

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი ჩუბინიძე

დეფორმირებული და თერმულად დამუშავებული ბორით  
ლეგირებული მონოკრისტალური გერმანიუმის  
ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2013 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი  
ფიზიკის დეპარტამენტი  
სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტში

ხელმძღვანელი: ფიზ.მათ.მეცნ. დოქტორი  
სტუ-ს სრული პროფესორი ზურაბ ჩაჩხიანი  
რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2013 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.** გასული საუკუნის ოთხმოცდაათიანი წლებიდან გერმანიუმი წარმოადგენს ერთ-ერთ ძირითად მასალას ელექტრონულ ტექნოლოგიებში. გერმანიუმის ნახევარგამტარული თვისებები ფართოდაა გამოყენებული ელექტრონულ ხელსაწყოებში, მზის ენერჯის გარდამქმნელებში, აგრეთვე განსაზღვრული მახასიათებლების Ge-Si შენადნობებში. ინფრაწითელი დიაპაზონის ღამის ხედვის ხელსაწყოების ლინზები და ფანჯრები შექმნილია ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული მონოკრისტალური გერმანიუმის ფუძეზე. III-V მასალების ჰეტეროსტრუქტურებისათვის გერმანიუმის ფუძეშრები წარმოადგენენ ძირითად ნახევარგამტარულ მასალას.

გერმანიუმის ფართო მრავალმხრივი გამოყენება განპირობებულია მისი უნიკალური ნახევარგამტარული თვისებებით. პრაქტიკაში გამოყენებულ ნახევარგამტარებს შორის გერმანიუმი გამორჩეულია ხვრელების ძვრადობის ყველაზე მაღალი სიდიდით (1900 სმ<sup>2</sup>/ვ·წმ).

გერმანიუმს გააჩნია განსაკუთრებული მახასიათებლები მაღალი სიხშირეების მოწყობილობებში ოპერაციებისათვის. მისი აკრძალული ზონის დაბალი მნიშვნელობა (0.66ევ) საშუალებას იძლევა ოპერაციები განხორციელდეს მცირე ძაბვების ზემოქმედებით, როდესაც შესაძლებელია სითბური ხმაურის კორექცია და შემცირება მინიმუმამდე.

**თემის აქტუალობა.** გერმანიუმის მასიურ კრისტალში, სხვადასხვა წარმოშობის გარეშე ნაკადების ზემოქმედებით (დინამიური მექანიკური დატვირთვა, ლაზერული იმპულსები, აჩქარებული იონები) შესაძლებელია განვითარდეს ფაზური გარდაქმნების ტიპის პროცესები, რომლებშიაც არსებით როლს ასრულებენ სტრუქტურული დეფექტები. წერტილოვანი დეფექტები, ვაკანსიები და მინარევების ატომები გერმანიუმის კრისტალურ მესერში წარმოქმნიან ლოკალიზებულ დეფორმაციებს, რაც განპირობებულია მინარევების ატომების კოვალენტურ რადიუსებს შორის არსებული განსხვავებით. ინტენსიური ლოკალიზებული დეფორმაციების

წყაროებს წარმოადგენენ წერტილოვანი დეფექტების კომპლექსები და წერტილოვანი და დისლოკაციური წარმოშობის გავრცობილი დეფექტების ერთობლიობები. მათი ძვრადობისა და ელექტრული აქტიურობის ცვლილებებს შეუძლიათ გამოიწვიონ ნახევარგამტარული მასალებისა და მათ ფუძეზე შექმნილი ხელსაწყოების ძირითადი მახასიათებლების დეგრადაცია და პრაქტიკულად არაკონტროლირებადი, არასასურველი ცვლილებები.

გერმანიუმის კრისტალურ მესერში არსებული და სპეციფიკურ პირობებში წარმოქმნილი სხვადასხვა ტიპის სტრუქტურული დეფექტების კრისტალოგეომეტრიული და ენერგეტიკული მახასიათებლების კვლევა წარმოადგენს მაღალ თეორიულ და პრაქტიკულ ინტერესს რეალური სტრუქტურული მდგომარეობისა და სტრუქტურულად-მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მახასიათებლების კორელაციური კავშირების გამოვლინებისა და მართვის მექანიზმების დასადგენად.

წითელი გამოსხივების გაზნევა დეფექტებზე გერმანიუმში აუარესებს გამოსახულების კონტრასტს და იწვევს სინათლის ნაკადის შესუსტებას. გერმანიუმის სრულყოფილ კრისტალებში გამჭვირვალობის არეში გაზნევის ინტენსივობა თანაზომადია შთანთქმის, ხოლო გამჭვირვალობის მოკლეტალღოვან დიაპაზონში შესაძლებელია გადააჭარბოს შთანთქმის სიდიდეს. მცირეკუთხოვანი დისლოკაციური საზღვრები მნიშვნელოვნად ამცირებენ სტრუქტურულ სრულქმნილობას. ამით ძლიერ მცირდება ასეთ სტრუქტურულ მდგომარეობაში გერმანიუმის ფუძემრეების ეფექტურობა რადიაციისადმი მედეგი ფოტოელექტრული გარდამქმნელებისათვის. მათი სტრუქტურების ფუძემრეებად გამოიყენება დისლოკაციებისაგან პრაქტიკულად თავისუფალი გერმანიუმის მასიური მონოკრისტალები.

აღსანიშნავია ისიც, რომ ამჟამად მონოკრისტალური გერმანიუმი ფართოდ გამოიყენება III-V ნაერთების ეპიტაქსიური სტრუქტურების ფუძემრეებად მზის ენერჯის გარდამქმნელებში, რომლებითაც აღჭურვილია თანამგზავრების ენერგეტიკული სისტემა. გერმანიუმის

ფუძემდებების დამზადებისა და მუშაობის პროცესებში აღძრული დეფორმაციები ქმნიან ახალი დისლოკაციების ჩასახვისა და გავრცელების პირობებს. მათი დიაგნოსტიკა და მართვა აუცილებელია მუშაობის რესურსის გაზრდისათვის. ყოველივე ზემოთ აღნიშნული განსაზღვრავს გერმანიუმის მასიური კრისტალების მიღების ტექნოლოგიური პირობების, პროფილირებული ნამზადების შექმნის, რეალური სტრუქტურისა და სტრუქტურულად-მგრძობიარე ფიზიკურ-მექანიკური და ელექტროფიზიკური თვისებების კომპლექსურად კვლევის აუცილებლობასა და აქტუალობას.

ნაშრომის მიზანია ჩოხრალსკის მეთოდით არალეგირებული და სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიური კრისტალების მიღება; მიღებული კრისტალების რეალური სტრუქტურული მდგომარეობისა და სტრუქტურულად-მგრძობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კომპლექსური კვლევა; კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის, ლეგირების სიღრმის, მაღალ ტემპერატურებზე დეფორმაციისა და თერმული დამუშავების გავლენით სტრუქტურის დეფექტების, ელექტროფიზიკური, თერმული, დინამიური მექანიკური თვისებების მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერებების დადგენა.

