

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

დავით ხომასურიძე

**A³B⁵ ტიპის ნახევარგამტარული მასალების რადიაციული
თვისებების შესწავლა**

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 ფაკულტეტის, ფიზიკის
დეპარტამენტის, მიკროელექტრონიკისა და ნახევარგამტარული
ხელსაწყოების მიმართულებაზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: სრული პროფესორი ნოდარ კეკელიძე

რეცენზენტები: სრული პროფესორი ნუგზარ დოლიძე
ასისტენტ პროფესორი თამარ ჭელიძე

დაცვა შედგება 2012 წლის "4" ივნისს, ----- 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 ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

თემის აქტუალობა: ნახევარგამტარების ფიზიკური და ქიმიური თვისებები უკიდურესად მგრძნობიარეა მათში არსებული დეფექტებისა და მინარევების მიმართ. მეტიც, პრაქტიკულად ყველა ის უნიკალური თვისება, რომელთა მეშვეობითაც ნახევარგამტარული მასალები და ხელსაწყოები გახდა თანამედროვე მეცნიერების, ტექნიკის, ტექნოლოგიების, ინფორმატიკის, მართვის სისტემების და სხვათა წამყვან ძალად, სწორედ მინარევების წყალობითაა შექმნილი.

თავის მხრივ, ნახევარგამტარებში დეფექტები პრაქტიკულად იგივე როლს თამაშობენ, რასაც მინარევები. უპირველეს ყოვლისა დეფექტები განაპირობებენ ნახევარგამტარული მასალების კრისტალების ხარისხს, ანუ მათი ელექტრონიკაში გამოყენების შესაძლებლობებს. ამავე დროს დეფექტების საშუალებით ისევე, როგორც მინარევების გამოყენებით შესაძლებელია მიზანმიმართულად ვცვალოთ ნახევარგამტარული მასალების თვისებები.

A^3B^5 ტიპის მასალები წარმოადგენენ უმნიშვნელოვანეს თანამედროვე ნახევარგამტარულ შენაერთებს, რომლებიც მტკიცედ მკვიდრდებიან ოპტოელექტრონიკასა და მიკროელექტრონიკაში. მკაფიოდ გამოიკვეთა მათი გამოყენების პერსპექტივები ნანოტექნოლოგიების მიმართულებითაც. ამ ნივთიერებების ბაზაზე იქმნება მაღალი ეფექტურობის მქონე ფოტოელემენტები, ლაზერები, არაკოჰერენტული სისტემები, მიმღებები, გამომსხვიებლები, მაღალი სიხშირის გენერატორები ე.წ. განის დიოდები, მრავალი ტიპის გადამწოდები, დეტექტორები და სხვა. ყოველივე ეს განპირობებულია იმით, რომ აღნიშნულ ნივთიერებებს გააჩნიათ მრავალი უნიკალური თვისება. მათ გააჩნიათ „პირდაპირი“ ენერგეტიკული ზონები, და ხასიათდებიან ელექტრონების ძვრადობის მაღალი მაჩვენებლებით. ამასთანავე, მაგალითად InAs-ს აქვს უფრო ფართო აკრძალული ენერგეტიკული ზონა ($E_g=0.36$ ევ), რის გამოც მისი გამოყენების სფერო ინდიუმის ანთიმონიდთან შედარებით გაცილებით უფრო ფართოა.

თავის მხრივ, დღეისათვის InP-ს ბაზაზე დამზადებული ფოტოელექტრული გარდამქმნელი წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტის მქონე ოპტოელექტრონულ ხელსაწყოს. განსაკუთრებით დიდია მისი კოსმოსურ მოწყობილობებში ფართოდ გამოყენების პერსპექტივები.

ოპტო და მიკრო ელექტრონიკის ძალიან სწრაფი განვითარების გამო წარმოიშვა აუცილებლობა ისეთი ნივთიერებების შექმნისა, რომლებიც საშუალებას მოგვცემენ თითქმის უწყვეტად ვცვალოთ მასალების ძირითადი პარამეტრები, მაგალითად მათი ენერგეტიკული ღრეფოს სიდიდე და შესაბამისად დავამზადოთ სხვადასხვა ტალღის სიგრძის მქონე ლაზერები, მიმღები ან გამომსხივებელი. ასეთი პროცედურის განხორციელების საშუალებას იძლევა მყარი ხსნარები.

ნახევარგამტარული მასალების რადიაციული თვისებების შესწავლა ფრიად აქტუალურია მათი ისეთ ექსტრემალურ პირობებში გამოსაყენებლად, როგორცაა: კოსმოსი, ატომური ელექტროსადგურები, რეაქტორები, ამაჩქარებლები და რადიაციულად დაბინძურებული ტერიტორიები. ბოლო პერიოდში განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი გახდა ისეთი პროცესების შესწავლა, როცა ნახევარგამტარში ჩნდება დიდი ზომისა და დიდი რაოდენობის დეფექტები. ასეთი მოვლენები ვითარდება ნახევარგამტარებში საპლანეტათაშორისო გაფრენების დროს, აგრეთვე თანამგზავრების ორბიტაზე ყოფნის გრძელვადიან პერიოდში, მზეზე აფეთქებების კვლევისას და სხვა. განსაკუთრებით რთული ამოცანები გაჩნდა ჩერნობილისა და ფუკუშიმოს კატასტროფებთან დაკავშირებით.

ნაშრომის მიზანი: სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს დიდი ზომის დეფექტების ფიზიკური ბუნების გამოკვლევა InP-ში ,InAs-ში და მათ ზოგიერთ მყარ ხსნარებში, მათ შორის: ჩქარი ნეიტრონების დიდი ნაკადებით $\Phi=2 \cdot 10^{18} \text{ნ/სმ}^2$ და მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით (50მეგ) დასხივებულ კრისტალებში დენის მატარებელთა გაბნევის მექანიზმების გამოკვლევა დიდი ზომის და დიდი რაოდენობის

დეფექტებზე, წერტილოვანი ტიპის დეფექტებზე, იონებზე, ნეიტრალურ ატომებზე, მესრის არაერთგვაროვნებებზე, და კრისტალური მესრის რხევებზე; ტექნოლოგიური წარმოშობის დეფექტების შესწავლა; დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ საკვლევ ნივთიერებებში რადიაციული დეფექტების ენერგეტიკული დონეების განსაზღვრა; დენის მატარებელთა კონცენტრაციების ცვლილებათა კანონზომიერების დადგენა; დეფექტების გამოწვის პროცესების შესწავლა.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები: ნაშრომში შესწავლილია ინდიუმის არსენიდის, ინდიუმის ფოსფიდის და ინდიუმის არსენიდით და ინდიუმის ფოსფიდით მდიდარ InAs-InP-ს მყარი ხსნარების ელექტრული თვისებები, მათი მაღალენერგეტიკული ნაწილაკებით დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე: ნაშრომში პირველადაა ნაჩვენები, რომ ოპტოელექტრონიკისა და მიკროელექტრონიკისათვის ფრიად მნიშვნელოვანი შენაერთის - ინდიუმის ფოსფიდის ხარისხი (რომელიც შეიცავდა დიდი ზომის დეფექტებს), ხისტი დასხივების შედეგად კი არ ეცემა, არამედ უმჯობესდება. კერძოდ ნაჩვენებია, რომ ნახევარგამტარის ხარისხის ერთ-ერთი ძირითადი მაჩვენებელი პარამეტრი - დენის მატარებელთა ძვრადობა, დასხივების შემდეგ იზრდება 100%-ით.

ინდიუმის ფოსფიდის კრისტალებში პირველად იქნა გარკვეული დიდი ზომის ტექნოლოგიური დეფექტების ფიზიკური ბუნება, ჩატარდა რაოდენობრივი თეორიული ანალიზი და განსაზღვრულ იქნა დენის მატარებელთა გამბნევი დეფექტების ძირითადი პარამეტრები, რაც მნიშვნელოვანია არსებული რთული თეორიის შემდგომი სრულყოფისთვის.

საკვლევ ნიმუშებში განისაზღვრა დიდი ზომის რადიაციულ დეფექტებზე, წერტილოვანი ტიპის დეფექტებზე, მინარევებზე და კრისტალური მესრის რხევებზე დენის მატარებელთა გაბნევის მექანიზმები.

პირველად იქნა ნაჩვენები, რომ ნეიტრალურ მინარევებზე გაბნევის საყოველთაოდ აღიარებული ერგინსოს თეორია არ რეალიზდება InP-ს კრისტალებში. დენის მატარებელთა ძვრადობის რაოდენობრივი ანალიზისათვის საჭიროა გავითვალისწინოთ გაბნევა ნეიტრალური მინარევების არაერთგვაროვან განაწილებაზე.

შედეგების გამოყენების სფერო: ნაშრომს გააჩნია სერიოზული პრაქტიკული ღირებულება ვინაიდან:

1. ნაშრომში შემოთავაზებულია ინდიუმის ფოსფიდის კრისტალების ხარისხის გაუმჯობესების ეფექტური ხერხი;

2. შრომაში მიღებული შედეგები შესაძლოა წარმატებით იქნას გამოყენებული ოპტოელექტრონული და მიკროელექტრონული ხელსაწყოების შექმნის სფეროში;

3. სადისერტაციო თემაში განხორციელებული რადიაციული პროცესების ანალიზი და შესაბამისი დასკვნები ფრიად ნაყოფიერი იქნება რადიაციულად მდგრადი მასალების მისაღებად, რომლებიც აუცილებელია ისეთ ექსტრემალურ პირობებში გამოყენებისათვის როგორცაა: კოსმოსი, ატომური ელექტროსადგურები, ბირთული რეაქტორები, ამაჩქარებლები და რადიოაქტიურად ძლიერად დაბინძურებული არეები, მათ შორის ჩერნობილი და ფუკუშიმო.

