

ნახევარბამტარებსა და სტრუქტურებში
რადიაციული დეფექტების შესწავლა და ბამოყენება

ნ. დოლიძე, ა. ბიბილაშვილი, ზ. ჯიბუტი

ი. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
თბილისი, საქართველო
სსიპ მიკრო- და ნანოელექტრონიკის ინსტიტუტი
თბილისი, საქართველო
nugzardolidze@gmail.com

მიღებულია 2022 წლის 27 ივნისს

ანოტაცია

ნაშრომში განხილულია აჩქარებული ელექტრონებითა და γ -კვანტებით 77 კ ტემპერატურაზე დასხივებულ გერმანიუმში რადიაციული დეფექტების გამოკვლევები, ჩატარებული პროფ. ა. გერასიმოვისა და მისი სამეცნიერო ჯგუფის მიერ. ვინაიდან გერმანიუმისათვის შეუძლებელია მყარი სხეულების მიკროსტრუქტურის განსაზღვრის ისეთი მძლავრი მეთოდის გამოყენება, როგორცაა ელექტრონული პარამაგნიტური რეზონანსი, მონაცემები რადიაციული დეფექტების მიკროსტრუქტურის შესახებ მიღებულია არაპირდაპირი მეთოდებით, როგორცაა ელექტროფიზიკური, ფოტოელექტრული, ოპტიკური და მექანიკური თვისებების გაზომვები. დადგენილია კვლევის პროცესში დამზერილი გამოწვის სტადიების შესაბამისი რადიაციული დეფექტების ბუნება და შემადგენლობა. მოცემულია რადიაციის, როგორც ტექნოლოგიური ხერხის, პრაქტიკული გამოყენების მაგალითები. შესწავლილია რადიაციის გავლენა ლითონი-დიელექტრიკი-ნახევარგამტარი სისტემებზე და მოცემულია ასეთ სტრუქტურაში, დიელექტრიკით Al_2O_3 , რადიაციით ინდუცირებული მუხტის დაგროვების მოდელი.

1. შესავალი

პროფესორი ალექსი გერასიმოვი თავისი სამეცნიერო მოღვაწეობის პირველ ეტაპზე იკვლევდა რადიაციის ზემოქმედებას ნახევარგამტარებზე. გასული საუკუნის 60-იან წლებისათვის ნახევარგამტარული ელექტრონიკის სწრაფ განვითარებასთან ერთად ამ კვლევების პრაქტიკული ღირებულება ძლიერ გაიზარდა და განისაზღვრებოდა რადიაციულად მდგრადი ხელსაწყოების შექმნის ტექნოლოგიების სრულყოფით. გარდა ამისა, ბოლო ათწლეულების პრაქტიკამაც დაადასტურა, რომ თავად რადიაცია დიდი წარმატებით შეიძლება იქნას გამოყენებული, როგორც ტექნოლოგიური მეთოდი, მყარსხეულოვანი ხელსაწყოების დამზადების პროცესში. რადიაციული ტექნოლოგიები მიეკუთვნება არატრადიციული, პერსპექტიული ტექნოლოგიების რიცხვს, ვინაიდან ტრადიციულებთან შედარებით მათ აქვს მთელი რიგი უპირატესობებისა. პირველ რიგში უნდა აღინიშნოს შედარებით დაბალი მუშა ტემპერატურები, პროცესების შექცევადობა, ტექნოლოგიური ციკლის ნებისმიერ

ეტაპზე მათი გამოყენების შესაძლებლობა (მაღალიგამჭოლუნარიანობის გამო) და, რაც არანაკლებ მნიშვნელოვანია, დაბალი ენერგომემცველობა. უფრო მეტიც, კვლევებმა აჩვენა, რომ რადიაციული ტექნოლოგიების საშუალებით შესაძლებელია ისეთი შედეგების მიღება, რომლებიც პრინციპულად მიუღწეველია ტრადიციული (თერმული) მეთოდებით. რადიაციული დეფექტების შექმნის მექანიზმების, მათი თვისებების, სტრუქტურის, გეომეტრიის, კრისტალურ მესერში სივრცული მდებარეობისა და შესაბამისი მასალების ელექტროფიზიკურ, ოპტიკურ და მექანიკურ თვისებებზე ზემოქმედების თავისებურებების ზედმიწევნით ცოდნა საშუალებას იძლევა თავად რადიაცია იქნას გამოყენებული მასალების თვისებების მართვადი ცვლილებისათვის.

პროფესორმა ალექსი გერასიმოვმა, საკუთარ სამეცნიერო ჯგუფთან ერთად, ერთ-ერთმა პირველმა დაიწყო ნახევარგამტარების დასხივება და რადიაციული დეფექტების შესწავლა 77 კ ტემპერატურაზე. უკვე იმ დროისათვის ამ მასალებში სხვადასხვა ტემპერატურაზე, სხვადასხვა სახის რადიაციის ზემოქმედებით შექმნილი დეფექტების ბუნების შესწავლისადმი მიძღვნილი კვლევების შედეგები საკმაო რაოდენობით იყო დაგროვებული. მიუხედავად ამისა, მრავალი საკითხი მათი თვისებებისა და სტრუქტურის შესახებ ღიად რჩებოდა.

განსაკუთრებით ეს ეხება გერმანიუმსა და გალიუმის არსენიდს, რომელთა მიმართ, სილიციუმისგან განსხვავებით, წარუმატებელი აღმოჩნდა მყარი სხეულების მიკროსტრუქტურის განსაზღვრის ისეთი მძლავრი მეთოდის გამოყენება, როგორც არის ელექტრონული პარამაგნიტური რეზონანსი (ეპრ). მკვლევრები ამ მასალებში ეპრ-ის გამოყენების შეუძლებლობის სხვადასხვა მიზეზს ასახელებენ – სპინ-ორბიტალური ურთიერთქმედების სიდიდიდან დაწყებული, რაც განაპირობებს სპინ-მესრული რელაქსაციის დროის სიმცირეს (გერმანიუმში) და ზეფაქიზი ხაზების დიდ გაფართოებას (გალიუმის არსენიდში), და ამ მასალების სტრუქტურული არასრულყოფილებით და, მასთან დაკავშირებული, დიდი შიდა მექანიკური დამაბულობებით (განსაკუთრებით რადიაციის ზემოქმედების შემდეგ) დამთავრებული.

აღსანიშნავია, რომ სილიციუმის მიმართ ამ მეთოდის გამოყენებამ შესაძლებელი გახადა რადიაციით ინდუცირებული რამდენიმე დეფექტისა და მათი კომპლექსის ცალსახად იდენტიფიცირება (დივაკანსია, ვაკანსია + წყალბადის ატომი ან სხვა ნეიტრალური მინარევი, ვაკანსია + აქტიური მინარევი ატომი და ა.შ.). ამიტომ, გერმანიუმსა და გალიუმის არსენიდის შემთხვევებში მკვლევრები იძულებული იყვნენ რადიაციული დეფექტების მიკროსტრუქტურის შესახებ ემსჯელათ არაპირდაპირი მონაცემების საფუძველზე, რომლებიც მიიღებოდა ელექტროფიზიკური, ფოტოელექტრული, ოპტიკური და მექანიკური თვისებების შესწავლით.

ამასთან ერთად, დაგროვებული მონაცემების განხილვისას აშკარა გახდა, რომ მიღებული შედეგები ძნელად შესადარებელი და ხშირად ერთმანეთის საწინააღმდეგოც კი იყო. ასეთი მდგომარეობა გამოიწვია იმ ვითარებამ, რომ სხვადასხვა მკვლევარი ხშირად (განსაკუთრებით საწყის ეტაპზე) ექსპერიმენტებში სხვადასხვა მასალასა და რადიაციის სხვადასხვა სახეობას იყენებდა და არ ითვალისწინებდა ისეთ მნიშვნელოვან ფაქტორებს, როგორცაა მინარევი შემადგენლობა, მასალის სტრუქტურის საწყისი არასრულყოფილება, დასხივების სახეობა, ენერგია, ინტენსივობა, ტემპერატურა და სხვა. აქედან გამომდინარე, კონკრეტულ მასალებში რადიაციული დეფექტების შესასწავლად აუცილებელი იყო ექსპერიმენტები ჩატარებულიყო ერთნაირ მასალებზე, მკაცრად კონტროლირებულ პირობებში.

მყარ სხეულებზე რადიაციის ზემოქმედების პირველივე ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ დასხივების ტემპერატურა მოქმედებს რადიაციული დეფექტების შექმნაზე. ტემპერატურის ზრდასთან ერთად იზრდება დეფექტების რთული კომპლექსების ფორმირების ალბათობა, ხოლო მარტივი დეფექტების მიღება შესაძლებელია მხოლოდ დაბალ ტემპერატურაზე დასხივებულ კრისტალებში.

პროფ. ა. გერასიმოვმა, თავის სამეცნიერო ჯგუფთან ერთად, ერთ-ერთმა პირველმა დაიწყო რადიაციული დეფექტების შესწავლა 77 კ ტემპერატურაზე დასხივებულ კლასიკურად აღიარებულ ნახევარგამტარებში Ge-სა და Si-ში [1, 2]. კვლევები ტარდებოდა თხევადი აზოტის ტემპერატურაზე, 2 – 6 მეგაევ ენერგიის ელექტრონებით და / ან გამა-კვანტებით დასხივებულ მასალებში. ეს საშუალებას იძლეოდა შექმნილიყო შედარებით მარტივი სტრუქტურული დეფექტები (ფრენკლის წყვილები და მათი მარტივი კომპლექსები), ტემპერატურის შემდგომი ზრდით შესწავლილიყო მათი ქცევა (კომპლექსების წარმოქმნა და დაშლა, მიგრაცია, ანიჰილაცია და სხვა) და, აქედან გამომდინარე, მიღებულიყო მონაცემები კრისტალში ამ დროს მიმდინარე პროცესებზე და საკვლევი დეფექტების ბუნებაზე. ამას ხელი შეუწყო იმ გარემოებამაც, რომ, სხვა ნახევარგამტარებისაგან განსხვავებით, დასხივების შედეგად n-ტიპის Ge იცვლის გამტარებლობის ტიპს. ეს ეფექტი უაღრესად ხელსაყრელი აღმოჩნდა დეფექტების კვლევებისათვის – დასხივებული მასალის გამოწვის პროცესში ადგილი აქვს უკუკონვერსიის პროცესს, ფერმის დონე მოძრაობს აკრძალული ზონის ქვედა ნახევრიდან ზემოთ, რითაც ცვლის დეფექტების მუხტურ მდგომარეობას და აადვილებს მათზე დაკვირვებას.

