

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ვოლობიძე

სამაცნიერო პოზიტივის მასალები



თბილისი
2011

ნაშრომი შეიცავს კიბერნეტიკის ინსტიტუტში 2011 წლის 24-25 თებერვალს ჩატარებულ კონფერენციაზე “ფოტონიკა – 2011” წარდგენილ მასალებს.

გამოცემის რედაქტორი ფიზ-მათ. მეცნ. კანდიდატი

თ. ლაფერაშვილი

საგამომცემლო ჯგუფი: თ. ლაფერაშვილი

თ. კვიციანი

6. ქალდანი

© საგამომცემლო სახლი “ტექნიკური უნივერსიტეტი” 2011

ISBN 978-9941-14-933-7

<http://www.gtu.ge/publishinghouse/>



შემდა უფლება დაცულია. ამ წიგნის არც ერთი ნაწილი (იქნება ეს ტექსტი, ფოტო, ილუსტრაცია თუ სხვ.) არანაირი ფორმით და საშუალებით (იქნება ეს კლებრონები თუ შექანიური), არ შეიძლება გამოყენებულ იქნას გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

სააგენტო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით

შესავალი

ფოტონიკა არის 21-ე საუკუნის დაწყისი, რომლის ამოცანაა მოწყობილობების შექმნა და გამოყენება სინათლის გამომსხივებლების, ფოტომიმდგებებისა და ტალღაგამტარების ბაზაზე. ფოტონიკა არის გამოყენებითი ფიზიკის დისციპლინა, რომელიც შეისწავლის ფოტონების წარმოქმნის, სხვადასხვა გარემოში გავრცელებისა და გარდაქმნის კანონებს პრაქტიკული გამოყენების მიზნით, ისევე როგორც ელექტრონიკა, რომელმაც ტექნიკური რევოლუცია მოახდინა გასულ საუკუნეში, არის გამოყენებითი ფიზიკის დისციპლინა, რომელიც შეისწავლის ელექტრონების გადატანის კანონებს პრაქტიკული მოწყობილობების შექმნის მიზნით.

გარდა ხილული დიაპაზონისა, ფოტონიკაში განიხილავენ, აგრეთვე, ულტრააირფორ, ინფრაწილულ და ტერაჰერცულ უბანში მგრძნობიარე მოწყობილობებსაც. მათ შესაქმნელად მოსახერხებელია III-V ჯგუფის ნახევარგამტარები და მათი მყარი სხნარები განიერი აკრძალული ზონისა და დამუშავების ტექნოლოგიური მეთოდების ხელმისაწვდომობის გამო. ასეთი ნახევარგამტარების გამტარობის ზონის ელექტრონისა და გალენტური ზონის ხერელის რეკომბინაციის შედეგად ფოტონი წარმოიქმნება. მაგალითად, ნახევარგამტარში შექვანილი მინარევებისაგან დამოკიდებულებით გალიუმის ფოსფიდის (GaP) ბაზაზე მიიღება მწვანე, ყვითელი ან წითელი სინათლის გამომსხივებელი დიოდები (სბდ – LED).

III-V ჯგუფის ნახევარგამტარები ბუნებრივი სახით არ მოიპოვებიან, ხელოვნურად არიან სინთეზირებული, ამიტომ სილიციუმთან (Si) - თან შედარებით ძვირია, მაგრამ, იმის გამო, რომ GaAs არის პირდაპირზონიანი ნახევარგამტარი, რომელშიც ელექტრონულ-ხვრელური გადასვლები ხდება მხოლოდ ფოტონების შთანთქმის ან გამოსხივების შედგად და ხასიათდებიან ელექტრონების მაღალი ძვრადობით, GaAs – ის ბაზაზე დამზადებული მოწყობილობების სწრაფქმედება მაღალია და ის ჯერჯერობით შეუცვლელია სტრატეგიული დანიშნულების მართვის მოწყობილობებში.

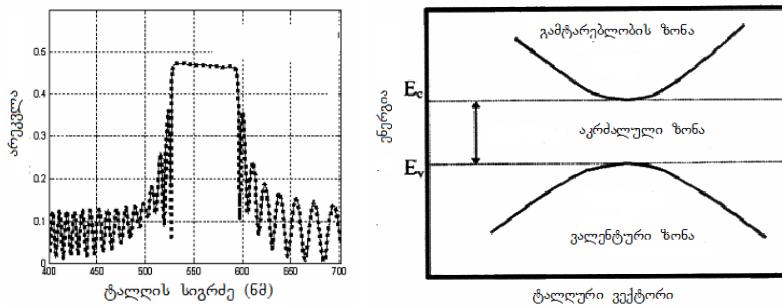
წიგნი შეიცავს თბილისში კიბერნეტიკის ინსტიტუტში 2011 წლის 24-25 ოქტემბერში ჩატარებული კონფერენცია „ფოტონიკა 2011“-ზე წარდგენილ მასალებს. აღნიშნული სემინარი ჩატარდა შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით, გრანტი (№GNSF/ST08/4-426);

**ქოლესტერული თხევადი პრისტალები -
ერთგანზომილებიანი ფოტონური პრისტალები -
06ვორამაციულ ტექნიკური გაში**

გურამ ჭილაძა, ანდრო ჭანიშვილი, გია პეტრიაშვილი
gpetr41c@yahoo.co.uk

ინფორმაციის ნაკადის სწრაფი ზრდა მკაცრ მოთხოვნებს უყენებს ინფორმაციის ჩაწერის, დამუშავებისა და დამახსოვრების სისტემებს. ამ მიმართულებით განსაკუთრებით საინტერესოა ქოლესტერული თხევადი კრისტალები [1-5]. ზოგადად მიღებული კლასიფიკაციის თანახმად თხევადი კრისტალები (თკ) იყოფა ორ კლასად: ნემატური და სმექტიკური თკ. ნემატური თკ ხასიათდებიან ორიენტაციული მოწესრიგებით, ხოლო სმექტიკური თკ-ში ორიენტაციულ მოწესრიგებას ემატება ფენოვანი დაწყობა. თუ ნემატური თკ-ის მოლეკულები არიან ქირალური (ოპტიკურად აქტიურნი) ან არაქილარულ ნემატიკებს ემატება თხევადკრისტალური ან არა თხევადკრისტალური ქირალური მოლეკულები, ამ შემთხვევაში წარმოიქმნება სივრცულად მოღულირებული ზემოლეკულური სპირალური სტრუქტურა, რომელიც ხასიათდება ფართო პერიოდული დიაპაზონით (სპირალის ბიჯი) - რამდენიმე ასეული ნანომეტრიდან უსასრულობამდე და წრიულად პოლარიზებული სინათლის სპირალის ღერძის გასწვრივ გავრცელებისას ბრეგის დიფრაქციის შედეგად 100%-იანი სელექტური არეკვლით. შებამამისად, არაპოლარიზებული სხივის არეკვლა კი 50% უდრის (სურ.1).

ზემოლეგულური პერიოდული სტრუქტურები ასევე გააჩნია ქირალურ სმექტიკურ C (S_C) თკა, ფაზური გადასვლის წინამორბედ TGB და ცისფერ ფაზებს (BP) [6-7].



სურ. 1 ბრეგის არეავლის პიკი
ქოლესტერულ თხევად გრისტალში

სურ. 2 ფოტონური კრისტალის
ენერგეტიკული ზონები

ქოლესტერული თკაის ერთ-ერთი საინტერესო თვისება თანამედროვე მიღებით მდგომარეობს იმაში, რომ იგი შეგვიძლია განვიხილოთ როგორც ერთგანზომილებიანი ფოტონური კრისტალი. ფოტონური კრისტალები განიხილება ისეთ სტრუქტურებად, რომლებშიც ელექტრომაგნიტური ტალღების გარკვეულ სიხშირეებს ეკრალებათ გავრცელება (სურ.2). იმ სპექტრალურ უბნებს, რომლებშიც შეუძლებელია ელექტრომაგნიტური ტალღების გავრცელება, აკრძალული ფოტონური ზონა ეწოდება. ქოლესტერულ თკაში აკრძალული ფოტონური ზონის სპექტრალური მდებარეობა განისაზღვრება სპირალის ბიჯის (P) პერიოდით $\lambda_B = P\pi$ სადაც π გარდატების საშუალო მაჩვენებელია, ხოლო

ნახევარსიგანე თომაგი გარდატეხის მაჩვენებლების
სიღილით:

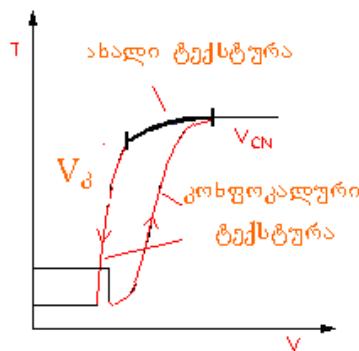
$\Delta\lambda = P \Delta n$.

ქოლესტერიკების უნიკალობა იმაში
მდგომარეობს, რომ შეგვიძლია გარე ძალების
ზემოქმედებით ვცვალოთ მოცემული სტრუქტურების
გარდატეხის მაჩვენებლები, წრფივი და წრიული
დიქროიზმები, რაც აისხება ქოლესტერიკის აკრძალული
ფოტონური ზონის სპექტრალური მდებარეობის,
ნახევარსიგანისა და სხვა პარამეტრების მართვაში.
ადსანიშნავია სპირალის ბიჯის (სელექტრიური გაბნევის
ტალღის სიგრძის) უმნიშვნელო გარე ძალების
მოქმედებით მნიშვნელოვანი ცვლილების უვაებზე და
როგორც აღნიშნულია [5]-ში, მნელია მოიძებნოს ისეთი
მაკროსკოპული პარამეტრი, რომელიც ისე მგრძნობიარეა
მოლეკულური სტრუქტურის ან კომპოზიციის
ცვლილებასთან მიმართებაში, როგორიც სპირალის
ბიჯია. გარეშე ძალების გავლენით (ელექტრული,
მაგნიტური, აკუსტიკური ველების, ტემპერატურის
ცვლილებით, სინათლის ზემოქმედებით) სელექტრიური
გაბნევის ტალღის სიგრძის ცვლილების შესაძლებლობა
იწვევს, როგორც თეორიულ ისე პრაქტიკულ ინტერესს.

ქოლესტერულ თკ-ში დაიმზირება მრავალი ტიპის
ელექტროოპტიკული უვაებზები, რომლებიც
დამოკიდებულია თხევადგრისტალური უჯრედის
ზედაპირის დამუშავებაზე, სპირალის ბიჯის P სიღილეზე,
უჯრედის სისქისა და ბიჯის შეფარდების სიღილეზე,
დიელექტრიკული ანიზოტროპიის $\Delta\varepsilon$ სიღილეზე და
მოდებული ელექტრული ველის სიღილეზე [8-13]. ეს

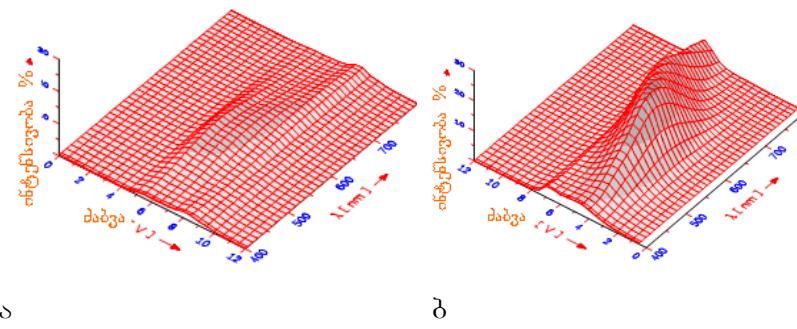
ეფექტები უმთავრესად დაკავშირებულია ქოლესტერული
თკ - ის ტექსტურულ ცვლილებებზე.

მიღებულია და შესწავლილია ახალი
ელექტროოპტიკური ეფექტი ქოლესტერულ თხევად
კრისტალებში, კერძოდ, ქოლესტერულ-ნემატურ ფაზური
გადასვლის ეფექტში გარკვეულ პირობებში დამზერილია
ჰისტერეზისი: ქოლესტერულ თკ-ში დადებითი Δε-ით
ელექტრული ველის გაზრდის და შემდგომი
შემცირებისას დაიმზირება შემდეგი სტრუქტურული
(ტექსტურული) ცვლილებები: პლანარული-
კონფორმული-პომეოტროპული-კონფორმული-
პლანარული. გარკვეულ პირობებში პომეოტროპულ-
პლანარული ტექსტურული ცვლილებისა დაიმზირება ე.წ.
“ახალი ტექსტურა”, რომელსაც დიფრაქციული მესერის
თვისებები გააჩნია (სურ.3). ეს ეფექტი საშუალებას
იძლევა იმართოს ელექტრული ველით როგორც ბრეგის
დიფრაქციის მაქსიმუმი, ისევე ლაზერის სხივის გადახრა
[14-16].



სურ.3 არეალილი სხივის ინტენსივობის ცვლილება ელექტრულ
ველში

სურ. 3-ზე ნაჩვენებია არეკვლილი სხივის ინტენსივობის ცვლილება ელექტრულ ველში.



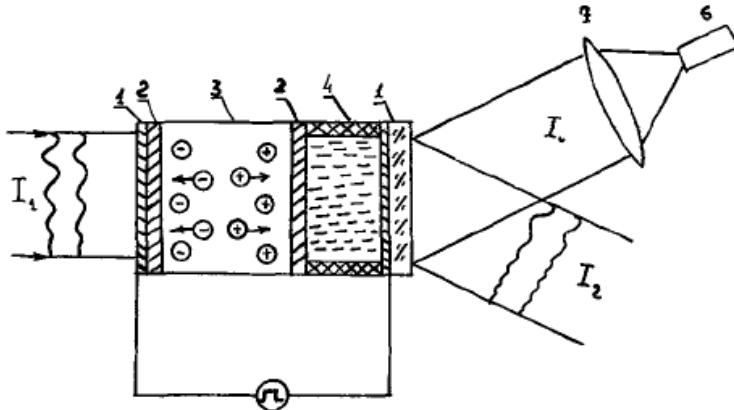
ა

ბ

სურ. 4. არეკვლილი სხივის ფერის დამოკიდებულება ელექტრული ველის სიდიდეზე; ა- ელექტრული ველის ზრდისას, ბ- ელექტრული ველის შემცირებისას.

ქოლესტერული თხევადი კრისტალი წარმოადგენს ნარევს E7/S811; დაცემული სხივის კუთხე $\varphi = 40^\circ$, არეკვლილი სხივის კუთხე $\theta = 20^\circ$, სპირალის ბიჯი $P = 1.1 \mu\text{m}$.

სხვა პრაქტიკული გამოყენებიდან აღსანიშნავია ახალი ტიპის ინფრაჭითელი გამოსახულების გარდამქმნელი სტრუქტურა – მეტალი-დიელექტრიკი-თკ [17 – 20].



სურ.5. გამოსახულების გარდამქმნელის კონფიგურაცია

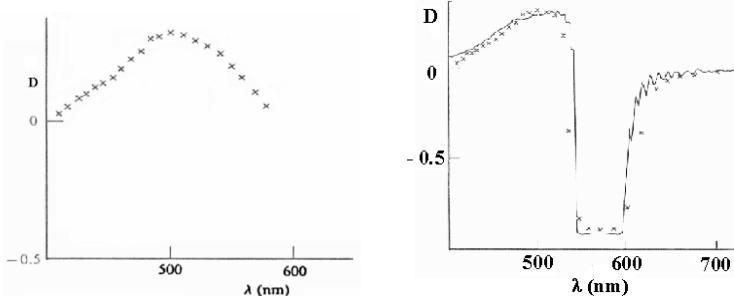
1-ელექტროდები, 2- დიელექტრიკული ფენები, 3-ნახევარგამტარი, 4- თკ, 5- იმპულსური ძაბვა, 6- ლაზერი, 7- კოლიმატორი. I- შემავალი გამოსახულება, II- გამოსავალი გამოსახულება.

განხილულ იქნა სხვადასხვა ელექტროოპტიკული ჟამპები, რაც საშუალებას იძლევა გამოსახულების გარდამქმნელი ფართოდ გამოყენებულ იქნას საინფორმაციო ტექნოლოგიებში, კერძოდ არკოპერენტული ინფრაწითელი გამოსახულების კოპერენტულ სილულ გამოსახულებად ტრნსფორმაციაში, გამოსახულების დამახსოვრებაში.

თუ ქოლესტერულ თკ-ს დაგამტებთ საღებარს, რომელსაც ხაზოვანი დიქტოიზმი ახასიათებს, სპირალურ სტრუქტურას გადაყავს ხაზოვანი დიქტოიზმი წრიულ ში. ინდუცირებული წრიული დიქტოიზმი გამოისახება როგორც $D = (I_l - I_r) / (I_l + I_r)$, სადაც I_l და I_r წარმოადგენენ მარცხნივ და მარჯვნივ მაბრუნებელი

წრიულად პოლარიზებულ სინათლის გასვლის კოეფიციენტებს შესაბამისად. იმ შემთხვევაში, როდესაც სინათლის შთანთქმის და სელექტიური გაბნევის ტალღის სიგრძეები ემთხვევიან ადგილი აქვს შთანთქმის ჩაქრობას. ეს უვექტი რენტგენის ტალღების ანომალიურ შთანთქმის (ე.წ. ბორმანის ეფექტი) ანალოგიურია.

ექსპერიმენტალურად მიღებულია რაოდენობრივი თანხვედრა თეორიასთან [21]. სურ.6 წარმოდგენილია ინდუცირებული წრიული დიქროიზმი იმ შემთხვევაში, როდესაც სპირალის ბიჯი = 1,08 მკ-ს. ხოლო როდესაც სპირალის ბიჯი ხილულ არეშია დიფრაქციულად პოლარიზებული სინათლის შთანთქმა სელექტიური არეკვლის არეში იცვლება. (სურ.7)



სურ.6 წრიული დიქროიზმის ტალღის სიგრძეზე დამოკიდებულება ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში

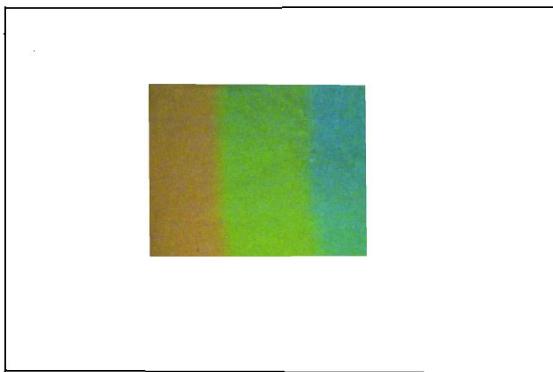
სურ.7 სელექტიური არეკვლის პიკის მიერ შთანთქმის შემცირება ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში

ასევე როდესაც სელექტიური გაბნევის და ლუმინესცენციის ტალღის სიგრძეები ემთხვევიან

ერთმანეთს ადგილი აქვს ლუმინესცენციის ჩაქრობას [22-23].

თხევადკრისტალური ტექნოლოგიების ერთერთ მნიშვნელოვან მიღწევას წარმოადგენს მისი პარამეტრების ცვლილების სინათლის საშუალებით მართვა [12,24]. ცნობილია, რომ შუქმბრძნობიარე თხევადი თკ-ის პარამეტრები ძლიერად იცვლებიან სინათლის სხივის მოქმედებით. ეს მირითადად დაკავშირებულია თკ-ს დიდ ოპტიკურ ანიზოგროპიასთან და მისი მოლექულების კოლექტიური რეაგირების უნართან. ბოლო წლებში ინტენსიურად მიმდინარეობს ქოლესტერულ თკ-ში ფოტოეფექტზე დაფუძნებული კვლევები [25-29]. ფოტომგრძნობიარე ქოლესტერული თკ-ის უნიკალობა იმაში მდგომარეობს, რომ სინათლის საშუალებით შეგვიძლია გვვალოთ მოცემული სტრუქტურების გარდატენის მაჩვენებლები, წრფივი და წრიული დიქროიზმები, რაც აისხება ქოლესტერული თკ-ის აკრძალული ფოტონური ზონის სპექტრალური მდებარეობის, ნახევარსიგანისა და სხვა პარამეტრების მართვაში. აღნიშნული კვლევების შედეგად შუქმბრძნობიარე თხევად კრისტალებისათვის დამზერილი იქნა სპირალის ბიჯის (ფერის) მნიშვნელოვანი ცვლილება ნემატო-ქირალურ ნარევებში. ფოტოეფექტი დაიმზირება, როდესაც ნემატო-ქირალურ ნარევებში ან ქირალური კომპონენტია ოპტიკურად აქტიური, ან ნემატური თკ, ან ორივე კომპონენტი. იმ შემთხვევაში, როდესაც გამოიყენებოდა ფოტომგრძნობიარე ქირალური დანამატი არომატული ეთერის ბაზაზე მიღებულ იქნა ბიჯის შეუქცევადი ცვლილება, რომელმაც 400 ნანომეტრი შეადგინა. არაფოტომგრძნობიარე ნარევის

შემთხვევაში მათ დაემატა ფოტომგნობიარე მოლექულები, მაგალითად კიბამინი D, ხოლო ფოტოტრანსფორმირებადი ნემატ-ური თკ-ის შემთხვევაში კი აზო- აზოქსი- და დარიჩინის მჟავის ბაზაზე დაფუძნებული ნივთიერებები [30-34]. ადსანიშნავია რომ ამ კლევების შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნას ოპტიკური ინფორმაციის ჩაწერის და დამუშავებისათვის, მზის გამოსხივების დოზიმეტრებად. სურ. 8 ფერთა ცვლილება მზის დასხივებით ფოტომგრანიბიარე ქოლესტერულ თკ უჯრედში არის ნაჩვენები

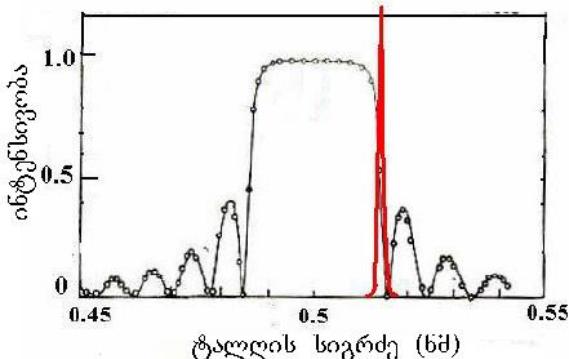


სურ. 8. “სამფერიანი კვადრატი”

მნიშვნელოვანი შედეგები იქნა მიღებული ფოტოეფექტზე ცისფერ ფაზაში [35].

ბოლო წლებში განსაკუთრებული უურადღება დაეთმო ქოლესტერული თკ-ების გამოყენებას მართვად ლაზერებში. ასეთი ტიპის ლაზერებში ქოლესტერული თკ-ები გამოიყენება 2 გზით: ქოლესტერული თკ-ები, როგორც განაწილებულ უკუკავშირიანი გარემო ან როგორც რეზონატორები [36].

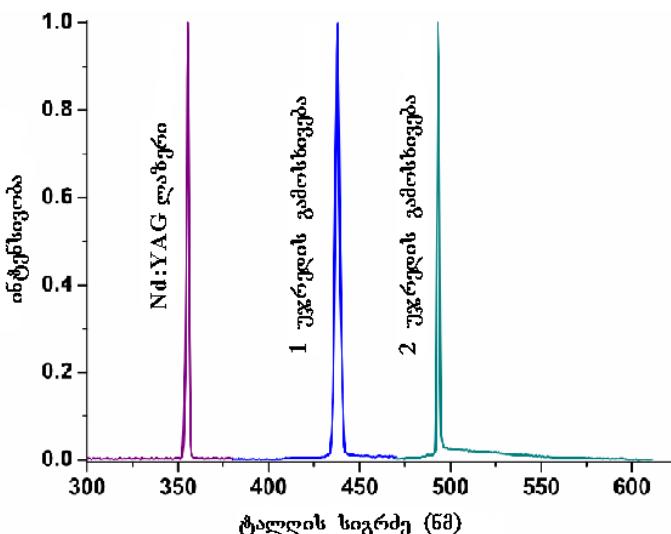
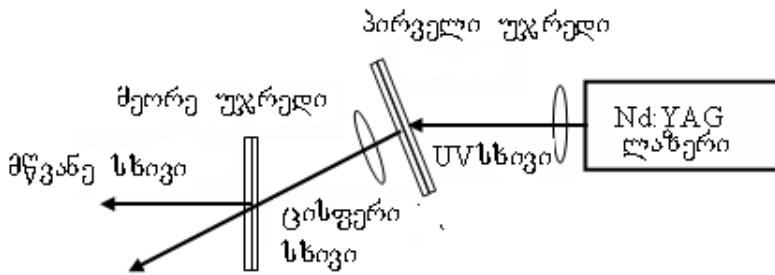
განაწილებულ ჟკჰაგშირიან ქოლესტერულ ოპლაზერებში იმის გამო როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, როდესაც სელექტიური გაბნევისა და ლუმინესცენციის ტალღის სიგრძეები ემთხვევიან ერთმანეთს ადგილი აქვს ლუმინესცენციის ჩაქრობას, ლაზერული გამოსხივება დამტკირება სელექტიური გაბნევის ზონის მოკლე ან გრძელტალღოვან კიდეებზე (სურ.9)



სურ.9 ლაზერული გამოსხივების პიკი აკრძალული ზონის გრძელტალღოვან კიდეზე

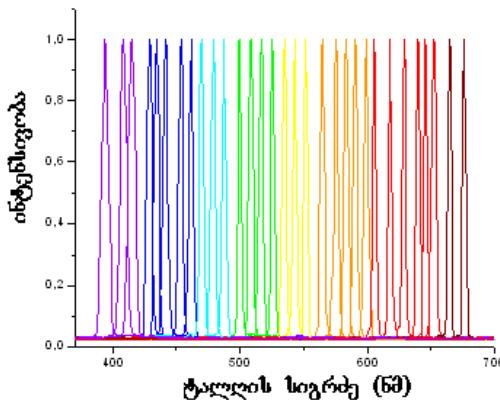
ფოტომგრამობიარე ქოლესტერულ ოპ-ში პირველად იქნა განხორციელებული სინათლის საშუალებით ლაზერული გენერაციის უწყვეტი სპექტრალური გადაწყვობა [37-38]. აღსანიშნავია, რომ აზო- და აზოქსი- ნაერთების ნემატიკების შემთხვევაში მიღწეულ იქნა, როგორც ბიჯის ისე ამ შენაერთების გამოყენებით დამზადებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ლაზერის შექცევადი მართვა შუქდიოდის დასხივებით, ორივე როგორც გრძელტალღოვანი ისე მოკლეტალღოვანი, მიმართულებით, სპექტრის ულტრაიისფერი უბნიდან ინფრაწითელ უბნამდე [39]. განხორციელებულ იქნა

ლაზერული კასკადი თრი ქოლესტერული თხევადერისტალური უჯრედის საშუალებით. თვითეულ თხევადერისტალური უჯრედს დაემატა თრი სხვადასხვა საღებარები, რომელთაგანაც ერთის ლუმინესცენციური გამოსხივების უბანი ემთხვევა მეორის შთანთქმის უბანს [40] (სურ. 10 და 11.)



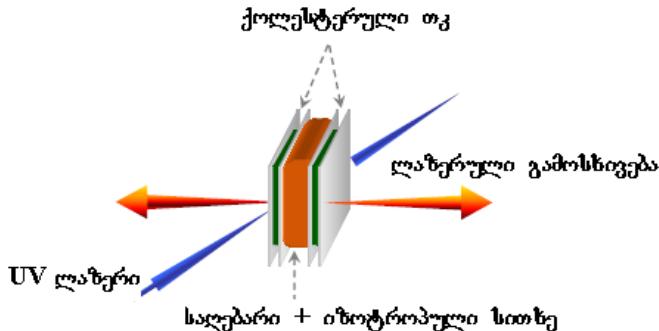
სურ.10,11 ერთი თხევადერისტალური ლაზერის მიერ მეორე თხევადერისტალური ლაზერის აღგზნება

ასევე დამზადებულ იქნა სხვადასხვა საღებარ დამატებული 30 ქოლესტერული თხევადკრისტალური ლაზერი, რომელთა სპექტრები გამოსახულია სურ.12.



სურ.12 ლაზერული გამოსხივების გადაწყობა ოპტიკური სპექტრის ხილულ, ახლო ულტრაიისფერსა და ახლო ინფრაწითელ უბნებში

იმ შემთხვევაში, როდესაც ქოლესტერული თქ გამოყენებულ იქნა, როგორც რეზონატორი მართვად საღებარ ლაზერებში, განხილულ იქნა სამუჯრედოვანი სტრუქტურები: ქოლესტერული თხევადკრისტალი-საღებარდამატებული იზოტროპული სითხე ქოლესტერული თხევადკრისტალი [41-43] (სურ.13).



სურ.13 ლაზერული გამოსხივების სქემატური სურათი სამუჯრედოვან
სტრუქტურებში

ჩატარებული კვლევები მიუთითებს იმაზე, რომ შეიძლება აიგოს კომპაქტური, სპექტრის ფართო უბანში თანაბრად და უწყვეტად გადაწყობადი ქოლესტერული თკ ლაზერები ფართო გამოყენებით საინფორმაციო ტექნოლოგიებში, მედიცინაში და ტექნიკის მრავალ სახეობაში [44].

ლიტერატურა

1. G.Chilaya, Induction of chirality in nematic phases, Rev. Phys.Appliq., 1981, V. 16, pp 193-208
2. G.S.Chilaya and L.N.Lisetski, Helical Twist in Cholesereric Mesophases, Sov.Phys.Usp.1981, V 24, pp 496-510
3. G.Chilaya, Physical properties and applications of liquid crystals with induced helicoidal structure, Metsniereba, Tbilisi, 1985 (in Russian)
4. K.D.Vinokur; D.G.Sikharulidze, G.S.Chilaya, Z.M.Elashvilui, Liquid crystals with helical structure and their applications in displays, Metsniereba, Tbilisi, 1988 (in Russian)

5. G.S.Chilaya and L.N.Lisetski, Cholesteric liquid crystals: physical properties and molecular -statistical theories, Mol.Cryst.Liq.Cryst. , 1986, V140, pp 243-286
6. G.S.Chilaya and V.G.Chigrinov, Optics and electrooptics of chiral smectic C liquid crystals, Physics - Uspekhi, 1993, V 36, pp 909-932
7. G.Chilaya, Experimental investigations of some optical properties in liquid crystals with spiral structure, Nuovo Cimento, 1988, V 10 D, pp 1263-1271
8. Blinov, L. M. & Chigrinov, V. G. (1994). "*Electrooptic effects in liquid crystal materials*", Springer-Verlag, New York
9. G.S.Chilaya and V.G.Chigrinov, New possibilities of the use of liquid crystals with helical structure, Sov.Phys. Crystallography, 1988, V 33, pp 154-161
10. G.S.Chilaya, Effect of various external factors and pretransitional phenomena on structural transformations in cholesteric liquid crystals, Crystallography Reports, 2000, V 45, pp 944-960
11. G.Chilaya, Optical and electrooptical characteristics of chiral liquid crystals, Proceedings of Institute of Cybernetics, 2000, V1, # 1-2, pp 118-139.
12. G.Chilaya, Cholesteric Liquid Crystals: Optics, Electrooptics and Photooptics, chapter 6 in "Chirality in Liquid Crystals", edited by H.Kitzerow and Ch.Bahr, series Partially Ordered Systems, Springer Verlag, New York, 2001, pp 159-185.
13. G.Chilaya, Different Aspects of Application of Liquid Crystals in Cholesteric and Pretransitional Phases, chapter 8 in: "Advances in Condensed Matter and Materials Research"., Editors: H. Geelvinck and S. Reynst, Nova Science Publisher's Inc., Hauppauge, New York, USA, 2010, Vol. 7, pp. 423-457
14. G.S.Chilaya, S.N.Aronishidze, K.D.Vinokur, S.P.Ivchenko, M.I.Brodzeli, Influence of the surface boundary conditions on the cholesteric- nematic transition, Acta Physica Polonica, A 54, 655-661,1978
15. G.Chilaya, G.Hauck, H.D.Koswig and D.Sikharulidze, Electric field controlled color effect in cholesteric liquid crystals and polymer-

- dispersed cholesteric liquid crystals, J.Appl.Phys., 1996, V 80, PP 1907-1909;
- 16. G.Chilaya, G.Hauck, H.D.Koswig and D.Sikharulidze, Cholesteric liquid crystals in applied electric fields: structural transformations and applications, Proc. SPIE,, 1998,V 3318, PP 351-357);
 - 17. G.S.Chilaya, D.G.Sikharulidze, Effect of “memory” of cholesteric-nematic phase transition in liquid crystals with symmetric structure semiconductor-dielectric, Pysma JTF,4,384-387,1978;
 - 18. G.S.Chilaya,D.G.Sikharulidze, M.I.Brodzeli, Liquid crystal image converter based on the cholesteric-nematic phase transition with storage, Journal de Physique, C-3, 40, 274-277,1979;
 - 19. D.G.Sikharulidze, G.S.Chilaya, M.I.Brodzeli, Liquid crystal incoherent-to-coherent image converter based on the semiconductor-insulator type structure, Kvantovaya Electronica, 6,1271-1277,1979;
 - 20. D.G.Sikharulidze, G.S.Chilaya, Image transducers based on MIS-Electrooptical material structures, Radio I Swiaz, Moscow, 1986 (in Russian);
 - 21. S.N.Aronishidze, V.E.Dmitrienko, D.G.Khoshtaria and G.S.Chilaya, Circular dichroism in absorbing mixtures with a cholesteric structure JETP Lett. 32,17-19, 1980 (Pis'ma Zh.Eksp.Teor.Fiz.32,19-22,1980)
 - 22. D.Katsis, A.W.Schmid, S.H.Chen, Mechanistic insight into circularly polarized photoluminescence from a chiral-nematic film, Liq.Cryst. 26, 181 (1999)
 - 23. J. Schmidtke, W. Stille, Fluorescence of a dye doped cholesteric liquid crystals film in the region of the stop band: theory and experiment, Eur. Phys. J. B 31 , 179 (2003).
 - 24. G.S.Chilaya, Light-Controlled Change in the helical pitch and broadband tunable cholesteric liquid-crystal lasers, Crystallography Reports, 2006, Vol. 51, Suppl. 1, pp S108-S118
 - 25. A.Chanishvili, G.Chilaya, G.Petriashvili and D.Sikharulidze, “Light induced effects in cholesteric mixtures with a photosensitive nematic host”, *Mol.Cryst.Liq.Cryst.*, V.409, 2004, pp.209-218.

26. G. Chilaya, A. Chanishvili, G. Petriashvili,R. Barberi,R. Bartolino, M. P. De Santo,M. A. Matranga, P. Collings, Light Control of Cholesteric Liquid Crystals Using Azoxy-Based Host Materials, Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 453, pp. 123–140, 2006.
27. D. Arinzon, E. Levy, P. Collings, A. Chanishvili, G. Chilaya, G. Petriashvili,Trans-cis isomerization of an azoxybenzene liquid crystal, Liquid Crystals, Vol. 34, No. 6, June 2007, 707–718
28. S.V. Serak, N.V. Tabiryan, G. Chilaya, A. Chanishvili, and G. Petriashvili, “Chiral Azobenzene Nematics Phototunable with a Green Laser Beam”, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 2008, vol. 488, pp. 42–55.
29. M.I. Serbina, L.N. Liserski, I.A. Gvozdovskyy, A.V. Koval'chuk, G.S.Chilaya, Effects of UV radiation on selective reflection and dielectric properties of cholesterol ester mixtures with photoactive nematics, Functional Materials, Vol 17, # 4, , pp 449-453, 2010
30. Aronishidze M.N. Chanishvili A.G., Chilaya G.S., Khatiashvili A.A., Petriashvili G.Sh., Tavzarashvili S.P., Tevdorashvili K.G., “Cholesteric liquid crystal mixtures sensitive to solar irradiation”, *Georgian Engineering News*, 2003, N3, pp. 7-11.
31. M. Aronishidze , A. Chanishvili , G. Chilaya, G. Petriashvili, S. Tavzarashvili , L. Lisetski, I. Gvozdovskyy , I. Terenetskaya , Color Change Effect Based on Provitamin D Phototransformation in Cholesteric Liquid Crystalline Mixtures, Mol. Cryst. Liq. Cryst., V . 420 , pp 47 – 53 (2004)16.
32. Chilaya G. Petriashvili , A. Chanishvili, I. Terenetskaya, N. Kireeva , L. Lisetski, Provitamin D₂ and Provitamin D₃ Photo Transformations in Cholesteric Liquid Crystal Mixtures Induced by UV Radiation, Mol.Cryst.Liq.Cryst. V433, 73-85 (2005).
33. Chanishvili, G. Chilaya, G.Petriashvili, R.Barberi, R.Bartolino,M.P.De Santo, Cholesteric liquid crystal mixtures sensitive to different ranges of solar UV irradiation,Mol.Cryst.Liq.Cryst. V434, 353-366 (2005).
34. Petriashvili G. and Chanishvili A. and Chilaya G. and Matranga M. A. and De Santo M. P. and Barberi R. C., “Novel UV Sensor Based on a

- Liquid Crystalline Mixture Containing a Photoluminescent Dye”, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2009, Vol. 500, pp. 82-90.
- 35. A.Chanishvili, G.Petriashvili, G.Chilaya, P.Collings, *Trans-cis* isomerization and blue phases, *Phys.Rev.*, E 71, 057105 (2005).
 - 36. R. Barberi and G. Chilaya, “Strategies for tunable cholesteric lasers”, chapter 11in.: “Liquid Crystal Microlasers”, edited by L.M. Blinov and R. Bartolino (Transworld Research Network, 2010). pp 199-222.
 - 37. A.Chanishvili, G.Chilaya, G. Petriashvili, R. Barberi,R.Bartolino,G. Cipparrone, A. Mazzulla,L. Oriol, Phototunable lasing in dye-doped cholesteric liquid crystals, *Applied Physics Letters*, 2003, V.83, N. 23, pp 5353-5355.
 - 38. A.Chanishvili, G.Chilaya, G. Petriashvili, R. Barberi,R.Bartolino,G. Cipparrone, A. Mazzulla,L. Oriol, Lasing in dye-doped cholesteric liquid crystals: two new strategies of tuning, *Adv. Mat.* 2004, 16, N.9-10, pp 791-794.
 - 39. G. Chilaya, A. Chanishvili, G. Petriashvili, R. Barberi, R. Bartolino, G. Cipparrone, A. Mazzulla and P. V. Shibaev, Reversible tuning of lasing in cholesteric liquid crystals controlled by light emitting diodes, *Advanced Materials*, Volume 19, Issue 4 (February, 2007) (pp 565-568)
 - 40. Andro Chanishvili, Guram Chilaya, and Gia Petriashvili,Riccardo Barberi, Roberto Bartolino, Gabriella Cipparrone, and Alfredo Mazzulla, Laser emission from a dye-doped cholesteric liquid crystal pumped by another cholesteric liquid crystal laser, *Applied Physics Letters*, 2004, V. 85, N.16, pp. 3378-3380.
 - 41. Guram Chilaya, Andro Chanishvili, Gia Petriashvili, R. Barberi, G. Cipparrone, A. Mazzulla, M. P. De Santo, H. Sellame, M. A. Matranga, Single mode lasing in multilayer sandwiched systems consisting of cholesteric liquid crystals and dye solution, SPIE, Proceedings of 15th International conference Advanced Display Technologies, October 03-05, 2006, Moscow, Russia, Vol. 6637, pp 6637OM-1-6.
 - 42. G. Chilaya, A. Chanishvili, G. Petriashvili, R. Barberi, G. Cipparrone, A. Mazzulla, M. P.De Santo, H. Sellame, M. A. Matranga, Lasing in

- Three Layer Systems Consisting of Cholesteric Liquid Crystals and Dye Solution, Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 495, pp. 97=[449]–105=[457], 2008
- 43. M. A. Matranga, M. P. De Santo, G. Petriashvili, A. Chanishvili, G. Chilaya, and R. Barberi, “Frequency Tunable Lasing in a Three Layer Cholesteric Liquid Crystal Cell”, Ferroelectrics, 2010, vol. 395: pp. 1 – 11.
 - 44. Guram Chilaya, Andro Chanishvili, Gia Petriashvili, Riccardo Barberi, Maria Penelope De Santo, Mario Ariosto Matranga, “Different Approaches of Employing Cholesteric Liquid Crystals in Dye Lasers”, Materials Sciences and Applications, 2011, vol. 2, pp. 116-129

სპიროპაირანების ნანორმაზურები ფოტონიკისათვის

პ. ჯაფარიძე, ლ. დევაძე, ჯ. მაისურაძე, ი. მუავანაძე,
ნ. სეფაშვილი, ც. ზურაბიშვილი, გ. პეტრიაშვილი,
მ.გუგავა
devadze2005@yahoo.com

ანოტაცია

სამუშაო ფოტუსირებულია ფოტოქრომული სპიროპაირანების მნიშვნელოვანი პარამეტრის – ფოტომგრძნობიარობის გაზრდის გზების ძიებაზე. ნაჩვენებია, რომ ფოტომგრძნობიარობის გაზრდა მოლექულის მოღიგიცირებასთან ერთად შეიძლება სპიროპაირანების ბაზაზე ისეთი თხევადეკრისტალური კომპოზიციების შექმნით, რომლებშიც მათი მიცელებად - ნანორეაქტორებად თვითორგანიზება ხდება, რაც ზრდის სისტემის ფოტომგრძნობიარობას. ფირები, რომლებიც სპიროპაირით დოპირებული კომპოზიციების პოლიმერში მიკროკაფსულირებითაა ინტეგრირებული, ასევე, მაღალი ფოტომგრძნობიარობით ხასიათდება.

საკვანძო სიტყვები: ფოტოქრომია, სპიროპაირანები, ნანონაწილაკები, ნანორეაქტორები, ნემატო-ქირალური თხევადი კრისტალები.

ნანონაწილაკების - ნანოზომის სტრუქტურების (კლასტერები, კომპლექსები, აგრეგატები, მიცელები და სხვ.) ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები განსხვავდება როგორც ცალკეული ატომისა და მოლეკულის, ასევე მასიური სხეულის თვისებებისგან. ნანოსტრუქტურების კვლევის შედეგად შესაძლებელია შეიქმნას და დამუშავდეს წინასწარ განსაზღვრული, ბუნებრივ მასალებზე უკეთესი თვისებების მქონე ნანომასალები. ასალი ნანოსტრუქტურების ფორმირებისათვის აუცილებელია

ატომებისა და მოლეკულების ნაწილების ობიექტებად გაერთიანების კანონზომიერების დადგენა, წარმოქმნის პირობების ცოდნა და კონტროლი. ინფორმაციული ტექნოლოგიებისთვის ორგანული ნაწილების შესაქმნელად მნიშვნელოვანია, როგორც ნაწილების სისტემებში მოლეკულათშორისი (ვან-დერ-ვაალსის ძალების, დონორულ-აქცეპტორული ურთიერთქმედების, წყალბადური ბმების ა.შ.) ურთიერთქმედებების შედეგად თვითაწყობის შესაძლო მექანიზმების კვლევა, ასევე ნაწილების სისტემებში ელექტრონული და ოპტიკური თვისებების ზომაზე, შემაღენლობაზე და სივრცით აღნაგობაზე დამოკიდებულების დადგენა.

სპიროპირანები ორგანულ ფოტოქრომულ, ბისტაბილურ ნაერთთა მნიშვნელოვანი კლასია. ბისტაბილურ მოლეკულებს და მოლეკულურ ანსამბლებს შეუძლიათ გარკვეული ენერგეტიკული ბარიერით გაყოფილ ორ თერმოდინამიკურად მდგრად მდგომარეობაში არსებობა, რომელთა შორის გადართვა გარე ზემოქმედებით (სინათლე, სითბო, ელექტრული და მაგნიტური ველები და სხვ.) ხდება. ბისტაბილური, გადართვის უნარის მქონე "ჭკვიანი" (smart) მოლეკულები ფაქტობრივად ნაწილების 2-ბიტიანი სისტემას, რომელიც სილიკონური ტრანზისტორის ფუნქციას ასრულებს მოლეკულურ დონეზე. სპიროპირანის მოცულობითი აღნაგობის, არაპოლარული, შეუფერავი მოლეკულა ულტრაინისფერი (უი) სინათლის ზემოქმედებით გადადის კოპლანარულ, შეფერილ, მაღალი დიპოლური მომენტის მქონე მეროციანინულ

ფორმაში. ასეთი ბიპოლარული მოლექულები კი შედარებით იოლად თვითორგანიზდებიან, ანუ წარმოქმნიან ნანონაწილაკებს.

სპიროპირანები პრაქტიკულ გამოყენებას პოულობენ სინათლით მართვად ისეთ მოწყობილობებში, როგორიცაა ინფორმაციის ჩამწერი (მათ შორის სამგაზომილებიანიც), დამმასხსოვრებელი და გადამამუშავებელი სისტემები, არაწრფივი ოპტიკური მასალები, მოლექულური კომპიუტერები, რეგულირებადი სიმკვრივის ფილტრები, ოპტიკური გადამრთველები, სხვადასხვა სახის სენსორები, ხელსაწყოები მედიცინისა და ეკოლოგიისათვის და სხვ. ყველა ჩამოთვლილ შემთხვევაში სპიროპირანით დოპირებულ მასალას, სხვა პარამეტრებთან (სტაბილურობა, ციკლურობა, ორფოტონიანი შთანთქმის დიდი კვეთი) ერთად, უნდა ახასიათებდეს მაღალი ფოტომგრანბიარობა. მსოფლიოს მრავალ სამეცნიერო ცენტრსა და ფირმაში აწარმოებენ კვლევას სპიროპირანების ფოტომგრანბიარობის ასამაღლებლად, რაზეც გამოქვეყნებული შრომებისა და პატენტების დიდი რაოდენობა მეტყველებს.

სპიროპირანების ფოტომგრანბიარობის გაზრდისთვის ახდენენ მოლექულის მოდიფიცირებას ჩონჩხის შეცვლით, ინდოლინურ და ქრომენულ ნაწილში სხვადასხვა ელექტრონული ბუნების (ელექტროდონორული და ელექტროაქცეპტორული) ჩამნაცვლებლებისა და მოლექულაში მათი პოზიციის ვარირებით. ასეთი მიღომით ჩვენს მიერ სინთეზირებული და შესწავლილია რამოდენიმე ასეული სპიროპირანი. ინდოლინის ბირთვის შეცვლამ აზაინდოლინით

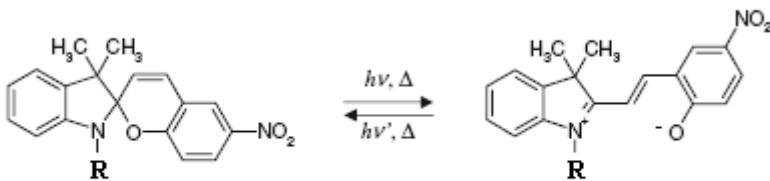
საშუალება მოგვცა მიგვედო უი სინათლისადმი გაზრდილი ფოტომგრძნობიარობის სპიროპირანები [1]. ტეტრაჟიდროქინოლინის ნაწარმების ფოტომგრძნობიარობა ხილული სინათლის მიმართ აღვმატება ცნობილი ანალოგებისას [2].

ჩვენს მიერ მიკვლეულია, რომ სპიროპირანით დოპირებული კომპოზიციის ეფექტური ფოტომგრძნობიარობის გაზრდა შესაძლებელია, აგრეთვე, ისეთი გარემოს შექმნით, რომელშიც სპიროპირანის მოლეკულები თვითორგანიზდებიან ნანონაწილაკებად, ანუ ნანორეაქტორებს წარმოქმნიან.

როდესაც ცალკეული მოლეკულები მოლეკულების მოლეკულათშორისი ძალების (ვან-დერ-ვაალსის, წყალბადური ბმების და ა.შ.) მეშვეობით ერთიანდებიან მდგრად ზემოლეკულურ სტრუქტურებად, ისინი ასრულებენ “ნანორეაქტორების” ფუნქციას: უზრუნველყოფენ რეაგენტების კონცენტრირებას და მათ სპეციფიურ მიკროგარემოს, რის შედეგადაც ნანორეაქტორებში იცვლება რეაგენტების მოლეკულური დინამიკა, ქიმიური გარდაქმნების მექანიზმები და სიჩქარეები, ლოკალური მუხტები და მათი განაწილება, იონიზაციის ენერგია და სწრაფვა ელექტრონისადმი, კონფორმაციები და რეაქციის უნარი. დაიკვირვება სხვა ანომალიებიც მაგ. მაღალი ხსნადობა. რაც უფრო ნაკლებია ნაწილაკის ზომა, მით მეტია ზედაპირზე არსებული მოლეკულების წილი საერთო რაოდენობაში. მცირე ნაწილაკების თერმოდინამიკიდან კი ცნობილია, რომ დიდი სიმრუდის ზედაპირზე მდებარე მოლეკულებს (ატომებს) მოცულობაში მყოფ ნაწილაკებთან შედარებით

დამატებითი პოტენციალური ენერგია გააჩნიათ. ნაწილი ურთიერთქმედება სინათლესთან მხოლოდ მათვების დამახასიათებელი თავისებურებებით ხასიათდება, რაც გამოიხატება მათ უნიკალურ ფოტოფიზიკურ და ფოტოქიმიურ თვისებებში. სუპრამოლექულური სტრუქტურები აქტიურნი არიან როგორც ოპტიკურად, ასევე ფოტოქიმიურად.

სპიროპირანით დოპირებული კომპოზიციის ულტრაიისფერი სხივებით ინდუცირებისას წარმოქმნილი მერცეანინული კოპლანარული, ბიპლანარული, მოლეკულები აზოტთან გრძელი ალკილის რადიკალის არსებობისას (მაგ. R= C₁₄H₂₉)



სპიროპირანი

მერცეანინი

R=C₁₄H₂₉

ლიოფილური თავი (დიპოლური მომენტი=18 დებაი)

შეიძლება განვიხილოთ როგორც ნაწილაკი, რომელსაც მაღალი დიპოლური მომენტის მქონე ლიოფილური თავი და გრძელი ალკილის რადიკალის ლიოფობური კუდი აქვს.



გრძელი ალკილის რადიკალის ლითფობური კუდი ($R=C_{14}H_{29}$)

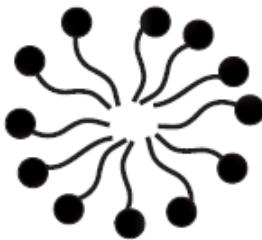
ასეთი მოლეკულა თავისი აგებულებით
მიცელების წარმოქმნის უნარის მქონე ზედაპირულად
აქტიური მოლეკულების მსგავსია, რაც გვაფიქრებინებს,
რომ სპიროპირანის მეროციანინული ფორმა გარკვეულ
მატრიცაში შეიძლება მიცელებად სტრუქტურირდებოდეს.
მიცელების წარმოქმნას ადასტურებს, აგრეთვე
მატრიცაში სპიროპირანის მაღალი ხსნადობაც, რომელიც
ზოგიერთ შემთხვევაში 15% – ია (წონითი თანაფარდობა).
მიცელების, ანუ ნანორეჟაქტორების წარმოქმნის პროცესის
ჩამრთველი (ტრიგერი) არის ულტრაიისფერი სინათლე
($\lambda = 365$ nm).

ხსნარი – დასხივებამდე შედგება: მატრიცის,
სპიროპირანისა და მასთან თერმოდინამიკურ
წონასწორობაში არსებულ მეროციანინული ფორმის
მოლეკულებისგან. თერმოდინამიკური წონასწორობის
მუდმივა ფოტოქიმიური წონასწორობის მუდმივაზე
ნაკლებია. **Кт<КРн**, უი სინათლით ექსპოზიციისას
კომპოზიციის თერმოდინამიკური წონასწორობა ირდვევა
და იხრება მეროციანინული ფორმის მოლეკულებისკენ
და ხსნარი იფერება. მეროციანინული ფორმის
მოლეკულების წარმოქმნას და კონცენტრაციის მატებას
თან სდევს მათი მიცელებად სტრუქტურირება.
(ფოტოინდუცირების და მიცელირების პროცესები

არაინერციულია, ე.ი. უი სინათლის ჩართვისთანვე იწყება). მიცელირების პრიტიპული კონცენტრაცია, ჩვენ შემთხვევაში, საქმაოდ დაბალია, რადგან ეს სიდიდე უპუპროპორციულია მოლეკულის კუდის სიგრძისა, რომელიც შესასწავლი სპიროპირანისთვის გრძელია და უდრის $C_{14}H_{29}$. მიცელირების პროცესში ხსნარის გადარიბება მეროციანინული მოლეკულებით, თერმოდინამიკური წონასწორობის აღსადგენად იწვევს სპიროპირანის მოლეკულების გადასვლას მეროციანინულში. ამგვარად, ფოტოქიმიურად წარმოქმნილ მეროციანინულ მოლეკულებს ემატება თერმოდინამიკური წონასწორობის აღსადგენად წარმოქმნილი მეროციანინული ფორმის მოლეკულები, რაც საბოლოო ჯამში კომპოზიციის ეფექტურ ფოტომგრძნობიარობას ზრდის. აქვე აღვნიშნოთ, რომ ფოტოქრომული ნაერთების ფოტომგრძნობიარობად მიღებულია ის მინიმალური ენერგია, რომელიც ოპტიკურ სიმკვრივეს ერთი ერთეულით შეცვლის.

ზემოხსენებული სპიროპირანის ფოტომგრძნობიარობა შევისწავლეთ სხვადასხვა პოლარობის თხევად და მყარ მატრიცაში. კვლევები ტარდებოდა სპიროპირანით დოპირებულ ეთანოლში, ტოლუოლში, ნემატურ და ნემატო-ქირალურ თხევად კრისტალებში, მეთილმეტაკრილატში, პოლისტიროლში და სხვ. აღმოჩნდა, რომ სპიროპირანით დოპირებულ კომპოზიციებს შორის ყველაზე მეტი ფოტომგრძნობიარობა აქვს კომპოზიციას, რომელიც შექმნილია ნემატო-ქირალური თხევადი კრისტალისა და სპიროპირანის ბაზაზე. ე.ი. ასეთი ტიპის მატრიცა

სისტემის თვითორგანიზებას, ანუ მიცელების წარმოქმნას ყველაზე უკეთ უწყობს ხელს და ამით ზრდის ფოტომგრძნობიარობას.



მიცელა

პრაქტიკული გამოყენებისთვის სპიროპირანით დოპირებული თხევადკრისტალური კომპოზიციების მყარ გარემოში განთავსებისას სასურველია მათი მახასიათებლები არ შეიცვალოს. ამისთვის კომპოზიციის პოლიმერში ინტეგრაციას ვახდენთ მიკროკაფსულირების ჩვენს მიერ შემუშავებული მეთოდით [3]. სპიროპირანით დოპირებული თხევადკრისტალური კომპოზიციების ბაზაზე მიკროკაფსულირებით შექმნილ პოლიმერულ ფირებს ულტრაინდისენერი სინათლის მიმართ ისეთივე მაღალი ფოტომგრძნობიარობა აღმოაჩნდათ, როგორც თხევადკრისტალურ კომპოზიციებს.