დასახული მიზნის მისაღწევად ნაშრომში გადაჭრილია შემდეგი

ამოცანები:

- არალეგირებული და ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიური კრისტალების მიღება ჩოხრალსკის მეთოდით;
- გერმანიუმის მასიური კრისტალების რეალური სტრუქტურული მდგომარეობის, ელექტროფიზიკური მახასიათებლების, მიკროსისალისა და ძვრის მოდულის კვლევა;
- გერმანიუმის მასიური კრისტალების ფარდობითი წაგრძელებისა და ხაზოვანი თერმული გაფართოების კოეფიციენტის ტემპერატურული დამოკიდებულების კვლევა;

- გრეხითი რხევების 0,5-5,0ჰც. სიხშირისა და დეფორმაციის ამპლიტუდის  $1 \cdot 10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-3}$  დიაპაზონებში გერმანიუმის მასიური კრისტალების შინაგანი ხახუნისა და დინამიური ძვრის მოდულის ტემპერატურული დამოკიდებულების კვლევა;
- გერმანიუმის მასიურ კრისტალებში გრეხითი რხევების გაბნევის რელაქსაციური და ჰისტერეზისული პროცესების დამახასიათებელი სტრუქტურული დეფექტების მოძრაობის აქტივაციური მახასიათებლებისა და მიკროპლასტიკური დეფორმაციის პარამეტრების განსაზღვრა;

**ნაშრომის მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:**

- მიღებულია განსაზღვრული სტრუქტურული მდგომარეობის არალეგირებული და ფართო კონცენტრაციულ დიაპაზონში ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიური კრისტალები;
- შესწავლილია ბორით ლეგირების გავლენა პოლი- და მონოკრისტალური გერმანიუმის ნიმუშების დეფექტების ტიპებზე, კონცენტრაციასა და განაწილებაზე, თერმულ გაფართოებაზე, ელექტროფიზიკური მახასიათებლების, მიკროოსისალისა და ძვრის მოდულის მნიშვნელობებზე;
- შესწავლილია სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორით ლეგირების, მაღალ ტემპერატურებზე დეფორმაციისა და თერმული დამუშავების გავლენა თერმული გაფართოების არამონოტონურ ცვლილებებზე;
- შესწავლილია ბორით ლეგირების, კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის, მაღალ ტემპერატურებზე დეფორმაციისა და თერმული დამუშავების გავლენა გერმანიუმის სტრუქტურაში დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების ჩასახვისა და მოძრაობის აქტივაციის ენერჯის მნიშვნელობებზე.
- განსაზღვრულია სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიური კრისტალების სხვადასხვა ტიპის

დისლოკაციის დამაგრების ენერჯისა და დრეკადობის ზღვრის მნიშვნელობები.

**ნაშრომში წარმოდგენილი კვლევის შედეგების პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს შემდეგში:**

- განსაზღვრულია p-ტიპის გერმანიუმის მასიური კრისტალების სტრუქტურის, ელექტროფიზიკური, თერმული, დინამიური მექანიკური თვისებების მახასიათებლები და დადგენილია გარეშე ზემოქმედებით (დეფორმაცია, თერმული დამუშავება) განპირობებული მათი ცვლილებების კანონზომიერებანი.
- გარეშე ფაქტორების გავლენით განპირობებული ელექტროფიზიკური, თერმული და მექანიკური მახასიათებლების დადგენილი სიდიდეები მნიშვნელოვანია განსაზღვრული თვისებების მონოკრისტალური გერმანიუმის ფუძემრეების შესაქმნელად სხვადასხვა დანიშნულების ეპიტაქსიური სტრუქტურებისათვის.
- გრებიტი რხევების ენერჯის შთანთქმის რელაქსაციური და ჰისტერეზისული პროცესების განსაზღვრული მახასიათებლები შესაძლებელია გამოყენებული იქნას გერმანიუმის მასიური კრისტალებისაგან პროფილირებული ნამზადების შესაქმნელად ნახევარგამტარული ხელსაწყოებისათვის.
- ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიური კრისტალების სტრუქტურისა და სტრუქტურულად-მგრძობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კომპლექსური კვლევით მიღებული შედეგები წარმოადგენენ საცნობარო მასალას ნახევარგამტარების მექანიკური განმტკიცებისა და პლასტიკურობის პრობლემისათვის, ელექტროფიზიკური მახასიათებლების ცვლილებების დადგენილი კანონზომიერებანი შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ახალი ნახევარგამტარული მასალებისა და ხელსაწყოების თვისებებისა და

საექსპლოატაციო მახასიათებლების მართვის პრობლემის გადასაჭრელად.

### **დასაცავად გამოტანილია შემდეგი დებულებები:**

1. სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიური კრისტალების მიკროსტრუქტურისა და სტრუქტურულად-მგრძობიარე დინამიური მექანიკური თვისებების კვლევის შედეგები.
2. ბორით ლეგირების, მაღალტემპერატურული დეფორმაციისა და თერმული დამუშავების გავლენით გერმანიუმის მასიური კრისტალების სტრუქტურული დეფექტების აქტივაციური, თერმული გაფართოების, ელექტროფიზიკური და არადრეკადობის მახასიათებლების ცვლილებების დადგენილი კანონზომიერებანი.
3. ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიურ კრისტალებში მექანიკური რხევების მიღების რელაქსაციური და ჰისტერეზისული პროცესების მახასიათებლების კვლევის შედეგები.
4. ლეგირებით, დეფორმაციითა და თერმული დამუშავებით განპირობებული გერმანიუმის მასიური კრისტალების დრეკადობისა და მიკროპლასტიკურობის მახასიათებლების ცვლილებათა შესაძლებელი მექანიზმები.

**ნაშრომის აპრობაცია.** ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებულია სტუ-ს ფიზიკის დეპარტამენტისა და ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სამეცნიერო სემინარების სხდომებზე.

დისერტაციის შინაარსი და ძირითადი შედეგები მოხსენების სახით წარდგენილია საერთაშორისო კონფერენციებსა და სიმპოზიუმებზე:

1. XIX საერთაშორისო კონფერენცია “რადიაციული მოვლენების ფიზიკა და რადიაციული მასალათმცოდნეობა“, ალუმბა, ყირიმი, 5-9 სექტემბერი, 2010.



2. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საერთაშორისო კონფერენცია “გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები“. თბილისი, 30 მარტი, 2011.
3. XX საერთაშორისო კონფერენცია “რადიაციული მოვლენების ფიზიკა და რადიაციული მასალათმცოდნეობა“, ალუმტა, ყირიმი, 10-15 სექტემბერი, 2012.
4. XV საერთაშორისო სიმპოზიუმი “მოწესრიგება მინერალებსა და შენადნობებში“. OMA-15, დაბა ლოო, დონის როსტოვი, 13-18 სექტემბერი, 2012.

**პუბლიკაციები:** დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 12 სამეცნიერო ნაშრომში. ძირითადი პუბლიკაციების ნუსხა მოყვანილია ავტორეფერატის ბოლოში.

**ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა:** დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 138 ნაბეჭდ გვერდს. დისერტაცია შედგება რეზიუმესაგან (ორ ენაზე), სარჩევის, შესავლის, ორი თავის, ილუსტრაციის სახით მოყვანილი 18 ნახაზის, 9 ცხრილის, დასკვნისა და 114 დასახელების ლიტერატურისაგან.

