların, infraqırmızı şüalanma qəbuledicilərin, optoelektron cihazlarda epitaksiya üçün altlıqların, günəş elementlərin, foto və qamma detektorların yaradılmasında geniş istifadə olunur. Ona görə də verilən tərkili və elektroaktiv aşqarların konsentrasiyası tənzimləmə bilən keyfiyyətli kristalların alınması və onlarda elektron xassələrin öyrənilməsi böyük əhəmiyyət kəsb edir.

Son illərdə Si-Ge həcmi kristalların Çoxralski, Bricmen, zona əritmə və onların modifikasiya edilmiş üsulları ilə alınmasında əhəmiyyətli nailiyyətlər əldə edilmişdir. Si-Ge kristallarının xarakteristikaları, yarımkeçirici parametrlərini və onlarda dayaz və dərin aşqar mərkəzlərin spektrinin öyrənilməsinə çoxlu işlər həsr olunmuşdur^{1,2,3}. Bərk məhlulun kristallaşması zamanı ərintinin tərkibində tipik dayaz aşqarların seqreqasiyasının dəyişmə qanunauyğunluğu ilə bağlı məsələlər aktual tədqiqat mərhələsindədir. Tərkibində elektroaktiv aşqarların olduğu mürəkkəb aşqarlanmış Si-Ge kristallarının elektron xassələri az öyrənilmişdir. Kristal qəfəsdə maddənin elektrikkeçirmə xassələrinə əhəmiyyətli təsir göstərən əlavə elektroaktiv komplekslərin yaranması imkanı bu materiallara xüsusi maraq yaradır.

1Zhang, Q. Influence of rapid thermal annealing on Ge-Si interdiffusion in epitaxial multilayer Ge_{0.3}Si_{0.7}/Si superlattices with various GeSi thicknesses / H. Tu, S. Gu, Z. Zhang [et al.] // ECS Journal of Solid State Science and Technology, - 2018, 7(11), -p. 671-676.

2Loaiza, L. C. Understanding the lithiation/delithiation mechanism of Si_{1-x}Ge_x alloys / Elodie Salager, Nicolas Louvain, Athmane Boulaoued [et al.] // Journal of Materials Chemistry A, -2017, 5, -p. 12462-12473.

3 Basu, Ranita. A review on single crystal and thin film Si-Ge alloy: growth and applications // Mater. Adv., - 2022, 3, -p. 4489-4513.

Digər tərəfdən, matrisdə sürətli diffuziyaedici aşqarın mövcudluğu uyğun temperaturlarda termik emal yolu ilə geniş intervalda kristalın elektron xassələrini dəqiq idarə etməyə imkan verir.

İşdə dayaz akseptor (Ga) və donor aşqarlarla (Sb), həmçinin, tez diffuziyaedici Ni atomları ilə mürəkkəb aşqarlanmış $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 < x < 0,15$) həcmi kristalların alınması və tədqiq olunan materiallarda əsas aşqar halların spektri və elektrikkeçirmə hadisələrin xarakteristikasının müəyyən olunmasına yönəlmiş kompleks məsələlər həll edilmişdir. Qeyd edək ki, ikiqat yüklü akseptor aşqarı kimi Ni seçilməsi onun tədqiq edilən materialların elektrikkeçirmə xassələrinə effektiv təsir göstərməsinə və kristalın matrisində mövcud olan digər aşqarlarla müxtəlif elektroaktiv komplekslər yaratmaq xüsusiyyətlərinə əsaslanır

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Tədqiqatın obyektı mürəkkəb aşqarlanmış germaniuma bənzər $Ge_{1-x}Si_x < Ga, Sb, Ni >$ ($0 < x < 0,15$) kristallarıdır.

Kristalların müxtəlif texnologiyalarla alınması və həmin kristalların elektrofiziki xassələrin öyrənilməsi tədqiqatın predmetidir

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri.

Verilmiş tərkibli (x), dayaz (Ga, Sb) və dərin (Ni) aşqarlarla mürəkkəb legirə olunmuş $Ge < Ga, Sb, Ni >$ və $Ge_{1-x}Si_x < Ga, Sb, Ni >$ kristallarının alınması, aşqar halların spektrinin dəyişmə xüsusiyyətlərinin, elektrikkeçirmə xarakteristikalarının və termoemaldan sonra kristallarda elektroaktiv komplekslərin yaranma şərtlərinin müəyyənləşdirilməsi.

Qoyulan məqsədə nail olmaq üçün işdə aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

1. Pfann 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 paylanmasının nəzəri təsviri.

2. Komponentlərin və aşqarların verilmiş aksial konsentrasiya paylanmasında $Ge_{1-x}Si_x < Ga, Sb >$ ($0 \leq x \leq 0,30$) kristallarının göyərdilməsi üçün optimal metodları və texnoloji parametrləri təyin etmək.

3. $Ge_{1-x}Si_x < Ga, Sb >$ ($0 \leq x \leq 0,30$) mürəkkəb aşqarlanmış kristalların ənənəvi və modifikasiya edilmiş Bricmen həmçinin, ərintinin istiqamətlənmiş konsentrasiyon ifrat soyutma üsulu ilə göyərdilmə metodikalarının işlənilib hazırlanması.

4. Nümunələrin yüksək temperaturlarda termoemalı və ardıcıl tablama nəticəsində diffuziya yolu ilə nikellə legirlənmə metodlarının işlənməsi.