სტრატეგიით “მოლეკულიდან მასალამდე” დაბორატორიული ნიმუშის დონეზე შევქმენით მაღალი ფოტომგრძნობიარობის მასალები ნანოტექნოლოგიებისთვის.

THE SPIROPYRAN NANOREACTORS FOR PHOTONICS

K.Japharidze, L.Devadze, J.Maisuradze, I. Mjavanadze,
N.Sephasvili, C.Zurabisvili, G.Petriasvili, M.Gugava

rk focus on to find ways to increase photosensitivity an important parameter
of tdevadze2005@yahoo.com

Wo he photochromic spiropyrans. Shown to increase the sensitivity along
with modification molecules can be created on the basis of spiropyrans
liquid crystal composition of self-organization in micelle-nanoreactors,
which increases the sensitivity of the system. Films received integration
compositions in polymer by micro-capsulation, also, have a high
photosensitivity.

Key words: photochromic, spiropiran, nanoparticles, nanoreactors, nemato-
qiral licuid crysta

ლიტერატურა:

1. J.P.Maisuradze, Sh.A.Akhobadze, L.V.Devadze, K.G.Japaridze. ChGS , No.10, pp. 1367-1369, 1982.
2. K.G.Japaridze. Spirochromenes. Metsniereba Publishers, Tbilisi, 1979.
3. Ts.I.Zurabishvili, Z.M.Elashvili, G.Sh.Chelidze, K.G.Japaridze (2002), Georgian Patent P. 2683: in Sakpatenti Bulletin, No. 8 (108).

პეტეროსტრუქტული მზის ელემენტები

ორესტ კვიციანი

orestkv@yahoo.com

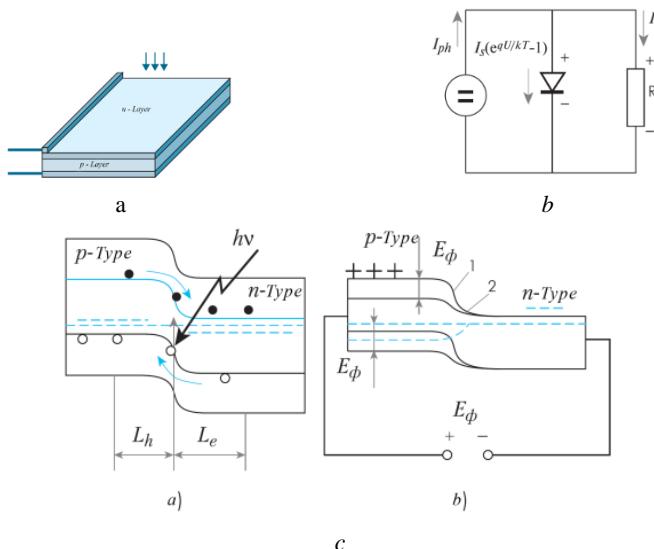
განხილულია მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტისა და ხანგრძლივი გარგისიანობის მზის ელემენტების შექმნის გზები გალიუმის არსენიდისა და III-V ჯგუფის სხვა ნახევარგამტარული შენაერთების პეტეროსტრუქტურების ბაზაზე.

საკვანძო სიტყვები: მზის ელემენტი, ნახევარგამტარი, პეტეროსტრუქტურა, ფოტონური ენერგია.

ნახევარგამტარული მზის ელემენტები თავდაპირველად გამოგონილ იქნა 1953 წელს; იმ დროიდან მზის ელემენტები წარმოადგენენ ენერგიის ძირითად წყაროს კოსმოსური აპარატებისთვის. ამ სისტემების მიმართ სულ უფრო მზარდი მოთხოვნილებები წარმოშობს უფრო მაღალი საექსპლუატაციო თვისებების, მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტისა და ხანგრძლივი გარგისიანობის მქონე მზის ელემენტების შექმნის აუცილებლობას. პრობლემის გადაჭრის ერთეულობა გზას წარმოადგენს პეტეროსტრუქტურული მზის ელემენტების შემუშავება გალიუმის არსენიდისა და III-V ტიპის სხვა შენაერთებისაგან.

90-იან წლებამდე მზის ელემენტები ძირითადად მზადდებოდა კრისტალური, პოლიკრისტალური და ამორფული სილიციუმის გამოყენებით, რაც გაცილებით იაფი ტექნოლოგიური პროცესით იყო გამოწვეული, ვინაიდან GaAs მზის ელემენტების ფასი დაახლოებით 10-ჯერ აღემატებოდა Si მზის ელემენტებს. GaAs მზის ელემენტების მნიშვნელოვანი გაიაფება (დაახლოებით 5-

ჯერ) მხოლოდ 90-იანი წლებში დაიწყო, რაც მასობრივი წარმოების დაწყებამ გამოიწვია.



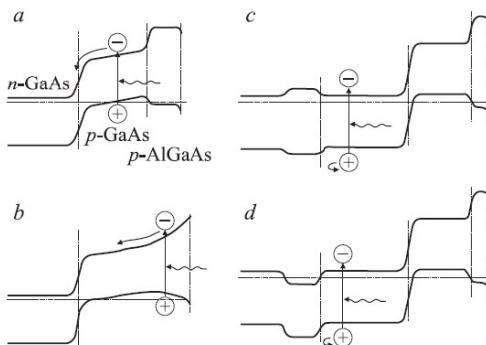
სურ. 1. a მზის ელემენტის კონსტრუქცია, b მისი ეპიზალენტური ელექტრული სქემა და c ზონური მოდელები განათების დაწყებისა და შემდგომ პროცესში b).

მზის ელემენტის უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია ეფექტურობა (მქნ) η. მონოკრისტალური Si ბაზაზე დამზადბული მზის ელემენტები ხასიათებიან $\eta=13\text{-}16\%$ ეფექტურობით. რამდენიმე ნაკლის მიუხედავად (სიფაქიზე, მაღალი სიძვრივე), GaAs კრისტალებს გააჩნიათ ძალზე მნიშვნელოვანი უპირატესობები Si-თან შედარებით: 30%-ით მეტი გამოსავალი სიმძლავრე ფართობის ერთეულიდან; 20%-ით მდალი რადიაციული მდგრადობა;

ტემპერატურის მიხედვით ეფექტურობის ცვლილების 2-ჯერ დაბალი კოეფიციენტი; 40-60%-ით უფრო სანგრძლივი მუშაობის შესაძლებლობა კოსმოსში; ენერგიის გარდაქმნის 20-30%-ით უფრო მაღალი ეფექტურობა. GaAs მონოკრისტალს აქვს სილიციუმთან შედარებით განიერი აკრძალული ზონა (1.40 eV), ამიტომ არ შეუძლია 0.9 \mu m - ზე გრძელი ტალღის სიგრძის სინათლის შთანთქმა. იგივე გარემოება განსაზღვრავს გაჯერების დენის დაბალ სიდიდეს $J_{rev} = 10^{-9} - 10^{-10}\text{ A/cm}^2$, GaAs-თვის, როდესაც ეს სიდიდე Si-თვის არის: $J_{rev} = 10^{-6} - 10^{-7}\text{ A/cm}^2$. გარდა ამისა უნდა აღინიშნოს დია წრედის ძაბვის მაღალი სიდიდე და ტემპერატურის მიხედვით ეფექტურობის ცვლის დაბალი სიდიდე GaAs-თვის.

მზის ელემენტები ფართოდ გამოიყენება კოსმოსურ მზის ბატარეებში. უკვე არსებობს ისეთი ელემენტების გამოყენების გამოყდილება, რომლებიც დამზადებულია AlGaAs/GaAs, AlGaInP/GaAs და სხვა ნანოჰეტეროსტრუქტურების ბაზაზე. ცნობილია, რომ AlGaAs/GaAs ჰეტეროსტრუქტურული მზის ელემენტები სასიათდებიან მაღალი ეფექტურობით, რაც გამოწვეულია AlGaAs-ის ფართოზონიანი ოპტიკური ფანჯრით და GaAs-ის მაღალი შთანთქმისუნარიანობით. ასეთი მზის ელემენტები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ინტენსიურად, მაღალი ტემპერატურისა და მაღალი რადიაციის პირობებში. დღეისთვის ყველაზე ხშირად GaAs მზის ელემენტები მზადდება p-AlGaAs - p-GaAs - n-GaAs ჰეტეროსტრუქტურების გამოყენებით. სურ. 1-ზე ნაჩვენებია მსგავსი მზის ელემენტების ზონური დიაგრამები: a) სტრუქტურა, რომელშიც p-GaAs ფენა ინტეგრირებული

ელექტრული ველით მიიღება თუთიის (Zn) დიფუზით n-GaAs-ში ფართოზონიანი p-AlGaAs ფენის ზრდის დროს; b) ინტეგრირებული ძლიერი ელექტრული ველიანი პეტეროსტრუქტურის ზონური დიაგრამა; c) სტრუქტურა ფონური ფართოზონიანი ფენით, რომელიც ქმნის პოტენციურ ბარიერს; d) სტრუქტურა ფონური პოტენციური ბარიერით, რომელიც ფორმირებულია მაღალლეგირებული n+ -GaAs ფენით.

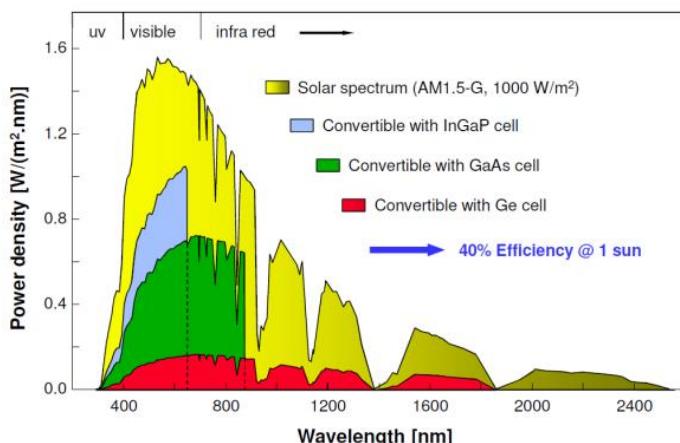


სურ.2. p-AlGaAs-p-n-GaAs პეტეროგადასასვლელიანი მზის ელემენტების ზონური დიაგრამები

AlGaAs/GaAs პეტეროსტრუქტურა მისაღებია სხვადასხვა ოპტოელექტრონული მოწყობილობებისთვის, ვინაიდან GaAs არის პირდაპირზონიანი ნახევარგამტარი. თანაც ფართოზონიანი ფანჯრის ეფექტი ძალზე მნიშვნელოვანია მზის ელემენტებისთვის. ეს სპექტრული უბნის მნიშვნელოვნად გაზრდისა და მისი ზუსტად რეგულირების საშუალებას იძლევა.

შთანთქმის მაღალი კოეფიციენტიდან გამომდინარე ამ III-V ნახევარგამტარული შენაერთის აქტიური სისტე

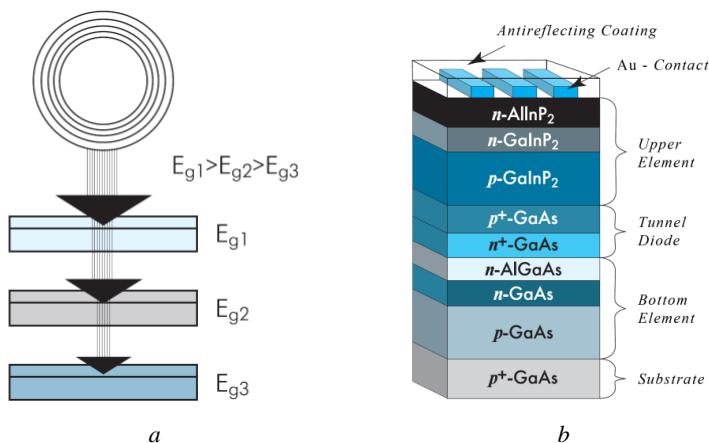
დიდი სიფრთხილით უნდა იქნეს შერჩეული მზის გამოსხივებისაგან ენერგიის ოპტიმალური გამოსავლის მისაღებად. სტრუქტურაში ნანომეტრების სისქის ფენების გამოყენებით მიიღება მზის ელემენტის უფრო მაღალი მწარმოებლურობა და გარდა ამისა მასალის ხარჯიც მცირდება; ამის გამო პეტეროსტრუქტურული მზის ელემენტების დასამზადებლად მიზანშეწონილია ეპიტაქსიური მეთოდების გამოყენება. აღმოჩნდა, რომ AlGaAs/GaAs ინტერფეისი ხასიათდება დეფექტებისა და რეკომბინაციული ცენტრების დაბალი სიმკვრივით, რაც განპირობებულია პრაქტიკულად იდენტური მესრის პარამეტრებით ეპიტაქსიური ფენის ზრდის დროს.



სურ. 3. მზის გამოსხივების ენერგეტიკული სპექტრი და სხვადასხვანახვარგამტარების გამოყენებით გარდაქმნადი შემაღებელები.

მზის ენერგიის ფოტოელექტრული გარდაქმნის ეფექტურობის გაზრდის ერთეულთი მთავარი მიმართულებაა ე.წ. კასკადური (ტანდემური) მზის

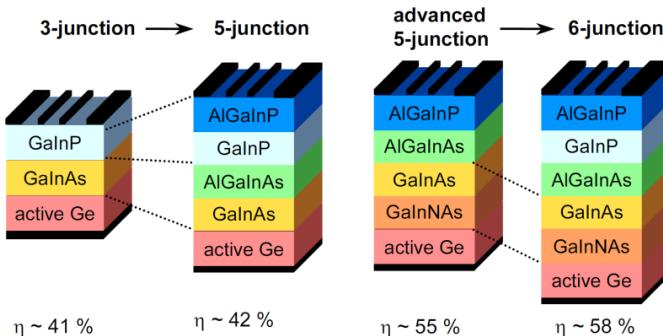
ელემენტების დამზადება. ეს შესაძლებლობა დამყარებულია მზის გამოსხივების (ხილული, ახლო ინფრაწითელი და ინფრაწითელი) ენერგიის უფრო ეფექტურ გამოყენებაზე, გამოსხივების სპექტრულ შემადგენლებად დაყოფის გზით (სურ.3). ცნობილია კასკადური მზის ელემენტების ორი ძირითადი სახეობა. ერთ შემთხვევაში გამოიყენება შერჩევითი სარკები, რომლებიც გამოსხივებას რამდენიმე სპექტრულ კომპონენტად ხლეჩენ და მიმართავენ მათ სხვადასხვა მზის ელემენტებისაკენ.



სურ. 4. a) მრავალგადასახვლელიანი მზის ელემენტის აგების სქემა;
b) კასკადური მზის ელემენტი

მეორე შემთხვევაში გარკვეული რაოდენობის მზის ელემენტები თავსდება ერთი-მეორეზე (სურ.4), აკრძალული ზონის სიგანის შემცირების მიხედვით – სინათლის სხივის გავრცელების მიმართულების გასწვრივ. ასეთი კასკადის ზედა ფართოზონიანი ელემენტი გათვლილია მზის სპექტრის მოკლებადღოვანი

შემადგენელის გარდაქმნაზე ფოტონური ენერგიის მინიმალური დანაკარგით. შემდგომი შედარებით ვიწროზონიანი ელემენტი გარდაქმნის შედარებით გრძელტალღოვან მზის გამოსხივებას. თეორიული გათვლებით ნაჩვენებია, რომ შესაძლებელია ასეთი ტექნილოგიით 60%-მდე ეფექტურობის მიღწევა [2].

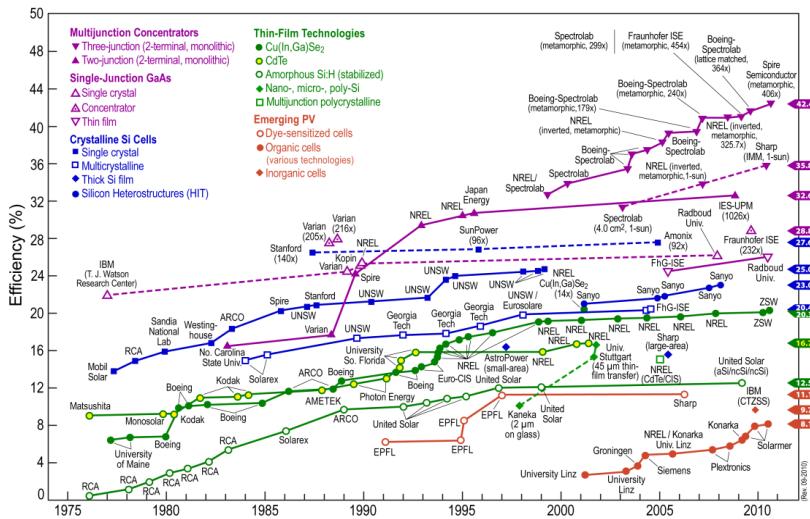


სურ. 5. თეორიულად გამოთვლილი ეფექტურობა სხვადასხვა კასკადური მზის ელემენტებისათვის.

GaAs-ის საფუძველზე დამზადებული ფოტოელემენტების სფეროში პროგრესი გამოწვეული იყო ჰეტეროსტრუქტურების დამზადების ახალი ეპიტაქსიური მეთოდების შემუშავებით. ახალი ტექნოლოგიების გამოყენების წყალობით ოპტიმიზირებული იქნა ფართოზონიანი AlGaAs ფანჯრის სისქე. ამავე ფენაში დაიწყო მესამე შემადგენელის ფუნქციის შესრულება ფოტოელემენტის სამფენიან ინტერფერენციულ ანტიამრეკლავ საფარში. შემოღებულ იქნა ფონური ფართოზონიანი ფენა, რომელიც ფრონტალურ ფართოზონიან ფენასთან ერთად უზრუნველყოფს ფოტოგენერირებული მატარებლების ორმხრივ

შეზღუდვას სინათლის შთანთქმის უბნის საზღვრებში, რაც ამცირებს რეკომბინაციულ დანაკარგებს.

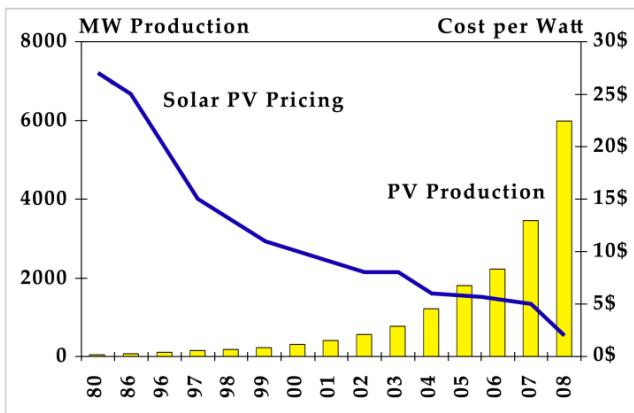
სურ.6-ზე ასახულია ტექნოლოგიური პროგრესის დინამიკა, რომელსაც ადგილი ჰქონდა სხვადასხვა ტიპის მზის ელემენტების შემთხვევაში.



სურ. 6. ტექნოლოგიური პროცესის დინამიკა მზის ელემენტების წარმოების სფეროში

მიღწეული პროგრესის მიუხედავად მზის ენერგიის დირებულება დღეისთვის ჯერ კიდევ საკმაოდ მაღალია. ენერგიის ამ ეკოლოგიურად სუფთა წყაროს ეფექტური გარდამქმნელების შემუშავებასთან ერთად მეცნიერების წინაშე დგას აგრეთვე მზის ელემენტების დამზადების ტექნოლოგიური პროცესის გამარტივების საკითხი, რომლის მიზანია მზის ენერგიის გაიაფება.

შეიძლება ითქვას, რომ მზის ელემენტებმა Si ბაზაზე უკვე ამოწურეს თავიანთი შესაძლებლობა ეფექტურობის ამაღლების თვალსაზრისით და მათი შედარებითი სიიაფის მიუხედავად სამომავლო გამოყენების პერსპექტივით ნელ-ნელა იკლებს. ასეთი ელემენტების წარმოების მასშტაბები გასული 30 წლის მანძილზე საკმაოდ სწრაფად იზრდებოდა, თუმცა ამავდროულდ მზარდ ენერგეტიკულ მოთხოვნილებას ეს ტექნიკი არ აკმაყოფილებს.



სურ.7. მზის ელემენტების სიმძლავრის მიხედვით ფასისა და წარმოებული სიმძლავრის დინამიკა.

ერთერთი გამოსავალი ამ სიტუაციიდან არის ჰეტეროგადასასვლელიანი მზის ელემენტების წარმოების მასშტაბის გაზრდა, რაც ეკონომიკური თვალსაზრისით გამართლებული რომ იყოს, უნდა ეყრდნობოდეს დამზადების ეპიტაქსიური და სხვა მეთოდების განვითარებას ტექნოლოგიური პროცესის დირექტულების მაქსიმალურად შესამცირებლად. სურ.7-ზე ნაჩვენებია

მზის ელემენტების სიმძლავრის მიხედვით ფასისა და წარმოებული სიმძლავრის დინამიკა

ლიტერატურა:

1. “III-V material solar cells for space application”, T.V. Torchynska, G.P. Polupan, - Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.. V. 5, N 1. P. 63-70,2002.
2. “Anisotype GaAs based heterojunctions for III-V multijunction Solar Cells”, A.S. Gudovskikh, K.S. Zelentsov, N.A. Kalyuzhnny, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, - 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September, Valencia, Spain, 2010.
3. “The history and future of semiconductor heterostructures”, Zh. I. Alferov, - Fiz. Tekh. Poluprovodn. 32, 1–18 , (1998).
4. “Solar energy- the state of the art”, Jeffrey Gordon, - James & James (Science publishers) Ltd.
5. “From Space to Earth: The Story of Solar Electricity”, John Perlin, - Harvard University Press, 2002.

**თალღაგამტარების პლასიფიკაცია და
არაერთგაროვნების შემცველი სამკორტიანი
თალღაგამტარის მოწელი**

დავით ლაფერაშვილი

d.laferashvili@mia.gov.ge

რეზიუმე

აღწერილია სხვადასხვა ტიპის ტალღაგამტარი სამეცნიერო დამატებული მიღებული კლასიფიკაციის მიხედვით. განხილულია ტალღაგამტარის მათემატიკური მოდელი და გამოთვლილია არაერთგვაროვნებების შემცველი T-ტიპის სამკორტიან ტალღაგამტარში ჩანერგილი დიელექტრიკული ცილინდრის ოპტიმალური პარამეტრები

1.შესაბამისობა

რადიოელექტრული და საკომუნიკაციო სისტემების განვითარების თანამედროვე ტენდენციები გაზრდილ მოთხოვნებს უქენებს როგორც მთლიანი სისტემების, ასევე მათი შემადგენელი გადამცემი და გარდამქმნელი ელემენტების ეფექტურობასა და ელექტრომაგნიტურ თავსებადობას. მრავალპორტიანი (სამი და მეტი პორტის შემცველი) ტალღაგამტარული გადასასვლელები ფართოდ გამოიყენება მიკროტალღურ და ოპტიკურბოჭკოვან ტექნიკაში, ზემაღლი სისტირეების ინტეგრაციურ სქემებში და ტერაჰერცულ ტექნოლოგიაში.

კავშირგაბმულობის თანამედროვე საშუალებათა ეფექტური გამოყენებისათვის აუცილებელია დიდი გამტარუნარიანობისა და ენერგიის მცირე დანაკარგების მქონე ელექტრომაგნიტური ტალღების გადამცემი არხების – ტალღაგამტარების შექმნა. ტალღაგამტარი არის დიელექტრიკული არხი, რომელიც გამოიყენება

ელექტრომაგნიტური ენერგიის გადასაცემად და შემოსაზღვრულია ნებისმიერი ფორმის გვერდითი ზედაპირით ან ზედაპირებით. ეს ზედაპირი არის გამყოფი ორ გარემოს შორის, რომლის გავლისას მკვეთრად იცვლება გარემოს მახასიათებელი ერთ-ერთი პარამეტრთაგანი (დიელექტრიკული ან მაგნიტური შეღწევადობა, გამტარებლობა).

მიკროტალდოვანი და ოპტიკური მოწყობილობების უმრავლესობის მოქმედების პრინციპი დაფუძნებულია მასზე, რომ ტალღების არეავლის და გატარების მახასიათებლები ზედაპირზე, რომელიც ჰყოფს განსხვავებული ელექტრული და მაგნიტური თვისებების ე და μ გარემოს, ექვემდებარებიან ზემოქმედებას. ზოგადობის შეზღუდვის გარეშე შეიძლება დაფუშვათ, რომ გამყოფი ზედაპირი არის (x , y - სიბრტყე), ხოლო დაცემის სიბრტყე არის (x , z - სიბრტყე). ნებისმიერი დაცემული ბრტყელი ტალღა შეიძლება დაიშალოს ორ მდგრენელად ერთი არის პარალელური გარემოს გამყოფი ზედაპირისა, ე.ი. ის არის ზედაპირის პარალელურად პოლარიზებული და ჰქვია (transverse electric) TE- ტალღა ანუ s - პოლარიზებული ტალღა. მეორე ტალღა პოლარიზებულია დაცემის სიბრტყეში და მისი მაგნიტური ველი მდებარეობს გარემოს გამყოფ ზედაპირზე. ამ ტალღას ჰქვია) TM- ტალღა ანუ p - პოლარიზებული ტალღა. უმრავლეს შემთხვევაში დაცემული მონოქრომატული TME- ტალღა არის TE და TM- ტალღების წრფივი სუპერპოზიცია. სურათზე ნაჩვენებია TE- ტალღის არეავლა გარემოს გამყოფ

ზედაპირზე და (a) და TM- ტალღის არეკვლა გარემოს გამყოფ ზედაპირზე (b).

გამყოფი ზედაპირის ხასიათის მიხედვით არსებობს მეტალური, ატმოსფერული და სხვა ტიპის ტალღაგამტარები. ტალღაგამტარულ სისტემებში სიგნალის ენერგიის განშტოებისას აუცილებელია ტალღაგამტართა მხრების ისეთი შეთანხმება, რომელიც უზრუნველყოფს მუშა ტალღის ენერგიის გატარებას საჭირო მხარში და მის ჩახშობას სხვა მხრებში. შეთანხმების ამოცანის გადაწყვეტა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მრავალპორტიანი ტალღაგამტარული გადასასვლელებისთვის, სისტემითა ფართო დიაპაზონში სისტემის მახასიათებლების სტაბილურობის უზრუნველსაყოფად.

აღმოჩნდა, რომ ტალღაგამტარული მხრების პრაქტიკულად დასაშვები შეთანხმება შესაძლებელია სისტემითა მხოლოდ ვიწრო ზოლისთვის და ტალღაგამტარული მხრების განივი კვეთის ზომების მხოლოდ განსაზღვრული თანაფარდობის პირობებში. პრობლემის გადასაჭრელად საჭირო გახდა კონსტრუქციული ცვლილების შეტანა მრავალპორტიანი ტალღაგამტარული გადასასვლელის გეომეტრიაში და შეიქმნა დიელექტრიკული არაერთგვაროვნების შემცველი ტალღაგამტარები.

ტალღაგამტარულ გადასასვლელებში სხვადასხვა მახასიათებლების მქონე ტალღაგამტართა ნაწილების შესათანხმებლად გამოიყენება ხელოვნურად ჩანერგილი არაერთგვაროვნებები (ინდუქციური დერო, ზოლი, დიაფრაგმა). ასეთი არაერთგვაროვნებებისა ან მათი

კომბინაციების ჩართვით ხდება ტალღაგამტარში შემათანამებელი მხრების ტალღური წინადობის ცვლილება სიგნალის სიხშირული აწყობის მიზნით.

რადიოელექტრული და საკომუნიკაციო სისტემების ოპტიმიზაციის ამოცანა არის ერთერთი ცენტრალური საკითხი ინფორმაციის გადამცემი სისტემების კონსტრუირებისას. ოპტიმალური თვისებების მქონე მრავალპორტიანი ტალღაგამტარული გადასასვლელების სერიულ გამოშვებას წინ უნდა უძლოდეს მათი ელექტროდინამიკური ანალიზისა და ოპტიმიზაციის ეტაპი. არაერთგვაროვნებების შემცველი სამპორტიანი ტალღაგამტარული გადასასვლელის ანალიზი ხდება ზუსტი ელექტრომაგნიტური თეორიის გამოყენებით [1].

2. ტალღაბამტარების პლასტიკაცია

განვიხილოთ კავშირგაბმულობაში გამოყენებული ტალღაგამტარების ტიპები სამეცნიერო ლიტერატურაში მიღებული კლასიფიკაციის მიხედვით. ზოგადდ ტალღაგამტარს შეიძლება ჰქონდეს ნებისმიერი მრუდის ფორმა და ტალღაგამტარის ღერძის გასწვრივ ცვლადი განივი პერიოდი.

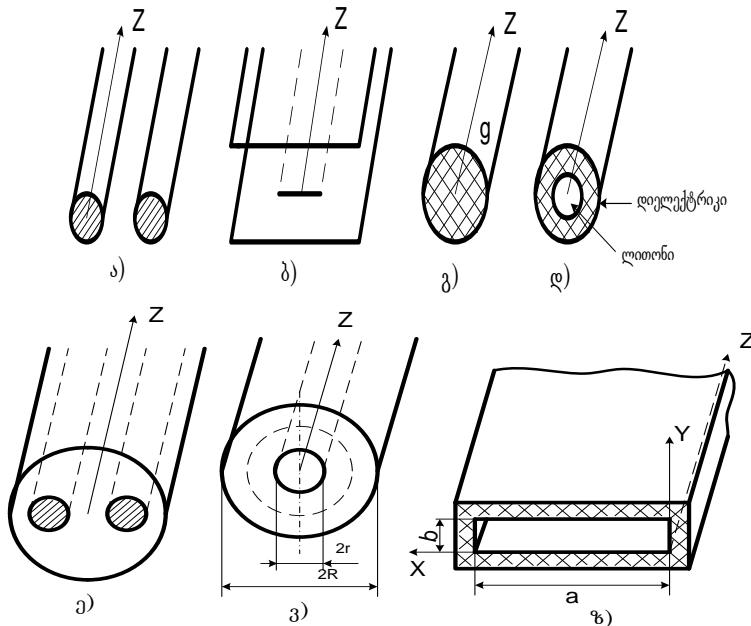
ყველაზე მეტად გავრცელებულია ტალღაგამტარი, რომელიც შემოსაზღვრულია ლითონის ცილინდრული გვერდითი ზედაპირით, აქვს ღერძის გასწვრივ უცვლელი განივი კვეთი და, რომელიც შევსებულია ერთგვაროვანი დიელექტრიკით.

განივი პერიოდის ფორმის მიხედვით ტალღაგამტარი არსებობს მართკუთხა, მრავალკუთხა, კოაქსიალური, Π-ტიპის, H-ტიპის და სხვა. ის შეიძლება იყოს ერთხელბმული ან მრავალბმული.

გადაცემის ხაზისაგან განსხვავებით, ცალადბმული ტალღაგამტარის ზომები გადასაცემი ტალღის სიგრძის რიგისაა ან აღქმატება მას. ის გამოიყენება დიდი სიმძლავრის გატარების შემთხვევაში, მისი ნაკლია განივი კვეთის მნიშვნელოვანი ზომები. მაგალითად, როცა გამავალი ტალღის სიგრძე $\lambda=30$ სმ, მართკუთხა ტალღაგამტარის ზომები უნდა იყოს 20-25 სმ რიგისა, ე.ი. მნიშვნელოვნად დიდი. ამის გამო ტალღაგამტარი ძირითადად გამოიყენება ზემადალი სიხშირის დიაპაზონში (ზმს), ე. ი. $f>10^9$ ჰე სიხშირის ან $\lambda<30$ სმ სიგრძის ტალღებისათვის. იმ შემთხვევაში თუ $\lambda<12$ სმ-ზე რადიოლოკაციურ სადგურებში მათი გამოიყენება ხდება ფიდერულ სისტემებში ენერგიის გადასაცემად სიგნალის გადამცემიდან გადამცემ ანტენამდე და მიმღები ანტენიდან მიმღებამდე.

ორადბმული განივი კვეთის მქონე ტალღაგამტარის უმარტივესი მაგალითია კოაქსიალური ხაზი.

ზმს ფიდერულ სისტემას წარმოადგენს ტალღაგამტარული ტრაქტი, რომელიც შედგება განსხვავებული განივი კვეთის, ფორმის, ზომისა და სიმრუდის მქონე ტალღაგამტარული მონაკვეთებისაგან, ბრუნვითი შეერთებებისა და სხვა ტალღაგამტარული კვანძებისაგან. სხვადასხვა განივი კვეთის მქონე ტალღაგამტარების შესაერთებლად გამოიყენება ტალღაგამტარული გადასასვლელები, რომელთა განივი კვეთი მდორედ (თანდათან) იცვლება.



სურ.1. პრაქტიკაში გამოყენებული გადაცემის ხაზის ტიპები: а) ორგამტარიანი, ბ) ბრტყელი ხაზი, გ) ღიელექტრიკული ტალღამტარი, დ) ერთგმტარიანი ხაზი, ე) ეკრანირებული ორგამტარიანი ხაზი, ვ) კოაქსიალური ხაზი, ზ) სწორგუთხა ტალღაგამტარი, თ) H ტალღაგამტარი, ი) მრგვალი ტალღაგამტარი, კ) ელიფსისებური ტალღაგამტარი.

გადაცემის ხაზები შეიძლება იყოს დია სურ.1(ა-დ) და დახურული სურ.1 (ე-ზ) ტიპისა. დია ტიპის გადამცემი ხაზის შემთხვევაში ელექტრომაგნიტური ველი განაწილებულია გადამცემი ხაზის მთელ სივრცეში და ენერგიის უდიდესი ნაწილი თავმოყრილია ხაზის სიახლოვეს. დია ხაზებზე მოქმედებს გარემომცველი გარემო და ასეთი ხაზების პარამეტრები დამოკიდებულია მეტეოროლოგიურ პირობებზე (წვიმა, თოვლი), რაც ზღუდავს მათ გამოყენებას ზემადალი სისშირის

დიაპაზონში. დახურული ტიპის გადამცემ ხაზებში
მთელი ენერგია თავმოყრილია გარე გარემოსაგან
იზოლირებულ სივრცეში, რომელიც შემოსაზღვრულია
ლითონით ან სხვა გარსით.

პრაქტიკაში გამოყენებული გადაცემის ხაზების
ტიპები ნაჩვენებია სურ.1-ზე, სადაც ა) ორგამტარიანი, ბ)
ბრტყელი ხაზი, გ) დიელექტრიკული ტალღაგამტარი, დ)
ერთგამტარიანი ხაზი, ე) ეპრანირებული ორგამტარიანი
ხაზი, ვ) კოაქსიალური ხაზი, ზ) სწორკუთხა
ტალღაგამტარი. არსებობს აგრეთვე H-ტიპის, მრგვალი და
ელიფსისებური ტალღაგამტარები.

მულტიპორტული (სამი ან უფრო მაღალი რანგის)
ტალღაგამტარული გადასასვლელები ფართოდ არის
გამოყენებული მიკროტალღოვან უბანში ისეთი
მოწყობილობების შესაქმნელად როგორიცაა
მიმმართველი განმშტოებელი, სიმძლავრის
გამანაწილებელი წრედები, მულტიპლექსერები,
ფილტრები, ფაზური წამნაცვლებელი და სხვა. ასეთი
მოწყობილობების მუშაობის ეფექტურობა
დამოკიდებულია ტალღაგამტარის შტოებში შეთანხმების
ხარისხე და მათი ამოცანაა უზრუნველყოს საკმაოდ
მაღალი ენერგომომარაგება საჭირო შტოებში და
ენერგიის ჩაქრობა (მინიმუმამდე შემცირება) დანარჩენ
შტოებში. მნიშვნელოვანია, აგრეთვე, სიგნალის
გატარების სტაბილურობის მიღწევა საჭირო სისშირულ
ზოლში. ზმს ტექნიკაში ფართოდ გამოიყენება მართკუთხა
ტალღაგამტარების T -ტიპის შეერთებები E და
H სიბრტყეებში.

რეგულარულ ცილინდრულ ტგ-ში ველი
წარმოადგენს სხვადასხვა ტიპის ტალღების უსასრულო

სიმრავლის ჯამს. ყველა ტიპის ტალღებს ზოგჯერ ასე აღნიშნავენ: TE ანუ H, TM ანუ E, და TEM (T აღნიშნავს მართობულობას). თუ დავუშვებთ რომ დანაკარგები არ გვაქვს, მაშინ ყველა ტალღას აქვს თავისი სტრუქტურა: TE – ტალღებში ელექტრულ ველს აქვს მხოლოდ მართობული მდგენელი, მაგრამ მაგნიტურ ველს აქვს გასწვრივი და მართობული მდგენელები;

TM – ტალღებს აქვთ მაგნიტური ველის მართობული მდგენელი და ყველა სხვა მდგენელი ელექტრული ველისაა;

TEM – ტალღებს საერთოდ არა აქვთ გრძივი მდგენელები და შეიძლება არსებობდნენ მხოლოდ მრავლადბმულ ტგ-ში. ე.ი. ტგ-ში, რომელსაც ერთი შინაგანი გამტარი მაინც აქვს;

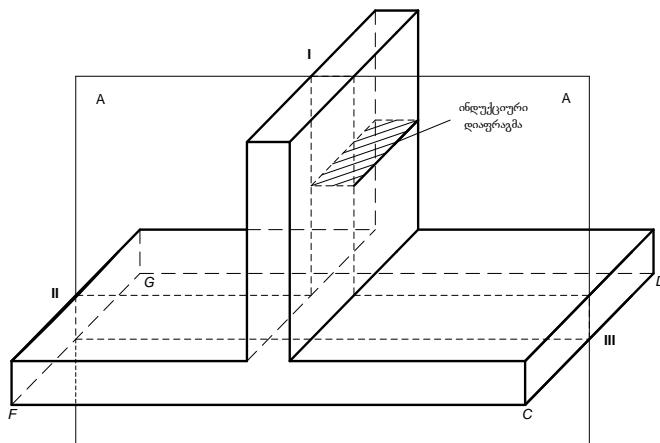
თ-ის და n-ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის ტალღების აღნიშვნები ჩაიწერება ასე TM_{mn} ანუ E_{mn}, და TE_{mn} ანუ H_{mn}; ტალღებს უმცირესი თ-ითა და n-ით ეწოდებათ უმარტივესები. მაგ.: TM ტალღის შემთხვევაში ($H_z=0$) უმარტივესია TM₁₁ ტალღა, ხოლო ტალღები TM₁₀ და TM₀₁ განუხორციელებელია, რადგან მაგნიტური ძალწირები შექრული უნდა იყოს. TE ტალღის შემთხვევაში ($H_z=0$) შესაძლებელია ტალღების არსებობა, როცა m=0, n≠0 ან n=0, m≠0, რადგან ელექტრული ძალწირები შეიძლება იყოს სწორი ხაზები, რომლებიც იწყებიან და მთავრდებიან ტგ-ის მოპირდაპირე კედლებზე, ამიტომ უმარტივეს TE₁₀ ტალღას მივიღებთ, როცა ($E_z=0$) m=1, n=0 ან (m=0, n=1).

შერჩეული სისტემის ქვედა ზღვრის მქონე დეციმურული და უფრო გრძელი ტალღების

შემთხვევაში, სიგნალების გადამცემი კონსტრუქციის დამზადებისას აუცილებელია ზომების დიდი სიზუსტით დაცვა.

3. სამკაპა ტალღაგამტარი

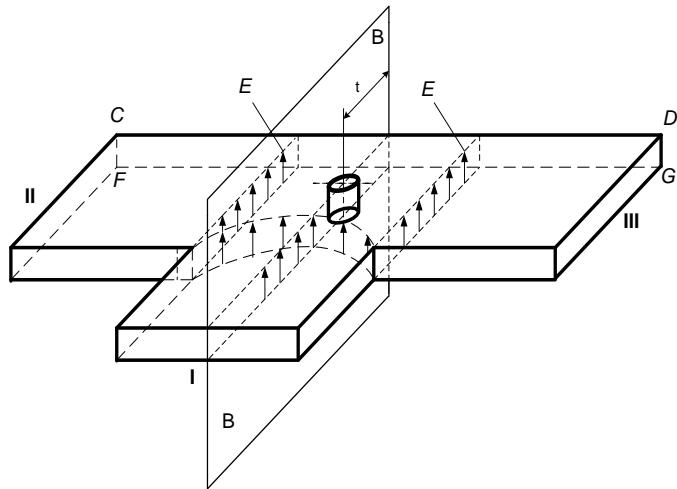
სამკაპა ეწოდება ექვსპოლუსას, რომელიც წარმოიქმნება სამი გადაცემის ხაზის შეერთებით. ნახ.2-ზე ნაჩვენებია სამკაპა ტალღაგამტარის სქემატური გამოსახულება.



ნახ .2. T – ტიპის სამკაპა

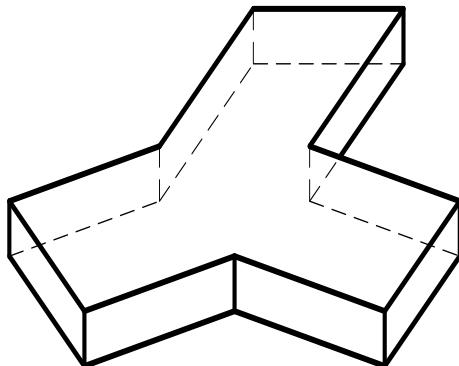
ასეთი ტალღაგამტარული სამკაპების უმარტივესი კლასიფიკაცია ხდება შემდეგი თვისებების მიხედვით: თუ ტალღაგამტარის განშტოება ხდება **E** სიბრტყეში, ე.ი. სიბრტყეში, რომელიც პარალელურია **E** ვექტორისა და **Z** დერძისა, მაშინ სამკაპას ეწოდება ტალღაგამტარული **E** ტიპის სამკაპა ან უბრალოდ ტალღაგამტარული **E** სამკაპა, ხოლო თუ ტალღაგამტარი განშტოვდება

სიბრტყეში, სადაც მდებარეობს მაგნიტური ველის გაქტორი, მაშინ მას H ტიპის ტალღაგამტარი ეწოდება

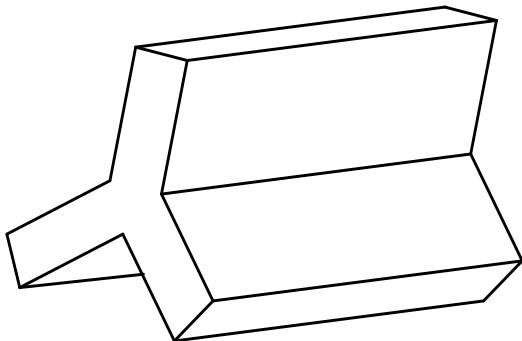


ნახ. 3. T-ტიპის სამკაპა

სამკაპას სტრუქტურის მიხედვით ხდება შემდეგი კლასიფიკაცია: სამკაპას T ფორმის შეერთებებითაT-ტიპის სამკაპას უწოდებენ (ნახ.2 და ნახ.3). ხოლო სიმეტრიულ სამკაპას Y ფორმის შეერთებებით, შესაბამისად, Y-ტიპისას მიაკუთვნებენ (ნახ.4 და ნახ.5). ასეთი ტიპის ტალღაგამტარების დამზადება შესაძლებელია ანალოგიურად, კოაქსიალური ხაზების, მრგვალი ტალღაგამტარებისა და სხვა გადაცემის ხაზების მონაკვეთებისაგან.



ნახ. 4. ყ ტიპის სიმეტრიული სამკაპა



ნახ. 5. ყ ტიპის სიმეტრიული სამკაპა

დავუშვათ, რომ H_{10} ტალღა აღძრულია H -სიბრტყული T -ტიპის სამკაპას I მხარში (ნახ. 2). გრცელდება რა ტალღაგამტარის I მხრის გასწვრივ, ტალღა აღწევს ტალღაგამტარის განშტოების უბანს. ეს უბანი შეგვიძლია განვიხილოთ როგორც მართკუთხა ტალღაგამტარი, რომლის განიერი კედლის ზომა უსასრულოდ დიდია. ამიტომ I მხრიდან გამოსული ელექტრომაგნიტური ტალღის სტრუქტურა წააგავს

თავისუფალი სივრცის ცილინდრული TEM ტალღის სტრუქტურას. ვრცელდება რა მოცემულ განშტოებაში, ცილინდრული ტალღა თავის გზაზე ხვდება CDGF კედლებს და აირეკლება მისგან. გამავალ მხრებში II-სა და III-ში არეკვლილი ტალღა დაცემულთან ერთად H₁₀ ტალღას აღაგზნებს. გარდა ამისა, I მხარშიც არეკვლილი ცილინდრული ტალღის ნაწილი აღაგზნებს არეკვლილ ტალღას H₁₀-ს. ნახ. 2-დან, რომელზეც გამოსახულია განშტოებაში ელექტრული ველების მიახლოებითი სტრუქტურა, ჩანს რომ, მხრები II და III აღიგზნებიან სიმფაზურად და რადგან ისინი სიმეტრიულად არიან განლაგებულნი I მხარის მიმართ, ამიტომ H₁₀ სამფაზური ტალღების ამპლიტუდები ტოლია.

იმისათვის, რომ I მხარს არეკვლილი ტალღა მოვაცილოთ, H-სამკაპაში ჩანერგილია ინდუქციური დერო, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 3-ზე. ცილინდრული ტალღა CDGF კედლიდან აირეკვლამდე ნაწილობრივ აირეკლება ამ დეროდან და I მხარში წარმოიქმნება ორი არეკლილი ტალღა H₁₀, ერთი დეროდან და მეორე – მეტალური კედლიდან. ჩანერგილი დეროს დიამეტრი ისე შეირჩევა, რომ CDGF კედლიდან და დეროდან არეკლილი ტალღების ამპლიტუდები იყოს ტოლი.. თუ დეროს ცენტრსა და CDGF კედლს შორის მანძილი $t = \lambda / 4$ -ს, მაშინ ეს განაპირობებს მეტალური კედლიდან არეკლილი ტალღის ფაზის 180^0 -ით ჩამორჩენას დეროდან არეკლილ ტალღასთან შედარებით. ე.ი. ეს ტალღები აკომპაქნირებენ (აქრობენ) ერთმანეთს. რადგან არეკლილი ტალღის ამპლიტუდა I მხარში 0-ის ტოლია, ამიტომ ასეთი სახით შეთანხმებულ H-სამკაპაში I მხარიდან შემოსული

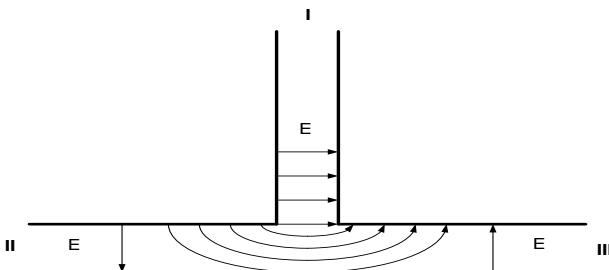
ენერგია თანაბრად ნაწილდება II და III მხრებს შორის, ამიტომ ურთიერთშექცევადობის პრინციპის თანახმად ადგილი უნდა ჰქონდეს საწინააღმდეგო მოვლენასაც. ე.ი. თუ II და III მხრებში ერთდროულად აღგზნებულია ტოლი ამპლიტუდების მქონე სიმფაზური ტალღები H_{10} , მაშინ ამ ტალღების ენერგია შეიკრიბება და გაივლის I მხარში. ანალოგიურად, შეიძლება განვიხილოთ შემთხვევა როცა აღიგზნება მხოლოდ II მხარი ან III მხარი.

H-ტიპის სამკაპა ტალღაგამტარში I და III მხრები II მხრის მიმართ ასიმეტრიულადა არიან განლაგებული, ამიტომ II მხარის აღგზნებისას I მხარში განშტოებული ენერგია III მხარში განშტოებული ენერგიის ტოლი არ არის. იგივე ითქმის I და II მხარზე III მხრის მიმართ და ენერგია ანალოგიურად არათანაბრად გაიყოფა III მხრის აღგზნების შემთხვევაშიც. გარდა ამისა, უნდა აღინიშნოს რომ H-სამკაპა, რომელიც შეთანხმებულია I მხარის მხრიდან (ნახ. 2) შეუთანხმებელია II და III მხრების მხრიდან.

ცხადია, H-ტიპის სამკაპების ყველა შესაძლო კონსტრუქციიდან მხოლოდ Y-ტიპის შეერთება (ნახ. 4) უზრუნველყოფს სიმძლავრის თანაბარ განაწილებას გვერდით მხრებს შორის ამ სამიდან ნებისმიერის აღგზნების შემთხვევაში.

გამოვიყვლიოთ ენერგიის განაწილება E ტიპის სამკაპა ტალღაგამტარში, რომლის სქემატური გამოსახულება ნაჩვენებია ნახ. 6-ზე. განვიხილოთ ელექტრული ველის სტრუქტურა T-სამკაპას E-სიბრტყელ AA-კვეთაში. სურ. 6-დან ჩანს, რომ თუ ენერგია მოდის I მხარში, სამკაპას II და III მხრების სიმეტრიული

განლაგების გამო, მათში ადიგზნებიან ამპლიტუდით ტოლი და საწინააღმდეგო ფაზების მქონე H_{10} ტალღები. შემოსული ელექტრომაგნიტური ტალღების ნაწილი, აირეკლება რა სიბრტყიდან $CDGF$ (ნახ.3), I მხარში ადაგზნებს არეკვლილ ტალღას. იმისათვის, რომ მოახდინონ ამ არეკვლილი ტალღის კომპენსირება I მხარში ქმნიან კიდევ ერთ არეკვლილ ტალღას სიმეტრი-



ნახ. 6

ული ან ასიმეტრიული ინდუქციური დიაფრაგმის გამოყენებით (როგორც სურ.3 –ზეა ნაჩვენები).. ამასთან I მხარში შემოსული ენერგია თანაბრად ნაწილდება II და III მხრებს შორის. აქაც, პროცესის შექცევადობის პრინციპის თანახმად ადგილი უნდა ჰქონდეს შებრუნებულ მოვლენასაც. მაგ.: თუ განსახილველ სამკაპას II და III მხრებში ერთდროულად აღვაგზნებთ ტოლი ამპლიტუდის მქონე საწინააღმდეგო ფაზიან ტალღებს, მაშინ მათი ენერგია შეიკრიბება და I მხარში წამოვა.

რადგან ტალღაგამტარის განიკვეთის ზომები ტალღის სიგრძის თანაზომადია, მათში ელექტრომაგნიტური ველის გავრცელებისა და აღგზნების ამოცანა უნდა ამოიხსნას მაქსველის განტოლებების ინტეგრირების საფუძველზე მოცემული სასაზღვრო

პირობებისა და წყაროებისათვის. ამ ამოცანის ამოხსნის მეთოდები წარმოადგენენ ტალღაგამტარის თეორიის შინაარსს.

3.მართგულისა ტალღაგამტარის მათემატიკური მოდელი

ტალღაგამტარის თეორიისა და პრაქტიკული გამოყენების ძირითადი საკითხებია: 1) ველის გავრცელების პირობების გამოკვლევა რეგულარულ ტალღაგამტარებში, ე.ი. ტალღაგამტარში, რომელზეც არ მოქმედებს გარეშე ველის წყარო და რომელიც არ შეიცავს რაიმე სახის არაერთგვაროვნებებს (ამოცანა ამოიხსნება მაქსველის ერთგვაროვანი განტოლებების ინტეგრებით) და 2) საჭირო სტრუქტურის ველის აგზების ყველაზე უფასო მეთოდების მოქების ამოცანა (ამოიხსნება მაქსველის არაერთგვაროვანი განტოლებების ინტეგრებით).

პარმონიული ტალღების შემთხვევაში მაქსველის განტოლებებიდან ელექტრული და მაგნიტური ველებისათვის ტბ-ში მიიღება ტალღური განტოლებები:

$$\Delta^2 E + \mathbf{k}^2 E = 0$$

$$\Delta^2 H + \mathbf{k}^2 H = 0$$

სადაც $k = \mu/c = 2\pi/\lambda$ არის ტალღური რიცხვი.

მართკუთხა ტალღაგამტარისათვის (სურ. 4) ელექტრული და მაგნიტური ველის ნებისმიერი პროექცია უნდა აკმაყოფილებდეს ტალღურ განტოლებას:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} + \mathbf{k}^2 f = 0 \quad (1)$$

ბერნული-ფურიეს მეთოდის თანახმად ამ განტოლების წარმოდგენა შესაძლებელია შემდეგი სახით:

$$f(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z) \quad (2)$$

(2)-ის (1)-ში ჩასმით მიიღება განტოლებები X , Y , Z ფუნქციებისათვის; ხდება მათი ინტეგრება, ზოგად ინტერვალში შემოდის სასაზღვრო პირობებიც რის შედეგადაც იდეალური გამტარეობის კედლებით შემოსაზღვრულ უსასრულოდ გრძელ ტბ-ში ველის კომპლექსური ამპლიტუდის გეგმილებისთვის მიიღება შემდეგი გამოსახულებები:

$$E_x = A_x \cos m\pi \frac{x}{a} \sin n\pi \frac{y}{b} e^{-\kappa}$$

$$E_y = A_y \sin m\pi \frac{x}{a} \cos n\pi \frac{y}{b} e^{-\kappa}$$

$$E_z = A_z \sin m\pi \frac{x}{a} \sin n\pi \frac{y}{b} e^{-\kappa} \quad (3)$$

$$H_x = B_x \sin m\pi \frac{x}{a} \cos n\pi \frac{y}{b} e^{-\kappa}$$

$$H_y = B_y \cos m\pi \frac{x}{a} \sin n\pi \frac{y}{b} e^{-\kappa}$$

$$H_z = B_z \cos m\pi \frac{x}{a} \cos n\pi \frac{y}{b} e^{-\kappa}$$

სადაც m და n ნებისმიერი დადებითი მთელი რიცხვებია, ხოლო $A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z$ – მუდმივებია, რომლებიც ტბ-ის აღგზნებით განისაზღვრება. ბოლო მამრავლი $e^{-\kappa}$ კი განსაზღვრავს ტალღის ამპლიტუდისა და ფაზის ცვლილებას Z დერძის გასწროვ გავრცელებისას. ტალღაგამტარში თუ დანაკარგები არ არსებობს, როდესაც

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} > \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \quad (4)$$

გავრცელების მუდმივა γ შეიძლება განისაზღვროს E_x, E_y, E_z -ის გადიფერენცირებითა და (1) განტოლებაში ჩასმით:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + k^2} \quad (5)$$

გავრცელების მუდმივა შეიძლება იყოს წმინდა წარმოსახვითი: $\gamma = j\alpha$ ($j = \sqrt{-1}$). ამასთან

$$\omega > \pi c \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2} = \omega_k = \frac{2\pi c}{\lambda_k} \quad (6)$$

ე.ო. იდეალური ტბ მიღევის გარეშე ატარებს მხოლოდ კრიტიკულ სიხშირეზე მაღალი სიხშირის რხევას, ანუ კრიტიკულ ტალღის სიგრძეზე λ_k ნაკლები ტალღის სიგრძის მქონე რხევას. ე.ო. აქვს ფილტრის ოვისება. ზღვრული სიხშირე ω_k მით მაღალია, რაც უფრო მცირეა ტბ-ის ზომები. ამასთან ნებისმიერი λ ტალღის სიგრძე ტბ-ში მოხვედრისას იზრდება. ტალღის სიგრძე ტბ-ში ავღნიშნოთ Λ -ით. λ -თი ტალრაგამტარში აგზნებული ტალღის სიგრძე Λ აღემატება იმავე λ ტალღის სიგრძეს თავისუფალ სივრცეში: $\Lambda \approx \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2 k}{\omega^2}}}$

ტრიგონომეტრიული მამრაგლის(3) გამოსახულებებში

მიუთითებს მდგარი ტალღის არსებობზე ტბ-ის კედლების მართობული მიმართულებით. ელექტრული ველის მხებ მდგენელებს კედლებზე აქვთ კვანძები, თ და თ რიცხვები განსაზღვრავენ მდგარი ნახევარტალდების რიცხვს, რომლებიც მოთავსებულია ა და ბ გვერდების გასწვრივ, ე.ი. რაც უფრო მეტია თ და თ , მით უფრო რთულია ველი ტბ-ს კვეთაში.