დისერტაცია შედგება შესავალისაგან, 6 თავისაგან, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 137 გვერდს, ნახაზების რაოდენობა-54, ცხრილების რაოდენობა-7, გამოყენებული ლიტერატურული წყარო-126.

დისერტაციის პირველ თავში განხილულია InAs და InP-ს, ენერგეტიკული სტრუქტურა, ელექტრული თვისებების თავისებურებანი, დენის მატარებელთა გაბნევის მექანიზმები, დასხივების გავლენა ელექტრულ თვისებებზე, დენის მატარებელთა გაბნევა სხვადასხვა ტიპის მოუწესრიგებელი უბნების მქონე ნახევარგამტარებში.

ლიტერატურაში შესწავლილია InAs-ში და InP-ში დენის მატარებელთა გაბნევის ძირითადი მექანიზმები, მაგრამ მათი წვლილის შესახებ ურთიერთგამომრიცხავი მონაცემებია. არ არსებობს მონაცემები დიდი ზომის დეფექტებზე და ნეიტრალურ მინარევებზე გაბნევის შესახებ.

InAs და InP გამოყენების არეალის გასაფართოებლად საჭიროა მათი მყარი ხსნარების შესწავლა. მწირი მონაცემები არსებობს InAs-ის და InP-ს თვისებებზე მეორე კომპონენტის მცირე დანამატით. არ არსებობს მონაცემები ტექნოლოგიური წარმოშობის მოუწესრიგებელი უბნების მქონე III-V ტიპის კრისტალების თვისებების შესახებ.

მეორე თავში. InAs და InP მიეკუთვნება ნაერთებს დნობის ტემპერატურაზე მნიშვნელოვანი წნევით. ამიტომ ექსპერიმენტული ნიმუშები ძირითადად მიღებული იყო ჰორიზონტალური ზონური დნობის მეთოდით. გამოყენებული იქნა აგრეთვე კრისტალების ამოწვევის ჩოხრალსკის მეთოდი. მიღებული იყო ბინარული ნაერთების InAs-ის და InP-ს, InAs-ით და InP-ით მდიდარი InAs-InP-ის მყარი ხსნარების არალეგირილებული და ლეგირებული მონოკრისტალები. მინარევების კონცენტრაცია იცვლებოდა 10^{16} - 10^{19} სმ⁻³ ინტერვალში. შესწავლილი იქნა ელექტრული თვისებები. განხორციელდა ჰოლის კოეფიციენტის და კუთრი ელექტროგამტარობის გაზომვები და დენის მატარებელთა ძვრადობის განსაზღვრა.

გაზომვისთვის მომზადებულ ნიმუშებზე დაიტანებოდა დენის და პოტენციალის კონტაქტები. II-ტიპის ნიმუშებისთვის გამოყენებული იყო ინდიუმის და ტელურის შენადნობი.

ნიმუშების შემადგენლობა და ერთგვაროვნება განისაზღვრებოდა ქიმიური ანალიზით და მიკრო რენტგენულ-სპექტრალური ანალიზით MAP მიკროანალიზატორზე, ჰოლის ეფექტის გაზომვებით, რენტგენოსტრუქტურული ანალიზით და ელექტროგამტარობის ზონდური მეთოდის გაზომვებით. კრისტალის შემოწმებამ გვიჩვენა, რომ ნიმუშებში არ არსებობდა ლოკალური არაერთგვაროვნებით გამოწვეული

ამოვარდნები. საკვლევი ნიმუშები იყო ერთგვაროვანი, კომპონენტების თანაბარი განაწილებით.

ექსპერიმენტების ყველაზე რთულ ნაწილს წარმოადგენდა დაბალტემპერატურული გაზომვები, კერძოდ, ელექტროგამტარებლობისა და ჰოლის კოეფიციენტის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების განსაზღვრა. გაზომვები ტარდებოდა დანადგარზე, რომელიც საშუალებას იძლევა ჩატარდეს ექსპერიმენტები ძალიან ფართო ტემპერატურულ ინტერვალში 4.2-300K.

ცხადია, დაბალტემპერატურული გაზომვების დროს ძალზე მნიშვნელოვანია ტემპერატურის გაზომვა დიდი სიზუსტით. ჩვენ ვსარგებლობდით ორი ტიპის თერმომეტრით: სპილენძ-კონსტანტანის თერმოწყვილით და ნახშირის წინააღმდეგობით. თხევადი ჰელიუმის სიძვირის გამო ექსპერიმენტების ძირითადი ნაწილი ჩატარებულ იქნა მეორე-დაბალტემპერატურულ გაზომვების დანადგარზე. ის განკუთვნილი იყო 78-300K ინტერვალში გაზომვებისთვის, განსაკუთრებით, იმ ნიმუშებისთვის, რომლებსაც გააჩნდათ დენის მატარებელთა დიდი კონცენტრაცია.

შესაძლებელი ცდომილების გაზომვების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ საშუალო კვადრატული ცდომილება 8-10%-ის ფარგლებშია ჰოლის კოეფიციენტისთვის, ხოლო ელექტროგამტარობისთვის არ აღემატება 4-5%. დენის მატარებელთა კონცენტრაციის და ძვრადობის განსაზღვრისას მაქსიმალური ცდომილება შეადგენს $\pm 10\%$.

გამოსაკვლევი ნიმუშები დასხივებული იქნა რეაქტორის ვერტიკალურ არხებში $T=70^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე ერთი კვირის განმავლობაში. სწრაფი ნეიტრონების მაქსიმალური ინტეგრალური ნაკადი იყო $2 \cdot 10^{18}$ ნ/სმ². ზოგი კრისტალი დასხივებული იქნა ელექტრონების 50 მეგ ენერგიით და $5 \cdot 10^{17}$ ე/სმ² ნაკადით.

ნიმუშების ელექტრო პარამეტრების გაზომვები შესრულდა დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ. ინდუქცირებული რადიოაქტივობის

შესუსტების გათვალისწინებით. დასხივებული კრისტალების იზოქრონული გამოწვა შესრულდა თერმოდამუშავების ჩასატარებელ დანადგარზე 200-700°C ტემპერატურის ფარგლებში.

მესამე თავში წარმოდგენილია ელექტროგამტარობის, ჰოლის ეფექტის და დენის მატარებელთა ძვრადობის გაზომვის შედეგები InAs-ს და InP-ს ექსპერიმენტულ ნიმუშებში. დენის მატარებელთა კონცენტრაცია იყო 10^{16} – 10^{18} სმ⁻³, 4.2–300K ტემპერატურის ფარგლებში. ჰოლ–ფაქტორი განისაზღვრებოდა ძვრადობისა და ჰოლის კოეფიციენტის დამოკიდებულებით მაგნიტური ველის დამაბულობაზე.

დენის მატარებელთა მაღალი ძვრადობა InAs და InP–თვის და ძლიერი მაგნიტური ველის გამოყენება გვაახლოებს იმ პირობებს, როცა $A=1$ და არ არის დამოკიდებული გაბნევის მექანიზმზე. მიღებულია, რომ ოთახის ტემპერატურაზე III–V ნაერთებისთვის $A=1$.

ინდიუმის არსენიდი. დენის მატარებელთა კონცენტრაცია, პრაქტიკულად არ იცვლება ტემპერატურის ზრდასთან 4.2–300K ინტერვალში ნიმუშის გადაგვარების გამო. დენის მატარებელთა ძვრადობის თეორიული გათვლა ჩატარებული იყო სამი ძირითადი გაბნევის მექანიზმის გათვალისწინებით: გაბნევა სითბურ და ოპტიკურ რხევებზე და იონიზებულ მინარევებზე. ექსპერიმენტმა და ძვრადობის თეორიულმა გათვლებმა გვიჩვენა, რომ 100–300K ინტერვალში ჭარბობს გაბნევა მესერის ოპტიკურ რხევებზე, მისი წვლილი მცირდება ტემპერატურის ზრდასთან ერთად, ხოლო გაბნევა მინარევის იონებზე მცირეა და იწყებს დომინირებას მხოლოდ უფრო დაბალ ტემპერატურებზე. 4.2K უბანში, ელექტრონული გაზი გადაგვარებულია და ძვრადობა არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე.

ინდიუმის ფოსფიდი. ნეიტრალურ მინარევებზე მუხტის მატარებელთა გაბნევის საკითხებში მხოლოდ ერგინსოის სამუშაომ [1] მიიღო მრავალმხრივი აღიარება ყველა გამოყენებულ მიდგომებს შორის [1-5]. მაგრამ დაფიქსირებულია სხვაობა არა რამდენიმე პროცენტით, არამედ

რამდენიმე რიგით, ექსპერიმენტულ მონაცემებსა [6-8] და თეორიას შორის[1].

გაბნევა ნეიტრალურ მინარევებზე სხვა მექანიზმებთან შედარებით შეიძლება იყოს მნიშვნელოვანი მხოლოდ დაბალ ტემპერატურებზე. როგორც წესი, ამ დროს გამტარობის ელექტრონების ენერგია მნიშვნელოვნად ნაკლებია ნეიტრალური მინარევის ატომის იონიზაციის ენერგიაზე (ნელი ელექტრონების შემთხვევა). მაგრამ მინარევის ატომის სიახლოვეს ელექტრონის ველის კონფიგურაციის ზუსტი მონაცემები არ არსებობს. ამიტომ ნეიტრალურ მინარევებზე დენის მატარებელთა გაბნევის თეორიის ამოცანა ბევრად უფრო რთულია და მიღებული შედეგები ნაკლებ ზუსტია, ვიდრე იონიზებული მინარევების ცენტრებზე გაბნევისას. ეს საკითხი განსაკუთრებულად მნიშვნელოვანია InP-სთვის დიელექტრიკული მუდმივას დიდი მნიშვნელობის გამო. 10^{16} – 10^{17} cm^{-3} მინარევის შემცველი InP-ს კრისტალებში ჩვენს მიერ 4.2–300K ინტერვალში ექსპერიმენტულად განსაზღვრული მუხტის ძვრადობის შედარებამ თეორიულად გათვლილ ძვრადობასთან გვიჩვენა, რომ როცა $T > 250\text{K}$ ჭარბობს გაბნევა ოპტიკურ ფონონებზე. ნეიტრალური დონორების კონცენტრაცია 300K ტემპერატურის მახლობლად არის ძალიან დაბალი. როცა $T < 250\text{K}$ და მცირდება 77K-მდე ჭარბობს გაბნევა დამუხტულ დონორებზე. $\mu(T)$ -ს დამოკიდებულება განისაზღვრება იონიზებული და ნეიტრალური ატომების რაოდენობებს შორის თანაფარდობით და ელექტრონების საშუალო ენერგიით. ტემპერატურულ არეში $T < 77\text{K}$, სადაც იონიზებული მინარევები ნეიტრალური ხდებიან დენის მატარებელთა „გაყინვის“ გამო, დომინირებს გაბნევა ნეიტრალურ დონორებზე. ტემპერატურულ არეში $T < 30\text{K}$ გაბნევა განისაზღვრება ნეიტრალური მინარევებით.