5. Holl əmsalının temperatur asılılığının və elektrik keçiriciliyinin eksperimental qiymətlərinə əsasən $Ge_{1-x}Si_x < Ga, Sb, Ni >$ ($0 \leq x \leq 0,15$) 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. Germaniuma bənzər mürəkkəb aşqarlanmış $Ge_{1-x}Si_x < Ga, Sb, Ni >$ kristallarının alınmasına və elektrik xassələrinə aid eksperimental nəticələrin bu istiqamət üzrə mövcud olan nəzəriyyələr əsasında izah edilməsi.

Tədqiqatın metodları.

Müxtəlif metodlarla göyərdilmiş $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,15$) kristallarına aid elmi işlərin analizi və sistemləşdirilməsi aparılıb. Mürəkkəb aşqarlanmış $Ge - Si < Ga, Sb >$ ($0 \leq x \leq 0,30$) kristallarında əsas komponentlərin və aşqarların konsentrasiya paylanması üçün virtual mühit modeli çərçivəsində riyazi modelləşdirilmə tərtib olunub. Ənənəvi və modernləşdirilmiş Bricmen metodu ilə göyərdilmiş $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,15$) nümunələrində elektrik xassələrinin müəyyənləşdirilməsi üçün təcrübi üsul kimi Holl ölçmələri istifadə olunub.

Müdafiyə çıxarılan əsas müddəalar.

1. Pfanın yaxınlaşmasında və binar sistemlər üçün virtual mühit modeli çərçivəsində $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,30$) külçəsində komponentlərin (Ge, Si) və aşqarların (Ga, Sb) aksial konsentrasiya paylanması üçün alınmış riyazi ifadələr, ərintidən <5,5 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 $Ge - Si < Ga, Sb > (0 \leq x \leq 0,30)$ kristallarda əsas aşqar hallarının spektri, bu materiallarda aşqar elementlərin hər birinə uyğun spektrlərin cəmindən ibarətdir.
4. $Ge_{1-x}Si_x < Ga, Sb, Ni >$ 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 Ni_s və Ga_s və Ni_i-Ga_s cütündən ibarət komplekslərdir.
5. Kristalların 770-1150K intervalında ardıcıl termiki emalı materialın elektron xassələrini idarə etməyə imkan verir.
6. $Ge_{1-x}Si_x < Ga, Sb, Ni >$ kristallarında sərbəst yükdaşıyıcıların 77 – 300K intervalında yüüklüyünə aid təcrübi nəticələrin hamısı üç əsas: fononlardan, ərintinin nizamsızlıqlarından və aşqar ionlarından səpilmə mexanizminin additivliyi yaxınlaşması çərçivəsində nəzəriyyə ilə qənaətbəxş dərəcədə izah olunur.

Tədqiqatın elmi yeniliyi.

Pfann yaxınlaşmasında modifikasiya edilmiş Bricmen, zona əritmə, ikiqat qidalandırma üsulları ilə ərintidən 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 edilmişdir.

$Ge_{1-x}Si_x (0 \leq x \leq 0,30)$ kristallarının Ga, Sb aşqarları ilə idarə olunankompleksaşqarlanma və göyərdilmə metodları təklif olunmuşdur. Aşqarların göstərilən konsentrasiyasında ($10^{15} -$

10^{16}sm^{-3}) verilmiş tərkibli $(x)Ge_{1-x}Si_x$ həcmikristalları göyərdilmişdir.

Göstərilmişdir ki, Ni -lə onun maksimum həllolma temperaturunda (1150K) diffuziya üsulu ilə legire olunmuş $Ge_{1-x}Si_x <Ga, Sb, Ni>$ ($0 \leq x \leq 0,15$) kristallarında əsas aşqar hallarının enerjisipektri bu materiallarda hər bir legirə olunmuş aşqar elementinin uyğun spektrlərinin cəmindən ibarətdir.

Müəyyən olunmuşdur ki, $Ge-Si <Ga, Sb, Ni>$ kristallarının 1050 ÷ 1080K temperaturalarda tablanması matrisdə enerji səviyyəsi nikelin birinci akseptor səviyyəsindən aşağıda yerləşən əlavə akseptor mərkəzlərinin yaranmasına gətirir. Bu mərkəzlər üçün ən uyğun model Ni_s və Ga_s aşqarlarının əvəzedici $Ni_s Ga_s$ atomları cütündən, yaxud Ni_i -in düyünlərarası atomlarından və Ga_s -in əvəzedici atomlar cütündən ibarət $Ni_i Ga_s$ komplekslər hesab olunur.

$Ge_{1-x}Si_x <Ga, Sb, Ni>$ kristallarında sərbəst yükdaşıyıcılarının 77-300 K intervalında yürüklüyünün eksperimental nəticələri matrisdə elektron və deşiklərin səpilməsinin üç əsas mexanizm: qəfəs rəqslərindən, bərk məhlul ərintisinin nizamsızlıqlarından və ionlaşmış aşqar mərkəzlərindən səpilmə ilə kifayət qədər 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 $< Ge_{1-x} - Si_x >$ kristallarının göyərdilməsi metodikası perspektivlidir. Bu metodikalar müxtəlif yarımkeçirici materialşünaslıq mərkəzlərində və laboratoriya praktikasında bərk məhlulların aşqarlanmış kristallarının ərintidən konservativ və qeyri – konservativ metodlarla göyərdilməsi üçün müvəffəqiyyətlə istifadə oluna bilər. Beləliklə, verilmiş parametrlə legirlənmiş kristalların göyərdilməsi üçün optimal texnoloji parametrlər, işdə təqdim olunmuş riyazi münasibətlər əsasında uyğun modelləşmə ilə müəyyən olunur.