რეგულარულ ცილინდრულ ტბ-ში ველი წარმოადგენს სხვადასხვა ტიპის ტალღების უსასრულო სიმრავლის ჯამს. ყველა ტიპის ტალღები იყოფა სამ კლასად: TE ანუ H, TM ანუ E, da TEM (T აღნიშნავს მართობულობას). თუ დაგუშვებო რომ დანაკარგები არ გვაქვს, მაშინ ყველა ტალღას აქვს თავისი სტრუქტურა: TE – ტალღებში ელექტრულ ველს აქვს მხოლოდ მართობული მდგენელი, მაგრამ მაგნიტურ ველს აქვს გასწვრივი და მართობული მდგენელები;

TM – ტალღებს აქვთ მაგნიტური ველის მართობული მდგენელი და ყველა სხვა (სამივე) მდგენელი ელექტრული ველისაა;

TEM – ტალღებს საერთოდ არა აქვთ გრძივი მდგენელები და შეიძლება არსებობდნენ მხოლოდ მრავლადბმულ ტბ-ში. ე.ი. ტბ-ში, რომელსაც ერთი შინაგანი გამტარი მაინც აქვს;

მ-ის და თ-ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის ტალღების აღნიშვნები ჩაიწერება ასე TM_{mn} ანუ E_{mn} , და TE_{mn} ანუ H_{mn}; ტალღებს უმცირესი თ-ითა და თ-ით ეწოდებათ უმარტივესები. მაგ.: TM ტალღის შემთხვევაში ($H_z=0$) უმარტივესია TM₁₁ ტალღა, ხოლო ტალღები TM₁₀ და TM₀₁ განუხორციელებელია, რადგან მაგნიტური

ძალწირები შეკრული უნდა იყოს. TE ტალღის შემთხვევაში ($H_z=0$) შესაძლებელია ტალღების არსებობა, როცა $m=0$, $n \neq 0$ ან $n=0$, $m \neq 0$, რადგან ელექტრული ძალწირები შეიძლება იყოს სწორი ხაზები, რომლებიც იწყებიან და მთავრდებიან ტბის მოპირდაპირე კედლებზე. ამიტომ უმარტივეს TE₁₀ ტალღას მივიღებთ, როცა ($E_z=0$) $m=1$, $n=0$ ან ($m=0$, $n=1$) (ნახ.7);

არებული სიხშირის ქვედა ზღვრის არსებობა დეციმეტრულ და უფრო გრძელი ტალღების შემთხვევაში კონსტრუქციის დამზადებისას მოითხოვს ზომების დიდი სიზუსტით დაცვას.

ენერგია ვრცელდება მეტალური მილის შიგნით, დრუში. მასში შეიძლება არსებობდნენ E და H ტიპის ტალღები და მართკუთხა ტალღამტარში, რომელიც წარმოადგენს გადაცემის ხაზის კერძო შემთხვევას, შეუძლებელია TEM ტიპის ტალღების არსებობა.

დეპარტებს კოორდინატთა სისტემის სათავე მოვათავსოთ მართკუთხედის ერთ-ერთ წვეროში, ხოლო სისტემის გვერდები შევუთავსოთ მართკუთხედის გვერდებს.

Е ტალღის E და H ვექტორების განივი მდგენელები შეიძლება გამოისახოს \dot{E}_z გრძივი მდგენელით. ამიტომ ვეღის სტრუქტურა ტალღამტარში განისაზღვრება შემდეგი განტოლების ამოხსნით:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}_y}{\partial x^2} + \gamma_{\perp}^2 \dot{E}_z = 0; \quad (7)$$

ამ განტოლების ამოხსნით მიიღება, რომ კედლები არის იდეალური გამტარი, ამიტომ მისი კედლების ზედაპირზე ელექტრული ველის მხები მდგენელი 0-ის ტოლია.

მოცემულ შემთხვევაში ამ პირობიდან გამომდინარეობს, რომ $\dot{E}_z = 0$, როცა $x = 0, x = a$ და $\dot{E}_z = 0$, როცა $y = 0, y = b$. (2) განტოლებაში დაშვებით, რომ $x = 0$ და $x = a$, მივიღებთ ორ განტოლებას:

$$A(C \cos \gamma_y y + D \sin \gamma_y y) e^{-i\beta z} = 0$$

$$(A \cos \gamma_x x + B \sin \gamma_x x)(C \cos \gamma_y y + D \sin \gamma_y y) e^{-i\beta z} = 0 \quad (8)$$

ამ განტოლებას აკმაყოფილებს y -ის ნებისმიერი მნიშვნელობა, როცა $A = 0$ და

$$B \sin \gamma_x a = 0 \quad (9)$$

ანალოგიურად, თუ დავუშვებთ (2) განტოლებაში რომ $y = 0$ და $y = b$, მივდივართ დამოკიდებულებამდე $C = 0$ და

$$D \sin \gamma_y b = 0 \quad (10)$$

$B \neq 0$ და $D \neq 0$ პირობისათვის ტოლობა (4) და (5) სრულდება მაშინ, როცა

$$\gamma_x a = m\pi \quad \text{და} \quad \gamma_y b = n\pi \quad (11)$$

სადაც m და n - ნებისმიერი მთელი დადებითი რიცხვებია. როცა $m = 0$ ან $n = 0$ \dot{E}_z გრძივი მდგენელი იგივერად ნულის ტოლია, როცა E ტალღის არარსებობას შეესაბამება. ამიტომ $m \geq 1$ და $n \geq 1$. (6)

ტოლობიდან ვდებულობთ γ_x და γ_y - ის მნიშვნელობებს:

$$\gamma_x = \frac{m\pi}{a} \quad ; \quad \gamma_y = \frac{n\pi}{b} \quad (11)$$

A, C, γ_x და γ_y -ის (2)-ში ჩასმით მივიღებთ

$$\dot{\vec{E}}_z = E_{0z} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-i\beta z} \quad (13)$$

სადაც E_{0z} -ით აღინიშნება DB ნამრავლი, რომელიც წარმოადგენს ელექტრული ველის დაძაბულობის გრძივი მდგენელის ამპლიტუდას. ამ სიდიდის განსაზღვრა სასაზღვრო პირობით არ ხდება, რადგან ველის მდგენელის ამპლიტუდა დამოკიდებულია წყაროს სიმძლავრეზე, რომელიც აღძრავს ტალღაგამტარში ელექტრომაგნიტურ ველს.

თუ გავითვალისწინებთ დამოკიდებულებას ველის მართობულ და გრძივ მდგენელებს შორის და $\dot{\vec{E}}_z$ ნაცვლად კი მის მნიშვნელობას გამოვიყენებთ (8) გამოსახულებიდან, ასევე დავუშვებთ რომ $\dot{\vec{H}}_z = 0$, შედეგად შევძლებთ ველის მართობული მდგენელის განსაზღვრას:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}}_x &= -\frac{i\beta}{\gamma_\perp^2} \frac{\partial \dot{\vec{E}}_z}{\partial x} = -\frac{i\beta \gamma_x}{\gamma_\perp^2} E_{0z} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-i\beta z} \\ \dot{\vec{E}}_y &= -\frac{i\beta}{\gamma_\perp^2} \frac{\partial \dot{\vec{E}}_z}{\partial y} = -\frac{i\beta \gamma_y}{\gamma_\perp^2} E_{0z} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-i\beta z} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\dot{H}_x = -\frac{i\omega \mathcal{E}_a}{\gamma_{\perp}^2} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial y} = -\frac{i\omega \mathcal{E}_a \gamma_y}{\gamma_{\perp}^2} E_{0z} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-i\beta z}$$

$$\dot{H}_y = -\frac{i\omega \mathcal{E}_a}{\gamma_{\perp}^2} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial x} = -\frac{i\omega \mathcal{E}_a \gamma_x}{\gamma_{\perp}^2} E_{0z} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-i\beta z}$$

სადაც γ_{\perp}^2 მნიშვნელობა $\gamma_{\perp}^2 = \gamma_x^2 + \gamma_y^2$ გამოსახულებისა და (7)-ის გათვალისწინებით, ტოლია:

$$\gamma_{\perp} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (15)$$

ყველა მდგრენელის ცვლილება გრძივი დერძის გასწვრივ აღიწერება მამრავლით $e^{-j\beta z}$.

როგორც (9) და (10) გამოსახულებებიდან გამომდინარეობს, განივი კვეთის სიბრტყეში ველის სტრუქტურა მდგარი ტალღის სტრუქტურას შეესაბამება, ამასთან m ნახევარტალღების რიცხვია a გვერდის გასწვრივ, ხოლო n -ნახევარტალღების რიცხვია, b გვერდის გასწვრივ. ამავე გამოსახულებების თანახმად მთელი რიცხვების m და n წყვილს შეესაბამება ელექტრომაგნიტური ველის გარკვეული სტრუქტურა.

4.გართვებისა სამპაპას გათვალისწინები მოდელის ციფრული დამუშავების შედეგები

მართვული სამკაპა ტალღაგამტარში ჩანერგილი ცილინდრული არაერთგვაროვნების არაერთგვაროვნების გეომეტრიული ზომები გამოთვლილია შექმნილი მათემატიკური მოდელის ციფრული დამუშავების

საფუძველზე. ტალღაგამტარული გადასასვლელების შესახებ ჩატარებული მრავალრიცხოვანი შრომების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ შეწყვილებული შტოების პრაქტიკულად გამოყენებადი შეთანხმების მიღწევა შეიძლება მხოლოდ სიხშირის ვიწრი ზოლში და მხოლოდ ტალღაგამტარის მხედების განივი კვეთის ზომების გარკვეული შეფარდების დროს. ამიტომ ასეთი გადასასვლელის შეთანხმების პირობების გსაუმჯობესებლად აუცილებელია გადასასვლელის გეომეტრიის სათანადო შეცვლა. ამ მიზნით ხდება სხვადასხვა ფორმის არაერთგვაროვნებების ჩართვა. მათი გამოყენებით ხდება ტალღური წინაღობის რეგულირება მთავარ და შესარწყმელ მხარეებში მანამ შესარწყმელ მხარეებში არ მიიღწევა შეთანხმების საჭირო მასასიათებელი. განხილულია შემთხვევა, როდესაც არაერთგვაროვნებას ქმნის სამპორტიანი გადასასვლელის მთავარ შტოში ხელოვნურად ჩანერგილი ცილინდრული ფორმის დიელექტრიკული ღერო.

მიუხედავად იმისა რომ ხელოვნური ჩართვების გავლენა კარგად არის შესწავლილი ჩვეულებრივ ტალღაგამტარებში, ტალღაგამტარულ გადასასვლელებში მათი განხილვისას ჩნდება სირთულეები და ამიტომ მრავალი მოვლენა ტალღაგამტარული გადასასვლელებში სხვადასხვა ხელოვნური ჩართულებებით ბოლომდე კარგად არ არის გაგებული.

გამოსაკვლევი ამოცანის გეომეტრია არის მართკუთხა საკოორდინატო სისტემაში მოცემული სამკაპა, ანუ სამპორტიანი ტალღაგამტარული გადასასვლელი მის მთავარ შტოში განთავსებული ცილინდრული ფორმის ღეროთი (სურ.6). მართკუთხა

ტალღამტარების T-ტიპის შეერთებები ხდება სიბრტყეში. ჯერ განვიხილავთ იმ შემთხვევას, როცა ცილინდრული დერო წარმოადგენს კარგ გამტარ მასალას, შემდეგ ამოცანის ამოხსნას განვაკრცობთ დიელექტრიკული ცილინდრული დეროს შემთხვევისათვის. კარტეზიული კოორდინატთა სათავე აღებულია ჩანერგილი ცილინდრის ცენტრში. ვუშვებთ, რომ მოცემული არაერთგვაროვანი გეომეტრიის მქონე ტალღაგამტარის აგზნება ხდება მისი საკუთარი ტალღით H₁₀-ით, რომელიც ეცემა მთავარი შტოზე (ზემოდან) და ვპოულობთ ელექტრომაგნიტურ ველს, რომელიც წარმოიქმნება ტალღაგამტარის სხვადასხვა უბანში ცილინდრულ დეროსა და გადასასვლელზე ტალღის დიფრაქციის შედეგად.

დიელექტრიკული დეროს შემთხვევის განსახილველად შემოდის ახალი სასაზღვრო პირობები და შეთავსების პირობები დიელექტრიკული ცილინდრული დეროს ზედაპირზე და სასაზღვრო სიდიდეების ამოცანას კალავ მიგემვართ ალგებრულ განტოლებათა სისტემამდე, სადაც ჩართული დიელექტრიკის მახასიათებელი პარამეტრების გამოსათვლელად საჭიროა გარკვეული ცვლილებები. გამოყვანილია ტალღაგამტარული სამკაპას სიმძლავრის ბალანსის განტოლება და ჩაწერილია მისი ნორმალიზირებული ფორმა, რითაც დასრულებულია თეორია სამპორტიანი ტალღაგამტარული გადასასვლელისა მის მთავარ შტოში ხელოვნურად ჩანერგილი ცილინდრული დეროთი. დაშვებულია, რომ დაცემული ტალღა მთავარ შტოში სრულიად განისაზღვრება მისი ალექტრული კომპონენტით, რომელიც დროზე

დამოკიდებულებულია ექსპონენციალური e^{iat} კანონით.
 არეავლილი, გატარებული და ინტერფერირებული
 ჰარმონიკების ჯამური ველი სამკაპას უბნებში
 წარმოდგენილია ფურიეს მწყრივის სახით და
 ცილინდრულ ღეროზე გაბნეული ველი განიხილება
 როგორც ველი, გაბნეული ორელგეგნებიან პერიოდულ
 მესერზე, რომელიც შედგება ტალღამტარის მარცხება
 და მარჯვენა კედლებზე ცილინდრული ღეროს სარკული
 გამოსახულებებისაგან. ფურიეს კოეფიციენტების
 მოსაძებნად გამოყენებულია ნულოვანი პირობები
 მეტალის ღეროსა და ტალღამტარის კედლის გამყოფ
 ზედაპირზე, აგრეთვე შეთანხმების (შეწყვილების)
 სასაზღვრო პირობები სამკაპას ცენტრალური და
 გვერდითი უბნების გამყოფ ზედაპირზე. ტალღამტარული
 გადასასვლელის შტოების შეთანხმების სასაზღვრო
 პირობების გამოყენებით მიიღება ფუნქციონალური
 განტოლებები ღეროდან და გადასასვლელიდან
 არეავლილი ტალღების მოდალური სპექტრის
 ამპლიტუდებისათვის. მიღებული ფუნქციონალურ
 განტოლებათა სისტემა გარდაქმნილია შემდგომი
 ანალიზისათვის უფრო მოხერხებულ დაუკანილ ფორმაში,
 რისთვისაც გამოყენებულია საკუთრივი ფუნქციების
 ორთოგონალობის პირობა და დირაკის ფუნქციის
 ფილტრაციის თვისება. ზუსტი ელექტრომაგნიტური
 თეორია იქნა გამოყენებული E-სივრცეში
 ტალღამტარულ სამკაპაში დიფრაქციის მოვლენის
 შესასწავლად. ელექტროდინამიკის ამოცანა
 არაერთგვაროვანი სისტემისათვის მის მიერ
 გადაწყვეტილი იქნა მეორე რიგის ალგებრულ
 განტოლებათა ამოხსნით სამკაპას მთავარ შტოში ველის

უცნობი კოეფიციენტების მიღების მიზნით, რის შედეგადაც შექმნილი იყო ალგორითმი და მონაცემთა კომპიუტერული დამუშავების შედეგად მიღებული იყო რიცხვითი შედეგები. გამოკვლეული იყო გაბნევის მახასიათებლები სამპორტიან გადასასვლელში, როდესაც მთავარ შტოში ჩანერგილი იყო ცილინდრული ფორმის დიელექტრიკული დერო, შესწავლილი იყო დაცემული ტალღის არეკვლის, გატარებისა და გარდატების მახასიათებლები. (10) – ში განვითარებული თეორიის საფუძველზე მიღებული პროგრამული პაკეტის საშუალებით შესაძლებელია ტალღაგამტარში ჩანერგილი დიელექტრიკული ცილინდრის ოპტიმალური პარამეტრების გამოთვლა. მაგალითად, იმ შემთვევისათვის როდესაც ტალღაგამტარის მთავარი შტოს სიგანეა - a, სიგრძე - b, თუ დაცემული ტალღის სიგრძე $\lambda = 1.32538$ მკ. და ტალღაგამტარში ჩანერგილ არაერთგვაროვნებას ქმნის დიელექტრიკული ცილინდრი, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა $\varepsilon = 3.8$, მაშინ მისი დიამეტრი უნდა შეირჩეს ისე, რომ შესრულდეს პირობები: $2a / \lambda = 1.509$, $b / a = 1$ და $d / a = 0.25$, სადაც d - ცილინდრის დიამეტრია.

დასპანა

განვითარებული	თეორიის	საფუძველზე
მიღებული	პროგრამული	პაკეტის
გამოთვლილია	შემდეგი	ელექტროდინამიკური
მახასიათებლები:	არეკვლის	კოეფიციენტი,
არეკლილი	ენერგია,	ჯამური
ენერგიის	ჯამური	გატარებული
ცილინდრის	დანაკარგი	ენერგია,
	და	ნაწინასწარმეტყველებია

შემთვევისათვის, როცა ტალღის სიგრძე $\lambda = 1.32538$;
 $2a / \lambda = 1.509$; ცილინდრის დიელექტრიკული შეღწევადობა
 $\varepsilon = 3.8$ და $b/a = 1$; $d/a = 0.25$, სადაც ტალთაგამზარის
მთავარი შტოს სიგანეა a , სიგრძე - b , ხოლო d -
ცილინდრის დიამეტრია.

ლიტერატურა

1. Вольман В. И., Пименков Ю. В. Техническая Электро - Динамика "Связь" Москва , 1971 , с. 480.
2. Кеванишвили Г. Ш. К теории Волноводного Троиника Изв. вузов, Радиофизика, 1978, Т. 21, N 11, с. 1669 - 1674.
3. Bogdanov F., Kevanishvili G. and G.V.Kekelia:"Scattering of H₁₀ Wave by the Set of Dielectric Cylinders in Rectingular Waveguide," Bulletin of the Academy of Sciences of Georgian SSR,Vol.130, no3, pp537-540(1988)(in Russian)
4. Бараев С. В., Коровин О. Н. Расчет Матрицы Рассеяния Волноводного Тройника в Е - Плоскости , Радиотехника и Электроника 1985,T 27, N8, с.1840 - 1842.
5. Богданов Ф., Кеванишвили Г., Чихладзе Г. К теории Волноводного Тройника в Е - Плоскости. Сообщения Академии Наук Грузии, 1991, Т.141, N1, с. 93 - 96.
6. Левин Л. Современная теория волноводов, ИЛ Москва, 1954.
7. Никольский В.В. Теория Электромагнитного поля, "Высшая школа", Москва, 1964.
8. Harrington R.F. Field Computation by Moment Methods, IEEE Press, New York 1993
9. Bogdanov F ., Kevanishvili G., Jandieri G.,and Yasumoto. "Optimization Strategy for Multoport Waveguide Junctions with Canonical Types Of Artifical Discontinuities" Proc. X International Symposium On Microwave and Optical Technology (ISMOT- 2005), Fukuioka, Japan pp. 625 -627 (2005).

10. Z.ziang, Z. Shen, and X.Shan. Mode-Matching Analisis of Waweguide T-Junction Loader with an H-Plane Dielectric Slab. Progress In Electromagnetic Research, PIER 36, 319 -335, 2002.
11. დ.ლაფერაშვილი, ცილინდრულ არაერთგვაროვნების შემცველი მულტპორტული ტალღამტარული გადასასვლელის ანალიზი და კონსტრუირება” სამაგისტრო ნაშრომი სტუ რადიოტექნიკის კათედრა. თბილისი, 2007.

სტრუქტურული მოუწვევიბებლობები GaMnSb-ის ზირებში და მათი ბაპლუნა ანომალურ ჰოლის ეფექტზე

ვლადიმერ მიქელაშვილი
ფიზიკის დეპარტამენტი, სტუ
vmikelashvili@gmail.com

ნანოსპინგრონიკა ემყარება რა მაგნიტური ნახევარგამტარების გამოყენებას, წარმოადგენს მეცნიერებისა და ინჟინერიის ახალ სფეროს. ეს განპირობებულია საინფორმაციო ტექნოლოგიებში სრულიად ახალი მასალებისა და ხელსაწყოების განვითარებით, რომლებშიც გამოყენებულია არა მხოლოდ ელექტრონის მუხტი, არამედ მისი კვანტურ-მექანიკური თავისუფლების ხარისხი, სხვაგარად სპინი. კვანტურ-ინტერფერფერნციული უფექტების ექსპლუატაციას მივყავართ კვანტური კომპიუტერის შექმნისაკენ.

დღესდღეობით მეცნიერთა ძალისხმევა მიმართულია ნანომასშტაბური მრავალუენოვანი სტრუქტურების შექმნისაკენ, რომელიც შედგება ფერმაგნიტური მეტალისა და არამაგნიტური ნახევარგამტარის მონაცვლეობითი ფენებისაგან, სადაც შეისწავლება სპინური ინჟექციის, მანიპულაციის, კონტროლისა და დეტექტირების პრობლემები. დიდი მნიშვნელობა ენიჭებათ ნახევარგამტარებს, რომლებიც საუკეთესო სპინურ ინჟექტორებად გვევლინებიან. ამ პრობლემების გადასაწყვეტილია შერჩეულია გახსნილი მაგნიტური ნახევარგამტარები, რომლებშიც მაგნიტურ მინარევთა იონები გარკვეული პროცენტული ფარდობითაა წარმოდგენილი(მაგ: 5 ატ %). ასეთი ნახევარგამტარული შენაერთები გამოირჩევიან სპინური

პოლარიზაციის მაღალი ხარისხითა და პოლის ეფექტით ოთახის ტემპერატურის პირობებში, რაც ერთ-ერთ მნიშვნელოვან წინაპირობას ქმნის სპინგრონული ხელსაწყოს პრაქტიკული რეალიზებისათვის.

მიუხედავად რიგი მრავალრიცხოვანი კვლევებისა გასხნილი მაგნიტური ნახევარგამტარების ტექნოლოგიაში, ამ შენაერთთა წონასწორული სინთეზის პირობები მაინც შემოიფარგლებიან (III, Mn) V სისტემებისათვის Mn-ის ხსნადობის დაბალი ლიმიტით ($5\text{ } \text{ატ}\%$)[1]. აქედან GaMnAs -ის შემთხვევაში შესაბამისად გვაქვს ხვრელების კონცენტრაციისა ($p=3.5\times10^{20} \text{ } \text{სმ}^{-3}$) და კიურის ტემპერატურის დაბალი ($T_c \approx 160 \text{ } \text{კელვინი}$) მნიშვნელობები.

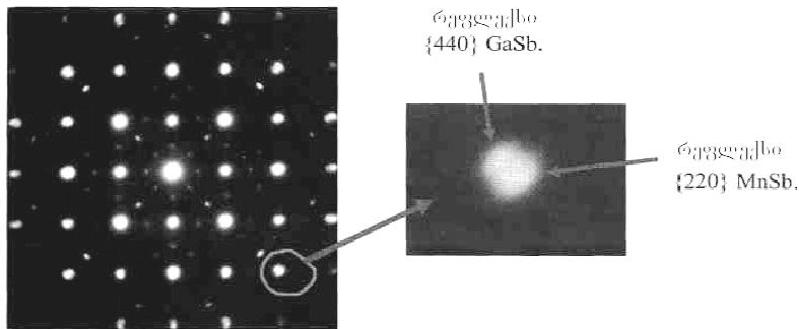
მოლეკულურ-სხივური ეპიტაქსიისა და მისი მოდიფიკაციებისაგან განსხვავებით ლაზერულ-პლაზმური სინთეზის ტექნოლოგიები უზრუნველყოფენ, არა მხოლოდ გაზრდილ კონცენტრაციებს ($N_{\text{Mn}}\approx10^{21} \text{ } \text{სმ}^{-2}$), არამედ მაღალი ლეგირებით გამოწვეული მაგნიტური მოუწესრიგებლობების კონტროლის შესაძლებლობას[2]. ამ კონცენტრაციებზე III-Mn-V სისტემები წარმოადგენენ ძლიერ მოუწესრიგებელ გარემოს, რომელთა მოწესრიგებულობა დაკავშირებულია როგორც სტატისტიკურად განაწილებულ Mn-ის დონორთა ხასიათთან, ისე გაზრდის დეფექტებთან და ძლიერ კომპენსაციასთან, რასაც იწვევენ Mn-ის მეტასტაბილური დონორები.

ჩვეულებრივ Mn-ს III-V შენაერთებში როგორც მაგნიტური მინარევის, ისე აქცეპტორის ფუნქცია აკისრია და ენაცვლება GaAs-ის შემთხვევაში Ga-ის ატომებს.

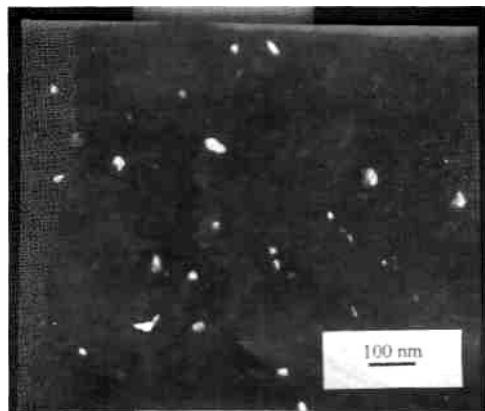
თუმცა მაღალი კონცენტრაციებისას იგი იკავებს კვანძმთაშორის მდგომარეობებსაც სადაც დონორად გვევლინება. მაღალი კონცენტრაციებისას იგი აგრეთვე ქმნის გრანულებს, რომელიც შედგება Mn-ის შენაერთისაგან V ჯგუფის მინარევთან, როგორიცაა: MnAs, MnSb, რაც უკვე ფერომაგნიტურ მეტალებს წარმოადგენენ. ამგვარად, გვაქვს 3 ტიპის მოუწესრიგებლობა: სტრუქტურელი (სხვადახვა ფაზის გრანულები), მაგნიტური (მაგნიტურ იონთა არაერთგვაროვანი განაწილება, რასაც მივყავართ ლოკალური მაგნიტური მომენტების ფლუქტუაციამდე), და ელექტრული (დამუხტულ მინარევთა არაერთგვაროვანი განაწილება, რაც იწვევს ფლუქტუაციურ პოტენციალს). შემდგომში ჩვენ ვაჩვენებთ თუ რამდენადაა დამოკიდებული გასსნილი მაგნიტური ნახევარგამტარის ფერომაგნიტურ თვისებებზე მოუწესრიგებლობების გავლენა ლაზერული მეთოდებით მომზადებულ GaMnSb -ის მაგალითზე. როგორც ავდიოშრეფ Mn-ის მაღალი კონცენტრაციებისას ყალიბდება მეტალური ფერომაგნიტური გრანულები.

GaSb:Mn-ის ფირები სინთეზირებული იქნა ლაზერული პლაზმიდან დაფენის მეთოდით. ფირები 40-140 ნმ სისქიო დაფენილი იქნა GaAs(100)-ის ფუძქშრეზე, რომლის ტემპერატურა იცვლებოდა $T_s \approx 200-400$ °C -მდე, რაც განაპირობებდა ხერელების კონცენტრაციის ცვლილებას $p = 5 \times 10^{20} - 3 \times 10^{19}$ სმ⁻³ საზღვრებში.

ნუმუშთა სტრუქტურის მაღალი ხარისხი და MnSb-ის გრანულები ადვილად შეგვიძლია დავინახოთ სურ. 1 ა და სურ. 1 ბ-ზე.



სურ. 1 ა. (Ga,Mn)Sb ნიმუშის ელექტრონულ დიფრაქციული სურათი. გადიდებული არე გვიჩვენებს $\{440\}$ მატრიცის და MnSb-ის რეფლექსებს.



სურ. 1 ბ. (Ga,Mn)Sb ნიმუშის ელექტრონული მიკროსკოპის სურათი, რომელიც მატრიცაში გრანულების დემონსტრირებას ახდენს.

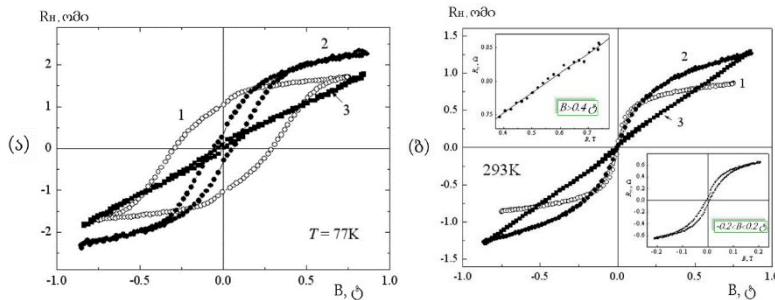
ერთ-ერთი ყველაზე ეფექტური გზა გმნ
სტრუქტურების შესასწავლად და სპინპოლარიზებული
მუხტის გადამტანების დეტექტირებისათვის არის

ანომალური ჰოლის ეფექტი(აპე). ცნობილია, რომ ჰოლის გელი მაგნიტურ მასალაში შედგება ორი კომპონენტისაგან

$$E_H = R_0 B j_x + R_a M j_x \quad (1)$$

სადაც B - მაგნიტური ინდუქცია, M - დამაგნიტებულობა, j_x -დენის სიმკვრივე, R_0 - ლორენცის ძალებით გამოწვეული ნორმალური ჰოლის კოეფიციენტი, R_a - ანომალური ჰოლის ეფექტის კოეფიციენტი.

დამაგნიტებულობის საპირისპიროდ ჰოლის ეფექტის მახასიათებლები დამოკიდებულია ხვრელების კონცენტრაციაზე(რომელიც თავის მხრივ დამოკიდებულია დაფენის ტემპერატურაზე T_s). სურ. 2 აღნიშნავს მაგნიტური ვეილს დამოკიდებულებას ჰოლის წინაღობაზე $R_{xy}(B)$, რომელიც მიღებულია $T=77$ K (სურ. 2 a) და $T=293$ K (სურ. 2 b) ტემპერატურებზე GaSb:Mn -სათვის სხვადასხვა ხვრელების კონცენტრაციებისას.



სურ. 2. ჰოლის წინაღობის მაგნიტურ ველთან დამოკიდებულება GaMnSb/GaAs სტრუქტურებისათვის : 1 – $p = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $T_s = 200^\circ\text{C}$; 2 – $p = 1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $T_s = 200^\circ\text{C}$; 3 – $p = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $T_s = 440^\circ\text{C}$.

გაზომვები შესრულდა (a) -77K და (b) – 293K ტემპერატურებზე. ბ-სათვის ზედა ჩანართი აღნიშნავს $R_{xy}(B)$ დამოკიდებულებას ნიმუშ 1-სათვის, როცა $B > 0.4$ Oe;

ქვემო ჩანართი კი გვიჩვენებს იგივე დამოკიდებულებას როცა $-0.2 < B < 0.2$ ტ.

მუხლების კონცენტრაცია გამოთვლილი იქნა R_{xy} (B) მრუდის დახრილობიდან $B > 0.4\text{--}0.5$ ტ ველისას. მაღალი ველისას ამ დამოკიდებულების წრფივი ხასიათი მოყვანილია სურ 2 ბ ჩანართზე. სურათიდან ჩანს, რომ ჰოლის ეფექტი 1 და 2 ნიმუშებისათვის ანომალურია $T=77$ და 300K ტემპერატურებზე, როდესაც 3 მრუდის შემთხვევაში მცირე კონცენტრაციებზე გვაქვს ჩვეულებრივი ჰოლის ეფექტის შემთხვევა. ნიმუშ 1 და 2-ის შედარებით ჩანს, რომ ხვრელთა კონცენტრაციის კლება ახშობს აჟ-ის ჰისტერეზისულ ხასიათს.

დეტალურად, წინააღმდეგობის ველი ნიმუშ 1-სათვის $B_c=0.29\text{G}$ 77K -ზე და აჟ-ის ჰისტერეზისი ოთახის ტემპერატურამდე არსებობს ($B_c=6.5$ მტ, ქვედა ჩანართი სურ 2 ბ). ამავდროულად ნიმუშ 2-სათვის $B_c=0.058\text{G}$ 77k -ზე და ჰისტერეზისი არ დაიმზირა 300k -ზე. აჟ-ის დომინირებისას ცვლადი(სპონტანური) ჰოლის წინაღობა R_{xy}^S პროპორციულია სპონტანური დამაგნიტულობის M_s [3,4].

ხვრელების კონცენტრაციის ძლიერი დამოკიდებულება აჟ-ის ეფექტზე წარმოშობს აზრს, რომ ეს განსხვავებები ხვრელების კონცენტრაციებზე უნდა იყოს დამოკიდებული. თავისუფალ მუხტის გადამტანთა ურთიერთქმედება ფერომაგნიტურ ჩანართებთან ჩანს, რომ უნდა განისაზღვროს შოტკის ბარიერის არსებობით მატრიცასა და კლასტერის გამყოფ ზედაპირთან(ჩვენს შემთხვევაში MnSb/GaSb საზღვარი). ეს ურთიერთქმედება დამოკიდებულია არა მარტო ფერომაგნიტური ფაზის

შემადგენლობაზე, არამედ ხვრელთა კონცენტრაციაზე, რომლის ზრდასაც მივყავართ შოტკის ბარიერის შემცირებამდე. ეს ფაქტი იწვევს ძლიერ გვირაბულ გაცვლას თავისუფალ მუხტის გადამტანებსა და ფერომაგნიტურ კლასტერებს შორის, ამიტომ აკე ხდება უფრო გამოკვეთილი. მეორე მხრივ დაფენის ტემპერატურის ზრდას მივყავართ კლასტერთა ზომის ზრდისაკენ.

წინააღმდეგობის ველის დიდი მნიშვნელობა და დამაგნიტების მრუდის მკეთრი ზრდა ჰისტერეზისულ მრუდზე, მიგვითითებს კლასტერთა დომენურ სტრუქტურაზე, რაც ნიშნავს, რომ წინააღმდეგობა იზრდება კლასტერის ზრდასთან ერთად. ალბათ უნდა ჩავთვალოთ, რომ MnSb-ის კლასტერის ზომა 10 ნმ-ზე მცირეა და ურთიერთქმედება გამოწვეულია GaSb:Mn მატრიცაში მუხტის გადამტანების შუამავლობით.

დასკვნის სახით შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ზელეგირებული მასალის, როგორიცაა - GaSb:Mn ფერომაგნიტური თვისებების ძირითად განმსაზღვრელ ფაქტორს წარმოადგენს მაგნიტური ნანოკლასტერების ფორმირება.

სამუშაო შესრულებულია საერთაშორისო ფონდის მხარდაჭერით ISTC –პროექტი G1335.

ლიტერატურა

1. X. Chen, et.al., Appl. Phys. Lett. 81 p 511. (2002)
2. P.Kervalishvili, Z.Gogua, V.Mikelashvili. “Nanostructure – Based Spinelectronics Sensory Materials”, Novel Materials, Annual Collection of Selected Papers, Georgian Engineering News, , pp.7-14. 2006

3. B.A.Aronzon, A.B.Granovsky. A role of the disorder in transport properties ferromagnetic III-Mn-V semiconductors. The collection of works of XX international school-seminar “ New magnetic materials of microelectronics “, on June, 12-16th. Moscow, crp.523. 2006
4. B.A.Aronzon . Disorder effects in dilute magnetic semiconductors, HAIT Journal of Science and Engineering A, Volume 5, Issues 1-2, pp. 52-70.

გალიუმის არსენიდზე ლითონების ელექტროჰიბრიდური და მიმიური დაზენა

თინათინ ლაფერაშვილი

lafera2002@yahoo.com

წარმოდგენილია გალიუმის არსენიდის ზედაპირზე ლითონების ელექტროჰიბრიდი დაფენის ორიგინალური მეთოდი, რომლის მიხედვით უშეალოდ ლითონის თხელი ფენის დაფენის წინ ხდება ნახევარგამტარის ზედაპირის უანგისაგან ელექტროჰიბრიდი გასუფთავება. ელექტროლიტად გამოყენებულია ლითონის ქლორიდის წყალხსნარი, რომელიც ერთდროულად შეიცავს, როგორც ნახევარგამტარის ელექტროჰიბრიდურად გამწმენდ ნივთიერებას, ასევე დასაფენი ლითონების იონებსაც. წარმოდგენილი ტექნოლოგიით დამზადებულია იდეალური შოტკის დიოდები, აღწერილია მათი ელექტროფიზიკური მახასიათებლების კვლევის შედეგები.

საკვანძო სიტყვები: ელექტროჰიბრიდი, დაფენა, ლითონი, ნახევარგამტარი, შოტკის დიოდი.

1. შესაბალი

ნახევარგამტარზე ლითონს აფენენ სხვადასხვა მეთოდით: ქიმიური, ელექტროჰიბრიდური, გაკუუმური, ლაზერული, მაგნეტრონული, მოლექულურ-სხივური ეპიტაქსიით და სხვა. ლითონის დაფენის ელექტროჰიბრიდური მეთოდი არ საჭიროებს მაღალი ვაკუუმის შესაქმნელად საჭირო ძვირადლირებულ დანადგარებს; ეკონომიკურია, რადგან ძვირფასი ლითონებისა და დენის დანახარჯი მცირეა; გარდა ამისა, ეს მეთოდი გალიუმის არსენიდზე (GaAs) ფერომაგნიტური

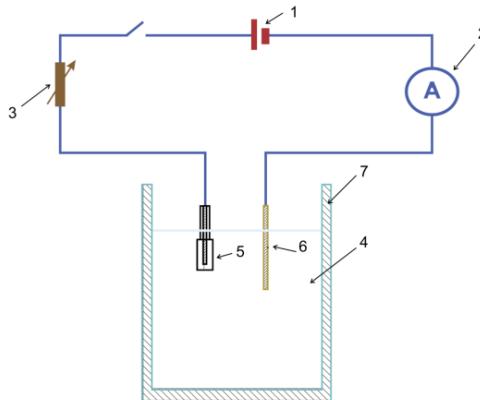
ლითონის (Fe) ეპიტაქსიური გაზრდის საშუალებას იძლევა [1].

2. GaAs-ზე ლითონების (Fe, Ni, Pd) ელექტრომიზიური დაფენა

III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებზე ლითონების დაფენის ელექტროქიმიური მეთოდი აღწერილი იყო [2-3]-ში. ნახევარგამტარულ ფირფიტაზე ლითონის ელექტროქიმიური მეთოდით დასაფენად მას ერთ ზედაპირზე უკეთდება ომური კონტაქტი, რომელზეც მიერჩილება მავთული დენის მისაყვანად, შემდეგ ნახევარგამტარის ზედაპირი ომური კონტაქტით და მასზე მირჩილული მავთული დაიფარება ქიმიურად მდგრადი ლაქით, ხოლო მეორე ზედაპირი კვლავ სუფთავდება სათანადო ხსნარებში ქიმიური დამუშავებით და ლითონის დასაფენად მყისიერად თაგსდება ჭიქაში - 4 (იხ. სურ.1), რომელშიც ჩასხმულია წინასწარ დამზადებული ელექტროლიტი.

გალიუმის არსენიდზე შოტკის დიოდის მისაღებად ექსპერიმენტში გამოყენებული იყო ჩოხრალსკის მეთოდით გაზრდილი 200 – 250 მკ სისქის n-ტიპის მონკრისტალური GaAs – ის ფირფიტები, (100) კრისტალური ორიენტაციითა და ელექტრონების კონცენტრაციით $10^{16}\text{-}10^{17}\text{ см}^{-3}$. ნახევარგამტარულ ფირფიტაზე ლითონის თხელი ფირის დასაფენად ელექტროლიტი მზადდება შესაბამისი ლითონის ქლორიდის ჟყალხსნარზე HCl და NaOH-ის ისეთი რაოდენობის დამატებით, რომ ელექტროლიტის მჟავიანობის შესაბამისი pH იყოს (1.5 – 2,0) ინტერვალში.

ლითონით დაფარვამდე ჯერ ხდება ნახევარგამტარის ზედაპირის ელექტროლიტური გასუფთავება; შემდეგ ნახევარგამტარზე მოდებული ძაბვა მყისიერად იცვლება საწინააღმდეგო პოლარობით და იმავე ხსნარში, ერთიან ტექნილოგიურ პროცესში (ხსნარიდან ნიმუშის ამოუღებლად) ლითონი ეფინება ნახევარგამტარის ზედაპირს. დაფენის პროცესში თავიდან გადის მცირე დენი ნახევარგამტარზე ლითონის ჩანასახების წარმოსაქმნელად, რამდენიმე წუთის შემდეგ დენის სიმკვრივე იზრდება ლითონის დაფენის სიჩქარის გაზრდის მიზნით.



სურ.1. ნახევარგამტარზე ლითონის ელექტროქიმიური დაფენის დანადგარის სქემა

ნახევარგამტარზე ლითონის ელექტროქიმიური მეთოდით დაფენის მარტივი მოწყობილობის სქემა ნაჩვენებია სურ.1-ზე. მუდმივი დენის წყაროზე (1) მიერთებულია ამპერმეტრი (2), ცვლადი წინადობა

წრედში გამავალი დენის შესაცვლელად (3) და ჭიქა (7) ელექტროლიტით (4), რომელშიც მოთავსებულია ნახევარგამტარული ფირფიტა(5) და მეორე ელექტროდი (6); 7 -კვარცის ჭიქა.

ექსპერიმენტებისთვის შერჩეული იყო ელექტროლიტები და GaAs-ზე დაფენილი იყო სხვადასხვა ლითონი. აღწერილი ტექნოლოგიის გამოყენებით ადრე ჩვენს მიერ დამზადებული და შესწავლილი იყო შოტკის იდეალური დიოდები გალიუმის ფოსფიდის ბაზაზე [2-5], აგრეთვე შოტკის დიოდები GaAs-ზე III ჯგუფის ლითონების In, Ga და Al ელექტროქიმიური დაფენით [5]. აქ წარმოდგენილია ფერმაგნიტური ლითონის Fe-ის, აგრეთვე Pd-ისა და Ni-ის ელექტროქიმიური დაფენის რეჟიმები (ცხრ. I).

ცხრილი I. GaAs –ზე ლითონების ელექტროქიმიური დაშვენა

ლითონი	მარილი	რაოდენობა გრ/ლ	ანოდი	pH
Fe	FeCl ₂	32 -35	Pt	1.5
Ni	NiCl ₂ .6H ₂ O	30	Ni	1.5
Pd	PdCl ₂	32-35	Pt	1.5

3. ალუმინის ელექტროქიმიური დაშვენა GaAs -ის ზედაპირზე ალუმინის ქლორიდის წყალსნარიდან

საინტერესო აღმოჩნდა ალუმინის ქლორიდის წყალსნარიდან III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებზე ალუმინის ელექტროქიმიური მეთოდით დაფენის შესაძლებლობა [4,5], რაც ჩვენს მიერ ნაჩვენები იყო ექსპერიმენტული მონაცემების კვლევების შედეგად.

თუმცადა, ელექტროქიმიის კანონების თანახმად წყალსნარიდან ალუმინის გამოძევება შეუძლებელი უნდა იყოს.

ცნობილია, რომ მრეწველობაში გამოყენებული ალუმინი მთლიანად მიიღება 1886 წელს პოლის მიერ შემოთავაზებული ელექტროქიმიური მეთოდით 1000°C ტემპერატურაზე რკინის აბაზანაში, რომელიც ასრულებს კათოდის როლს. ელექტროლიტია გალვობილი კრიოლიტი Na_3AlF_6 , რომელშიც გახსნილია Al_2O_3 . ალუმინის ჟანგს დებულობენ მისი მინერალების $[\text{AlHO}_2, \text{Al}(\text{OH})_3]$ ნარევიდან სათანადო გასუფთავების შემდეგ. ელექტროლიზორში იყენებენ ნახშირის ანოდებს. დენის გავლისას გამოყოფილი სითბო ელექტროლიტს უნარჩუნებს გალვობილ მდგომარეობას 1000°C -ზე. ანოდური რეაქცია მიმდინარეობს ნახშირჟანგის მონაწილეობით



კათოდური რეაქციაა

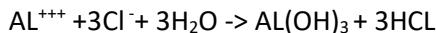


ელექტროლიზის პროცესში მიღებული ლითონური ალუმინი გროვდება ელექტროლიზორის ფსკერზე, საიდანაც მას გადმოასხამენ.

კითხვას -- შესაძლებელია თუ არა	ალუმინის
ელექტროქიმიური დაფენა მისი მარილების	
წყალსნარიდან -- სშირად უარყოფითად	პასუხობენ,
რადგან ძაბვათა მწკრივში ალუმინი წყალბადის	

მარცხნივ მდებარეობს ე.ი. უფრო ძლიერი აღმდგენია ვიდრე წყალბადი, ელექტროლიზის დროს უნდა აღდგეს წყალბადი და გამოიყოს კათოდურ სივრცეში H₂.

მეორეს მხრივ ალუმინი, რომელიც ელექტროლიტში დისოცირებული მარილის AlCl₃-ის სახით არის წარმოდგენილი შედის წყალთან რეაქციაში



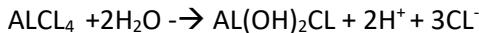
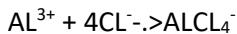
რის შედეგადაც წყალში უხსნადი ფუძე გამოილექება და ელექტროლიტში ალუმინის თავისუფალი იონი ადარ უნდა იყოს. ამის თავიდან აცილება შესაძლებელია სსნარზე მარილმჟავას დამატებით. ხდება საწინააღმდეგო რეაქციაც



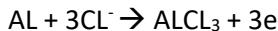
და ელექტროლიტში კვლავ გაჩნდებიან თავისუფალი იონები, რომელთა გადაადგილება შესაძლებელია ელექტრული ველის მოქმედებით ანოდიდან კათოდისაკენ.

ანოდად გამოყენებული ალუმინის ფირფიტა შეიძლება იმავდროულად იყოს ალუმინის იონების წყაროც. როგორც ცნობილია, წყალში მოთავსებისას ალუმინი სწრაფად იფარება ალუმინის ჟანგის თხელი ფენით, რომელიც იცავს მას შემდგომი კოროზიისაგან, თუმცა ელექტროლიტში არსებული აგრესიული ქლორის ადსორბცია ჟანგის ფენაზე და მისი რეაქცია ჟანგთან წარმოქმნის Al(OH)₂Cl-ს, შლის ჟანგის ფენას და

აშიშვლებს ლითონს, რის შემდეგ ხსნარში შესაძლებელია განხორციელდეს შემდეგი პროცესები:



ა6



მიღებული $\text{Al(OH)}_2\text{Cl}$ და Al(OH)_3 წყალში უხსნადი ფუძეებია და ნალექის სახით უნდა გამოიყოს, რისი აცილებაც შესაძლებელია ხსნარზე HCl -ისა და NaOH -ის ისეთი რაოდენობის დამატებით, რომ ელექტროლიტის $\text{pH} = 1.5$. მათი ურთიერთქმედების შედეგად მიიღება NaOCl რომელიც დისოცირდება და მიიღება Na^+ და ძლიერი დამჯანგავი იონი OCl^- ასე, რომ ხსნარში დენის გატარებისას ერთდროულად შეიძლება გვქონდეს კათონები Na^+ , Al^{3+} , H^+ , და ანიონები OH^- , Cl^- , ClO^- . ელექტროლიტში დენის გატარებისას ანოდზე გამოიყოფა Cl_2 , ხოლო კათოდურ სივრცეში გამოძევდება წყალბადი და გამოილექება ალუმინი.

მეორე კითხვაა, თუ რაზე შეიძლება ალუმინის ელექტროქიმიური გამოლექვა, ე.ი. რისი გამოყენება შეიძლება კათოდად. რადგან ძაბვათა მწკრივში ალუმინი მოთავსებულია წყალბადის მარცხნივ, პრაქტიკაში გამოყენებული ლითონების წინ, ეს ნიშნავს იმას, რომ იგი ქმიურად უფრო აქტიურია, ე.ი. უფრო ადვილად

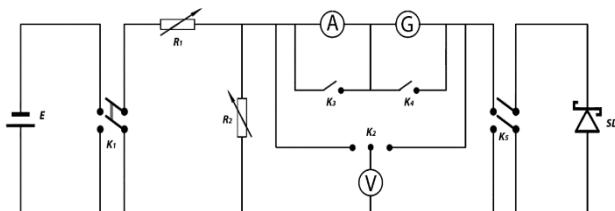
გასცემს ელექტრონს და მისი აღდგენა ნეიტრალურ მდგომარეობაში სხვა პრაქტიკაში გამოყენებად ლითონებთან ურთიერთქმედებისას არ ხდება.

კათოდად შეიძლება ისეთი ნახევარგამტარის გამოყენება, რომლის ზედაპირი დიდი რაოდენობით შეიცავს უარყოფითად დამუხტულ ქიმიურად აქტიურ ზედაპირულ ცენტრებს (მაგალითად, III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებში ასეთ ცენტრებს ქმნიან დეფექტები: As_{Ga} და P_{Ga} - GaAs-ისა და GaP-ს შემთხვევაში, შესაბამისად), ასეთ შემთხვევაში ელექტრილიზის დროს კათოდთან მიახლოებისას ხდება ალუმინის კათონების ჩაიჭერა ქიმიურად აქტიურ ზედაპირულ ცენტრებზე და ნახევარგამტარის ზედაპირზე ალუმინის ლითონურ ჩანასახები წარმოიქმნებიან. ხდება კათოდური რეაქცია იქნება



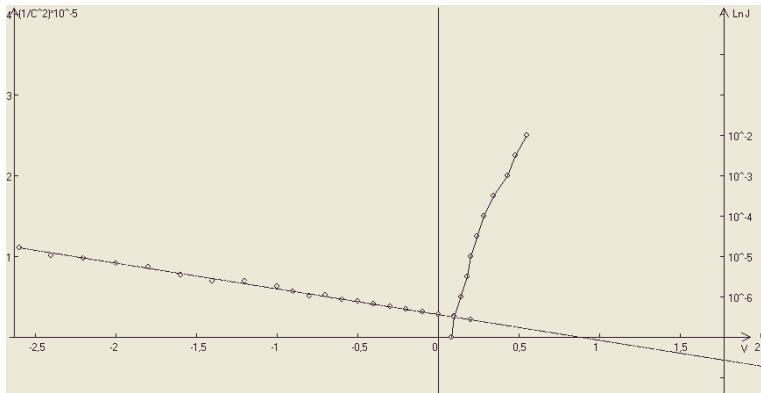
და ელექტროლიზის შემდგომ პროცესში ამ ჩანასახებზე გაზრდილი ალუმინი წარმოქმნის ერთიან ლითონურ ფენას, რომლის სისქე დამოკიდებული უნდა იყოს სსნარში ლითონის კონცენტრაციაზე, მის ტემპერატურაზე, ე.ი. დენის სიმკვრივესა და დაფენის დროზე. ლითონით დაფარვის შემდეგ ფირფიტებს ვჭრიდით (1-4) მმ² ზომის ნიმუშებად და ვზომავდით ვოლტამპერულ, ვოლტევვადურ და ფოტოსპექტრულ მასასიათებელს მოკლებართულ მდგომარეობაში. ლითონისა და ნახევარგამტარის კონტაქტში დენის გავლის მექანიზმის დასადგენად, გამყოფი ზედაპირის იდეალურობის კოეფიციენტისა და კონტაქტური

პოტენციალის ან ზედაპირული ბარიერის სიმაღლის გამოსათვლელად (საკოველთაოდ აღიარებული მეთოდებით [2,3] სტრუქტურების ვოლტამპერული მახასიათებელი იზომებოდა სტაციონარულ რეჟიმში (მუდმივი დენის პირობებში), სურ. 2-ზე ნაჩვენები ელექტრული სქემის გამოყენებით. გაზომვებს ვატარებდით ოთახის ტემპერატურაზე.



სურ.2. ვოლტამპერული მახასიათებლის გადასაღები სერა

ვოლტეგადური მახასიათებელი იზომებოდა 10 მც-ზე სიხშირეზე L2-28 ხელსაწყოს გამოყენებით. სურ.2-ზე ნაჩვენებია გალიუმის არსენიდსა და გალიუმის ფოსფიდზე ალუმინის ქლორიდის წყალსნარიდან ლითონის ელექტროქიმიური დაფენით მიღებული შოტკის დიოდების ვოლტამპერული მასიათებელი დიოდზე მოდებული გარეშე ძაბვის დადგებითი მნიშვნელობებისათვის (პირდაპირი წანაცვლებისას). დენის ძაბვისგან დამოკიდებულების გრაფიკი აგებულია ნახევრადლოგარითმულ მასშტაბში (V,lnJ) (ნახ.2 – ის მარჯვენა მხარე). ვოლტ-ტეგადური მახასიათებელი გაზომილი დიოდზე მოდებული გარეშე ძაბვის უარყოფითი მნიშვნელობებისათვის აგებული იყო (V, C^{-2}) კოორდინატებში (ნახ.2 – ის მარცხენა მხარე).



სურ..3 Al/GaAs შოტკის დიოდის ვოლტამპერული (მარჯვნივ) და ვოლტტენცადული მახასიათებელი (მარცხნივ)

სურ.3-დან ჩანს, რომ $(V, \ln J)$ და (V, C^{-2}) დამოკიდებულება არის წრფივი, ხოლო $(V, \ln J)$ დამოკიდებულებიდან გამოთვლილი იდეალურობის კოეფიციენტი ახლოსაა ერთან, რაც მიუთითებს მასზედ, რომ ლითონსა და ნახევარგამტარს შორის არის უშუალო კონტაქტი (შუალედური ჟანგის ფენის გარეშე), კონტაქტზე დენის სვლის მექანიზმი კარგად აღიწერება თერმოელექტრონული ემისიის ბეტეს თეორიით და ექსპერიმენტულად მიღებული შოტკის ბარიერის სიმაღლე კარგ თანხვდენაშია სხვა ავტორების მიერ ზემაღლი ვაკუუმის პირობებში დამზადებული Al/GaAs შოტკისბარიერის სიმაღლეს (0.7 – 08) ევ.

