საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი არჩუაძე

გერმანიუმ-სილიციუმის მონოკრისტალური შენადნობების ელექტროფიზიკური და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2012 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტზე
ფიზიკის დეპარტამენტის
მყარი სხეულების ფიზიკის მიმართულებასა და
სსიპ სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის
ინსტიტუტში

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი
სრული პროფესორი გიორგი დარსაველიძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2012 წლის ”------” ----------, ---------- საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი ----------, აუდიტორია ----------

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა სტუ-ს ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი: სრული პროფესორი თინათინ კაიშაური

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

შესავალი. უკანასკნელ პერიოდში მკვეთრად გაიზარდა ინტერესი მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობებისადმი, რასაც განაპირობებენ თანამედროვე ნახევარგამტარულ ხელსაწყოებში, ქსელური, ბოჭკოვან-ოპტიკური კავშირგაბმულობისა და რადიაციისადმი მედეგ მოწყობილობებში, სწრაფმთვლელ ბირთვულ დეტექტორებში, ბიპოლარულ ტრანზისტორებსა და სხვა დარგებში მათი გამოყენების მაღალი პერსპექტივები. მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობები გამოიყენებიან ნეიტრონებისა და რენტგენის გამოსხივების მონოქრომატორებში.

<u>**თემის აქტუალობა.**</u> ამჟამად დიდი ყურადღება ექცევა მექანიკური რელაქსაციური პროცესების კვლევას ელემენტარულ ნახევარგამტარებში. მექანიკური რელაქსაციური პროცესების სიხშირული და ტემპერატურული სპექტრების გაზომვა აკუსტიკური სპექტროსკოპიის მეთოდებით უნიკალური მონაცემებს იძლევა კრისტალური მესრის დამახასიათებელი დეფექტების აქტივაციურ და ძალოვან პარამეტრებზე, რომლებიც გამოიყენებიან მართვადი ელექტროფიზიკური, სტრუქტურულად მგრძობიარე ფიზიკურ-მექანიკური და პლასტიკური თვისებების პროგნოზირების ფუნდამენტური თეორიის საფუძვლების შექმნაში.

მეტად მცირეა მექანიკური რელაქსაციური პროცესების ექსპერიმენტული კვლევების მოცულობა აკუსტიკური მეთოდების გამოყენებით. განსაკუთრებით ეს ეხება სუფთა და ლეგირებული გერმანიუმ-სილიციუმის მოცულობით მონოკრისტალებს, რომლებიც ინფრაბგერების სიხშირის დიაპაზონში პრაქტიკულად არ არიან გამოკვლეული. არ არის შესწავლილი გრეხითი რხევების მილევის პროცესები სიხშირის, ტემპერატურისა და ამპლიტუდის ფართო დიაპაზონებში. არ არსებობს მონაცემები მათში მექანიკური რელაქსაციური, სტრუქტურული და ელექტროფიზიკური თვისებების კორელაციის შესახებ.

თანამედროვე ნახევარგამტარული ტექნოლოგიებისა და ხელსაწყოთ მშენებლობის ამოცანებისათვის აუცილებელია მართვადი სტრუქტურისა და ფიზიკური მახასიათებლების მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების მიღება. აღნიშნული გარემოება განაპირობებს ლეგირებული გერმანიუმ-სილიციუმის მოცულობითი მონოკრისტალების რეალური სტრუქტურის, ელექტროფიზიკური თვისებების და გრეხითი რხევების პირობებში მექანიკური რელაქსაციური პროცესების კომპლექსური კვლევის აქტუალობას.

<u>ნაშრომის მიზანს</u> წარმოადგენს: ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული n- და p- ტიპის Ge-Si სისტემის მასიური კრისტალების მიკროსტრუქტურის, ელექტროფიზიკური მახასიათებლების, თერმული გაფართოებისა და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კომპლექსური კვლევა; ლეგირების, მაღალ ტემპერატურებზე მოწვისა და ციკლური დეფორმაციის ზემოქმედებით Ge-Si კრისტალების რეალური სტრუქტურის, დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების ჩასახვისა და მოძრაობის აქტივაციის, ელექტროფიზიკური, მექანიკური და არადრეკადი მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერების დადგენა.

<u>სამუშაოს მიზანი და ამოცანები:</u>

- მონოკრისტალური $Ge_{1-x}Si_x$ შენადნობების მიკროსტრუქტურის, მოკროსისალის, დინამიური ძვრის მოდულისა და ელექტროფიზიკური მახასიათებლების კვლევა;
- მონოკრისტალური $Ge_{1-x}Si_x$ შენადნობების ფარდობითი წაგრძელების ტემპერატურული დამოკიდებულების კვლევა;
- მონოკრისტალური Ge-Si ნიმუშებში გამოვლენილი რხევითი ენერგიის გაბნევის რელაქსაციური და ჰისტერეზისული ტიპის პროცესებში მონაწილე დეფექტების მოძრაობის აქტივაციისა და ურთიერთქმედების ენერგიის მნიშვნელობების განსაზღვრა და

მათი ცვლილებების კანონზომიერებების კვლევა გრეხითი რხევების დაბალი სიხშირის დიაპაზონში (~ 1ჰც).

- მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების მიკროპლასტიკური დეფორმაციის მახასიათებლების განსაზღვრა

<u>ნაშრომის მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:</u>

- შესწავლილია ლეგირებისა და მაღალტემპერატურული მოწვის გავლენა Ge-Si კრისტალების დისლოკაციურ სტრუქტურასა და ელექტროფიზიკურ მახასიათებლებზე;
- შესწავლილია ლეგირების, ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარისა და მაღალ ტემპერატურებზე მოწვის გავლენა Ge-Si კრისტალების ფარდობითი წაგრძელების ანომალურ ტემპერატურულ დამოკიდებულებაზე;
- შინაგანი ხახუნის მეთოდით განსაზღვრულია Ge-Si სისტემის კრისტალებში დისლოკაციებისა და წერტილოვანი დეფექტების მოძრაობის აქტივაციისა და ურთიერთქმედების ენერგიის მნიშვნელობები, დადგენილია მათი ცვლილებათა კანონზომიერებანი;
- განსაზღვრულია Ge-Si სისტემის კრისტალებში სუსტად და ძლიერად დამაგრებული დისლოკაციების მოწყვეტის კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციისა და დრეკადობის ზღვრის მნიშვნელობები და დადგენილია ლეგირების, თერმული დამუშავებისა და მაღალამპლიტუდური დეორმაციის გავლენით მათი ცვლილებების კანონზომიერებანი.