$Ge_{1-x}Si_x <Ga, Sb, Ni>$ ($0 \leq x \leq 0,15$) 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 yürüklüyünə təsiri, yarımkeçiricinin elektrik xassələrini geniş diapazonda 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); «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» altıncı beynəlxalq konfransda (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 17 elmi işdə dərc edilmişdir ki, onlardan 8 - i məqalə,(onlardan 4-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, 171 səhifəlik və ümumi işarə sayı 162706 olan kompüter mətnində şərh olunmuşdur. İşdə titulların sayı 375, mündəricat 2007, giriş 12 832, dissertasiyanın əsas məzmunu 145104, nəticə 2388 simvoldan ibarətdir. İstinad olunmuş ədəbiyyat siyahısı 145 sayda addan ibarətdir. Dissertasiyanın məzmunu 50 şəkil, 3 cədvəl daxildir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə, dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, tədqiqatın məqsədi, alınmış nəticələrin elmi yeniliyi və praktiki əhəmiyyəti, eləcə də müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar qeyd

edilmişdir. Dissertasiyanın fəsilələrinin məzmununu xarakterizə edən məlumatlar qısa şərh olunmuşdur.

Birinci fəsildə silisium, germanium kristallarının və onların bərk məhlullarının fundamental yarımkeçirici, eləcə də 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 elektrikkeçirmə xassələrinə, həmçinin matrisdə elektron və deşiklərin yürüklüyü və əsas səpilmə mexanizmlərinə aid işlərin nəticələri təqdim olunmuş və təhlil edilmişdir.

İkinci fəsildə Ge-Si sisteminin bərk məhlullarının həcmi monokristallarının göyərilməsinə aid texnologiyanın vəziyyətinin qısa xarakteristikası verilib, bu kristalların ərintidən konservativ və qeyri-konservativ yolla göyərilməsinə və aşqarlanmasına aid nəticələr təqdim olunmuşdur. Ge – Si sistemi bərk məhlul kristallarının ərintidən göyərilmə texnologiyasının müasir vəziyyətini qısaca ümumiləşdirdikdə aşağıdakı nəticəyə gəlmək olar.

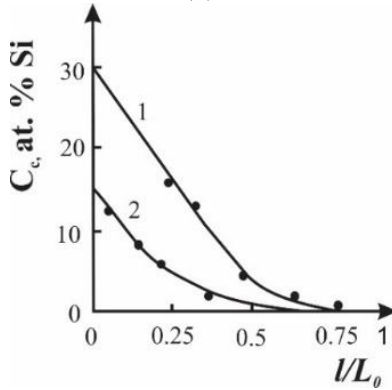
Son 2-3 onilliklərdə əldə edilən uğurlar bütün bərk məhlulların kəsilməz sırası boyunca dəyişən və həmçinin daimi aksial tərkibdə Ge – Si monokristallarının alınmasına imkan verir. Texnologiyanın bu imkanları bu materialların elmi tədqiqatına olan tələbatları ödəyir.

Burada materialların göyərilmə 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 qədər yüksək sürətlə ərintinin kristallaşması zamanı keyfiyyətli monokristalın göyərilməsinə imkan verir.

İşdə $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0,30$) kristalları silisium mayasından istifadə etməklə ənənəvi Bricmen üsulu ilə; ərintini verilmiş tərkibli Ge-Si külçəsi ilə qidalandırmaqla modifikasiya olunmuş Bricmen

metodu ilə; zona əritmə metodu⁴ ilə; ərintini istiqamətlənmiş konsentrasiyalı ifrat soyudulma üsulu və hibrid metodu^{5,6} 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 Ge-Si kristalları boyunca Si-un konsentrasiya paylanması (C_c) xarakterik əyriləri 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.

(a)

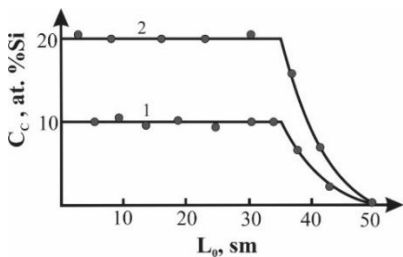


(a)

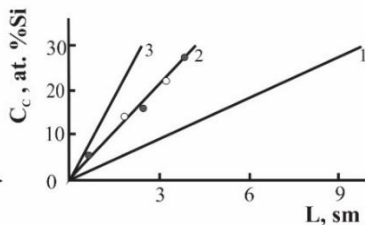
⁴Islamzade, E.M., Concentration profiles of components and impurities in $Ge_{1-x}Si_x$ <Ga> AND $Ge_{1-x}Si_x$ <Sb> crystals grown by zone melting method// - Baku: Azerbaijan Journal of Physics, Section:En, - 2024. XXIV (2), - p. 37-40.

⁵Zakhrabekovaa, Z. M., Kyazimova, V. K., Islamzade, E. M., Alekperov, A. I. Concentration Profile of the Gallium and Antimony Impurities in the $Ge_{1-x}Si_x$ - Si_x (Ga) and $Ge_{1-x}Si_x$ (Sb) Crystals Grown by the Hybrid Method // Inorganic Materials: Applied Research, - 2024. v. 15, No1, -p. 63–68.

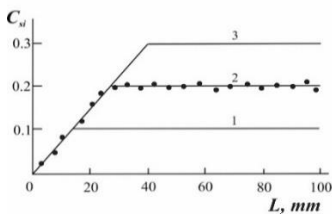
⁶Azhdarov, G.Kh., Agamaliev, Z.A., Islamzade, E.M. Hybrid Technique for Growing Homogeneous Single Crystals of Semiconductor Solid Solutions from melt // Crystallography Reports, - 2014, 59(3), - p. 442–445.