4. შოტკის დიოდების დამზადება ნახევარბამტარზე დიოდის ქიმიური დაზენი

გალიუმის არსენიდსა და გალიუმის ფოსფიდზე შოტკის დიოდების დასამზადებლად ვიყენებდით აგრეთვე

ოქროს და ნიკელის დაფენის ქიმიურ მეთოდს [6], ამ მეთოდით შოტკის დიოდების დასამზადებლად ექსპერიმენტში გამოყენებულია ჩოხრალსკის მეთოდით გაზრდილი n - ტიპის ნახევარგამტარული მონოკრისტალები $10^{16} - 10^{17}$ სმ⁻³ კონცენტრაციით და 250 - 300 მკ სისქით.

შოტკის დიოდების დამზადების ტექნოლოგიური საფეხურები იყო შემდეგი: ნახევარგამტარული კრისტალები იხეხებოდა (იშლიფებოდა) M7 და M3 მიკროფენცნილით; პრიალდებოდა ალმასის AM-1 პასტით; ირეცხებოდა CCl_4 -ში და აცეტონში რამდენჯერმე წამოღუდებით; და ხდებოდა ნახევარგამტარის ზედაპირების ქიმიური დამუშავება გალიუმის ფოსფიდისა სამეფო წყალში ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$), ხოლო გალიუმის არსენიდისა ხსნარში ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$) რამდენიმე წამის განმავლობაში წამოღუდებით; ამის შემდეგ ნიმუშები კარგად ირეცხება დისტილიტებულ წყალში და ახლად დამუშავებულ კრისტალებს ერთ ზედაპირზე უკეთდება ომური კონტაქტი In-ის შედნობით ინერტული გაზის ატმოსფეროში 3-5 წთ-ის განმავლობაში, 500 - 600 °C-ზე, (შესაბამისად GaAs - ისა და GaP-ს შემთხვევაში); შემდეგ ომური კონტაქტის შემცველი ნახევარგამტარის ზედაპირი და კრისტალის გვერდები იფარება ქიმიურად მდგრადი ლაქით; მისი შეშრობის შემდეგ სუფთავდება ნარევში 0.5% $\text{Br}_{2+99.5\%}$ CH_3OH ; რამდენჯერმე ირეცხებოდა სუფთა მეთანოლში და ნიმუში სწრაფად თავსდება კვარცის ჭიქაში ჩასხმულ ხსნარში ლითონის ქიმიურად დასაფენად. GaAs-ზე ლითონების დასაფენად საჭირო ხსნარების

შემადგენლობა და დაფენის პირობები მოცემულია ცხრილში II.

დაფენის შემდეგ მიღებული ლ-ნ სტრუქტურას ვაცლიდით ლაქს ჯერ მექანიკურად, შემდეგ აცეტონში რამდენჯერმე წამოღულებით, ვჭრიდით 1 - 4 მმ² ფართობის ნიმუშებად და ვზომავდით მახასიათებლებს. გადაღებული ვოლტ-ამპერული, ვოლტტევადური და ფოტოდენის დაცემული ტალღის ენერგიაზე დამოკიდებულებების ცხრილები

ცხრილი II. GaAs-ზე ლითონების (Au, Ni) ქიმიური მეთოდით დაფენის პირობები

ლითონი	ხსნარის შემაღბ.	რაოდ. გ/ლ	ტემპ. °C	დრო წთ.
Au	HAuCl ₄ . 3H ₂ O + HF	0.5	20	0.5 - 1
Ni	NiCl ₂ . 6H ₂ O + NaH ₂ PO ₂ .H ₂ O + H ₃ C ₆ H ₅ O ₇ + NH ₄ CL + NH ₄ OH	30 10 65 50	90 - 100	1 - 3

მიეწოდება კომპიუტერს. რომელიც „დელფი 2“ – ში ჩაწერილი პროგრამით ააგებს (U,lnI) და (U,1/C²) გრაფიკებს, გამოთვლის იდეალურობის კოეფიციენტს და თუ მისი მნიშვნელობა ერთან ახლოსაა (რაც იმას ნიშნავს რომ გამოსაკვლევ დიოდში დენის გავლის მექანიზმის აღწერა შესაძლებელია ბეტეს თერმოელექტრული ემისიის თეორიული მოდელით), გამოთვლის დიოდის პარამეტრებს და მნიშვნელობებს დაბეჭდავს, წინააღმდეგ შემთხვევაში იძლევა სიგნალს, რომ დიოდი არაიდეალურია და გამოთვლები

არაკორექტულია. დიოდების გაზომილი(I-V, C-V, და $I_F - h\nu$) მახასიათებლების მიხედვიდ გამოოფლილი პარამეტრების მნიშვნელობები წარმოდგენილია ცხრილში II.

ცხრილი III. გალიუმის არსენიდზე დამზადებული შროტების დიოდების იღვალურობის კოეფიციენტი და პროცენტიალური გარიერი

სტრუქტურა	იდეალურობის კოეფიციენტი, n	ბარიერის სიმაღლე კვ.		
		J/V	C/V	PR
Au/GaAs	1.15 – 1.17	0.91	0.92	0.93
Ga/GaAs	1.05 – 1.07	0.90	0.90	0.90
Al/GaAs	1.07 – 1.09	0.87	0.80	–
In/GaAs	1.05 – 1.07	0.70	0.72	0.7
Pt/GaAs	1.07 – 1.09	0.95	0.98	–
Fe/GaAs	1.02 – 1.05	0.80	0.81	–
Ni/GaAs	1.03 – 1.05	0.9	0.9	0.9
Pd/GaAs	1.05 – 1.07	0.9	0.9	0.9

ექსპერიმენტული შედეგებიდან ჩანს, რომ ლითონის GaAs –ზე დაფენის წარმოდგენილი მეთოდები იდეალური შოტკის დიოდების დამზადების შესაძლებლობას იძლევა.

Chemical and Electrochemical Deposition of Metals on GaAs

T.Laperashvili
lafera2002@yahoo.com

SUMMARY

The original method of metal electrodepositing on GaAs surface is presented. In this method electrochemical etching of semiconductor's surface occurs just before depositing of metal from the solution, which

contains etching material and metal ions together. For that, semiconductor's surface cleaning process and metal deposition carries out in the same technological process.

Keywords: electrodepoziting, metal, semiconductor, Shottky diode

ლიტერატურა

1. Epitaxial Fe/GaAs via electrochemistry; Zhi Liang Bao and Karen L. Kavanagh, Journal of Applied Physics, 98 (2005).
2. С. Зи, Физика полупроводниковых приборов, т.1, Москва, «Мир», , с.435,1984
3. E.X.Rhoderick. Metal-Semiconductor Contacts. p.208, Oxford University, New York, 1978.
4. Electrochemical deposition of Al on semiconductors. Laperaschvili T., Khachidze M., Immerlischvili I. Proceedings of SPIE Nana-, and Micro-Smart Systems:, Proc..SPIE. v.4936, p.349-355, 2002
5. A^3B^5 კვაზიოს ნახევარგამტარებზე მეტალების ქიმიური და ელექტროქიმიური დაფუნით მიღებული სტრუქტურების ფოტოელექტრული მახასიათებელი. თ. ლაფერაშვილი, დ. ლაფერაშვილი, ი.მერლიშვილი, ნ.ქალდანი. “ფოტონიკა 2005”, გვ 54-70, ”სოტექი” – თბილისი (2005)
6. Способ изготовления полупроводниковых структур. Гольдберг Ю.А., Лаперашвили Т.А., Накашидзе Г.А. и Царенков Б.В. Государственный реестр изобретения СССР, Авторское свидетельство N1056804. 1982
7. Фотоэлектрические свойства In - GaP поверхностно-барьерных структур, Бахтадзе М.В., Лаперашвили Т.А., Сагинашвили И.Н. Труды Тбилисского Государственного университета, т.244. 1983. Физика, стр. 120-125
8. ჭოტკის დიოდების დამზადების ხერხი, თ. ლაფერაშვილი, საქ. რესპუბლიკის პატენტი N46, GE H01L 29/48, 27.051992

**ლითონისა და ნახევარბამტარის კონტაქტის
ბამოყვება ნახევარბამტარული მასალების
პარამერტრების შესასწავლად**

ილია იმერლიშვილი, თინათინ ლაფერაშვილი
შესავალი

ნახევარგამტარული ხელსაწყოების და
ინტეგრაციური სქემების კონსტრუირებისათვის მისი
ელემენტების მათემატიკური გათვლის ამოცანა
მდგომარეობს იმაში, რომ მოწყობილობის მიმართ
ტექნიკური მოთხოვნის შესაბამისი ელექტრული
მახასიათებლების მისაღებად, წინასწარ შეირჩეს საწყისი
ნახევარგამტარული მასალა აუცილებელი
ელექტროფიზიკური პარამეტრებით, როცა ცნობილია
ცალკეული ელემენტების გერმეტრიული ზომები,
დიფუზური არების კონფიგურაცია, ომური კონტაქტები
და სხვა. გათვლის ამოცანის წარმატებით
განხორციელება შეიძლება თუ არსებობს მათემატიკური
მოდელი, რომელიც მოწყობილობის გამოსავალ
მახასიათებლებს დააკავშირებს მის ელექტროფიზიკურ
პარამეტრებთან და ტოპოლოგიასთან.

ექსპერიმენტულად მიღებული ნახევარგამტარული
ხელსაწყოების მახასიასიათებლების თეორიული
ანალიზის საშუალებით ხშირად შესაძლებელი ხდება
ნახევარგამტარული მასალის ძირითადი პარამეტრების
განსაზღვრა. ჩვენი ამოცანა იყო ნახევარგამტარული
მოწყობილობების ძირითადი შემადგენელი ელემენტების
ელექტროფიზიკური მახასიათებლების მანქანური
დამუშავების მეთოდების ძიება ნახევარგამტარული

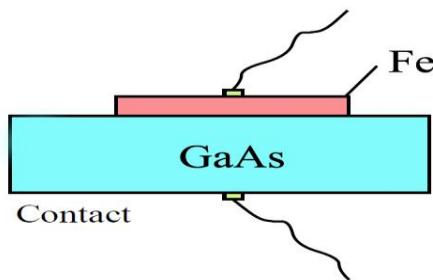
მასალის ძირითადი პარამეტრების განსაზღვრის მიზნით. შექმნილი იქნა პროგრამა “გადამრჩეველი” და "SMS Det." მასალის პარამეტრების გამოსათვლელად შოტკის დიოდების საშუალებით.

ვიზიკური მოცლუნები შროტის პონტაპტებში

შოტკის დიოდი არის ნახევარგამტარისა და ლითონის და გამმართველი კონტაქტი. სურ.1-ზე ნაჩვენებია გალიუმის არსენიდზე რკინის დაფენის შედეგად მიღებული შოტკის დიოდის სქემატური გამოსახულება. Fe/GaAs ქნის S ფართობის მქონე შოტკის კონტაქტს, ხოლო ნახევარგამტარის (GaAs) მეორე მხარეს გაკეთებული აქვს ომური კონტაქტი ინდიუმის შელღობით 500°C - ზე აზოვტის ატმოსფეროში. დიოდის წრედში ჩასართავად, როგორც ბარიერულ ასევე ომურ კონტაქტზე, მირჩილულია მაგთულები. შოტკის მარტივი თეორიის თანახმად, ასეთ კონტაქტში ლითონისა და ნახევარგამტარის სასაზღვრო ზედაპირის მიმდებარე დ სისქის ფენაში იქმნება მოცულობითი მუხტი, რომლის განაწილების სიმკვრივე დ არეში მუდმივია, ხოლო დ არის გარეთ ნულია (სურ.2a).

შოტკის დიოდი, რომელიც მრავალი ნახევარგამტარული მოწყობილობისა და ნახევარგამტარული სქემის აუცილებელი კომპონენტია, ხშირად გამოიყენება ნახევარგამტარული ეპიტაქსიალური ზედაპირების გამოსაკვლევად. ერთ-ერთი ფართოდ გავრცელებული მეთოდია ნახევარგამტარულ თხელ ზედაპირებში მუხტის მატარებელთა კონცენტრაციის განსაზღვრის ვოლტ-ტევადური მეთოდი, რისთვისაც გამოსაკვლევ ზედაპირზე მზადდება შოტკის

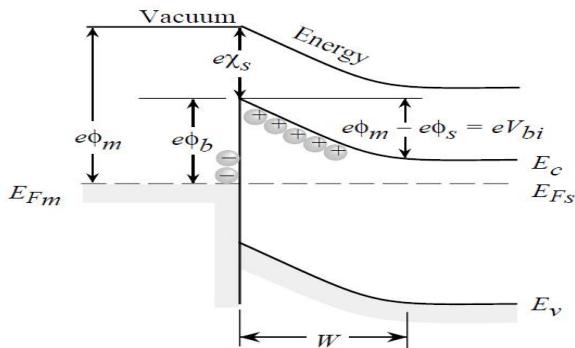
დიოდი. შოტკის დიოდის ტევადობა განისაზღვრება ბრტყელი კონდენსატორის ტევგადობის ანალოგიურად.



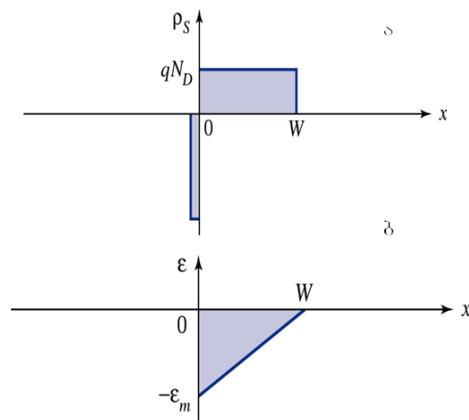
სურ. 1. Fe/GaAs შოტკის დიოდის სქემატური გამოსახულება.

მეტალისა და ნახევარგამტარის დაახლოებისას ატომური რიგის მანძილზე, როდესაც n -ტიპის ნახევარგამტარიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობა ნაკლებია მეტალის გამოსვლის მუშაობაზე, ხდება ელექტრონების უპირატესი გადასვლა ნახევარგამტარიდან მეტალში, რის გამოც გამყოფი ზედაპირის მიმდებარე ნახევარგამტარულ თხელ ფერაში იქმნება დადებითად დამუხტული ლოკალიზებული მოცულობითი მუხტი, რომელიც დინამიკური წონასწორობის დამყარებისას აღწევს W სისქეს. როგორც ცნობილია, შოტკის მარტივი თეორიის თანახმად მეტალსა და ნახევარგამტარს შორის იქმნება პოტენციალური ბარიერი, რომელსაც შოტკის ბარიერი ეწოდება, ხოლო მოცულობითი მუხტის ფერის სისქეს – შოტკის ბარიერის სიგანე ეწოდება. სურ. 2-ზე ნაჩვენებია ლითონისა და n -ტიპის ნახევარგამტარის კონტაქტზე პოტენციალური ბარიერის ფორმირების ენერგეტიკული დიაგრამა, საკონტაქტო მასალების უმულო

(ნახევარგამზეარის ზედაპირზე ჟანგის ფენა არ არის) შეხებისას.



სშრ.2. ლითონისა და n-ტიპის ნახევარგამზეარის კონტაქტზე პოტენციალური ბარიერის ვორმილების მნიშვნელი დიაგრამა.



სშრ.3. მუხტისა (ა) და ველის ბანაშილება(ბ) ლ-6 კონტაქტზე

ვ. შოტკის მიერ იქნა დაშვებული, რომ კონტაქტის მიმდებარე W სისქის ნახევარგამტარულ ფენაში იონიზირებული მუხტი განაწილებულია თანაბრად, ხოლო ველი იცვლება წრფივად, როგორც ნაჩვენებია სურ-3-ზე. აღმოჩნდა, რომ რეალური კონტაქტების მახასიათებლები კარგად აღიწერება პუასონის განტოლების ამოხსნით

$$\nabla^2 V = \frac{\rho}{\epsilon}, \quad (1)$$

სადაც MKS სისტემის ერთეულებში ρ არის ნახევარგამტარში მუხტის მატარებელთა სიმკვრივე, ϵ – დიელექტრიკული მუდმივაა.ამ სასაზღვრო პირობების დაშვებით. მიღებული იქნა, რომ შოტკის დიოდის ტევადობა ისეთი ბრტყელი კონდენსატორის ტევვადობის ტოლია, რომლის შემონაფენების ფართობი შეესაბამება შოტკის კონტაქტის ფართობს, დიელექტრიკული მუდმივა - ნახევარგამტარის დიელექტრიკულ მუდმივას, ხოლო შემონაფენებს შორის მანძილი შოტკის დიოდის კონტაქტურ არეში მოცულობითი მუხტის სისქის ტოლია. ასეთ პირობებში შოტკის დიოდის ტევვადობის (C) დიოდზე მოდებული ძაბვისაგან (U) დამოკიდებულება განისაზღვრება ფორმულით:

$$C(V) = \frac{dQ}{dU} = W_0 \sqrt{q\epsilon N_d (\Phi_B - U)}, \quad (2)$$

სადაც W_0 -არის მოცულობითი მუხტის სისქე დიოდზე ძაბვის მოდების გარეშე, $\epsilon = \epsilon_s \cdot \epsilon_0$ - კომბინირებული

დიელექტრიკული შეღწევადობა (es-ნახევარგამტარის დიელექტრიკული შეღწევადობაა, ხოლო $\epsilon_0=8.85 \cdot 10^{-12}$ აბსოლუტური დიელექტრიკული შეღწევადობა), N_d -ნახევარგამტარში იონიზირებული მუხტის კონცენტრაცია, Φ_B - შოტკის ბარიერის სიმაღლე, ხოლო U- დიოდზე მოდებული გარეშე ძაბვა; ამ ფორმულაში W_0 განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$W_0 = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 S}{C_0}, \quad (3)$$

სადაც C_0 -არის ტევადობა ნულოვანი წანაცვლების დროს, S -კონტაქტის ფართობი; თუ სიდიდეები გაზომოლია MKSA სისტემის ერთეულებში შოტკის კონტაქტის მიმდებარე ნახევარგამტარში იონიზირებული მუხტის კონცენტრაცია გამოითვლება ფორმულით

$$N_d = \frac{1.42 * 10^8}{b \epsilon S^2}, \quad (4)$$

სადაც b არის $(U, 1/C^2)$ გრაფიკული დამოკიდებულების დახრის კოეფიციენტი და გამოითვლება ფორმულით:

$$b = \frac{\Delta \left(\frac{1}{C^2} \right)}{\Delta U}, \quad (5)$$

პუასუნის განტოლების თანახმად d არეში ლითონიდან დაცილების x კოორდინატისაგან დამოკიდებულებით ელექტრული ველი იცვლება წრფივად, ხოლო ელექტრული პოტენციალი კვადრატული კანონით. თუ

რეალური კონტაქტების ფიზიკური მახასიათებლები კარგად აღიწერებიან ამ დაშვებების საფუძველზე მიღებული თეორიით, მათ შოტკის კონტაქტები ეწოდება და ასეთი სტრუქტურების ვოლტამპერული და ვოლტოგრადური მახასიათებლების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია განისაზღვროს ნახევარგამტარის პარამეტრები: მინარევების კონცენტრაცია, მათი ენერგეტიკული განაწილება აკრძალულ ზონაში, გამტარობის ზონის სტრუქტურის დადგენა და სხვა. ნახევარგამტარზე ლითონის დაფენილი ზედაპირის სარისხის მაჩვენებელი არის შოტკის ბარიერული დიოდის იდეალურობის კოეფიციენტის (n) მნიშვნელობა. ის ექსპერიმენტულად განისაზღვრება შოტკის დიოდის ვოლტამპერული დამოკიდებულებიდან და გარკვეული პირობების დაცვისას, მისი მნიშვნელობა ახლოს უნდა იყოს ერთონან (გამყოფ ზედაპირზე ელექტრონის სარკული არეკვლის პირობების გათვალისწინებით დიოდის იდეალურობის კოეფიციენტის ოცნრიული მნიშვნელობა n=1.02), ასეთ შემთხვევაში ვოლტამპერული მახასიათებლიდან პოტენციალური ბარიერის გამოთვლა შეიძლება ფორმულით:

$$\phi_B(J - U) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{SA^* T^2}{J_0} \right), \quad (6)$$

სადაც S არის გამმართველი კონტაქტის ფართობი; J_0 - არის გაჯერების დენი და მისი მნიშვნელობა მიიღება ექსპერიმენტულად $(U, \ln J)$ დამოკიდებულების

ექსტრაპოლაციით, როცა $U = 0$; A^* - რიჩარდსონის
მუდმივას ეფექტური მნიშვნელობა აიღება
ლიტერატურიდან, მაგალითად (111) ორიენტაციის
GaP-სთვის $A^* = 150 \text{ A/g} \cdot \text{cm}^2$.

პოტენციური ბარიერის განსაზღვრა შეიძლება ვოლტ-
ტევადური მახასიათებლიდან გრაფიკულად, თუ ეს
უპანასკნელი აგებულია კოორდინატებში $(U, 1/C^2)$. ამ
დამოკიდებულებიდან ბარიერის სიმაღლე გამოითვლება
ფორმულით

$$\phi_B(C - U) = U_0 + E_F + \frac{kT}{q}, \quad (7)$$

სადაც U_0 არის დიფუზური პოტენციალი, რომელიც
მიიღება $(U, 1/C^2)$ წრფივი დამოკიდებულების
ექსტრაპოლაციით აბსცისთა დერმზე.

შოტკის ბარიერის სიმაღლე განისაზღვრება, აგრეთვე,
ფოტოსპექტრალური $(hv, I_F^{1/2})$ მახასიათებლიდანაც.
როგორც ცნობილია [4] შოტკის დიოდებში მეტალიდან
ფოტოემიტირებული ელექტრონების ნახევარგამტარში
გადასვლით განპირობებული ფოტოდენი J_φ , ფაულერის
კანონის თანახმად პროპორციულია $(hv - \varphi_B)^2$ –ისა,
როცა $(hv - \varphi_B)$ მეტია რამდენიმე kT –ზე. თუ $(I_F^{1/2} - hv)$
დამოკიდებულების სწორხაზოვნება კარგად არის

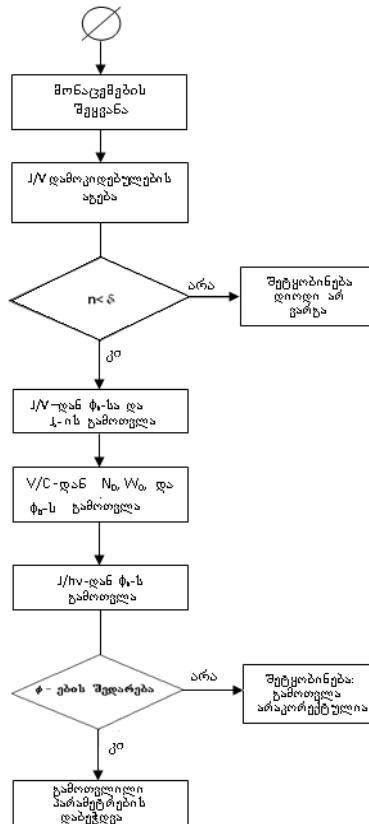
დაცული გამოსაკვლევი დიოდების სპექტრში, ბარიერის სიმაღლე მიიღება გრაფიკულად ($I_F^{1/2} - h\nu$) დამოკიდებულების ექსტრაპოლაცით, როცა ფოტოდენის ნოლის ტოლია.

$$\phi_B(J_\varphi - h\nu) = h\nu_0 ,$$

სადაც $h\nu_0$ არის $\sqrt{J_\varphi} \sim h\nu$ წრფივი დამოკიდებულების ექსტრაპოლაცია ენერგეტიკულ დერძე. თუ ვოლტ-ამპერული, ვოლტ-ტევადური და სპექტრული მახასიათებლებიდან გამოთვლილი შოტკის ბარიერის სიდიდეები ერთმანეთს ემთხვევიან ექსპერიმენტის ცდომილების ფარგლებში ეს მაჩვენებელია იმისა, რომ გამოსაკვლევი სტრუქტურების ფიზიკური პარამეტრები კარგად აღიწერებიან ლითონისა და ნახევარგამტარის მჭიდრო კონტაქტის თეორიული მოდელით და ამ შემთხვევაში შეიძლება მისი გამოყენება შოტკის კონტაქტის ელექტრო-ფიზიკური და ნახევარგამტარული მასალის ფიზიკური პარამეტრების დასადგენად

. შექმნილია პროგრამა, რომელიც რეალური დიოდების ექსპერიმენტულად გაზომილი ვოლტ-ამპერული, ვოლტ-ტევადური და ფოტოსპექტრული მახასიათებლების ცხრილის სახით წარმოდგენილი მონაცემებისა ნახევარგამტარის მახასიათებელი პარამეტრების კომპიუტერში შეეგანის შემდეგ ააგებს სათანადო მახასიათებლების გრაფიკულ გამოსახულებას და გამოთვლის დიოდის სათანადო პარამეტრებს. მაგალითად, ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების გამოთვლის იდეალურობის კოეფიციენტს და თუ მისი

მნიშვნელობა მეტი აღმოჩნდა 1.1-ზე, იძლევა სიგნალს, რომ „დიოდი არაიდეალურია“, ხოლო თუ $n < 1.1$ -ზე, გამოვლის ბარიერის სიმაღლეს, გადადის კოლტეფადური მახასიათებლის დამუშავებაზე, გამოვლის შოტკის ბარიერის სიმაღლეს, სიგანეს,



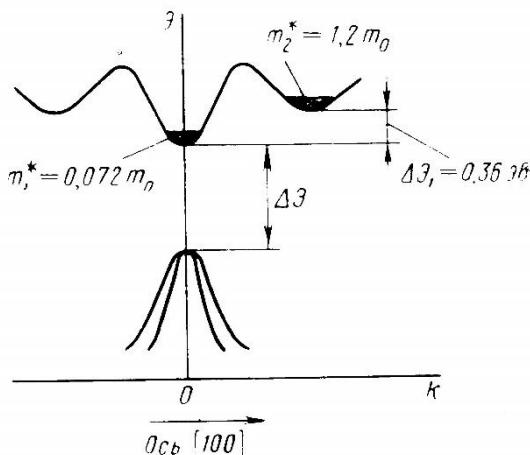
სტრუქტურული დიოდის პარამეტრების გამოსათვლელი ალგორითმი

იონისებული მუხტის კონცენტრაციაც და შემდეგ
გადადის სპექტრული მახასიათებლის დამუშავებაზე,
გამოთვლის ბარიერის სიმაღლეს, ერთმანეთს შეადარებს
შოტკის ბარიერის სამივე მეთოდით გამოთვლილ
მნიშვნელობებს და თუ ბარის მნიშვნელობები
ერთმანეთს ემთხვევა ცდომილბის ფარგლებში,
დაბეჭდავს გამოთვლის შედეგებს, წინააღმდეგ
შემთხვევში იძლევა სიგნალს გამოთვლები
არაკორექტულია. ამრიგად, პროგრამა ახდენს
ექსპერიმენტში გამოყენებული სტრუქტურების
გადარჩევას “იდეალურ” და “არაიდეალურ” დიოდებად.
სურ.4-ზე ნაჩვენებია ალგორითმი „გადამრჩეველი“.

ნახვარბამტარის გამტარობის ზონის სტრუქტურის
დადგენა შოტკის დიოდის ვოლტ-ამპარული და
ვოლტევგადური მახასიათებლების ერთობლივი
კვლევის შედგად

ლითონისა და ნახევარგამტარის შოტკის
კონტაქტის ვოლტამპერული მახასიათებლის
შესწავლისას ნახევრადლოგარითმულ მასშტაბში აგებულ
InI-V გრაფიკულ გამოსახულებაზე ნაცვლად სწორი
ხაზისა მრავალი მკვლევარის მიერ მიღებული იყო
ტებილი ხაზი მკვეთრად განსხვავებული დახრის
კოეფიციენტებით [1-3]. ეს მოვლენა პირველად ახსნილი
იყო [2]-ში შოტკის ბარიერზე პირდაპირი წანაცვლების
ძაბვის მოდების შემთხვევაში კონტაქტში გამავალი დენის
სვლის მექნიზმის პირობების ცვლილებით, რაც
ნახევარგამტარის გამტარობის ზონის თავისებურებებთან
იქნა დაკავშირებული. [2]-ში წარმოდგენილ მოდელს
საფუძვლად უძევს დაშვება იმის შესახებ, რომ შოტკის

პონტაქტზე მუხტის მატარებლებით გადარიბებულ ფენაში ელექტრონის გასვლის დრო ხდება გაცილებით დიდი რელაქსაციის დროზე, როცა ელექტრონის კინეტიკური ენერგია მეტი აღმოჩნდება გამტარებლობის ზონის ცენტრალური და სატელიტური ზონების ქვედა კიდეებს შორის ენერგეტიკულ სხვაობაზე, ისე რომ, გადარიბებულ ფენაში ქვეზონათშორისი გაბნევის უგულებელყოფა აღარ შეიძლება. ზომიერად ლეგირებული ნახევარგამტარის შემთხვევაში ($n < 10^{17} \text{ см}^{-3}$) ლითონება და ნახევარგამტარს შორის შექმნილ ბარიერზე დენის გავლაში მონაწილეობენ ის ელექტრონები, რომელთა საერთო ენერგია ბარიერის სიმაღლეზე მეტია. როცა დენის გავლაში მონაწილე ელექტრონების ენერგია მკვეთრად განსხვავდება ვოლტამპერულ მახასიათებელზე წარმოიქმნება ერთმანეთისაგან დახრის



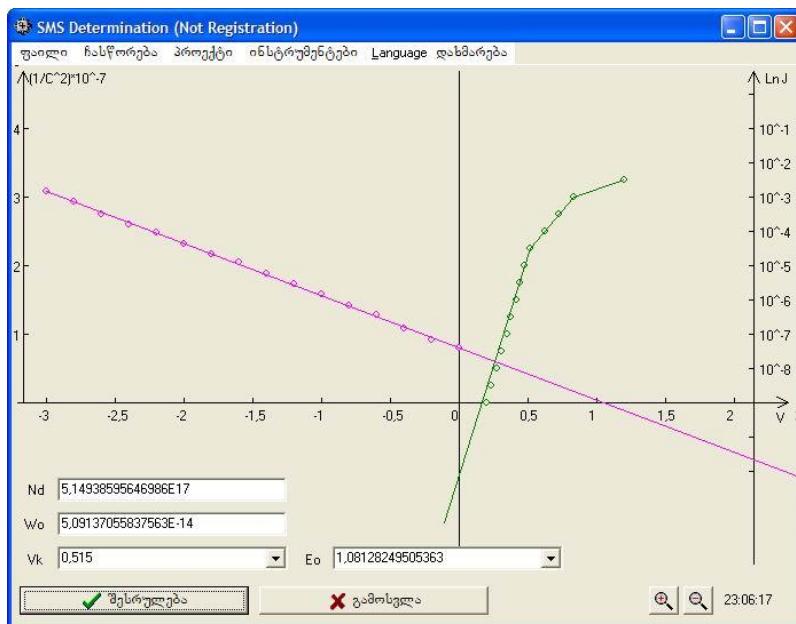
სურ5. GaAs-ის ზონური სტრუქტურა

პოლიციენტით განსხვავებული, V_0 ძაბვით გაყოფილი უბნები, სადაც $InI-V$ მახასიათებელი მუხლს აკვთებს. ეს თეორია შემდგომში განვითარებული იყო [3]-ში, რომლის მიხედვით ნახევარგამტარის გამტარობის ზონის ცენტრალური და სატელიტური ზონების ქვედა კიდეებს შორის ენერგეტიკული სხვაობა პირდაპირ გამოითვლება შემდეგი მარტივი გამოსახულებით:

$$E_0 = (V_0 - V_B)q + k_B T \quad (8)$$

სადაც V_0 $1/C^2$ -ის ძაბვაზე დამოკიდებულების ძაბვის დერმთან გადაკვეთის წერტილია, q არის ელექტრონის მუხები, k_B - ბოლცმანის მუდმივა. ექსპერიმენტში გამოყენებული იყო $GaAs$ -თან შედარებით განიერზონიანი თ-ტიპის ნახევარგამტარები ჩოხრალსკის მეთოდით გაზრდილი სპეციალურად არალეგირებული გალიუმის ფოსფიდი, რომლის კოლტამპერული და კოლტტეგადური მახასიათებლები, სურ.6 –ზეა ნაჩვენები. ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა ზემოთ ნაჩვენები ტიპის გრაფიკის მიხედვით დადგენილი იქნას უცნობი შედგენილობის სამმაგი ნაერთების ზონური სტრუქტურა. ჩვენ ეს მეთოდი გამოვიყენეთ რთული შედგენილობის ნახევარგამტარების $GaAlAs$, $GaAlP$ ზონური სტრუქტურის შესასწავლად. მასზე თხევადური ეპიტაქსიით გაზრდილი $GaAlP$, გალიუმის არსენიდზე თხევადი ეპიტაქსიით გაზრდილი $GaAlAs$ და თხელფიროვანი $GaSe$. შოტკის დიოდები მიღებული იყო ოქროს ქიმიური და ინდიუმისა და ალუმინის ელექტროქიმიური დაფენით. ნიმუშების სისქე იყო 200-250 მიკრონი. პირველად ნიმუშის ერთ მხარეს უკეთდებოდა ინდიუმის ომური

კონტაქტი გასუფთავებული წყალბადის ატმოსფეროში $500\text{--}550^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე რამდენიმე წუთის განმავლობაში გამოწვით, GaSe -ზე ომური კონტაქტის მისაღებად გამოყენებული იყო ვერცხლის პასტა, მისი შეშრობის შემდეგ ნიმუშები ომური კონტაქტითა და მასთან მიერთებული მავთულით იფარებიდა ქიმიურად მდგრადი ლაქით, გარდა ზედაპირის იმ ნაწილისა, სადაც ხდება ბარიერული კონტაქტის დაფენა.



სურ. 6. Al/GaP შროტის დიოდის ვოლტამპავრული (მარჯვენა) და ვოლტტევადური (მარცხნივ) მახასიათებელი.

ლაქის შეშრობის შემდეგ ნიმუშები იწამლებოდა ქიმიურად, ირეცხებოდა დისტილირებულ წყალში და

სწრაფად იდება ელექტროლიტში ბარიერული კონტაქტის დასაფენად. ლითონების დაფენა ხდებოდა ადრე ადწერილი მეთოდებით [4-5]. ლითონის დაფენის შემდეგ ნიმუშებს ლაქი ეცლებოდა მექანიკურად, ირეცხებოდა აცეტონში, მეთანოლში ან დისტილირებულ წყალში, იჭრებოდა 1-3 მმ² ფართის ნიმუშებად და იზომებოდა ვოლტამპერული და ვოლტტევადური მახასიათებლები. ვოლტამპერული მახასიათებელი იზომებოდა 10^{-11} - 10^{-2} ამპერის ფარგლებში, ტევადობა გაზომილი იყო 10 მჰვ სიხშირეზე. სურ.8-ზე წარმოდგენილია GaAs-ის ზონური სტრუქტურა, ხოლო სურ.6-ზე Al//GaP შოტკის დიოდის ვოლტამპერული და ვოლტტევადური მახასიათებელი.

ცხრილი II

სტრუქტურა	V ₀	V _{m1}	V _{m2}	ΔE ₁	ΔE ₂
In/GaP	0.78	0.27		0.51eV	
Al/GaP	1.03	0.51		0.52eV	
Au/GaP	1.3	0.8		0.50eV	
Au/Al _x Ga _{1-x} As x=0.1-0.2	0.9	0.23	0.50	0.63eV	0.4eV
Al/GaAs	0.8	0.45		0.35	
Au/GaSe	0.62	0.08	0.17	0.52	0.45

ანალოგიური მახასიათებლები იყო მიღებული ცხრ.II-ში ჩამოთვლილი სტრუქტურებისთვის და ცხრილში მოცემული გამოთვლილი მნიშვნელობები კარგ თანხვდენაშია სხვა მეთოდებით განსაზღვრულ ლიტერატურ მონაცემებთან.

შოტკის დიოდების ვოლტაგადური და ვოლტამპერატური მახასიათებლების ერთობლივი კვლევის საფუძველზე გამოთვლილი იქნ ნახვარგამტარის გამტარობის ზონის ქვეზონათშორის ენერგეტიკული სვეაობების მნიშვნელობები: $V_0=0,78$, $V_\beta=0,27$, $\Delta E=0,51\text{eV}$ - $\text{In/GaP}; V_0=1,3$, $V_\beta=0,8$, $\Delta E=0,50\text{eV}$ for $\text{Au/GaP}; V_0=1,05$, $V_\beta=0,52$, $\Delta E=0,53\text{eV}$ - $\text{Al/GaP}; V_0=0,9$, $V_{\beta 1}=0,23$, $V_{\beta 2}=0,50$, $\Delta E_1=0,63\text{eV}$, $\Delta E_2=0,4\text{eV}$ - $\text{Au/Al}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$ ($x=0,1-0,2$); $V_0=1,58-1,62$, $V_{\beta 1}=0,35$, $V_{\beta 2}=0,85$, $\Delta E_1=0,70\text{eV}$, $\Delta E_2=1,2\text{eV}$ for $\text{Au/Al}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}$ ($x=0,2-0,3$); $V_0=1,05$, $V_\beta=0,52$, $\Delta E=0,53\text{eV}$ for $\text{Al/GaP}; V_0=0,8$, $V_\beta=0,35$, $\Delta E=0,35\text{eV}$ - $\text{Al/GaAs}; V_0=0,62$, $V_{\beta 1}=0,08$, $V_{\beta 2}=0,17$, $\Delta E_1=0,52\text{eV}$, $\Delta E_2=0,45\text{eV}$ - Au/GaSe ; რაც კარგ თანხვდენაშია ლიტერატურიდან ცნობილ სათანადო მონაცემებთან. ეს არის მაჩვენებელი იმისა, რომ ექსპერიმენტული დიოდები კარგად აღიწერებიან ლითონისა და ნახვარგამტარის კონტაქტის თეორიული მოდელით.

ლიტერატურა

1. E.X. Rhoderick. *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford University, New York, 1978, p.208.
2. Laperashvili T., Khachidze M., Imerlishvili I. Electrochemical deposition of Al on semiconductor. Nano and microtechnology. Proc. SPIE, volume 4936, page 349-355 (2002).
3. I.A.Goldberg, B.V. Tsarenkov - Electron Letters ,1971, v7, #20, p.601-602
4. Laperashvili T., Imerlishvili I.,Khachidze M., Laperashvili D. Photoelectric characteristics of contacts In-semiconductor A^3B^5 . Nanotechnology . Proc. SPIE, volume 5118, page 502-506 (2003).
6. Salardi and B. Pellegrini and T.Di Leo. "Generalization of Thermoionic Emission Theory, Temperature Dependence of GaAs

Intervalley Gap From Measurements on Schottky Diodes". *Solid-State Electronics*, vol. 22, pp. 435- 441, 1978.

7. M. Vitomirov, C.M.Aldao, M.Shabel, G.D. Waddill, S.G.Andersen and J.H. Weaver - energies and Symmetries in Interface Formation: In/GaP(110) and Ga/InP(110) , *J. Vac. Sci. Technol. A7(3)*, 1989.

ბალიუმის არსენიდზე შოთკის პარიერის წარმოქმნის მექანიზმები

თინათინ ლაფერაშვილი, ორესტ კვიციანი
lafera2002@yahoo.com, orestkv@yahoo.com

გალიუმის არსენიდზე სხვადასხვა ლითონის ქიმიური და ელექტროქიმიური დაფენით დამზადებულია შოტკის ბარიერული დიოდები (შპდ). შესწავლილია მათი ელექტრული და ფოტოელექტრული მახასიათებლები. ლითონისა და ნახევარგამტარის კონტაქტზე შოტკის ბარიერის ფორმირების თეორიული მოდელების ანალიზის საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ GaAs ზედაპირზე შოტკის ბარიერის ფორმირება აიხსნება დაფაქტების მოდელით.

საკვანძო სიტყვები: შოტკის დიოდი, გალიუმის არსენიდი, მეტალების დაფენა

1. შესავალი

შოტკის ბარიერული დიოდი (შპდ) მრავალი ნახევარგამტარული მოწყობილობის მნიშვნელოვანი საბაზისო ელემენტია. თანამედროვე ტექნოლოგიაში მისი განსაკუთრებული როლის გამო დიდი პრაქტიკული და თეორიული მნიშვნელობა აქვს ლითონისა და ნახევარგამტარის გამყოფ ზედაპირზე მიმღინარე ფიზიკური, ქიმიური და მეტალურგიული პროცესების კვლევას, რადგან აღნიშნული პროცესები მნიშვნელოვანწილად განაპირობებენ შოტკის ბარიერის წარმოქმნას და მის სიმაღლეს, რაც ამ სტრუქტურების ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს. შოტკის დიოდების პრაქტიკული გამოყენების დიდი ისტორიის მიუხედავად ჯერ კიდევ არ არის ჩამოყალიბებული ერთიანი თეორია, რომელიც სრულყოფილად ახნის

შოტკის ბარიერის ფორმირების მექანიზმს. არსებული წარმოდგენების სრულყოფის მიზნით დიდი მნიშვნელობა აქვს სხვადასხვა ტექნოლოგიური პროცესით მიღებული შოტკის დიოდების ახალი ექსპერიმენტული მონაცემების მოპოვებას და მათ ანალიზს.

III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებზე დამზადებული შოტკის დიოდების კლევა კიბერნეტიკის ინსტიტუტში ჩვენ დავიწყეთ გასული საუკუნის 70-იან წლებში, მიღებული იყო იდეალური შოტკის დიოდები გალიუმის ფოსფიდზე (GaP) და დამუშავებული იყო დიოდების მახასიათებელი პარამეტრების (ბარიერის სიმაღლე, სიგანე, იდეალობის კოეფიციენტი) გაზომვის მეთოდიკა; GaP-ზე ლითონების ელექტროქიმიური დაფუძნით მიღებული „იდეალური“ შოტკის დიოდების ელექტრული და ფორმულების მახასიათებლების კვლევის შედეგად აღმოჩნდა შოტკის ბარიერის სიმაღლის მნიშვნელობები განსხვავდება ბარდინის მოდელის მიხედვით მოსალოდნელი სიდიდეებისაგან (ბარიერის სიმაღლე In/GaP - სოვის 0.6 - 0.8 eV, ხოლო Pt/GaP - სოვის – 1.45 eV იყო მიღებული, ოუმცა ბარდინის მოდელის მიხედვით ბარიერის სიმაღლე არ არის დამოკიდებული დაფუძნილი ლითონის გამოსვლის მუშაობაზე და GaP – სოვის 1.1 eV-ის ტოლი უნდა იყოს). ჩვენი ექსპერიმენტული შედეგებისა და ლიტერატურაში არსებული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე ჩამოვაყალიბეთ გალიუმის ფოსფიდზე შოტკის ბარიერის ფორმირების თეორიული მოდელი, რომლითაც დამატავოფილებლად აისხება შოტკის ბარიერის

სიმაღლის ძლიერი დამოკიდებულება დაფენილი ლითონის გვარობაზე.

გალიუმის არსენიდის (GaAs) უნიკალური თვისებებისა და მასზე დამზადებული შოტკის ბარიერული დიოდების ტერაჟერცულ ტექნოლოგიაში განსაკუთრებული როლის გამო განვიხილავთ გალიუმის არსენიდზე შოტკის ბარიერის ფორმირების მექანიზმებს და მოცემულ ნაშრომში წარმოვადგენთ GaAs-ზე ლითონების ელექტროქიმიური და ქიმიური დაფენის გზით მიღებული შოტკის დიოდების ვოლტ-ამპერული, ვოლტ-ტევადური და ფოტოსპექტრული მახასიათებლების კვლევის შედეგები.

2.შოტკის ბარიერის ფორმირების თეორიული მოდელების მიმოხილვა

პირველი თეორიული მოდელი, რომლითაც გარკვეულწილად აიხსნა მეტალ-ნახევარგამტარის კონტაქტზე ბარიერის ფორმირების მექანიზმი, ეკუთნის ვ. შოტკის და 6. მოტტს [1,2]; ამ მოდელის მიხედვით ბარიერის სიმაღლე განისაზღვრება მეტალის გამოსვლის მუშაობით ფმ და ნახევარგამტარის აფინიტურობით ჯ (ელექტრონული მსგავსებით);

$$\Phi_B = \phi_M - \chi_S$$

შემდგომში ჯ. ბარდინმა აჩვენა [3], რომ კოვალენტური ნახევარგამტარების შემთხვევაში Φ_B სუსტად არის დამოკიდებული ფმ-ზე; მან დაუშვა მოსაზრება, რომ ნახევაგამტარის ზედაპირზე არსებობენ უწყვეტად განაწლებული ლოკალიზებული ზედაპირული მდგომარეობები, რომლებიც ხასიათდებიან

ნეიტრალურობის დონით – ϕ_0 , რაც განსაზღვრავს შოტკის ბარიერის სიმაღლეს:

$$\Phi_B = E_g - \phi_0$$

წინა ორი მოდელის კომბინაციას წარმოადგენს ს. ზი-ს წრფივი მოდელი [4,5], რომლის მიხედვით შოტკის ბარიერის სიმაღლე წარმოადგენს მეტალის და ნახევარგამტარის პარამეტრების წრფივ ფუნქციას:

$$\Phi_B = S\phi_M + \phi_o,$$

სადაც $0 \leq S \leq 1$ ნახევარგამტარის S -იონურობიდან დამოკიდებულებით, საიდანაც ზღვრულ შემთხვევებში მიიღება შოტკის ($S=1$) და ბარდინის ($S=0$) მოდელი.

1965 წელს ვ. ჰაინემ ჩაატარა არსებული თეორიული მოდელების კრიტიკული ანალიზი და დასკვნა, რომ ლოკალიზებული ზედაპირული მდგომარეობები ლითონისა და ნახევარგამტარის მჯიდრო კავშირის დროს არ შეიძლება არსებობდნენ [6]. ჰაინეს თეორიის მიხედვით მეტალის ელექტრონული ტალღური ფუნქციები აღწევენ ნახევარგამტარში და მათი კუდები წარქმნიან ინდუცირებულ მდგომარეობებს, რომლებიც ბარდინისეული ზედაპირული მდგომარეობების როლს ასრულებენ.

კონტაქტების შემდგომმა გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ იდეალური მეტალ-ნახევარგამტარის კონტაქტი ტექნოლოგიურად ვერ ხორციელდება და რეალური სტრუქტურების გამყოფ საზღვარზე სინამდვილეში ყოველთვის არსებობს $10-20$ Å და უფრო მეტი სისქის შუალედური ფენა, რომელიც მეტალური თვისებებით სასიათდება. ის წარმოიქნება საკონტაქტო მასალების ქიმიური ურთიერთქმედებისა და დიფუზიის შედეგად,

ხოლო ბარიერი გაცილებით უფრო ადრე ფორმირდება შეუალებური ფენის წარმოქმნამდე [9], ამიტომ პაინეს თეორია ლითონის მიერ ინდუცირებული ზედაპირული მდგომარეობების ბუნების შესახებ მხოლოდ მიახლოებით აღწერს რეალურ სიტუაციას.

ზემოთ აღნიშნული მოდელები გამორიცხავს კონტაქტზე მეტალსა და ნახევარგამტარს შორის ურთიერთქმედებას. ჯ.ფილიპსმა და ჯ.ენდრიუსმა სილიციუმზე დამზადებული შოტკის დიოდების კვლევის შედეგად აჩვენეს [7], რომ კონტაქტზე ადგილი აქვს ქიმიურ ურთიერთქმედებას და ბარიერის სიმაღლეს გარკვეულ წილად განსაზღვრავს შესაბამისი ქიმიური რეაქციის სითბო. მათ მიერ ჩამოყალიბებული იყო შოტკის ბარიერის ფორმირების ქიმიური მოდელი.

1978 წელს მკვლევარების ჯგუფმა სპექტროსკოპიული მეთოდების გამოყენებით დაადგინეს, რომ III-V ნახევარგამტარების აკრძალულ ზონაში ზედაპირული მდგომარეობები არ არსებობს [9]. კონტაქტის ზედაპირის მახლობლად გამოსვლის მუშაობის პირდაპირი გაზომვით აჩვენეს, რომ ფერმის დონის პინიგი შეიძლება მიღწეულ იქნას ლითონის ერთ მონოფენაზე ნაკლების დაფენის შემთხვევაშიც. ბარიერის სიმაღლე თითქმის არ იცვლება სუბმონოფენებიდან უფრო სქელ ფენებზე გადასვლისას და Au-ს შემთხვევაში InP, GaAs და GaSb-ზე სტაბილურდება Au-ს პირველი 0.15 მონოფენით. ეს მიანიშნებს, რომ ფერმის დონის პინიგი აისხება მიკროსკოპული ეფექტებით. ლითონნახევარგამტარის გამოყოფი საზღვრის მახლობლად არსებობს არე, სადაც ლითონი შერეულია ნახევარგამტარის ატომებთან, ანუ ადგილი აქვს

ნახევარგამტარული მასალის ატომების გადანაცვლებას გამყოფ ზედაპირზე. ეს გადანაცვლება არასტექიომეტრულია, ანუ შედგენილი ნახევარგამტარის ერთერთი კომპონენტი გამყოფ ზედაპირს სცილდება უფრო აქტიურად ვიდრე მეორე კომპონენტი.

ეს შედეგები საფუძვლად დაედო ბარიერის ფორმირების ე.წ. დეფექტურ მოდელს [9,10], რომელიც შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგი სახით: გამყოფ ზედაპირზე პოტენციალური ბარიერის ფორმირებაში გადამწყვებ როლს ასრულებენ ნახევარგამტარის ზედაპირზე ან მის მახლობლად არსებული სტრუქტურული და ანტისტრუქტურული დეფექტები და მათი კომპლექსები; აღნიშნული დეფექტები წარმოიქმნება ნახევარგამტარის ატომების მეტალში გადანაცვლების შედეგად; ნახევარგამტარის ზედაპირზე მეტალის დაფენის პროცესში ნახევარგამტარის ატომები იღებენ საკმარის ენერგიას (ნახევარგამტარის ზედაპირზე კონდენსაციის სითბოს) და წარმოსაქმნიან დეფექტებს, რომლებსაც ნახევარგამტარის აკრძალულ ზონაში შეესაბამება ენერგეტიკული დონეები, და რომელთა მახლობლადაც ფიქსირდება ფერმის დონე. ასეთი ფიქსაციისთვის საკმარისია 10^{14} cm^{-3} კონცენტრაციის ელექტრონული მდგომარეობების სიმკვრივე.

რიგ შემთხვევებში დეფექტური მოდელი ვერ ხსნის ექსპერიმენტულად მიღებულ ზოგიერთ ფაქტს, ამიტომ წარმოშვა დეფექტური მოდელის გარკვეულწილად განზოგადების აუცილებლობა, კონტაქტურ ნივთიერებებს შორის რეაქციის გათვალისწინებით. განზოგადებული ან ერთიანი დეფექტური მოდელი შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგნაირად [11]: დაბალი წარმოქმნის სითბოს მქონე

ნახევარგამტარის მიერ ადსორბირებული ატომები ადგილად ქმნიან დეფექტებს, ანუ ზედაპირულ მდგომარეობებს; ხოლო მაღალი წარმოქმნის სითბოს მქონე ნახევარგამტარებში დეფექტები არ წარმოიქმნება. შოტკის ბარიერის სიმაღლე ამ შემთხვევაში განისაზღვრება ისევ მეტალის გამოსვლის მუშაობით, ნახევარგამტარის აფინიტურობით და ე.წ. ზედაპირის იონურობის პარამეტრით.

1981 წელს შეიქმნა კიდევ ერთი მოდელი - ე.წ. ეფექტური გამოსვლის მუშაობის მოდელი, რომელიც ეყრდნობა შოტკის მოდელს [12], მაგრამ ბარიერის სიმაღლის ლითონის გამოსვლის მუშაობაზე სუსტი დამოკიდებულება ასახსნელადაიხსნება იმით, რომ გამყოფ ზედაპირზე ლითონსა და ნახევარგამტარს შორის ურთიერთქმედების შედეგად წარმოიქმნება სხვადასხვა ფაზა და ყოველი მათგანი ხასიათდება საკუთარი გამოსვლის მუშაობით, ხოლო მთლიანი ზედაპირი ხასიათდება გარკვეული ეფექტური გამოსვლის მუშაობით:

$$\Phi_B = \phi_{eff} - \chi$$

ეს მოდელი სწორად უსვამს ხაზს გამყოფი ზედაპირის მახლობლად წარმოქმნილი სხვადასხვა სტრუქტურებისა და ფაზების მნიშვნელობას. თუმცა თეორია უშვებს მიკროკლასტერების არსებობას, ხოლო ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ ბარიერი ფორმირდება დაფენილი ლითონის ისეთი სისქის დროს (0.2 მონოფენა), როდესაც მიკროკლასტერების წარმოქმნა შეუძლებელია.

საინტერესო მოდელი იქნა წარმოდგენილი ჯ. ტერზოფის მიერ [13], რომლის მიხედვითაც ფერმის დონის პინინგი გამოწვეულია ლითონით ინდუცირებული

მდგომარეობებით. პოტენციალური ბარიერის სიმაღლე განისაზღვრება ორი კომპონენტით. პირველი შემადგენელი დაკავშირებულია ზედაპირულ დიპოლთან, რომელიც წარმოიქმნება მეტალისა და ნახევარგამტარის გამოსვლის შუშაობებს შორის სხვაობის შედეგად. მეორე კომპონენტი დაკავშირებულია მეტალის მიერ ინდუცირებული ზედაპირულ მდგომარეობებთან.

შოტკის ბარიერის ბუნების ასახესნელად თეორიული მოდელების წარმოდგენა დღემდე გრძელდება; მათი სიმრავლის მიუხედავად ამ დროისთვის არსებული ინფორმაცია შოტკის ბარიერის ბუნების შესახებ არ ექვემდებარება ერთიან აღწერას.

ექსპერიმენტული ნაშილი

2.1. GaAs შრტკის დიოდების დამზადება

შოტკის დიოდების მისაღებად ექსპერიმენტში გამოყენებული იყო ჩოხრალსკის მეთოდით გაზრდილი 200–250 მკ სისქის n-ტიპის მონოკრისტალური GaAs – ის ფირფიტები (100) კრისტალური ორიენტაციითა და (10^{16} – 10^{17}) სმ³ ელექტრონების კონცენტრაციით. GaAs-ზე ალუმინი (Al) დავაფინეთ ელექტროქიმიურად [], ოქრო (Au) ქიმიური მეთოდით [], როგორც აღწერილი იყო გალიუმის ფოსფიდის შემთხვევისთვის

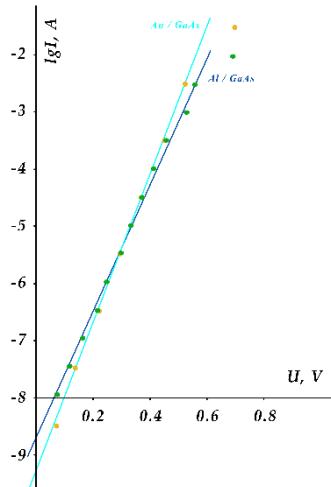
2.2. შრტკის ბარიერის სიმაღლის გაზომვის მეთოდები

ექსპერიმენტულად გადაღებული კოლტ-ამპერული, კოლტტევადური და ფოტოდენის დაცემული ტალღის ენერგიაზე დამოკიდებულებების ცხრილები მიეწოდება

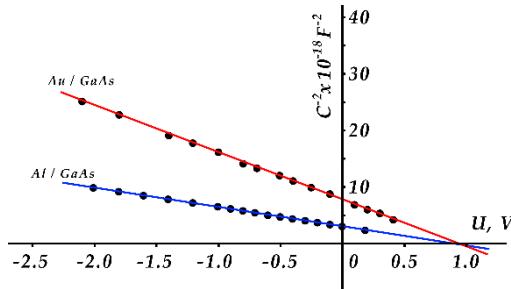
კომპიუტერს. რომელიც „დელფი 2“ – ში ჩაწერილი სპეციალური პროგრამით ააგებს ($V, \ln I$) და ($V, 1/C^2$) გრაფიკებს, გამოთვლის იდეალურობის კოეფიციენტს და ოუ მისი მნიშვნელობა ერთთან ახლოსაა (რაც იმას ნიშნავს რომ გამოსაკვლევ დონდში დენის გავლის მექანიზმის აღწერა შესაძლებელია თერმოელექტრული ემისიის თეორიული მოდელით, გამოთვლის დიოდის პარამეტრებს და მნიშვნელობებს დაბეჭდავს, წინააღმდეგ შემთხვევაში იძლევა სიგნალს, რომ დონდი არაიდეალურია და გამოთვლები არაკორექტულია.