### **ნაშრომის შინაარსი**

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

**პირველ თავში** წარმოდგენილია გერმანიუმის ფუძეზე არსებული ნახევარგამტარული მასალების სტრუქტურის, ელექტროფიზიკური და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ლიტერატურული მიმოხილვა. გაანალიზებულია გერმანიუმის მასიური კრისტალების სტრუქტურული დეფექტების კრისტალოგომეტრიული და ენერგეტიკული მახასიათებლები.

ნაჩვენებია, რომ ალმასის ტიპის კრისტალურ მესერში სრიალის სამი შესაძლებელი (001), (110) და (111) სიბრტყეებიდან ყველაზე მნიშვნელოვანია დისლოკაციების სრიალის {111} სიბრტყეთა სიმრავლე.

გერმანიუმისა და სილიციუმის კრისტალურ მესერში ფორმირდება ორი განსხვავებული ტიპის დისლოკაციების სიმრავლე, რაც დაკავშირებულია ალმასის ტიპის კუბური სტრუქტურის {111} ფენებში ატომების ორმაგ შრეებად განაწილებასთან. დისლოკაციები მოძრაობენ სრიალისა და შერეული მექანიზმებით. შერეული მექანიზმით მოძრავი დისლოკაციების ძვრადობა {111} სიბრტყეთა შორის სივრცეში მეტად მაღალია, ვიდრე იმავე სიბრტყეთა შორის არსებულ პარალელურ ფენებში. სრიალით მოძრავი დისლოკაციები განიცდიან დისოციაციას შოკლის ნაწილობრივ დისლოკაციებად, რასაც თან ახლავს წყობის დეფექტის წარმოქმნა.

მონოკრისტალურ გერმანიუმში დაბალ ძაბვაზე დისლოკაციების მოძრაობის მახასიათებლები კარგად ეთანხმებიან მოდელურ წარმოდგენებს, რაც გულისხმობს ღუნვების თერმულად აქტივირებულ ჩასახვას და დამამუხრუჭებელი წერტილოვანი დეფექტების ბარიერების გადალახვას. მაღალი ძაბვების გავლენით დისლოკაციების ძვრადობას ზღუდავს ფონონებთან ურთიერთქმედება. სწორედ ამის გამო ასეთ პირობებში განიხილავენ დისლოკაციების ღუნვების წყვილების მოძრაობას დიფუზიის თეორიის მოდელებში.

შესწავლილია მონოკრისტალურ გერმანიუმში დისოცირებული დისლოკაციების ძვრადობა. დისლოკაცია დისოცირებულია (111) სიბრტყეში, მისი ბიურგერსის ვექტორი [110] მიმართულების პარალელურია. 270°C-მდე გახურების გავლენით დისლოკაციის ერთი ნაწილი (111) სიბრტყეზე იწყებს სრიალს, ხოლო (111) სიბრტყეზე არსებული მდგენელი უცვლელია. 320°C –ზე (111) სიბრტყეზე არსებული დისლოკაციის მდგენელი მოძრაობს სრიალით დისლოკაციურ კვანძამდე. 440°C- ზე დისლოკაცია ასრულებს განივ სრიალს, იმავე დროში

დისლოკაციური კვანძი გადაადგილდება. დისლოკაციის სრიალი კვანძის მახლობლობაში შეზღუდულია.

მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტული და თეორიული შრომები ავლენენ ნახევარგამტარებში დიფუზური პროცესების დაჩქარებას დისლოკაციებისა და მცირეკუთხოვანი საზღვრების გასწვრივ. დიფუზიის აჩქარებას ხშირად აკავშირებენ ვაკანსიებთან. მათი კონცენტრაცია და ძვრადობა გაცილებით მაღალია ვიდრე კრისტალის მოცულობაში. აღნიშნული ცვლილებები უპირატესად განპირობებულია კრისტალური სტრუქტურის ძლიერი დამახინჯებით დისლოკაციების ბირთვების მახლობლობაში.

დღემდე არსებული მათემატიკური მოდელები საშუალებას იძლევიან განისაზღვროს მხოლოდ წერტილოვანი დეფექტების დიფუზური გადაადგილება დისლოკაციების ბირთვების გასწვრივ. დისლოკაციების დიფუზური შეღწევადობის და ნადნობში დიფუზიის ტემპერატურული დამოკიდებულებების შედარებითი ანალიზით განსაზღვრულია დისლოკაციის გასწვრივ დიფუზიის კოეფიციენტების აბსოლუტური მნიშვნელობები და დისლოკაციის ბირთვის ეფექტური რადიუსი.

გერმანიუმში დისლოკაციები აკრძალულ ზონაში ქმნიან აქცეპტორული ტიპის დონეების ორ ქვეზონას. მათი ენერგია და ნახევარგანი დამოკიდებულია კრისტალის ზრდის მიმართულებასა და წყალბადის შემცველობაზე. აღნიშნული დისლოკაციური ზონების გამოვლინება შესაძლებელია მხოლოდ, როდესაც დისლოკაციების სიმკვრივის ზღვრული სიდიდე  $10^{4}\text{სმ}^{-2}$ -ის რიგისაა.

დისლოკაციებით მდიდარ გერმანიუმში თერმული დამუშავებით შესაძლებელია ელექტროფიზიკური და ოპტიკური მახასიათებლების მკვეთრი ცვლილებები. შესწავლილია სხვადასხვა რეჟიმის თერმული დამუშავების გავლენა მონოკრისტალური გერმანიუმის დენის მატარებლების რეკომბინაციაზე დისლოკაციების სიმკვრივის ფართო დიაპაზონში. ნაჩვენებია, რომ მოწვა  $750^{\circ}\text{C}$ -ზე ამცირებს სიცოცხლის ხანგრძლივობას, როდესაც  $N_d=3\cdot 10^3\text{სმ}^{-2}$ . დისლოკაციების მცირე სიმკვრივის

გერმანიუმში განმსაზღვრელია ვაკანსიური ტიპის დეფექტების წვლილი სიცოცხლის ხანგრძლივობის ცვლილებებში, ხოლო დისლოკაციების მაღალი სიმკვრივის პირობებში სუსტდება რეკომბინაციურ პროცესებზე ვაკანსიებისა და დისლოკაციების ურთიერთქმედების გავლენა.

შინაგანი ხახუნის მეთოდით გამოკვლეულია ერთეულოვანი და წყვილი ღუნვების ფორმირებისა და მოძრაობის ენერგიის ცვლილებები ნახევარგამტარულ მასალებში. ნაჩვენებია ელექტრულად აქტიური მინარევების ძლიერი გავლენა დისლოკაციების ბირთვებსა და ატმოსფეროებზე. დენის მატარებლების ამალეზულ კონცენტრაციებზე დისლოკაციების ელემენტების რხევის სიხშირე შემოსაზღვრულია კოვალენტულ ბმებში ელექტრონების “გადართვებითა” და ჰიბრიდიზაციის მდგომარეობის შეცვლით, როდესაც დისლოკაციური ღუნვა აღმოჩნდება ბარიერის მაქსიმუმზე.

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.