<u>პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს შემდეგში:</u>

- Ge-Si სისტემის მასიური კრისტალების ელექტროფიზიკური მახასიათებლების ცვლილებების კვლევის შედეგები შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას გერმანიუმის ფუძეზე მართვადი ნახევარგამტარული თვისებების ახალი მასალების შექმნის პრობლემის გადასაჭრელად;
- სტრუქტურული დეფექტების ჩასახვისა და მოძრაობის აქტივაციის ენერგიის დადგენილი სიდიდეები მნიშვნელოვანია გერმანიუმის ფუძეზე შექმნილი ნახევარგამტარული ხელსაწყოების ტექნოლოგიური, ფიზიკური და საექსპლოატაციო პარამეტრების, მოქმედების ხანგრძლივობისა და საიმედოობის დადგენის პრობლემისათვის;
- n- და p- ტიპის Ge-Si სისტემის კრისტალების სტრუქტურის, ელექტროფიზიკური, თერმული გაფართოების, მექანიკური და რხევების ენერგიის გაბნევის პროცესების დადგენილი მახასიათებლები წარმოადგენენ საცნობარო მასალას ნახევარგამტარების სიმტკიცისა და პლასტიკურობის პრობლემაში ფიზიკური წარმოდგენების განვითარებისათვის. მიღებულ შედეგებს გააჩნიათ მეცნიერული და გამოყენებითი მნიშვნელობა სპეციფიკური დანიშნულების ნახევარგამტარულ ხელსაწყოებში Ge-Si სისტემის შენადნობების გამოყენების სფეროს გაფართოებისათვის.
- Ge-Si სისტემის მასიური მონოკრისტალების სტრუქტურული დეფექტების ტიპების, ელექტრული აქტივობის კრისტალოგეომეტრული და ენერგეტიკული პარამეტრების დიაგნოსტიკისა და მართვის პრობლემის გადაჭრით, მნიშვნელოვნად გაფართოვდება თანამედროვე მაღალ ტექნოლოგიებში მათი გამოყენების შესაძლებლობები.

<u>დასაცავად წარმოდგენილი ძირითადი დებულებები</u>:

1. მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების სტრუქტურის ელექტროფიზიკური და მექანიკური მახასიათებლებისა და სითბური გაფართოების კვლევის შედეგები.

2. ბორითა და დარიშხანით ლეგირებული მონოკრისტალური შენადნობების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის ტემპერატურული სპექტრის კვლევის შედეგები

3. ლეგირების, თერმული დამუშავებისა და მაღალტემპერატურული დეფორმაციის გავლენით მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების სტრუქტურულად-მგრძნობიარე ფიზიკრ-მექანიკური თვისებების ცვლილებათა დადგენილი კანონზომიერებანი.

<u>ნაშრომის აპრობაცია.</u> ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა სტუ-ს ფიზიკის დეპარტამენტისა და ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სამეცნიერო სემინარების სხდომებზე.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები წარდგენილი იქნა, სტუ-ს საერთაშორისო კონფერენციაზე "გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები" 30 მარტი, 2011, ქ.თბილისი.

<u>პუბლიკაციები:</u> დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 7 სამეცნიერო ნაშრომში. ძირითადი პუბლიკაციების ნუსხა მოყვანილია ავტორეფერატის ბოლოში.

<u>ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა:</u> დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 145 ნაბეჭდ გვერდს. დისერტაცია შედგება რეზიუმესაგან (ორ ენაზე), სარჩევის, შესავლის, ორი თავის, ილუსტრაციის სახით მოყვანილი 19 ნახაზის, 9 ცხრილის, დასკვნისა და 117 გამოყენებული ლიტერატურისაგან.

ნაშრომის შინაარსი

<u>**შესავალში**</u> მოცემულია ნაშრომის ზოგადი დახასიათება, ნაჩვენებია თემის აქტუალობა, ჩამოყალიბებულია ნაშრომის მიზანი, მისი მეცნიერული სიახლე და პრაქტიკული ღირებულება, დასახულია კვლევის ამოცანები.

<u>**პირველ თავში**</u> წარმოდგენილია Ge-Si სისტემის ნახევარგამტარული შენადნობების სტრუქტურის, ელექტროფიზიკური და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ლიტერატურული მიმოხილვა. გაანალიზებულია არსებული მეცნიერული ინფორმაცია Ge-Si შენადნობების სტრუქტურული დეფექტების კრისტალოგეომეტრიული და ენერგეტიკული მახასიათებლების შესახებ.

ელემენტარულ ნახევარგამტარებში რელაქსაციური პროცესების კვლევა საწყის ეტაპზე განხორციელდა ულტრაბგერების სიხშირულ დიაპაზონში და მიზნად ისახავდა მყარ სხეულებში ულტრაბგერების ტალღების ელექტრონულ და ფონონურ სისტემებთან ურთიერთქმედების ბუნების დადგენას. ულტრაბგერების ურთიერთქმედება ელექტრონულ სისტემასთან მრავალრიცხოვანი საინტერესო პროცესის გამომწვევი მიზეზია, რომელთა უმრავლესობას რელაქსაციური წარმოშობა გააჩნია.

ზემაღალი სიხშირის დიაპაზონში ($\approx 9\cdot 10^9$ ჰც) აღმოჩენილი იქნა შინაგანი ხახუნისა და C_{44} დრეკადობის კოეფიციენტის ურთიერთკორელაციური ცვლილება ვერცხლით ლეგირებულ n—გერმანიუმში ($n=10^{19}$ სმ$^{-3}$). ექსპერიმენტები შესრულდა [111] და [100] მიმართულებით გასწვრივი და განივი ტალღების აგზნების პირობებში. დადგენილი იქნა, რომ მაქსიმალური შინაგანი ხახუნით ხასიათდებიან ის ტალღები, რომლებიც დაკავშირებული აღმოჩნდნენ C_{44} დრეკადობის მოდულის ცვლილებასთან.

გერმანიუმისა და სილიციუმის სტრუქტურებში დისლოკაციების ჩასახვის, კრისტალოგრაფიული და მოძრაობის ენერგეტიკული მახასიათებლების კვლევას დიდი მნიშვნელობა აქვს მართვადი

სტრუქტურული მდგომარეობისა და ფიზიკური თვისებების ნახევარგამტარული n– და p-ტიპის მასალების შესაქმნელად. მკვლევართა უმრავლესობა უპირატესად განიხილავს ხრახნული და 60º-იანი ტიპის დისლოკაციებს. ამასთან ერთად მარცვლების მცირეკუთხოვან გამყოფ საზღვრებზე არსებობენ ასევე კიდური დისლოკაციები <111> მიმართულებით.