3.80 დებული შედებების და მათი ანალიზი

ვოლტამპერული მახასიათებლის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ დენის სვლის მექანიზმი კარგად აღიწერება თერმოელექტრონული ემისიის თეორიით



სურ.1. Al/GaAs და Au/GaAs შროტების დიონდების ვოლტ-ტენიალური



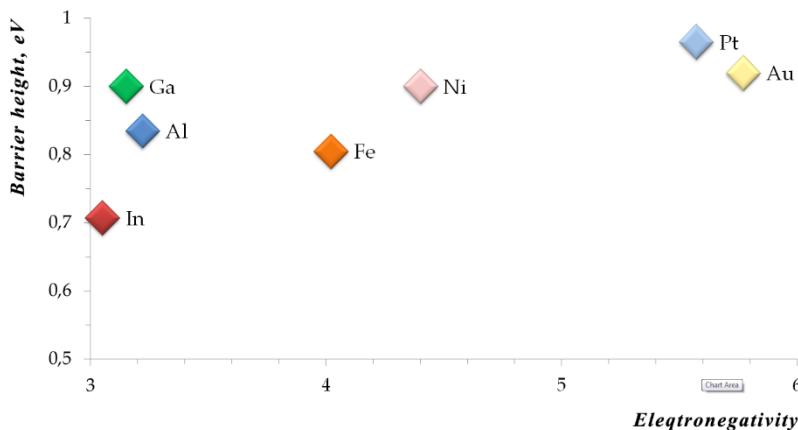
სურ.2. Al/GaAs და Au/GaAs ჰოტკის დიოდების ვოლტ-ტენსიონი

ცხრილში III ნაჩვენებია გალიუმის არსენიდზე ჩვენს მიერ დამზადებული შოტკის დიოდების ძირითადი პარამეტრების იდეალურობის კოეფიციენტისა და პოტენციალური ბარიერის მნიშვნელობები.

ცხრილი I. GaAs შოტკის დიოდების მახასიათებლები

სტრუქტურა	იდეალურობის გოგიფიციენტი, <i>n</i>	ბარიერის სიმაღლე,		
		I/V	C/V	PR
Au/GaAs	1.15 – 1.17	0.91	0.92	0.93
Ga/GaAs	1.05 – 1.07	0.90	0.90	0.90
Al/GaAs	1.07 – 1.09	0.87	0.80	–
In/GaAs	1.05 – 1.07	0.70	0.72	0.7
Pt/GaAs	1.07 – 1.09	0.95	0.98	–
Fe/GaAs	1.02 – 1.05	0.80	0.81	–
Ni/GaAs	1.03 – 1.05	0.9	0.9	0.9
Pd/GaAs	1.05 – 1.07	0.9	0.9	0.9

ცხრილში წარმოდგენილი მონაცემების მიხედვით აგებული შოტკის ბარიერის ლითონის გამოსვლის მუშაობაზე დამოკიდებულება ნაჩვენებია სურ. 3 -ზე.



სურ.3. გარიერის სიმაღლის დამოკიდებულება ლითონის ელექტროზარითოვითობაზე

დასტვნა

შესწავლილი იყო გალიუმის არსენიდზე შოტკის დიოდის ფორმირების მექანიზმის შესახებ არსებული თეორიული მოდელებისა და ჩვენს მიერ მიღებული ექსპერიმენტული შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ რთულია ვინმეს დაეთანხმო. რეალობასთან ახლოსაა დეფექტების მოდელი

ლიტერატურა:

1. Schottky W.Z., „Zur Halbleitertheorie der Sperrschiicht- und Spitzengleichrichter“, Zeitschrift für Physik, Volume 113, Issue 5-6, pp. 367-414 (1939).
2. Mott N. F., „The Theory of Crystal Rectifiers“, Proc. R. Soc. Lond. A171, pp. 27-38 (1939).

3. Bardeen J., „Surface States and Rectification at a Metal Semiconductor Contact“, Phys. Rev. Lett., Vol.71, #10, pp. 717-729 (1947).
4. Rhoderick E.H., [Metal-Semiconduntor contacts], Clarendon Press-Oxford,1978
5. Sze S. M., Kwok K.Ng., [Physics of Semiconductor Devices], John Wiley and Sons Inc. (2007).
6. Heine V., „Theory of Surface States“, Phys. Rev. Vol.138, #6A, pp. A1689–A1696 (1965).
7. Andrews J. M., Phillips J. C., „Chemical Bonding and Structure of Metal-Semiconductor Interfaces“, Phys. Rev. Lett. Vol.35, #1, pp. 56–59 (1975).
8. Brillson L. J., „Transition in Schottky Barrier Formation with Chemical Reactivity“, Phys. Rev. Lett. Vol.40, #4, pp.260–263 (1978).
9. Spicer W. E., Chye P. W., Skeath P. R., Su C. Y., and Lindau I., New and unified model for Schottky barrier and III–V insulator interface states formation, J. Vac. Sci. Technol. Vol.16, #5, pp. 1422-1436 (1979).
10. Walukiewicz W., Mechanism of Schottky barrier formation: The role of amphoteric native defects, J. Vac. Sci. Technol. B Vol.5, #4, pp. 1062-1068 (1987).
11. Spicer W. E., Liliental-Weber Z., Weber E., Newman N., Kendelewicz T., Cao R., McCants C., Mahowald P., Miyano K., and Lindau I., The advanced unified defect model for Schottky barrier formation, J. Vac. Sci. Technol. B Vol.6, #4, pp. 1245-1252 (1988).
12. Freeouf J. L. and Woodall J. M., Schottky barriers: An effective work function model, Appl. Phys. Lett. Vol.39, #9, pp. 727-729 (1981).
13. Tersoff J., Schottky Barrier Heights and the Continuum of Gap States, Phys. Rev. Lett. Vol.52, #6, pp. 465–468 (1984).

ბალიუმის არსენიდზე მცირებინაღობიანი ომური კონტაქტების მიღება და კვლევა

თინათინ ლაფერაშვილი, ორესტ კვიციანი, ია დლონტი,
თინათინ გულიაშვილი, ვლადიმერ მიქელაშვილი

ნახევარგამტარებზე ინდიუმის მცირებინაღობიანი ომური კონტაქტის დამზადების ოპტიმალური რეჟიმის შესარჩევად გსწავლობდით დენის სვლის მექანიზმისა და კონტაქტური წინააღმდეგობის ცვლის დამოკიდებულებას თერმოდამუშავების ტემპერატურაზე და დროზე. ნახევარგამტარის ერთ მსარეს ჯერ უკეთდებოდა სუფთა ინდიუმის რამდენიმე წერტილოვანი ომური კონტაქტი ზემოთ აღწერილი ტექნოლოგიით, ერთ-ერთ კონტაქტზე მიერჩილებოდა მავთული, ამის შემდეგ კონტაქტიანი ზედაპირი მავთულით იფარებიდა ქიმიურად მდგრადი ლაქით და მეორე ზედაპირზე ელექტროქიმიურად გაფენდით სუფთა ინდიუმს, შემდეგ ლაქს ვაცლიდით, ნიმუშებს ვამტვრევდით 1-2 მმ² ფართობის ნაწილებად და ვახდენდით ერთჯერად თერმოდამუშავებას აზოგის ატმოსფეროში სხვადასხვა ტემპერატურაზე 10 წუთის განმავლობაში.

აღწერილია III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებზე (GaAs, GaP, InP) ომური კონტაქტების მისაღებად საჭირო ტექნოლოგიური დანადგარი და ომური კონტაქტის კონტაქტური წინაღობის გაზომვის მეთოდიკა.

ექსპერიმენტული გამოკვლევების მიხედვით, III-V ჯგუფის ისეთი ნახევარგამტარებისათვის, როგორიცაა GaAs, GaP, InP, დაბალი პოტენციალური ბარიერის მიღება ლითონის შერჩევით გერ ხერხდება. დაბალი და საშუალო კონცენტრაციით ($n < 10^{17}-10^{18}$ სმ⁻³) ლეგირებულ ნახევარგამტარებში მუხტის ძირითად მატარებელთა მაღალი კონცენტრაციის მისაღებად ახდენენ კონტაქტის

მიმდებარე ნახვარგამტარული ფენის სათანადო მინარევებით (დონორებით ან აქცეპტორებით) ლეგირებას იმდენად მაღალ კონცენტრაციამდე, რომ საკმაოდ დავიწროვებულ პოტენციალურ ბარიერში შესაძლებელი გახდეს ულექტრული მუხტის გადამტანების კვანტურ-მექანიკური გვირაბული გასვლა, ანუ მოხდეს მუხტის გადამტანების (ელექტრონების ან ხვრელების) ველური ემისია. ველურ ემისიის მოვლენაზე დაფუძნებული ომური კონტაქტის გვირაბული მოდელის [6,8,11] მიხედვით, კონტაქტზე არსებობს საკმაოდ მაღალი პოტენციალური ბარიერი, მაგრამ იგი გამჭვირვალეა მუხტის მატარებელთა გვირაბული გასვლისათვის (ტუნელირებისათვის). ყოველივე ზემოთ თქმულიდან გამომდინარეობს, რომ პრაქტიკაში საშუალო და დბალი კონცენტრაციით ლეგირებულ (n) ნახვარგამტარებზე ომური კონტაქტის მისაღებად საჭიროა საკონტაქტო მასალად ისეთი მინარევების შემცველი ლითონური შენადნობის (m) გამოყენება, რომელიც ნახვარგამტარის ზედაპირის გადაგარებამდე (n⁺) ლეგირების შესაძლებლობას იძლევა. ამ შემთხვევაში კონტაქტის ომურობა აიხსნება იმით, რომ მაგალითად n/m⁺ სტრუქტურაში n/n⁺ გადასასვლელზე ბარიერი არ არის, ხოლო n^{+/m} გადასასვლელზე ბარიერი გამჭვირვალეა მატარებელთა ტუნელირებისათვის.

ომური კონტაქტის ძირითადი მახასიათებელი პარამეტრია მისი გუთრი წინააღმდება R_c, რომელსაც კონტაქტურ წინააღმდებასაც უწოდებენ და ასე გამოისახება

$$R_c = \left(\frac{dI}{dV} \right)^{-1}_{V=0},$$

სადაც V – კონტაქტზე მოდებული ძაბვაა, I – მასში გამავალი დენი.

კონტაქტში დენის გავლის მექანიზმის ზემოთ ჩამოთვლილი თეორიული მოდელების გათვალისწინებით გამოთვლილი კონტაქტური წინადობის მნიშვნელობას თერმოელექტრონული ემისიისათვის ძირითადად განსაზღვრავს ექსპონენციალური მამრავლი $\exp(\Phi_B/kT)$, თერმოველური ემისიისათვის – $\exp(\Phi_B/E_{00}\coth E_{00}/kT)$, ხოლო ველური ემისიისათვის – $\exp(\Phi_B/E_{00})$ [8]. აյ. Φ_B პოტენციალური ბარიერის სიმაღლეა, k – ბოლცმანის მუდმივა, T – ტემპერატურა, E_{00} – სიდიდეს ეწოდება გვირაბული გავლის პარამეტრი და მისი მნიშვნელობა მოიცემა ფორმულით:

$$E_{00} = \frac{qh/2\sqrt{N_d}}{\varepsilon sm^*} \quad (1)$$

სადაც q – ელექტრონის მუხტია, N_d - დაიონიზებული მუხტის კონცენტრაცია, m^* – ნახევარგამტარში მუხტის ძირითადი მატარებლების ეფექტური მასა, ε_s - ნახევარგამტარის დიელექტრიკული შედწევადობა, h – პლანკის მუდმივა. E_{00} კონტაქტის მახასიათებელი მნიშვნელოვანი პარამეტრია და ტოლია ლითონისა და ნახევარგამტარის კონტაქტზე შექმნილი დიფუზური პოტენციალის იმ მნიშვნელობისა, რომელზეც ნახევარგამტარში მოცულობითი მუხტის კიდეზე მყოფი და გამტარობის ზონის მინიმუმის შესაბამისი ენერგიის მქონე ელექტრონის გვირაბული გასვლის აღბათობა არის e^{-1} (ე ნეაჟრის რიცხვია). E_{00} -ის საშუალებით

შესაძლებელია წინასწარი განსაზღვრა იმისა, კონტაქტი რმური იქნება, თუ გამმართველი. კერძოდ, თუ $kT > E_{00}$, დენის სვლის მექანიზმი დომინირებს თერმოელექტრონული ემისიის პროცესი და მიიღება გამმართველი კონტაქტი შოტკის ბარიერით. თუ $kT < E_{00}$, გვაქვს გელური გამტარობა და მიიღება ომური კონტაქტი, $kT \leq E_{00}$ კი შუალედური შემთხვევაა.

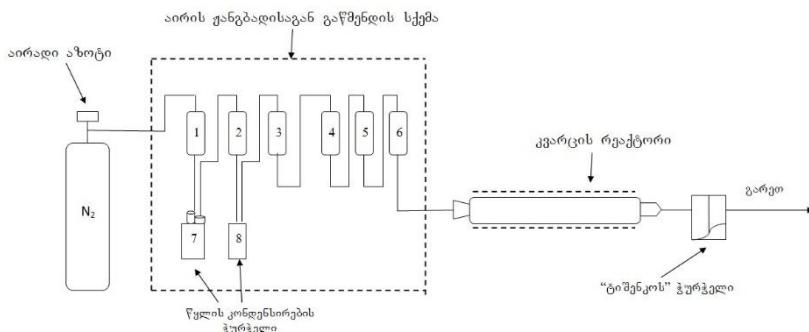
პრაქტიკაში გალიუმის არსენიდზე ომური კონტაქტების მისაღებად ყველაზე ხშირად იყენებენ მეტალურგიულ ეფექტიას, რომელიც შეიცავს 88% Au, 12% Ge და ემატება 5 წონითი პროცენტი Ni. 400-500 °C-ზე 30 წამის განმავლობაში შედნობის შედეგად მიღებული იყო ომური კონტაქტი, რომლის კონტაქტური წინაღობა ნაკლებია 10^{-6} ომს m^2 -ზე. ომური კონტაქტის ფორმირების მექანიზმს ასე ხსნიან: პირველ ეტაპზე 300°C - ზე Ge სწრაფად დიფუნდირებს საკონტაქტო არეში, Au არის გამსხველი GaAs-სათვის. GaAs იშლება – Au+GaAs = AuGa+As; Ni+As → NiAs. 400°C-ზე მიმდინარეობს Ga-ის აუტდიფუზია ოქროში, Ge იკავებს Au-ის ვაკანტურ ადგილს და ამ შემთხვევაში მოქმედებს როგორც დონორი. ამ მოდელის ფარგლებში ჩატარებული თეორიული გამოთვლების [12] თანახმად, $10^{-5}\text{ომს}\text{m}^2$ - ზე ნაკლები კონტაქტური წინაღობის მისაღებად საჭიროა მაღალლეგირებულ ფენაში დონორების კონცენტრაცია იყოს არანაკლები $5\cdot10^{19}\text{s}\text{m}^{-3}$ -სა, თუმცა ექსპერიმენტულად დამტკიცდა, რომ AuGe-ის ან AuGeNi-ის ლითონური შენადნობების ეპიტაქსიური გაზრდაც კი არ იძლევა GaAs-ის ზედაპირის გერმანიუმის $(1\text{-}4)\cdot10^{18}\text{s}\text{m}^{-3}$ -ზე მეტი კონცენტრაციით ლეგირების საშუალებას. რაქტიკულად

კი მიღებული იყო $5 \cdot 10^{-7} < R_c < 5 \cdot 10^{-6}$ ომს m^2 კონტაქტური წინადობის მქონე ომური კონტაქტი Ge-ით დაგირებულ 10- 10^{17} სმ $^{-3}$ კონცენტრაციის GaAs-ზე. ეს შეუსაბამობა თეორიასთან საეჭვოდ ხდის ზემოთაღწერილი და ლიტერატურაში კარგადდამკვიდრებული ომური კონტაქტის ფორმირების თეორიული მოდელის სამართლიანობას ასეთ შემთხვევებში. ამ წინააღმდეგობის მოსახსნელად შექმნილი იყო ომური კონტაქტის ვარიზონული მოდელი [11], რომლის მიხედვით ომური კონტაქტის In/GaAs ფორმირება შეიძლება აიხსნას იმით, რომ GaAs-ის ზედაპირზე ინდიუმის დაფენისა და მისი შემდგომი თერმოდამუშავების შედეგად ლითონსა და ნაევარგამტარს შორის იზრდება $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ -ის ($0 < x < 1$) ვარიზონული ფენა, პეტეროსტრუქტურა InAs/Ga_{1-x}In_xAs/GaAs ბარიერს არ შეიცავს, ხოლო InAs-ის ზედაპირზე ნებისმიერი ლითონის და მათ შორის ინდიუმის დაფენისას მიიღება ომური კონტაქტი. ჩვენ ჩავატარეთ ექსპერიმენტული პკლევა ამ დებულების სამართლიანობის დასადგენად. ამჟამად არსებობს ნახევარგამტარებზე მეტალების დაფენის სხვადასხვა მეთოდი: თერმული, კაოზდერი და იონური დაფრქვევა, მეტალის დაფენა გაზური ფაზიდან, მოლეკულური ეპიტაქსია, ქიმიური და ელექტროქიმიური დაფენა. ჩვეულებრივ, მეტალის დაფენა ხდება ნახევარგამტარის წინასწარ დამუშავებულ ზედაპირზე. ზედაპირის დამუშავებაში იგულისხმება მოშლითვა, გაპრიალება, ქიმიური, ელექტროქიმიური და გაზური მოწამვლა და სხვა. ასეთი დამუშავების შედეგად ნახევარგამტარის ზედაპირი იფარება როზლი შემადგენლობის ჟანგის ფენით, რომლის სისქეj GaAs-სათვის 10-60 Å-ია.

ძირითადი მონაცემები იმ ლითონების შესახებ, რომლებიც გამოიყენება GaAs-ზე ომური კონტაქტების მისაღებად და კონტაქტის მიღების რეჟიმების შესახებ, აღწერილია ლიტერატურაში. ინფორმაციის ანალიზიდან ჩანს, რომ GaAs-ზე საკონტაქტო დიითადად გამოიყენება შემდეგი მეტალები In, Pt, Au, Sn, Ag და ლითონების შენადნობები AuNi, AuNiGe, AuGe, InNi, InNiGe. ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ ჩამოთვლილ ლითონთა დიდი უმრავლესობა 350°C -ზე მაღალ ტემპერატურაზე თერმოდამუშავების შედეგად იძლევა ინტერმეტალურ ნაერთებს ამის თავიდან ასაცილებლად ჯერ აფენენ პალადიუმს და შემდეგ ერთ ან რამდენიმე ლითონის ფენას.

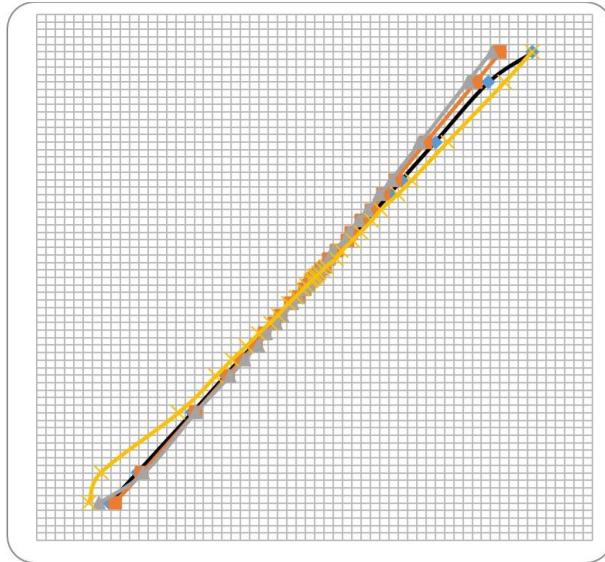
ნახევარგამტარებზე ომური კონტაქტების დასამზადებლად გამოვიყენეთ დანადგარი, რომლის სქემა მოცემულია ნახ. 1-ზე. ყველა კვარცის მილისებრ ქილებზე (1-6) შემოხვეულია ელექტროდუმელი; 1, 2 – ში მოთავსებულია მოპალადიუმირებული ალუმინიუმი, რომელიც ხელს უწყობს აირში არსებული უანგბადის წყლის ორთქლად გარდაქმნას და თხევადაზოტიან თერმოსში ჩადგმული სპეციალური მინისაგან დამზადებულ ჭურჭელში (7, 8) კონდენსირდება. ტექნოლოგიური პროცესის დამთავრების შემდეგ შესაძლებელია იქიდან წყლის გადმოსხმა; 3, 4-ში სუფთა, გამომშრალი ალუმინიუმია, ხოლო 5, 6-ში სილიკონები. ნიმუშების თერმული დამუშავება ხდება ელექტროდუმელში ჩადგმულ კვარცის რეაქტორში მოთავსებულ გრაფიტის ნიმუშები გამოსაწვავად ჩაიწყობა კვარცის ან გრაფიტის კასეტაში და თავსდება

კვარცის რეაქტორში, რომელშიც გადის ჟანგბადისაგან გაწმენდილი აიროვანი აზოტი. ექსპერიმენტულად დადასტურდა, რომ გალიუმის არსენიდზე (GaAs) ომური კონტაქტის მისაღებად საჭიროა ინდიუმის შელღობა $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე 3–5 წთ-ის განმავლობაში. კასეტაში, შიგნება მაგრდება ტემპერატურის გასაზომი თერმოწყვილი.



ნახ.1. დანადგარი ომური კონტაქტის დასამზადებლად

ომური კონტაქტის ფორმირების მექანიზმის შესასწავლად ომურ კონტაქტზე მიერჩილება მავთული (დენის მისაყვანად), შემდეგ ნახევარგამტარის ზედაპირი (ომური კონტაქტით) და მასთან მიბმული მავთული დაიფარება ქიმიურად მდგრადი ლაქით, მეორე ზედაპირი კვლავ სუფთავდება სათანადო სსნარებით დამუშავებით და მყისიერად თავსდება წინასწარ დამზადებულ ელექტროლიტში. დაფენის შემდეგ ნიმუში იჭრებოდა ნაწილებად და მათი თერმოდამუშავება ხდებოდა სხვადასხვა ტემპერატურაზე.



ნახ. 2. GaAs - ზე ინდიუმის შელდობით მიღებული ნიმუშების ვოლტ-აპერული მახასიათებლები, აბსცისათა ღერძებადაზომილია ძაბვა V (მვ), ორდინატია ღერძები – დანი I (მა).

კონტაქტის წინადობის გამოსათვლელად გაზომილი იყო ვოლტ-ამპერული მახასიათებული. ნახ.2-ზე ნაჩვენებია GaAs-ზე 500°C ტემპერატურაზე ინდიუმის შელდობით მიღებული ნიმუშების ვოლტ ამპერული მახასიათებლები. ნახ.2-დან ჩანს, რომ ვოლტ-ამპერული დამოკიდებულება არის წრფივი და სიმეტრიული კოორდინატთა სათავის მიმართ, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ მიღებული კონტაქტები არის ომური. თუმცა მიმდინარე პროცესების ცალსახად ინტერპრეტაციისა და თეორიული მოდელის დასადგენად საჭიროა ჩატარდეს კომპლექსური კვლევა კონტაქტური ფენების სტრუქტურულ ანალიზთან ერთად.

ლიტერატურა

1. Э.Х. Родерик. Контакты металл-полупроводник, М. "Радио и Связь" 1982, стр. 209
2. W.J. Poudwillie and T.C. Mogill. Ohmic contacts to n-type GaAs J. Vac. Sci. Technol.B3(4) 1985
3. T. Sebastyen. Solid St. El. v.25. N7. pp. 543-550, 1982.
4. მ. ბახტაძე, ო. ლაფერაშვილი, ა. მუმლაძე, ი. საგინაშვილი გალიუმის ფოსფიდზე მეტალების ელექტროქიმიური დაფენით მიღებული შოტკის დიოდების ელექტრული თვისებები. საქ. მეცნ. აკ-ის მაცნე. ქიმიის სერია, ტ. 17, №4 1991 **ეს ლაპრეს**
5. Ridout. Solid st. El. v. 18 pp. 547-550. 1976
6. W.J. Poudwillie and T.C. Mogill. Ohmic contacts to n-type GaAs J. Vac. Sci. Technol.B3(4) 1985
7. T. Sebastyen. Solid St. El. v.25. N7. pp. 543-550. 1982.
8. ო. ლაფერაშვილი, დ. ფასურიშვილი. ომური კონტაქტი გალიუმის არსებიდზე. საქ. მეცნ. აკადემიის მოამბე ტ. 152. №2 გვ. 269-272. 1995
9. Гольдберг Ю.А. Лаперашвили Т.А. Накашидзе Г.А. Изменение механизма прохождения тока при переходе барьера контакта к омическому вследствие отжига структуры Au-GaP n – типа, сб. Оптическая обработка информации и оптоэлектроника, Тбилиси, "Мецниереба" 1986, стр. 51-55
10. Бахтадзе М. В. Лаперашвили Т.А. Электрохимический метод создания диодов Шоттки на основе GaP. Известия АН ГССР, серия Хим. 1986, №4, стр. 306-308
11. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов т.1."Мир", М. 1984.
12. А. Мильнс, Д. Фоихт. Гетеропереходы и переходы металлов полупроводник. "Мир" , М.1975.
13. Liquid phase epitaxial growth of GaAs from Au---Ge---Ni melts M. Otsubo, H. Kumabe and H. Miki. Solid St.El.,v.20, N7,1977,p.617-621

14. Л. Д. Либов, С. С. Мескин, Д. А. Наследов, В. Е. Седов, Б. В. Царенков, Омические контакты арсенид галлия-металл. ПТЭ 4 с14-22 1965

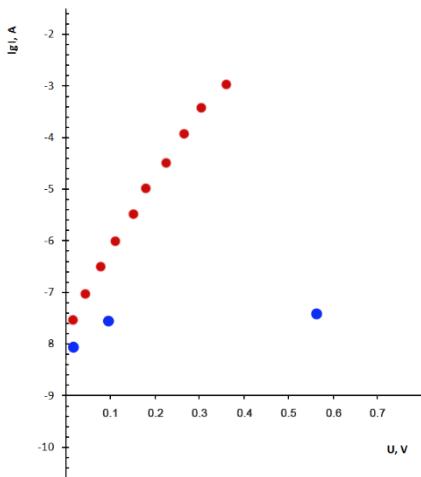
15. ლაფერაშვილი თ., ბახტაძე გ. მეტალისა და ნახევარგამზარის ომური კონტაქტი - საქ. მეცნ. აკად. მაცნე, ქიმიის სერია, გ. 27, N 3-4, 2001, გვ.206.

თერმოდამუშავების გავლენა ნახევარბამტარისა და ლითონის პრეცაზტის ფოტოელექტრულ მახასიათებლებზე

თინათინ ლაფერაშვილი, ორესტ კვიციანი,
დავით ლაფერაშვილი, ია ლლონტი

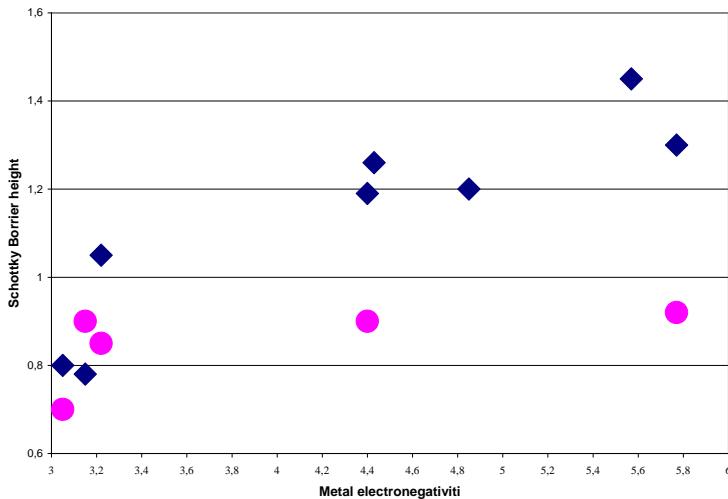
წარმოდგენილია გალიუმის არსენიდსა და
გალიუმის ფოსფიდზე ინდიუმის დაფენით მიღებული
სტრუქტურების თერმოდამუშავების გავლენა
სტრუქტურების ელექტრულ და ფოტოელექტრულ
მახასიათებლებზე.

ლითონებს III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებზე
გაფენდით ქიმიური და ელექტროქიმიური მეთოდით [1-2].
სურ.1-ზე ნაჩვენებია ელექტროქიმიური დაფენით
მიღებული In/GaP შოტკის დიოდის ვოლტამპერული
მახასიათებლი აგებული ნახევრადლოგარითმულ (V,lnI)
მასშტაბში. დიოდზე პირდაპირი მიმართულებით
მოდებული ძაბვის მცირე მნიშვნელობებისთვის, (V,lnI)
დამოკიდებულება წარმოადგენს სწორ ხაზს, რაც
მაჩვენებელია იმისა, რომ დიოდის ელექტრული
მახასიათებლების გამოსათვლელად შეიძლება ბეტეს
თერმოელექტრული ემისიის თეორიის გამოყენება. ამ
გრაფიკიდან გამოთვლილი იდეალურობის კოეფიციენტის
მნიშვნელიბა $n < 1.1$ მიუთითებს იმაზე, რომ მიღებულ
ლითონისა და ნახევარგამტარის გამყოფ ზედაპირზე არ
არსებობს ჟანგის ან სხვა განსხვავებული შუალედური
ფენა.



სურ.1. In/GaP ჰეტკის დიოდის ვოლტამპერული გახასიათებელი ნახევრადლობარითმულ მასშტაბზე, დიოდზე პირდაპირი და უკუმიმართულების ძაბვის მოღებისას.

გალიუმის ფოსფიდზე ინდიუმის ელექტროქიმიური დაფენით მიღებული სტრუქტურის სპექტრალურ მახასიათებელზე ადრევე იყო შენიშნული ერთმანეთისაგან მკვეთრად გამიჯნული ფოტომგრძნობიარობის ორი უბანი. ამ მოვლენის ასახსნელად დაშვებული იყო ინდიუმისა და გალიუმის ფოსფიდის კონტაქტზე მასალების ურთიერთქმედების შესაძლებლობა, კერძოდ გალიუმის ფოსფიდში გალიუმის ატომების ნაწილობრივი ჩანაცვლება ინდიუმით და გარდამავალ ფენაში In_{1-x}Ga_xP სამმაგი მყარი სსნარის პატარა კუნძულების მიღება უკვე ოთახის ტემპერატურაზე.



სურ.2. GaAs-სა და GaP-ზე მეტალების დაცვენი გილებული დიოდის შოტკის ბარიერის დამოკიდებულება ლითონის გამოსვლის მუშაობაზე, რომ შემსაბამება GaAs-ს, ხოლო რომ გამოიყენება GaP-ს

სურ.2-ზე წარმოდგენილია GaAs-სა და GaP-ზე მეტალების დაფენით მიღებული შოტკის დიოდის ძირითადი მახასიათებლის – შოტკის ბარიერის დამოკიდებულება მეტალის ელექტროუარყოფითობაზე.

ლითონისა და ნახევარბამტარის პონტაქტის თერმოდამუშავება

ნიმუშების თერმოდამუშავება ხდებოდა გაწმენდილი აზოტის ატმოსფეროში. მოცემულ ნაშრომში წარმოდგენილია III-V ნახევარგამტარებზე მეტალების ქიმიური და ელექტროქიმიური დაფენის მეთოდები. In/GaP სტრუქტურის მაგალითზე ნაჩვენებია, რომ შეიძლება III-V

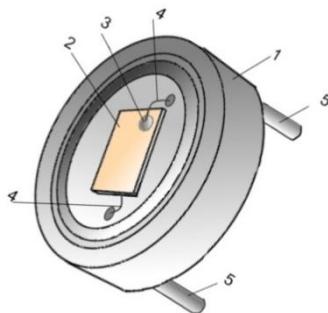
ნახევარგამტარებზე III ჯგუფის მეტალების დაფენისა და მისი შემდგომი თერმოდამუშავების გამოყენება კვანტურ-წერტილოვანი სტრუქტურების მიღების ტექნოლოგიურ საფეხურად.

III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებზე მეტალების დაფენა ხდებოდა ქიმიური მეთოდით ექსპერიმენტში გამოყენებულია ჩოხრალსკის მეთოდით გაზრდილი n - ტიპის ნახევარგამტარული მონოკრისტალები 10^{16} – 10^{17} სმ⁻³ კონცენტრაციით და 250 - 300 მკ სისქით.

გალიუმის არსენიდსა (GaAs) და გალიუმის ფოსფიდზე (GaP) შოტკის დიოდების დამზადების ტექნოლოგიური საფეხურები იყო შემდეგი: ნახევარგამტარული კრისტალები იხეხებოდა (იშლიფებოდა) M7 და M3 მიკროფენილით; პრიალდებოდა ალმასის AM-1 პასტით; ირეცხებოდა CCl₄-ში და აცეტონში რამდენჯერმე წამოდუღებით; და ხდებოდა ნახევარგამტარის ზედაპირების ქიმიური დამუშავება გალიუმის ფოსფიდისა სამეფო წყალში (HCl + HNO₃), ხოლო გალიუმის არსენიდისა სსნარში (H₂SO₄ + H₂O₂ + H₂O) რამდენიმე წამის განმავლობაში წამოდუღებით; ამის შემდეგ ნიმუშები კარგად ირეცხება დისტილირებულ წყალში და ახლად დამუშავებულ კრისტალებს ერთ ზედაპირზე უკეთდება ომური კონტაქტი In-ის შედნობით 500 - 600 °C-ზე, შესაბამისად GaAs - ისა და GaP-ს შემთხვევაში (ომური კონტაქტის შედნობა ხდება ინერტული გაზის ატმოსფეროში 3 – 5 წთ-ის

განმავლობაში); შემდეგ ნახევარგამტარის ზედაპირი ომური კონტაქტით და კრისტალის გვერდები იფარება ქიმიურად მდგრადი ლაქით; მისი შეშრობის შემდეგ 3 წთ-ის განმავლობაში სუფთავდება ნარევში $0.5\% \text{ Br}_2 + 99.5\% \text{ CH}_3\text{OH}$; რამდენჯერმე ირეცხებოდა სუფთა მეთანოლში; ამის შემდეგ ნიმუში სწრაფად თავსდება კვარცის ჭიქაში ჩასხმულ ხსნარში მეტალის ქიმიურად დასაფენად.

ინდიუმის დაფენის შემდეგ ლითონ-ნახევარგამტარის სტრუქტურას სცილდებოდა ქიმიურად მდგრადი ლაქი ჯერ მექანიკურად, შემდეგ აცემონში რამდენჯერმე წამოდუდებით. ვჭრიდით 20 - 25 მმ² ფართობის ნიმუშებად.

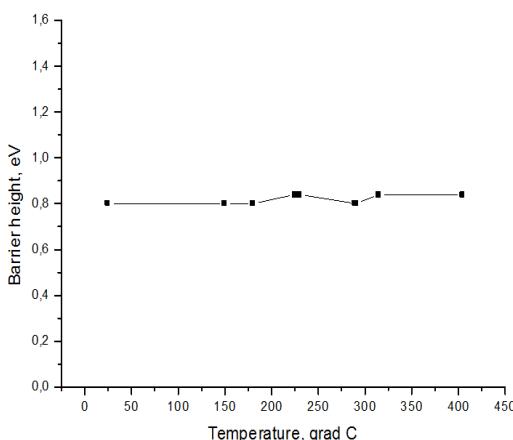


სურ.3. მასავრიმენტულად დამზადებული დიოდი

მიღებული მეტალ-ნახევარგამტარული გადასასვლელის ბაზაზე შოტკის ღიოდების დასამზადებლად კრისტალი მაგრდება სპილენის კორპუსში და აქვს სურ.1-ზე ნაჩვენები კონფიგურაცია.

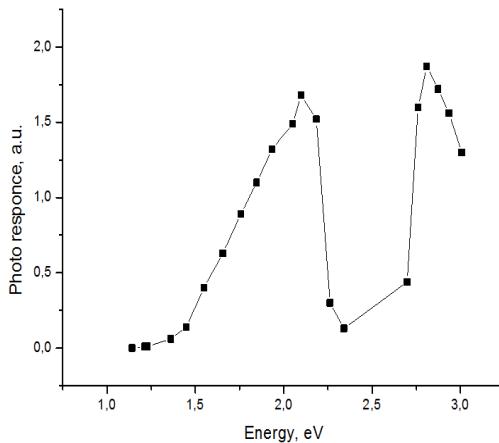
თერმოდამუშავების გავლენა ლითონისა და
ნახევარგამტარის კონტაქტის ფოტოელექტრულ
მახასიათებელზე

შესწავლით იყო თერმოდამუშავების გავლენა In/GaP დიოდების ელექტრულ და ფოტოელექტრულ მახასიათებლებზე. სურ.2.-ზე In/GaP შოტკის დიოდის ბარიერის სიმაღლის დამოკიდებულება დიოდის თერმოდამუშავების ტემპერატურაზე, საიდანაც ჩანს, რომ სტრუქტურები 5-30 წუთის განმავლობაში თერმოდამუშავებისას 400°C -მდე ბარიერულ დიოდებად რჩებიან, ბარიერის სიმაღლე თითქმის არ იცვლება (სურ.2), ხოლო სპექტრალურ მახასიათებელზე მნიშვნელოვნად იზრდება ინფრაწითელ უბანში შთანთქმის ეფექტურობა გალიუმის ფოსფიდის შთანთქმის მოკლებალლოვან უბანთან შედარებით.



სურ.4. In/GaP შოტკის დიოდის ბარიერის სიმაღლის დამოკიდებულება დიოდის თერმოდამუშავების ტემპერატურაზე

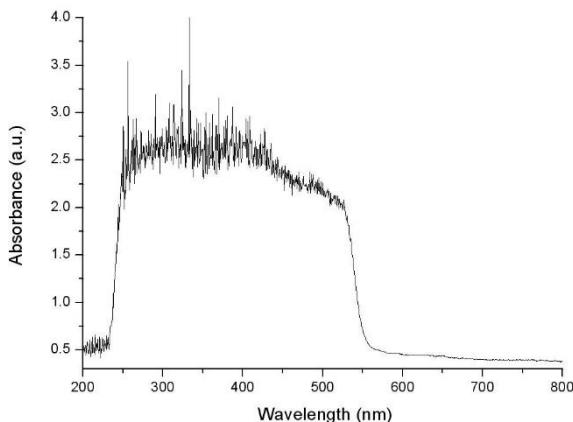
სურ.5-ზე ნაჩვენებია 290°C -ზე 10 წელის განმავლობაში თერმოდამუშავებული In/GaP დიოდის სპექტრალური მახასითებელი 0.2 ვოლტი ძაბვის უპუმიმართულებით მოდების შემთხვევაში. აღმოჩნდა, რომ ეს გრძელტალდოვანი უბანი ეთანადება $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ სამმაგი მეტალი სსნარის შთანთქმის უბანს. სტრუქტურების ომური კონტაქტის მხრიდან განათებისას მოკლეტალდოვანი უბანი მოიჭრება და მიიღება ახლო ინფრაწითელ უბანში მგრძნობიარე ელეტრომაგნიტური გამოსხივების ეფექტური დეტალები.



სურ.5. In/GaP შროტკის დიოდის ფოტოსაენტრული მახასიათებელი დიოდის $290^{\circ}\text{B}-\text{Z}\text{E}$ 10 წელის განმავლობაში თერმოდამუშავების შემდეგ.

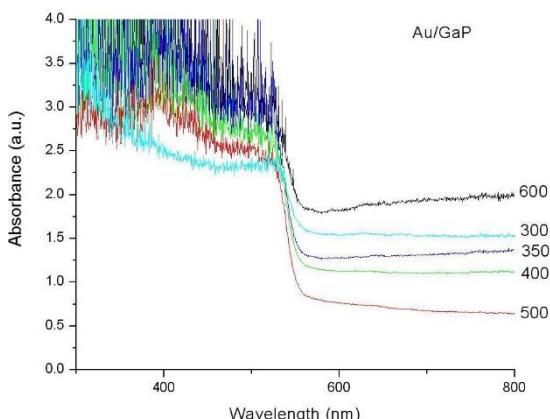
გალიუმის არსენიდსა და გალიუმის ფოსფიდზე ოქროს თხელი (250 – 500 Å) ფირით დაფენილი სტრუქტურები წარმოადგენენ მაღალეფექტურ მზის ელემენტებს გამოსხივების იისფერ და ულტრაინფერ უბანში. სურ.4-ზე ნაჩვენებია Au/GaP დიოდის სპექტრული

მახასიათებელი გადაღებული „Avantes“ –ის გამოყენებით.

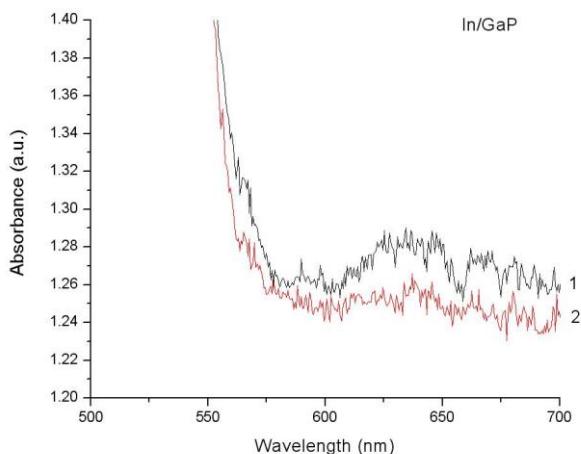


სურ.6. Au/GaP დიოდის სპექტრული მახასიათებელი

სურ5-ზე ნაჩვენებია Au/GaP სტრუქტურის სხვადასხვა ტემპერატურაზე 30 წუთის განმავლობაში თერმოდამუშავების შემდეგ გადაღებული სპექტრული მახასიათებლები. სურათიდან ჩანს, რომ ჩვენს მიერ დამზადებული დიოდების სპექტრული მახასიათებელი მდგრადია 600°C ტემპერატურაზე 30 წუთის განმავლობაში თერმოდამუშავების მიმართ. საინტერესი აღმოჩნდა ინდიუმის დაფენით მიღებული სტრუქტურების სპექტრული მახასიათებელის ცვლილება იმავე რეჟიმში (In/GaP და Au/GaP სტრუქტურები ერთდროულად იყო ჩაწერილი გრაფიტის კასეტაში) თერმოდამუშავების შედეგად გაჩნდა ფოტომგრამბიარე უბანი წითელ და ინფრაწითელ უბანში, როგორც სურ.7,8-ზეა ნაჩვენები.



სურ.7. Au/GaP სტრუქტურის სპექტრული მახასიათებელი ინდიკაციაშების შემდეგ.



სურ.8. In/GaP სტრუქტურის სპექტრული მახასიათებელი ინდიკაციაშების შემდეგ.

დასპენა

ამრიგად, III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებზე ელექტროქიმიური და ქიმიური დაფენით მიღებული სტრუქტურების ელექტრული და ფოტოელექტრული თვისებების შესწავლის საფუძველზე მიღებული შედეგებით ნაჩვენებია, რომ მეტალისა და ნახევარგამტარის კონტაქტი არის არამარტო ელექტრომაგნიტური გამოსხივების დეტექტორი, ან მოხერხებული საშუალება ნახევარგამტარის პარამეტრების შესასწავლად, არამედ იგი არის ტექნოლოგიური საფეხური ფუნქციონალურად ახალი ნანოსტრუქტურების დასამზადებლად, კერძოდ III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებზე III ჯგუფის ელემენტებისა და მათი მყარი ხსნარების დაფენითა და დაბალტემპერატურული თერმოდამუშავებით შესაძლებელია სტრუქტურების მიღება საინტერესო ფოტონური თვისებებით.

ლიტერატურა:

1. Бахтадзе, М.В., Лаперашвили, Т.А. Сагинашвили, И.Н. Фотоэлектрические свойства In - GaP поверхностно-барьерных структур. Труды Тбилисского ун-та, 1983, 244, 120-125.
2. Гольдберг, Ю.А., Лаперашвили, Т.А., Накашидзе, Г.А., Царенков Б.В. Влияние термообработки на характеристику прямой токонапряжение Au-n-GaP поверхностно-барьерных структур. Письма в ЖТФ, 1982, 8, 14, 886-889
1. Laperaschvili T., Immerlischvili I., Khachidze M., Laperaschvili D. Photoelectric characteristics of contacts In-semiconductor A3B5. Proceedings of SPIE, 2003, 5118, 502.

**ტერაკტერცული სიხშირის ბამომსხივებები და
ზოფონური მიმღებები III-V ჯგუფის
ნახევარბამტარების პრანტურწერტილოგანი
სტრუქტურების ბაზაზე**

თინათინ ლაფერაშვილი, დავით ლაფერაშვილი,
ორესტ კვიციანი

1. შესაბამის

მომავლის კვანტურ ინფორმაციულ ტექნოლოგიებში გამოყენებული იქნება ეფექტური ერთფოტონიანი წყაროები. უპე არსებული კვანტური წერტილები საუკეთესო ერთფოტონიანი წყაროებია და შესაძლებელია მათში ემისიის მართვა. III-V ჯგუფის ნახევარგამტარების კვანტურწერტილოვანი სტრუქტურები წარმოადგენენ თანამედროვე ტერაკტერცული ტექნოლოგიის საბაზისო ელემენტებს, როგორც ტერაკტერცული გამომსხივებლების, ასევე ტერაკტერცული დეტაქტორებისა და მიმღები ანტენებისათვის.

კავშირგაბმულობის თანამედროვე საშუალებათა ეფექტურობის გასაზრდელად აუცილებელია დიდი გამტარუნარიანობისა და ენერგიის მცირე კარგვების მქონე სიგნალის გადამცემი არსების ანუ ელექტრომაგნტური ტალღაგამტარების შექმნა. ასეთ სისტემებში სიგნალის ენერგიის განშტოების, დაყოფისა და გარდაქმნისას აუცილებელია ტალღაგამტარული გადასასვლელების შეთანხმება, ესე იგი მუშა ტალღის ენერგიის საჭირო მიმართულებით გატარების საკმარისად მაღალი დონის მიღწევა, ხოლო სხვა მიმართულებებით მისი ჩახშობა. ეს ამოცანა განსაკუთრებით

მნიშვნელოვანია მრავალარხიანი ტალღაგამტარული სისტემების სტაბილური მახასიათებლების უზრუნველსაყოფად სისტირეთა ფართო დიაპაზონში, რაც გერ მიიღწევა ერთგვაროვანი მრავალპორტიანი ტალღაგამტარული არხებით. ასე, მაგალითად, ერთგვაროვანი სამპორტიანი T-სებრი (სამკაპა) და ოთხპორტიანი ჯვრისებრი ტალღაგამტარული გადასასვლელების კვლევებმა E და H სიბრტყეებში აჩვენეს, რომ ტალღაგამტარული მხრების პრაქტიკულად დასაშვები შეთანხმება მიიღება სისტირეთა მხოლოდ ვიწრო ზოლისთვის და ამასთან ერთად ტალღაგამტარული მხრების განივგეთთა ზომების მხოლოდ განსაზღვრულ თანაფარდობათა პირობებში [1]. ამ პრობლემის გადასაჭრელად იქმნება პრინციპულად ახალი ტიპის მოწყობილობები, ფოტონურკრიტალური ტალღაგამტარით დაკავშირებული ინტეგრალური სქემები.

ფოტონური კრისტალი იქმნება ხელოვნურად ნახევარგამტარულ მასალაში არაერთგვაროვნებების, მაგალითად ჰაეროვანი ხვრელების სერიის ჩანერგვით. ფოტონური კრისტალის ძირითადი მახასიათებლია ზონური სტრუქტურა, რომელიც განსაზღვრავს მხოლოდ გარკვეული სისტირის ბრტყელი ტალღის გავრცელების შესაძლებლობას გარემოში.

კვანტური წერტილები არის ადამიანის მიერ შექმნილი ხელოვნური ატომები. ტერმინი კვანტური წერტილები (Quantum dot's) შემოღებული იქნა მარკ რიდის მიერ და ისმარება მრავლობით რიცხვში. კვანტური წერტილები არის 1-100 ნანომეტრის ზომის ნახევარგამტარული სტრუქტურები, რომლის ექსიტონები შეზღუდული არიან სამივე სივრცულ განზომილებაში.

ასეთ სტრუქტურებს აქვთ თვისებები, რომელთაც შეალედური მდგომარეობა უჭირავს მოცულობითი ნახევარგამტარების თვისებებსა და დისკრეტული მოლეკულის თვისებებს შორის.

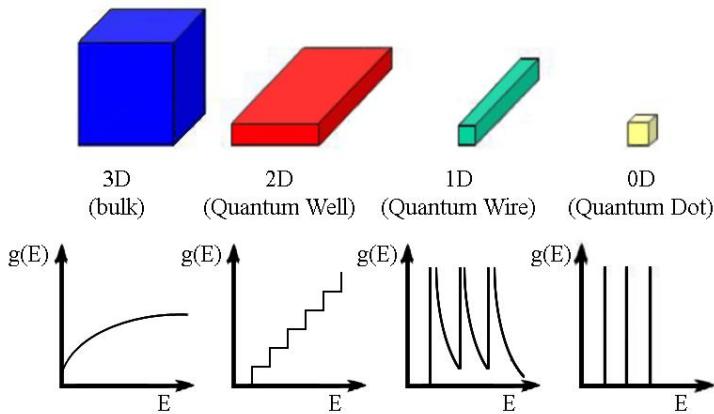
ისეთ კვლევებს, რომელიც აღმოაჩენს ნანოზომის მასალების ახალ თვისებებს, ხშირად ნანომეცნიერებას უწოდებენ, ხოლო ნანოტექნოლოგია განიხილავს საკითხებს, თუ როგორ იქნას გამოყენებული ნანოზომის მასალებში აღმოჩენილი თავისებურებები საჭირო დანიშნულების ტექნიკური მოწყობილობების მისაღებად და ტექნოლოგიური პროცესების მისაღწევად. ზოგიერთი ასეთი მოწყობილობა უკვე გამოყენება მედიცინაში, ელექტრონიკაში, რობოტოტექნიკასა და ენერგიის საწარმოებლად. კვანტური წერტილების ბაზაზე დამზადებულია სინათლის გამომსხივებელი დიოდები და დიოდური ლაზერები, ტერაჰერცული სიხშირის მიმღებები, მზის ელემენტები, ტრანზისტორები. პერსპექტიულია მათი გამოყენება კვანტურ კრიპტოგრაფიასა და კომპიუტერებში ლოგიკური ელემენტების (ქებიტების) შესაქმნელად. ოპტიკურად აქტიური კვანტური წერტილების მიღების ერთ-ერთი ცნობილი მეთოდია III-V ნახევარგამტარების თვითორგანიზებადი ზრდა, როდესაც თვითორგანიზებადი კუნძული ჩანერგილია მასალაში, რომლის აკრძალული ზონა მეტია კუნძულის მასალის აკრძალულ ზონაზე. მაგალითად, როდესაც **GaAs**-ში ჩანერგილია **InAs**-ის კუნძულები [1]. ჩვენს მიერ **In/GaP** სტრუქტურის მაგალითზე ნაჩვენები იყო, რომ შეიძლება III-V ნახევარგამტარებზე III ჯგუფის მეტალების დაფენისა და მისი შემდგომი თერმოდამუშავების გამოყენება კვანტურ-

წერტილოვანი სტრუქტურების მიღების ტექნოლოგიურ საფეხურად.

2. პპანტური ღერტილების ვიზიკური ბუნება

კვანტური წერტილების ძირითადი თავისებურება არის ის, რომ კრისტალის ზომების შეცვლით ხდება ნახევარგამტარული მასალის აკრძალული ზონის ცვლა, რაც შეუძლებელია მოცულობით ნახევარგამტარში. ლეიმანის განმარტებით კვანტური წერტილები არის ნახევარგამტარები, რომელთა მახასიათებლები ძლიერად დამოკიდებული ინდივიდუალური კრისტალის ზომებსა და ფორმაზე. მაგალითად, ფლოურესცენციის შემთხვევებში, კრისტალის ზომების შემცირება იწვევს გამოსხივებული სინათლის წანაცვლებას წითელიდან ლურჯი სინათლისაკენ.

მკვლევარები ნანოსტრუქტურის ანალიზს ხშირად აკეთებენ მასალაში ელექტრონული მდგომარეობების სიმკვრივის მიხედვით. მოცულობით ნახევარგამტარში ელექტრონულ მდგომარეობათა სიმკვრივე ელექტრონის ენერგიიდან კვადრატული ფესვის პროპორციულია. როგორც სურ.1-ზე არის ნაჩვენები, მოცულობით კრისტალში ელექტრონულ მდგომარეობათა სიმკვრივის უწყვეტი სპექტრი კვანტური წერტილების შემთხვევაში გარდაიქმნება ელექტრონულ მდგომარეობათა დისკრეტულ სერიად. კვანტურ ორმოში ელექტრონები შეზღუდული არიან ერთი მიმართულებით თხელ ფირში, რომლის სისქე რამდენიმე ნანომეტრია. როგორც სურ.1-დან ჩანს კვანტური ორმოს ელექტრონულ მდგომარეობათა სიმკვრივე შედგება საფეხურებისაგან და ზონის კიდე წაინაცვლებს მაღალი ენერგიებისაკენ.



სურ.1. ნახვარბამტარულ სტრუქტურები ელექტრონულ მდგრადარეობათა სიმკვრივის დამოკიდებულება წერტილში.

კვანტურ წერტილებში ენერგეტიკული განაწილება დისკრეტულია და ელექტრონულ მდგომარეობათა სიმკვრივე აღიწერება დელტა-ფუნქციის მსგავსი მახვილი პიკების სერიისაგან, რომლებიც წარმოადგენენ ელექტრონის ენერგიის დისკრეტულ საკუთარ მნიშვნელობებს. იმის გამო, რომ ექსპერიმენტულ ნიმუშებში ყველა კვანტური წერტილი არ არის ერთნაირი ზომისა, განსხვავდება საკუთარ ენერგიებში და მდგომარეობათა სიმკვრივის პიკები შესაბამისად მდებარეობენ კვანტური წერტილის საშუალო ზომის შესაბამისი ენერგიის მიმდებარე არეში [2].