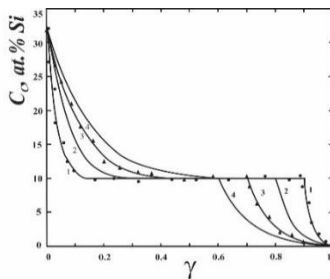
(b)



(c)



(d)



(f)

Şək. 1. Müxtəlif metodlarla göyərdilmiş Ge-Si kristallarının uzunluğu boyunca Si-un konsentrasiyasının paylanması: (a)- ənənəvi Bricmen metodu ilə; 1,2 ayrılırları 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)-Ge-Si-qidalandırıcı çubuqlarından istifadə edərək modifikasiya olunmuş Bricmen metodu ilə; 1, 2 ayrılırları - 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)-ərintinin istiqamətlənmiş konsentrasiyalı ifrat soyudulma metodu ilə; 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.

(d)-hibrid üsulla göyərdilən; 25 K/sm ərimədə temperatur qradiyenti 1,2,3 ayrılırları bir cins ərazidə silisium konsentrasiyasının qiymətlərinə uyğundur $C_{\text{Si}}^* = 0, 1; 0, 2$ və $0, 3$) - temperatur qradiyenti;

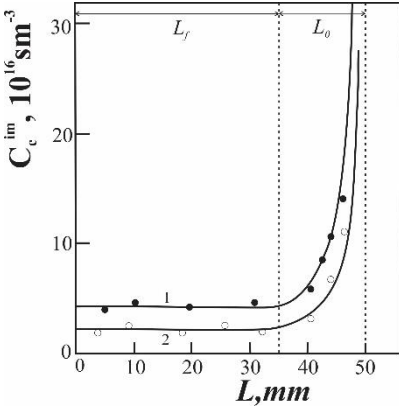
(f)-zona əritmə üsullu ilə göyərdilən kristallar. Dairələr-eksperimental, bütöv xətlər - Pfann yaxınlaşmasında hesablanmış nəzəri məlumatlardır. $\text{Ge}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ kristallarının konsentrasiya profilləri, 1,2,3,4 ayrılırları ərimə zonasının $Z=0, 1; 0, 2; 0, 3; 0, 4$ uzunluqlarına uyğundur.

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 səbəbindən, tərkib dəyişmələrinə qarşı kifayət qədər həssasdır. Hər bir diskin sıxlığı hidrostatik metodla (havada və suda çəkilməklə) təyin edilmişdir. Hibrid üsulla alınan nümunələr üzərində rentgen şüalarının difraksiya analizi aparılıb və aşağıdakılar müəyyən edilib: kristalların kristallıq dərəcəsi 96,0717%, monokristal dənələrinin ölçüsü 1355,4 Å, yanlış oriyentasiya FWHM(30.) $0,06^\circ$ idi. Göstərilən metodlarla göyərtilmiş bütün kristallarda komponentlərin aksial konsentrasiya paylanmasının nəzəri ayrılıqları Pfan yaxınlaşmasında alınan ifadələr əsasında hesablanmışdır. Şəkil 1-dən görüldüyü kimi, Ge-Si kristallarının göyərtilmə metodunun hər biri (a,b,c,d,f) 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 metodların birgə potensialı həm bircins, 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 göyərtilmə prosesində daxil edilmişdir. Bu ona görə mümkündür ki, Ge-Si kristallarının ərimə temperaturunda aşqarların kifayət qədər yüksək həll olması (10^{19}sm^{-3} - 10^{20}sm^{-3}) müşahidə olunur. Kristallarda aşqarların paylanmasını və konsentrasiya səviyyəsini müəyyən edən parametrlər seqreqasiya əmsalındır. 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 göyərtilmiş kristalların oxu boyunca aşqarların konsentrasiyanın əhəmiyyətli dərəcədə qradientə malik olmasına gətirir.

Şəkil 2-də ərintinin və qidalandırıcı külçələrin ilkin tərkibi uyğun olaraq $C_i^0=1.7 \text{ at\% Si}$ və $C_f=10 \text{ at\% Si}$ olduqda (şəkl.1(b)), modifikasiya olunmuş Bricein metodu ilə göyərtilmiş Ge-Si kristallarının uzunluğu boyu Ga və Sb aşqarlarının konsentrasiya asılılığının (dairələrlə işarə edilmiş) xarakterik eksperimental ayrılıqları

nümunə üçün göstərilmişdir. Qeyd edək ki, (Ga, Sb) aşqarları liqatura şəklində Ge və Si maddələri ilə birlikdə mayanın üstündəki tigdə yerləşdirilir.



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 [$C_l^{0,Ga} = 5.3 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ və $C_l^{0,Sb} = 4.6 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$] oblastları üçün hesablanmışdır.

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 iki komponentli 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

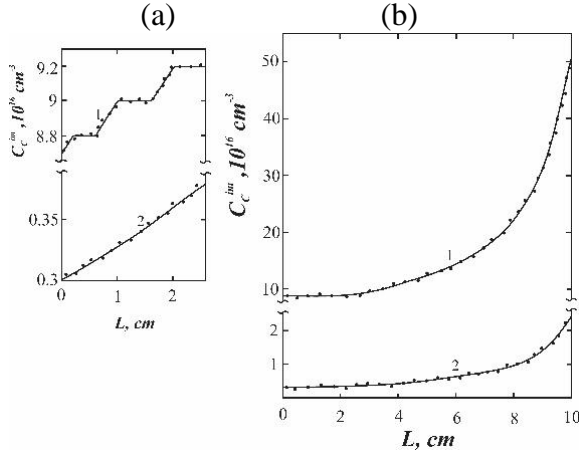
aşqarların ərintidə konsentrasiyası; $K_{im}^x = C_c^{im} / C_l^{im}$ – aşqarın kristalın tərkibindən xətti asılı olan tarazlı seqreqasiya əmsalı; K_{im}^f –aşqarın $Ge_{1-x}Si_x$ -nın ilkin qidalandırıcı külçənin tərkibinə uyğun seqreqasiya əmsalı; $\gamma = L/L_0$ – sonlu ərimə zonasının göstərilmiş uzunluğudur. (2) düsturundakı $\gamma = L/L_0$ parametrinin qiymətişdə 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 inteqralı hesablamak 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 əyriləri 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.