ალმასის ტიპის მესერში სამი შესაძლებელი (001), (110) და (111) სიბრტყედან ყველაზე მნიშვნელოვანია დისლოკაციების სრიალი {111} სიბრტყეთა სიმრავლეში. ხრახნული, კიდური და 60º-იანი დისლოკაციების ღერძები და ბიურგერსის ვექტორი მიმართულია <110> -ის გასწვრივ. 60º-იანი დისლოკაციაზე ხრახნული მდგენელის ბიურგერსის ვექტორი მცირეა, ხოლო კიდური მდგენელი უფრო მეტად გამოკვეთილია და ადვილად გამოირჩევა მისი დიფრაქციული გამოსახულების კონტრასტი. სტრუქტურაში განიხილებიან ასევე კიდური დისლოკაციები ღერძით [110], ბიურგერსის ვექტორით 1/2 [110] და სრიალის სიბრტყით (001). აღსანიშნავია, რომ მათ სქემატურ გამოსახულებებზე ნათლად ფიქსირდებიან ორმაგი ექსტრასიბრტყეები. მათი ანალიზი აჩვენებს, რომ ალმასის ტიპის სტრუქტურებში შესაძლებელია არსებობდნენ კიდური დისლოკაციები, რომელთა ბირთვებში არ არსებობენ გაწყვეტილი ელექტრონული ბმები.

მონოკრისტალურ გერმანიუმში 600ºC-ზე პლასტიკური დეფორმაცია და შემდგომში სწრაფი (10ºC/წთ) გაცივება წარმოქმნის სპეციფიკური კონფიგურაციის დისლოკაციების სიმრავლეს. დისლოკაციების მოწამვლის ორმოების განაწილება ორი ტიპის სიბრტყეებზე შესწავლილია დეფორმაციის სხვადასხვა ეტაპზე. ერთ-ერთი მათგანი პარალელურია განივი სრიალის (111), ხოლო მეორე პირველადი სრიალის [111] სიბრტყეების. დისლოკაციური ორმოების არაერთგვაროვანი განაწილება დამახასიათებელია დეფორმაციის პირველი ეტაპისთვის.

შესწავლილია 450-700°C ტემპერატურულ ინტერვალში Ge-Si კრისტალებში დისლოკაციების მოძრაობის სიჩქარის ტემპერატურული დამოკიდებულება, როდესაც კრისტალზე მოდებული ძვრის ძაბვის მნიშვნელობა იცვლება 3-20 მპა-მდე. ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ 60-გრადუსიანი დისლოკაციის სიჩქარე 900°C-ზე 20 მპა ძაბვის ველში მონოტონურად მცირდება სილიციუმის კონცენტრაციის ზრდისას. იგი აღწევს გერმანიუმის დამახასიათებელი სიჩქარის მნიშვნელობის ნახევარს, როდესაც Ge-Si შენადნობებში სილიციუმის კონცენტრაცია 2,2 %-ია.

ექსპერიმენტული შედეგებიდან ცნობილია ასევე, რომ Ge-Si შენადნობებში გერმანიუმთან შედარებით დისლოკაციების მოძრაობის სიჩქარე უმნიშვნელოდ შემცირებულია.

გერმანიუმის მაღალი შემცველობის მასიური მონოკრისტალების მიღების პრობლემა ჯერ-ჯერობით ბოლომდე გადაწყვეტილი არ არის, მაგრამ მიღწეული ტექნოლოგიური დონე საშუალებას იძლევა შეფასდეს კრისტალიზაციის პროცესის თანმხლები თერმული ძაბვები და შედგენილობის ლოკალური ფლუქტუაციები.

Ge-Si შენადნობებში დისლოკაციების ბირთვებთან მყარი ხსნარის ატმოსფეროების დინამიურ ფორმირებას შეუძლია გამოიწვიოს დისლოკაციის მოძრაობისადმი ათერმიული წინააღმდეგობის წარმოქმნა, ისეთი ფორმით როგორიც გამოვლენილია მინარევებით ლეგირებულ GaAs-ის სტრუქტურაში. $Ge_{1-x}Si_x$ მონოკრისტალების მექანიკური თვისებები გამოკვლეულია შედგენილობის x=0,04 ინტერვალში სხვადასხვა ტემპერატურაზე კუმშვითი დეფორმაციის პირობებში. შედეგები შედარებულია მონოკრისტალური გერმანიუმისა და სილიციუმის მექანიკური თვისებების მახასიათებლებთან. დადგენილია რომ, დენადობის ძაბვა და ზღვარი იზრდებიან Si-Ge შენადნობებში სილიციუმის შემცველობის გაზრდით მითითებულ კონცენტრაციულ ინტერვალში. დენადობის ძაბვა მაღალ ტემპერატურებზე პრაქტიკულად

ტემპერატურისაგან დამოუკიდებელია, რაც ადასტურებს, რომ Si და Ge-სგან განსხვავებით Ge-Si შენადნობებს ახასიათებთ დენადობის ძაბვის ათერმიული მდგენელი.

უკანასკნელ პერიოდში მიმდინარეობს ნახევარგამტარებში დისლოკაციების მოძრაობის მექანიზმების ინტენსიური კვლევა. გაანალიზებულია დისლოკაციებზე არსებული ღუნვების დინამიკაზე წერტილოვანი დეფექტების გავლენის სხვადასხვა მექანიზმი. ანალიზს საფუძვლად უდევს ნახევარგამტარულ მონოკრისტალებში წერტილოვანი დეფექტების ურთიერთქმედება დისლოკაციების სეგმენტებთან და ღუნვებთან.

მნიშვნელოვანი ექსპერიმენტული შედეგებია წარმოდგენილი ულტრასისუფთავის გერმანიუმში დისლოკაციების ელექტრული თვისებების შესახებ. ნაჩვენებია, რომ 10^{12}-10^{13}სმ$^{-3}$ არსებულ დონემდე გასუფთავებულ გერმანიუმში დისლოკაციები აკრძალულ ზონაში ქმნიან აქცეპტორული ტიპის დონეების ორ ქვეზონას. დისლოკაციური ზონების გამოვლინება შესაძლებელია მხოლოდ მაშინ, როდესაც დისლოკაციების სიმკვრივის ზღვრული სიდიდე 10^4სმ$^{-2}$-ის რიგისაა. გაანგარიშებით ნაჩვენებია, რომ 10^3სმ$^{-2}$ დისლოკაციების სიმკვრივის შემთხვევაში აქცეპტორების კონცენტრაცია არის $3{,}5 \cdot 10^9$სმ$^{-3}$. როდესაც დისლოკაციების სიმკვრივე უფრო ნაკლებია მაშინ დეფექტების კონცენტრაცია იმდენად მცირეა, რომ გამოყენებული მეთოდები ვერ ახდენენ დისლოკაციური ზონების რეგისტრაციას.