აღნიშნული კვლევების შედეგად დადგენილ იქნა მთელი რიგი კანონზომიერებებისა, რომელთაგანაც ზოგიერთს ქვემოთ წარმოვადგენთ.

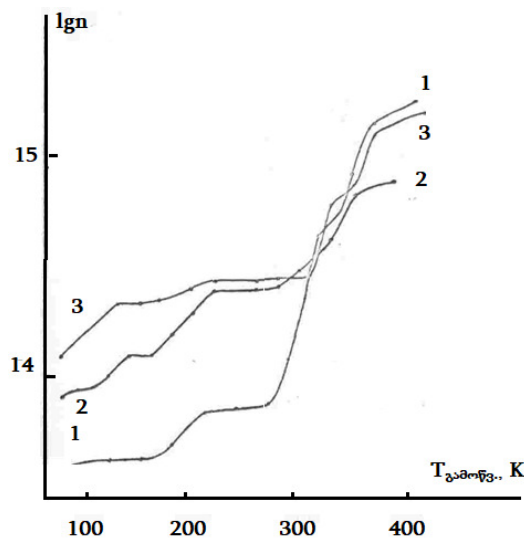
2. რადიაციული დეფექტი ვაკანსია + მინარევული ატომი, $E_c - 0.21$ ევ

კვლევებმა აჩვენა, რომ რადიაციული დეფექტები ნებისმიერი ნახევარგამტარის აკრძალულ ზონაში ღრმა მაკომპესირებელ ენერგეტიკულ დონეებს წარმოქმნის, რაც ორივე ტიპის (n- და p-ტიპის) მასალაში იწვევს დენის ძირითადი მატარებლების კომპენსირებას [3, 4]. შესაბამისად, ფერმის დონე მისწრაფვის აკრძალული ზონის ცენტრისკენ. რადიაციის გარკვეული დოზის შემდეგ ფერმის დონე ჩერდება ცენტრთან ახლოს და დასხივების შემდგომი დოზები ამ მნიშვნელობას პრაქტიკულად ვეღარ ცვლის. მას „ფერმის ზღვრული დონე“ ეწოდება.

ფერმის ზღვრული დონისა და რადიაციის შესაბამისი დოზის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ნახევარგამტარულ მასალაზე და, უფრო ნაკლებად, დასხივების ტემპერატურაზეც. დასხივების შედეგად კრისტალში მყარდება აღზნებული ფსევდოწონასწორული მდგომარეობა. დასხივების ტემპერატურაზე ეს მდგომარეობა სტაბილურია, მაგრამ ტემპერატურის შემდგომი მომატებით იწყება არაწონასწორული მდგომარეობების რელაქსირების პროცესები. ანუ აღზნებული კრისტალი გადადის წონასწორულ მდგომარეობაში. ამ პროცესს „გამოწვა“ ეწოდება და სხვადასხვა კრისტალში იგი სხვადასხვანაირად მიმდინარეობს, როგორც წესი, სტადიებს სახით. რაც უფრო დაბალია შედარებით მცირე ენერგიების (2 – 6 მეგაევ) ელექტრონებით და გამა-კვანტებით დასხივების ტემპერატურა, მით უფრო მარტივი რადიაციული დეფექტები წარმოიქმნება კრისტალში ვაკანსიებისა და კვანძთაშორისი ატომების სახით. ამიტომაცაა 77 კ ტემპერატურაზე დასხივება უაღრესად ხელსაყრელი. დეფექტების

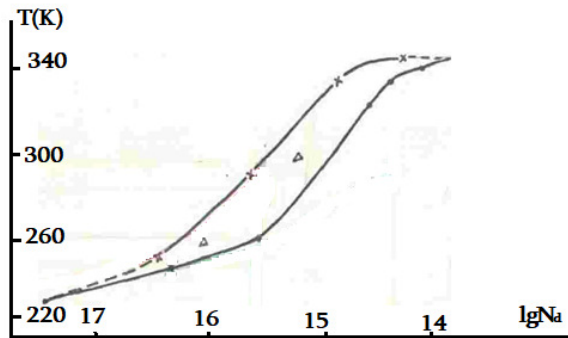
გამოწვა ტემპერატურის მატებასთან ერთად მიმდინარეობს არა მონოტონურად, არამედ – სტადიებად. როგორც აღინიშნა, 77 კ ტემპერატურაზე შედარებით მცირე ენერგიების მქონე ელექტრონებით დასხივება Ge-ში ქმნის მარტივ დეფექტებს და გამოწვის შემდგომი სტადიები მეტყველებენ ამ დეფექტების ქცევის თაობაზე. ცხადია, რომ თითოეული სტადია სხვადასხვა დეფექტის გამოწვას მოასწავებს, მაგრამ როგორ გავარჩიოთ, თუ კონკრეტულად რომელ სტადიაზე რომელი დეფექტი გამოიწვევა? Si-ში ეს პრობლემა მარტივად იჭრება ეპრ-ის დახმარებით. მაგრამ Ge-ში მკვლევარი იძულებულია მინარევული დეფექტის ბუნებისა და მისი კონცენტრაციის შესახებ იმსჯელოს არაპირდაპირი (ელექტროფიზიკური და ოპტიკური) მეთოდების გამოყენებით.

ა. გერასიმოვი და მისი სამეცნიერო ჯგუფი ამ გზით წავიდა [5 – 13]: შეირჩა Ge-ის სამი n-ტიპის ნიმუში, სხვადასხვა დონორული მინარევით: As, Sb და Bi. ისინი დასხივდა 77 კ ტემპერატურაზე და ჩატარდა ე.წ. იზოქრონული გამოწვები (სხვადასხვა ტემპერატურაზე ნიმუში ყოვნდება ერთი და იგივე დროის განმავლობაში). ექსპერიმენტმა აჩვენა დეფექტების გამოწვის რამდენიმე სტადია. აღმოჩნდა, რომ საწყისი ტემპერატურა სტადიისათვის, რომელიც დაახლოებით 300 კ ტემპერატურაზე იწყება, გარკვეულწილად დამოკიდებულია მინარევის გვარობასა და მის კონცენტრაციაზე (სურათი 1) და არ არის დამოკიდებული დასხივების ინტეგრალურ ნაკადსა და ინტენსივობაზე. კვლევებით დადგინდა, რომ დეფექტს, რომელიც გამოიწვევა მოცემულ სტადიაზე აკრძალულ ზონაში შეესაბამება ენერგეტიკული დონე $E_c - 0.21 \pm 0.01$ ევ და იგი არის კომპლექსი ვაკანსია + მინარევული ატომი.

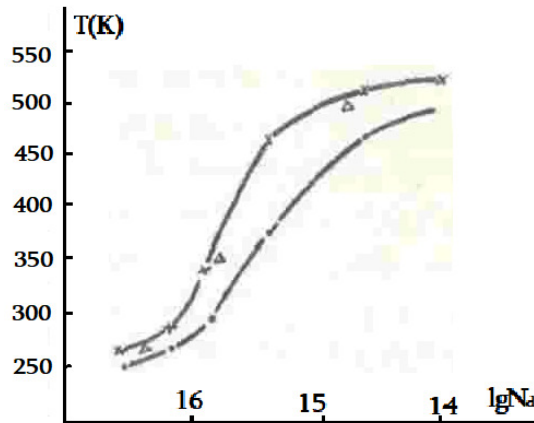


სურათი 1. აჩქარებული ელექტრონებით 77 კ ტემპერატურაზე დასხივებული n-ტიპის Ge-ის იზოქრონული გამოწვა. დონორებია (კონცენტრაცია $\approx 10^{15}$ სმ⁻³): **1** – სტიბიუმი, **2** – ბისმუტი და **3** – დარიშხანი.

მოცემული სტადიის საწყისი ტემპერატურები, მალეგირებელი მინარევების მიხედვით, აკმაყოფილებს თანაფარდობას $T_{Sb} < T_{Bi} < T_{As}$ (სურათი 2). აღსანიშნავია, რომ დასხივებით p-ტიპში კონვერტირებული n-ტიპის Ge, ამავე ტემპერატურულ ინტერვალში განიცდის უკუკონვერსიასაც და ამ შემთხვევაშიც დონორულ მინარევზე დამოკიდებულება ანალოგიურია (სურათი 3). მსგავსი ეფექტი დაიმზირება Si-შიც, ოღონდ, ტემპერატურათა თანაფარდობას იქ სხვა სახე აქვს: $T_{Bi} < T_{Sb} < T_{As}$.



სურათი 2. დასხივებულ n-ტიპის Ge-ში დენის ძირითადი მატარებლების გამოწვის სტადიის საწყისი ტემპერატურების დამოკიდებულება მალეგირებელი მინარევის კონცენტრაციასა და გვარობაზე: x – დარიშხანი, Δ – ბისმუტი და • – სტიბიუმი.