Şəkil 3-də nümunə üçün Hibrid metodla göyərdilmiş Ge- Si kristalı boyunca Ga və Sb aşqarlarının konsentrasiya profilinin eksperimental və eləcədə istifadə olunmuş göyərdilmə rejimində Pfann yaxınlaşmasında hesablanmış nəzəri qiymətləri verilmişdir. Göründüyü kimi nəzəri və təcrübi (eksperimental) nəticələr yaxşı uzlaşır.

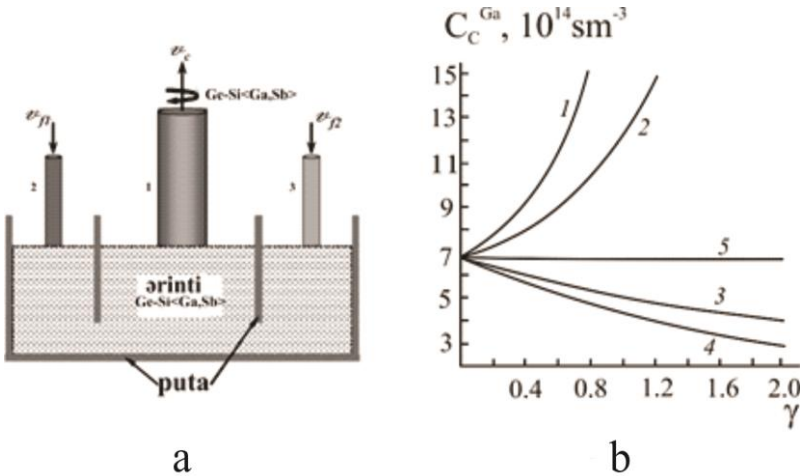


Şəkil 3. Hibrid metodla göyərdilmiş $Ge_{1-x}Si_x<Ga>$ və $Ge_{1-x}Si_x<Sb>$ bərk məhlullarında Ga (1) aşqarı və Sb aşqarı uyğun konsentrasiya profilləri. (a) və (b) böyüdülmüş miqyasda istiqamətlənmiş konsentrasiya ifrat soyutma metodu ilə alınmış bərk məhlullarda uyğun olaraq böyümə sahəsi boyu və bütün kristal boyu aşqarların konsentrasiya profilləri. Bütöv xətlər hesablama nəticələri, nöqtələr isə təcrübi nəticələrdir(3). Hər iki kristalın ərintidə başlanğıc konsentrasiyası $C_e^{o.im} = 1 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-3}$ Hər iki aşqarın ərintidə başlanğıc konsentrasiyası $C_e^{o.im} = 1 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-3}$ —dir Tərkibində Si miqdarı 20at% olan (4) bircins kristalın böyümə sahəsindəki,ərintidə temperatur qradienti -25 K/sm , $\alpha = 0,155$ təşkil edir.

Kristallaşmanın başlanğıc hissəsində göyərən kristal boyunca aşqarların konsentrasiyası artır, baxmayaraq ki, Si- un konsentrasiyasının xətti artması aşqarların seqreqasiya əmsalının azalmasına gətirir. Kristallaşmanın 1–ci və 2-ci mərhələsində aşqarların konsentrasiyasının artması zamanla ərintinin həcmnin azalması və nəticədə ərintidə aşqarların konsentrasiyasının artması ilə bağlıdır. Kristalın böyüməsinin 1- ci mərhələsində Ga aşqarının konsentrasiyası profilinin pilləli xarakterini bircins hissələrdə ifadə olunduğunu qeyd etməliyik. Hesab etmək olar ki, Sb aşqarlarının konsentrasiya profilində bu halın müşahidə olunmaması Ge və Si – da bu aşqarların seqreqasiya əmsalının kiçik olması ilə əlaqəlidir.

Ərintinin istiqamətlənmiş konsentrasiyon ifrat soyudulma metodu və ənənəvi Bricsmen üsulu ilə göyərtilmiş 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.4 (a)-da Ge-Si kristal larının bu üsulla göyərdilməsinin və aşqarlanmasının konseptual sxemi göstərilmişdir. Verilən tərkibli Ge-Si <Ga, Sb> kristalının ərintidən göyərməyə başladığı andan ərintiyə eyni zamanda təmiz Si və Ge qidalandırıcı çubuqları daxil edilir



Şək. 4. (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 $Ge_{0.75}Si_{0.25}$ 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) – $\alpha + \beta = 0.933$, $\alpha = 0.245$.