შინაგანი ხახუნის მეთოდით გამოკვლეულია ერთეულოვანი და წყვილი ღუნვების ფორმირებისა და მოძრაობის ენერგიის ცვლილებები ნახევარგამტარულ მასალებში. ნაჩვენებია ელექტრულად აქტიური მინარევების ძლიერი გაბნევა დისლოკაციების ბირთვებსა და ატმოსფეროებზე. დადგენილია, რომ აქცეპტორული მინარევები თანაბარი კონცენტრაციის პირობებში ტეტრაედრული რადიუსებისაგან დამოუკიდებლად ერთნაირად ახდენენ გავლენას დისლოკაციების

ძვრადობაზე და ერთნაირად ამცირებენ აქტივაციის ენერგიას არალეგირებულ კრისტალთან შედარებით. უფრო ძლიერად ამცირებენ დისლოკაციებზე ღუნვების მოძრაობის აქტივაციის ენერგიას დონორული მინარევები. ელექტრონების გავლენა არ ისაზღვრება მხოლოდ დისლოკაციების ძვრადობით. დენის მატარებლების ამაღლებულ კონცენტრაციებზე დისლოკაციების ელემენტების რხევის სიხშირე შემოსაზღვრულია კოვალენტულ ბმებში ელექტრონების "გადართვებითა" და ჰიბრიდიზაციის მდგომარეობის შეცვლით, როდესაც დისლოკაციური ღუნვა აღმოჩნდება ბარიერის მაქსიმუმზე. აღსანიშნავია, რომ n-ტიპის კრისტალებში შედარებით დაბალია დისლოკაციური ღუნვის სიხშირის ფაქტორი. ეს ხორციელდება ძლიერად ლეგირების შემთხვევაში. მაშინ მოსალოდნელია ელექტრონების ტალღური ფუნქციის გადაფარვის გაძლიერება აქცეპტორულ მინარევებსა და ღუნვებზე. ე. წ. დისლოკაციურ ზონაში.

დეფექტების ელექტრონულ-სტიმულირებული რეაქციის მოდელში განხილულია როგორც წონასწორული, ასევე არაწონასწორული დენის მატარებლების გავლენა დეფექტების რეაქციის სიჩქარეზე კოვალენტურ კრისტალებში. ბმების შესუსტების მექანიზმის ელემენტარულ აქტად მიღებულია დარღვეული ვალენტური ბმის წარმოქმნისა და გადართვის პროცესი და გაანალიზებულია მასთან დაკავშირებული კრისტალური მესრის კვანძის ელექტრონული თერმების დინამიკა.

ნაჩვენებია, რომ დეფექტების რეაქციის სიჩქარე n- გერმანიუმში იზრდება მონოტონურად ზღურბლური ძაბვის გარეშე ელექტრონების კონცენტრაციის ამაღლებით. p-ტიპის გერმანიუმში სუსტად ლეგირების შემთხვევაში ის საერთოდ დამოუკიდებელია ხვრელების კონცენტრაციისაგან, ხოლო ხვრელების მაღალ კონცენტრაციებზე ($\sim 10^{19}$სმ$^{-3}$) დეფექტების რეაქციის სიჩქარე რთული ფუნქციონალური დამოკიდებულებით ავლენს ზრდის ტენდენციას.

<u>**მეორე თავში**</u> წარმოდგენილია კვლევის მეთოდები, ექსპერიმენტული შედეგები და მათი განსჯა. Ge-Si სისტემის მასიური მონოკრისტალები მიღებულია ჩოხრალსკის მეთოდით ზრდის მიმართულებით [111]. მიკროსტრუქტურა შესწავლილია ოპტიკური მიკროსკოპით Neophot-32. ელექტროფიზიკური მახასიათებლები განსაზღვრულია მუდმივ მაგნიტურ ველში ჰოლის ეფექტის რეგისტრაციის მეთოდით. თერმული გაფართოების კვლევა განხორციელებულია ლაბორატორიულ დილატომეტრზე ტევადური გადამწოდით. დილატომეტრი აღჭურვილია ნიმუშის წაგრძელების ტევადური სენსორით, რომელსაც გააჩნია მართვისა და ინფორმაციის წაკითხვის ციფრული პოსტი. დისპლეითა და კლავიატურით ინფორმაცია გამოდის რეალურ დროში. გაზომვის დაწყებამდე ხდება საწყისი პარამეტრების შეშვება. გაზომვის მთლიანი ციკლი ხორციელდება ავტომატურ რეჟიმში.

საცდელი ნიმუშების არადრეკადი თვისებები ტემპერატურისა და დეფორმაციის ფართო ინტერვალში შესწავლილია შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის ლაბორატორიულ დანადგარზე გრეხითი რხევების სიხშირისა და მილევის ლოგარითმული დეკრემენტის რეგისტრაციით. მეთოდი საშუალებას იძლევა გამოვლინდეს საცდელი კრისტალების სტრუქტურაში რელაქსაციური და ჰისტერეზისული წარმოშობის რხევების ენერგიის გაბნევის პროცესები. განისაზღვროს მათი ენერგეტიკული მახასიათებლები, შეფასდეს ძვრის მოდულისა და დრეკადობის ზღვრის სიდიდეები.

მონოკრისტალური Ge და Ge-Si შენადნობების მიკროსტრუქტურაში (111) სიბრტყეებზე გამოვლენილია დისლოკაციური მოწამვლის ორმოები. დადგენილია, რომ Si-ისა და მალეგირებელი ელემენტების (B,As) კონცენტრაციის გაზრდით იზრდება დისლოკაციების სიმკვრივე და განაწილების არაერთგვაროვნება.

შეწავლილია ელექტროფიზიკური მახასიათებლები არალეგირებული და ბორითა და დარიშხანით ლეგირებული მონოკრისტალური ნიმუშების –

Ge, $Ge_{0,99}Si_{0,01}$ და $Ge_{0,98}Si_{0,02}$. გაზომვები შესრულებულია ოთახის ტემპერატურაზე. არალეგირებული გერმანიუმის მონოკრისტალი ხასიათდება p-ტიპის გამტარობით. თერმული დამუშავება - მოწვა 750°C ტემპერატურაზე 10სთ-ის განმავლობაში გავლენას არ ახდენს გამტარობის ტიპზე, უმნიშვნელოდ ამცირებს დენის მატარებლების – ხვრელების კონცენტრაციას და ავლენს მათი ძვრადობის ამაღლების ტენდენციას.