სურათი 3. დასხივებით p-ტიპში კონვერტირებულ n-ტიპის Ge-ში უკუკონვერსიის (აღდგენის) საწყისი ტემპერატურების დამოკიდებულება მალეგირებელი მინარევის კონცენტრაციასა და გვარობაზე: x – დარიშხანი, Δ – ბისმუტი და • – სტიბიუმი.

ცხრილი 1. გერმანიუმში მინარევილი ატომების პარამეტრები.

მინარევის ტიპი	ატომური რადიუსი, Å [14]	იონური რადიუსი, Å [15]	კოვალენტური რადიუსი, Å [16]	ბორის რადიუსი, Å	აქტივაციის ენერჯია, მევ [17]
As	1.21	0.96	1.18	32	14.0
Sb	1.41	1.19	1.36	45	9.6
Bi	1.46	1.32	1.46	36	12.5

ტემპერატურათა თანაფარდობა Si-ში ახსნილია მარტივად: ტემპერატურის მატებასთან ერთად იწყებს მოძრაობას დეფექტი (მინარევი) და ურთიერთქმედებს სხვა ატომებსა და დეფექტებთან. მოძრაობისას მისი „გავლენის სფერო“ დამოკიდებულია მის ატომურ, იონურ ან კოვალენტურ რადიუსზე (იხ. ცხრილი 1). რაც მეტია ეს რადიუსი, მით უფრო ადრე იწყება ურთიერთქმედება. მაგრამ გერმანიუმისათვის ასეთი ახსნა ადარ გამოდგა. აღმოჩნდა, რომ ეს თანაფარდობა კორელირებს დონორის იონიზების

ენერგიასთან ანუ ელექტრონის ბორის რადიუსთან და არა – მის ატომურ, იონურ ან კოვალენტურ რადიუსთან. Si-ში აქტივაციის ენერგია და ბორის რადიუსი ეთანხმება რიგს $Bi > Sb > As$. სწორედ აქედან მომდინარეობს სილიციუმთან დაკავშირებული შეცდომა. ამრიგად, 77 კ ტემპერატურაზე დასხივებული n-ტიპის Ge-ის კვლევებმა კიდევ ერთ საინტერესო ეფექტს მოჰგინა ნათელი.

3. სინათლისადმი მგრძობიარე რადიაციული დეფექტები

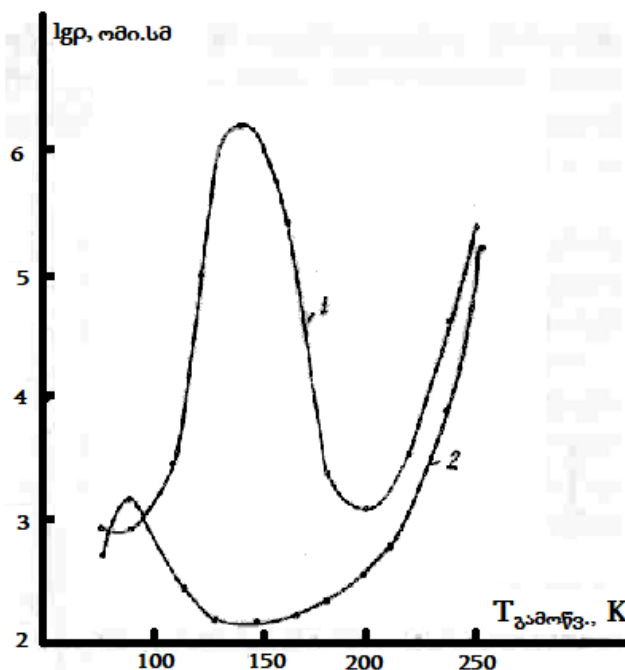
ახლა დასხივებულ n-ტიპის Ge-ში გამოწვის პირველ სტადიაზე დამზერილ დეფექტს დავუბრუნდეთ [7, 18 – 31]. პრინციპში ნებისმიერ კრისტალში, განურჩევლად გამტარებლობის ტიპისა, დასხივების შედეგად მესერიში ერთნაირი ტიპის დეფექტები უნდა იქმნებოდნენ. განსხვავებული მათი მუხტური მდგომარეობები შეიძლება იყოს აკრძალულ ზონაში ფერმის დონის განსხვავებული მდებარეობების გამო. ასეთ შემთხვევაში ელექტროფიზიკური თუ ოპტიკური გაზომვებისას ისინი განსხვავებულად მოიქცევა.

როგორც ადრე აღინიშნა, სხვა ნახევარგამტარული მასალებისაგან განსხვავებით, Ge-ში ფერმის ზღვრული დონე აკრძალული ზონის ქვედა ნახევარშია და ამიტომ დასხივების შედეგად n-ტიპის Ge განიცდის კონვერსიას – იცვლის გამტარებლობის ტიპს და ხდება p-ტიპის. Ge-ის ეს თვისება ძალიან მოსახერხებელი აღმოჩნდა სტრუქტურული და, მათ შორის, რადიაციული წარმოშობის დეფექტების იდენტიფიცირების, მათი ქცევისა და მიგრაციის მექანიზმების შესასწავლად.

როგორც ითქვა, Ge მიეკუთვნება იმ იშვიათ ნახევარგამტართა რიცხვს, სადაც არ „მუშაობს“ სტრუქტურული დეფექტების შესწავლის ისეთი მძლავრი მეთოდი, როგორცაა ეპრ. მაგრამ, Ge-ს აქვს ის უნიკალური თვისება, რომ დასხივების შედეგად შეუძლია შეიცვალოს გამტარებლობის ტიპი, რაც აღმოჩნდა ხელსაყრელი იმ არაპირდაპირი მეთოდებისათვის (ელექტროფიზიკური, ოპტიკური და სხვა), რაც რჩებოდა მკვლევართა განკარგულებაში ასეთ მასალებში დეფექტების შესასწავლად. სწორედ n-ტიპის Ge-ის თვისება, რომ დასხივებით მოხდეს მისი კონვერსია p-ტიპში, იძლევა საშუალებას, რომ გამოწვისას ფერმის დონის ქვედა ნახევრიდან უკან – ზედა ნახევარისაკენ მოძრაობის პროცესში დავაკვირდეთ დეფექტების ქცევას სხვადასხვა მუხტურ მდგომარეობაში. ამ შემთხვევაში დასხივების ტემპერატურას განსაკუთრებით დიდი მნიშვნელობა ენიჭება.

კვლევებმა აჩვენა, რომ აჩქარებული ელექტრონებით 77 კ ტემპერატურაზე დასხივებულ n-ტიპის Ge-ში, რომელმაც შეიცვალა გამტარებლობის ტიპი, და ასევე, დასხივებულ p-ტიპის Ge-ში ვლინდება რადიაციული დეფექტები, რომელებიც სინათლისადმი მგრძობიარობას ამჟღავნებს. სინათლისადმი მგრძობიარობა იმაში მდგომარეობს, რომ ელექტროფიზიკური პარამეტრების (მოცემულ შემთხვევაში ესაა კუთრი წინაღობა ან ხვრელების კონცენტრაცია) გამოწვის მრუდების მსვლელობას გამოწვის ოპტიკური პირობების მიხედვით, სიბნელეში თუ თეთრი სინათლით გაშუქებით, ურთიერთსაპირისპირო ხასიათი აქვს (სურათი 4). სიბნელეში გამოწვა–თეთრი სინათლით გაშუქება ციკლის მოქმედებისას მიმდინარეობს როგორც შექცევადი, ასევე – შეუქცევადი პროცესები. მოცემულ ცვლილებებზე პასუხისმგებელი დეფექტები განსაზღვრულია, როგორც საკუთარი დეფექტების შედარებით მარტივი კომპლექსები, რომელთა შემადგენლობაშიც არ შედის მინარევული ატომი (ანალოგიურად n-ტიპის

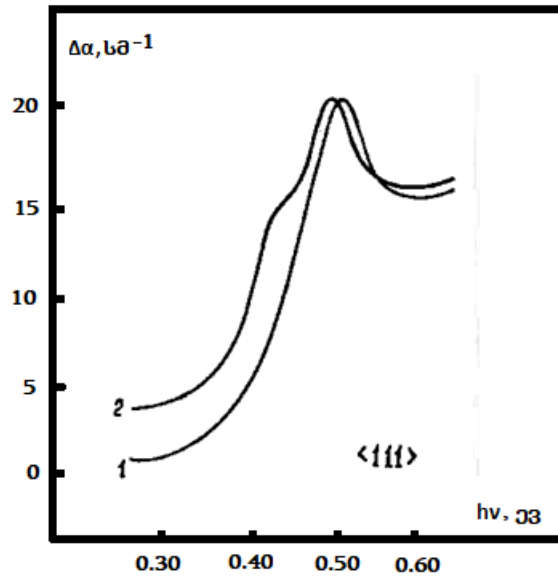
Ge-ში ისეთი დეფექტი, რომელიც გამოიწვება იმავე 220 კ ტემპერატურის სტადიაზე). ჰოლის კოეფიციენტის ტემპერატურული დამოკიდებულების მრუდებიდან განისაზღვრა გერმანიუმის აკრძალულ ზონაში არსებული დეფექტების შესაბამისი ენერგეტიკული დონეები: $E_v + 0.16 \pm 0.02$ და 0.08 ± 0.01 ევ, შესაბამისად, სიბნელეში გამოწვისა და თეთრი სინათლით გაშუქების შემდეგ. ამ დონეების კონცენტრაცია დამოკიდებულია აჩქარებული ელექტრონების ინტეგრალურ ნაკადზე, მაგრამ არა – მინარევის გვარობაზე და მის საწყის კონცენტრაციაზე.



სურათი 4. 77 კ ტემპერატურაზე დასხივებით n-ტიპიდან p-ტიპში კონვერტირებულ Ge-ში კუთრი წინაღობის ცვლილება რადიაციული დეფექტების გამოწვის პროცესში: **1** – სიბნელეში და **2** – სინათლეზე.