ლეგირებული კოვალენტური ნახევარგამტარების დისლოკაციების ჩასახვისა და მოძრაობის აქტივაციის ენერგიის ვარიაციები ნათლად ვლინდებიან შინაგანი ხახუნის ტემპერატურულ სპექტრებში. შინაგანი ხახუნის მეთოდით გამოკვლეულია ერთეულოვანი ღუნვების მოძრაობისა და წყვილი ღუნვების ფორმირების აქტივაციური პარამეტრები  $n$ -ტიპის ლეგირებულ და, აგრეთვე, არალეგირებულ მონოკრისტალურ გერმანიუმში. განსაზღვრულია დისლოკაციებზე არსებული ღუნვების მოძრაობის ენერგია ( $\sim 1,108$ ევ) და სიხშირის ფაქტორი  $\sim 1,5 \cdot 10^{10} \text{წმ}^{-1}$ .

მეორე თავში წარმოდგენილია კვლევის მეთოდები, ექსპერიმენტული შედეგები და მათი განსჯა. არალეგირებული და ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მონო- და პოლიკრისტალური სხმულების მიღება განხორციელდა ჩოხრალსკის სადნობ ღუმელზე.

მსხვილმარცვლოვანი Ge:B-ის მიკროსტრუქტურაში გამოვლენილია ინდივიდუალური და დაჯგუფებული ორეულები. ორეულების დაჯგუფებები დამუხრუჭებულია ბლოკების გამყოფ საზღვართან. ხშირ შემთხვევებში ვლინდება ინდივიდუალური დისლოკაციები. მათი განაწილება არაერთგვაროვანია. ხშირად ფიქსირებულია წრფეზე განლაგებული დისლოკაციების სიმრავლე.

ჰოლის ეფექტის რეგისტრაციით მუდმივ მაგნიტურ ველში ოთახის ტემპერატურის პირობებში შესწავლილია ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული გერმანიუმის კრისტალები არალეგირებულ და სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორით ლეგირებულ მდგომარეობაში. არალეგირებული პოლიკრისტალური გერმანიუმის p-ტიპის ნიმუშების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები მგრძნობიარეა შემადგენელი მარცვლების ფორმისა და ზომებისადმი.

გერმანიუმის მასიური კრისტალების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები  
ცხრილი 1

საცდელი ნიმუშები	დენის მატარებლების კონცენტრაცია სმ <sup>-3</sup>			დენის მატარებლების ძვრადობა, სმ <sup>2</sup> ·ვ <sup>-1</sup> ·წმ <sup>-1</sup>		
	საწყისი	დეფორმირებული	მომწვარი, 1070 K, 10 სთ	საწყისი	დეფორმირებული	მომწვარი, 1070K, 10სთ.
p-Ge პოლიკრ.	1·10 <sup>15</sup>	5·10 <sup>15</sup>	8·10 <sup>14</sup>	650	500	530
Ge:B პოლიკრ.	3·10 <sup>17</sup>	7·10 <sup>17</sup>	1·10 <sup>17</sup>	350	260	330
Ge:B პოლიკრ.	1·10 <sup>18</sup>	6·10 <sup>18</sup>	1·10 <sup>18</sup>	140	90	120
Ge:B [111]	1·10 <sup>17</sup>	5·10 <sup>17</sup>	7·10 <sup>14</sup>	580	350	500
Ge:B [111]	3·10 <sup>18</sup>	7·10 <sup>18</sup>	1·10 <sup>18</sup>	310	170	270
Ge:B [100]	1·10 <sup>17</sup>	4·10 <sup>17</sup>	8·10 <sup>16</sup>	500	330	460
Ge:B [100]	3·10 <sup>17</sup>	5·10 <sup>18</sup>	1·10 <sup>18</sup>	160	90	145
p-Ge, [111]	6·10 <sup>14</sup>	5·10 <sup>15</sup>	1·10 <sup>15</sup>	1600	800	1150
p-Ge, [100]	6·10 <sup>14</sup>	3·10 <sup>15</sup>	1·10 <sup>15</sup>	1380	640	890

ბორით სუსტად ლეგირებული პოლიკრისტალური გერმანიუმის ელექტროფიზიკური მახასიათებლების ფორმირებაში მოსალოდნელია მარცვლების გამყოფი საზღვრების წვლილის გაზრდა. ეს გარემოება პირველ ყოვლისა ასახულია ხვრელების ძვრადობაზე. მისი მნიშვნელობების შემცირება განპირობებულია ხვრელების ინტენსიური გაბნევით დისლოკაციური აღნაგობის მარცვლების საზღვრებზე (ცხრ.1).

შესწავლილია ჩოხრალსკის მეთოდით [111] კრისტალოგრაფიული მიმართულებით მიღებული გერმანიუმის მასიური კრისტალების მიკროსისალე. არალეგირებული პოლიკრისტალური გერმანიუმი, სხვადასხვა ზომის მარცვლებს ზომებით 0,1-1 მმ, საწყის მდგომარეობაში ხასიათდება მიკროსისალის სიდიდით 660 კგ/მმ<sup>2</sup>. იმ შემთხვევაში როდესაც კრისტალის შემადგენელი მარცვლების ზომები მცირეა (0,05-0,1 მმ), მიკროსისალე უფრო მაღალია და აღწევს 700 კგ/მმ<sup>2</sup>.

როგორც მოსალოდნელია მონოკრისტალური გერმანიუმი მჭიდროდ წყობის (111) სიბრტყეებზე ხასიათდება მიკროსისალის მაღალი სიდიდეებით. დისლოკაციების სიმკვრივის  $3 \cdot 10^3$  სმ<sup>-2</sup>-ის პირობებში მიკროსისალის სიდიდე შესამჩნევად დაბალია უდებექტო მონოკრისტალური გერმანიუმისათვის დამახასიათებელ მნიშვნელობასთან შედარებით (800 კგ/მმ<sup>2</sup>). (100) ორიენტაციის მონოკრისტალური გერმანიუმის მიკროსისალის ცვლილებათა კანონზომიერებანი (111) ორიენტაციის ნიმუშების მიკროსისალის ცვლილების ანალოგიურია.

თერმული გაფართოების ექსპერიმენტული კვლევები შესრულდა 300–1100K ტემპერატურულ ინტერვალში. გამოკვლეულია მსხვილი ბლოკებისაგან შედგენილი სტრუქტურის გერმანიუმის მასიური კრისტალები. ექსპერიმენტული გაზომვები სრულდებოდა ვაკუუმში გახურებისა და გაცივების სიჩქარის რეგულირებით 1K/წთ–დან 5K/წთ–მდე დიაპაზონში. საცდელი ნიმუშის ფარდობითი წაგრძელების ტემპერატურული დამოკიდებულების გრაფიკზე გამოვლენილია

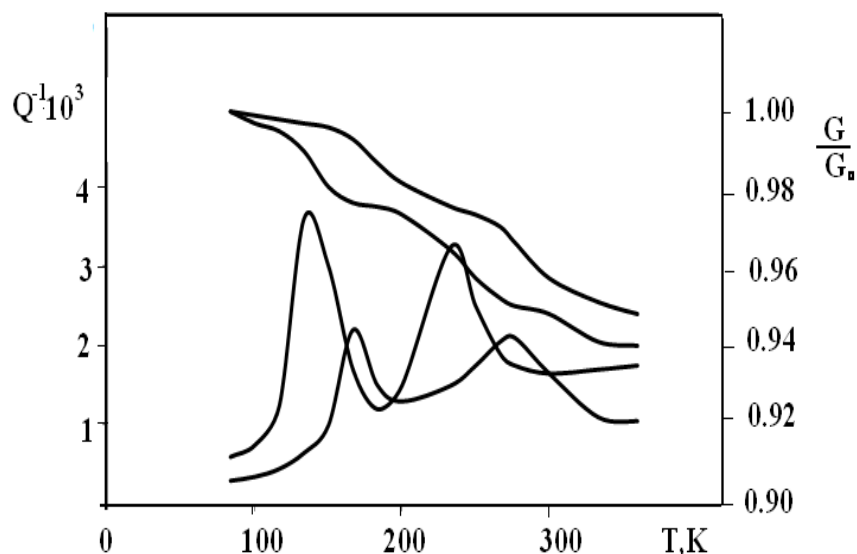
არამონოტონური ზრდის არეები 500–520 K, 770–800K და 900–940K ტემპერატურებზე.