InP-ს კრისტალში ექსპერიმენტულად განსაზღვრული მუხტის ძვრადობიდან μ_{exp} გამოყოფილი იყო ძვრადობის კომპონენტი, რომელიც

დაკავშირებულია ნეიტრალური მინარევების ატომებზე მუხტის გაბნევასთან (μ_n) და შედარებულია თეორიულ ვარაუდთან [9].

დაბალ ტემპერატურებზე μ_i -ს წვლილი ძალიან მცირეა. ამიტომ დენის მატარებელთა გაბნევა ნეიტრალური მინარევების ატომებზე, $T < 77K$, შეიძლება იყოს ჭარბი. ნეიტრალური ცენტრები Nn ხდებიან დომინანტებად. ქვემოთ ჩვენ განვიხილავთ მხოლოდ დაბალ ტემპერატურებს $T < 30K$ და არ მივიღებთ მხედველობაში გათვლებისას ფონონურ გაბნევას და იონებზე გაბნევას. ჩვენ შეგვიძლია ვივარაუდოთ რომ $\mu_{exp} \approx \mu_n$ ამ ტემპერატურულ არეში.

ერგინსოსის მოდელი და შესაბამისად გათვლები გვაძლევენ ძალიან შემცირებულ მნიშვნელობებს ძვრადობისთვის და არ შეიძლება გამოყენებულ იქნას ჩვენი ექსპერიმენტების ინტერპრეტაციისთვის, როგორც ეს იყო [6-8]-ნაშრომებში. ამიტომ, μ_n გათვლებისთვის ჩვენ გამოვიყენეთ სკლარის [2] მოდელი:

$$\mu_N = \frac{1,17 \cdot 10^{22}}{N_n \epsilon_0} \left(\frac{m^*}{m_0} \right) \left[0,734 \cdot 10^{-2} \frac{\epsilon_0 T^{1/2}}{\left(\frac{m^*}{m_0} \right)} + 30,2 \frac{\left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{1/2}}{\epsilon_0 T^{1/2}} \right] \quad (1)$$

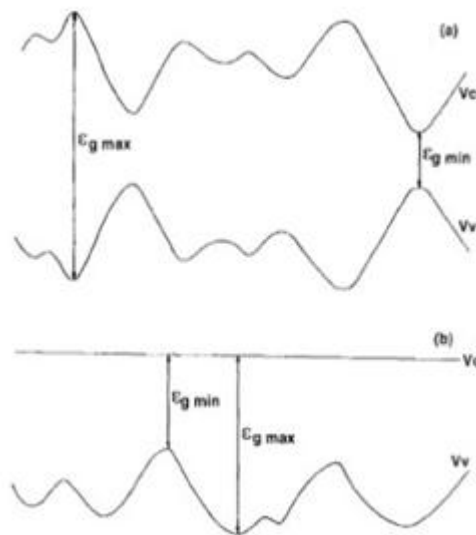
თუ დავუშვებთ, რომ $\mu_{exp} = \mu_n$ 4.2K ტემპერატურაზე [2] მოდელის შესაბამისად, გამომდინარეობს, $Nn \sim 1.10^{17} \text{cm}^{-3}$, მაგრამ [2] თეორიასთან შედარება გვიჩვენებს სხვაობას თეორიასა და ექსპერიმენტს შორის. ექსპერიმენტის გადახრა მნიშვნელოვანია. იმისათვის რომ მივაღწიოთ ექსპერიმენტული ძვრადობის სრულ შეთანხმებას თეორიულთან, ბუნებრივია, ვივარაუდოთ მუხტის გაბნევის დამატებითი მექანიზმი, რომელიც გამოწვეულია მინარევის ნეიტრალური ატომების მოუწესრიგებელი განლაგებით.

თუ გვაქვს ნახევარგამტარული შენადნობი $A_c B_{1-c}$ c შემადგენლობის სივრცული შემთხვევითი ფლუქტუაციებით, ϵ_g სიდიდე აგრეთვე იცვლება, ასე რომ პოტენციალები, რომლებიც არეგულირებენ გამტარობას და

აკრძალული ზონების კიდევს, იქნება განსხვავებული, როგორც ამპლიტუდით, ისე ნიშნით.

მცირე მასშტაბიანი ფლუქტუაციები დაკავშირებული არიან მესერის კვანძებში ატომების სტატისტიკურ განაწილებასთან. ასეთ ფლუქტუაციებს აქვთ მცირე ამპლიტუდა და გავლენას ახდენენ ნახევარგამტარების თვისებებზე, მხოლოდ დაბალ ტემპერატურებზე.

არაერთგვაროვანი“ შენადნობის“ ზონური დიაგრამა ნაჩვენებია ნახ.1ა-ზე. ოღონდ შედარებით ვიწრო ზონის არაერთგვაროვნობის სიგრძით L , რომელიც გაცილებით ნაკლებია მაკრანირებელ სიგრძე L_s -ზე ნიმუშში. თუ $L > L_s$, დენის ძირითადი მატარებლების პოტენციალი ეკრანირდება და ზონური დიაგრამა გამოიყურება ნახ.1ბ-ს მსგავსად.



ნახ.1. ენერგეტიკული სტრუქტურის სქემა არაერთგვაროვან ნახევარგამტარულ შენადნობში მცირე მასშტაბის (a) და დიდი მასშტაბის (b) შემადგენლობის ფლუქტუაციებით.

თუ არაერთგვაროვნობები დაკავშირებულია მესერის კვანძებში არაურთიერთქმედებიანი კომპონენტის სუფთა სტატისტიკურ განაწილებასთან, მაშინ არაერთგვაროვნობის ზომა და ამპლიტუდა Δ შეიძლება შევაფასოთ [10]:

$$\Delta \sim 10^{-2} \frac{\alpha^4 c^2 (1-c)^2 m^3}{\hbar^6 N^2} \quad (2)$$

სადაც $\alpha = d\chi/dc$, სადაც χ არის ელექტრონისადმი სწრაფვა და N მესერის კვანძების რიცხვი 1სმ^3 -ში. ასეთი ტიპის არაერთგვაროვნობა ანუ მოუწესრიგებელი გაბნევა პირველად დაფიქსირებული იყო SiGe ნახევარგამტარულ შენადნობებში [11]. მოუწესრიგებელი გაბნევის წვლილი ელექტრონების ძვრადობაში გამოძევიდა, აგრეთვე, რიგი III-V ტიპის ნაერთების მყარ ხსნარებში [12]. ამ მექანიზმის წვლილის გათვლები პირველად ჩაატარა ბრუქსმა [12]. ბრუქსის მიხედვით მოუწესრიგებელ შენადნობში შემადგენლობა იცვლება ერთი უბნიდან მეორემდე სტატისტიკური ფლუქტუაციის ხარჯზე. ეს იწვევს ენერგეტიკული ზონების დეფორმაციას, პიკებს და ჩავარდნებს ზონების კიდებზე. ეს მსგავსია დეფორმაციული პოტენციალისა მესრული ატომების სითბური რხევების გაბნევის თეორიაში. ბრუქსის გამოსახულებას ძვრადობისთვის აქვს შემდეგი სახე:

$$\mu_{dis} = \frac{(2\pi)^{1/2} e\hbar^u N_0}{3(m^*)^{5/2} (kt)^{1/2} c(1-c)(E_a - E_b)^2} \quad (3)$$

სადაც N_0 არის ატომების რიცხვი მოცულობის ერთეულში, c – არის შენადნობის ერთ–ერთი კომპონენტის შემადგენლობა, $E_a - E_b$ – ზონის კიდების ენერჯის პოზიციას A და B შენადნობის ორი კომპონენტისთვის. ასე, რომ „შენადნობის“ გაბნევა შეიძლება განხილულ იქნას როგორც „გაყინული“ გაბნევა მესერის სითბური რხევებით. „შენადნობის“ გაბნევის თავისებურებაა, ის, რომ დენის მატარებელთა მცირე კონცენტრაციისას „შენადნობის“ გაბნევის წვლილი ძვრადობაში იზრდება შენადნობის კომპონენტების შემცველობის გაზრდისას.