მინარევული ფოტოგამტარებლობის სპექტრების შესწავლამ, რომლებიც გადაღებულ იქნა საკვლევი ნიმუშის სიბნელეში გამოწვის შემდეგ და განმეორებით, უშუალოდ პირველი სპექტრის გადაღების შემდეგ, დაადასტურა სინათლის ზემოქმედებით ღრმა დონეების თხელ დონეებში ტრანსფორმირების ფაქტი. ამასთან, ფოტოდენის ფორმაც მიუთითებს კრისტალში როგორც შექცევადი, ისე – შეუქცევადი პროცესების არსებობაზე.

ინფრაწითელ არეში ოპტიკური შთანთქმის კვლევებმა აჩვენა, რომ დასხივებულ ნიმუშებში 0.52 ევ-ის მახლობლად არსებობს შთანთქმის ფართო ზოლი. ნაჩვენებია, რომ ამ ზოლის გამომწვევი დეფექტები გერმანიუმში იქმნება დასხივების დაწყებისთანავე, მაგრამ ისინი შთანთქმას ახორციელებს მხოლოდ გარკვეულ მუხტურ მდგომარეობაში (როდესაც ფერმის დონე აკრძალული ზონის ქვედა ნახევარშია). აქაც შთანთქმის ზოლის ინტენსივობა დამოკიდებულია აჩქარებული ელექტრონების ინტეგრალურ ნაკადზე და არა – მინარევის საწყის კონცენტრაციაზე. ეს შთანთქმის ზოლი ავლენს მკაფიოდ გამოხატულ რეზონანსულ (გაუსის ფორმის) შთანთქმის ხასიათს, რაც მიუთითებს დონე-დონე გადასვლაზე. აღმოჩნდა, რომ თეთრი სინათლით ზემოქმედების შემდეგ ჩნდება ახალი შთანთქმის ზოლი მაქსიმუმით 0.44 ევ-ის რაიონში. ამასთან, 0.52 ევ მაქსიმუმის მქონე შთანთქმის ზოლი არც ქრება და არც მცირდება (სურათი 5).



სურათი 5.77 კ ტემპერატურაზე დასხივებულ $\langle 111 \rangle$ ორიენტაციის Ge-ში შთანთქმის კოეფიციენტის დამოკიდებულება კვანტების ენერგიაზე: **1** – სიბნელეში გამოწვისა და **2** – თეთრი სინათლის ზემოქმედების შემდეგ. $\Delta\alpha = \alpha_R - \alpha_C$, სადაც α_R და α_C , შესაბამისად, დასხივებული და საკონტროლო ნიმუშების შთანთქმის კოეფიციენტებია.

სიბნელეში განმეორებითი გამოწვა აღადგენს პირველად მდგომარეობას: 0.44 ევ მაქსიმუმის მქონე შთანთქმის ზოლი ქრება და ეს პროცესი შექცევადია ანუ შეიძლება განმეორებულ იქნას რამდენჯერაც გვსურს. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ 0.44 და 0.52 ევ ენერგიის კვანტების შთანთქმისას ნიმუშებში ფოტოდენის ზრდა არ დაიმზირება.

ელექტროფიზიკური და ოპტიკური გაზომვებით მიღებული შედეგები აშკარად მიანიშნებენ, რომ საქმე გვაქვს ე.წ. დიპოლური ტიპის კვაზისტაბილურ კომპლექსთან, რომელიც შედგება ორი კომპონენტისაგან. ეს კომპლექსი არ შეიცავს მალეგირებელი მინარევის ატომებს, იგი შედგება ერთზე მეტი ვაკანსიისაგან და სიბნელეში გამოწვა–თეთრი სინათლით გაშუქება ციკლის ზემოქმედებით იცვლის მუხტურ მდგომარეობას.

ვინაიდან მოცემული დეფექტი დიპოლური ტიპის კომპლექსი აღმოჩნდა, ჩატარებულ იქნა კვლევები ერთდერმა კუმშვისა და პოლარიზებული სხივის გამოყენებით შესაძლო სივრცული ორიენტაციის განსასაზღვრად. საგანგებოდ დამზადებულ, მკაცრად ორიენტირებულ ნიმუშებზე ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ, საკვლევი დეფექტი ავლენს დიქროიზმის თვისებას და, სილიციუმისაგან განსხვავებით, ეს თვისება დაიმზირება ერთდერმა წნევის მოდების გარეშე – ერთდერმა წნევა მხოლოდ აძლიერებს ეფექტს. ეს ეფექტი ახსნილია დასხივებულ გერმანიუმში ძლიერი მექანიკური დამაბულობების არსებობით, რაც ეპრ-ის გამოუსადეგრობის ერთ-ერთ მიზეზად სახელდება. ნაჩვენებია, რომ მოცემული კომპლექსის დიპოლური მომენტი ორიენტირებულია $\langle 110 \rangle$ კრისტალურ მიმართულებასთან ახლოს, ხოლო დიპოლის დერმი მდებარეობს $\langle 111 \rangle$ მიმართულების გასწვრივ, ანუ მას ახასიათებს ატომური სიმეტრია $\langle 111 \rangle$ დერმის მიმართ.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, გერმანიუმისათვის უსარგებლო, ეპრ-ის გამოყენებით ჩატარებული კვლევების შედეგად სილიციუმში შესაძლებელი გახდა მთელი რიგი დეფექტების იდენტიფიცირება. შედარებისას, აშკარად იკვეთება

გერმანიუმში საკვლევი „სინათლისადმი მგრძობიარე“ დეფექტების მთელი რიგი თვისებების (გამოწვის რეჟიმი, აქტივაციის ენერგია, შთანთქმის ზოლის დიქროიზმი და რეზონანსული ხასიათი, აკრძალულ ზონაში რამდენიმე დონის არსებობა, სივრცული ორიენტაცია და სხვა) მსგავსება სილიციუმში დივაკანსიის თვისებებთან. გერმანიუმსა და სილიციუმში მრავალი კრისტალოგრაფიული, ელექტროფიზიკური და ოპტიკური პარამეტრის მსგავსების გამო, მკვლევრები ხშირად იხრებიან მათ შორის არც თუ უსაფუძვლო ანალოგიების გატარებისაკენ. ითვლება, რომ ამ ორ მასალაში მიმდინარე პროცესების საერთო სურათი თვისობრივად იდენტური უნდა იყოს (განსხვავებები შესაძლებელია რიცხვით მახასიათებლებში).

ასეთი ანალოგიის გამოყენებას მივყავართ იმ დასკვნამდე, რომ გერმანიუმში სინათლისადმი მგრძობიარე დეფექტები წარმოადგენენ დივაკანსიებს, რომლებიც p-ტიპის ან p-ტიპში 77 კ ტემპერატურაზე დასხივების შედეგად კონვერტირებული n-ტიპის გერმანიუმში არსებობენ 77 – 250 კ ტემპერატურულ დიაპაზონში და სიბნელეში გამოწვა-თეთრი სინათლით გაშუქება ციკლის მოქმედების შედეგად იცვლის თვისებებს: გამოწვის მრუდის მსვლელობა, გამოწვის პირობების მიხედვით (სიბნელეში თუ თეთრი სინათლით გაშუქებით), ურთიერთსაპირისპიროა. ელექტრულად (ჰოლის კოეფიციენტის ტემპერატურული მახასიათებლების მიხედვით) ისინი გვევლინება ენერგეტიკულ დონეებად აკრძალულ ზონაში: $E_v + 0.08 \pm 0.01$ და 0.16 ± 0.02 ევ, მუხტური მდგომარეობის მიხედვით, ხოლო ინფრაწითელი შთანთქმის სპექტრებში იძლევა შესაბამისად ორ ზოლს 0.44 და 0.52 ევ-ის ტოლი მაქსიმუმებით. ეს დეფექტები ავლენს დიქროიზმის თვისებას.

შემდგომში პროფ. ა. გერასიმოვის კოლეგებმა მისი სამეცნიერო ჯგუფიდან გააგრძელეს კვლევები აღნიშნული მიმართულებით და სილიციუმისათვის განიხილეს [27 – 31] კომპლექსური, მათ შორის, ეპრ-ის შესწავლს შედეგად დადგენილი, დივაკანსიის ენერგეტიკული სქემა და სივრცული მოდელი. აჩვენეს, რომ ისინი თვისობრივად სრულყოფილად მიესადაგება დივაკანსიებს გერმანიუმშიც. ამ მოდელის მიხედვით, სავალენტო ზონის კიდესთან დივაკანსია ქმნის ოთხ დონეს, რომელთაგანაც ორი იმყოფება უშუალოდ სავალენტო ზონის ზედა კიდესთან, იმდენად ახლოს, რომ შესაძლებელია მასში შეღწიონ კიდევ, ხოლო დანარჩენი ორი – უფრო მაღლა 0.08 და 0.16 ევ მანძილებზე.