მაღალი კონცენტრაციის ბორით ლეგირებული მსხვილმარცვლოვანი Ge:B-ის მასიური ნიმუშების ფარდობითი წაგრძელების ტემპერატურული დამოკიდებულების გრაფიკზე მკაფიოდ არის წარმოდგენილი მონოტონური ზრდიდან გადახრები ~400K, 530K, 570–600K, 800–900K ტემპერატურულ შუალედებში.

ექსპერიმენტებით დადგინდა, რომ თერმული გაფართოების არამონოტონურობა პრაქტიკულად დამოკიდებული არ არის კრისტალოგრაფიული ორიენტაციისაგან. იცვლება მხოლოდ ფარდობითი წაგრძელების სიდიდეები, რაც ასახულია თერმული გაფართოების კოეფიციენტების სიდიდეთა ცვლილებებში.

გერმანიუმის მასიური კრისტალების თერმული გაფართოების ტემპერატურული დამოკიდებულება ხასიათდება 300–1100K ტემპერატურულ დიაპაზონში სხვადასხვა ინტენსივობის ანომალიების სიმრავლით. მათგან მაღალი ინტენსივობით გამორჩეულია პროცესი 550–600K ინტერვალში. იგი დამოუკიდებელია გერმანიუმის სტრუქტურული მდგომარეობისაგან; სუსტად მცირდება მალეგირებელი ატომების კონცენტრაციის გაზრდით.

შესწავლილია ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული გერმანიუმის მასიური კრისტალების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიური მოდულის ტემპერატურული დამოკიდებულებები 77–300K ინტერვალში. გაზომვები შესრულებულია გრეხითი რხევების ამპლიტუდურ დეფორმაციაზე -  $5 \cdot 10^{-5}$ , გაცივება - გახურების სიჩქარით 2გრად/წთ. შინაგანი ხახუნის სპექტრში 150 და 250K ტემპერატურების მახლობლობაში გრეხითი რხევების 0,83ჯ. სიხშირეზე გამოვლენილია ორი მცირე ინტენსივობის მაქსიმუმი. გერმანიუმის მასიური კრისტალების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიური მოდულის ტემპერატურული სპექტრების მახასიათებლები დამოკიდებულია გრეხითი რხევების ამპლიტუდაზე (ნახ.1).



ნახ. 1. მონოკრისტალური Ge:B-ის შინაგანი ხახუნისა (1,2) და ძვრის მოდულის სპექტრები

1,1 - Ge:B ( $1 \cdot 10^{17}$  სმ<sup>-3</sup>),  $f_{300K} \cong 1,2$  ჰც;

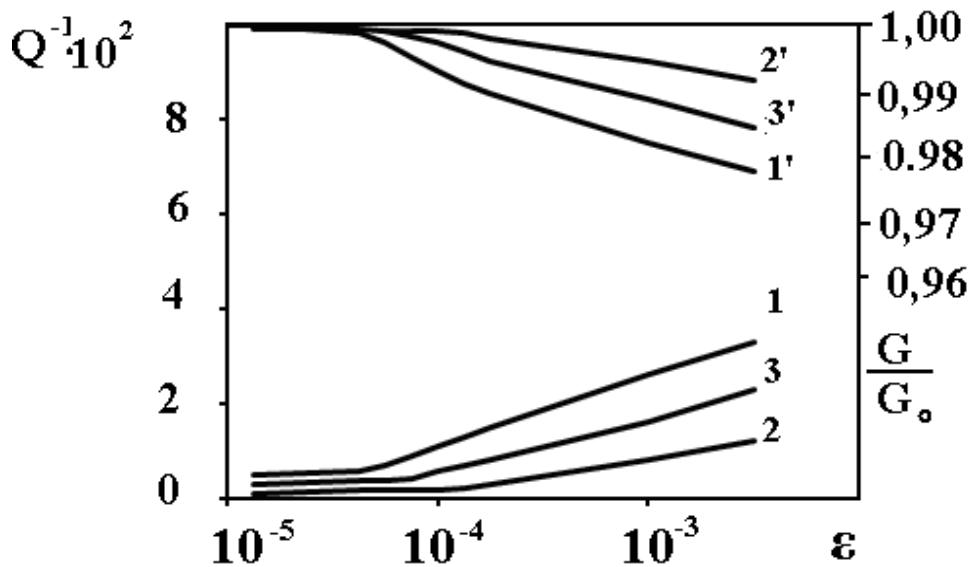
2,2 - Ge:B ( $5 \cdot 10^{19}$  სმ<sup>-3</sup>),  $f_{300K} \cong 0,9$  ჰც.

შესწავლილია ბორით ლეგირების გავლენა მონო- და პოლიკრისტალური გერმანიუმის მასიური ნიმუშების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები დინამიური დატვირთვის პირობებში.

ექსპერიმენტულად განსაზღვრულია არალეგირებული და სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიური პოლი და მონოკრისტალური ნიმუშების ძვრის მოდულის აბსოლუტური მნიშვნელობები. გერმანიუმის მონოკრისტალის ძვრის დინამიური მოდული ამჟღავნებს კრისტალოგრაფიული ორიენტაციისაგან შესამჩნევ დამოკიდებულებას. კერძოდ, მის მნიშვნელობები მაღალია [111] ორიენტაციის შემთხვევაში.

რხევითი ამპლიტუდური დეფორმაციის  $1 \cdot 10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-3}$  ინტერვალში ოთახის ტემპერატურაზე შესწავლილია სუფთა და ბორით ლეგირებული მონოკრისტალური გერმანიუმის შინაგანი ხახუნის  $Q^{-1}(\epsilon)$  და ძვრის ფარდობითი მოდულის  $G/G_0(\epsilon)$  ამპლიტუდური დამოკიდებულება. (ნახ.2).





ნახ.2. ბორით ლეგირებული მონოკრისტალური გერმანიუმის შინაგანი ხახუნისა (1,2,3) და ძვრის მოდულის(1',2',3') ამპლიტუდური დამოკიდებულება, T=300K.  
 1,1' \_ Ge,[111], 2,2' \_ Ge:B (1·10<sup>19</sup>სმ<sup>-3</sup>), [111], 3,3' \_ Ge:B (8·10<sup>19</sup>სმ<sup>-3</sup>), [111]

საკვლევი ნიმუშებისათვის დამახასიათებელია კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციის ერთადერთი მნიშვნელობა, რომელზედაც შინაგანი ხახუნის ინტენსივობა იწყებს მკვეთრად ამაღლებას, შესაბამისად ასევე მკვეთრად მცირდება ძვრის ფარდობითი მოდული ამპლიტუდური დეფორმაციის მაღალი მნიშვნელობების დიაპაზონში. ბორით სუსტად ლეგირება საგრძნობლად ზრდის ამპლიტუდური დეფორმაციის კრიტიკულ სიდიდეებს. ბორის მაღალი კონცენტრაციების შემთხვევაში კი, პირიქით კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციის სიდიდეები მცირდება, მაგრამ ისინი უფრო მაღალია არალეგირებულ მონოკრისტალურ გერმანიუმთან შედარებით.