განსაზღვრულია სუსტად და ღრმად ლეგირებული მონოკრისტალების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები. ნაჩვენებია, რომ ძლიერად ლეგირებული გერმანიუმი ხასიათდება საგრძნობლად შემცირებული ხვრელების ძვრადობით. 750°C ტემპერტურაზე ვაკუუმში მოწვა 10სთ-ის განმავლობაში საგრძნობლად ამაღლებს დენის მატარებელი ელექტრონების კონცენტრაციას გამტარობის ზონაში. შესაბამისად, მცირდება მათი ძვრადობა ოთახის ტემპერატურაზე. აღსანიშნავია, რომ მონოკრისტალური Ge:As ნიმუშების სტრუქტურაში შედარებით მაღალია დისლოკაციების სიმკვრივე, რასაც შეუძლია შეამციროს გამტარობის ზონაში ელექტრონების ძვრადობა.

ბორითა და დარიშხანით ცალ-ცალკე ლეგირებული Ge-Si მონოკრისტალების ელექტრული მახასიათებლები თერმულად არამდგრადია. ხანმოკლე (1-1,5სთ) მოწვა 450-600 °C ინტერვალში მნიშვნელოვნად ცვლის დენის მატარებლების კონცენტრაციასა და ძვრადობას. მათი სტაბილიზაცია მიიღწევა მოწვით 750°C ტემპერტურაზე 10სთ-ის განმავლობაში. ასეთ მდგომარეობაში p-ტიპის (Ge-Si):B ნიმუშებში შემცირებულია ხვრელების კონცენტრაცია და გაზრდილია ძვრადობის მნიშვნელობები. n-ტიპის (Ge-Si):As ნიმუშებში იზრდება ელექტრონების კონცენტრაცია, მცირდება მათი ძვრადობა.

მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობის მიკროსტრუქტურა შედარებით მაღალი სიმკვრივის დისლოკაციებს შეიცავს (111) სიბრტყეზე ($\sim 10^4$სმ$^{-2}$) . ეს გარემოება განაპირობებს მიკროსისალის მნიშვნელობების სპეციფიკურ ცვლილებებს. მთავარ ფაქტორად საცდელი შენადნობების მიკროსისალის

ფორმირებაში განიხილება მცირე ატომური რადიუსის სილიციუმის ატომების მახლობლობაში აღძრული კუმშვის დეფორმაცია და დეფორმაციით განპირობებული კუმშვის ძაბვები. კრისტალური მესრის შევიწროება იწვევს ატომთაშორისი კავშირის ძალების ლოკალურად ზრდას. ცხადია აღნიშნული წარმოშობის ძალების სიდიდე მალეგირებელი კომპონენტის სილიციუმის კონცენტრაციის პროპორციულია.

დარიშხანით ლეგირებული Ge-Si მონოკრისტალური შენადნობების მიკროსისალის მნიშვნელობები დამოკიდებულია დარიშხანის კონცენტრაციაზე. As-ის მცირე კონცენტრაციების შემთხვევაში მოკრისისალე უმნიშვნელოდ მცირდება, მაგრამ დარიშხანის მაღალი კონცენტრაციით ლეგირებულ Ge-Si კრისტალებში მკვეთრად მცირდება მიკროსისალის სიდიდეები. ასეთ შემთხვევაში დენის მატარებელი თავისუფალი ელექტრონები ასუსტებენ ტეტრაედრულ კოვალენტურ კავშირებს, რაც ერთ-ერთი მიზეზია მექანიკური მახასიათებლების, კერძოდ, მიკროსისალის შემცირების.

მონოკრისტალურ გერმანიუმში ფარდობით წაგრძელებას ახასიათებს აჩქარებული და შენელებული ცვლილებები. 200-300°C, 450-500°C და 650-750°C უბნებზე მისი ზრდის სიჩქარე მაღალია, ხოლო 300-450°C, 550-600°C, 700-730°C უბნებზე იგი აშკარად შენელებულად იზრდება. ფარდობითი წაგრძელების ასეთი ხასიათის ცვლილებები განპირობებულია სხვადასხვა ტიპის არასტაბილური დეფექტების კომპლექსებში გარდაქმნებით, რის შედეგად მათი შემადგენელი ატომები იცვლიან პოზიციებს და მყარ ხსნარში გადადიან, ხორციელდება კომპლექსებში კონფიგურაციული ცვლილებები. მოწვით 5სთ-ის განმავლობაში 900°C-ზე ვიწროვდება ყველა ტემპერატურული უბანი, სადაც ვლინდება ფარდობითი წაგრძელების ანომალური ზრდა.

Ge-Si შენადნობების ფარდობითი წაგრძელების ყველა ანომალია თერმულად მდგრადია. 900°C-ზე ხანგრძლივი მოწვა (20სთ.) ვაკუუმში გავლენას არ ახდენს მათ ინტენსივობასა და ტემპერატურულ ინტერვალებზე.

თერმული გაფართოების ანომალური ცვლილებები გერმანიუმსა და სილიციუმში დაკავშირებულია ფაზურ გარდაქმნებთან. ძირითად მექანიზმად ფაზური გარდაქმნების განვითარებაში მიჩნეულია ატომთაშორისი კავშირების რეჰიბრიდიზაცია. თავისუფალი ზედაპირი ხასიათდება გაწყვეტილი ვალენტური კავშირებით (თითოეული ყოველ ატომზე (111) წახნაგზე სილიციუმსა და გერმანიუმში) ეს იწვევს მეზობელ ქვედა სიბრტყეებზე ბმების ძლიერ შეშფოთებას, რაც განაპირობებს ატომების გადანაწილებას მესერში. ფაზური გარდაქმნების დროს ირღვევა ტეტრაედრული sp^3 კოვალენტური კავშირები, მცირდება აკრძალული ზონის სიგანე, იზრდება დენის მატარებლის კონცენტრაცია, ხდება მასალის მეტალიზაცია კოვალენტური მდგენელების შესუსტებასთან ერთად.

შესწავლილია [111] ორიენტაციის მონოკრისტალურ Ge, Ge:B, Ge:As და $Ge_{1x}Si_x$ ($x<0,05$) შენადნობების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიური მოდულის ტემპერატურული დამოკიდებულებები. მონოკრისტალური გერმანიუმის შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრი შედგება ექსპონენციალური ფონისა და დეფორმაციული წარმოშობის მაქსიმუმებისაგან. მათი აქტივაციური მახასიათებლები (აქტივაციის ენერგია, სიხშირის ფაქტორი) მნიშვნელოვან ცვლილებებს განიცდიან ლეგირების, მაღალტემპერტურული ციკლური დეფორმაციისა და თერმული დამუშავების გავლენით. რელაქსაციური პროცესები ხასიათდებიან რხევითი ენერგიის გაბნევის მაღალი ინტენსივობითა და ამპლიტუდურ დეფორმაციაზე ძლიერი დამოკიდებულებით. აღნიშნული თავისებურებანი დამახასიათებელია დისლოკაციებისა და წერტილოვანი დეფექტების (ვაკანსიები, მინარევების ატომები და მათი კომპლექსები, დისპერსული