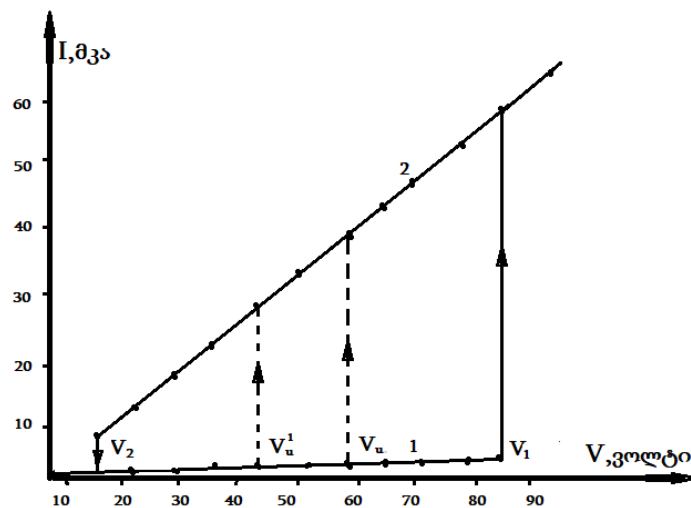
დივაკანსიას გერმანიუმში, ისევე როგორც სილიციუმში, სივრცული ორიენტაცია ახასიათებს – მისი დიპოლური მომენტი ორიენტირებულია $\langle 110 \rangle$ კრისტალურ მიმართულებასთან ახლოს და გააჩნია ატომური სიმეტრია $\langle 111 \rangle$ ღერძის მიმართულებით. ა. გერასიმოვის კოლეგებმა განაზოგადეს მიღებული შედეგები და განსაზღვრეს, რომ გერმანიუმში, სილიციუმში და გალიუმის არენიდში ფერმის დონის ზღვრულ მნიშვნელობაზე სწორედ დივაკანსიებია პასუხისმგებელი. და რადგან ამ მასალებში დივაკანსიას აქვს ოთხი დონე, რომელთაგან ორი იმყოფება სავალენტო ზონასთან ახლოს, ხოლო ორი – აკრძალული ზონაში, ეს ორი დონე განსაზღვრავს მასალის ამფოტერულობას. ისინი ელექტრულად აქტიურია და 5 მუხტურ მდგომარეობაში შეუძლია იმყოფებოდეს: $-1, -2, 0, +1$ და $+2$.

როცა გვაქვს დადებითად დამუხტული დონეები (ფერმის დონე მათ ქვემოთაა), დივაკანსია იქცევა, როგორც დონორი, და ფერმის დონე გამტარებლობის ზონისაკენ მიიწევს. მაგრამ როგორც კი ის გადაკვეთს ზედა დონეს, დეფექტი უარყოფითად იმუხტება, ხდება აქცეპტორი და ფერმის დონე ისევ სავალენტო ზონისკენ მიიწევს. ამიტომ როგორც კი ფერმის დონე მოხვდება ამ ორ დონეს შორის ის პრაქტიკულად

ველარ მოძრაობს – „დამაგრებულია“. სილიციუმში და გალიუმის არსენიდში დივაკანსიის დონეები იმყოფება აკრძალული ზონის შუასთან ახლოს, ხოლო გერმანიუმში – სავალენტო ზონასთან ახლოს ($E_v + 0.08 \pm 0.01$ და 0.16 ± 0.02 ევ). აქედან განისაზღვრება ფერმის ზღვრული დონის მნიშვნელობა.

4. რადიაციით შექმნილი n-p გადასასვლელის თვისებები

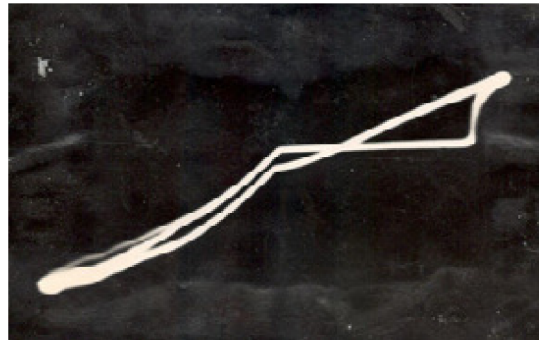
ვინაიდან უკვე ვიცით, რომ n-ტიპის Ge-ის გარკვეული დოზით დასხივების შედეგად იგი განიცდის გამტარებლობის ტიპის კონვერსიას, ჩატარდა ექსპერიმენტები რადიაციით შექმნილ ე.წ. გრძელი დიოდების გამოსაკვლევად [32]. ექსპერიმენტში გერმანიუმის ნიმუშების ნაწილი იფარებოდა რადიაციით არაგანჭოლვადი მასალით ისე, რომ ნიმუშის ნაწილი სხივდებოდა, ნაწილი კი რჩებოდა პირვანდელ მდგომარეობაში. შედეგად, დამზადდა რადიაციით შექმნილი დიოდები n-p გადასასვლელის სახით. იზომებოდა მათი როგორც დინამიკური, ისე – სტატიკური ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები (ვამ). ვინაიდან საკვლევი n-p გადასასვლელი მიღებულია დასხივების შედეგად, რომელიც აკრძალულ ზონაში წარმოქმნის ღრმა ენერგეტიკულ დონეებს, მათ სპეციფიკური თვისებები უნდა ახასიათებდეს. მართლაც, კვლევებმა აჩვენა, რომ აზოტის დუდილის ტემპერატურაზე ნიმუშების მაღალი წინაღობის გამო, ვამ-ების გაზომვა შეუძლებელი აღმოჩნდა. მაგრამ, საკმარისი იყო მისი განათება თეთრი ან ინფრაწითელი სინათლით (კვანტების ენერგიით 0.35 – 0.75 ევ), რომ დიოდის გამართვის ეფექტი უკვე დაიშინებოდა. სპეციფიკა იმაშია, რომ სინათლის დასხივების პროცესში 77 კ ტემპერატურაზე ვამ-ის ჩამკეტი მიმართულებით ჰისტერეზისი დაიშინებდა (სურათები 6 და 7).



სურათი 6. „გრძელი დიოდების“ სტატიკური ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი ჩამკეტი მიმართულებით.

სურათზე 6 მოცემულია „გრძელი დიოდების“ სტატიკური ვამ ჩამკეტი მიმართულებით. ძაბვის თანდათანობით გაზრდით გარკვეულ V_1 მნიშვნელობამდე, დენი ჩამკეტი მიმართულებით გრაფიკის (შტო 1) შესაბამისად იზომება. ძაბვის V_1 მნიშვნელობაზე დაიშინება დენის მყისიერი ზრდა – დავარქვათ ამ მოვლენას „გარღვევა“ – და ნიმუში გადადის ახალ მდგომარეობაში, რომელსაც ვამ-ის შტო 2 შეესაბამება. ახლა თუ შევამცირობთ ან გავზრდით ძაბვას, დენის მაჩვენებელი

იმოდრავებს შტოზე 2 ძაბვის რაღაც V_2 მნიშვნელობამდე, რის შემდეგაც დენის მნიშვნელობები შტოს 1 შესატყვისი იქნება. ეს პროცესები ურთიერთშექცევადია. იმ შემთხვევაში, როდესაც ჩამკეტი მიმართულებით ძაბვას იმპულსურად მივაწვდით, „გარღვევა“ ძაბვის უფრო ნაკლებ V_u მნიშვნელობაზე მოხდება. შემჩნეულია, რომ „გამრღვევი“ ძაბვის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ძაბვის გარეშე ნიმუშის დაყოვნების დროზე – რაც უფრო მცირეა ეს დრო, მით უფრო მეტია „გამრღვევი“ ძაბვა (სურათი 7).



სურათი 7. „გრძელი დიოდების“ დინამიკური ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი.

ამ ეფექტის ასხსნელად მკვლევრებმა დაუშვეს, რომ ნიმუში შედგება ერთმანეთთან მიმდევრობით ჩართული ორი ნაწილისაგან. ესენია ელემენტი, რომელშიც ადგილი აქვს „გარღვევას“ და რომლის ვამ-ზეც არის უარყოფითი დიფერენციალური წინააღმდეგობის მონაკვეთი, და ელემენტი, რომელიც ომური „დატვირთვის“ როლს ასრულებს. იგულისხმება, რომ ამ შემთხვევაში „დატვირთვა“ ნიმუშის მაღალმომიანი ნაწილია. ხოლო ვამ-ის უარყოფითი წინააღმდეგობის მონაკვეთი n-p გადასასვლელია, სადაც ადგილი აქვს რადიაციული დეფექტების შესაბამისი ღრმა დონეების გარღვევას. ცნობილია [33, 34], რომ კომპენსირებულ გერმანიუმის ვამ-ზე გარღვევისას დაიმზირება უარყოფითი წინააღმდეგობის უბანი.

იგივე ეფექტი სხვების მიერ დამზერილ იქნა ამორფული გერმანიუმის დიოდებშიც და გამოყენებულია ელექტრონიკაში სწრაფი გადამრთველების დასამზადებლად.

5. რადიაციის ტექნოლოგიაში გამოყენების მაგალითები

პრაქტიკამ აჩვენა, რომ რადიაცია დიდი წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც ტექნოლოგიური მეთოდი მყარსხეულოვანი ხელსაწყოების დამზადების პროცესში. როგორც უკვე აღინიშნა, რადიაციულ ტექნოლოგიებს ტრადიციულთან შედარებით აქვს მთელი რიგი უპირატესობებისა. შედარებით დაბალი მუშა ტემპერატურები, პროცესების შექცევადობა და ტექნოლოგიური ციკლის ნებისმიერ ეტაპზე გამოყენების შესაძლებლობა (რადიაციის მაღალი გამჭოლუნარიანობის წყალობით) ამ მეთოდს უნიკალურს ხდის ნახევარგამტარული ელექტრონიკის წარმოებისთვის. კვლევებმა აჩვენა, რომ რადიაციული ტექნოლოგიების საშუალებით შესაძლებელია ისეთი შედეგების მიღება, რომლებიც პრინციპულად მიუღწეველია ტრადიციული (თერმული) მეთოდებით. რადიაციული დეფექტების ქცევის და მათი კონკრეტული მასალების ელექტროფიზიკურ, ოპტიკურ და მექანიკურ თვისებებზე

ზემოქმედების თავისებურებების ზედმიწევნით ცოდნამ მკვლევრებს საშუალება მისცა თავად რადიაცია გამოეყენებინათ მასალების თვისებების კონტროლირებადი შეცვლის მიზნით. მოვიყვანთ რამდენიმე ასეთ მაგალითს [35 – 39].