გაბნევის ეს მექანიზმი ძევიდა არამარტო SiGe-ის და III-V ნაერთების შენადნობებში, არამედ ნეიტრალური მინარეების შემთხვევაშიც [8]. ეს მექანიზმი მსგავსია Si-Ge-ში „შენადნობის“ გაბნევისას, ასე რომ ძვრადობა (μ_{dis}) დაკავშირებული გაბნევისთან ელექტრულად ნეიტრალური მინარეის ატომებზე „შენადნობის“ მოუწესრიგებლობაზე InP-ნაერთში შეიძლება წარმოდგენილ იქნას, როგორც

$$\frac{1}{\mu_{dis}} = \frac{1}{\mu_{exp}} - \frac{1}{\mu_n} \quad (4)$$

შესრულებული μ_{dis} გათვლები (4) ფორმულის თანახმად და შედარებული ბრუქსის μ_{dis} თეორიულ (3) გამოსახულებასთან გვიჩვენებს მოუწესრიგებელი გაბნევის არსებობას და ამტკიცებს ჩვენს ვარაუდს, რომ ექსპერიმენტულ ძვრადობას და თეორიას [11] შორის სხვაობა განისაზღვრება მუხტის გაბნევით მინარევის ნეიტრალური ატომების მოუწესრიგებელი განლაგების გამო. ამრიგად მცდელობა, რომ შემოვიტანოთ დამატებითი „შენადნობის“ გაბნევა 4.2–30K არეში აუმჯობესებს თეორიის დამთხვევას ძვრადობის ექსპერიმენტულ მონაცემებთან InP კრისტალებში [12].

მეოთხე თავში განხილულია ჩქარი ნეიტრონებით დასხივებული InAs-ით მდიდარი InAs-InP მყარი ხსნარების ელექტრული თვისებები. ჩატარებული სამუშაოს მიზანი იყო InAs-ით მდიდარი InAs-InP მყარი ხსნარების პარამეტრების კავშირის დადგენა დასხივებასთან. გამოვავლინოთ თუ რა როლს თამაშობს დასხივება მასალის საწყის მდგომარეობაზე. განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა დასხივებულ ნიმუშებში ფერმის დონის სტაბილიზაციას.

შესწავლილი იყო ჩქარი ნეიტრონებით ($\Phi=2 \cdot 10^{18}$ ნ/სმ²) დასხივებული InAs-ის და InAs-ით მდიდარი მყარი ხსნარების კრისტალები InP-ს 10 და 20 მოლ%-ის დამატებით InAs-ში. დენის მატარებელთა საწყისი კონცენტრაცია (n_0) საკვლევ ნიმუშებში იცვლებოდა $1,5 \cdot 10^{16}$ - $2,2 \cdot 10^{19}$ სმ⁻³ ინტერვალში.

დენის მატარებელთა კონცენტრაციის ტემპერატურული დამოკიდებულებები ინდიუმის არსენიდისთვის და ინდიუმის არსენიდით მდიდარი InAs-InP მყარი ხსნარებისთვის გვიჩვენებენ, რომ ყოველ ფიქსირებულ ტემპერატურაზე დენის მატარებელთა კონცენტრაცია მნიშვნელოვნად იზრდება ჩქარი ნეიტრონებით ($\Phi=2 \cdot 10^{18}$ ნ/სმ²) დასხივების შემდეგ. მაგრამ ტემპერატურის ზრდასთან ერთად n თითქმის არ იცვლება.

დენის მატარებელთა კონცენტრაციის ზრდა ფიქსირებულ ტემპერატურაზე სუსტდება დასხივების შემდეგ ფოსფორის შემადგენლობის გაზრდით. უკვე InP-ს 20მოლ% დანამატით კრისტალში დასხივებით გამოწვეული კონცენტრაციის ზრდა შედარებით სუსტად არის გამოვლენილი. დაფიქსირებული დენის მატარებელთა კონცენტრაცია იზრდება თითქმის ერთი რიგით. როცა ელექტრონების საწყისი კონცენტრაცია $n \geq 4 \cdot 10^{18} \text{ სმ}^{-3}$ დასხივებით გამოწვეული დენის მატარებელთა კონცენტრაციის ცვლილება უმნიშვნელოა. მიღებული კანონზომიერება აიხსნება დასხივების შედეგად წარმოქმნილი დონორული ტიპის სტრუქტურული დეფექტებით. ეს მოვლენა, გამოკვლეულ ნიმუშებში მიგვანიშნებს, რომ უპირატესობა აქვს იმ სტრუქტურული დეფექტების წარმოქმნას, რომლებსაც გააჩნიათ მცირე ენერგეტიკული დონეები აკრძალულ ზონაში და ვიღებთ მასალას გადაგვარებული ელექტრონების გაზით.

ფერმის დონის გამოთვლები ადასტურებენ, რომ საკვლევ ნიმუშებში დასხივება გადაადგილებს ფერმის დონეს გამტარებლობის ზონის არეში.

ჩქარი ნეიტრონებით დასხივებული იზოქრონული გამოწვა 200–700°C ტემპერატურულ ინტერვალში InAs-ით მდიდარ InAs-InP მყარ ხსნარებში გვიჩვენებს, რომ დენის მატარებელთა კონცენტრაციის აღდგენა ხდება 300–400°C ტემპერატურებზე.

ძვრადობის ცვლილება ინდიუმის არსენიდში დასხივების შემდეგ შეესაბამება დენის მატარებელთა ძვრადობის ცვლილებას. ძვრადობა მცირდება დასხივების შემდეგ მთელი გამოკვლეული ტემპერატურის ინტერვალში (4.2–300K), რაც გამოწვეულია მასალის მოცულობაში დამატებითი დაახლოებით 10^{19} სმ^{-3} იონიზებული ცენტრების წარმოქმნით. როცა $n \geq 4.8 \cdot 10^{18} \text{ სმ}^{-3}$ დასხივების შემდეგ ძვრადობა არ განიცდის მნიშვნელოვან ცვლილებებს, ფიქსირდება მხოლოდ ძვრადობის მცირე შემცირების ტენდენცია.

დაწვრილებითი რაოდენობრივი თეორიული გათვლები გვიჩვენებენ,

რომ შეუძლებელია დენის მატარებელთა ძვრადობის აღწერა 4.2–300K ინტერვალში ნეიტრონების დიდი დოზით დასხივების შემდეგ წერტილოვან დეფექტებზე და მესრის რხევებზე გაბნევის თეორიაზე დაყრდნობით. ბრუქს–ჰერინგის თეორიაც არ აღწერს დაფიქსირებული ელექტრონების ძვრადობის ტემპერატურულ დამოკიდებულებას. ჩატარებული 200–700°C ტემპერატურულ ინტერვალში გამოწვა გვიჩვენებს, რომ ძვრადობა გამოწვის შემდეგ 600°C-ზე თითქმის მთლიანად აღსდგება. ჩატარებული ანალიზი გვიჩვენებს, რომ რადიაციული დონორის როლს თამაშობს დარიშხანის კვანძთაშორისი ატომი.

მეხუთე თავში განიხილება ჩქარი ნეიტრონებით დასხივებული InP–თი მდიდარი InAs–InP მყარი ხსნარების ელექტრული თვისებები. შესწავლილ იქნა ინდიუმის ფოსფიდის და ინდიუმ–ფოსფიდით მდიდარი მყარი ხსნარების კრისტალები InAs-ის 20 და 30 მოლ%-ის დამატებით InP-ში. საწყისი დენის მატარებელთა კონცენტრაცია (n_0) საკვლევ ნიმუშებში იყო $1.5 \cdot 10^{16}$ – $4.3 \cdot 10^{18} \text{სმ}^{-3}$ ფარგლებში. შედეგები გვიჩვენებენ, რომ დენის მატარებელთა კონცენტრაცია, ინდიუმის ფოსფიდში და ინდიუმის ფოსფიდით მდიდარ მყარ ხსნარებში InP-ს კრისტალში InAs-ის 20 და 30 მოლ% დანამატით, მნიშვნელოვნად მცირდება დასხივების შემდეგ ყოველ ფიქსირებულ ტემპერატურაზე. ინდიუმის ფოსფიდით მდიდარ მყარ ხსნარებში აგრეთვე დაიმზირება დენის მატარებელთა კონცენტრაციის ძლიერი შემცირება დასხივების შემდეგ, მაგრამ ნაკლები თითქმის ორი რიგით ვიდრე ინდიუმ ფოსფიდის კრისტალში. InAs–ის დამატება InP–ს კრისტალებში ამცირებს ამ ეფექტს.

გამომჟღავნებული დენის მატარებელთა კონცენტრაციის შემცირება მიგვანიშნებს, რომ ჩქარი ნეიტრონების ნაკადით დასხივება საკვლევ ნიმუშებში ქმნის მათ მოცულობაში ძირითადად დეფექტებს, რომლებიც თამაშობენ დენის მატარებელთა ჩამჭერი ცენტრების როლს. ამ დონეების იონიზაციის ენერჯიაა $\epsilon_c = 0.4$ ევ. ინდიუმის ფოსფიდისთვის და $\epsilon_c \sim (0.25–0.29)$

ევ. როცა $n \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ სმ}^{-3}$ დენის მატარებელთა კონცენტრაციის ცვლილება დასხივების შემდეგ უმნიშვნელოა.

გამოსხივება იწვევს დენის მატარებელთა ძვრადობის შემცირებას ყოველ ფიქსირებულ ტემპერატურაზე, როგორც ინდიუმის ფოსფიდში ისე ინდიუმის ფოსფიდის კრისტალისთვის InAs-ის 20მოლ% დანამატით.

თეორიასთან შედარება გვიჩვენებს, რომ დენის მატარებელთა გაბნევის მექანიზმები იცვლება საკვლევ კრისტალებში და დასხივების შემდეგ წარმოიქმნება გაბნევაში უფრო ეფექტური რადიაციული დეფექტები, დიდი ზომის მოუწესრიგებელი უბნები. ინდიუმის ფოსფიდის მესერი უფრო ძლიერად ირღვევა დასხივებით.

400°C-ზე გამოწვის შემდეგ დენის მატარებელთა ძვრადობის ტემპერატურული დამოკიდებულება უახლოვდება $\mu(T)$ -ს დამოკიდებულებას დასხივებამდე InAs-ის 20მოლ% დანამატით InP-ს კრისტალში. რადიაციული დეფექტების ჩამჭერი ცენტრების როლს თამაშობენ ფოსფორის კვანძთაშორისი ატომები.