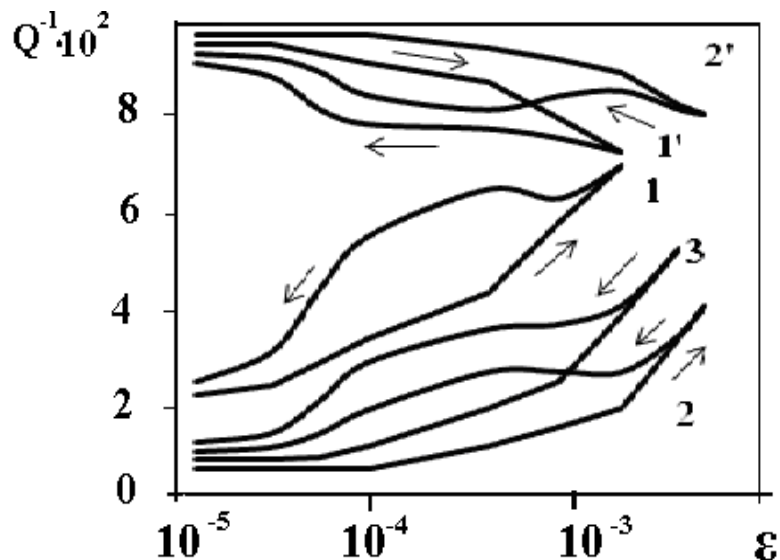
კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციისა და ძვრის მოდულის აბსოლუტური მნიშვნელობების ნამრავლით განისაზღვრა დრეკადობის ზღვრის სიდიდეები ძვრის დეფორმაციის პირობებში. მიღებული შედეგები წარმოდგენილია ცხრილში 2.

მონოკრისტალური გერმანიუმის დინამიური მექანიკური მახასიათებლები  
ცხრილი 2

საცდელი ნიმუშები	დენის მატარებლების კონცენტრაცია $\text{სმ}^{-3}$ [111]	ძვრის მოდული, $\text{კგ/მმ}^2$		ფარდობითი ამპლიტუდური დეფორმაცია		დრეკადობის ზღვარი, $\text{კგ/მმ}^2$	
		[111]	[100]	[111]	[100]	[111]	[100]
Ge	$5 \cdot 10^{15}$	3800	3600	$4 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	0,15	2,66
Ge:B	$1 \cdot 10^{16}$	4150	3950	$1 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	0,41	14,5
	$1 \cdot 10^{17}$	4100	3850	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,33	8,2
	$5 \cdot 10^{18}$	3900	3700	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,27	3,9

ექსპერიმენტებით ნაჩვენებია, რომ ბორით სუსტად ლეგირებული მონოკრისტალური გერმანიუმი ხასიათდება დრეკადობის ზღვრის მაღალი მნიშვნელობებით. მათთან შედარებით არალეგირებული და ბორით ძლიერად ლეგირებული მონოკრისტალური გერმანიუმის დრეკადობის ზღვრის მნიშვნელობები საგრძნობლად დაბალია.

820K ტემპერატურაზე  $Q^{-1}(\epsilon)$  და  $G/G_0(\epsilon)$  ფუნქციონალური დამოკიდებულებები ხასიათდებიან მრავალსტადიურობით. [111] კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის ნიმუშის შინაგანი ხახუნის სპექტრი ოთახის ტემპერატურაზე შედგენილია სამი, ერთმანეთისაგან განცალკევებული დიაპაზონით (ნახ.3).



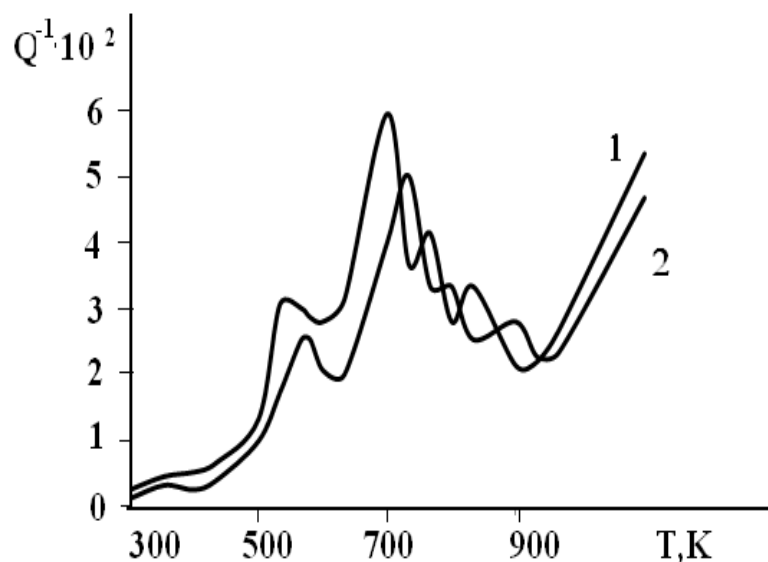
ნახ.3. მონოკრისტალური Ge:B ნიმუშების შინაგანი ხახუნისა  $Q^{-1}(\epsilon)$  (1,2,3) და ძვრის მოდულის  $G/G_0(\epsilon)$  (1',2') ამპლიტუდური დამოკიდებულება,  $T=820\text{K}$ .  
1,1' - Ge, [111], 2,2' - Ge:B ( $1 \cdot 10^{17} \text{სმ}^{-3}$ ), [111], 3 - Ge:B ( $5 \cdot 10^{18} \text{სმ}^{-3}$ ), [111].

ბორით ძლიერად ლეგირებული გერმანიუმის  $Q^{-1}(\varepsilon)$  დამოკიდებულება ასევე ორი კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციით ხასიათდება. მათი სიდიდეები მაღალია არალეგირებული გერმანიუმის ანალოგიურ მახასიათებლებთან შედარებით, მაგრამ ნაკლებია ბორით სუსტად ლეგირებული ნიმუშების ასეთივე მახასიათებლებზე.

მონოკრისტალური Ge:B საცდელი ნიმუშის გრებიტი რხევების 3,03კ სიხშირეზე შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრი ხასიათდება ინტენსიური მაქსიმუმებით 550, 700, 780 და 870K ტემპერატურებზე(ნახ.4).

რელაქსაციური პროცესები 700 და 780K ტემპერატურებზე ძლიერად დამოკიდებულია ამპლიტუდისაგან, რაც ადასტურებს დისლოკაციებისა და წერტილოვანი დეფექტების მონაწილეობას ენერჯის გაბნევის პროცესებში.

ლიტერატურული მონაცემებისა და მიღებული ექსპერიმენტული შედეგების შედარებით ანალიზით შესაძლებელია დაუშვათ, რომ რელაქსაციური მაქსიმუმები 550 და 780-800K ტემპერატურებზე განპირობებულია 60-გრადუსიანი კიდურ დისლოკაციებზე გეომეტრიული და წყვილი ღუნვების შექცევადი მოძრაობით გარეშე პერიოდული ძაბვის ზემოქმედებით.