ზემოთ აღწერილი „გრძელი დიოდი“ მიღებულია რადიაციის მეშვეობით და ამდენად ის შეიძლება ჩაითვალოს ნახევარგამტარული ხელსაწყო დაზიანების ხერხად. დასხივების პრაქტიკამ აჩვენა, რომ საწყის – მცირე დოზებზე ნახევარგამტარის ელექტროფიზიკური პარამეტრები, გაუარესების ნაცვლად, უმჯობესდება ანუ, მესრის დაზიანების ნაცვლად, ადგილი აქვს კრისტალის მოწესრიგებულობის ამაღლებას. ამ ეფექტს „მცირე დოზის ეფექტი“ ეწოდა. იგი პირველად დამზერილ იქნა პროფ. ა. გერასიმოვის და მისი ჯგუფის მიერ შრომაში [35]. შემდგომში კი განვითარდა და მის საფუძველზე შეიქმნა ნახევარგამტარების საკუთარი (გენეტიკური) დეფექტებისაგან გაწმენდის რადიაციულ-ტექნოლოგიური მეთოდი [36 – 39]. ამ მეთოდის საშუალებით შესაძლებელი გახდა მიკროსქემების დასამზადებლად განკუთვნილი Si-ის ფირფიტის ზედაპირზე, ტექნოლოგიური პროცესების დაწყებამდე, დასხივებით ამაღლებულიყო პარამეტრების ერთგვაროვნება, რაც საბოლოო ჯამში იძლევა მზა ნაკეთობების ვარგისიანობის პროცენტის გაზრდას. იგივე რადიაციული მეთოდი იქნა გამოყენებული ოპტოელექტრონული ხელსაწყოების (შუქდიოდები, მაშუქი სკალები და სხვა) წარმოების ტექნოლოგიაში, რამაც საგრძნობლად (2 – 5-ჯერ) გაზარდა მაშუქი ელემენტების სიკაშკაშე.

ნახევარგამტარული ლოგიკური ინტეგრალური მიკროსქემების (იმს) დაზიანებისას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება მათ სწრაფქმედებას. ამისთვის ნახევარგამტარში შეჰყავთ მინარევი (Si-ში Au), რომელიც აკრძალულ ზონაში იძლევა ღრმა რეკომბინაციურ დონეებს. ტექნოლოგიურად ამგვარი პროცესები მაღალტემპერატურულია (>900°C) და ცვალებადი წარმატებით მიმდინარეობენ. იმს-ის სწრაფქმედება კონტროლდება უკვე მზა პროდუქციაზე და ხშირად ამ პარამეტრის მიხედვით წუნის დიდ პროცენტსაც იძლევა. ვინაიდან რადიაციის ზემოქმედების დროს კრისტალში იქმნება დეფექტები ღრმა რეკომბინაციური დონეებით, რომელთა დიდი ნაწილიც გამოიწვევა მაღალ ტემპერატურებზე (Si-ში დივაკანსია 500, ხოლო კომპლექსი ვაკანსია + წყალბადის 600 კ-ის ზემოთ), გადაწყდა წარმოებისას სწრაფქმედების პარამეტრით წუნში გადატანილი იმს-ები „გაცოცხლებულიყო“ რადიაციის ზემოქმედებით ოთახის ტემპერატურაზე. რადიაციის მაღალი გამჭოლუნარიანობის გამო ეს ოპერაცია შეიძლება ჩატარდეს უკვე კორპუსირებულ იმს-ზეც კი. შედეგმა მოლოდინი გაამართლა: სამეცნიერო-საწარმოო გაერთიანების (სსგ) „მიონი“ ქარხანაში გაშვებულ საკონტროლო პარტიაში ვარგისიანი ნაწარმის ფაქტიური პროცენტი 36-დან 42%-მდე გაიზარდა. გარდა ამისა, რადიაციის საშუალებით საწყის მასალაში, Si-ში, მოხერხდა ოქროს მინარევის რადიაციული დეფექტების შესაბამისი ღრმა რეკომბინაციული დონეებით ჩანაცვლება, რამაც გამორიცხა ოქროთი ლეგირების საჭიროება და საკმაო მოგება მისცა წარმოებას ოქროს ნედლეულის ეკონომიის შედეგად.

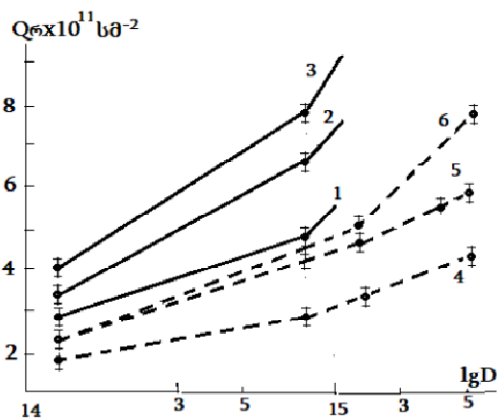
6. რადიაციის გავლენა სისტემებზე ლითონი–დიელექტრიკი–ნახევარგამტარი

რადიაციის მოქმედებით ლითონი–დიელექტრიკი–ნახევარგამტარი (ლდნ) ტიპის იმს-ის პარამეტრები განიცდის დეგრადაციას [40 – 42]. ამიტომ მიკროელექტრონიკის ერთ-ერთი ძირითადი პრობლემა იყო და ასეთად რჩება მისი რადიაციული მდგრადობის (რმ) ამაღლება.

ამ სისტემაში რადიაციის მიმართ ყველაზე მგრძობიარე მასალა დიელექტრიკული ფირებია, რომელიც ნებისმიერ ლდნ იმს-ში აქტიურ ან პასიურ ფუნქციებს ასრულებს [40]. ამიტომ სსგ-ში „მიონი“ ნახევარგამტარებზე და ნახევარგამტარულ ხელსაწყოებზე რადიაციის გავლენის შესწავლის განყოფილების ძირითადი ამოცანა იყო იმს-ების და მათი ელემენტების რმ-ის გაზრდა. კვლევებმა აჩვენა, რომ იმს-ში ფართოდ გამოყენებადი სილიციუმის ორჟანგი SiO_2 ვერ იძლევა რმ-ხელსაწყოების შექმნის შესაძლებლობას და საჭიროა მისი შეცვლა სხვა ისეთი დიელექტრიკული მასალით, რომელიც რადიაციის ზემოქმედების შედეგად მუხტს არ დააგროვებს. ამისათვის კი საჭიროა, რომ დიელექტრიკში იმთავითვე არსებობდეს ჩამჭერი ცენტრები როგორც ხვრელების, ასევე ელექტრონებისათვის ანდა დენის ორივე ტიპის მატარებელს სიდიდით ახლოს მყოფი ძვრადობები ჰქონდეთ. მიახლოებით ასეთი თვისებების დიელექტრიკად შეირჩა ალუმინის ჟანგი Al_2O_3 . დიელექტრიკზე რადიაციის მოქმედების მექანიზმი რთულია – ის მოქმედებს დიელექტრიკის არეში, გამყოფ საზღვარზე Si-დიელექტრიკი ან ნახევარგამტარის ზედაპირის წინა არეზე. ამას ყველაფერს განსაზღვრავს საწყისი პარამეტრები ანუ დიელექტრიკის მიღების ტექნოლოგია. დიელექტრიკზე რადიაციული ზემოქმედების ეფექტის უშუალო გამოვლენაა ელექტრონი-ხვრელი წყვილების შექმნა და მათი ქცევა კრისტალში. სხვადასხვა ტექნოლოგიით შესაძლებელია წყვილის კრისტალში ქცევის რეგულირება.

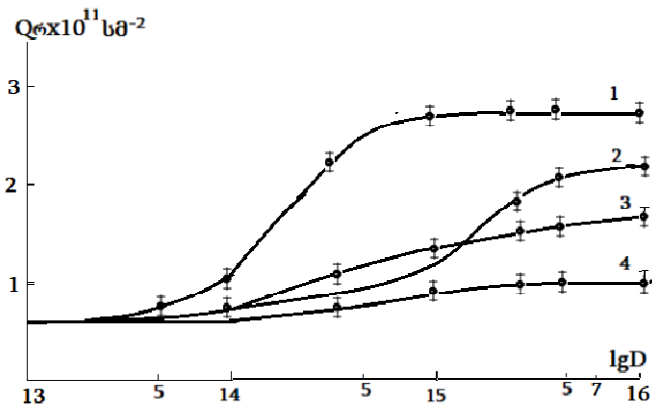
შეიქმნა სტიმულირებული პლაზმური ანოდირების ტექნოლოგია, რომელიც დაბალტემპერატურული და ეფექტურია [41]. ლდნ-სისტემაზე რადიაციული გავლენის შესწავლა ხორციელდება მაიონებელი რადიაციის, კერძოდ, ელექტრონების ან გამა-გამოსხივების მოქმედებით. მძიმე ნაწილაკების მოქმედების შესწავლა არაეფექტურია, რადგან ისინი მხოლოდ მოცულობით დეფექტებს წარმოქმნის.

შემუშავებულმა კატალიზური პლაზმური ანოდირების (კპა) ტექნოლოგიამ აჩვენა, რომ ასე მიღებული SiO_2 -ის დიელექტრიკული ფირები უფრო რმ-ია, ვიდრე სტანდარტული ტექნოლოგიით (მაღალტემპერატურული, თერმული) მიღებულები. ეს ნაჩვენებია სურათზე 8. ყველა შემთხვევაში დიელექტრიკული ფირების სისქე 90 ნმ-ს შეადგენდა. აქედან ჩანს, რომ ყოველთვის დადებითია დაგროვილი მუხტი, რომელიც ლითონზე მოდებული დადებითი წანაცვლების ძაბვისას მეტია, ვიდრე უარყოფითი ძაბვისას. დასხივების დოზის ზრდასთან ერთად მუხტის დაგროვება დაიძვირება.