მეექვსე თავში წარმოდგენილია InP-ს ელექტრული თვისებები ტექნოლოგიური წარმოშობის მოუწესრიგებელი უბნებით. მეტად მნიშვნელოვანია ტექნოლოგიური წარმოშობის დიდი ზომის მოუწესრიგებელ არეების გავლენის გამოკვლევა III-V ნაერთების, განსაკუთრებით კი InP-ს ელექტრულ თვისებებზე. მნიშვნელოვანია, რომ InP-ს კრისტალების ზრდისას წარმოიშობა დიდი რაოდენობის წუნი ფოსფორის ზედმიწევნით მაღალი ორთქლის წნევის გამო, ამასთანავე ფოსფორის ატომების მასა ორჯერ ნაკლებია დარიშხანის ატომების მასაზე. ამრიგად, შესაძლებელია უფრო ეფექტური მოუწესრიგებელი უბნების წარმოქმნა ზრდის პროცესში InP-ს კრისტალებში, ვიდრე InAs-ის კრისტალებში. თუმცა, კრისტალები მოუწესრიგებელი უბნებით, განიხილება როგორც გამოუსადეგარი მასალა მრავალი ელექტრონული ხელსაწყოს შესაქმნელად, მაგრამ ეს მოუწესრიგებელი მასალები მაინც გამოიყენება ზოგ სპეციალურ მყარ სხეულიან მიკროელექტრონიკის

ხელსაწყოებში. მოუწესრიგებელი არეების შემცველი InP-ს კრისტალები წარმოადგენს საუკეთესო მასალას მოუწესრიგებელი არეების ელექტრული თვისებების გამოკვლევისთვის.

ტექნოლოგიური წარმოშობის მოუწესრიგებელი უბნების (დიდი ზომის დეფექტების) დაშლისთვის და დაბალხარისხოვანი ნიმუშების ხარისხის გაზრდისთვის გამოვიყენეთ ხისტი დასხივება, როგორც ჩქარი ნეიტრონებით, ისე მაღალი ენერგიის ელექტრონებით. ეს მეთოდი თავისუფალია სითბური დამუშავების და იონებით დაბომბვის მეთოდის ნაკლოვანებებისგან.

გამოკვლეული იყო *n*-InP-ს ექსპერიმენტული ნიმუშები $1,51 \cdot 10^{16}$ და $1,18 \cdot 10^{16}$ დენის მატარებელთა კონცენტრაციით (ცხრილი 1).

ცხრილი 1. InP-ს ექსპერიმენტული ნიმუშების მახასიათებლები 300K-ზე

ნიმუშის #	დენის მატარებელთა კონცენტრაცია, n , სმ ³	კუთრი ელექტრო წინაღობა, ρ , ომ.სმ	დენის მატარებელთა ძვრადობა. სმ ² /ვ.წმ	შენიშვნა
1	$1,51 \cdot 10^{16}$	0,57	741	დასხივებამდე
	$1,4 \cdot 10^{13}$	301,1	1490	ჩქარი ნეიტრონების ნაკადით $\phi = 2 \cdot 10^{18}$ ნ/სმ ² დასხივების შემდეგ
2	$1,18 \cdot 10^{16}$	0,14	3700	დასხივებამდე
	$2,16 \cdot 10^{14}$	4,3	6700	50მეგ და $\phi = 5 \cdot 10^{17}$ ე/სმ ² ელექტრონების ნაკადით დასხივების შემდეგ

დენის მატარებელთა კონცენტრაცია. თუ დენის მატარებელთა კონცენტრაცია მცირედ იცვლებოდა ტემპერატურულ ინტერვალში დასხივებამდე, დასხივების შემდეგ ფიქსირდება დენის მატარებელთა კონცენტრაციის ძლიერი დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. ორივე სახის დასხივების შემდეგ დენის მატარებელთა კონცენტრაცია მცირდება, როგორც ყოველ ფიქსირებულ ტემპერატურაზე (3 რიგით), ასევე ტემპერატურის შემცირებასთან ერთად თითქმის ოთხი რიგით. აღნიშნული მოვლენა შეიძლება მჭიდროდ იყოს დაკავშირებული ერთის მხრივ დიდი

მოუწესრიგებელი უბნების დაშლასთან, რომლებიც მასალაში წარმოქმნილი იყო კრისტალის ზრდის პროცესში, მეორეს მხრივ–მრავალი წერტილოვანი დეფექტების წარმოქმნასთან, რომელიც თან ახლავს დასხივებას. ეს წერტილოვანი ცენტრები, მოქმედებენ რა, როგორც ჩამჭერები დენის მატარებლებისთვის, ამცირებენ დენის მატარებელთა კონცენტრაციას დასხივების შემდეგ. ჰოლის კოეფიციენტის ტემპერატურული დამოკიდებულებიდან გამოთვლები ღრმა დონეების იონიზაციის ენერჯისთვის გვაძლევენ: $\epsilon_c - \epsilon_i$ ტოლია 0.7 ევ და 0.44 ევ $1,51 \cdot 10^{16}$ და $1,18 \cdot 10^{16}$ დენის მატარებელთა კონცენტრაციების შესაბამისად.

დენის მატარებელთა ძვრადობა. გაზომვის შედეგები დასხივებამდე n -InP-ს კრისტალებში გვიჩვენებენ ძვრადობის ზედმიწევნით დაბალ მნიშვნელობებს და $\mu(T) \sim T^{-1.2}$ და $\mu(T) \sim T^{-1.8}$ $1,51 \cdot 10^{16}$ და $1,18 \cdot 10^{16}$ დენის მატარებელთა კონცენტრაციებისას.

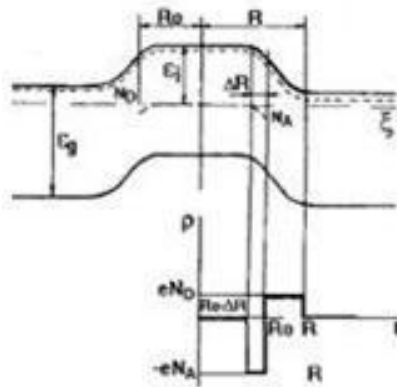
ექსპერიმენტულად გამოკვლეული InP-ს ელექტრული თვისებების შედეგები და მათი თავისებურებანი (დასხივებამდე დაბალი ძვრადობის მნიშვნელობები და მათი გადიდება დასხივების შემდეგ) არ შეიძლება ახსნილ იქნას მინარევების კომპლექსების შექმნით, მეორე ფაზის გამოყოფით და სხვა მოვლენებით, რომლებიც ფიქსირდება ზოგადად ლეგირებულ კრისტალებში. მეორე ფაზა შეიძლება იყოს ძვრადობის დადაბლებული მნიშვნელობების მიზეზი თუ ის იკავებს ნიმუშის მოცულობის მნიშვნელოვან ნაწილს (ათეული პროცენტები), რასაც არ უნდა ჰქონდეს ადგილი ჩვენს ნიმუშებში. იონებისა და ნეიტრალური მინარევების კონცენტრაციის მარტივი გადიდებისას, თუ ისინი შეერთდებიან კომპლექსებში მათ შეუძლიათ ეფექტურად შეამცირონ დენის მატარებელთა ძვრადობა მხოლოდ დაბალ ტემპერატურაზე. ზემოთქმულიდან გამომდინარე, ბუნებრივია, ყველაზე სავარაუდოა დაზიანებების არსებობა ძირითადად მესერის მაღალი რიგის მოუწესრიგებელი უბნების სახით. ბუნებრივია, ვივარაუდოთ მესამე დამატებითი დენის მატარებელთა გაზნვის მექანიზმის -მოუწესრიგებელი უბნების არსებობა. ისინი არიან

დენის მატარებელთა გაბნევის ეფექტური ცენტრები და იწვევენ ძვრადობის შემცირებას. მოუწესრიგებელი უბნების არსებობა n -InP-ს კრისტალებში დამტკიცებული იყო შემდგომი დასხივებით.

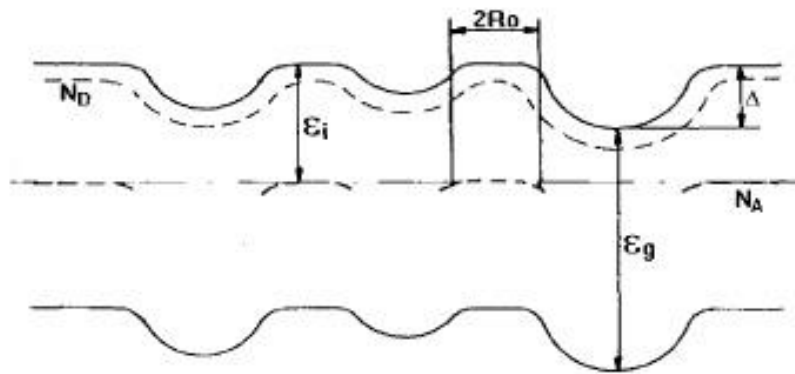
დენის მატარებელთა ძვრადობის გამოკვლევების შედეგები გვიჩვენებენ, რომ ნიმუშების ელექტრული თვისებები დასხივების შემდეგ კი არ უარესდება, როგორც მოსალოდნელი იყო, არამედ უმჯობესდება (ცხრილი 1). ამრიგად, დენის მატარებელთა ძვრადობა, რომელიც კრისტალის ხარისხის ძირითადი ინდიკატორია, იზრდება დასხივების შემდეგ ყველა ტემპერატურაზე. კერძოდ, დენის მატარებელთა ძვრადობა იზრდება დაახლოებით ორჯერ ოთახის ტემპერატურაზე, როგორც ჩქარი ნეიტრონებით, ისევე მაღალი ენერჯის ელექტრონებით დასხივების დროს. ამავე დროს დასხივების შემდეგ იცვლება ძვრადობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების კანონზომიერება. ფიქსირდება ბევრად უფრო სუსტი ძვრადობის ტემპერატურული დამოკიდებულება, ვიდრე დასხივებამდე.