ნახ.4 . მონოკრისტალური Ge:B ნიმუშების შინაგანი ხახუნის სპექტრები

1\_ Ge:B( $10^{17}$ სმ $^{-3}$ ), 2\_ Ge:B( $5 \cdot 10^{18}$ სმ $^{-3}$ ) ორიენტაცია[111].

ინტენსიური შინაგანი ხახუნის მაქსიმუმები 700 და 870K ტემპერატურებზე შესაძლებელია დაკავშირებულია გეომეტრიული და წყვილი ღუნვების მოძრაობასთან ხრახნული ორიენტაციის დისლოკაციებზე ნიშანცვლადი ძაბვის ველში. ექსპერიმენტული კვლევები ნათლად ავლენენ რელაქსაციური პროცესების განმსაზღვრელი დეფექტების მოძრაობის აქტივაციის ენერჯის სიდიდეებისა და დინამიური მექანიკური მახასიათებლების ზრდის ტენდენციას სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორით ლეგირებულ მონოკრისტალურ გერმანიუმში.

### დასკვნა

1. ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებულია არალეგირებული და სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიური კრისტალები.
2. შესწავლილია გერმანიუმის მასიური კრისტალების მიკროსტრუქტურა. მონოკრისტალური ნიმუშების (111) სიბრტყეებზე გამოვლენილია დისლოკაციების განაწილების კანონზომიერება და ნაჩვენებია, რომ ბორის კონცენტრაციის ამაღლებით იზრდება დისლოკაციების სიმკვრივე. მაღალტემპერატურული დეფორმაცია ღუნვაზე საცდელი მონოკრისტალური ნიმუშების სტრუქტურაში მკვეთრად ამაღლებს დისლოკაციების სიმკვრივეს. იწვევს ბლოკური სტრუქტურის ფორმირებას; ბლოკების შიდა სტრუქტურაში წარმოქმნილია ლარტყების ფორმის ორეულების დაჯგუფებები.
3. ჰოლის ეფექტის რეგისტრაციის მეთოდით შესწავლილია მასიური პოლი- და მონოკრისტალური სუფთა და ბორით ლეგირებული გერმანიუმის ნიმუშების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები. დადგენილია სტრუქტურული მდგომარეობის, ბორის კონცენტრაციის, მაღალტემპერატურული დეფორმაციისა და შემდგომი მოწვის გავლენით გერმანიუმის მასიური კრისტალების

ელექტროგამტარობის, დენის მატარებლების კონცენტრაციისა და ძვრადობის ცვლილებების კანონზომიერებანი.

4. განსაზღვრულია სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორით ლეგირებული გერმანიუმის მასიური კრისტალების მიკროსისალისა და ძვრის მოდულის მნიშვნელობები. გაანალიზებულია სტრუქტურული მდგომარეობის, კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის, მაღალტემპერატურული დეფორმაციისა და მოწვის გავლენა მიკროსისალისა და ძვრის მოდულის ცვლილებებზე.
5. 300–1000K ტემპერატურულ ინტერვალში გამოვლენილია გერმანიუმის მასიური კრისტალების არამონოტონური თერმული გაფართოება, გაანალიზებულია დისპერსულ ფაზებში, კომპლექსებსა და კოტრელის ატმოსფეროებში გარდაქმნების წვლილი ფარდობით წაგრძელებისა და ხაზოვანი თერმული გაფართოების არამონოტონურ ცვლილებებში.
6. გრეხითი რხევების ~13ც სიხშირეზე 150 და 250K ტემპერატურებზე გამოვლენილია დისლოკაციებისა და წერტილოვანი დეფექტების ურთიერთქმედებით განპირობებული ხასიგუტის ტიპის რელაქსაციური მაქსიმუმები და განსაზღვრულია პროცესების დამახასიათებელი აქტივაციის ენერჯისა და სიხშირის ფაქტორის მნიშვნელობები. გაანალიზებულია ბორით ლეგირების, მაღალტემპერატურული დეფორმაციისა და მოწვის წვლილი რელაქსაციური პროცესების მახასიათებლების ცვლილებებში.
7. 300-1000K ტემპერატურულ ინტერვალში და 0,5-5,03ც სიხშირულ დიაპაზონში შესწავლილია სტრუქტურული მდგომარეობის, ბორით ლეგირების, დეფორმაციისა და თერმული დამუშავების გავლენა რხევების მილევის რელაქსაციურ და ჰისტერეზისულ პროცესებზე. განსაზღვრულია პროცესებში მონაწილე დეფექტების მოძრაობის აქტივაციური მახასიათებლები.

8. ამპლიტუდური დეფორმაციის ფართო ინტერვალში გამოვლენილია ძვრის მოდულისა და რხევების მიღების მრავალსტადიური ცვლილებები და განსაზღვრულია კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციისა და დრეკადობის ზღვრის მნიშვნელობები.
9. მიღებული შედეგები შესაძლებელია გათვალისწინებული იქნას გერმანიუმის ფუძეზე ახალი ნახევარგამტარული სტრუქტურებისა და ხელსაწყოების შექმნის პრობლემების გადაწყვეტაში.

## Resume

Since the nineties of the last century germanium is one of the basic material in electronic technologies. Semiconducting properties of germanium is widely applied in electronic devices, solar energy converters and also in Ge-Si alloys of various characteristics. Lenses of night vision devices of infrared range are made on the basis of monocrystalline germanium, obtained by Czochralski method. Germanium is main semiconducting material for heterostructures of III-V materials.

Wide application of germanium is stipulated by its unique semiconducting properties. Among semiconductors, applied in practice, germanium is distinguished by high values of holes mobility ( $1900\text{cm}^2/\text{v}\cdot\text{sec}$ ).

Germanium has special characteristics for operations in high frequencies devices. Its low value of width of band gap ( $0.66\text{eV}$ ) gives opportunity to conduct operations by influence of low stresses, when correction and reduction of thermal noise to minimum is possible.

Studying of influence of crystalline lattice defects on optical properties is necessary for application of germanium for making infrared techniques elements. First of all, contribution of dislocations and boundaries of dislocation origin in formation of optical characteristics must be established. Analysis of intensity and distribution of internal stresses, existed in crystal volume is very important too.

At present, great results are obtained in field of technology and investigation of semiconducting materials, based on germanium, but unfortunately there are group of unsolved problems and unstudied tasks. In particular, inter-correlation dependences of dislocation structures and structural-sensitive physical-mechanical properties are not complexly investigated. Influence of interaction of axial and radial temperature gradients on dislocation and dislocation origin defects (blocks, twinings and grain boundaries, stacking faults) is not investigated complexly.

In the present work, investigation results of obtaining, real structure states, electrophysical characteristics, microhardness, thermal expansion and dynamical mechanical properties temperature dependences, relaxation and hysteretic processes of

absorption of oscillation energy of bulk crystals of undoped and boron –doped germanium have been presented.

Bulk crystals of pure and doped germanium by different concentration of boron have been obtained by Czochralski method along to [111] orientation. Profiled specimens with definite sizes have been prepared on the standard devices of mechanical polishing and cutting by diamond disk.