Kristallaşma və ərintinin qidalandırılma sürətlərinin nisbətinin müvafiq seçimində ərintidə və göyərən kristalda əsas komponentlərin konsentrasiyası sabit qalır. Ərintidən ikiqat qidalandırma yolu ilə göyərdilən $Ge_{(1-x)}Si_x$ kristallarında Ga və Sb aşqarlarının paylanması məsələsinin riyazi həlli Pfann 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. 4(b)-də nümunə üçün 5 fərqli rejimdə ikiqat qidalandırma metodu ilə göyərdilmiş $Ge_{0.75}Si_{0.25}$ kristalında Ga aşqarının kristal boyunca konsentrasiya paylanması (4) tənliyinə əsasən hesablanmış və xarakterik əyrilər 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 qradientini 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 fəsilə nümunələrin ölçülməsi və termik emalı üsulları təsvir edilmişdir. Yarımkəçirici quruluşa malik Ge, Si və onların bərk məhlullarında sərbəst yükdaşıyıcılarının Holl-faktoru, həmçinin, bu

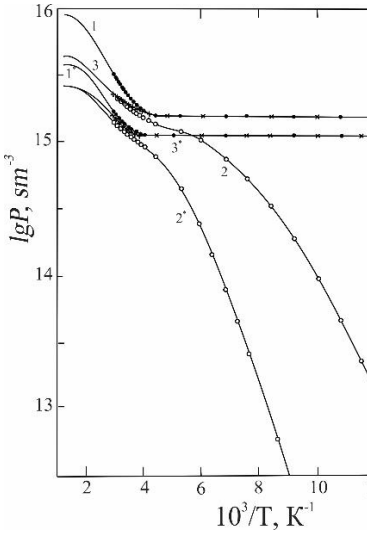
materialların matrislərində Ni, Ga və Sb aşqar səviyyələrinin cırılma dərəcəsi və faktoru ilə bağlı məsələlər müzakirə olunmuşdur. Mürəkkəb aşqarlanmış $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0.15$) kristallarının Holl əmsalının 77-300 K intervalında təcrübi nəticələrinə əsasən dərin aşqar mərkəzlərinin əsas 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.

Holl ölçülərinin aparılması üçün ikinci fəsilə 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 $(1-2) \times (2-3) \times (10-14)$ 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 Ga:Sb= 2:(1-2) materialın səthində 4,2-350 K temperatur intervalında yaxşı aqrezin lehimlənmədə mexaniki möhkəmliyini və kontaktın omikliyini təmin edir. Ga-Sb- ilə lehimlənmiş yerlərdə qoyulan omik kontaktlar mikropolyalnikin köməyi ilə qoyulur. Nümunələrin lehimlənməsi vakuumda 300-350⁰ temperaturda 20-30 dəq ərzində aparılır. 60-350 K temperatur intervalında nümunələrdə Holl effektinin və elektrikkeçiriciliyinin temperatur asılılığının ölçməsində istifadə edilmiş kriomaqnit sistem standart məsələlər aiddir. Burada 77 K – dən aşağı temperatur rejiminin nümunənin tutacağıının yerləşdiyi maye azotla dünyorda havanın sorulması yolu ilə alındığını qeyd etməklə kifayətlənirik. Elektrik keçiriciliyi və Holl ölçmələri 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 yarımkeçiricilərin 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 matrisədə 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 $Ge_{1-x}Si_x$ (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_s -in birinci akseptor səviyyəsindən aşağıda əlavə səviyyələr yaranır. Holl ölçmələrində bu səviyyələr Ga-un konsentrasiyası 10^{16}sm^{-3} olan nümunələrdə, bu aşqarın akseptor səviyyəsini güclü kompensasiyası olduğu halda müşahidə edilir. Şək. 5-də misal olaraq, iki belə nümunə – Ge (Ni, Ga, Sb) və $Ge_{0.9}Si_{0.1}$ (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 $1,5 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-3}$, $Ge_{0.9}Si_{0.1}$ -də isə $1,1 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-3}$ olan qallium aşqarının

hesabına yaranmışdı. Nikellə aşqarlamadan sonra nümunələrin $p(T)$ asılılığına dair eksperimental məlumatlar ($1v1^*$ 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.



Şək. 5. İki – Ge $\langle Ga, Sb, Ni \rangle$ (1 - 3) və $Ge_{0.9}Si_{0.1} \langle Ga, Sb, Ni \rangle$ ($1^* - 3^*$) – 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.

Şəkildən görüldüyü kimi Ge və $Ge_{0.9}Si_{0.1}$, nümunələrinin müvafiq olaraq, 1020 və 1030 K-də termoemalı, hər iki nümunə üçün $p(T)$ ayrılığının 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 dələlət 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 $Ge_{1-x}Si_x \langle Ga, Sb, Ni \rangle$ ($0 \leq x \leq 0,15$) 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 meV təşkil edir.

Əlavə DA səviyyələrinin təbiətini müəyyən etmək üçün nümunələrin $\sim 550-570 \text{ K}$ temperaturda əlavə tablanması aparılmışdır. Müəyyən olundu ki, bu temperaturlarda nümunələrdə DA səviyyələri parçalanır və 18 saatlıq tablanma isə onların tamamilə yox olmasına gətirir. Şəkil 5-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 Ni_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, Ni_sGa_s və Ni_iGa_s cütlükləri ilə bağlıdır.

İşdə, aşqarların müxtəlif konsentrasiyalar nisbətində $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x\langle\text{Ga,Sb,Ni}\rangle$ ($0 \leq x \leq 0.15$) kristallarında uyğun termoemaldan əvvəl və sonra, qadağan olunmuş zonada enerji səviyyələrinin yekun diaqramları təqdim olunmuşdur.