3. კვანტური ტერტილების მიღების ტექნოლოგია

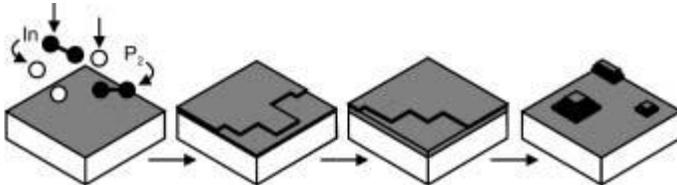
კვანტურ წერტილები სისტემის მიღების უმარტივესი მეთოდია მაკროსკოპული კრისტალის

მექანიკური დამტვრევა - დაფქვა. მოწესრიგებული ნანოსტრუქტურების ფორმირებისას ხდება ბრტყელი კრისტალური ზედაპირის გადაწყობა ბორცვებისა და ბრტყელი უბნების პერიოდულ სტრუქტურად ზედაპირის თავისუფალი ენერგიის შესამცირებლად. ნანოკრისტალი არის მონოკრისტალი, რომლის დიამეტრი რამდენიმე ნანომეტრია. ნანოკრისტალური ქვანტური წერტილი კი არის ნანოკრისტალი, რომლის აკრძალული ზონა ნაკლებია მის გარემომცველი მასალის აკრძალულ ზონაზე. ტიპიური ქწ-ის დიამეტრი 500 ნმ-ის განზომილებისაა. ქვანტურწერტილოვანი სისტემის ფერს განსაზღვრავს მათი გეომეტრული ზომები.

ოპტიკურად აქტიური კვანტური წერტილების მიღების ერთ-ერთი ცნობილი მეთოდია III-V ნახევარგამტარების თვითორგანიზებადი ზრდა, როდესაც თვითორგანიზებადი კუნძული ჩანერგილია მასალაში, რომლის აკრძალული ზონა მეტია კუნძულის მასალის აკრძალულ ზონაზე. მაგალითად, როდესაც GaAs-ში ჩანერგილია InAs-ის კუნძულები. სტრანსკი-კრასტანოვის (S-K) მეთოდის მიხედვით ფუძეშრეზე (GaAs) გაზური ფაზიდან ეპიტაქსის მეთოდით ხდება განსხვავებული ნახევარგამტარის (InAs) ფენის ზრდა [2]. მიმდევრობით ხდება ფენის ეპიტაქსია ფენაზე, რის შედეგადაც მიღება გაზრდილი ნახევარგამტარის თხელი ფირი, რომელიც კრიტიკული სისქის მიღწევის შემდგა გადადის კუნძულოვან მოდაში. ამ მეთოდით მიღებული იყო InAs-GaAs და InP-GaAs სტრუქტურებში კუნძულების ტიპიური სიმკვრივე $10^9 - 10^{12} \text{ სმ}^{-2}$, რაც დამოკიდებულია გაზრდის პირობებზე. კვანტური წერტილების თვითანსამბლირებით

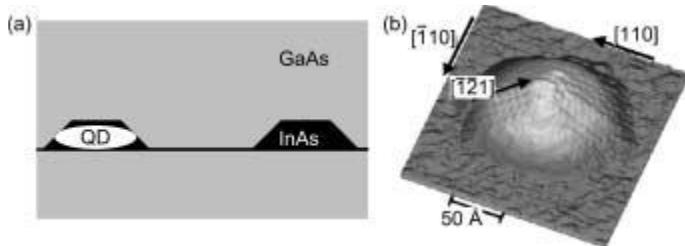
შესაძლებელი ხდება კუნძულების ფორმირება
ეპიტაქსიური ზრდის პროცესში.

ეპიტაქსიის ჩვეულებრივ პროცესში ხდება ერთი
ატომური ფენის ზრდა მეორეზე. კუნძულების ფორმირება
მოხდება იმ შემთხვევაში, თუ იარსებებს დიდი
განსხვავება მასალების მესერის პარამეტრებს შორის
და/ან დაფენილი მასალის ზედაპირული ენერგია
განსხვავდება ფუძეშრის ზედაპირული ენერგიისაგან.
დაფენილი მასალა ახდენს მისი პოტენციალური ენერგიის
მინიმიზაციას ფუძეშრების კუნძულების ფორმირების
გზით. ამ მეთოდის გამოყენებით
დამზადებულია ლაზერული სტრუქტურა, რომელშიც
რამდენიმე კუნძულოვანი ფენა ერთმანეთზე ერთი მეორის
წვერზეა განთავსებული. ტიპიური კვანტური წერტილის
სიმაღლე 15 ნმ და სიგანე 15-25 ნმ-ია. ეს კი იმას ნიშნავს,
რომ ერთ კვანტურ წერტილში გვაქვს ბევრი ელექტრონი
და ხვრელი. ელექტრონის ძირითადი მდგრმარეობის
გამოთვლილი დაწესების ენერგია არის 180 მევ 13.6 ნმ
სიმაღლის ქვანტური წერტილებში. სურ.2-ზე ნაჩვენებია
ქვანტური წერტილის ზრდის პროცესი S-K მეთოდის
მიხედვით, რომელიც იწყება ატომური ფენის ფენაზე
ზრდით, მაგრამ, როცა ფენის სისქე მიაღწევს



სურ.2 S-K მეთოდით ქვანტური წერტილის ზრდა

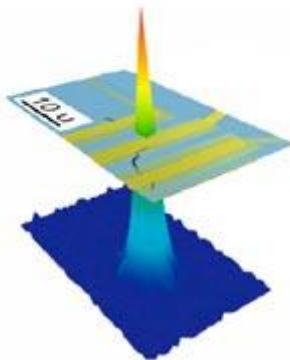
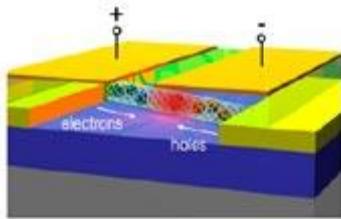
კრიტიკულს, დაიწყება კუნძულის ფორმირება. სურ.3 –ზე ნაჩვენებია n-GaAs-ში ჩანერგილი InAs – ის ქვანტური წერტილების სქემატური გამოსახულება (ა), და InAs – ის გაზრდილი კუნძულის გამოსახულება [] –ის მიხედვით.



სურ.3. n-GaAs-ში ჩანერბილი InAs – ის ქვანტური წერტილების სქემატური გამოსახულება (ა) და InAs – ის გაზრდილი კუნძულის გამოსახულება (ბ).

ტიპიური ქვანტური წერტილის სიმაღლეა 5 – 15 ნმ, სიგანე 15 – 25 ნმ, ეს იმას ნიშნავს, რომ მასში არის მრავალი ელექტრონი და ხვრელი.

ქვანტური წერტილების ზომები დიდად არის დამოკიდებული გაზრდის ტემპერატურასა და სხვა პირობებზე. მაგალითად III და V ჯგუფების ელემენტთა შეფარდებაზე. ქვანტური წერტილების საშუალო ზომაა 10-50 ნმ, ფლუქტუაცია 10% დან 30%-მდე. InGaAs-GaAs კვანტურწერტილოვანი ლაზერები აასხივებენ 1,3 მკმ სიგრძის ტალღას, რაც ძალიან მნიშვნელოვანია კავშირგაბმულობის გავრცელებული ოპტიკურბოჭკოვან სისტემებთან თავსებადობის თვალსაზრისით.

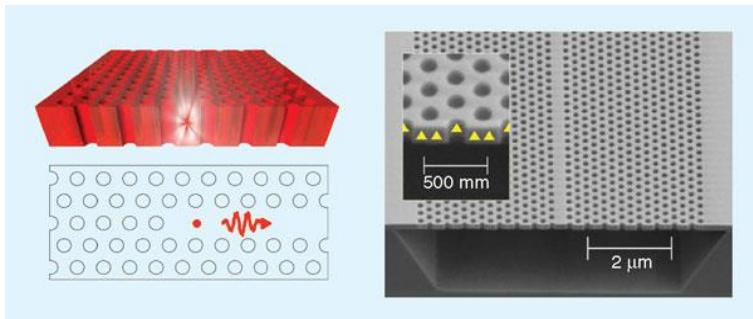


სურ.4. ბაზოსხივება InP/GaP სტრუქტურიდან

მთავარი სირთულეა გამოსხივებული ერთმოდიანი მონოფოტონის გავრცელებისათვის ეფექტური გადაცემის არხის არარსებობა. ფოტონური კრისტალი არის მასალა გარდატეხის მაჩვენებლის პერიოდული მოდულაციისათვის ერთი, ორი ან სამი მიმართულებით, რაც აიძულებს ფოტონებს ლოკალიზებული იქნენ დისკრეტულ ენერგეტიკულ მდგომარეობებზე. ფოტონური კრისტალის აღწერა შეიძლება ფოტონური აკრძალული ზონური სტრუქტურის გამოყენებით, ისევე როგორც, ნახევარგამტარულ მასალაში ხდება ელექტრონული გადსვლების აღწერა ნახევარგამტარის ზონური თეორიით.

4. ერთმოდიანი მონოფოტონური გამოსხივების ეფექტური გადაცემა

ერთმოდიანი მონოფოტონური გამოსხივების ეფექტური გადაცემა შესაძლებელია კვანტური წერტილის ჩანერგით ფოტონურ კრისტალურ ტალღაგამტარში, როგორც ნაჩვენებია სურ.5-ზე.



სურ.5 ფოტონურ პრისტალურ ტალღაგამტარში ჩანერბილი კვანტური ფერტილი

ასეთ ტალღაგამტარში სინათლის გავრცელება შეიძლება მნიშვნელოვნად შეიზღუდოს, რაც აძლიერებს სინათლესა და მასალას შორის ურთიერთქმედებას, რის შედეგადაც ტალღაგამტარში ფოტონის ემისია სწრაფად იზრდება და როგორც აცხადებენ [], მათ მიერ ნაჩვენები იქნა, რომ ხდება გამოსხივებული მონოფოტონების 89%-ის ურთიერთქმედება ტალღაგამტართან 50% ზე მეტი ეფექტურობითა და უპრეცენტოდ ფართო გატარების ზოლით 20 ნგ.[1].

ბოლო ხანს მონოფოტონის ძლიერი ლოკალიზების შესაძლებლობა იყო დამზერილი ფოტონურ-კრისტალურ

ტალღაგამტარში. ამ ქსპერიმენტებმა აჩვენეს
მაღალგვეპტური კოპერენტული მონოფოტონური
წყაროების გამოყენების შესაძლებლობა ნაწილობრივი
სტრუქტურებში.

ლიტერატურა:

1. Boris L. Gelmont, Dwijit L., Woolar, Jefry L. Hetler, Thomas w Growe. IEEE Transactions on electron devices. Vol 45.N 12 1998. P. 2521-2527.
2. Hans Christian Hansen Mulvad, Michael Galili, Leif K. Oxenløwe, Hao Hu, Anders T. Clausen, Jesper B. Jensen, Christophe Peucheret, and Palle Jeppesen, Demonstration of 5.1 Tbit/s data capacity on a single-wavelength channel.” Optics Express, vol. 18, no. 2, pp. 1438–1443, (2010)

პომავესირებული ნახევარგამტარების ფოტოგამტარობა

ორესტ კვიციანი, თინათინ ლაფერაშვილი, დავით
ლაფერაშვილი, ილია იმერლიშვილი

შესავალი

ინფორმაციის სწრაფი დამუშავების ამოცანების წარმატებით გადასაჭრებულად აუცილებელი გახდა კვლევების წარმოება საჭირო მახასიათებლების მქონე ახალი ტიპის არაწრფივი მოწყობილობების შესაქმნელად. 21-ე საუკუნეში პერსპექტიულია ისეთი მოწყობილობები, რომლებშიც სიგნალის მართვა შესაძლებელი იქნება როგორც ელექტრული, ასევე ოპტიკური და მაგნიტური ველით. წრედი არაწრფივია თუ მისი პარამეტრები დამოკიდებულია მასში გამავალი დენის ან ბაბვის სიდიდეზე. არაწრფივი მოწყობილობის ბაზაზე შესაძლებელია ორმდგრადმდგომარეობიანი ანუ ბისტაბილური ელემენტების მიღება მეხსიერების ან ლოგიკური სქემების შესაქმნელად. ასეთი მოწყობილობების ერთ-ერთი ელემენტია ოპტიკური გადამრთველი III – V ჯგუფის ნახევარგამტარების ბაზაზე. დიდი კუთრი წინაღობის ნახევარგამტარი მიიღება მასალის ისეთი მინარევებით ერთობლივი ლეგირების შედეგად, რომლებიც იწვევენ მუხტის თავისუფალი მატარებლების კომპენსაციას.

იმის გამო, რომ გალიუმის ფოსფიდის ლეგირება ადგილად ხდება სხვადასხვა ტიპის მინარევებით და შესაძლებელია მაღალომიანი კომპენსირებული მასალის მიღება, რომელიც ფოტომგრამბიარეა როგორც

საკუთრივ, ასევე მინარევულ უბანში, ხოლო არაწონასწორული მუხტის რეკომბინაციას ხშირად თან სდევს ხილული გამოსხივება, გალუიუმის ფოსფიდი არის მოხერხებული მასალა ნახევარგამტარებში ინჟექციური დენებისა და პლაზმის გავრცელების მექანიზმების შესასწავლად.

აქ წარმოდგენილია შედეგები, რომლებიც მიღებული იყო ნაწილობრივ კომპენსირებული გალუიუმის ფოსფიდის ბაზაზე დამზადებული უარყოფითი დიფერენციალური წინაღობის უბნის შემცველი S - ტიპის ვოლტამპერილი მახასიათებლის მქონე ნახევარგამტარული ოპტოელექტრული გადამრთველის ვოლტამპერული და ფოტოსაქექტრული მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე. შემოთავაზებულია ოპტიკური გადართვის მექანიზმის მოდელი ასეთ სტრუქტურებში.

ორმხრივი ინჟექცია კომპანიის მიერ ნახევარგამტარული

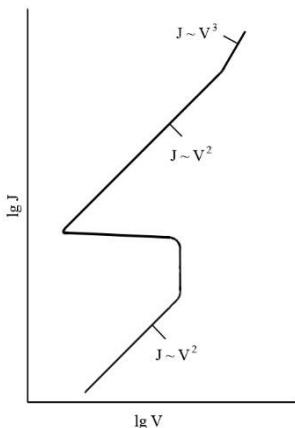
ცნობილია, რომ ორ მდგრად მდგომარეობიანი უარყოფითი დიფერენციალური წინაღობის მქონე დენიოტ კონტროლირებადი ნახევარგამტარული გადამრთველების მიღება შესაძლებელია ოთხფენიანი p-n-p-n ტირისტორების, p-i-n დიოდების და კ.წ. გრძელი დიოდების ბაზაზე, რომლებშიც გადართვის მექანიზმი ხორციელდება კონტაქტებიდან საპირისპირო ნიშნის მუხტის მატარებლების (ელექტრონების და ხერელების) ორმხრივი ინჟექციის შედეგად. ასეთი ელემენტის მთავარი მახასიათებელი არის ზღურბლური ძაბვის V_{th}

შეფარდება ნარჩენ ძაბვასთან V_H (V_{th} - ეს არის ძაბვა, რომელზეც გადამრთველი ელემენტი დიდწინადობიანი რეჟიმიდან გადადის მცირე წინადობის რეჟიმში. სასურველია, შეფარდება V_{th}/V_H იყოს დიდი.

ნაწილობრივ კომპენსირებულ ნახევარგამტარში მუხტის მატარებელთა ორმხრივი ინჟექციის შედეგად კოლტამპერულ მახასიათებელზე უარყოფითი დიფერენციალური წინადობის შემცველი უბნის გაჩენის შესაძლებლობა თეორიულად იწინასწარმეტყველა ლამპერტმა. მისი თეორიის თანახმად ზღურბლური და ნარჩენი ძაბვები პროპორციულია ელექტრონების და ხვრელების ემიტერებს შორის მანძილის კვადრატისა და მათი ჩამჭერი ცენტრების შესაბამისი მინარევების კონცენტრაციისა.

დენის გავლის მექანიზმი კომპენსირებულ ნახევარგამტარებში შესწავლილი იყო ლამპერტის მიერ. მან განიხილა სრულად კომპენსირებული ნახევარგამტარი, როცა ელექტრონების სიცოცხლის ხანგრძლივობა არსებითად უსასრულოდ დიდია. ეს ნიშნავს იმას, რომ ძალიან მცირე მოდებული ძაბვებისათვის ნიმუშში გამავალი დენი არის განპირობებული კათოდიდან ინჟექტირებული ელექტრონებით, შეზუდული მოცულობითი მუხტით და პროპორციული მოდებული ძაბვის კვადრატისა. ძაბვის გაზრდისას, ზღურბლურ მნიშვნელობამდე, რომელიც საკმარისი აღმოჩნდება იმისათვის, რომ ანოდიდან ინჟექტირებული ხვრელებიც გავიდნენ მთელ კრისტალში, ხვრელური ჩამჭერი ცენტრების ნაწილი შეივსება, რაც გამოიწვევს ხვრელების სიცოცხლის ხანგრძლივობის

გაზრდას და ელექტრონების სიცოცხლის ხანგრძლივობის შემცირებას; ასეთ პირობებში ხვრელებს უფრო იოლად შეუძლიათ გასვლა მთელ კრისტალში, მყარდება დადებითი უპუკავშირი ხვრელების ინჟექციის დონესა და მათი სიცოცხლის ხანგრძლივობის ზრდას შორის, რაც განაპირობებს უარყოფითი დიფერენციალური წინაღობის უბნის გაჩენას გოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე.



სურ.1. გოლტ-ამპერული მახასიათებელი ლამპერტის მიხედვით.

როდესაც ელექტრონებისა და ხვრელების სიცოცხლის ხანგრძლივობები ერთმანეთს გაუტოლდებიან ნიმუშში გამავალი დენი განპირობებული ორივე ტიპის მატარებლების გავლით, იქნება შეზღუდული რეკომბინაციით. ლამპერტის მიერ მიღებული იქნა, რომ დენი ძაბვების ამ უბანშიც $V > V_3$ პროპორციულია ძაბვის კვადრატისა. ხოლო როცა მოდებული ძაბვის გადიდების შედეგად ბოლოს და ბოლოს ინჟექციის სიჩქარეები გადააჭარბებენ რეკომბინაციის სიჩქარეს, დენი გახდება

ელექტრონულ-ხვრელური, შეზღუდული მოცულობითი მუხტით და პროპორციული V^3 . ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი ამ მოდელისათვის თვისობრივად მოცემულია სურ.-1-ზე.

აღმოჩნდა, რომ მაღალომიანი ნახევარგამტარის შემთხვევაში ($\rho = 10^2 - 10^9$ ომ.სმ) ომურ კონტაქტზე მოდებული ძაბვის გადიდებისას ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის წრფივობა ირდვევა, ხდება მუხტის ძირითადი მატარებლების უპირატესი გადასვლა ნახევარგამტარში, რაც იწვევს მოცულობითი მუხტის დაგროვებას ნახევარგამტარში. ამ შემთხვევაში ამბობენ, რომ გვაქვს ინჟექციური კონტაქტი[5]. თუ კონტაქტიდან ხდება მასალაში მხოლოდ ერთი ტიპის მუხტის მატარებლის (ელექტრონი ან ხვრელი) ინჟექცია მას მონოპოლური ინჟექცია პქვია, ხოლო ორმაგი ინჟექცია არის სხვადასხვა ნიშნის მუხტის მატარებლების გადასვლა მასალის მოპირდაპირე ზედაპირზე განლაგებული კონტაქტებიდან.

ნახევარგამტარში კონტაქტებიდან მუხტის მატარებელთა ორმაგი ინჟექციის შედეგად დენით კონტროლირებადი უარყოფითი დიფერენციალური წინაღობის შემცველი ს-ტიპის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის მქონე სტრუქტურის მიღებაა შესაძლებელი. ასეთია ე.წ. გრძელი დიოდი, იგი $p-n$ გადასასვლელს არ შეიცავს და მის მოპირდაპირე ზედაპირზე განლაგებულ კონტაქტებს შორის მანძილი გაცილებით მეტია მუხტის მატარებელთა დიფუზურ სიგრძეზე ამიტომ უწოდეს მას “გრძელი დიოდი”. ასეთი სტრუქტურის თეორიული ვოლტ-ამპერული

მასასიათებლის გრაფიკი ორმაგ ლოგარითმულ
მასშტაბში ნაჩვენებია სურ.1-ზე.

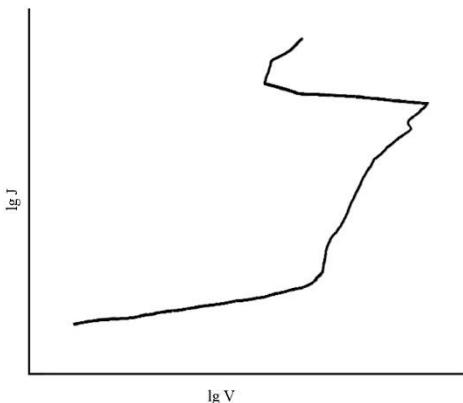
ნიმუშების დამზადების ტექნოლოგია

ექსპერიმენტში გამოყენებული იყო ჩოხრალსკის
მეთოდით გაზრდილი სპეციალურად არალეგირებული
გალიუმის ფოსფიდის ნიმუშები, რომელთა ლეგირება
ხდებოდა ერთდროულად უანგბადისა და ცინკის
დიფუზით კვარცის დახურულ ამპულაში. გამოსაკვლევი
დიოდები დამზადებული იყო დიდწინალობიან გალიუმის
ფოსფიდის მონოკრისტალებზე რომელთა განივი კვეთის
მიკროსკოპული დათვალიერებით გადასასვლელი არ იყო
დაფიქსირებული, მიახლოებით 1 mm^2 დიამეტრის
არაგამმართველი კონტაქტები მზადდებოდა ინდიუმის
შელღობით გასუფთავებული წყალბადის ატმოსფეროში
 600°C ტემპერატურაზე 5 წუთის განმავლობაში. სტოქსის
მეთოდით განსაზღვრული კუთრი $\eta = 10^8 - 10^{10} \text{ მმ.ს.მ.}$ მიღებული
ნახევარგამტარი-მეტალი ($\text{M}/\text{N}/\text{M}$), რომლის ზედაპირის
ფართი $4-5 \text{ mm}^2$ -ია მაგრდება დიოდის ორგამოსასვლელიან
სპილენძის კორპუსში. ზედა კონტაქტის მირჩილვა ხდება
ვერცხლის მავთულით. დიოდის ბოლოებზე გარკვეული
სიდიდის ძაბვის მოდებისას ნახევარგამტარულ
მასალაში ხორციელდება მუხტის მატარებელთა ორმაგი
ინჟექცია - ელექტრონებისა და ხვრელების ინჟექცია
ნახევარგამტარის საპირისპირო მხარეზე განლაგებული
არაგამმართველი კონტაქტებიდან, რომელთა შორის
მანძილი $d=150 - 200 \text{ მკ ი.}$ რადგან ასეთ სტრუქტურებში
კონტაქტურ არებს შორის მანძილი გაცილებით მეტია

მუხტის მატარებელთა დიფუზურ სიგრძეზე $L = 0.5 - 2$ მ, მათ გრძელი დონდები ეწოდებათ.

დიონდების ვოლტამპამული მახასიათებელი

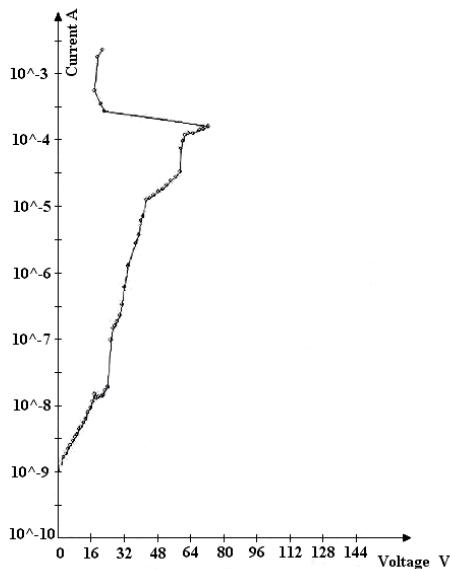
გადაღებულია დიონდების ვოლტამპერული და ფოტოსპექტრული მახასიათებლები. სურ.2-ზე ნაჩვენებია წვენის მიერ დამზადებული სტრუქტურის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გრაფიკი აგებული ნახევრად ლოგარითმულ მასშტაბში.



სურ.2. GaP-ს ბაზაზე დამზადებული გრძელი დონდის ვოლტამპერული მახასიათებელი ორმაგ ლოგარითმულ მასშტაბში.

როგორც სურათიდან ჩანს სტრუქტურების ვოლტამპერული მახასიათებელი შედგება რამდენიმე უბნისაგან, რომლებიც აღიწერებიან: ომის კანონით, კვადრატული დამოკიდებულებით ($I-V^2$), გვაქვს დენის სწრაფი ზრდის უბანი, სტრუქტურის უარყოფითი დიფუზურციალური წინადობის უბანი და კვლავ ჩნდება

ხარისხობრივი (I-V^a) დამოკიდებულება. სურ.3-ზე
ნაჩვენებია იმავე დიოდის ვოლტ ამპერული
მახასიათებელი ნახევრად ლოგარითმულ მასშტაბში.



სურ.3. GaP-ს ბაზაზე დამზადებული გრძელი დიოდის ვოლტამპერული მახასიათებელი ნახევრად ლოგარითმულ მასშტაბში.

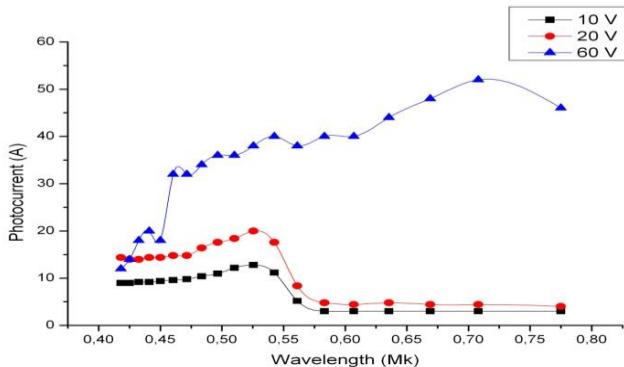
GaP ბაზაზე დამზადებული გრძელი დიოდის ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე ჩვენი აზრით პირველად დაფიქსირებული რამდენიმე კვადრატული უბნის არსებობა მიუთითებს იმაზე, რომ მოცულობითი მუხტით შეზღუდული დენი შეიძლება განპირობებული იყოს მინარევების რამდენიმე ჯგუფის არსებობით, რაც თეორიულად ნაწინასწარმეტყველები იყო ლამპერტის მიერ კომპენსირებულ ნახევარგამტარებსა და დიელექტრიკებში ინჟექციური დენების შესწავლისას.

დიოდების სამშტრული მახასიათებელი

შესწავლილი იყო დამზადებული დიოდების ფოტოსპექტრული მახასიათებელი. აღმოჩნდა, რომ კომპენსირებული GaP-ს ბაზაზე დამზადებული დიოდი ხასიათდება ორი მდგრადი მდგომარეობით, არის ფოტომგრძნიბიარე და ოთახის ტემპერატურაზე ჩართულ მდგომარეობაში ანათებს კაშკაშა მწვანედ, გადართვამდე სუსტი წითელი ან ყვითელი ნათება აქვს. ამასთან ერთად, ოთახის ტემპერატურაზე ხილული სიგნალის მართვა შესაძლებელია როგორც ელექტრული, ასევე ოპტიკური სიგნალით, ანუ შესაძლებელია განხორციელდეს სინათლის მართვა სინათლით.

ნიმუშების ვოლტამპერული და სპექტრული მახასიათებლების ერთობლივი კვლევის საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ მისი ერთი მდგრადი მდგომარეობიდან მეორეში გადართვა და უკან გადმორთვა შესაძლებელია როგორც ელექტრული ასევე ოპტიკური სიგნალით. სხვადასხვა სისქის ნიმუშებში ზღურბლური ძაბვა 20 - 60 ვ. და დენი გადართვამდე 0.038 - 0.064, ნარჩენი ძაბვა 6.5 - 2.4 ვ. და შესაბამისი დენი 0.4 - 0.6 მა. არის. ექსპერინენტებმა აჩვენეს, რომ ზღურბლოან მიახლოებული ძაბვიდან ელემენტის ჩართვა შესაძლებელი ხდება 560 ნმ ტალღით, ხოლო გამორთვა 750 ნმ ტალღით დასხივებისას.

სურ.4-ზე მოცემულია დიოდის შთანთქმის სპექტრალური მახასიათებელი გადაღებული მოდებული ძაბვის სხვადასხვა მნიშვნელობაზე ($V= 10, 20, 60\text{ვ}$).



სურ.4. დიოდის შთანთქმის სპექტრალური მახასიათებელი

ექსპერიმენტული შედეგების ანალიზი

მიღებული შედეგების ასახსნელად დავუშვათ, რომ ექსპერიმენტში გამოყენებულ ნახევარგამტარში ოპტიკურად აქტიური ცენტრები არიან ღრმა აქცეპტორები, რომელთა კონცენტრაციაა N_A , და მათი ენერგეტიკული დონე მდებარეობს 0,5 ევ ჰევით გამტარებლობის ზონიდან. ეს ღრმა აქცეპტორული დონეები ნაწილობრივ კომპენსირებული არიან წვრილი დონორებით, რომელთა კონცენტრაციაა N_D . რადგან აქცეპტორები მდებარეობენ იმდენად ღრმად, რომ მცირე აგზებად საკმარისი იმისათვის, რომ ჩაჭერილი ელექტრონები გადავიდნენ გამტარებლობის ზონაში. ვინაიდან არის აქცეპტორული დონეების ღრმა ლოკალიზაცია აკრძალული ზონის ნახევრის ზემოთ. უარყოფითად იონიზებულ აქცეპტორებს უჩნდებათ ძალიან დიდი ჩაჭერის კვეთი ჭარბი ხვრელებისათვის, მაშინ როცა ნეიტრალურ აქცეპტორულ ცენტრებს აქვთ

ბევრად პატარა ჩაჭერის კვეთი თუ ელექტრონებისათვის. ის ფაქტი, რომ აქცეპტორული დონეები წარმოადგენენ სიტუაციას სადაც თუ არის ის ძირითადი პირობა რომელიც ‘ს ტიპის დიოდების მიღების შესაძლებლობას იძლევა.

ჩვენი ნიმუშებისათვის გამოთვლილი პარამეტრების მიხედვით შეიძლება დავასკვნათ, რომ მოცულობითი მუხტით შეზღუდული დენები განპირობებულია ცენტრებით, რომელთა შესაბამისი ენერგეტიკული დონეებია 0.7 – 0.9 კ. გამტარებლობის ზონის ქვემოთ, რაც შეიძლება შეესაბამებოდეს ჟანგბადს გალიუმის ფოსფიდში. ჟანგბადი თამაშობს ძირითად როლს დიოდის ოპტიკური ჩართვის მექანიზმი. ჟანგბადი გალიუმის ფოსფიდში არის დრმა დონორი, მაგრამ ის შეიძლება იყოს ერთხელ იონიზირებული, ორჯერ იონიზირებული, მას შეუძლია შექმნას მოლეკულური კომპლექსური ცენტრი II ჯგუფის მეტალთან.

ერთობლივი კალეგის საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ ოპტიკური გადართვის მექანიზმი განპირობებულია კომპენსირებულ ნახევარგამტარში მუხტის მატარებლების სხვადასხვა ჩაჭერის კვეთის მქონე ცენტრების ერთობლივი არსებობით გამოწვეული არაწრფივი პროცესით.

ნიმუშების ვოლტამპერული და სპექტრული მახასიათებლების ერთობლივი კვლევის საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ ოპტიკური გადართვის მექანიზმი განპირობებულია ნახევარგამტარში მუხტის მატარებლების სხვადასხვა ჩაჭერის კვეთის მქონე

ცენტრების ერთობლივი არსებობით გამოწვეული არაწრფივი პროსებით.

ვთქვათ ჩვენ ნიმუშებში აქტიური ცენტრებია დრმა დონორები. ეს დრმა დონორული დონეების შესაბამოსი ჟანგბადის ატომები ნაწილობრივ კომპენსირებული არიან წვრილი აქცეპტორებით NA კონცენტრაციის ცინკით. რადგან დონორები მდებარეობენ იმდენად დრმად, რომ საკმარისია მცირე აგზება იმისათვის რომ ჩაჭერილი ხვრელები გადავიდნენ სავალენტო ზონაში. დადებითად იონიზებულ დონორებს უნდებათ ძალიან დიდი ჩაჭერის კვეთი ჭარბი ელექტრონებისათვის მაშინ როცა ნეიტრალურ დონორულ ცენტრებს აქვთ ბევრად პატარა ჩაჭერის კვეთი ს ხვრელებისათვის. ის ფაქტი რომ დონორული დონეები წარმოადგენენ სიტუაციას სადაც σთ>σ_h არის ის ძირითადი პირობა, რომელიც იძლევა ‘S ტიპის დიოდების მიღების შესაძლებლობას.

ჩვენი ნიმუშებისათვის გამოთვლილი პარამეტრების მიხედვით შეიძლება დავასკვნათ, რომ მოცულობითი მუხტით შეზღუდული დენები განკირობებულია ცენტრებით, რომელთა შესაბამისი ენერგეტიკული დონეებია 0.7 – 0.9 ევ. გამტარებლობის ზონის ქვემოთ. გალიუმის ფოსფიდში დრმა დონეების მრავალრიცხოვანი კვლევებიდან ჩანს, რომ ასეთი ცენტრების შექმნა ნახევარგამტარულ მასალაში შესაძლებელია სპილენძის, ქრომის, ჟანგბადისა და მათთან დაკავშირებილი მინარევული კომპლექსებით [13], რომელთა ცალსახა იდენტიფიკაციისათვის საჭიროა დამატებითი კვლევების წარმოება. ჟანგბადი გალიუმის ფოსფიდში არის დრმა დონორი, მაგრამ ის შეიძლება

იყოს ელექტრულად ნეიტრალური, ერთხელ იონიზირებული ან ორჯერ იონიზირებული, მას შეუძლია შექმნას მოლეკულური კომპლექსური ცენტრი II ჯგუფის მეტალთან, ამიტომ სურათი შეიძლება იყოს ძალიან როგორი.

ამრიგად, ინჟექციის დაბალი დონიდან მაღალ დონემდე შეცვლისას ხვრელების სიცოცხლის ხანგრძლივობა გაიზრდება $\frac{\tau_p}{\tau_n}$ ჯერ, ანუ ზუსტად $\frac{\langle v\sigma_{p_f} \rangle}{\langle v\sigma_n \rangle}$

ჯერ. ლამპერტის თეორიის თანახმად ნარჩენი, ანუ მინიმალური ძაბვის (V_g) გაზომვით შესაძლებელია გამოითვალის ეფექტური პვერი (σ^0), საიდანაც ნეიტრალური მინარევული ცენტრები ახდენენ ელექტრონების ჩაჭერას. ანალოგიურად გარღვევის ძაბვის გაზომვით შეიძლება მიღებულ იქნეს ეფექტური პვერის მნიშვნელობა (σ_p^-), საიდანაც ერთჯერ უარყოფითად დამუხტებულ მინარევულ ცენტრებს შეუძლიათ ხვრელის ჩაჭერა.

დასპენა

მაღალომიან ნაწილობრივ კომპენსირებულ გალიუმის ფოსფიდზე მიღებული უარყოფითი წინადობის შემცველი შ-ტიპის ვოლტამპერული მახასიათებლის მქონე სტრუქტურების ვოლტ-ამპერული და ფოტოსპექტრული მახასიათებლის ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები გიჩვენებენ, რომ ვოლტ-ამპერული

მახასიათებელი გარგად აღიწერება ლამპერტის
მოდელით.

ლიტერატურა

1. Lampert M.A., Rose A., Transient Behavior of the Ohmic Contact Phys. Rev., 113, 1236 (1959)
2. Lampert M.A, "Injection Current in Insulators", proc. IRE, v. 50, p.p. 1781-1795, 1962.
3. Electrical Spin Injection and Transport in Semiconductor Spinotronic Devices B.T. Jonker, S.C. Erwin , A.Petrov and A.G. Petuchov. MRS Bulletin The New Era of Spintronics, 740 – 747, october 2003.
4. Lampert M.A and. Mark P, Current Injection in Solids, Academic Press, New York, 1970.
5. Ashley K.L and Milnes A.G. "Double injection in deep lying impurity in semiconductors". J. Appl. Phys.lett.2, p.71 (1963), vol. 35, p.p. 369-374, Feb. 1964
6. Barnett A. M. "Current Filaments in Semiconductors" IBM J.RES. DEVELOP. pp.522-528. Sept.1969.
7. Roy Clarke. Quantum Filament Technologies. Spin-aut target flat panel displais Opto Lasaeer Europe Magazine, 10 may, 2005.
8. Laperashvili T.A., Kaldani N.R., Laperashvili D.I. Optoelectronic Switch Device Based on GaP" , Georgian Engineering News, N 3, 2006, 67-70.

ომშრი პონტაპტები III-V ჯგუფის ნახევარბაზტარებაზე

თინათინ ლაფერაშვილი, ორესტ კვიციანი

შესაბამისი

III-V ჯგუფის ნახევარგამტარების ბაზაზე შექმნილი ტექნიკური მოწყობილობებისადმი (სინათლის გამომსხივებელი დიოდები – LED, ფოტომიმღებები, ინჟექციური ლაზერები, ელექტრომაგნიტური სიგნალის დამტკიცებელი და სხვა) ინტერესის გაზრდამ გამოიწვია ამ ნახევარგამტარებზე მცირეწინაღობიანი ომური კონტაქტების მიღებასთან დაკავშირებული მეცნიერული კვლევის გააქტიურება. ლითონისა და ნახევარგამტარის ომური კონტაქტის შესახებ არსებული ინფორმაციის [1 – 11] ანალიზი ცხადყოფს, რომ რეალური კონტაქტების კვლევების შედეგად მიღებულ მონაცემები ზოგჯერ ეწინააღმდეგება ომური კონტაქტების თეორიული მოდელის მიხედვით მოსალოდნებულ შედეგს. საკითხს ართულებს ლითონისა და ნახევარგამტარის კონტაქტზე მიმდინარე ქიმიური, ფიზიკური და მეტალურგიული პროცესების მრავალფეროვნება, რომელთა გათვალისწინება თეორიული მოდელის შექმნისას ვერ ხერხდება. ამის გარდა, თანამედროვე ტექნოლოგიის განვითარებამ წარმოქმნა ახალი პრობლემები, კერძოდ ნანოტექნოლოგია იყენებს ისეთ სტრუქტურებს, რომელთა გეომეტრული პარამეტრები ნანომეტრის ზომისაა, ხოლო მათი ფუნქციონირებისათვის აუცილებელი ომური კონტაქტების რეალური ზომები – გაცილებით დიდი (მიკრომეტრი) და ამ პრობლემის დასაძლევად –

ნანოტექნოლოგიის აქტიური ელემენტებისა და მათი ომური კონტაქტების ზომების შესაბამისობაში მოსაყვანად მკვლევრებისაგან ჯერ კიდევ დიდი მეცნიერული სამუშაოა ჩასატარებელი.

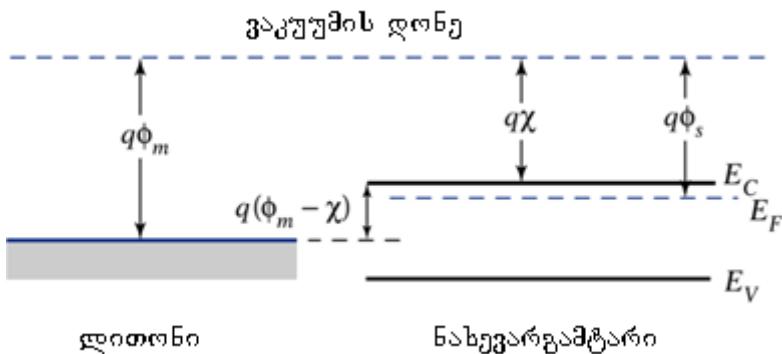
ომური კონტაქტის ვორმირების ფიზიკური
საჰუმანოსტი

ლითონისა და ნახევარგამტარის (ლ-ნ) ომური კონტაქტი არის ნახევარგამტარული სქემის ან მოწყობილობის ელემენტი, რომელიც უზრუნველყოფს დენის გავლას წრედში და არ ცვლის აქტიური ელემენტების მუშაობის პრინციპს. ლითონისა და ნახევარგამტარის კონტაქტს ეწოდება ომური, თუ მისი ვოლტამპერული მახასიათებელი არის წრფივი და ის სიმეტრიულია მასზე მოდებული ძაბვის პოლარობის მიმართ. ამასთან, კონტაქტის წინაღობა გაცილებით ნაკლები უნდა იყოს ნახევარგამტარული მოწყობილობის წინაღობაზე.

განვიხილოთ კონტაქტის ფორმირების პროცესი ლითონისა და ნახევარგამტარის საზღვარზე. ნახ.1-ზე მოცემულია ლითონისა და n – ტიპის ნახევარგამტარის ენერგეტიკული დიაგრამები, როცა ისინი ერთმანეთისაგან იზოლირებული არიან (ერთმანეთს არ ეხებიან).

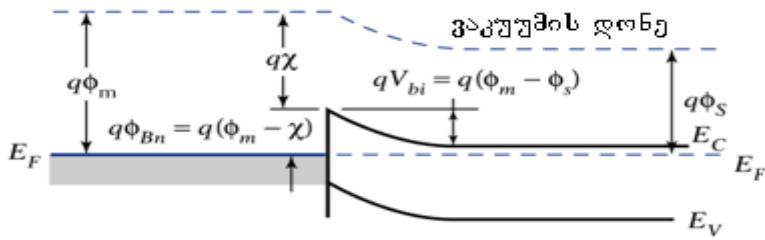
ნებისმიერი ლითონი ხასიათდება ლითონიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობით (Φ_m), რომელიც ლითონში ფერმის დონეზე მყოფი ელექტრონის ვაკუუმის დონეზე გადასაყვანად საჭირო ენერგიაა. ნახევარგამტარის გამტარობის ზონის მინიმუმისა (E_c) და

სავალენტო ზონის მაქსიმუმის (E_v) მდებარეობა ენერგეტიკულ დიაგრამაზე განისაზღვრება ნახევარგამტარის ელექტროუარყოფითობით (χ), აკრძალული ზონის სიგანითა (E_g) და ნახევარგამტარში ელექტრონის ელექტროსტატიკური ენერგიით ($q\phi_s$), სადაც q ელექტრონის მუხტი, ხოლო ϕ_s ნახევარგამტარიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობაა, რომელიც ნახევარგამტარში ფერმის დონეზე მყოფი ელექტრონის გაკუუმის დონეზე გადასაყვანად არის საჭირო.



ნახ.1. ლითონისა და n – ტიპის ნახევარგამტარის ენერგეტიკული დიაგრამა

განვიხილოთ ლ-ნ კონტაქტზე მიმდინარე ფიზიკური პროცესები ლითონისა და n-ტიპის ნახევარგამტარის უშუალო შეხებისას. ამ შემთხვევისთვის ლითონისა და n-ტიპის ნახევარგამტარის კონტაქტის ენერგეტიკული დიაგრამა ნაჩვენებია მე-2 ნახაზზე.



ნახ.2. ლითონისა და n - ტიპის ნახევარბამტარის პონტაქტის ენერგეტიკული დიაგრამა.

თუ ნახევარგამტარიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობა (ϕ_s) ნაკლებია ლითონიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობაზე (ϕ_m), როგორც ნახ.2-ზეა წარმოდგენილი, ნახევარგამტარიდან ლითონში გადასული ელექტრონების ნაკადი მეტი აღმოჩნდება ლითონიდან ნახევარგამტარში გადასული ელექტრონების ნაკადზე, რის შედეგადაც ნახევარგამტარი დაიმუხტება დადებითად, ხოლო ლითონი უარყოფითად. ეს გამყოფ ზედაპირზე წარმოქმნის ელექტრულ ველს, რომელიც მიმართულია ნახევარგამტარიდან ლითონისაკენ და არ უშლის ხელს ელექტრონების გადასვლას ლითონიდან ნახევარგამტარში, ხოლო ნახევარგამტარიდან გამოსული ელექტრონებისათვის კი წარმოადგენს გარკვეულ პოტენციალურ ბარიერს.

შოტკის თეორიის [1-3] თანახმად ლითონისა და n-ტიპის ნახევარგამტარის გამყოფ საზღვარზე ფორმირებული პოტენციალური ბარიერის სიმაღლე (Φ_B) გამოითვლება ფორმულით:

$$\Phi_B = \phi_m - \chi$$

n-ტიპის ნახევარგამტარის შემთხვევაში, თუ

$$\phi_m > \chi$$

მაშინ მიიღება გამმართველი კონტაქტი, ხოლო, თუ

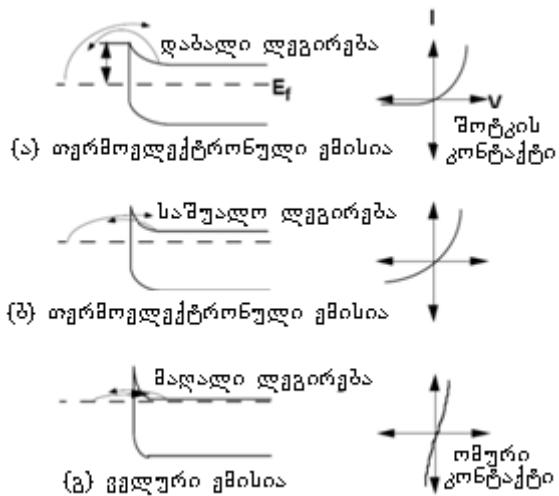
$$\phi_m < \chi$$

მიიღება ომური კონტაქტი.

მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტებით არის დადასტურებული, რომ ლითონისა და III-V ჯგუფის ნახევარგამტარის რეალური სისტემების უმრავლესობისათვის კონტაქტი გამმართველია და იმის მიხედვით, თუ როგორია ნახევარგამტარში მინარევების კონცენტრაცია, კონტაქტში გამავალ დენს განაპირობებს დენის გავლის სხვადასხვა მექანიზმი:

- 1) მცირედლეგირებული ნახევარგამტარების შემთხვევაში თერმოელექტრონული ემისია (ნახ.3ა),
- 2) საშუალოდ ლეგირებული ნახევარგამტარებისთვის თერმოველური ემისია (ნახ.3-ბ),
- 3) ძლიერად ლეგირებული ნახევარგამტარებისათვის – გელური ემისია (ნახ.3-გ).

სურ.3-ზე ისიც არის ნაჩვენები, რომ 1) შემთხვევაში მიიღება გამმართველი კონტაქტი, ხოლო 3) შემთხვევაში – ომური.



ნახ.3. დენის გავლის მექანიზმი ლითონისა და ნახევარგამტარის კონტაქტში.

ომური კონტაქტების ფორმირების შესახებ თეორიიდან გამომდინარეობს, რომ კონკრეტულ ნახევარგამტაზე ომური კონტაქტების მისაღებად საჭიროა ისეთი ლითონის შერჩევა, რომლის გამოსვლის მუშაობა უნდა იყოს ნაკლები ელექტრონის გამოსვლის მუშაობაზე უ-ტიპის ნახევარგამტარის შემთხვევაში და მეტი წ-ტიპის ნახევარგამტარის შემთხვევაში. რეალურად ამ პირობების დამაკმაყოფილებელი კომბინაცია მცირეა და მაშინაც კი, როცა ასეთი წყვილები მოიძებნება ლ-ნ გადასასვლელზე ფორმირებული პოტენციალური ბარიერის სიმაღლე ხშირად ნაკლებად არის დამოკიდებული ლითონის გვარობაზე და ძირითადად

განპირობებულია ნახევარგამტარის ზედაპირზე
არსებული ზედაპირული მდგომარეობებით.

ომური კონტაქტების მიღების მეთოდები

ნახევარგამტარზე ომურ კონტაქტთან მიახლოებული თვისებების მქონე კონტაქტის მისაღებად გამოყენებული ლითონი უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ ძირითად მოთხოვნებს: ნახევარგამტარში უნდა ზრდიდეს დენის ძირითად მატარებელთა კონცენტრაციას ან იყოს ნეიტრალური, უნდა იყოს ურთიერთგახსნადი ნახევარგამტართნ, ჰქონდეს ნახევარგამტართან შედარებით დაბალი დნობის ტემპერატურა ან ჰქმნიდეს აღვილადნობად ევტექტიკას, დნობის ტემპერატურაზე სასიათდებოდეს ორთქლის დაბალი წნევით, ჰქონდეს მაღალი სითბო და ელექტროგამტარებლობა, ლითონის წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი ახლოს უნდა იყოს ნახევარგამტარის წრფივი გაფართოების კოეფიციენტან, რათა კონტაქტზე არ შეიქმნას მექანიკური დაძაბულობა და არ გაჩნდეს ბზარები. მექანიკურად მდგრადი კონტაქტის მისაღებად საჭიროა ლითონის ნახევარგამტარის ზედაპირთან ჰქონდეს კარგი ადგეზია და ნახევარგამტარული ხელსაწყოს მუშაობის პირობებში არ უნდა ხდებოდეს ფაზური გარდაქმნა.

პრაქტიკაში ომური კონტაქტების მიღების რამდენიმე ფართოდ გავრცელებული მეთოდი არსებობს. მათგან ყველაზე პოპულარულია ნახევარგამტარის ზედაპირზე მაღალლეგირებული n^+ და p^+ -ტიპის ფენების შექმნა შესაბამისად, n და p -ტიპის ნახევარგამტარებისათვის. როცა n^+ და p^+ -ფენაში მატარებელთა

კონცენტრაცია იმდენად დიდია, რომ მ-ნ კონტაქტზე მაღალი პოტენციალური ბარიერის არსებობის შემთხვევაშიც კი ბარიერის სიგანე ანუ მოცულობითი მუხტის სისქე ისეთი მცირეა, რომ შესაძლებელი ხდება მასში მატარებელთა ქვანტურ მექანიკური ტუნელირება, მაშინ ბარიერში დენის სვლის მექანიზმი განისაზღვრება ველური ემისით და მიიღება კონტაქტი ომური მახასიათებლით. ასეთი დიდადლეგირებული ფენა შეიძლება შეიქმნას წინასწარ (ლითონით დაფარვამდე) ან ლითონის (ლითონური შენადნობების) დაფენისა და მისი შემდგომი თერმოდამუშავების პროცესში.

მეორე მეორდად შეიძლება ჩაითვალოს შემთხვევა, როცა კონტაქტზე პოტენციალური ბარიერი არ არის ან მისი სიმაღლე უმნიშვნელო ხდება. თუ ამის მიღწევა ლითონის შერჩევით არ ხერხდება, საჭიროა ნახევარგამტარის ზედაპირული ფენის ლეგირება ისეთი მინარევებით, რომლებიც ელექტრონულ მდგომარეობებს ჰქმნიან ნახევარგამტარის აკრძალულ ზონაში გამტარებლობის ზონის ფსკერის ან სავალენტო ზონის ზედა საზღვრის მახლობლად, შესაბამისად ი და p-ტიპის ნახევარგამტარებისათვის. ამ შემთხვევაში ფერმის ენერგიის მიბმა (pinning) ხდება და ეს უკანასკნელი განსაზღვრავს პოტენციალური ბარიერის სიდიდეს.

ომური კონტაქტი მიიღება ნახევარგამტარზე ლითონის დაფენისა და შემდგომი თერმოდამუშავების პროცესში ნახევარგამტარის ზდაპირზე ამორფული ან ძლიერ მოუწესრიგებელი ფენის შექმნის გზით. ეს ფენა ჩნდება სასაზღვრო არეში (interface) საკონტაქტო

მასალების შერევის შედეგად მათი კრისტალური მესერის პარამეტრებს შორის დიდი სხვაობის არსებობის დროს.

ომური კონტაქტის მიღება შეიძლება აგრეთვე, ნახევარგამტარის ზედაპირის მიმდებარე ფენაში ისეთი დეფექტების შექმნით, რომლებიც წარმოადგენს რეკომბინაციულ ცენტრებს. თუ მათი სიმკვრივე საკმაოდ დიდია, ლ-ნ კონტაქტში გამავალ დენში მადომინირებელი ხდება რეკომბინაციული დენი და ასეთი კონტაქტის ვოლტამპერული მახასიათებელი ომურია.

ნახევარგამტარზე მცირეწინადობიანი დაბალომიანი ომური კონტაქტის მისაღებად ნახევარგამტარის ზედაპირზე ზრდიან ზედაპირის შართობული მიმართულებით ცვლადი აკრძალული ზონის მქონე (ე.წ. ვარიზონულ) ნახევარგამტარს. ასეთ ნახევარგამტარში ელექტრონის გამოსვლის მუშაობა კოორდინატის ფუნქციაა. ნახევარგამტარის ზედაპირზე შექმნილი შუალედური კონტაქტური ვარიზონული მასალის სათანადო შერჩევით შესაძლებელი ხდება ლ-ნ კონტაქტზე მკვეთრი ბარიერის მთლიანად მოშლა ან შემცირება იმ დონეზე, რომ ელექტრონების გადასვლა ბარიერზე შესაძლებელი გახდეს თერმოელექტრონული ემისიის მექანიზმით.

კონტაქტური ჭინაღობის გაზომვა

ომური კონტაქტის კონტაქტური წინადობის გასაზომად ამზადებენ სპეციალური კონფიგურაციის ომურ კონტაქტებს.

ხშირად იყენებენ დერძული სიმეტრიით ნახევარგამტარის წინა და უკანა მხარეს [1] ან ერთიდაიმავე ზედაპირზე [2] დამზადებულ კონტაქტებს, ეს უკანასკნელი საჭიროებს ნახევარგამტარის ზედაპირზე გამტარი ფირის მეზასტრუქტურის შექმნას [3]. ნახევარგამტარულ ფირფიტაზე მოთავსებული ორი ომური კონტაქტის შემცველი სტრუქტურის მთლიანი წინააღმდეგობა შეიძლება წარმოდგენილი იქნას შემდეგი ფორმულით [4]

$$R=R_c+R_{\text{system}}+R_m+R_p$$

საღაც R_c არის ომური კონტაქტის კონტაქტური წინააღმდეგობა, R_{system} -რეალური კონტაქტის კონფიგურაციით განპირობებული გაბნევის წინაღობა, R_m კონტაქტებს შორის მოქცეული მასალის მიმდევრობითი წინაღობა, R_p -ზონდირებით გამოწვეული წინაღობა.