Microstructure of experimental specimen of poly- and monocrystalline germanium have been studied by optical microscope. Individual and groups of dislocations have been revealed in the structure of monocrystalline specimens. Dislocation density has been estimated.

Electrophysical characteristics of experimental specimens at room temperature by Hall Effect have been established. Their values have been estimated according to structural state. Increase of concentration of current carriers- holes in deformed state has been shown.

Influence of structural state, crystallographic orientation, boron doping, hightemperature deformation and annealing in deformed state on microhardness of Ge bulk crystals have been studied. It has been experimentally studied, that doping by boron with low concentration, causes increase of values of microhardness. Its maximum value is revealed on planes of (111) orientation of Ge:B ( $\sim 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ) monocrystal, when dislocation density does not exceed  $10^3\text{cm}^{-2}$

Thermal expansion of the bulk crystals of germanium have been studied by capacity sensor dilatometer in a wide temperature interval from the room temperature upto 1100K. Nonmonotony of thermal expansion has been revealed on temperature dependence of relative elongation in the temperature interval of 500-900K. Increasing effects of nonmonotony of relative elongation has been distinctly revealed in monocrystalline specimens. Deviations of linear regularities of thermal expansion have been revealed on [111] crystallographic orientation in undoped monocrystals and on [100] orientation with less intensity. It has been established, that anomalies of thermal expansion are clearly revealed on 3K/min. velocity of temperature changing. Intensity of effect reduced to zero at high or low velocities of heating.

Relaxation internal friction two maxima and shear modulus defect have been revealed in the range of low temperatures, in areas of 150 and 250K. Activation characteristics (activation energy, frequency factor, intensity, broadening of maxima) of relaxation internal friction processes have been determined and regularities of their changes by the influence of boron doping have been established. It has been shown, that boron doping causes increase of activation characteristics of both relaxation processes. Hightemperature deformation causes increase of intensity of the processes and decrease of activation characteristics. Annealing at 1070K, for 10hrs, reveals tendency to increase of activation characteristics of relaxation processes.

It has been experimentally established, that intensity of both relaxation processes increases by increasing of strain amplitude, that confirms their dislocation origin. According to obtained result, activation energy values of relaxation processes are equal to

the energy values of interaction of dislocation–point defects, at critical strain amplitude. Microscopic mechanisms of low-temperature relaxation processes are presented on the basis of obtained result: breakaway of oscillating segment/kink of dislocations from impurity atom(150K) and point defects from simple complexes (250K) by influence of mechanical periodical stress.

Relaxation and hysteretic processes of oscillation energy dissipation have been revealed in 300-1100K temperature interval. Activation characteristics of relaxation processes have been determined. It has been established, that temperatures of hysteretic internal friction processes coincides with temperature intervals of nonmonotonic increasing of thermal expansion.

Increase of dislocation origin defects mobility has been revealed in the bulk crystals of heavily boron doped germanium, that is confirmed by decreasing of activation characteristics of dislocation relaxation processes, critical strain amplitude of dislocation and pinning points interaction, absolute value of shear modulus and elasticity limit.

Intercorrelation dependences of characteristics of structural state, structural-sensitive thermal, mechanical and relaxation processes in bulk crystals of boron- doped germanium have been analyzed. Microscopic mechanisms of relaxation processes of torsion oscillations energy dissipation have been presented. Contribution of processes of generation and motion of geometrical and kink pairs on the screw and 60-dislocations, and also their interaction with Cottrell atmospheres, in formation of elasticity and plasticity of monocrystalline germanium have been analyzed.

Established regularities of changes of structural-sensitive characteristics of boron- doped germanium bulk crystals can be used for obtaining and investigation semiconducting materials and devices, based on germanium.

### დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში:

1. Бокучава Г.В., Дарсавелидзе Г.Ш., Гулдамашвили А.И., Чубинидзе Г.Г.,  
Курашвили И.Р., Широков Б.М. Влияние высокотемпературного  
отжига на электрофизические и механические характеристики  
монокристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x \leq 0,03$ ). Труды XIX международной  
конференции по физике радиационных явлений и радиационному  
материаловедению. Алушта, Крым, 5-9 сентября, 2010г. с.327-328.
2. Darsavelidze G., Darchiashvili M., Chubinidze G., Kurashvili I., Sanaia E.,  
Gabrichidze L., Tabatadze I. “Peculiarities of internal friction of metallic  
ceramic  $\text{Si}_{0,85}\text{Ge}_{0,15} : \text{P}$  alloys”. Bulletin of the Georgian Academy of sciences,  
vol.4,Nº1, 2010, p.82-84.



3. Арчуадзе Г.Н., Чубинидзе Г.Г., Сичинава А.В., Билисейшвили М.Д., Курашвили И.Р.. Термическое расширение и неупругие свойства монокристаллов  $Ge_{1-x}Si_x$  ( $x \leq 0,02$ ). 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-მექანიკური თვისებებზე. სტუ.საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის “გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები” თეზისების კრებული, თბილისი, გამომცემლობა “ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 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-მექანიკური თვისებებზე. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის მოხსენებათა კრებული “გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები”. თბილისი, გამომცემლობა “ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2011, გვ.12-14.
6. ჩუბინიძე გ., ქადარია მ., ყურაშვილი ი., კუჭუხიძე თ., ბილისიეშვილი მ. რელაქსაციური პროცესები ბორით ლეგირებულ პოლიკრისტალურ გერმანიუმში. საქართველოს ქიმიური ჟურნალი. 2011, 11, №4, გვ.419-422.
7. G. Archuadze, G. Chubinidze, I.Kurashvili, G. Bokuchava, G.Darsavelidze. Inelastic characteristics of monocrystalline Ge-Si alloys. Georgian International Journal of Science and Technology. vol.3, #4. 2011. p.365-369.
8. ჩუბინიძე გ., ყურაშვილი ი., ჩაჩხიანი ზ., ბიბილური მ. ბორით ლეგირებისა და თერმული დამუშავების გავლენა მონოკრისტალური გერმანიუმის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, განათლება, 2012. №2(5), გვ.293-297.

9. Chubinidze G., Kurashvili I., Bokuchava G., Chachkhianai Z. , Darsavelidze G. Dynamical mechanical properties of boron-doped monocrystalline germanium. Bulletin of the Georgian Academy of sciences, vol.6,№2, 2012, p.89-93.
10. Чубинидзе Г.Г., Курашвили И.Р., Дарчиашвили М.Д., Чачхиани З.Б., Дарсавелидзе Г.Ш. Физико-механические свойства монокристаллического Ge:B. Труды 15-ого международного симпозиума. “Упорядочение в минералах и сплавах”. Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2012, с.278-282.
11. Дарсавелидзе Г.Ш., Бокучава Г.В., Чубинидзе Г.Г., Арчуадзе Г.Н., Курашвили И.Р., Широков Б.М. Динамические механические характеристики монокристаллов системы Si-Ge. Труды XX международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. Алушта, Крым, 10-15 сентября, 2012г. с.279-280.
12. ჩუბინიძე გ., ყურაშვილი ი., ტაბატაძე ი., ბილისიეიშვილი მ. დაბალტემპერატურული რელაქსაციური პროცესები გერმანიუმის მასიურ კრისტალებში. საქართველოს ქიმიური ჟურნალი, 2013,ტ.13, №1. გვ.47–51.