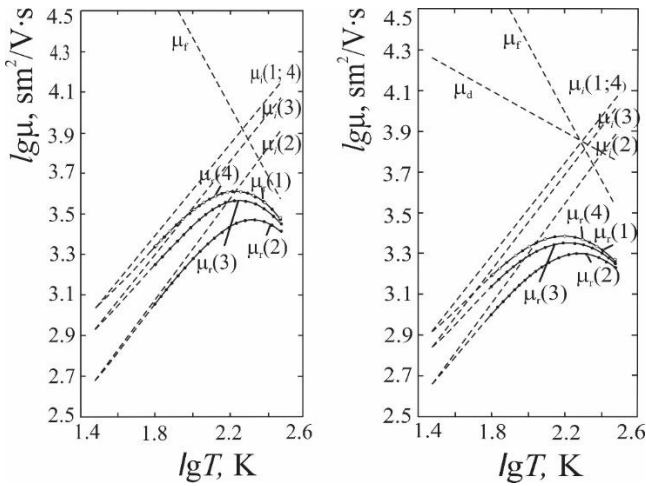
Dördüncü fəsilə $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x\langle\text{Ga,Sb,Ni}\rangle$ ($0 \leq x \leq 0.15$) kristallarının elektrikkeçirmə xassələrinin və termoemalın matrisdəki elektronların və dəşiklərin konsentrasiyasına və yürüklüyünə təsirinin tədqiqi barədə məlumatlar təqdim olunmuşdur. $77-300 \text{ K}$ intervalında kristalların elektron və dəşik yürüklüklərinin temperatur asılılığından alınan eksperimental nəticələr, sərbəst yük daşıyıcıların səpilməsinin üç əsas mexanizminin (fononlardan, ərintinin nizamsızlıqlarından və aşqar ionlarından) additivliyi yaxınlaşmasında kəmiyyətə izah edilmişdir.

Materialın elektrikxüsusiyyətlərini 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 yarımkeçiricilərin konkret zona quruluşu, matrisdəki sərbəst elektronların və dəşiklərin akustik və optik fononlarla, eləcə də kristallıq 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 yürüklülüyünün 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.

Şəx.6-da nümunə üçün mürəkkəb aşqarlanmış Ge(a) və $Ge_{0.95}Si_{0.05}$ (b) kristallarında nikellə aşqarlandıqdan əvvəl və sonra, eləcə də nümunələrin ardıcıl termoemalı nəticəsində matrislərdə əlavə akseptor komplekslərin (AK) yaranması və parçalanması şərtləri də daxil olmaqla, elektronların yürüklüyünün temperatur asılılıqlarının xarakterik ayrıları göstərilmişdir. Eksperimental nəticələr işarələrlə göstərilib. Bütün nümunələr nikellə legirə olunmamışdan əvvəl və sonra, eləcə də nümunələrin sonrakı termoemalında elektron keçiriciliyinə malikdir. Bu, sürmənin effektiv konsentrasiyasının – $N_{Sb}^* = N_{Sb} - (N_{Ga} + 2N_{Ni})$ hesabına olur. Şəx. 6-dan görüldüyü kimi, hər iki nümunədə, nikellə aşqarlandıqdan sonra elektronların yürüklüyü nəzərə çarpacaq dərəcədə azalır. Kristalların sonrakı termoemalı μ_e -nin artmasına səbəb olur və ~ 770 K-temperaturda sonuncu termoemaldan sonra elektronların yürüklüyünün μ_e qiyməti faktiki olaraq, nümunələrin Ni-lə aşqarlanmasından əvvəlki qiymət ilə üst-üstə düşür.



Şək. 6. Ge <Ga, Sb, Ni> (a) və Ge_{0.95}Si_{0.05}<Ga, Sb, Ni> (b) -də elektronların yürüklüyünün (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 tablamadan sonra səpilmə;

μ_r (1) – μ_r (4) - nikellə aşqarlamadan əvvəl və sonra, eləcədə sonrakı termoemallardan sonra elektronların yekun yürüklüyü.

μ_i (1) – μ_i (4) hesablanmış əyriləri 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- $N_{Sb}=5.65 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ga}=4.22 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $N_{Ni}=0$, $N_{AK}=0$.

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 yadır;

– $Ge_{1-x}Si_x<Ni, Ga, Sb>$ kristallarının 1050-1080 K temperaturda termoemalı onlarda, Ni atomunun da daxil olduğu, əlavə dərin akseptor komplekslərinin yaranmasına səbəb olur;

– $Ge_{1-x}Si_x<Ni, Ga, Sb>$ bərk məhlullarının ~ 770 K temperaturda termoemalı, matrisdə ifrat doymuş nikel məhlulunun tam parçalanmasına səbəb olur;

– $Ge_{1-x}Si_x<Ga, Sb>$ 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 yürüklük uyğun olaraq aşağıdakı ifadələrlə müəyyən edilir:

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

Burada A_{Ge-Si} və β əmsalları hər bir tərkib üçün sabit kəmiyyətlərdir. Elektronların aşqar ionlardan səpilməsi ilə məhdudlaşan μ_i yürüklüyü, keçirici zonada yerləşən elektronların tərəfindən aşqar ionunun elektrik sahəsinin ekranlaşdırılmasını nəzərə alan, məlum Brooks-Herring düsturu ilə hesablanmışdır.

Şəkil 6-dan görüldüyü kimi həm Ge, həm də $Ge_{0.95}Si_{0.05}$ 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 yürlüklüyünün 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 germaniumabənzər Ge- Si <Ga, Sb, Ni> bərk məhlul kristallarında Ni-aşqarının ikiqat akseptor təsirini və matrisdə əlavə akseptor komplekslərin yaranmasını nəzərə almaqla dəşiklərin yürlüklüyünün temperatur asılılığının eksperimental qiymətlərinin analizləri təqdim olunub.