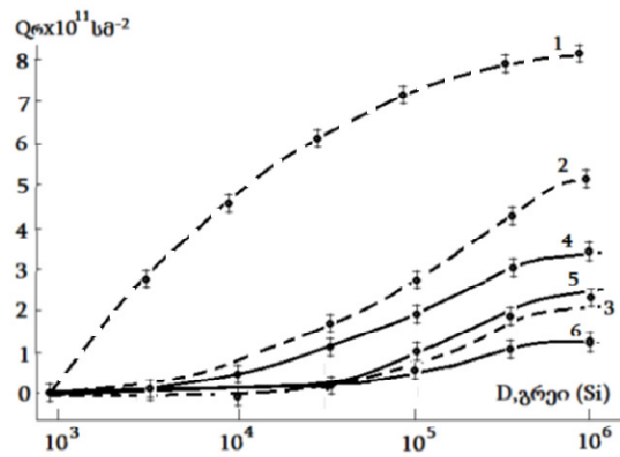


სურათი 8. Al-SiO_2 (თერმული)-Si (—) და Al-SiO_2 (კპა)-Si (-----) სტრუქტურებში რადიაციით ინდუცირებული მუხტის დამოკიდებულება ელექტრონების ნაკადზე, დასხივების დროს მასზე სხვადასხვა ძაბვის მოდებისას: 0 (1 და 4), -3 (2 და 5) და +2 ვ (3 და 6).

Al-Al₂O₃-Si სტრუქტურაზე ელექტრონული დასხივების ექსპერიმენტული შედეგები ნაჩვენებია სურათზე 9. ელექტრონების ინტეგრალური ნაკადის ზრდით დაიმზირება Al₂O₃ დიელექტრიკში მუხტის დაგროვება, მაგრამ ეს უფრო მცირეა, ვიდრე SiO₂-ში (სურათი 8) და უფრო დაბალ დოზაზე გადის ნაჯერობაზე. რადიაციის ზემოქმედების მიხედვით, კიდევ მეტი განსხვავებაა გამა-სხივების მოქმედებისას SiO₂-ისა და Al₂O₃-ის შემცველ ლდნ-სტრუქტურებს შორის (სურათი 10). ამ სურათიდან ჩანს, რომ რადიაციულად ინდუცირებული მუხტი SiO₂-ში ყველა შემთხვევაში მეტი გროვდება, ვიდრე Al₂O₃-ში.



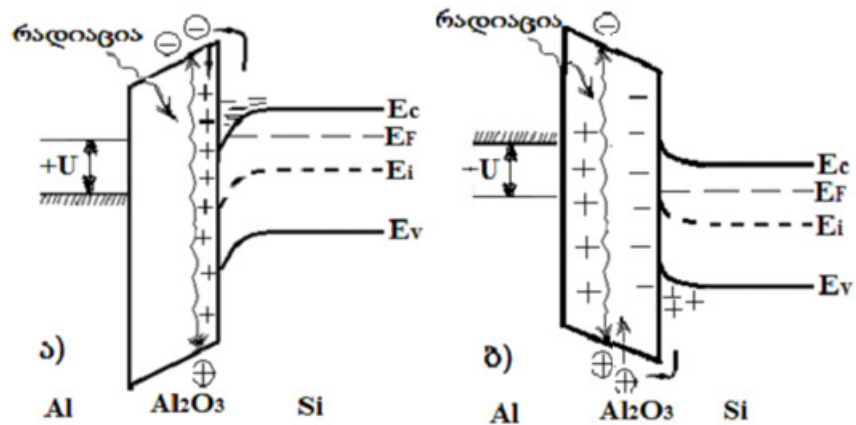
სურათი 9. Al-Al₂O₃-Si სტრუქტურაზე რადიაციით ინდუცირებული მუხტის დამოკიდებულება ელექტრონების ნაკადზე, დასხივების დროს მასზე სხვადასხვა ძაბვის მოდებისას: +2 (1), +1 (2), 0 (3) და -1 ვ (4).



სურათი 10. Al-Al₂O₃-Si (—) და Al-SiO₂-Si (---) სტრუქტურებში რადიაციით ინდუცირებული მუხტის დამოკიდებულება გამა-დასხივების დოზაზე, დასხივების დროს მასზე სხვადასხვა ძაბვის მოდებისას: +2 (1 და 4), -2 (2 და 5) და 0 ვ (3 და 6).

შეიძლება ავაგოთ Al₂O₃ დიელექტრიკით ლდნ-სტრუქტურების რადიაციული დასხივებით მიღებული შედეგების თვისებრივი მოდელი [42]. ეს მოდელი Al₂O₃-ში ითვალისწინებს ელექტრონული და ხვრელური ტიპის ჩამჭერების არსებობას, ელექტრონებისა და ხვრელების ინჟექციას სილიციუმის ფუძემდრდან და ჩამჭერებზე მათ რეკომბინაციას.

ლდნ-სტრუქტურაზე წანაცვლების დადებითი ძაბვისას (სურათი 11ა), რადიაციით ინდუცირებული ელექტრონები ძირითადად ჩაიჭირება Al-Al₂O₃ გამყოფ საზღვარზე, ხოლო ხვრელები – Si-Al₂O₃ გამყოფ საზღვარზე, მაგრამ ამ დადებითი მუხტის დიდი ნაწილი ან კომპენსირდება ანდა რეკომბინირდება სილიციუმიდან ელექტრული ველით ინჟექტირებულ ელექტრონებთან. ელექტრული ველით ინჟექტირებული ელექტრონებისა და რადიაციით ინდუცირებული ხვრელების დენების ფარდობა იზრდება წანაცვლების ძაბვის სიდიდის ზრდით ანუ წანაცვლების ძაბვის ზრდით მცირდება ეფექტური დადებითი მუხტი (სურათი 10, მრუდი 4). ლდნ-სტრუქტურაზე უარყოფითი წანაცვლების ძაბვისას (სურათი 11ბ) კი რადიაციით ინდუცირებული ელექტრონი-ხვრელის წყვილები ისე განცალკევდებიან დიელექტრიკში, რომ Si-Al₂O₃ საზღვრის ახლოს ჩაიჭირება ელექტრონები, ხოლო ხვრელები, ძირითადად – Al-თან. Al₂O₃-ში ჩამჭერებზე ელექტრონული მუხტი არ ვლინდება ან სილიციუმიდან ინჟექტირებულ ხვრელებთან მათი რეკომბინაციის ანდა Si-Al₂O₃ საზღვართან ინჟექტირებულ ხვრელებით მათი კომპენსირების გამო. უარყოფითი წანაცვლების სიდიდის ზრდით იზრდება დადებითი მუხტის სიდიდეც (სურათი 10, მრუდი 5).



სურათი 11. Al₂O₃ დიელექტრიკში რადიაციით ინდუცირებული მუხტის დაგროვების მოდელი, როცა რადიაციის მოქმედებისას ლითონზე მოდებულია წანაცვლების დადებითი (ა) და უარყოფითი (ბ) ძაბვები.

ამრიგად, Al₂O₃-ის უფრო მაღალი რმ SiO₂-თან შედარებით განპირობებულია იმით, რომ Al-ის პლაზმური ანოდირებით მიღებულ Al₂O₃-ში არსებობს ჩამჭერი ცენტრები როგორც ელექტრონების, ისე – ხვრელებისათვის, მაშინ როდესაც SiO₂-ში ისინი მხოლოდ ხვრელებისთვისაა.

ლდნ-სისტემებზე რადიაციის გავლენის შესწავლის შედეგები ასე ჯამდება:

- (ა) კატალიზური პლაზმური ანოდირებით მიღებული SiO₂ რადიაციის მიმართ უფრო ნაკლებადაა მგრძობიარე, ვიდრე იმს-ების სერიულ წარმოებაში გამოყენებადი თერმული SiO₂.
- (ბ) ექსპერიმენტულად დადგინდა, რომ კატალიზური პლაზმური ანოდირებით მიღებული Al₂O₃ რადიაციულად უფრო მდგრადია, ვიდრე სხვადასხვა მეთოდებით მიღებული SiO₂.
- (გ) წარმოდგენილია Al₂O₃ დიელექტრიკიან ლდნ-სტრუქტურაში რადიაციით ინდუცირებული მუხტის დაგროვების მოდელი, რომელიც ითვალისწინებს

Al₂O₃-ში ელექტრონებისა და ხვრელების ჩამჭერების არსებობას, ფუძემდებრიდან ელექტრონებისა და ხვრელების ინჟექციას და ამ ჩამჭერებზე რეკომბინაციას.

დასასრულ უნდა აღინიშნოს, რომ ამ ნაშრომში მოყვანილია პროფ. ა. გერასიმოვისა და მისი სამეცნიერო ჯგუფის მიერ ნახევარგამტარულ მასალებსა და სტრუქტურებზე რადიაციის გავლენის შესახებ შესრულებული კვლევების მხოლოდ გარკვეული ნაწილი. ერთ შრომაში მათი სრულად გადმოცემა შეუძლებელი იქნებოდა. ეს კვლევები გაგრძელდა და განვითარდა სამეცნიერო ჯგუფის წევრების შემდგომ მოღვაწეობაში.