ომური კონტაქტის კონტაქტური წინააღმდეგობის გაზომვის უმარტივესი მეთოდის მიხედვით ნახევარგამტარს ორივე მხარეს უკეთდება ბრტყელი პლანარული კონტაქტები დერძული სიმეტრიით. მთლიანი სისტემის ლითონი-ნახევარგამტარი-ლითონი (ლ-ნ-ლ) ვოლტამპერული მახასიათებელ ნახევარგამტარის კუთრი წინაღობა, t -ფირფიტის სისქეა, მაშინ (ლ-ნ-ლ) სისტემის საერთო წინაღობა გამოითვლება ფორმულით:

$$R=\rho t/A+2R_c/A,$$

თუ აგილებთ სხვადასხვა სისქის ნიმუშებს და ავაგებთ RA -ს ფუნქციონალურ დამოკიდებულებას t -სგან

შეიძლება გრაფიკულად განისაზღვროს ρ -ს და R_c -ს მნიშვნელობები.

კონტაქტური წინადობის გამოსათვლელად ყველაზე ხშირად იყენებენ მეთოდს [1], რომელიც ეფუძნება ლ-ნ-ლ სისტემის გაზომილ საერთო წინადობის კონტაქტის ფართობისაგან დამოკიდებულების განსაზღვრას. ამ მეთოდის ორიგინალურ ვერსიაში ნ/გ-ის უკანა ზედაპირზე უკეთდება ერთიანი ბრტყელი ომური კონტაქტი, ხოლო წინა ზედაპირზე სხვა და სხვა დიამეტრის კონტაქტები. კონტაქტური წინადმდეგობა მიიღება მ-ნ/გ-მ სისტემის გაზომილი საერთო წინააღმდეგობის ნახევარგამტარული ფირის სისქის კონტაქტის ფართობთან დამოკიდებულების გრაფიკიდან, თუ ნახევარგამტარის კუთრი წინააღმდეგობა ცნობილია. ამ მეთოდის გამოყენების პირობაა დენის თანაბარი განაწილება მთელ კონტაქტზე. კონტაქტური წინადობა იზომება ბრტყელ კონტაქტსა და მის მართობულად თანაბრად დაშორებულ სხვა და სხვა ფართობის კონტაქტებს შორის. გაზომილი წინადგობა გამოისახება ფორმულით

$$R=R_p+\rho(B/2d)+4R_c/d^2$$

სადაც R_p -ზონდით განპირობებული წინადობაა, რომელიც არ არის დამოკიდებული კონტაქტის დიამეტრზე, მეორე წევრი - კონტაქტის კონფიგურაციით განპირობებული წინადობა რომელიც პირდაპირპროპორციულია ნ/გ-ის კუთრი წინადობისა (ρ) და იცვლება $1/d$ - დამოკიდებულებით, B პროპორციულობის კოეფიციენტია

$$B=2/\operatorname{Arctan}4/(d/c)$$

[2]-ის თანახმად d -ს შევარჩევა შეიძლება ისე ($d < t$), რომ B ჩაითვალოს 1-ის ტოლად. მესამე წევრის მნიშვნელობა იცვლება $1/d^2$ -ის პროპორციულად და მისი საშუალებით გამოითვლება კონტაქტის კუთრი წინააღმდეგობა. თუ უპანა მხარეს კონტაქტის წინააღობა მცირება, მას უკუაგდებენ. ამ მეთოდის მოდიფიკაციაა კერამიდას მიერ წარმოადგენილი მეთოდი[6], რომელიც იყენებს [1] პროცედურას, მაგრამ წინააღობის გაზომვა ხდება ნახევარგამტარული ფირფიტის ერთ ზედაპირზე განლაგებულ კონტაქტებს შორის. ამ მეთოდის უპირატესობა ის არის, რომ საჭიროებს მეტალიზაციის მხოლოდ ერთ პროცესს და მისი გამოყენება შეიძლება თხელი ფირების შემთხვევაში. ამ ვერსიაში b/d ფირფიტის ერთოდამავე ზედაპირზე ერთმანეთიდან S მანძილზე განლაგდება სხვადასხვა დიამეტრის მრავალი წრიული კონტაქტი. იზომება წინააღობა ორ უახლოეს კონტაქტს შორის და აიგება $R(S,d)$ მრუდების ოჯახი. S კონტაქტებს შორის მანძილია, d -კონტაქტის დიამეტრი. აიგება $R(S)$ დამოკიდებულება და ხდება მისი ინტერპოლაცია ნულზე. თუ კონტაქტის კონფიგურაციით განპირობებული Rs წინააღობა ცნობილია, კონტაქტური წინააღობა განისაზღვრება გრაფიკულად $1/d^2$ -ზე დამოკიდებულებიდან.

როგორც ზემოთ ავლიშნეთ, მეთოდი, რომელიც დაფუძნებულია ერთგანზომილებიანი წრფივი ტრანსმისიის მოდელზე საჭიროებს მაღალომიან ფუძეშრეზე გამტარი ფირის მეზასტრუქტურის შექმნას. თუ კონტაქტის წინააღობა გაცილებით დიდია ნიმუშის მოცულობით წინააღმდეგობასთან შედარებით, მისი

განსაზღვრა ადგილია ვოლტამპერული მახასიათებლიდან მცირე ძაბვების ($U < 10\text{mV}$) მოდებისას. თუ კონტაქტური წინააღმდეგობა მოცულობითი წინააღმდეგობის თანაზომადია -- გამოიყება შოკლის მეთოდი [4], რომლის თანახმად p -ტიპის ფუძეშრეზე ჯერ დააფენენ თ-ტიპის თხელ ფენას, შემდეგ ხდება ვიწრო საფეხურების იზოლირება მოწამვლით და დაეფინება ლითონის თხელი ფენა (სურ.1). ორი ზონდი გამოიყენება დენის გასატარებლად ზოლის გასწვრივ, ხოლო სხვა ორ ზონდზე მოდებულია ძაბვა. ორ წერტილს შორის ძაბვის ვარდნის წერტილებს შორის მანძილზე ფუნქციონალური დამოკიდებულება იძლევა L_p წრფივი გადაცემის სიგრძეს, როგორც ეს ნაჩვენებია სურ.1გ-ზე. კონტაქტური წინააღმდეგობა განისაზღვრება ფორმულით

$$R_c = \rho L^2$$

ρ -დაფენილი თხელი ნახევარგამტარული ფირის კუთრი წინაღობაა, რომლის განსაზღვრა ექსპერიმენტში შეიძლება მაგალითად ვან-დერ-პოს მეთოდით.

კონტაქტური წინაღობის გაზომვის ოთხზონდიანი მეთოდის [1] მიხედვით გამოსაკვლევი სტრუქტურა წარმოადგენს უსასრულოდ მცირე სისქის ნახევარგამტარულ ზედაპირზე ერთი სწორი ხაზის გასწვრივ განლაგებულ ოთხ იდენტურ ექვიდისტანციურ წრიულ კონტაქტს, რომლისთვისაც შესრულებული უნდა იყოს პირობები $d \ll S$ და $t \ll S$. d -არის კონტაქტის დიამეტრი S არის მანძილი კონტაქტებს შორის, t - ნახევარგამტარული ფენის სისქეა. ამ მეთოდის ორიგინალურ ვერსიაში [7] (1) ფორმულაში R_s და R_p წევრები უგულებელყოფილია და

კონტაქტური წინააღმდეგობა განსაზღვრულია განცვლებით:

$$SR_c = R - R_m = U_{bc}^* / I_{bd} - U_{bc} / I_{ad}$$

ძაბვის ვარდნა U_{bc} და U_{bc}^* იზომება b და c ზონდებს შორის, როცა დენი I_{bd} და I_{ad} გადის b, d და a, d ზონდებს შორის შესაბამისად. ეს მეთოდი ხშირად გამოიყენება თხელფიროვანი სტრუქტურების შემთხვევაში და გადამუშავებული იყო რიგი ავტორების მიერ [1,8,9]. [1]-ის მიხედვით

$$R_c = R - R_m - R_{\text{system}} = U_{bc}^* / I_{bd} - U_{bc} / I_{ad} F_1 - R_s F_2$$

სადაც

$$F_1 = \ln(4S/A) / 2\ln 2$$

$$F_2 = \sum Y^m / 2^{2m} (m!) 2^{\sum Y^m / m + 1} (m!) 2^{2m} - 1$$

$$Y = pd^2 / 4R_c Aw$$

აქ A-კონტაქტის ფართობია, R-გაზომილი წინააღმობაა, p-კონტაქტებს შორის მოქცეული ნახევარგამტარის კუთრი წინააღმობა, R_s არის გაბნევის წინააღმობა, F_1 არის ფაქტორი, რომელიც განპირობებულია პოტენციალის გადანა-წილებით ზედაპირულ ფენაში, F_2 არის კორელაციის ფაქტორი R_s წინააღმდეგობისათვის. ითვლება, რომ ზონდით განპირობებული წინააღმდეგობა უმნიშვნელოა.

უნდა ავდნიშნოთ, რომ $10^{-5} \text{მმსმ}^2 \cdot \text{წე}$ ნაკლები წინააღმობის გასაზომად ყველა ექსპერიმენტული მეთოდი არაზუსტია, რადგან ლითონის კუთრი წინააღმობა პრაქტიკულად ამავე განზომილებისაა.

პრაქტიკული ობური კონტაქტები

A^3B^5 ჯგუფის ნახევარგამტარებზე (GaAs, GaP) ომური კონტაქტის მისაღებად ხშირად გამოყენება ლითონური ნარევი, რომელიც შეიცავს 88% ოქროს, 12% გერმანიუმს და 5 წონით პროცენტ ნიკელს [1]. მრავალ ნახევარგამტარზე ომური კონტაქტის მიღება შეიძლება, აგრეთვე, ინდიუმის გამოყენებითაც [2]. წინამდებარე შრომაში აღწერილია გალიუმის ფოსფიდზე In, In(Te2%), In(Zn10%) და In(Ga) მეტალურგიული ნარევების გამოყენებით ომური კონტაქტების დამზადების ტექნოლოგია და წარმოდგენილია კონტაქტური წინადობის გამოთვლის შედეგები. შესწავლილია ლითონისა და ნახევარგამტარის კონტაქტში დენის გავლის მექანიზმების ცვლა თერმოდამუშავების რეჟიმის ცვლილების შედეგად. საკონტაქტო მასალად ექსპერიმენტში გამოყენებული იყო უ-ტიპის სპეციალურად არალეგირებული გალიუმის ფოსფიდის მონოკრისტალური ფირფიტები (111) კრისტალური ორიენტაციით და $5 \cdot 10^{16}$ სმ $^{-3}$ კონცენტრაციით. ფირფიტების საწყისი სისქე 250-300 მკ იყო. ფირფიტებს კვრიდით 5x5 მმ 2 ზომის ნაწილებად, მექანიკურად გშლიფით M3 და M7 მიკროფენილების გამოყენებით, ვაპრიალებდით AM-1 ემულსიით, ვრეცხავდით დიქლორეთანში და აცეტონში რამდენჯერმე წამოდუღებით. შემდეგ ვწამლავდით სამეფო წყალში, ვრეცხავდით დისტილირებულ წყალში და ვაშრობდით ფილტრის ქაღალდით. ნიმუშის სისქეს ვზომავდით მიკრომეტრის საშუალებით ან თხელი ფირფიტებისათვის MUU-4 მიკროსკოპის გამოყენებით. ამის შემდეგ ზედაპირს

ვასუფთავებდით სპირტით და ვუკეთებდით 4-6 მცირე ზომის წერტილოვან კონტაქტს განსაკუთრებულად სუფთა ინდიუმის შედნობით გასუფთავებული წყალბადის ატმოსფეროში 600°C -ზე 3-5 წუთის განმავლობაში.

დამზადებული კონტაქტების ომურობას გამოწმებდოთ ოსცილოგრაფზე. თუ ვოლტამპერული მახასიათებელი იყო წრფივი და სიმეტრიული, კონტაქტები ომური იყო და ვახდებდით გაზომვებს ვან დერ პოს დანადგარზე და ვითვლიდით ნახევარგამტარული მასალის პარამეტრებს (კუთრი წინააღმდეგობა, კონცენტრაცია და ძვრადობა)

საკონტაქტო მასალად გამოყენებული იყო განსაკუთრებით სუფთა ლითონები: ინდიუმი, თუთია და ტელური. ლითონური შენადნობები დამზადებული იყო დახურულ ამპულაში $10^{-4}\text{-}10^{-5}$ პა ვაკუუმის პირობებში, $800\text{-}850^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე ერთი საათის განმავლობაში თერმოდამუშავების შედეგად. ნახევარგამტარულ ნიმუშს ერთი მხრიდან ვუკეთებდით ბრტყელ კონტაქტს, ხოლო მეორე ზედაპირზე სტანდარტული საჭრელით მოჭრილ $1.2\text{-}1.3$ სმ დიამეტრის მქონე წრიულ კონტაქტს. ლითონის კონტაქტის შელდობა ნახევარგამტართან ხდებოდა გრაფიტის კასეტაში, გაწმენდილი აზოტის ატმოსფეროში 5 წუთის განმავლობაში. კონტაქტებს ერჩილებოდა ნიკელის მავთული. ვრეცხავდით განზავებულ მარილმჟავაში, შემდეგ დისტილირებულ წყალში.

სტრუქტურის ვოლტამპერულ მახასიათებელს გზომავდით მუდმივი დენის პირობებში, ოთახის ტემპერატურაზე. ვოლტამპერული მახასიათებლის ტიპიური გრაფიკი მოცემულია სურ.4-ზე. საიდანაც ჩანს, რომ მიღებული კონტაქტები არის ომური.

ვოლტამპერული მახასიათებლიდან განისაზღვრება სისტემის კონტაქტი-ნახევარგამტარი-კონტაქტი საერთო წინააღმდეგობა R_t , ხოლო ომური კონტაქტის კონტაქტური წინააღმდეგობა R_c გამოითვლება როგორც ნახევარსხვაობა გაზომილ R_t წინააღმდეგობასა და კონტაქტებს შორის მოქცეულ მასალის R_s წინააღმდეგობას შორის ფორმულით

$$R_c=1/2(R_t - R_s)$$

სადაც $R_s = \rho d/S$, S არის კონტაქტის ფართობი, ρ ნახევარგამტარის კუთრი წინააღმდეგობა, d ნახევარგამტარული ფირფიტის სისქეა. კონტაქტის წინადობა დაიყვანება ფართობის ერთეულზე. აღმოჩნდა, რომ კონტაქტური წინადობა $\rho=0.2$ ომ/სმ კუთრი წინააღმდის მქონე გალიუმის ფოსფიდზე In(Te2%) შენადნობის გამოყენება იძლევა $3,2 \cdot 10^{-4}$ ომსმ² კონტაქტურ წინადობას და In(Zn10%)-ისა $3,2 \cdot 10^{-3}$ ომსმ²-ს. გამოვლის შედეგებმა გვიჩვენა, რომ ზომიერად ლეგირებული ნახევარგამტარებისათვის კონტაქტური წინადობა მნიშვნელოვნად არ არის დამოკიდებული საკონტაქტო ლითონში დამატებული მინარევის გვარობაზე.

GaAs-ზე ინდიუმის მცირებინაღობიანი ომური კონტაქტის მიღების რაოდნება

ნახევარგამტარებზე ინდიუმის მცირებინაღობიანი ომური კონტაქტის დამზადების ოპტიმალური რეჟიმის შესარჩევად ვსწავლობდით დენის სვლის მექანიზმისა და კონტაქტური წინააღმდეგობის ცვლის დამოკიდებულებას თერმოდამუშავების ტემპერატურაზე და დროზე. ნახევარგამტარის ერთ მხარეს ჯერ უკეთდებოდა

სუფთა ინდიუმის რამდენიმე წერტილოვანი ომური კონტაქტი ზემოთ აღწერილი ტექნოლოგიით, ერთ-ერთ კონტაქტზე მიერჩილებოდა მავთული, ამის შემდეგ კონტაქტიანი ზედაპირი მავთულით იფარებიდა ქიმიურად მდგრადი ლაქით და მეორე ზედაპირზე ულექტრო-ქიმიურად ვაფენდით სუფთა ინდიუმს, შემდეგ ლაქს ვაცლიდით, ნიმუშებს ვამტკრევდით 1-2 მმ² ფართობის ნაწილებად და ვახდენდით ერთჯერად თერმო-დამუშავებას აზოვის ატმოსფეროში სხვადასხვა ტემპერატურაზე 10 წუთის განმავლობაში.

გოლტ-ამპერული მახასიათებელი იზომებოდა სტაციონარულ რეჟიმში აღმოჩნდა, რომ 250⁰-300⁰C-მდე თერმოდამუშავებისას I₆/ ა კონტაქტი რჩება ბარიერული და დენის სვლის მქანიზმი ძირითადად განისაზღვრება თერმოელექტრონული ემისიით. თერმოდამუშავების ტემპერატურის თანდათან გაზრდისას ბარიერი მცირდება, კონტაქტური წინააღმდეგობა მცირდება და 450⁰C-ზე თერმოდამუშავებისას კონტაქტი ხდება ომური. ამ მოვლენას ჩვენ იმით გხსნით, რომ ევტექტიკის ტემპერატურაზე უფრო დაბალ ტემპერატურაზეც ნახევარგამტარსა და მეტალს შორის მიმდინარეობს მყარფაზოვანი რეაქცია, რის შედეგადაც შესაძლებელია ცვლადი შემადგენლობის საშუალებო ფენის წარმოქმნა. შეიძლება სტრუქტურის რომელიმე გადასასვლელზე ან ორივეზე არსებობდეს პოტენციალური ბარიერი. მაგრამ იგი იმდენად დაბალი ხდება, რომ ოთახის ტემპერატურაზე იონიზირებული მუხტებისათვის ადვილი გადასალახია. ამით შეიძლება აიხსნას ის ფაქტი, რომ ინდიუმი კარგ ომურ კონტაქტს იძლევა როგორც և ასევე

პ ტიპის მასალაზე. როცა სუფთა In-ის ნაცვლად GaP-ს ზედაპირზე დავაფინეთ In-ისა და Ga-ის მყარი ხსნარი, რაც ადგილი მოსახერხებელია ჩვენს მიერ დამუშავებული ტექნოლოგიის გამოყენებით, აღმოჩნდა, რომ ომური კონტაქტის მიღება შეიძლება $350\text{--}400^{\circ}\text{C}$ -ზე. Ga-ის დამატება ალბათ ამცირებს მასალის ხსნადობის ტემპერატურას და იგივე რეაქცია იწყება უფრო დაბალ ტემპერატურაზე. ის ფაქტი, რომ GaP-ს ზედაპირზე მიმდინარეობს მყარფაზოვანი რეაქცია, ჩვენს მიერ ნაჩვენები იქნა ადრე ასეთი სტრუქტურების ვოლტამპერული, ვოლტტევადური [5] და საექტრალური მახასიათებლების [6] შესწავლის საფუძველზე.

აღწერილია III-V ჯგუფის ნახევარგამტარებზე (GaAs, GaP, InP) ომური კონტაქტების მისაღებად საჭირო ტექნოლოგიური დანადგარი და ომური კონტაქტის კონტაქტური წინაღობის გაზომვის მეთოდიკა.

ექსპერიმენტული გამოკვლევების მიხედვით, III-V ჯგუფის ისეთი ნახევარგამტარებისათვის, როგორიცაა GaAs, GaP, InP, დაბალი პოტენციალური ბარიერის მიღება ლითონის შერჩევით ვერ ხერხდება. დაბალი და საშუალო კონცენტრაციით ($n < 10^{17}\text{--}10^{18} \text{ cm}^{-3}$) ლეგირებულ ნახევარგამტარებში მუხტის ძირითად მატარებელთა მაღალი კონცენტრაციის მისაღებად ახდენენ კონტაქტის მიმდებარე ნახევარგამტარები ფენის სათანადო მინარევებით (დონორებით ან აქცეპტორებით) ლეგირებას იმდენად მაღალ კონცენტრაციამდე, რომ საკმაოდ დავიწროვებულ პოტენციალურ ბარიერში შესაძლებელი გახდეს ელექტრული მუხტის გადამტანების კვანტურ-მექანიკური გვირაბული გასვლა ანუ მოხდეს მუხტის

გადამტანების (ელექტრონების ან ხერელების) ველური ემისია. ველურ ემისიის მოვლენაზე დაფუძნებული ომური კონტაქტის გვირაბული მოდელის [6,8,12] მიხედვით, კონტაქტზე არსებობს საკმაოდ მაღალი პოტენციალური ბარიერი, მაგრამ იგი გამჭვირვალეა მუხტის მატარებელთა გვირაბული გასვლისათვის (ტუნელირებისათვის). ყოველივე ზემოთ თქმულიდან გამომდინარეობს, რომ პრაქტიკაში საშუალო და დბალი კონცენტრაციით ლეგირებულ (n) ნახევარგამტარებზე ომური კონტაქტის მისაღებად საჭიროა საკონტაქტო მასალად ისეთი მინარევების შემცველი ლითონური შენადნობის (m) გამოყენება, რომელიც ნახევარგამტარის ზედაპირის გადაგვარებამდე (n⁺) ლეგირების შესაძლებლობას იძლევა. ამ შემთხვევაში კონტაქტის ომურობა აიხსნება იმით, რომ მაგალითად n/m⁺ სტრუქტურაში n/n⁺ გადასასვლელზე ბარიერი არ არის, ხოლო n⁺/m გადასასვლელზე ბარიერი გამჭვირვალეა მატარებელთა ტუნელირებისათვის.

ომური კონტაქტის ძირითადი მახასიათებელი პარამეტრია მისი კუთრი წინააღმობა R_c, რომელსაც კონტაქტურ წინადობასაც უწოდებენ და ასე გამოისახება:

$$R_c = \left(\frac{dI}{dV} \right)^{-1}_{V=0}$$

სადაც V – კონტაქტზე მოდებული ძაბვაა, I – მასში გამავალი დენი.

კონტაქტში დენის გავლის მექანიზმის ზემოთ ჩამოთვლილი თეორიული მოდელების (ნახ.3)

გათვალისწინებით გამოთვლილი კონტაქტური
 წინადობის მნიშვნელობას თერმოელექტრონული
 ემისიისათვის ძირითადად განსაზღვრავს
 ექსპონენციალური მამრავლი $\exp(\Phi_B/kT)$, თერმოველური
 ემისიისათვის – $\exp(\Phi_B/E_{00}\coth E_{00}/kT)$, ხოლო გალური
 ემისიისათვის – $\exp(\Phi_B/E_{00})$ [8]. აյ დამრავლებული
 ბარიერის სიმაღლეა, k – ბოლცმანის მუდმივა, T –
 ტემპერატურა, E_{00} – სიდიდეს ეწოდება გვირაბული
 გავლის პარამეტრი და მისი მნიშვნელობა მოიცემა
 ფორმულით:

$$E_{00} = \frac{qh/2\sqrt{N_d}}{\varepsilon sm^*}$$

სადაც q – ელექტრონის მუხტია, N_d - დაიონზებული
 მუხტის კონცენტრაცია, m^* – ნახევარგამტარში მუხტის
 ძირითადი მატარებლების ეფექტური მასა, ε_s –
 ნახევარგამტარის დიელექტრიკული შეღწევადობა, h –
 პლანკის მუდმივა. E_{00} კონტაქტის მახასიათებელი
 მნიშვნელოვანი პარამეტრია და ტოლია ლითონისა და
 ნახევარგამტარის კონტაქტზე შექმნილი დიფუზური
 პოტენციალის იმ მნიშვნელობისა, რომელზეც
 ნახევარგამტარში მოცულობითი მუხტის კიდეზე მყოფი
 და გამტარობის ზონის მინიმუმის შესაბამისი ენერგიის
 მქონე ელექტრონის გვირაბული გასვლის ალბათობა
 არის e^{-1} (e ნეპერის რიცხვია). E_{00} -ის საშუალებით
 შესაძლებელია წინასწარი განსაზღვრა იმისა კონტაქტი
 ომური იქნება, თუ გამმართველი. კერძოდ, თუ $kT > E_{00}$,
 დენის სვლის მექანიზმი დომინირებს
 თერმოელექტრონული ემისიის პროცესი და მიიღება

გამმართველი კონტაქტი შოტკის ბარიერით. თუ $kT < E_{\text{cut}}$, გვაქვს ველური გამტარობა და მიიღება ომური კონტაქტი, $kT \geq E_{\text{cut}}$ კი შუალედური შემთხვევაა.

პრაქტიკაში გალიუმის არსენიდზე ომური კონტაქტების მისაღებად ყველაზე ხშირად იყენებენ მეტალურგიულ ევტექტიკას, რომელიც შეიცავს 88% Au, 12% Ge და ემატება 5 წონითი პროცენტი Ni. 400-500 °C-ზე 30 წამის განმავლობაში შედნობის შედეგად მიღებული იყო ომური კონტაქტი, რომლის კონტაქტური წინაღობა ნაკლებია 10^{-6} მმ \cdot ს $^{-2}$ -ზე. ომური კონტაქტის ფორმირების მექანიზმს ასე ხსნიან: პირველ ეტაპზე 300°C - ზე Ge სწრაფად დიფუნდირებს საკონტაქტო არეში, Au არის გამსხველი GaAs-სათვის. GaAs იშლება – Au+GaAs = AuGa+As; Ni+As → NiAs. 400°C-ზე მიმდინარეობს Ga-ის აუტდიფუზია თქროში, Ga იკავებს Au-ის გაკანტურ ადგილს და ამ შემთხვევაში მოქმედებს როგორც დონორი. ამ მოდელის ფარგლებში ჩატარებული თეორიული გამოთვლების [12] თანახმად, 10^{-5} მმ \cdot ს 2 - ზე ნაკლები კონტაქტური წინაღობის მისაღებად საჭიროა მაღალლეგირებულ ფენაში დონორების კონცენტრაცია იყოს არანაკლები $5 \cdot 10^{19}$ სმ $^{-3}$ -სა, თუმცა ექსპერიმენტულად დამტკიცდა, რომ AuGe-ის ან AuGeNi-ის ლითონური შენადნობების ეპიტაქსიური გაზრდაც კი არ იძლევა GaAs-ის ზედაპირის გერმანიუმის $(1-4) \cdot 10^{18}$ სმ $^{-3}$ -ზე მეტი კონცენტრაციით ლეგირების საშუალებას. პრაქტიკულად კი მიღებული იყო $5 \cdot 10^{-7} < R_c < 5 \cdot 10^{-6}$ მმ \cdot ს 2 კონტაქტური წინაღობის მქონე ომური კონტაქტი Ge-ით ლეგირებულ $10 \cdot 10^{17}$ სმ $^{-3}$ კონცენტრაციის GaAs-ზე. ეს შეუსაბამობა თეორიასთან საეჭვოდ ხდის ზემოთაღწერილი და

ლიტერატურაში კარგად დამკვიდრებული ომური
 კონტაქტის ფორმირების თეორიული მოდელის
 სამართლიანობას ასეთ შემთხვევებში. ამ
 წინააღმდეგობის მოსახსნელად შექმნილი იყო ომური
 კონტაქტის ვარიზონული მოდელი [14,12], რომლის
 მიხედვით ომური კონტაქტის In/GaAs ფორმირება შეიძლება
 აისხნას იმით, რომ GaAs-ის ზედაპირზე
 ინდიუმის დაფენისა და მისი შემდგომი
 თერმოდამუშავების შედეგად ლითონსა და
 ნაევარგამტარს შორის იზრდება Ga_{1-x}In_xAs-ის (0<X<1)
 ვარიზონული ფენა, ჰეტეროსტრუქტურა InAs/Ga_{1-x}In_xAs/GaAs ბარიერს არ შეიცავს, ხოლო InAs-ის ზედაპირზე ნებისმიერი ლითონის და მათ შორის ინდიუმის დაფენისას მიიღება ომური კონტაქტი. ჩვენ ჩავატარეთ ექსპერიმენტული კვლევა ამ დებულების სამართლიანობის დასადაგნად. ამჟამად არსებობს ნაევარგამტარებზე მეტალების დაფენის სხვადასხვა მეთოდი: თერმული, კაოზური და იონური დაფრქვევა, მეტალის დაფენა გაზური ფაზიდან, მოლეკულური ეპიტაქსია, ქიმიური და ელექტროქიმიური დაფენა. ჩვეულებრივ, მეტალის დაფენა ხდება ნაევარგამტარის წინასწარ დამუშავებულ ზედაპირზე. ზედაპირის დამუშავებაში იგულისხმება მოშლიფვა, გაპრიალება, ქიმიური, ელექტროქიმიური და გაზური მოწამვლა და სხვა. ასეთი დამუშავების შედეგად ნაევარგამტარის ზედაპირი იფარება რთული შემადგენლოის ჟანგის ფენით, რომლის სისქე GaAs-სათვის 10-60 Å⁰-ია.

ძირითადი მონაცემები იმ მეტალების შესახებ,
 რომლებიც გამოიყენება GaAs-ზე ომური კონტაქტების

მისაღებად და კონტაქტის მიღების რეჟიმების შესახებ ინფორმაციის ანალიზიდან ჩანს, რომ GaAs-ზე საკონტაქტიდ ძიითადად გამოიყენება შემდეგი მეტალები In, Pt, Au, Sn, Ag და მეტალური შენაღნობები AuNi, AuNiGe, AuGe, InNi, InNiGe. ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ ჩამოთვლილ ლითონთა დიდი უმრავლესობა 350°C -ზე მაღალ ტემპერატურაზე თერმოდამუშავების შედეგად იძლევა ინტერმეტალურ ნაერთებს. ამის თავიდან ასაცილებლად ჯერ აფენენ პალადიუმს და შემდეგ ლითონის ერთ ან რამდენიმე ფენებს.

როგორც ცნობილია, არსებობს ნახევარგამტარზე ლითონების დაფენის სხვადასხვა მეთოდი: ქიმიური, ელექტროქიმიური, ვაკუუმური, ლაზერული, მაგნეტონული, მოლეკულურ-სხივური ეპიტაქსია და სხვ. GaAs-ზე ინდიუმის დასაფენად ჩვენ ავირჩიეთ ელექტროქიმიური მეთოდი არა მარტო სიიაფის გამო (ძვირფასი ლითონების დანახარჯი მცირეა, არ საჭიროებს მაღალი ვაკუუმის შესაქმნელად საჭირო ძვირად ლირებულ დანადგარებსა და დენის ხარჯებს), არამედ იმიტომაც, რომ ეს საკმაოდ ფაქტი და შრომატევადი მეთოდი ნახევარგამტარზე ლითონის მეტალის ფენების ბუნებრივ ზრდაზე (უშუალოდ ზრდის პროცესში) თუნდაც ფოტოგრაფირებით დაკვირვების საშუალებას იძლევა.

ნახევარგამტარებზე ომური კონტაქტების დასამზადებლად გამოვიყენეთ დანადგარი, რომლის სქემა მოცემულია მე-4 ნახ-ზე. ყველა კვარცის მილისებრ ქილებზე (1-6) შემოხვეულია ელექტროდუმელი; 1, 2 – ში მოთავსებულია მოპალადიუმირებული ალუმინიუმი,

რომელიც ხელს უწყობს აირში არსებული ჟანგბადის წელის ორთქლად გარდაქმნას და თხევადაზოტიან თერმოსტი ჩადგმული სპეციალური მინისაგან დამზადებულ ჭურჭელში (7, 8) კონდენსირდება. ტექნილოგიური პროცესის დამთავრების შემდეგ შესაძლებელია იქიდან წელის გადმოსხმა; 3, 4-ში სუფთა, გამომშრალი ალუმაგელია, ხოლო 5, 6-ში სილიკონგელი. ეპიტაქსიის ჩატარება შეიძლება ელექტროლუმელში ჩადგმულ კვარცის რეაქტორში მოთავსებულ გრაფიტის კასეტაში, შიგვე მაგრდება ტემპერატურის გასაზომი თერმოწყვილი.

ნიმუშები გამოსაწვავად ჩაიწყობა კვარცის ან გრაფიტის კასეტაში და თავსდება კვარცის რეაქტორში, რომელშიც გადის ჟანგბადისაგან გაწმენდილი აიროვანი აზოტი. ექსპერიმენტულად დადასტურდა, რომ გალიუმის არსენიდზე (GaAs) ომური კონტაქტის მისაღებად საჭიროა ინდიუმის შელდობა 500°C -ზე 3-5 წთ-ის განმავლობაში. ომური კონტაქტის ფორმირების მექანიზმის შესასწავლად ომურ კონტაქტზე მიერჩილება მავთული (დენის მისაყვანად), შემდეგ ნახევარგამტარის ზედაპირი (ომური კონტაქტით) და მასთან მიბმული მავთული დაიფარება ქიმიურად მდგრადი ლაქით და შიშველ ზედაპირზე ინდიუმი ეფინება ელექტროქიმიურად.

ექსპერიმენტული შედეგების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ზომიერად ლეგირებული ნახევარგამტარებისათვის კონტაქტური წინააღმდეგობა მნიშვნელოვნად არ არის დამოკიდებული საკონტაქტო მეტალში დამატებული მინარევის გვარობაზე, ამიტომ ექსპერიმენტის შემდგომ ეტაპზე გალიუმის ფოსფიდის ზედაპირზე

ელექტროქიმიური მეთოდით ვაფენდი სუფთა ინდიუმს და კერავლობდი დენის სვლის მექანიზმისა და კონტაქტური წინააღმდეგობის ცვლის დამოკიდებულებას თერმოდამუშავების ტემპერატურაზე და დროზე.

აღმოჩნდა, რომ $250^0\text{-}300^0\text{C}$ -მდე თერმოდამუშავებისას In/GaP კონტაქტი რჩება ბარიერული და დენის სვლის მექანიზმი ძირითადად განისაზღვრება თერმოელექტრონული ემისიით. თერმოდამუშავების ტემპერატურის თანდათან გაზრდისას ბარიერი მცირდება, კონტაქტური წინააღმდეგობა მცირდება და $450\text{-}500^0\text{C}$ -ზე თერმოდამუშავებისას კონტაქტი ხდება ომური. ამ მოვლენას ჩვენ იმით ვხსნით, რომ ევტექტიკის ტემპერატურაზე უფრო დაბალ ტემპერატურაზეც ნახევარგამტარსა და მეტალს შორის მიმდინარეობს მყარფაზოვანი რეაქცია, რის შედეგადაც შესაძლებელია ცვლადი შემადგენლობის საშუალებო ფენის წარმოქმნა. შეიძლება სტრუქტურის რომელიმე გადასასვლელზე ან ორივეზე არსებობდეს პოტენციალური ბარიერი, მაგრამ იგი იმდენად დაბალი ხდება, რომ ოთახის ტემპერატურაზე იონიზირებული მუხტებისათვის ადვილი გადასალახია. ამით შეიძლება აიხსნას ის ფაქტი, რომ ინდიუმი კარგ ომურ კონტაქტს იძლევა როგორც ი ასევე ც ტიპის მასალაზე. როცა სუფთა In-ის ნაცვლად ზედაპირზე დაგაფინე In-ისა და Ga-ის მყარი ხსნარი რაც ადვილი მოსახერხებელია ჩვენს მიერ დამუშავებული ტექნილოგიის გამოყენებით, აღმოჩნდა, რომ ომური კონტაქტის მიღება შეიძლება $350\text{-}400^0\text{C}$ -ზე. Ga-ის დამატება ალბათ ამცირებს მასალის ხსნადობის ტემპერატურას და იგივე რეაქცია იწყება უფრო დაბალ

ტემპერატურაზე. ის ფაქტი, რომ GaP-ს ზედაპირზე
მიმდინარეობს მყარფაზოვანი რეაქცია, ჩვენს მიერ
ნაჩვენები იქნა ადრე ასეთი სტრუქტურების
კოლტამპერატული, კოლტტევადური [5] და საექტრალური
მახასიათებლების [6] შესწავლის საფუძველზე.

ლიტერატურა

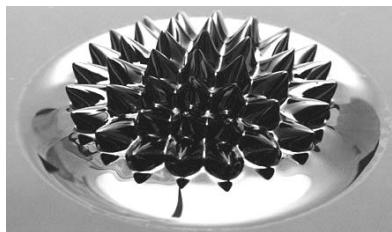
1. Э Х Родерик Контакты металл-полупроводник М "Радио и Связь" 1982 с 209
2. Ridout. Solid st. El. v. 18 pp. 547-550. 1976
3. W.J. Poudwillie and T.C. Mogill. Ohmic contacts to n-type GaAs J. Vac. Sci. Technol.B3(4) 1985
4. T. Sebastyen. Solid St. El. v.25. N7. pp. 543-550. 1982.
5. М. В. Бахтадзе Т. А. Лаперашвили Электрохимический метод создания диодов Шоттки на основе GaP. Известия АН ГССР серия Хим 1986 №4 стр 306-308
6. Ridout. Solid st. El. v. 18 pp. 547-550. 1976
7. W.J. Poudwillie and T.C. Mogill. Ohmic contacts to n-type GaAs J. Vac. Sci. Technol.B3(4) 1985
8. T. Sebastyen. Solid St. El. v.25. N7. pp. 543-550. 1982.
9. თ. ლაფერაშვილი, დ. ფასურიშვილი. ომური კონტაქტი
გალიუმის არსენიდზე. საქ. მეცნ. აკადემიის მოამბე ტ.
152. №2 გვ. 269-272. 1995
10. Ю. А.. Гольдберг Т. А. Лаперашвили Г. А. Накашиძე
Изменение механизма прохождения тока при переходе
барьерного контакта к омическому вследствие отжига структуры
Au-GaP н - типа сб Оптическая обработка информации и
оптоэлектроника Тбилиси "Мецниереба" 1986 ст 51-55
11. М. В. Бахтадзе Т. А. Лаперашвили Электрохимический метод
создания диодов Шоттки на основе GaP. Известия АН ГССР
серия Хим 1986 №4 стр 306-308
12. С . Зи. Физика полупроводниковых приборов т.1."Мир", М. 1984.

13. А. Мильнс, Д. Фоихт. Гетеропереходы и переходы металла полупроводник. "Мир" , М.1975.
14. M. Otsubo, H. Kumabe and H. Miki. Solid St.El.,v.20, N7,1977,p.617-621.
15. Л. Д. Либов, С. С. Мескин, Д. А. Наследов, В. Е. Седов, Б. В. Царенков. Омические контакты арсенид галлия-металл.ПТЭ, 4, , 1965, с.14-22
16. Norman Braslau. Ohmic Contacts to GaAs,Thin Solid Films, v.104, 1983, p.391 –1097.
17. A.Y.C.Yu.Electron Tunneling and Contact Resistance of Metal-silicon Contact Barriers Solid St.El.v.13, 1970,P.239-247.,
18. Ohmic contacts to III–V compound semiconductors: A review of fabrication techniques A.Piotrowska, A.Guivarc'h and G.Pelous. Solid St.El.v.26,N3,1983,p.179--197
19. თ.ლაფერაშვილი, დ. ლაფერაშვილი. ომური კონტაქტის ფორმირების მექანიზმი A^3B^5 ჯგუფის ნახევარ-გამტარებზე. მეცნიერება და ტექნიკა, N 7-9, 2000, გვ. 48–52.
20. W.J. Poudwille and T.C. Mogill. Ohmic contacts to n-type GaAs J. Vac. Sci. Technol.B3(4) 1985.
21. J.M. Woodall, J.L.Freeout, G.D.Pettit, J.Jacson, and P.Kricher Ohmic contacts to n-GaAs using graded band gap layers of $Ga_{1-x}In_x As$ grown molecular beam epitaxy J.Vax.Sci.Technol, 19 (3), 1981, p.626-629.
22. Зависимость высоты барьера Шоттки структур с полупроводниками на основе GaP от электроотрицательности металла, Журнал Технической Физики, т.55, вып.4, с.733-734 (1985).
23. Photoelectric characteristics of contacts In-Semiconductor A^3B^5 . T. Laperaschvili, I. Immerlischvili, M. Khachidze, D. Laperaschvili. Nanotechnology, Proc. of SPIE v. 5118, 2003, p.502-506.

სამედიცინო დანიშნულების მაგნიტური ნაწილების სინთეზი

ქ. კებუტია, ვ. მიქელაშვილი, ჯ. მარხულია, ლ. სანებლიძე,
მ. ჭავჭანიძე

ბოლო ათწლეულებში ნანოტექნოლოგიების შესწავლაში მიღწეულმა წარმატებებმა დასაბამი მისცა ახალ მიმართულებას – ნანოკომპოზიტური მასალების კვლევას. ეს უკანასკნელი წარმოადგენს თხევად ან პოლიმერულ გარემოში შეწონილ მაგნიტური ან არამაგნიტური ნანონაწილაკების სისტემებს. ნანოკომპოზიტურმა ნივთიერებამ (ან ნანონაწილაკების სუსპენზიამ) კვლავ მიიპყრო საყოველთაო ყურადღება და დღესაც ინარჩუნებს აქტუალობას [1]. ნანომასალების განვითარება ხელს უწყობს მეცნიერებაში არა მხოლოდ ახალი მოვლენისა და ახალი თეორიის კვლევის სტიმულირებას, არამედ სავარაუდოდ ინდუსტრიულ რევოლუციასაც.



სურ. 1. მაგნიტური ნანოსითხე მაგნიტის ზემოქმედების ქვეშ

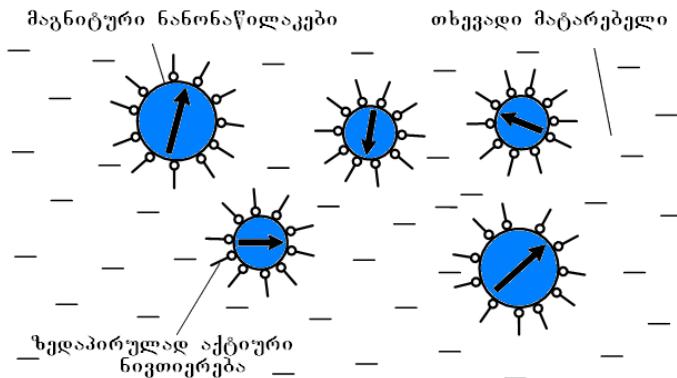
ნანოსტრუქტურები, რომლებიც შექმნილია მცირე, ზღვრული ზომის არაორგანული მყარი სხეულებისაგან თავიანთი ზომისა და დაკვანტვის მაჩვენებლების გამო შესამჩნევად განსხვავდება ჩვეულებრივი კრისტალური

მდგომარეობებისაგან ელექტრული და ოპტიკური თვისებებით. ნანოკომპოზიტები პოულობს ფართო გამოყენებას ინჟინერიისა და მედიცინის თითქმის ყველა სფეროში, კერძოდ, ნანოსიონები შეიძლება გამოყენებული იქნას მრეწველობის მრავალ სფეროში, დაწყებული ტრანსპორტის საშუალებებიდან, დამთავრებული ენერგიის წარმოებით და მოქნილი ელექტრონიკით [2].

მაგნიტური სითხეები წარმოადგენს წვრილ-დისპერსული მაგნიტური ნანონაწილაკების კოლოიდურ სსნარებს და ჩვეულებრივად არამდგრად მაგნეტორელოგიურ სითხეებს, რომლებიც შედგება უფრო დიდი ზომის მაგნიტური ნაწილაკებისაგან (სურ.1) [3]. გადამტანი სითხე შეიძლება იყოს პოლარული ან არაპოლარული. მაგნიტური ნანონაწილაკების სინთეზი იყოფა ორ მიმართულებად: ფიზიკური და ქიმიური პროცესი. ზოგიერთი მასალები რომლებიც ნანოსითხეებში გამოიყენება, არის ოქსიდური Al_2O_3 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , ნიტრიდული AlN , SiN , კარბიდული – SiC , TiC , მეტალური – Ag , Au , Cu , Fe , ნახევარგამტარული – TiO_2 მასალები; ერთ, ორ და მრავალგარსიანი ნახშირბადის ნანომილაკები და კომპოზიტური მასალები, როგორიცაა ნანონაწილაკი ბირთვი – პოლიმერი გარსი კომპოზიტები.

1960 წლიდან დაწყებული, როდესაც პირველად იქნა სინთეზირებული ეს ნივთიერებები, მათი ტექნოლოგიურ - სამედიცინო გამოყენების სფერო მუდმივად განიცდის გაფართოებას. ორფაზიან თხევადი კოლოიდებში, რომელიც შეიცავს ფართო სპექტრის ჩვეულებრივ, არამაგნიტურ სითხეებში (გადამტანებაში) შეტივტივებულ ფერო ან ფერი ნანონაწილაკებს, სტაბილურობა

განპირობებულია იმ ფაქტით, რომ ეს უფრო მკრივი ნანოსტრუქტურული ნივთიერებები განიცდის ბროუნის მოძრაობას (სურ.2).



სურ. 2. მაგნიტური სითხეების აგებულების პრინციპული სქემა.
მაგნიტური ნაწილაკები დაფარულია სურფაქტანტით. სურათი
შესაბამება ნაწილაკების დამაგნიტებულობის ერთდომენიან
მდგომარეობას (აღნიშნულია ისრებით).

მედიცინაში დიდი იმედის მომცემ გამოყენებად
ზოგადად განიხილება სამკურნალო საშუალებების
მიზნობრივი მიწოდება, პიპეროვერმია, უჯრედების
განცალკევება და კონტრასტული დამზერა.

მაგნიტური სითხეები უნდა იყოს შეთავსებადი
ბიოლოგიურ გარემოსთან. ასეთი სისტემები
დაფუძნებულია ბიოლოგიურად აქტიური მოლეკულებით
შემოგარსულ მაგნიტურ ნაწილაკებზე. ამგვარად,
ნაწილაკები დაკავშირებულია ბიოლოგიური
პოლიელექტროლიტის მოლეკულებთან, რომელიც
შეიცავს ორ ან მეტ პოლიფუნქციონალურ ქიმიურ
ჯგუფს, რომელიც პასუხისმგებელია მოლეკულის რთული

ზედაპირულ კავშირსა და შექმნილი ორმაგი ელექტრული ფენის სტაბილიზაციაზე.

მაღალი ადსორბციული თვისებების შერწყმა დეტრქსიკაციურ და იმუნომასტიმულირებელ შესაძლებლობებთან საშუალებას მოგვცემს ეს მასალა გამოყიდვისას კლინიკაში ჩირქოვან-ანთებითი დაავადებების სამკურნალოდ. მაგნიტური სითხეების უპირატესობა ანტიბიოტიკებთან შედარებით იმაში მდგომარეობს, რომ ისინი არ იძლევა რეზისტენტული ბაქტერიული ფორმების შექმნის შესაძლებლობას, რადგანაც ნაწილაკების უჯრედებთან შეწებება მხოლოდ ფიზიკური ბუნებისაა, მაგ., იბ-მენინგიტის მკურნალობისას მთავარ პრობლემას წარმოადგენს მიკრობის მზარდი წინააღმდეგობა ანტიბიოტიკების მიმართ.

წინამდებარე სამუშაო არის ერთგვარი გაგრძელება იმ საქმიანობისა, რომლის დროსაც ვლადიმერ ჭავჭანიძის სახელობის კიბერნეტიკის ინსტიტუტის სოხუმის სამედიცინო კიბერნეტიკის ლაბორატორიაში მრავალი წლის მანძილზე პროფ. გ. ახალაიას ხელმძღვანელობით მუშავდებოდა გონიერი მასალების ახალი კლასის – მაგნიტური სითხეების (მს) მიღების ტექნოლოგია [4]. მაღალი ადსორბციული თვისებების, დეტრქსიკაციური და იმუნომასტიმულირებელი შესაძლებლობების შესამება იძლევა მათი წარმატებული გამოყენების საშუალებას კლინიკაში, რაც დამტკიცდა აფხაზეთის ომში.

სინთეზის ფიზიკური მეთოდები მოიცავს მექანიკური დაქუცმაცების და ინერტული აირის

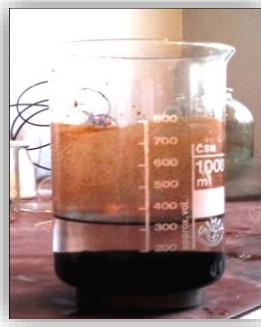
კონდენსაციის ტექნიკას, მოგვიანებით განვითარდა ქიმიური მეთოდები, როგორებიცაა ქიმიური დალექცის, ქიმიური აორთქლებით დაფენის, მიკრო-ემულსიები, სპრეი პიროლიზი, და თერმული გაფრქვევა. აგრეთვე სონოქიმიური მეთოდი განვითარდა სუსპენზიის შესაქმნელად, სადაც რკინის ნანონაწილაკები სტაბილიზდება ოლეინის მჟავით [5].

ყოველივე ამის ბაზაზე და თანამედროვე ლიტერატურული ანალიზისა და მიღწევების გათვალისწინებით კიბერნეტიკის ინსტიტუტში მომზადდა მაგნიტური ნანოსითხეების მიღების თანამედროვე ტექნოლოგია – ქიმიური დალექცის მეთოდი, რომელიც საყოველობრივ თვასაზრისით იძლევა წვრილდისპერსიული ნანონაწილაკების უფრო მცირე ზომებს და გამოირჩევა შედარებით მაღალი სტაბილიზაციით მატარებელ სითხეში.

მაგნიტური ნანონაწილაკების ბიოლოგიური გამოყენება ძირითადად ფოკუსირებულია სიმსივნის უჯრედების გამოკლევაზე. Fe_3O_4 ნანონაწილაკები, რომლებიც ანტიბიოტიკებითაა დაფარული მოიაზრება, როგორც მაგნიტურად კონტროლირებადი ფარმაცევტული აგენტები ბაქტერიებით დაზიანებული ქსოვილებისა და ორგანოების აღსაღებენად ან სამკურნალოდ. ამასთან, რკინის ოქსიდები, როგორიცაა მაგნეტიტი (Fe_3O_4), არის ერთ-ერთი სტაბილური ოქსიდაციის პუთხით და ამჟღავნებს მნიშვნელოვან დამაგნიტებულობას. აგრეთვე იგი გამოირჩევა ნაკლები ტოქსიურობით, რაც მისი გამოყენების არეალს აფართოებს [6].

ექსპერიმენტალური ნაწილი. მაგნეტიზის ნანონაწილაკების სინთეზისათვის ერთ-ერთი ეფექტური მეთოდია ქიმიური დალექცის მეთოდი. ექსპერიმენტში გამოიყენება რკინის სამვალენტიანი და ორვალენტიანი მარილების წყალსნარები, გამხსნელ გარემოს წარმოადგენდა ნატრიუმის ჰიდროქსიდი ($NaOH$). დისტილიზებული დეიონიზებური წყალი (დწ), რომელიც გამოყენებულია მთელი ექსპერიმენტის განმავლობაში სნარის მოსამზადებლად. ექსპერიმენტში გამოყენებამდე გაიზომა მისი გამტარებლობა რომელიც შეადგენდა 15 მგ მმო / სმ და მეტს. რეაქციის შედეგად ტუტე გარემოში $FeSO_4 + 2FeCl_3 + 8NaOH = Fe_3O_4 + Na_2SO_4 + 6NaCl + 4H_2O$ (1)

სსნარი გადაიქცევა შავი ფერის სუსპენზიად, რაც მეტყველებს მაგნეტიზის ფორმირებაზე.



სურ. 3 მაგნიტური ნანოსითხის ფორმირება ქიმიური დალექცის შედეგად

ატმოსფერულ პირობებში მთლიანი ექსპერიმენტული ნაწილის ბლოკ-სქემა მოცემულია ნახ 1 –ზე. სამედიცინო გამოყენების კუთხით სინთეზი მოიცავს შემდეგ ეტაპებს:

წვრილდისპერსიული ნაწო-ნაწილაკების წარმოება გადამტან სითხეში, მათი სტაბილიზაცია, მედიკამენტური საშუალებებით მათი დატვირთვა.

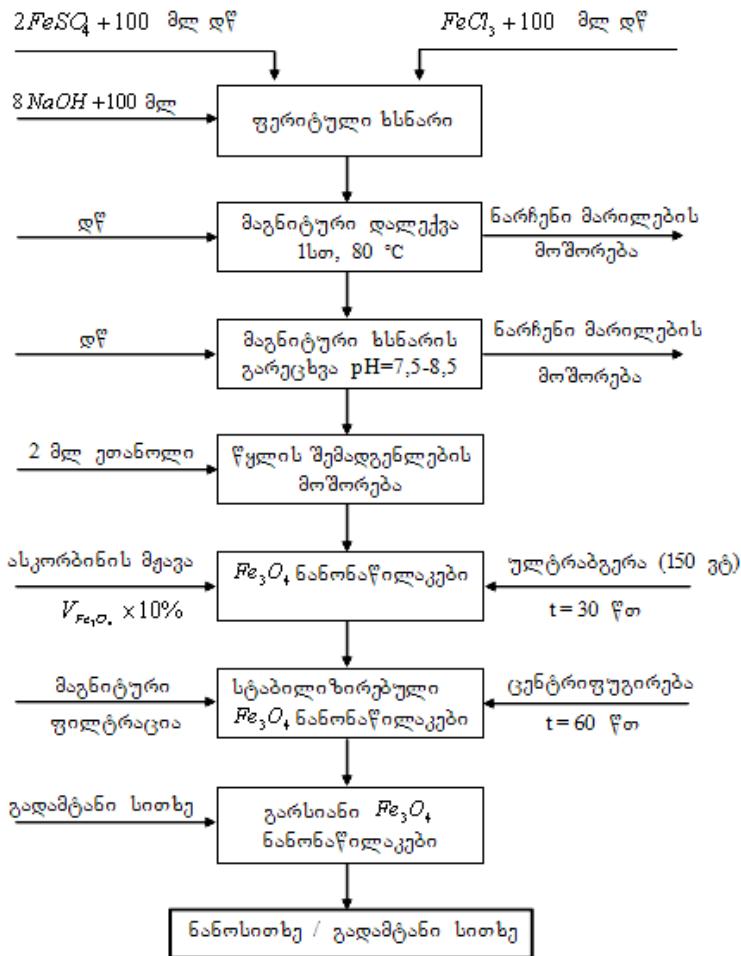
კრისტალიზაციის ცენტრების ფორმირება და შემდგომი ზრდა მიმდინარეობს შერევის მეშვეობით. საწყის ეტაპზე, რეაქციის შემდგომ უნდა მოხდეს სსნარის კარგად მორევა 1 სთ განმავლობაში. ამის შემდგომ კოლბის ფსკერზე გარედან მოვათავსებთ მაგნიტს. რამდენიმე სანში ადვილად შეგვიძლია დაფინანსოთ ორი ფაზის გამოყოფა (სურ.3).