Nümunələrdə dəşiklərin yürlüklüyünün eksperimental qiymətlərinin şərhı, elektronların yürlüklüyündə olduğu kimi, baxılan temperatur sahəsində Ge – da sərbəst yükdaşıyıcıların əsas səpilmə mexanizmlərinin fononlarda və aşqar ionlarından, Ge_{0,9}Si_{0,1}-kristallarında isə əlavə olaraq ərinti nizamsızlıqlarından olduğu nəzərə alınmaqla aparılıb.

Kristallarda yükdaşıyıcıların yürlüklüyünün 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, ərintinin istiqamətləndirilmiş konsentrasiyon kəskin soyudulma və qidalandırma metodları ilə göyərdilmiş həcmi Ge-Si kristallarında matris komponentlərinin və 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 göyərdilməsi məsələsi həll edilmişdir.

3. Si mayasından və qidalandırıcı Ge-Si külçələrindən istifadə etməklə modifikasiya olunmuş Bricmen və ərintinin konsentrasiyon kəskin soyudulma üsulları ilə əsas komponentlərin və aşqarların konsentrasiyalarının verilmiş tərkibində Ge-Si kristallarının göyərdilməsi, həmçinin Ga və Sb aşqarları ilə kompleks aşqarlama metodları işlənmişdir.

4. Ərintidən 5,5 mm/saat sürəti ilə göyərdilmiş kristallarda əsas komponentlərin və aşqarların aksial konsentrasiya profilinə dair eksperimental nəticələr, tam qarışmış ərinti yaxınlaşmasında və binar sistemlərin maye və bərk fazalar üçün virtual mühit modeli çərçivəsində hesablamalarla kifayət qədər yaxşı uyğunlaşır.

5. Ni ilə onun maksimal həllolma temperaturunda (~ 1150 K) diffuziya üsulu ilə aşqarlanmış $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x\langle\text{Ga,Sb,Ni}\rangle(0 \leq x \leq 0.15)$ kristallarındakı əsas aşqar səviyyələrinin enerji spektri hər bir aşqar elementinin müvafiq spektrlərinin cəmindən ibarətdir.

6. Aşqarların konsentrasiyası $10^{15}\text{-}10^{16} \text{ sm}^{-3}$ olan mürəkkəb aşqarlanmış $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x\langle\text{Ga, Sb}\rangle$ kristallarının $\sim 770\text{-}1150\text{K}$ temperaturlarda tablanması materialın elektrik xassələrinə təsir etmir. $\text{Ge-Si}\langle\text{Ga,Sb,Ni}\rangle$ kristallarının $1050\text{-}1080$ K temperaturlarda 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 yaxud da düyünlərərsi Ni_i və əvəzedici qallium atomlarından ibarət $\text{Ni}_s \text{Ga}_s$ kompleks cütlükləri hesab olunur.

7. 770-1150K intervalında termoemal vasitəsilə Ge<Ga,Sb,Ni> və germaniumabənzər Ge-Si<Ga,Sb,Ni> kristallarında elektron və dəşiklərin konsentrasiyasının və yürüklüyünün geniş diapazonda idarə edilmə imkanı göstərilmişdir.

8. $Ge_{1-x}Si_x$ <Ga,Sb,Ni> ($0 \leq x \leq 0.15$) kristallarında sərbəst yükdaşıyıcılarının 77-300K intervalında yürüklüyünün elektron və dəşiklərin səpilməsinin üç əsas mexanizmi: qəfəs rəqslərindən, bərk məhlul ərintisinin nizamsızlıqlarından və ionlaşmış aşqar mərkəzlərindən səpilmə ilə kifayət qədər izah 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 Ge<Ni,Ga> / 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 Ge–Si<Ga,Ni> Crystals / E.M. Islamzade, Z.A. Agamaliyev, Z. M. Zakhrabekova [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 Ge-Si<Ga, Ni> // 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 $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 < x \leq 0,13$), комплексно-легированных примесями $\langle Ga, Sb, Ni \rangle$ // -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 $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 < x < 0.13$) crystal complex doped by $\langle Ga, Sb, Ni \rangle$ 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 N.B. Abdullayevin 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 $Ge_{1-x}Si_x \langle Ga, Sb, Ni \rangle$ ($0 \leq x \leq 0,13$) 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 $Ge_{1-x}Si_x \langle Ga, Sb, Ni \rangle$ ($0 \leq x \leq 0,15$) // - Баку: Известия НАН Азербайджана, серия физико-математических и технических наук, - 2020. XL(2), - с. 54-60.

16. Zakhrabekova, Z. M., Kyazimova, V. K., Islamzade, E. M., Alekperov, A. I. Concentration Profile of the Gallium and Antimony Impurities in the $Ge_{1-x}Si_x \langle Ga \rangle$ and $Ge_{1-x}Si_x \langle Sb \rangle$ Crystals Grown by the Hybrid Method // *Inorganic Materials: Applied Research*, - 2024. v. 15, No1, -p. 63–68.

17. İslamzade, E.M., Concentration profiles of components and impurities in $Ge_{1-x}Si_x \langle Ga \rangle$ AND $Ge_{1-x}Si_x \langle Sb \rangle$ crystals grown by zone melting method // - Baku: Azerbaijan Journal of Physics, Section:En, - 2024. XXIV(2), - p. 37-40.

Dissertasiyanın müdafiəsi "05" mart 2025-ci il tarixində saat 09³⁰-da Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ-1073, H. Cavid prospekti 131.

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

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

Avtoreferat "05" fevral 2025-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 04.02.2025

Kağızın formatı: A5

Həcmi: 38 255

Tiraj: 100