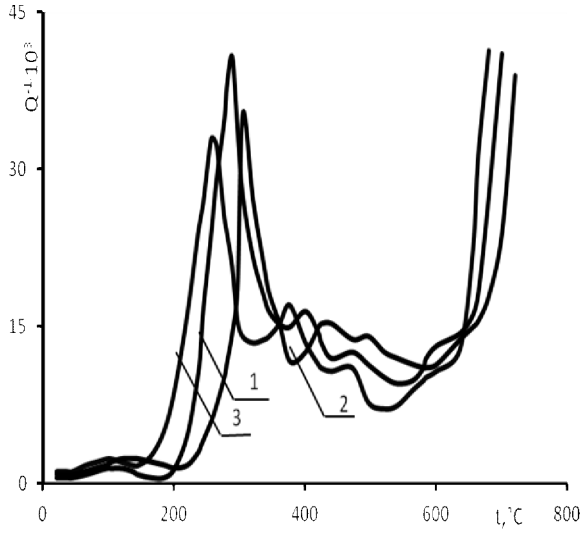
ფაზები) ურთიერთქმედების პროცესებისათვის მყარ სხეულებში. ძვრის დინამიური მოდულის ტემპერატურული დამოკიდებულების გრაფიკებზე გამოვლენილია განსაზღვრულ ტემპერატურებზე ძვრის მოდულის დეფექტი და ანომალური ამაღლება. მოდულის დეფექტის წარმოშობა განპირობებულია ლოკალურ არეებში სტრუქტურის დეფორმაციით, ხოლო მოდულის ანომალური ამაღლება არის დინამიური მექანიკური განმტკიცების შედეგი.

შესწავლილია მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის ტემპერატურული დამოკიდებულებები. ნაჩვენებია, რომ Si-ის კონცენტრაციის გაზრდა Ge-ს კრისტალურ მესერში იწვევს ძვრის მოდულის აბსოლუტური მნიშვნელობის და დეფორმაციული წარმოშობის რელაქსაციური პროცესების აქტივაციური მახასიათებლების ამაღლებას. რაც, ძირითადად გამოწვეულია მყარ ხსნარში Si-ის მცირე ატომური რადიუსის ატომების მახლობლობაში ლოკალური კუმშვის დეფორმაციითა და შესაბამისად, ურთიერთქმედების ძალების სიდიდის ზრდით. ბორითა და დარიშხანით მცირე კონცენტრაციებით (10^{14}-10^{15}სმ$^{-3}$) ლეგირება ამაღლებს აქტივაციური მახასიათებლების სიდიდეებს, ზრდის რელაქსაციური მაქსიმუმების თერმულ მდგრადობას. აღნიშნული ცვლილებები ლოკალიზებული კუმშვითი დეფორმაციის აღძვრითა და დისლოკაციების კოტრელის ატმოსფეროებში მალეგირებელი ატომების კონცენტრაცის გაზრდით არის განპირობებული.

მალეგირებელი ბორისა და დარიშხანის მაღალი კონცენტრაციები განაპირობებენ Ge-Si შენადნობების სტრუქტურაში დისლოკაციების ელექტრული ძალებით დამუხრუჭების შესუსტებას, რადგანაც ხვრელებითა და ელექტრონებით ივსებიან ე.წ. ერთგანზომილებიანი დისლოკაციური ზონები. ყოველივე აღნიშნული Ge-Si შენადნობების რეალურ სტრუქტურაში იწვევს დისლოკაციების ძვრადობის გაზრდას, ავლენს მოდულისა და დრეკადობის ზღვრის მნიშვნელობების შემცირების

ტენდენციას. ე.ი.ადგილი აქვს Ge-Si შენადნობების სტრუქტურის “დარბილებას”.

Ge-Si შენადნობების სტრუქტურაში დეფექტების რთული ურთიერთქმედება განაპირობებს სტრუქტურულად - მგრნობიარე შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრების სირთულეს. ნახ.1-ზე წარმოდგენილია ბორით ლეგირებულ Ge-Si შენადნობების შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული დამოკიდებულებები.



ნახ.1. ბორით ლეგირებული მონოკრისტალური $Ge_{0,99}Si_{0,01}$ შენადნობების შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრები

1. $Ge_{0,99}Si_{0,01}$:B, ($5\cdot10^{16}$სმ$^{-3}$) f_0=1,1ჰც; 2. $Ge_{0,98}Si_{0,02}$:B ($2\cdot10^{15}$სმ$^{-3}$), f_0=1,0ჰც;
3. $Ge_{0,98}Si_{0,02}$:B ($3\cdot10^{19}$სმ$^{-3}$), f_0=1,25ჰც

ბორით ლეგირება მცირე კონცენტრაციით (~$5\cdot10^{16}$სმ$^{-3}$) ზრდის მაქსიმუმების ტემპერატურას, შესამჩნევად ამცირებს მათ ინტენსივობას (ნახ.1.2). ბორის მაღალი კონცენტრაციის შემთხვევაში მცირდებიან მაქსიმუმების ტემპერატურები და ინტენსივობა.

აღსანიშნავია რომ ნებისმიერი კონცენტრაციით სილიციუმის შემცველი Ge-Si შენადნობების დეფექტების მოძრაობის აქტივაციის ენერგიის სიდიდეები იზრდებიან. ამის გამო, B-ით ძლიერად ლეგირებულ შენადნობებში ერთდრულად რეალიზებულია კრისტალური მესრის "დარბილებისა" და განმტკიცების ფაქტორი.

მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების ამპლიტუდური დამოკიდებულებებიდან განსაზღვრულია კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციისა და დრეკადობის ზღვრის მნიშვნელობები. შესწავლილია ლეგირების, დეფორმაციისა და თერმული ზემოქმედებით მათი ცვლილებების კანონზომიერებანი.

დასკვნა

1. შესწავლილია ჩოხრალსკის მეთოდით [111] კრისტალოგრაფიული მიმართულებით გაზრდილი მონოკრისტალური $Ge_{1-x}Si_x$($x \leq 0,05$) შენადნობების მიკროსტრუქტურა.

   - დადგენილია, რომ არალეგირებულ Ge-Si შენადნობებში სილიციუმის კონცენტრაციის გაზრდით (111) ორიენტაციის სიბრტყეებზე დისლოკაციების სიმკვრივე მაღლდება $2 \cdot 10^3$სმ$^{-2}$-დან $1 \cdot 10^4$სმ$^{-2}$-მდე.

   - ბორითა და დარიშხანით ლეგირებულ Ge-Si შენადნობებში დისლოკაციები ხასიათდებიან არაერთგვაროვანი განაწილებითა და მაღალი სიმკვრივით (~$5 \cdot 10^4$სმ$^{-2}$).