დამოწმებანი

- [1] А. Б. Герасимов, Б. М. Коноваленко. О низкотемпературном облучении Ge быстрыми электронами. Физ. твер. тела, 1964, 6, 3184.
- [2] А. Б. Герасимов, Б. М. Коноваленко. О низкотемпературном отжиге германия, облученного быстрыми электронами. Физ. твер. тела, 1965, 7, 2545.
- [3] В. С. Вавилов. Действие излучений на полупроводники, 1963, Москва, Изд. физ.-мат. лит.
- [4] В. С. Вавилов, Н. А. Ухин. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах, 1969, Москва, Атомиздат.
- [5] А. Б. Басман, А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе. Изохронный отжиг радиационных дефектов в Ge, облученном быстрыми электронами при T = 77 К. В. сб.: Радиационная физика неметаллических кристаллов, 1971, Киев, Наукова думка, 207.
- [6] А. Р. Басман, А. Б. Герасимов, Н. Г. Кахидзе, Б. М. Коноваленко. О радиационных дефектах в германии, облученном γ -лучами при T = 77 К. В. сб.: Радиационная физика неметаллических кристаллов, 1971, Киев, Наукова думка, 218.
- [7] А. Р. Басман, А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе, Н. Г. Кахидзе. О светочувствительных радиационных дефектах в Ge, облученном при T = 77 К. В. сб.: Радиационная физика неметаллических кристаллов, 1971, Киев, Наукова думка, 210.
- [8] А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе. О кинетике отжига радиационных дефектов в германии, облученном быстрыми электронами при T = 77 К. В. сб.: Радиационная физика кристаллов и p-n переходов, 1972, Минск, Наука и техника, 55.
- [9] А. Р. Басман, А. Б. Герасимов, М. К. Гогтишвили, Н. Д. Долидзе, К. И. Каспарян, Н. Г. Кахидзе, Б. М. Коноваленко. Влияние донорных примесей на отжиг радиационных дефектов в германии. Физ. тех. полупров., 1973, 7, 1377.
- [10] А. Б. Герасимов, М. К. Гогтишвили, Н. Д. Долидзе. Радиационные дефекты в Ge p-типа, облученном быстрыми электронами при низких температурах. В. сб.: Радиационные эффекты в германии и кремнии. Препринт КИЯИ-76-24, 1976, Киев, АН Украинской ССР, 44.
- [11] А. Б. Герасимов, М. К. Гогтишвили, Н. Д. Долидзе, Б. М. Коноваленко, М. В. Маградзе. Исследование стадии отжига в области 300 К в германии, облученном быстрыми электронами. Физ. тех. полупров., 1978, 12, 1482.

- [12] А. Б. Герасимов, М. К. Гоготишвили, Н. Д. Долидзе, Б. М. Коноваленко. Об отжиге радиационных дефектов в германии, облученном быстрыми электронами при 77 К, на стадии 220 К. *Физ. тех. полупров.*, 1998, 12, 1427.
- [13] Н. Д. Долидзе. Исследование природы радиационных дефектов в германии р-типа, облученном быстрыми электронами при температуре 77 К. Дисс. на соис. уч. степ. канд. физ.-мат. наук, 1978, Тбилиси, Тбилисский гос. унив.
- [14] К. Дей, Д. Селбин. Теоретическая неорганическая химия, 1969, Москва, Химия.
- [15] Б. И. Болтакс. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках, 1972, Ленинград, Наука.
- [16] Л. Паулинг. Природа химических связей, 1947, Москва, Госхимиздат.
- [17] А. Милнс. Примеси с глубокиви уровнями в полупроводниках, 1977, Москва, Мир.
- [18] А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе. Влияние света на низкотемператный отжиг радиационных дефектов в германий. *Физ. тех. полупров.*, 1967, 1, 982.
- [19] А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе. О кинетике отжига светочувствительных дефектов в германии, облученном при $T = 77$ К. В. сб.: Радиационные дефекты в полупроводниках, 1972, Минск, Белорусский гос. унив., 117.
- [20] А. Р. Басман, А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе, Н. Г. Кахидзе, Б. М. Коноваленко. Об отжиге радиационных дефектов в образцах германия р-типа. *Физ. тех. полупров.*, 1972, 6, 1398.
- [21] А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе, М. Г. Мцхетадзе. ИК-поглощение в Ge, облученном быстрыми электронами при температуре 77 К. В. сб.: Радиационные эффекты в германии и кремнии. Препринт КИЯИ-76-24, 1976, Киев, АН Украинской ССР, 46.
- [22] А. Б. Герасимов, М. К. Гоготишвили, М. Ш. Джандиери, Н. Д. Долидзе, А. А. Церцвадзе. О возможном механизме взаимодействия радиационных дефектов с химическими примесями. В. сб.: Радиационные эффекты в германии и кремнии. Препринт КИЯИ-76-24, 1976, Киев, АН Украинской ССР, 38.
- [23] А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе, Б. М. Коноваленко, М. Г. Мцхетадзе. Исследование полосы поглощения в области 0.52 эВ, в германии, облученном быстрыми электронами при температуре 77 К. *Физ. тех. полупров.*, 1977, 11, 1349.
- [24] А. Б. Герасимов, А. Д. Давитури, Н. Д. Долидзе, К. И. Каспарян, Г. Л. Офенгейм. Влияние одноосного сжатия на образование и отжиг радиационных дефектов в германии. В. сб.: Труды международной конференции по радиационной физике полупроводников и родственных материалов, 1980, Тбилиси, Тбилисский гос. унив., 825.
- [25] А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе, Г. Л. Офенгейм, А. А. Церцвадзе, Т. С. Чолокашвили. К вопросу о природе радиационных дефектов в германии, ответственных за полосу ИК-поглощения 0.52 эВ. *Вопр. ат. науки и тех. (Сер.: Физ. радиац. поврежд. и радиац. материаловед.)*, 1982, 65, 5.
- [26] A. B. Gerasimov, N. D. Dolidze, R. M. Donina, B. M. Konovalenko, G. L. Ofengeim, A. A. Tsertsvadze. On the identification and possible space orientation of "Light-Sensitive" defects in Ge. *Physica Status Solidi A*, 1982, 70, 23.
- [27] Н. Д. Долидзе, Г. Л. Офенгейм, Т. С. Чолокашвили, А. А. Церцвадзе. О природе радиационных дефектов в германии ответственных за полосу ИК поглощения

- 0.52 эВ. В. сб.: Вопросы микроэлектроники и физики полупроводниковых приборов, 1980, Тбилиси, Мион, 23.
- [28] Н. Д. Долидзе, Г. Л. Офенгейм, Т. С. Чолокашвили. О дихроизме полосы поглощения 0.52 эВ в облученном германии. В. сб.: Тезисы докладов юбилейной конференции, посвященной 60-летию установления советской власти в Грузии и 40-летию со дня основания АН Грузинской ССР, 1981, Тбилиси, АН Грузинской ССР, 187.
- [29] Н. Д. Долидзе, Г. Л. Офенгейм, Т. С. Чолокашвили. К дивакансионной модели радиационных дефектов в германии. В. сб.: Вопросы микроэлектроники и физики полупроводниковых приборов, 1983, Тбилиси, Мион, 25.
- [30] Н. Д. Долидзе. Идентификация и модель дивакансии в германии и арсениде галлия. Дисс. на соиск. уч. степ. докт. физ.-мат. наук, 2001, Тбилиси, Тбилисский гос. унив.
- [31] Н. Д. Долидзе, Б. Е. Цеквава. К модели дивакансии в германии. Физ. твер. тела, 2002, 44, 1043.
- [32] А. Б. Герасимов, Н. Д. Долидзе, Б. М. Коноваленко, С. М. Рывкин. О гистерезисном характере вольтамперной характеристики германиевого n - p перехода, созданного облучением. Физ. твер. тела, 1965, 7, 2562.
- [33] A. L. McWhorter, R. H. Rediker. The cryosar – A new low-temperature computer component. Proc. IRE, 1959, 47, 1207.
- [34] В. П. Доброго, А. А. Рогачев, С. М. Рывкин, И. Д. Ярошецкий. ВАХ компенсированного германия. Физ. твер. тела, 1961, 3, 1298.
- [35] М. Н. Абуладзе, А. Б. Герасимов. Кинетика образования и отжига радиационных дефектов на поверхности кремния. Физ. тех. полупров., 1974, 8, 792.
- [36] N. Dolidze, G. Eristavi, Z. Jibuti. Investigation of radiation-stimulated processes and their implementation in solid-state electronics. In: Proceedings of the Georgian Symposium for Project Development and Conversion, 1995, Tbilisi, 96.
- [37] N. Dolidze, G. Eristavi, Z. Jibuti. Small dose radiation stimulated processes in semiconductor materials and structures. Bull. Georgian Acad. Sci., 1998, 158, 50.
- [38] N. Dolidze, G. Eristavi, Z. Jibuti, G. Narsia, K. Kasparyan, L. Koptonashvili. Investigation of small dose radiation stimulated processes in semiconductor materials and structures. Bull. Georgian Acad. Sci., 1998, 158, 50.
- [39] G. L. Eristavi, N. D. Dolidze, Z. V. Jibuti. Method of increase the luminous intensity of optoelectronic emitting structures by radiation-thermal treatment. Georgian Eng. News, 1999, 4, 77-79.
- [40] А. Б. Герасимов, Н. Р. Аигина, Л. И. Ушангишвили, А. Г. Шилло. Технологические аспекты создания радиационно-стойких МОП ИС. Заруб. электронная тех., 1979, 1 (196), 3.
- [41] А. П. Бибилашвили, А. Б. Герасимов, Г. Б. Чахунашвили, А. Г. Шилло. Влияние облучения электронами и протонами на Al_2O_3 , полученного плазменным анодированием. Микроэлектроника, 1977, 51 (84), 254-259.
- [42] А. П. Бибилашвили. Разработка низкотемпературных процессов создания полупроводниковых приборов и ИМС. Дисс. на соиск. уч. степ. докт. физ.-мат. наук, 2001, Тбилиси, Тбилисский гос. унив.