საკვლევი InP-ს ელექტრული თვისებების მონაცემები არ შეიძლება ახსნილი იქნას ჩვეულებრივად მიღებული თეორიული მიახლოებებით. ბუნებრივია, ყველაზე სავარაუდოა დაზიანებების არსებობა ძირითადად მესერის მაღალი რიგის მოუწესრიგებელი უბნების სახით. ეს მიგვანიშნებს დენის მატარებელთათვის გაუმჭირვალე სიცარიელების არსებობაზე, რომლებიც ჩაფლულია მატრიცაში. დენის მატარებელთა ძვრადობის ტემპერატურული დამოკიდებულებების ექსპერიმენტული შედეგები შესაძლებელია აიხსნას [13-16] შრომებში წარმოდგენილი მოუწესრიგებელ უბნებიანი მასალების თეორიული მოდელების გამოყენებით, სადაც ყველა მოუწესრიგებელი უბანი არის სფერული ჩანართი და შეიცავს ლოკალური ცენტრების მაღალ კონცენტრაციას. მოდელი განვითარებული იყო დასხივებული ნახევარგამტარისთვის. ჩვენ გამოვიყენეთ ის მოდელი, რომლის ენერგეტიკული სტრუქტურის სქემა მოცემულია ნახ.2-ზე.

ჩვეულებრივ, პოტენციალის რელიეფს აქვს ნახ.3-ზე ნაჩვენები ფორმა. ამ მოდელის მიხედვით კრისტალის ძლიერად დანგრეული არე იძენს



ნახ. 2 ენერგეტიკული სტრუქტურის სქემა. პოტენციალის რელიეფი და სივრცული მუხტის განაწილება ერთი მოუწესრიგებელი უბნისთვის. “დიდი” მოუწესრიგებელი უბანი.



ნახ.3. ენერგეტიკული სტრუქტურის სქემა. პოტენციალის რელიეფი დასხივების მოუწესრიგებელი უბნების ცენტრების შემართებული ხაზის გასწვრივ.

გამტარებლობას, რომელიც განსხვავებულია მატრიცის გამტარობისაგან. გოსსიკის გამარტივებული სქემის მიხედვით მოუწესრიგებელი არე განიხილება როგორც სფერო, რომელიც გამოფიტულია დენის ძირითადი მატარებლებისგან. სტაციონარულ მდგომარეობაში წარმოიქმნება შესაბამისი პოტენციალური ბარიერები.

მსხვილი მოუწესრიგებლობები მოქმედებს როგორც დიელექტრიკი, ისინი იწვევენ დენის მატარებელთა გაბნევას მოცულობით მუხტზე და ამით ბლოკავენ დენის მატარებელთა ნაკადს. მოუწესრიგებელი უბნები გარშემორტყმულია რა საკმაო სიღრმის და სიგანის პოტენციალის ორმოებით მნიშვნელოვნად მოქმედებენ ელექტრულ თვისებებზე, კერძოდ,

დენის მატარებელთა ჰოლის ძვრადობაზე. ორმო მოქმედებს, როგორც იზოლირებული გაუმტარი სივრცე.

პრობლემაა, თუ როგორ დავაკავშიროთ დენის მატარებელთა გაბნევა მოუწესრიგებელ უბნებზე ძვრადობის ცვლილებებთან. მაგრამ პირველ მიახლოებაში ბუნებრივია ვივარაუდოთ, რომ ძვრადობის შეზღუდვები სიდიდე, რომელიც დაკავშირებულია გაბნევასთან მოუწესრიგებელ უბნებზე, განისაზღვრება, როგორც სხვაობა დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ ძვრადობის ექსპერიმენტული სიდიდეების შეზღუდვულ სიდიდეებს შორის.

$$\frac{1}{\mu_{dis}} = \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} \quad (5)$$

სადაც μ_{dis} -მოუწესრიგებელ უბნებზე გაბნევასთან დაკავშირებული ძვრადობაა, μ_1 - ძვრადობა დასხივებამდე, μ_2 - ძვრადობა დასხივების შემდეგ.

მოუწესრიგებელ უბნებზე დენის მატარებელთა გაბნევასთან დაკავშირებული μ_{dis} -გათვლის ექსპერიმენტული შედეგები (5) ფორმულიდან, შედარებული გოსიკ-ვაისბერგის თეორიის საფუძველზე გამოთვლილ μ_{dis} -თან

$$\mu_{dis} = e [N_{dis} (2mkT)^{1/2} A]^{-1}, \quad (6)$$

გვიჩვენებს დამაკმაყოფილებელ თანხვედომას.

სადაც N_{dis} -სივრცული მუხტის უბნების კონცენტრაციაა, e -ელექტრონის მუხტი, A -სივრცული მუხტის გაბნევის ეფექტური არე, m -დენის მატარებელთა ეფექტური მასა, k -ბოლცმანის მუდმივა, T - ტემპერატურა.

ცხრილში 2. მოყვანილია მოუწესრიგებელი უბნების პარამეტრები 300 K-ზე. ამიტომ ეფექტური მოცულობა, რომელიც უკავია მოუწესრიგებელ უბანს, ხდება ფართომასშტაბური. თუმცა მოსალოდნელია გვეყონდეს მოუწესრიგებელი უბნების ზომის ფართო დიაპაზონი. ბუნებრივია, ამ მოუწესრიგებელი უბნების მნიშვნელოვანი ნაწილი უნდა იყოს საკმარისად

ცხრილი 2. n-InP ნიმუშებში მოუწესრიგებელი უბნების პარამეტრები 300 K –ზე.

ნიმუშის ნომერი	მოუწესრიგებელი უბნის გეომეტრიული რადიუსი R_{dis} , სმ	მოუწესრიგებელი უბნების კონცენტრაცია N_{dis} , სმ ⁻³ .	ატომების რიცხვი მოუწესრიგებელ უბანში	მოუწესრიგებელი უბნის რადიუსი R_{eff} , cm	ელექტრული ველის შეღწევადობა, W, სმ	ელექტრული ველის დაძაბულობა ბარიერში, E, ვ/სმ.
1	$6.2 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{18}$	$2.0 \cdot 10^4$	$3.6 \cdot 10^{-7}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^4$
2	$2.7 \cdot 10^{-6}$	$3.7 \cdot 10^{16}$	$1.6 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$6.8 \cdot 10^4$

დიდი რადიუსის. დიდი მასშტაბის მოუწესრიგებლობის უბანს აქვს ბარიერი, რომელიც არ არის გამჭვირვალე ელექტრონებისთვის. ამრიგად, ელექტრონი არ ტუნელირებს ამ ბარიერში და შემოუვლის მოუწესრიგებელ უბანს. შედეგად გაიზრდება გაბნევა. ეკრანირების სიგრძის უხეში შეფასებით, როცა $N_{dis} \sim 10^{18}$ სმ⁻³ შეადგენს 10^{-6} სმ. ბარიერის სიგანე (W), რომელიც ახასიათებს მანძილს ნახევარგამტარის სიღრმეში, რომელზეც აღწევს ელექტრული ველი, მოუწესრიგებელი უბნების კონცენტრაციის უკუპროპორციულია და ტემპერატურის მიხედვით პრაქტიკულად არ იცვლება. აგრეთვე ტემპერატურის ცვლილებით არ იცვლება ბარიერის ელექტრული ველის დაძაბულობა. დასხივების შემდეგ მოუწესრიგებელი უბნების კონცენტრაცია მცირდება, W იზრდება და გამოფიტული არე კარგავს აზრს.

ამრიგად, დასხივება მაღალი ენერჯის ნაწილაკებით შლის მოუწესრიგებელ უბნებს და ამცირებს მათ მოცულობას, რაც იწვევს დენის მატარებელთა ძვრადობის გადიდებას. უნდა აღვნიშნოთ, რომ დასხივებას არ შეუძლია მიიყვანოს მოუწესრიგებელი უბნები მთლიან დაშლამდე და მათ გახსნამდე. დაშლის შემდეგ რჩება უფრო პატარა ნაწილი ზომის წარმონაქმნები, რომლებიც ნაკლებ ეფექტური არიან გაბნევის პროცესში. დასხივებულ მასალაში მოუწესრიგებელი უბნების დაშლა დამოკიდებულია საკვლევი ნიმუშების საწყის ხარისხზე.

უფრო ზუსტი მოდელი ვარაუდობს, რომ მოუწესრიგებელი უბნის მთლიანი მოცულობა არ არის იზოლატორი. მაგრამ ჩვენს მიერ ჩატარებულმა გამოთვლებმა აჩვენა, რომ პირველ მიახლოებაში დენის მატარებლებს არ შეუძლიათ შეაღწიონ სივრცული მუხტის უბანში, რომელიც განიხილება როგორც იზოლირებული უბანი.

დასკვნები

1. შესწავლილი იყო ელექტრონული გამტარობის ინდიუმ არსენიდის ნიმუშების ელექტრული თვისებები დენის მატარებელთა საწყისი კონცენტრაციით $3 \cdot 10^{16} - 2.7 \cdot 10^{18} \text{სმ}^{-3}$ ფარგლებში და 4.2–300K ტემპერატურულ ინტერვალში.

დადგენილია:

გაბნევის მექანიზმების (გაბნევა მესრის რხევებზე და მინარევების იონებზე) წვლილი მნიშვნელოვნად იცვლება ტემპერატურის ცვლილებასთან. 100–300 K ინტერვალში ჭარბობს გაბნევა მესრის, კერძოდ, ოპტიკურ რხევებზე. 4.2–100 K ინტერვალში დომინირებს გაბნევა მესრის იონებზე. 4.2K ტემპერატურის მიდამოებში ელექტრონული გაზი გადაგვარებულია და ძვრადობა არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე.