2. ჰოლის ეფექტის მეთოდით მუდმივ მაგნიტურ ველში განსაზღვრულია სილიციუმის, ბორისა და დარიშხანის სხვადასხვა შედგენილობის Ge-Si შენადნობების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები და გაანალიზებულია მათი ცვლილების კანონზომიერებანი.

3. სილიციუმის, ბორისა და დარიშხანის სხვადასხვა შედგენილობის Ge-Si შენადნობების (111) ორიენტაციის სიბტრყეებზე განსაზღვრულია მიკროსისალისა და ძვრის მოდულის აბსოლუტური სიდიდეები და გაანალიზებულია n- და p- ტიპის ნიმუშების სტრუქტურის "დარბილებისა" და განმტკიცების შესაძლებელი მექანიზმები.

4. n- და p- ტიპის მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების ფარდობითი წაგრძელების ტემპერატურულ დამოკიდებულებებზე გამოვლენილია ანომალური თერმული გაფართოების ინტერვალები. გაანალიზებულია მინარევების დისპერსულ ფაზებსა და კომპლექსებში გარდაქმნებისა და კოვალენტური ტეტრაედრული კავშირების დეზორიენტაციის წვლილი თერმული გაფართოების ანომალურ ცვლილებებში.

5. შესწავლილია კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის გავლენა მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების მიკროსისალისა და ძვრის მოდულის სიდიდეებზე.
   - დადგენილია, რომ მაღალი მექანიკური თვისებები დამახასიათებელია (111) ორიენტაციის სიბრტყეებისათვის.

6. შესწავლილია n- და p- ტიპის მონოკრისტალური $Ge_{1-x}Si_x$($x \leq 0,05$) შენადნობების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის ფარდობითი მოდულის ტემპერატურული და ამპლიტუდური დამოკიდებულებები.
   - გამოვლენილია რელაქსაციური და ჰისტერეზისული წარმოშობის გრეხითი რხევების ენერგიის გაბნევის პროცესები.
   - განსაზღვრულია რელაქსაციური პროცესების აქტივაციის ენერგიის და სიხშირის ფაქტორის მნიშვნელობები და დადგენილია ლეგირებით,

მაღალტემპერატურული თერმული დამუშავებითა და მაღალამპლიტუდური გრეხითი დეფორმაციით მათი ცვლილებების კანონზომიერებანი.

- გამოვლენილია ძვრის მოდულის დეფექტისა და ანომალური ზრდის ტემპერატურული ინტერვალები.

- გაანალიზებულია ხრახნულ და 60-გრადუსიან დისლოკაციებზე გეომეტრიული და წყვილი ღუნვების წარმოქმნისა და მოძრაობის წვლილი 200-700°C ინტერვალში რელაქსაციური პროცესების ფორმირებაში.

7. ამპლიტუდური დეფორმაციის ფართო ინტერვალში ($5\cdot10^{-5}$-$5\cdot10^{-3}$) შესწავლილია მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის მრავალსტადიური ამპლიტუდური დამოკიდებულება. განსაზღვრულია ამპლიტუდური დეფორმაციის კრიტიკული სიდიდეები და შეფასებულია დრეკადობის ზღვრის მნიშვნელობები.

   - ნაჩვენებია ბორითა და დარიშხანით ლეგირებულ Ge-Si შენადნობებში მიკროპლასტიკურობის მახასიათებლების მართვის შესაძლებლობები.

8. მონოკრისტალური შენადნობების მიკროსტრუქტურის, ელექტროფიზიკური, თერმული და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მახასიათებლების ცვლილებების დადგენილი კანონზომიერებანი შესაძლებელია გამოყენებული იქნას Ge-Si შენადნობების ფუძეზე ახალი ნახევარგამტარული ოპტოელექტრონული მოწყობილობებისა და ხელსაწყოების შესაქმნელად.

Abstract

In the last period interest to monocrystalline Ge-Si alloys has been sharply increased, that is caused by wide application perspectives in semiconducting, net, fibrous-optical, communication and radiation-stable devices, nuclear detectors, bipolar transistors and other fields.

Working resource and stability of characteristics of the devices, based on monocrystalline Ge-Si alloys have been determined by dislocations, existed in the structure. Establishment of inter-correlation dependence of structure and structural-sensitive physical-mechanical properties of semicondicting materials, based on monocrystalline Ge-Si alloys requires complex investigations and comparable analysis of obtained experimental results with characteristics of covalent semiconductng materials.

At present, investigations of mechanical relaxation processes in elemental semiconductors has great interest. It is caused with high sensitivities of relaxation method in the real crystal towards interaction between electrically active and neutral structural defects. Measuring of frequency and temperature spectra of mechanical relaxation processes via acoustical spectroscopic methods, gives unique data of activation parameters of defects , characterized of crystalline lattice, which are used in creation of prognosis bases of controllable electrophysical, structural-sensitive physical-mechanical and plastic properties. Despite of this crystallographic and energetic characteristics of defects, characterized of monocrystalline Ge-Si alloys, their influence on structural-sensitive semiconducting and physical-mechanical properties have not been complexly studied.

Investigation results of microstructure, mechanical, electrophysical, thermal and relaxation and hysteretic processes of dissipation of torsion oscillation energy and microplastic deformation of Ge and Ge-Si alloys have been presented in the work.

Experimental bulk crystals have been obtained by the Czochralski method in [111] crystallographic direction. Microstructure of the experimental undoped and doped specimens have been studied by using metallographic optical microscope. Dislocations have been revealed on (111) plane. It has been shown, that dislocation density has increased in Ge-Si monocrystals. In the microstructure of undoped germanium,

inhomogeneously distributed individual and twinnings and packets of twinnings have been revealed.

Regularities of changes of microhardness of Ge-Si alloys, under influence of doping, thermal treatment and crystallographic orientation have been established. Doping by boron with 10^{17}-$10^{19}sm^{-3}$ causes increase of values of microhardness, reason of this is influence of compressive deformation near of B atoms in the crystalline lattice, respectively, increasing of inter-atomic bonding forces. Increase of mechanical characteristics has been caused by decrease of dislocation mobility in the boron doped crystals.

Electrophysical characteristics of thermally treated Ge-Si alloys, with different crystallographic orientations have been investigated in the constant magnetic field, via Hall effect registration method and peculiarities of the changes have been analyzed.

Absolute values of dynamic shear modulus and dependences of shear modulus on the temperature and strain amplitude has been investigated.