2. შესწავლილი იყო ელექტრონული გამტარობის ინდიუმ ფოსფიდის ნიმუშების ელექტრული თვისებები დენის მატარებელთა საწყისი კონცენტრაციით $10^{16} - 10^{17} \text{სმ}^{-3}$ ფარგლებში და 4.2–300 K ტემპერატურულ ინტერვალში.

დადგენილია:

- ინდიუმის ფოსფიდში გაბნევა ნეიტრალურ მინარევებზე არ შეიძლება აიხსნას თეორიით, რომელიც დაფუძნებულია წყალბადის ტიპის ნეიტრალური ატომების მოდელზე. ერგინსონის თეორია არ სრულდება.
- ნეიტრალური მინარევების ატომები ინდიუმის ფოსფიდში განაბნევენ არა მარტო როგორც ნეიტრალური ცენტრები, არამედ ჩნდება ატომების მოუწესრიგებლობაზე დამატებითი გაბნევის მექანიზმი.

3. შესწავლილია ინდიუმის არსენიდის და ინდიუმის არსენიდით მდიდარი მყარი ხსნარების კრისტალების ელექტრული თვისებები 4.2–300 K ტემპერატურულ ინტერვალში დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ. დასხივება ხდებოდა ჩქარი ნეიტრონებით. ჩქარი ნეიტრონების მაქსიმალური ინტეგრალური ნაკადი შეადგენდა $2 \cdot 10^{18}$ ნ/სმ². საკვლევ ნიმუშებში კონცენტრაცია იცვლებოდა $1.5 \cdot 10^{16}$ – $2.2 \cdot 10^{19}$ სმ⁻³ ინტერვალში.

დადგენილია:

- დენის მატარებელთა კონცენტრაცია, როცა $n < 10^{18}$ სმ⁻³, დასხივების შემდეგ მნიშვნელოვნად (3 რიგით) იზრდება და არ იცვლება ტემპერატურასთან ერთად 4.2–300K ინტერვალში.
- InP-ს მცირე დანამატების გაზრდით 10–დან–20 მოლ%/მდე InAs –ში დასხივების შემდეგ დაფიქსირებული კონცენტრაციის ზრდა მცირდება, წარმოიქმნება უპირატესად დონორული ტიპის ცენტრები და ფერმის დონე გადაადგილდება გამტარობის ზონის არეში.
- ძვრადობა მცირდება დასხივების შემდეგ მთელ 4.2–300 K არეში. InP-ს მცირე დამატებებით ინდიუმ არსენიდში იზრდება გაბნევა მესრის ოპტიკურ რხევებზე, იონური კავშირის წვლილის გაზრდის გამო. დასხივების შედეგად წარმოქმნილი რადიაციული დეფექტები იწვევენ ძვრადობის მნიშვნელოვან დაცემას დასხივების შემდეგ.
- გადაგვარებულ ნიმუშებში როცა $n > 4.8 \cdot 10^{18}$ სმ⁻³ ძვრადობა არ განიცდის მნიშვნელოვან ცვლილებას დასხივების შემდეგ.
- 200–700°C ტემპერატურაზე გამოწვის შემდეგ ძვრადობა თითქმის აღსდგება.

4. შესწავლილ იქნა ინდიუმ ფოსფიდის და ინდიუმის ფოსფიდით მდიდარი მყარი ხსნარების (InAs-ის 20–30–მდე მოლ%) კრისტალების ელექტრული თვისებები 4.2–300K ინტერვალში დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ. საწყისი დენის მატარებელთა კონცენტრაცია (n_0) საკვლევ ნიმუშებში იყო $1.5 \cdot 10^{16}$ – $4.3 \cdot 10^{18}$ სმ⁻³ ფარგლებში.

დადგენილია:

- დასხივების შემდეგ დენის მატარებელთა კონცენტრაცია მცირდება (დაახლოებით 3 რიგით). InAs-ის მცირე დამატებები (20–30–მდე მოლ%) ამცირებს ამ ეფექტს. დასხივება ინდიუმის ფოსფიდის და ინდიუმის ფოსფიდით მდიდარ მყარ ხსნარებში ქმნის კრისტალების მოცულობაში დეფექტებს, რომლებიც არიან დენის მატარებელთა ჩამჭერი ცენტრები. დასხივება ცვლის დენის მატარებელთა კონცენტრაციის ტემპერატურულ დამოკიდებულებას, დაიკვირვება უფრო ძლიერი ტემპერატურული დამოკიდებულება.
 - დასხივების შედეგად წარმოქმნილი ღრმა დონეების ცენტრების იონიზაციის ენერგია ინდიუმის ფოსფიდისთვის არის $\epsilon_c - 0.4$ ევ. ხოლო ინდიუმის ფოსფიდით მდიდარი მყარი ხსნარებისთვის $\epsilon_c - (0.25 - 0.29)$ ევ).
 - როცა $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{სმ}^{-3}$ დენის მატარებელთა კონცენტრაციის ცვლილება დასხივების შემდეგ უმნიშვნელოა.
 - გამოწვა 300°C არეში იწვევს $\epsilon_c - 0.25$ ევ დონის გაქრობას და ახალი დონის $\epsilon_c - 0.14$ ევ წარმოქმნას. 400°C გამოწვა აქრობს მთლიანად ღრმა დონეებს. აღსდგება დენის მატარებელთა კონცენტრაციის დამოკიდებულების კანონზომიერება ტემპერატურაზე.
 - ჩქარი ნეიტრონებით დასხივებისას დენის მატარებელთა ძვრადობა მცირდება ყოველ ფიქსირებულ ტემპერატურაზე და წარმოიქმნება გაბნევაში უფრო ეფექტური რადიაციული დეფექტები- მოუწესრიგებელი უბნები. ძვრადობის ტემპერატურული დამოკიდებულება დასხივების შემდეგ უკეთესად აღიწერება თეორიით, რომელიც ეყრდნობა მოუწესრიგებელ უბნებზე გაბნევას.
4. შესწავლილია ტექნოლოგიური წარმოშობის მოუწესრიგებელი უბნების შემცველი *n*-ტიპის ინდიუმ ფოსფიდის კრისტალების ელექტრული თვისებები. ნიმუშები იყო ანომალურად დაბალი დენის მატარებელთა ძვრადობის მნიშვნელობით. ნიმუშების ხარისხის

გასაუმჯობესებლად ნიმუშები დასხივებულ იქნა ჩქარი ნეიტრონების ნაკადით $\Phi = 2 \cdot 10^{18} \text{ სმ}^{-3}$ და მაღალი ენერგიის ელექტრონების 50მეე ენერგიით და $5 \cdot 10^{17} \text{ ე/სმ}^2$ ნაკადით.

დადგენილია:

- დენის მატარებელთა კონცენტრაციის და დენის მატარებელთა ანომალური ტემპერატურული ცვლილება, ძვრადობის დაბალი მნიშვნელობები და მისი ტემპერატურული დამოკიდებულება დაკავშირებულია კრისტალში დიდი ზომის დეფექტების მოუწესრიგებელი უბნების არსებობით და დაკავშირებულია მათთან სივრცული მუხტის უბნების არსებობით.
- მოუწესრიგებელი უბნების შემცველი *n*- ტიპის ინდიუმის ფოსფიდის დენის მატარებელთა ძვრადობა განისაზღვრება მესერული და მინარევეების იონებზე გაბნევის გარდა გაბნევით მოუწესრიგებელ უბნებზე. მოუწესრიგებელ უბნებზე გაბნევასთან დაკავშირებული ძვრადობის კომპონენტი იცვლება კანონით $\mu_{dis}(T) \sim T^{1.5}$. მოუწესრიგებელი უბნები ახდენენ ძლიერ გავლენას ძვრადობის სიდიდეზე, ბლოკავენ დენის ძირითადი მატარებლების მოძრაობას და განაზღვრენ მათ თავის მოცულობით მუხტზე. დასხივების შემდეგ დენის მატარებელთა კონცენტრაცია მკვეთრად მცირდება და დენის მატარებელთა ძვრადობა ორჯერ იზრდება. თეორიულ მოდელთან შედარებამ გვიჩვენა, რომ რადიაციულ დასხივებას მივყავართ მოუწესრიგებელი უბნების დაშლისკენ. დასხივება ქმნის კრისტალებში დეფექტებს, რომლებიც არიან ჩამჭერი ცენტრები ელექტრონებისათვის და იწვევენ დენის მატარებელთა კონცენტრაციის მკვეთრ შემცირებას. დასხივება შეიძლება გამოყენებულ იქნას ტექნოლოგიური წარმოშობის მოუწესრიგებელი უბნების მოსაშორებლად. იმ პოტენციალური ორმოს პარამეტრები, რომელიც წარმოიქმნება ტექნოლოგიური წარმოშობის მოუწესრიგებელი უბნების ირგლივ *n*-InP კრისტალებში, აგრეთვე

სფერული ფორმის სივრცული მუხტის უბნები, რომლებითაც გარსშემორტყმულია მოუწესრიგებელი უბნები, კარგად აღწერს ელექტრულ თვისებებს მოუწესრიგებელ უბნებიანი *n*- InP-ს კრისტალებში.

abstract

The main goal for the dissertation is the research of physical nature of large size defects in InP, InAs and in some of their solid solutions. The main method used for accomplishing this was determining mechanisms of scattering of current carriers in crystal lattice and researching law of changes of electrons concentrations.

Samples were radiated with fast neutrons, powerful streams- $\Phi=2\cdot 10^{18}\text{n/cm}^2$ and highly energetic (50MeV) electrons- $\Phi=5\cdot 10^{17}\text{el/cm}^2$. Researches were carried out in wide range of temperature $T=4.2\text{-}300\text{K}$. Crystal annealing was done at up to 700°C temperature. Single crystals were acquired via methods of horizontal zonal melting. Concentration of doping impurities was $1,51\cdot 10^{16}$ and $1,18\cdot 10^{16}\text{cm}^{-3}$.

The topic is important as InP and InAs and their solid solutions are widely used in opto- and micro electronics. Also, InP represents one of the best materials for manufacturing photo elements, which is especially important for space equipment. In addition, effective way of improving quality of InP crystals has been discovered.

The work will display for the first time that using high energy particles for radiation can result in decomposition of large-size technological defects and, subsequently, improvement of physical properties of crystal. In particular, InP as observed to develop mobility increase of 100%, and also numerical theoretical analysis for this phenomenon was done for the first time. Also a research was carried out on main properties of disordered areas: geometrical radius of disordered areas; concentration of disordered areas; number of atoms in disordered areas; effective radius of disordered areas; penetration of electric field; tension of electric field in barrier. It is displayed that as a result of radiation, large-sized defects are

disintegrated into smaller defects (of dotted type), which serve as acceptors and, as a result, concentration of electrons is decreased by several orders.

Mechanisms of scattering of electrical current carriers was determined in all substances, in both radiated and non-radiated samples. It was displayed for the first time that scattering of charge carriers on neutral atoms in InP is not characterized by widely used Erginsoy model and that it is essential to take into account the scattering on disordered statistical distribution of neutral atoms.

On the basis of calculations carried out, and analysis of temperature dependences of current carriers mobility and concentration, it was established that as a result of rigid radiation, besides dotted defects, large sized radioactive defects also emerge and cannot be analyzed using only traditional mechanisms.

It is displayed that as a result of radiation on InP and InAs solid solutions defects of acceptor type emerge with deep energetic levels ($\varepsilon_c - 0.4$ eV, $\varepsilon_c - 0.2$ eV) which drastically reduce concentration of current carriers.

Concentration of charge carriers for InAs and InAs-InP solid solution rich with InAs, increases significantly on each fixed temperature as a result of radiation and does not change with temperature increase. This fact is weakened with increase of phosphorus composition and only becomes noticeable when $n_0 \leq 4.1018 \text{ cm}^{-3}$. Donor type effects of small energetic levels emerge in forbidden zone and Fermi level moves to conductor zone as a result of radiation. Role of donors is accomplished by radioactive defects that represent interstitial atoms of arsenic.

It is displayed that concentration of charge carriers in InP and InAs-InP solid solutions rich with InP creates defects of charge carriers trapping character, with deep energetic levels $\varepsilon_c - 0.4$ eV, $\varepsilon_c - 0.2$ eV. In given instance, role of electrically active radioactive defects are accomplished by interstitial phosphor atoms that, under the InP-InAs rigid radiation, emerge in significantly greater numbers than the interstitial atoms of arsenic.

For the first time, research has been done on anomaly temperature dependences of charge concentration and mobility in n-type InP crystal with disordered areas. Besides the scattering on lattice and impurity ions, mobility in crystals containing disordered areas is also determined by scattering on disordered areas. Disordered areas block movement of main carriers of charge carriers and scatter them on their volume charge. Concentration of charge carriers is reduced drastically, and mobility increased twice after radiation with fast neutrons ($\Phi=2\cdot 10^{18}\text{n/cm}^2$) and electron streams of 50 Mev and $\Phi=5\cdot 10^{17}\text{e/cm}^2$.

Research was carried out on annealing process for radiated crystals at 400°C - 700°C temperature range. It is displayed that the process is of complex character and also that annealing radiated InAs-InP solid solutions rich with InAs at 700°C causes elimination of defects and restoration of charge concentration. As a result of radiation in solid solutions rich with InP disordered areas emerge, which act effectively in scattering charge carriers.

ლიტერატურა

1. Erginsoy C., Neutral Impurity Scattering in Semiconductors, Phys. Rev., 1950, vol. 78, no. 6, pp. 1013–1014.
2. Sclar N, Neutral Impurity Scattering in Semiconductores, Phys.Rev. 1956, v.104, 1559-1561.
3. Zeeger K., Semiconductor Physics, Wien, New York: Springer-Verlag, 1973. p.13.
4. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S. G. Physics of semiconductors, Nauka, M., 1977, p.9.
5. Norton P., Braggins T., Levinstein H. Impurity and lattice scattering parameters as determined from Hall and mobility analysis in n-type silicon. Phys. Rev. 1973, B 8, p. 5632.
6. Jakeli V.G., “Charge Impurity States and Kinetic Phenomena in Semiconductors”, Phys-Math. Dr.Dissertation, Iv.Javakhishvili Tbilisi State University, 1995.
7. Khutsishvili E.V., Kekelidze N.P., Jakeli V.G., Pagava M.O., Charge Carriers Scattering on the Tin Impurity Atoms in Polycrystalline Alloys Si-Ge System, Unorganic Materials, 2006, 42, 398-400.
8. Khutsishvili E.V., Gabrichidze L.L., Tsagareishvili O.A., Kobulashvili N.V., Inorganic Materials, 2009, Vol. 45, No. 6, pp. 599–601. © Pleiades Publishing, Ltd., 2009 Carrier Mobility in Si1 -xGexCrystals.2009, in Neorganicheskie Materialy, 2009, Vol. 45, No. 6, pp. 655
9. Mansfield, R., Impurity Scattering, Proc. Phys. Soc., Sect. B, 1956, vol. 69, no. 433, pp. 76–82.
10. Кекуа М.Г., Хуцишвили Э.В. Твёрдые растворы полупроводниковой системы германий-кремний. Тбилиси: Мецნიერება. 1985, стр.175.

11. Makowski L. and Glicksman M. Disorder Scattering in Solid Solutions of III–V Semiconducting Compounds, *J. Phys. Chem. Solids*, 1973, vol. 34, pp. 487–492.
12. Kekelidze N., Khutsishvili E., Khomasuridze D., Kvirkvelia B. "Current Carriers Scattering on the Neutral Impurity Atoms in Crystals of Indium Phosphide". *Advances in Applied Physics and Materials Science Congress*. 2011, USA
13. Alexander Y. Shik. Electronic properties of inhomogeneous semiconductors. *Electrocomponent Science Monographs*, volume 9. Gordon and Breach Publishers, 1995, pp.1-50
14. B.R. Gossik, *J. Appl. Phys.*, 1959, vol. 30, p. 1214.
15. Crawford J.H. and Cleland J.W. *J. Appl. Phys.*, 30, 1959, p. 1204.
16. Weisberg L.R., *Anomalous Mobility Effects in Some Semiconductors and Insulators*, *J. Appl. Phys.*, 1962, vol.33, №5, pp.1817-182

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში:

1. Kekelidze N., Kekelidze D., Milovanova L., Khutsishvili E., Davitaya Z., Kvirkvelia B., Khomasuridze D. "Electrical Properties of InP Crystals with Inhomogeneities Regions". *Acta Physica Polonica A*. 2011, p. 27-29.
2. Kekelidze N., Khutsishvili E., Khomasuridze D., Kvirkvelia B. "Current Carriers Scattering on the Neutral Impurity Atoms in Crystals of Indium Phosphide". *AIP American Institute of Physics*, 2011, USA, p. 37-42
3. Tsintsadze G., Tsintsadze M., Kekelidze N., Kekelidze D., Milovanova L., Khutsishvili E., Davitaya Z., Khomasuridze D., Kvirkvelia B. "Radiation Technology of Nanoclusters Obtaining in Semiconductor indium phosphide crystals". *Proc. of XIX Mendeleev Congress on "General and Applied Chemistry"*, 25-30 September, Volgograd, Russia, 2011, p.650.
4. N.Kekelidze, E.Khutsishvili, L.Gabrishidze, D.Khomasuridze, B.Kvirkvelia, N.Kobulashvili." Current Carriers Scattering in Semiconductors with Various Types of Inhomogeneity". *Nano Studies*, September, 2011, v. 4, pp. 95-102
5. კეკელიძე ნ., ცინცაძე გ., კეკელიძე დ., მილოვანოვა ლ., ხუციშვილი ე., კვირკველია ბ., ვეფხვაძე ა., ხომასურიძე დ., ჯახუტაშვილი თ. „ნანონაწილაკების წარმოქმნა InP–ს კრისტალებში მათი ჩქარი ნეიტრონების დიდი ნაკადით დასხივების შედეგად“. ნანოქიმია და ნანოტექნოლოგიები. პირველი საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, 23-24 მარტი, 2010წ. გვ. 147–151.
6. ხუციშვილი ე., მეტრეველი ვ., გაბრიჭიძე ლ., ქობულაშვილი მ., ხომასურიძე დ., კვირკველია ბ., კეკელიძე ნ. InAs-ის კრისტალების სითბური გაფართოება და შინაგანი ხახუნის, გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები. საერთაშორისო კონფერენციის შრომები. სტუ, თბილისი, 30 მარტი 2011წ. გვ. 164-166.

7. ხომასურიძე დ., კეკელიძე ნ., კეკელიძე დ., მილოვანოვა ლ., ხუციშვილი ე., დავითაია ზ., კვიციანი ბ. "წუნდებული InP კრისტალების ხარისხის გაუმჯობესება რადიაციული ტექნოლოგიის მეშვეობით." გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები. საერთაშორისო კონფერენციის შრომები. სტუ, თბილისი, 30 მარტი 2011წ. გვ. 278–281.

აპრობაცია

დისერტაციის მასალები მოხსენებული იყო შემდეგ კონფერენციებზე და სემინარებზე:

1. ნანოქიმია, ნანოტექნოლოგიები NANO–2010. პირველ საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. თბილისი, 23-24 მარტი, 2010წ.
2. Advances in Applied Physics and Materials Science Congress. 12-15 May, 2011, Antalya, Turkey;
3. XIX Mendeleev Congress on “General and Applied Chemistry“, 25 - 30 September, 2011, Volgograd, Russia
4. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები“, ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 30 მარტი 2011წ.
5. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის, ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის, ფიზიკის დეპარტამენტი. სემინარი I.
6. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის, ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის, ფიზიკის დეპარტამენტი. სემინარი II.