Temperature intervals of anomalous increase and decrease of shear modulus have been sharply revealed on the curve of temperature dependences of mechanical characteristics. Anomalous increase of shear modulus in a process of temperature raising has been revealed in the crystals of high density. Regulating of intensity and temperature of anomalous increase of shear modulus is possible by doping and high temperature annealing.

Temperature dependence of relative elongation in monocrystalline Ge-Si alloys has been studied. Temperature intervals of anomalous changes of the relative elongation have been revealed. Investigation results of thermal treatment and doping effect on mentioned anomalies have been presented. Particularly, thermal expansion anomalous changes have been revealed in conditions of heating-cooling (3-5K/min). Annealing in 500-600°C and 800-900°C intervals (10hrs.) influence differently on temperature changes of thermal expansion. Thermal treatment at medium temperatures practically does not influence, but annealing at high temperatures causes decrease of anomaly in 200-450°C interval, in 650-700°C interval it has disappeared. These peculiarities are characteristic for undoped and boron doped monocrystalline specimens.

Investigations results of structure and structural-sensitive physical properties confirm phase-transformation processes in Si and Ge structures in a wide temperature interval (20-900ºC). These structural changes are reflected in anomalous changes of microstructure, electrical, mechanical and thermal properties, in heating-cooling processes. Investigation results of temperature dependences of shear modulus and thermal expansion, presented in the works, confirms revealing of phase-transformation processes in the monocrystalline Ge, in 200- 750 ºC interval.

For the analysis of this problem , investigation results of structural-sensitive internal friction temperature and amplitude dependences are very important. Relaxation and hysteretic processes of transformation of oscillation energy into thermal energy have been observed in temperature spectrum of internal friction of torsion oscillations of n- and p- types Ge and Ge-Si alloys. The values of frequency factor and activation energy of defects, participated in relaxation processes have been determined.

Shear modulus defect and anomalous increase has been revealed in 200-400°C temperature interval, near to the relaxation internal friction maxima. By thermal treatment (annealing) in 500-900ºC interval it is possible to regulate increase-decrease of shear modulus defects and change temperature by ±20°C. In the temperature interval of 200-400°C highamplitude cyclic deformation causes significant increase of relaxation internal friction intensity, values of shear modulus defects and intensity of the neighbor mechanical hardening process.

It has been established, that increase of Si content in Ge-Si alloys causes increase of activation characteristics of defects, rise of potential barriers for dislocation motion and respectively temperature intervals of anomalous changes of shear modulus and relaxation process parameters.

Boron doping of Ge-Si causes increases of activation energy of generation and mobility of the structural defects in Ge-Si alloys, limitation of dislocation mobility and increase of absolute values of shear modulus. In the alloys, doped by boron with high concentration ($5 \cdot 10^{18}$-$1 \cdot 10^{19} sm^{-3}$) current carriers_ holes causes weakening of oriented covalent bonds, softening of the structure, increasing of dislocation mobility and developing of microplastic deformation.

Amplitude dependences of dynamic shear modulus and internal friction intensity at fixed temperatures have been studied. Multi-stage character of their changes have been established and critical values of strain amplitude have been estimated.

Parameters of microplastic deformation _ critical strain amplitude and elastic limit have been determined. Regularites of changes of microplastic deformation parameters under influence of doping, thermal treatment and hightemperature cyclic deformation have been established.

Structure of Ge and Ge-Si monocrystals, doped by low concentration of boron has been hardened. The values of elastic limit, critical strain amplitude, dynamic shear modulus and microhardness have been increased. The values of frequency factors and activation energy of relaxation internal friction have been also increased. Suppressing of hardening effect of Ge-Si alloys is possible with 10^{18}-10^{19}sm^{-3} boron concentration. For the possible mechanism has been presented weakening of covalent bonds in conditions of high concentration of current carriers, resulting of this activation energy of dislocation motion decreases, and respectively, mobility increases and structural-sensitive mechanical characteristics decreases.

Relaxation and hysteretic processes of internal friction and structural changes, caused by increase of concentration in monocrystalline Ge-Si alloys have been analyzed. Microscope mechanisms of torsion oscillations energy dissipation have been presented, which foresees changes of activation characteristics of generation and motion of screw and 60º-_ dislocations, geometrical and pairs of kinks on the various dislocations under the influence of doping, hightemperture cyclic deformation and thermal treatment.

Established regularities of changes of real structure and electrophysical and physical-mechanical properties and thermal expansion of Ge-Si monocrystals can be used for developing new semiconducting devices and equipments, based on germanium.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში:

1. Арчуадзе Г.Н., Дарчиашвили М.Д., Кобулашвили Н.В., Куция А.А., Мхеидзе Д.Т., Билисейшвили М.Дж. Физико-механические свойства монокристаллических сплавов Ge-Si. საქართველოს ქიმიური ჟურნალი, 2009, ტ.9, №6, გვ.511-513.

2. Archuadze G., Darchiashvili M., Sanaia E., Baratashvili I., Darsavelidze G. Amplitude dependent inelasticity in undoped polycrystalline gemanium. Bulletin of the Georgian national academy of Sciences, 2010,vol.4.,#3, p.50-53.

3. Арчуадзе Г.Н., Чубинидзе Г.Г., Сичинава А.В., Билисейшвили М.Д., Курашвили И.Р.. Термическое расширение и неупругие свойства монокристаллов $Ge_{1-x}Si_x$ (x0,02). საქართველოს ქიმიური ჟურნალი, 2011, ტ.11,№3, გვ.297-299.

4. არჩუაძე გ., ჩუბინიძე გ., სიჭინავა ა., ქუთელია რ., ტაბატაძე ი.. თერმული დამუშავებისა და გრეხითი დეფორმაციის გავლენა მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. სტუ.საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის "გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები" თეზისების კრებული, 2011, გვ. 8-9.

5. არჩუაძე გ., ჩუბინიძე გ., სიჭინავა ა., ქუთელია რ., ტაბატაძე ი. თერმული დამუშავებისა და გრეხითი დეფორმაციის გავლენა მონოკრისტალური Ge-Si შენადნობების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის მოხსენებათა კრებული "გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები". თბილისი, გამომცემლობა"ტექნიკური უნივერსიტეტი", 2011, გვ.12-14.

6. არჩუაძე გ. მექანიკური რელაქსაციური პროცესები ბორით ლეგირებულ მონოკრისტალურ $Ge_{0,99}Si_{0,01}$ შენადნობში. საქართველოს ქიმიური ჟურნალი. 2011, ტ.12, №4, გვ. 3-5.

7. Archuadze G.N., Chubinidze G.G., Kurashvili I.R., Bokuchava G.V., Darsavelidze G.Sh.. Thermal expansion and inelasticity of monocrystalline Ge-Si alloys. Georgian international Journal of science and Technology, Nova science publischers, Inc.New York. 2011.