მას შემდეგ რაც მაგნიტიზის ნაწილაკები მაგნიტის გავლენით მიეკვრება კოლბის ფსკერს, ფრთხილად უნდა გადავლვაროთ სსნარის 2/3 მაგნიტის მოუშორებლად და კიდევ დავამატოთ დისტანციული წყალი. კარგად შევანჯლრით და დავდოთ მაგნიტზე. ოპერაცია მეორდება მანამ, სანამ pH არ მიაღწევს მნიშვნელობას 7.5 - 8.5. ეთანოლის მეშვეობით სსნარის გარეცხვა საჭიროა წყლის შემაღებელი ნაწილების მოსაშორებლად, ამისათვის ეთანოლშერეული სსნარი 5 წუთის განმავლობაში უნდა შევათბოთ, რათა ეთანოლი აორთქლდეს. ამის შემდგომ ხდება ფეროფაზის სტაბილიზება, რომელსაც თან ახლავს ვან დერ ვაალსისა და მაგნიტური დიპოლ-დიპოლ ურთიერთქმედებით გამოწვეული აგრეგაციის დაბლოკა ბარიერის წარმოქმნის შედეგად. ნაწილაკი შეიძლება დაცულ იქნას ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებით (სურფაქტანტებით), ელექტრული ორმაგი ფენით ან ბიოთავსებადი ნივთიერებით და ბოლო ხანებში დადგენილი H-კავშიერებით. შურფაქტანტები არის

მოლექულები, რომლებიც შედგება ორი კარგად გამოკვეთილი ნაწილისაგან: პირველი არის ზეთში ხსნადი (ჰიდროფობური) და მეორე – წყალში ხსნადი (ჰიდროფილური). ჰიდროფობური ნაწილი არაპოლარულია და ჩვეულებრივად მოიცავს ალიფატურ ან ნახშირწყალბადოვან ნაშთს (რადიკალს). ჰიდროფილური ნაწილი პოლარულია და ჩვეულებრივად მოიცავს პოლარულ ჯგუფებს, რომლებიც აქტიურად ურთიერთქმედებს წყალთან (კერძოდ, ჰიდროქსილის, კარბოქსილის და იონური ჯგუფები). ამგვარად, ფერიტის ნაწილაკების სტაბილიზაციისთვის არაპოლარულ არეში საჭიროა უბრალო სურფაქტაცია; ჰიდროფილური ნაწილი ადსორბირდება აქტიური ნაწილაკის ზედაპირზე და ამიტომ ჰიდროფობური ნაწილი ხდება შეთავსებადი გამსხველთან. წყლის მსგავს პოლარულ არეში, გარებანი ჰიდროფილური ფენის წარმოსაქმნელად საჭიროა სურფაქტანტის ორი ფენა.

ჩვენ შემთხვევაში სტაბილიზატორად (და სამკურნალო საშუალებადაც) გამოყენებულია ასკორბინის მჟავა: ფეროფაზის მშრალი მოცულობის 10 %. ნარევი იმყოფება 1სთ ინტენსიური მორევის ქვეშ, საბოლოოდ მიიღება სტაბილიზებური, სამკურნალო საშუალებით დაფარული რკინის ოქსიდის ნანონაწილაკები, რომელიც შემდგომ დამუშავდება ულტრაბეგერით (150 გტ სიმძლავრე) სულ მცირე ნახევარი საათის განმავლობაში, რათა დაიშალოს დარჩენილი წარმოქმნილი აგლომერატები. ამის შემდგომ მიიღება ჰომოგენური დისპერსიული ხსნარი. მიღებულ სისტემას უკეთდება ცენტრიფუგირება 4000 ბრ/წთ სიჩქარით ერთი საათის გამნავლობაში და შემდგომ გადაიტანება

წყალსა თუ სხვა გადამტან სითხეში გამოყენებიდან გამომდინარე.



ნახ.1. სამედიცინო დანიშნულების მაგნიტური ნანოსითხის მიღების ქიმიური დალექტოს მეთოდი.

რაც შეეხება ფიზიკურ პარამეტრებს, ნანოსითხის სიმკვრივე და ნანონაწილაკების მოცულობითი წილი განისაზღვრება გრავიმეტრული მეთოდით, ხოლო სიბლანტე განისაზღვრება კაპილარული მეთოდით ვისკოზიმეტრის დახმარებით, რაც ჩვენი შემდგომი კვლევის საგანია. რენტგენის დიფრაქციული სურათიდან განისაზღვრება კრისტალის ზომა დებაი-შერერის ფორმულის გამოყენებით:

$$D_{xrd} = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

სადაც K – არის ნაწილაკის ფორმის ფაქტორი ($K=0.9$), λ – რენტგენის ტალის სიგრძე ($\lambda=1.54$ ანგსტრემი), β – არის დიფრაქციულ სურათზე წირის სიფართვე, რომელიც აღებულია მაქსიმუმი ინტენსიურობის ნახევრის ტოლად, ხოლო θ – არის ბრეგის კუთხე. ნაწილაკების მაგნიტური თვისებები შეისწავლება დამაგნიტებულობისა და მაგნიტური ამთვისებლობის მრუდებიდან. მაგნიტური დიამეტრის საშუალო ზომა (d_m) და დაფარული ნაწილაკების კონცენტრაცია გამოითვლება ლანჯევენის (Langevin) განტოლებიდან [6] :

$$d_m^3 = \frac{18k_b T}{\pi \mu_0 M_B M_s} \left(\frac{dM_s}{dH} \right)_{H \rightarrow 0} \quad (3)$$

$$n = \frac{6M_s}{\pi d_m^3 M_B} \quad (4)$$

სადაც d_m - მაგნიტური ნაწილაკის დიამეტრია, k_b - ბოლცმანის მუდმივა ($k_b = 1,38 \times 10^{-23}$ ნმ/კ), T - აბსოლუტური ტემპერატურა, μ_0 - ვაკუუმში მაგნიტური შედწევადობა ($\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6}$ ნ/ა²), M_s - ნიმუშის გაჯერების დამაგნიტებულობა, M_B - გაჯერების დამაგნიტებულობა მოცულობით მაგნეტიზმი ($M_s = 0,92 \times 10^6$ ა/მ).

არსებობს ორი მიღვომა შერჩევლ სინთეზის პროცესში. ესაა ერთ და ორ საფეხურიანი ტექნიკა. ერთ საფეხურიანი ტექნიკის გამოყენებისას ერთდროულად ხდება ნანონაწილაკების სინთეზი და დისპერგირება მატარებელ სითხეში, ხოლო ორ საფეხურიანი ნანოსითხის სინთეზისას ქიმიური ან ფიზიკური მეთოდით, ჯერ წარმოიქმნება ნანონაწილაკები, შემდგომ ხდება მათი სტაბილიზება და შემდგომ გადაიტანება საბოლოო გადამტან სითხეში.

შედეგები და დასკვნა. ჩვენს მიერ შემუშავებული მაგნიტური ნანონაწილაკების მიღების ქიმიური დალექვის მეთოდი ორ-საფეხურიანი სინთეზის ტექნილოგიით წარმოადგენს მაგნეტიზმის (Fe_3O_4) ნანონაწილაკების მიღების დამუშავებულ მეთოდს, რომელიც მოიცავს, როგორც ნანონაწილაკების მიღების ქიმიურ მეთოდს გარეცხვის პროცედურებთან ერთად, ასევე ნანონაწილაკების სტაბილიზება/სურფაქტაციას, ულტრაბერიო დამუშავებას, ცენტრიფუგირებას და მათ საბოლოო გადამტან სითხეში მოთავსებას. ეს კომპლექსური მეთოდი საყოველთაო თვასაზრისით იძლევა წვრილდისპერსიული ნანონაწილაკების მცირე ზომებს და გამოირჩევა შედარებით მაღალი

სტაბილიზაციით გადამტან სითხეში. ამ ყველაფერს ემატება შერჩეული მასალის არატოქსიკურობა და ბიოთავსებადობა, რაც წინაპირობაა სამედიცინო გამოყენებისათვის.

ლიტერატურა:

1. W. Yu, D.M. France, S.U.S. Choi, and J.L. Routbort. Review and Assessment of Nanofuid Technology for Transportation and Other Applications. Argonne National Laboratory.2007.
2. C. Scherer and A. M. Figueiredo Neto. Ferrofluids: Properties and Applications. Brazilian Journal of Physics, vol. 35, no. 3A, September, 2005.
3. S.ekutia, N. Chkhaidze. A new formula of thermal conductivity for nanofuids, ECI Conference on Nanofuids: Fundamentals and Applications, Copper Mountain, 2007, Sept. 16-20.Colorado, USA
4. ლ. სანებლიძე, მ. ახალიაძე, ჭ. ახობაძე, გ. მანჯვალაძე. ნატყვიარი და ინფიცირებული ჭრილობებისა და დამწვრობების მკურნალობა მაგნიტური სითხეებით. სამხედრო ტექნიკა. №5, 2001
5. Kenneth S. Suslick, at, al. Acoustic Cavitation and Its Chemical Consequences, Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences Vol. 357, No. 1751, Acoustic Cavitation and Sonoluminescence (Feb. 15, 1999), pp. 335-353

ნახევარბამტარზე ბარიერული და ომური პონტაქტების დამზადების ტექნოლოგია

ჯანო მარხულია
კიბერნეტიკის ინსტიტუტი

შესავალი

ლითონ-ნახევარგამტარული კონტაქტების კვლევა წარმოადგენს ძალზე მნიშვნელოვან ამოცანას, როგორც პრაქტიკული ისე თეორიული თვალსაზრისით [1].

შეიძლება ითქვას, რომ ბოლო ორ ათწლეულში ჩვენ გაგხდით მოწმე ნახევარგამტარულ ელექტრონიკაში მომხდარი რევოლუციისა, რაც გამოიხატება ნახევარგამტარულ მასალათმცოდნეობაში მიღწეულ დიდ წარმატებებში [2].

მიუხედავად იმისა, რომ თანამედროვე ელექტრონიკაში, ნახევარგამტარული მოწყობილობები ძირითად იწარმოება სილიციუმის ბაზაზე, ამ ბოლო პერიოდში მიკრო და ნანოელექტრონიკის ძალზე სწრაფმა განვითარებამ განაპირობა ბინარულ ნახევარგამტარულ შენაერთებისადმი მოთხოვნების მკვეთრი ზრდა. მრავალრიცხოვანმა კვლევებმა აჩვენა, რომ სხვადასვა ტიპის ნახევარგამტარული მოწყობილობების დასამზადებლად განსაკუთრებით საინტერესო და საჭირო კარგი მახასიათებლები გააჩნიათ პერიოდული სისტემის III და V ჯგუფის ელემენტებისაგან წარმოქმნილ ბინარულ ნახევარგამტარულ შენაერთებს (ე.წ III-V

ტიპის ნაერთები). რომელსაც სათავეში უდგას გალიუმის არსენიდი (GaAs) [3,21].

ნახევარგამტარული შენაერთებიდან გალიუმის არსენიდს გააჩნია გარკვეული უპირატესობა სილიციუმთან შედარებით, კერძოდ, ის ხასიათდება მუხტის მატარებელთა მაღალი ძერადობითა და გაბნევის დაბალი სიმძლავრით. გალიუმის არსენიდი წარმოადგენს ფართოზონიან ნახევარგამტარს, მისი აკრძალული ზონის სიგანე ტოლია 1.38 ევ-ის, ამიტომაც მის საფუძველზე დამზადებულ მოწყობილობებს შეუძლია იმუშაონ 350°C -მდე ტემპერატურებზე. მუხტის ძირითად მატარებელთა მცირე სიცოცხლის ხანგრძლივობა ($10^{-9} - 10^{-10}$ წ)³ ზრდის GaAs საფუძველზე დამზადებული დიოდების სიხშირულ დიაპაზონს და საშუალებას იძლევა დამზადდეს მოწყობილობები უკეთესი იმპულსური თვისებებით. ეს უპირატესობები განაპირობებს მის ფართოდ გამოყენებას, მაღალსიჩქარიან ელექტრონულ მოწყობილობებში, ოპტიკოელექტრონულ ხელსაწყოებში, ლაზერულ და გვირაბულ დიოდებში, ფოტომიმდებებში, ბირთვული გამოსხივების დეტაქტორებისა და დისკრეტულ ზემადალსიხშირულ ინტეგრალურ სქემებში [1-3]. ნახევარგამტარულ მრეწველობაში მას გამოყენების მასშტაბით უჭირავს მესამე ადგილი სილიციუმისა და გერმანიუმის შემდეგ. გალიუმის არსენიდის ბაზაზე დამზადებული ნახევარგამტარული მოწყობილობები ერთ და იგივე სიხშირეზე გენერირებენ გაცილებით ნაკლებ სმაურს ვიდრე სილიციუმის საფუძველზე დამზადებული მოწყობილობები. სწორედ ზემოთ ხსენებული უპირატესობების გამო, გალიუმის არსენიდი ფართოდ

გამოიყენება ნახევარგამტარულ ლაზერებში, ცალკეულ რადარულ სისტემებში. გადიუმის არსენიდის ბაზაზე დამზადებულ ნახევარგამტარული მოწყობილობებს ასევე გააჩნიათ სხვებთან შედარებით უფრო მაღალი რადიაციული მედუგობა, რაც განაპირობებს მათ გამოყენებას რადიაციული გამოსხივების პირობებში, მაგალითად კოსმოსში მომუშავე მზის ბატარეებში. გალიუმის არსენიდი არის პირდაპირზონიანი ნახევარგამტარი რაც ასევე წარმოადგენს მის კიდევ ერთ უპირატესობას. ის შეიძლება გამოყენებული იქნას ოპტოელექტრონულ მოწყობილობებში, სინათლის გამომსხივებელ დიოდებში, ნახევარგამტარულ ლაზერებში. Ga-ს და As-ის კრისტალური მესრის მუდმივების პრაქტიკულად იდეალური შეთანხმებულობის გამო, მათ ატომურ შრეებს გააჩნიათ მცირე მექანიკური დაძაბულობა, ამიტომაც მათგან შესაძლებელია ფაქტიურად ნებისმიერი სისქის ფირების გამოზრდა [1-4].

<p>ზემადალსიხშირული</p> <p>ელექტრონიკა, რადიოელექტრონიკის როგორც დამოუკიდებელი მიმართულება ჩამოყალიბდა გასული საუკუნის 70-იან წლებში [3]. სხვადასხვა ფაქტორებიდან, რომლებმაც ძლიერი ბიძგი მისცეს ამ მიმართულების განვითარებას, განსაკუთრებულად აღსანიშნავია $n - n+$ და $n+ - n - n+$ გალიუმარსენიდისეული ეპიზერის სიადასტრუქტურების ტექნოლოგიაში, ფოტოლითოგრაფიაში, ასევე ნახევარგამტარის ზედაპირის დამუშავებისა და მისი ლითონიზაციის მეთოდებში მიღწეული წარმატებები. ასეთმა პროგრესმა განაპირობა შექმნილიყო სრულყოფილი გამმართველი და არაგამმართველი</p>	<p>ნახევარგამტარული</p> <p>რადიოელექტრონიკის როგორც დამოუკიდებელი მიმართულება ჩამოყალიბდა გასული საუკუნის 70-იან წლებში [3]. სხვადასხვა ფაქტორებიდან, რომლებმაც ძლიერი ბიძგი მისცეს ამ მიმართულების განვითარებას, განსაკუთრებულად აღსანიშნავია $n - n+$ და $n+ - n - n+$ გალიუმარსენიდისეული ეპიზერის სიადასტრუქტურების ტექნოლოგიაში, ფოტოლითოგრაფიაში, ასევე ნახევარგამტარის ზედაპირის დამუშავებისა და მისი ლითონიზაციის მეთოდებში მიღწეული წარმატებები. ასეთმა პროგრესმა განაპირობა შექმნილიყო სრულყოფილი გამმართველი და არაგამმართველი</p>
---	--

(ომური) ლითონ-ნახევარგამტარული კონტაქტები (მნკ), რომლებიც შემდგომში გახდენენ შოტკის დიოდების (მდ), გენერატორული განის დიოდების (გდ), ხოლო ცოტა მოგვიანებით კი ველის ტრანზისტორების შექმნის საფუძველი.

ამ შრომაში განხილულია ლითონ-ნახევარგამტარული კონტაქტების ტიპები და ძირითადი მახასიათებლები, ნახევარგამტარული თხელი ფირებისა და ზედაპირული ფენების მიღების მეთოდები, ზოგადად განხილულია ნახევარგამტარზე ბარიერული და ომური კონტაქტების დამზადების თანამედროვე ტექნოლოგიები, ძირითადი აქცენტი გამახვილებულია ნახევარგამტარებზე ლითონების დაფენის ელექტოქიმიურ მეთოდზე.

1. ლითონ-ნახევარგამტარული კონტაქტების ფიავაი და ძირითადი მახასიათებლები

ნახევარგამტარული ხელსაწყოს ელექტროდების შეერთება ელექტრონული მოწყობილობის სხვა ელემენტებთან ხორციელდება ლითონური გამტარებით, ამიტომ ნებისმიერი ნახევარგამტარული ხელსაწყო ყოველთვის შეიცავს ლითონსა და ნახევარგამტარს შორის კონტაქტურ არეს. იდეალურ შემთხვევაში ასეთ კონტაქტებზე ძაბვის ვარდნა უნდა იყოს ნულოვანი, სინამდვილეში კი ლითონური გამომყვანების ნახევარგამტართან რეალურ კონტაქტებს გააჩნიათ სასრულო წინაღობა, თუმცა მათი ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი ახლოსაა წრფივთან, ამიტომაც მათ ომურ კონტაქტებს უწოდებენ [5,8]

ლითონ-ნახევარგამტარის კონტაქტის დამოკიდებულება მასზე მოდებული ძაბვის პოლარობაზე პირველად აღმოჩენილ იქნა 1874 წელს [6]. განსაზღვრულ პირობებში ლითონ-ნახევარ-გამტარულ კონტაქტს შეიძლება გააჩნდეს არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებელი (“გამმართველი” კონტაქტები). ასეთი კონტაქტები არ შეიძლება გამოყენებულ იქნან ხელსაწყოს ელექტროდების ლითონურ გამტარებთან შესაერთებლად. ოუმცა გამმართველი კონტაქტების თვისებები საფუძვლად უდევს მთელ რიგ სასარგებლო ნახევარგამტარულ ხელსაწყოებს [5].

1938 წელს ვ.შოტკიმ გამოთქვა იდეა იმის შესახებ, რომ პოტენციალური ბარიერი ლითონ-ნახევარგამტარის საზღვარზე, რომელიც განსაზღვრავს კონტაქტის გამმართველ თვისებებს, წარმოიშობა ნახევრაგამტარში უძრავი მოცულობითი მუხტის წარმოქმნით [6-7].

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, შეიძლება გამოვყოთ ლითონ-ნახევარგამტარული კონტაქტების ორი ტიპი:

- არაგამმართველი (ომური);
- გამმართველი ან ბარიერული.

ლითონ-ნახევარგამტარული კონტაქტი ფენომენოლოგიური განსაზღვრების მიხედვით, წარმოადგენს ომურს, თუ კი დენის დამოკიდებულება კონტაქტზე არსებულ ძაბვასთან წრფივია ძაბვის იმ მნიშვნელობებამდე, რომელიც ბევრად აღემატება kT/q -ს (q -ელექტრონის მუხტი, k – ბოლცმანის მუდმივა, T , $^{\circ}\text{K}$ – ტემპერატურა) [7].

ომურთან მიახლოებული კონტაქტების მიღება შესაძლებელია ლითონის შედნობით, რომელიც ზრდის ნახევარგამტარში მუხტის ძირითად მატარებელთა კონცენტრაციას [7].

ლითონ-ნახევარგამტარის უშუალო კონტაქტი იქნება ვენტილური (შოტკის დიოდი), თუ ლითონსა და ნახევარგამტარს შორის არსებობს გვირაბულად-გაუმჯგირი პოტენციალური ბარიერი, და ომური, თუ ასეთი პოტენციალური ბარიერი არ არის, ან ის გვირაბულად გამჭვირვალეა. ბარიერი შეიძლება წარმოიქმნას ლითონსა და ნახევარგამტარის გამოსვლის მუშაობათა სხვადასხვაობის ხარჯზე (შოტკის მოდელი) ან ნახევარგამტარის აკრძალულ ზონაში განთავსებულ ზედაპირული მდგომარეობების მაღალი კონცენტრაციების ხარჯზე (ბარდინის მოდელი). უმრავლესობა III-V ტიპის ნახევარგამტარებისთვის სრულდება ბარდინის მოდელი [7].

კონტაქტის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგესნ კუთრი წინაღობა ნულოვანი წანაცვლებისას

$$\mathbf{Rc} = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1}_{V=0}$$

(სადაც V -კონტაქტზე მოდებული ძაბვაა, J –მასში გამავალი დენის ძალის სიმკვრივე).

ექსპერიმენტალურად დადასტურდა, რომ მცირე R_c მისაღებად საჭიროა ან ლეგირების მაღალი ხარისხი, ანდა ბარიერის მცირე სიმაღლე (ანდა ორივე ერთად).

სწორედ ამ მოსაზრებებიდან ამოდიან ომური
კონტაქტების დამზადებისას.

ფართოზონიან ნახევარგამტარებზე ჩვეულებრივ
როტულია კონტაქტების დამზადება მცირე ბარიერული
სიმაღლით. გარდა ამისა, გამოყენებულ ლითონებს
ყოველთვის არ გააჩნიათ საკმაოდ მცირე გამოსვლის
მუშაობა. ასეთ შემთხვევებში ომური კონტაქტების
დასამზადებლად ნახევარგამტარის ზედაპირზე ქმნიან
დამატებით მაღალლეგირებულ შრეს. ასეთი შრის შექმნა
შესაძლებელია სხვადასხვა მეთოდებით: წვრილი
დიფუზიით, გადაკრისტალირებით, კონტაქტის მასალის
ერთერთი კომპონენტთაგანის დიფუზიით, ორმაგი
ეპიტაქსიით, იონური იმპლანტაციით. GaAs და ასევე სხვა
 $A^{III}B^V$ ტიპის ნახევარგამტარებისაგან ომური კონტაქტების
მისაღებად გამოიყენება სხვადასხვა მეთოდები,
როგორიცაა: ფორმირება, ანოდირება, დაფრქვევა,
ელექტროლიზი [9-10].

გარდა ამისა, ომურ კონტაქტებს ასევე უყენებენ
სხვა მოთხოვნებსაც. მაგალითად, როგორც წესი ომური
კონტაქტები უნდა იყვნენ არაინჟექტირებადნი, გააჩნდეთ
კარგი თბოგამტარებლობა და სხვ.

იდეალური ომური კონტაქტის შექმნა, რომელიც
სრულად პასუხობს სხვადასხვა მოთხოვნებს,
პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამიტომაც რეალური ომური
კონტაქტები წარმოადგენენ მეტად თუ ნაკლებად
იდეალურთან მიახლოებულს [8].

ზმს-მოწყობილობების სწრაფი განვითარება
სტიმულს იძლევა ჩატარდეს კვლევები შოტკის ბა-

რიერული დიოდების პარამეტრების გაუმჯობესების მიმართულებით. დიდი ყურადღება ექცევა მათი დამზადების ტექნოლოგიურ პროცესებს, სადაც განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს ნახევარ-გამტარის ზედაპირის ხარისხს [12].

2. ნახევარგამტარზე ლითონის დაზენის მეთოდები

მიკროელექტრონიკის სწრაფმა განვითარებამ საჭირო გახდა დიდი რაოდენობით პრინციპულად ახალი ნახევარგამტარული მოწყობილობების, ინტეგრალური და ჰიბრიდული მიკროსქემების დამზადება. ამ მიმართულებების განვითარებაში განსაკუთრებული როლი აკისრია ნახევარგამტარულ კრისტალსა და ლითონურ ფირებს, ნ/გ კრისტალსა და გამტარებს შორის კონტაქტების მიღების ხერხების დახვეწას და ახალი მეთოდების დანერგვას [14].

ლითონ-ნახევარგამტარის კონტაქტების დამზადების ტექნოლოგიური სიმარტივის მიუხედავად, ლითონის და ნახევარგამტარის გამყოფ ზედაპირზე პროცესების ბუნება ბოლომდე გარკვეული არ არის და ამის მიზეზი ხშირად არის იდეალური, თეორიულ მოდელებთან მიახლოებული განმეორებადი თვისებების მქონე ლითონისა და ნახევარგამტარის კონტაქტის მიღების სირთულე, რაც განპირობებულია კონტაქტურ არეში მიმდინარე ქიმიური, ფიზიკური და მეტალურგიული პროცესების მრავალმხრივობითა და სირთულით [15].

ცნობილია, რომ ლითონ-ნახევარგამტარის კონტაქტურ ზონაში გამართვა მნიშვნელოვანწილად შეიძლება იცვლებოდეს ნახევარგამტარის ზედაპირის დამუშავების პირობებზე და კონტაქტის მიღების ხერხზე.

აუცილებელია კიდევ იმის გათვალისწინება, რომ ნახევარგამტარული კრისტალის ზედაპირულ შრეზე არსებულმა დეფექტებმა შესაძლოა გამოიწვიოს არა მხოლოდ ზედაპირული ან სასაზღვრო დიფუზიია კონტაქტურ ზონაში, არამედ არსებითი ზეგავლენა მოახდინოს კრისტალის სიღრმეში მინარევთა დიფუზიის პროცესებზე დისლოკაციებისა და მიკრობზარებზე გავლით, რომლებიც შეიძლება წარმოგვიდგეს როგორც დიფუზიური არხები.

არსებობს ლითონურ გამტარებსა და ნახევარგამტარულ კრისტალებს შორის ომური კონტაქტის მიღების სხვადასხვა ხერხები, რომლებსაც იყენებენ ნახევარგამტარულ მოწყობილობისადმი წაყენებული დანიშნულებისა და მოთხოვნილების შესაბამისად. მიღების ხერხების მიხედვით კონტაქტები შეიძლება იყვნენ: ურთიერთშეჭიდული, რაც მიიღწევა გამტარის ნახევარგამტარულ კრისტალთან მექანიკური ურთიერთმიჯრის გზით; მირჩილული; შედნობილი; კონტაქტები მიღებული სპეციალური პასტით და ამალგამით, ლითონური ფენის ნ/გ-ს ზედაპირზე დატანებით (ვაკუუმური დაფრქვევა, ლითონის ნახევარგამტარულ კრისტალზე ქიმიური ან ელექტროლიტური გზით დაფენა) ზემოთჩამოთვლილი რამოდნიმე მეთოდის კომბინაციით [14].

ლითონ-ნახევარგამტარული კონტაქტის მიღების ფართოდ გაგრცელებული ხერხია ნახევარგამტარულ ზედაპირზე თხელი ლითონური ფირის დაფუნა. ასეთი თხელი ფენების დატანების ტექნოლოგია საკმაოდ კარგად არის დამუშავებული.

ნახევარგამტარულ კრისტალის ზედაპირზე ფირების დატანა წარმოადგენს მხოლოდ შეალედურ ტექნოლოგიურ ციკლს მოწყობილობის შექმნისას, რამდენადაც შემდგომში აუცილებელია ლითონიზირებული ზედაპირების ლითონური გამტარებით შეერთების უზრუნველყოფა.

2.1 თხელი ფირებისა და ზედაპირული ფენების მიღების გათვალისწინები

თხელი ფირები ფართოდ გამოიყენება ნახევარგამტარულ და ჰიბრიდულ ინტეგრალურ მიკროსქემებში გამტარული შეერთების, რეზისტორების, კონდენსატორების შესაქმნელად. საჭირო ელექტრო-ფიზიკური პარამეტრების გარდა მათგან მოითხოვება იმ მასალასთან კარგი ადგეზია (ურთიერთშეკავშირების სიმყარე) რომელზედაც დაიტანება ფირი. ზოგიერთ მასალას შეიძლება გააჩნდეს ფუძეშრესთან ცუდი ადგეზია (მაგალითად, ოქროს სილიციუმთან). ამ შემთხვევაში ფუძეშრეზე თავდაპირველად აფენენ თხელ ქვედაშრეს კარგი ადგეზიით, ხოლო ამის შემდგომ მასზე აფენენ ძირითად მასალას, რომელსაც ამ უკანასკნელთან გააჩნია კარგი ადგეზია [16].

არსებობს თხელი ფირებისა და ზედაპირული ფენების მიღების სხვადასხვა მეთოდები, ყველაზე

სშირად სამეცნიერო კვლევებში გამოიყენება შემდეგი მეთოდები: 1) CVD – პროცესი (Chemical vapor deposition) 2) PVD – პროცესები (physical vapour deposition) მათ შორის 3) გაკუმურ თერმული გაფრქვევა.

CVD – პროცესი ეს არის ქიმიური პროცესი, რომელიც გამოიყენება მაღალი სისუფთავის მყარი მასალების მისაღებად.

ტიპიურ CVD – პროცესში, ფუძეშრე თავსდება ერთ ან რამდენიმე ნივთიერების ორთქლში, რომლებიც რეაქციაში შესვლით ან დაშლით, ფუძეშრის ზედაპირზე ახორციელებენ შესაბამისი საჭირო ნივთიერების წარმოქმნას. სშირად წარმოიქმნება რეაქციის აირადი პროდუქტები, რომელიც კამერიდან გაიტანება აირული ჭავლით (ნაკადით).

PVD – პროცესები აღნიშნავენ მეთოდთა ჯგუფს, რომელთა მეშვეობითაც შესაძლებელია ზედაპირული ფენების (თხელი ფირების) მიღება დაფრქვევის გზით გაკუმურში, რომლის დროსაც ზედაპირული ფენა მიიღება დაფენადი მასალის ორთქლის პირდაპირი კონდენსაციით [16,20].

გამოყოფენ PVD – პროცესების შემდეგ სტადიებს:

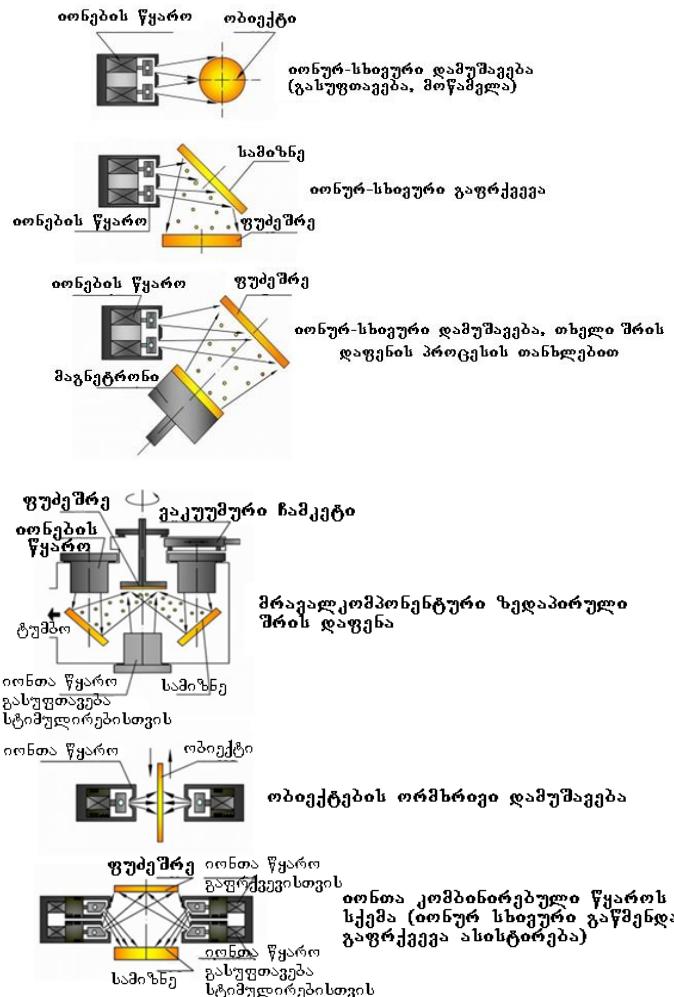
1. დასაფენი ნივთიერების ნაწილაკებისაგან შემდგარი გაზის (ორთქლის) შექმნა;
2. ორთქლის ტრანსპორტი სუბსტრატამდე;
3. ორთქლის კონდენსაცია სუბსტრატზე და ზედაპირული ფენის ფორმირება;

PVD – პროცესების ჯგუფს განეკუთნება ქვემოთ ჩამოთვლილი ტექნოლოგიები, ასევე ამ პროცესების რეაქტიული ვარიანტები.

აორთქლების მეთოდები (*evaporative deposition*):

- თერმული აორთქლება
- ლაზერული სხივით აორთქლება (*pulsed laser deposition, pulsed laser ablation*): ატომები და იონები ორთქლდებიან იმპულსურ რეჟიმში მომუშავე ლაზერით.
- ელექტრული რკალით აორთქლება (*arc evaporation, Arc-PVD*): ატომები და იონები მასალის საწყისი მდგომარეობიდან თავისუფლდებიან და გადადიან აირად ფაზაში ორ ელექტროდს შორის ელექტრულ რკალში გამავალი ძლიერი დენის მოქმედების შედეგად.
- ეპიტაქსია მოლეკულური სხივით;
- გაფრქვევა (*sputtering*) - ამოსავალი მასალა განიფრქვევა იონური ნაკადით ბომბარდირებით და გადადის გაზურ (აირად) ფაზაში.
- დაფრქვევა იონური სხივის მხარდაჭერით (*ion beam assisted deposition, IBAD*)
- იონთა იმპლანტაცია

PVD – პროცესების მეშვეობით დებულობენ 5 მკმ-დე სისქის ზედაპირულ ფენებს, ამ მეთოდით ჩვეულებრივ ზედაპირული ფენის დატანების შემდეგ, ფენა არ საჭიროებს დამატებით დამუშავებას.



ნახ.1. ვაკუუმში ზედაპირებისა და ობიექტების იონურ-სხივური დამუშავების ტიპიური სქემები



Ionfab. იონურ-სივეური მოწამელისა
და დაფურის სისტემა; მუშაობობული
[Oxford Instruments Plasma Technology](#)
(დოკი პრიტანეთი)

Plasmalab Sputter modules. მანქეტორნული
დაფურის სისტემა [Oxford Instruments Plasma
Technology](#) (იონი განხილვითი). სისტემა
საშუალების მიზანია განსორციელდეს 20 მე-
ტრან რამდენიმე მიღწონის სისქეს შეტანთა,
ოქსიდაცია, ნიტრიდთა და სილიციონთა ურეზების
დაღვინის პროცესის ბაზა.

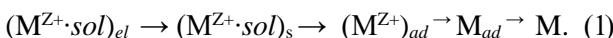
ნახევარგამტარზე თხელი კონტაქტების მისღებად,
კონკრეტულად კი იდეალური შოტკის დიოდის
დასამზადებლად აუცილებელია ლითონისა და
ნახევარგამტარის უშუალო კონტაქტის მიღება,
რისთვისაც ძირითადად გამოიყენაბა ლითონის
ვაკუუმური დაფექვევა, ქიმიური და ელექტროქიმიური
დაფენა. ქვემოთ დაწვრილებით იქნება განხილული
ლითონების ელექტროქიმიურად დაფენის მეთოდი.

3. ელექტრომიზოური დაზმა

ლითონების და მათი ნადნობების ნებისმიერი
ელექტრული დაფენისას, ეს იქნება ზედაპირის ლითონით
დაფარვა თუ ელექტრული კონტაქტების მიღება,
ყოველთვის მთავარი მიზანია – მიღებულ იქნას

წვრილმარცვლოვანი, თანაბარი (პრიალა), არაფოროვანი, დანალექთან კარგად შეჭიდული, საჭირო ფიზიკურ-მექანიკური, კოროზიული და ელექტრული თვისებების მქონე ნიმუშები.

ლითონების ელექტროდალექვის პროცესის სტადიები. ლითონთა ელექტროდალექვის (დაფენის) პროცესი ზოგად შემთხვევაში შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სტადიების სახით:



სტადიები: 1 2 3 4

სტადია 1 – ელექტროლიტის მოცულობიდან (ინდექსი el), კათოდის ზედაპირთან (ინდექსი s) დიფუზიის, კონვექციის ან მიგრაციის ხარჯზე ქვემოთ ჩამოთვლილი იონების მიყვანა:

ა) თავისუფალი მცირედ სოლვატირებული (წყალსნარში –ჰიდრატირებული) $M^{Z+} \cdot sol$ ლითონის იონთა;

ბ) იონების, რომლებიც ნაწილობრივ ან მთლიანად დაკავშირებულია ანიონთან

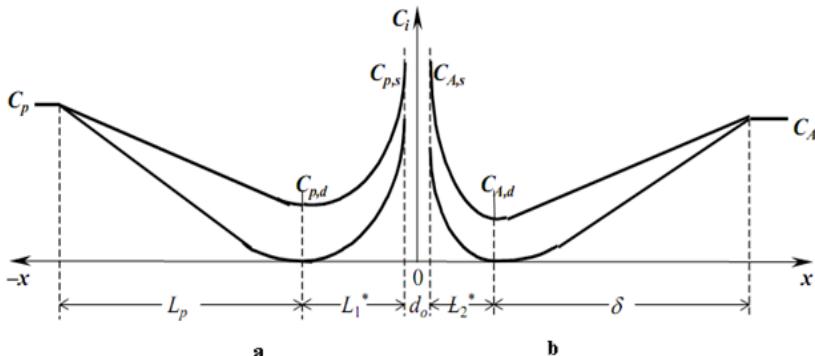
$X^- : MX_n^{(Z-n)+}$;

გ) L^- ლიგანდთან $ML^{(z-m)+} \cdot sol$ სოლ კომპლექსში კოორდინირებული იონების მიყვანა:

ლითონთა იონების დიფუზიის სიჩქარე ელექტროდის ბრტყელ ზედაპირთან i_d დენის ერთეულებში ზოგადად აღიწერება განტოლებით

$$i_{d,i} = zF(D_i/\delta_i)10^{-3}(C_i - C_{d,i}) \quad (2)$$

სადაც $i_{d,i}$ - i-ური ნაწილაკების დიფუზიური დენის სიმკვრივეა, $A/l\delta^2$; z – მათი მუხტი; D_i – i-ური ნაწილაკების დიფუზიის კოეფიციენტი, $l\delta^2/7\delta$; δ_i - ელექტროლიტი დიფუზიური შრის სისქეა; C_i და $C_{d,i}$ – i-ური ნაწილაკების კონცენტრაციაა ხსნარის მოცულობაში და დიფუზიური შრის საზღვარზე პუნქტის გარე დამუხტული შრის საზღვარით, ან თუ პუნქტის საზღვარი არ არის, მაშინ ჰელმოლცის საზღვრით, მოლ/ლ. ამის ილუსტრაციას ახდენს ნახ. 3.



ნახ.3 ნახევარგამტარის (a) ელექტროლიტთან (b) გამყოფ საზღვარზე მორგავირე ნაწილაკების განაწილება ნახევარგამტარის ანოდური პოლარიზაციისას.

ჩვენს შემთხვევაში (2) განტოლებას აქვს სახე $i_d = nF(D/\delta)10^{-3}(C_M^{z+} - C_M^{z+},d)$, ხოლო დიფუზიური გადაძაბვა η_d , რომელიც დამოკიდებულია C_M^{z+} ხსნარის მოცულობასა და $C_{M^{z+},d}$ კათოდის ზედაპირზე ლითონის იონთა კონცენტრაციის გრადიენტზე გამოისახება შემდეგი განტოლებით

$$\eta_d = (RT/nF)\ln(C_M^{z+}/C_{M^{z+},d}) = (RT/nF)\ln(1 - i_d/i_{d,lim})$$

აქ F – არის ფარადეის რიცხვი, T-ტემპერატურა კელვინებში, R – ომური წინაღობა, n – ელექტრონთა კონცენტრაცია (b^{-3}) η – გადაძაბვა; უნდა აღინიშნოს რომ კათოდურ გადაძაბვას აქ გააჩნია უარყოფითი ნიშანი [21].

სტადია 2 – ნაწილობრივი ან სრული დესოლვაციურება, ანუ M^{z+} ლითონის იონთა გამოთავისუფლება დისოციაციის ხარჯზე, რომელი ნაწილაკების იონზაცია (კოპლექსებში ხშირად არასრული), მათი კათოდის ზედაპირზე ადსორბცია (ინდექსი ad). სტადია 2 შედგება მთელი რიგი ელემენტარული აქტებისაგან.

ელექტროლიზის პირობებზე დამოკიდებულებით დესოლვაციაცია, იონიზაცია და ლითონის რომელი იონის ადსორბცია შეიძლება ხორციელდებოდეს მიმდევრობით ან პარალელურად. ეს ქიმიური რეაქციები, რომლებიც დაკავშირებული არ არიან უანგვა-აღდღენით პროცესებთან, შეიძლება იწვევდნენ კათოდური პროცესების დამუხრუჭებას, თუ იონთა გამოთავისუფლების სიჩქარე თანაზომადი იქნება კათოდზე მათ განმუხტვის სიჩქარისა. ამ დროს წარმოშობილი ქიმიური გადაძაბვა η_x აღიწერება განტოლებით

$$\eta_x = (v/p)(RT/nF)\ln(C_{M^{z+}}/C_{M^{z+},i}) = (v/p)(RT/nF)\ln(1 - i_x/i_{x,lim})$$

სადაც ν – სტეპიომეტრული კოეფიციენტია ქიმიურ რეაქციებში ლითონის იონების შემცველი ნაწილაკებისათვის; p – ლითონის იონებით ამ რეაქციების წესრიგი; $C_{M^{z+}}$ და $C_{M^{z+},i}$ – კათოდთან ლითონის იონთა კონცენტრაცია დენის გარეშე და დენის გავლისას; i_x და $i_{x,lim}$ – გარე და ზღვრული დენის სიმკვრივე, რომელიც

გამოწყვეტლია ქიმიური რეაქციის მსვლელობის სიჩქარით. ქიმიური გადაძაბვა, დიფუზიურისგან განსხვავებით, დამოკიდებული არ არის სსნარის მორევის ინტენსივობაზე.

სტადია 3 – კათოდზე ლითონის იონთა განმუხტვის ელექტროქიმიური სტადია.



როცა $z > 1$ განმუხტვა ჩვეულებრივ მიმდინარეობს საფეხურეობრივად. დიფუზიური შეზღუდვებისა და გვერდითი რეაქციების არარსებობისას ლითონთა იონების აღდგენის სიჩქარე დამოკიდებულია მათ C_M^{z+} სსნარში კონცენტრაციაზე და განმუხტვის სტადიაზე η გადაძაბვაზე, რომელიც განპირობებულია ელექტროდელექტროლიტ საზღვარზე მუხტის გადატანით.

$$i = nFkC_M^{z+} + e^{-\beta nF/RT} = i_0 e^{-\beta nF/RT}$$

ამ განტოლების η მიმართ ამოხსნით, ვდებულობთ ტაფელის განტოლებას

$$-\eta = (RT/\beta nF) \ln (i/i_0) = a + blgi$$

აქ β - გადატანის კოეფიციენტია;

$$a = - (RT/\beta nF) \ln i_0 = (b/\beta n) \lg i_0$$

სტადია 4 – ლითონის აღდგენილი შხამ-ატომების $(M^0)_{ad}$ მიგრაცია კათოდის ზედაპირზე და მათი კრისტალიზაცია. ფაზური გადაძაბვა η_f , რომელიც დაკავშირებულია კრისტალური მესრის აგების სირთულეებთან, შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი განტოლების სახით

$$\eta_f = (RT/nF) \ln(C_{ad,i}/C_{ad})$$

სადაც C_{ad} და $C_{ad,i}$ - ლითონთა შხამ-ატომების კონცენტრაცია დენის გარეშე და დენის გავლისას.

ელექტროარულ აქტებს, რომლებიც აკონტროლებენ მე-4 სტადიას და კომპაქტური ფენის მიღების მთელ პროცესს, წარმოადგენენ შემდეგი პროცესები: შხამ-ატომთა მიგრაცია; მათი შესვლა (განთავსება) კრისტალური მესრის სიბრტყეზე, წიბოზე, წვეროზე; ჩანასახების წარმოქმნა და ა.შ.

ლითონთა კათოდურ გამოყოფაზე ზემოქმედებას ახდენენ შემდეგი ფაქტორები;

კათოდური დენის სიმკვრივე: ეს წარმოადგენს ძირითად ფაქტორს. კათოდური დენის ოპტიმალური სიმკვრივე განისაზღვრება კათოდური პოლარიზაციული მრუდებისა და ეფექტური დენის მნიშვნელობების (დენის მიხედვით გამოსვლა) ანალიზიდან, რომელიც მიღებულია ექსპერიმენტალურად რამოდენიმე კათოდური დენის სიმკვრივისას ლითონის ელექტროდაფენის გზით. უპანასკნელი ჩვეულებრივ აირჩევა ლოგარითმულ მასშტაბში.

ლითონის ბუნება. ლითონები გაცვლით დენზე დამოკიდებულებით იყოფიან სამ ჯგუფად: **პირველი ჯგუფი:** ოქრო, ვერცხლი, ვერცხლისწყალი, ტელური, ტალიუმი, ინდიუმი, ტყვია, კადმიუმი, კალა, სპილენძი, ბისმუტი, თუთია: გამოყოფის მცირე გადაძაბვა (ერთეული და ათეული მილივოლტი), დიდი გაცვლითი დენი (01 – 500 მა/სმ²), დალექცის მარცვლების დიდი ზომები (1 – 10 მკმ და მეტი)

მეორე ჯგუფი: რკინა, ნიკელი, კობალტი, ქრომი, პლატინა, როდიუმი, და სხვ: გამოყოფის დიდი გადაძაბვა (ასეული მილიგოლტი), მცირე გაცვლითი დენი (0.1 – 10 მკა/სმ²) მცირე მარცვლები (0.1 მკმ – ზე ნაკლები)

მესამე ჯგუფი: - მოლიბდენი, ვოლფრამი, ტიტანი, გერმანიუმი, ტანტალი და სხვა ლითონები, რომლებიც წყალსანარებიდან სუფთა სახით არ გამოიყოფიან.

pH -ის ზეგავლენა.

კათოდური აღდგენის კინეტიკაზე, ასევე ლითონის დაფენის ხარისხზე და დენის ეფექტურობაზე არსებით გავლენას ახდენს ხსნარის pH. მჟავე გარემოში, მცირე pH-ისას ლითონის გამოყოფას (განსაკუთრებით მეორე ჯგუფის ლითონების), თან ახლავს წყალბადის გამოყოფა, რაც ამცირებს (ზოგჯერ კი ძალიან ძლიერად), დენის ეფექტურობას და აუარესებს დალექცის ხარსხს. მასში წარმოიქმნება მექანიკური გადაძაბვა, ბზარები, ფერერი ფენა. ხსნარის pH -ისა და კათოდური დენის (ამ უპარასენელი გაზრდა იწვევს pH-ის ზრდას კათოდურ არეში H⁺ იონების განმუხტვის შედეგად) მომატებით იზრდება ჰიდროქსიდების წარმოშობისა და მათი ლითონურ დანალექში ჩართვის ალბათობა, რაც წვეულებრივ დაუშვებელია. აქედან გასაგებია, რომ pH -ის ოპტიმალური მინიშვნელობა მოიცემა მცირე დიაპაზონში, კათოდური დენის სიმკვრივის მნიშვნელობის, ხსნარის შემადგენლობისა და დაფენადი ლითონის თვისებების გათვალისწინებით. ელექტროლიზის პროცესში pH-ის მუდმივი მნიშვნელობის შესანარჩუნებლად ელექტროლიტიში

შეჰყავთ ნივთიერება, რომელიც ახდენს pH-ის ცვლილების ბუფერირებას. მაგალითად, ცნობილ ნიკელირების სულფატურ ელექტროლიტიში შეჰყავთ 30 გ/ლ ბორის მეტა ｐH-ის 5.0–5.5 დიაპაზონში შესანარუნებლად [21, 28].

სსნარების სისუფთავე ახდენს არსებით ზეგავლენას ლითონთა ელექტროდაფენის პროცესზე, მიღებული ფენის თვისებებზე და მის ნახევარგამტართან კონტაქტის ხარისხზე. ზედაპირულად-აქტიური და მაღალმოლექულური ორგანული ნივთიერებები, ისეთები როგორიცაა, ლაურილსულფატი, α -ნაფტოლი, ტრიბენზილამინი, ტეტრაბუთილამონიუმი, პარატოლუიდინსულფომევა, ჟელატინი და სხვა. კათოდის ზედაპირის აქტიურ უბნებზე ადსორბირებისას, თუნდაც მცირე რაოდენობის შემთხვევაშიც კი (ნაკლები ვიდრე 0.01 მოლ/ლ) ამცირებენ ლითონის გამოყოფის სიჩქარეს და საშუალებას იძლევიან მიღებულ იქნას პრიალა, მბრწყინავი ფენები. ამ მინარევებმა და ასევე წყლის, რეაგენტების, აპარატურის, სხვა დაბინძურებებმა ლითონის დალექილ ფენაში ჩანერგვისას, შეიძლება არსებითად გააუარესონ ლითონის და კონტაქტის თვისებები. ლითონთა კათოდურ გამოყოფაზე ზემოქმედებას ახდენს ასევე სსნარის შემადგენლობა და სსარში კომპლექსების წარმოქმნა.

ლითონთა და ნადნობთა ელექტროდაფენის კინეტიკა ნაკლებადაა დამოკიდებული ნახევარგამტარული კათოდის თვისებებზე. ამასთან კათოდურ პროცესებში ნახევარგამტარებზე და წარმოქმნადი კონტაქტების თვისებებში დაიმზირება შემდეგი თავისებურებები:

დალექვის დენის დაბალი სიმკვრივე, ლითონის ფირის შეჭიდების (აღგეზია) დაბალი სიმტკიცე, განსაკუთრებულად ეს ვლინდება მცირედლეგირებად ნახევარგამტართან, კათოდური გადაძაბვის დამოკიდებულება ნახევარგამტარის კრისტალოგრაფიულ ორიენტაციაზე და ასევე მისი დონორული მინარევით ლეგირების ხარისხზე, ლითონ-ნახევარგამტარული კონტაქტურის უნიპოლარული გამტარებლობა.

3.1 ელექტროლიტის შერჩევა და ლითონთა დაზენის პირობები

ელექტრონულად დაფენადი ლითონის დაფენის ხარისხზე და ელექტრონულად დაფენილი ლითონ-ნახევარგამტარის გამმართველი კონტაქტების ვოლტამპერულ მახასიათებელზე, განსაკუთრებით კი მათ უპუდენებზე, არსებით ზეგავლენას ახდენენ გამტარებლობის ტიპი და მუხტის მატარებელთა კონცენტრაცია (დონორული მინარევით ნახევარგამტარის ლეგირების ხარისხი), დაუანგვის პროდუქტების ფირის სისქე და ზედაპირის შემადგენლობა, ელექტროლიტის შემადგენლობა, მისი სისუფთავე, ელექტროლიტის პირობები, შემდგომი თერმოდამუშავება.

ოქსიდური ზედაპირული ფირები, რომელთა სისქე აღემატება 10 – 100 ნმ-ს განსაკუთრებით უშლიან ხელს ნახევარგამტარზე ლითონების (ასევე ნადნობების) ელექტროდაფენას და აუარესებენ კონტაქტების ვოლტამპერულ მახასიათებლებს [21].

ელექტროლიტების შერჩევისას უპირატესობა ენიჭება ელექტროლიტებს, რომლებიც შეიცავენ ფტორიდიონებს (გერმანიუმი სილიციუმისათვის) ან დაფენადი ლითონის კომპლექსურ იონებს. ოპტიმალური შედეგების მისაღებად აუცილებელია საწყისი რეაქტივების და გამხსნელების მაღალი სისუფთავე და არაკოროდირებადი ანოდი (საუკეთესო ანოდია – სპექტრალურად სუფთა, ნახშირის ანოდი). ამიტომაც ნახევარგამტარზე ლითონების ელექტროდაფენისას ჩვეულებრივ თავს არიდებენ ელექტროლიტში შემავალ კომპონენტთა სიმრავლეს. განსაკუთრებით არასასურველია ელექტროლიტში სპილენძის იონთა მინარევი. მაღალ ტემპერატურებზე ის ძალზე აქტიურია, მოძრავია და ლითონების დაფენისას არღვევს გამმართველ კონტაქტებს [24,28].

ნახევარგამტარზე ელექტრონულად დაფენადი ლითონის ან ნადნობის შერჩევა დამოკიდებულია იმ მოთხოვნებზე რომელიც წაეუქნება მიღებად სტრუქტურას. ლითონის (ნადნობის) ბუნება, რომელიც ეფინება ისეთ ნახევარგამტარებზე როგორიცაა გერმანიუმი, სილიციუმი, გალიუმის არსენიდი და სხვ., არ ახდენს ისეთ განმსაზღვრელ ზეგავლენას ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე, კერძოდ, კი ბარიერის სიმაღლეზე, რომელიც გამომდინარეობს ნახევარგამტარულ ფიზიკაში არსებული უნიპოლარული გამტარებლობის თეორიიდან.

ომური კონტაქტების დამზადებისას უპირატესობას ანიჭებენ, პირველ რიგში, პლასტიკურ ლითონებს, რათა თავიდან აცილებულ იქნას მექანიკური დაძაბულობები და სტრუქტურული დარღვევები, მეორე რიგში, კი იმ

ელემენტებს რომლითაც დეგირებულია ნახევარგამტარი, ან იმ ელემენტებით, რომლებიც მასთან იმყოფებიან პერიოდული სისტემის ერთ ჯგუფში. p-ტიპისთვის ის ჩვეულებრივ არის ინდიუმი, თუთია, კადმიუმი, კალა, ტყვია, და მათი ნადნობები, n-ტიპისთვის – ბისმუტი, ტელური ან მისი ნადნობი ვერცხლთან, ან ოქროსთან.

გამმართველი კონტაქტების დამზადებისას ძირითადად n-ტიპის ნახევარგამტარებზე (გერმანიუმი, სილიციუმი, გალიუმის არსენიდი და სხვ), ელექტროდაფენისას უპირატესობას ანიჭებენ ძნელადდნობად ლითონებს და ნადნობებს, რომლებიც მდგრადია ღენის მაღალი დატვირთვებისადმი და რომელთაც გააჩნიათ მცირე წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი. უპირველესად ეს არის ნიკელი, ქრომი, პლატინისებრი ლითონები, ნიკელის ვოლფრამთან ნადნობი და სხვ.

ნახევარგამტარზე (ნ/გ ფუძეშრეზე) ლითონის ელექტროლიტურად დაფენის პროცესზე გავლენას ახდენს მარავალი ფაქტორი: ელექტროლიტის შემადგენლობა, ელექტროდის მასალის ქიმიური შემადგენლობა, მოცემულ ელექტროლიტში ელექტროდული პოტენციალი, ელექტროლიტში გამავალი ელექტრული დენის მნიშვნელობა და მიმართულება, ელექტროლიტის ტემპერატურა და სხვა.

ლითონების გაღვანური დაფენის პროცესების განხორციელებისას განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიექცეს გამოყენებული ელექტროლიტების სისუფთავეს. დამზადებულ ელექტროლიტში არ უნდა იყოს მინარევები, რომლების შეცვლიან დაფენადი ფირების (ფენების)

შემადგენლობასა და მათ ელექტროფიზიკურ თვისებებს. ასე, მაგალითად ელექტროლიტი დონორული მინარევების არსებობა იწვევს იმას, რომ ხერელური გამტარობის მქონე ნახევარგამტარულ მასალაში ვერ მივიღებთ კარგ ომურ კონტაქტებს. ელექტროლიტი სხვა (გვერდითი) მინარევების არსებობამ შეიძლება გამოიწვიოს ფენების განშრევება, ლითონური ფენის გამოპერვა, დაფენადი შრის (ფენის) სისქის არაერთგაროვნება. (მინარევები ელექტროლიტი შეიძლება აღმოჩნდენ ლითონის, სპილენძის, ბრინჯაოს, ნიკელის, ალუმინის და სხვა სახის ჭურჭლიდან, რომელშიც ის დროებით იმყოფებოდა. ამიტომაც ნახევარგამტარული მოწყობილობის დამზადებისას ელექტროლიტები უნდა მომზადდეს და შეინახოს მხოლოდ კერამიკულ, შუშის, ვინიპლასტურ, კვარცის ან ფტოროპასტურ ჭურჭელში. ელექტროლიტი მინარევები შეიძლება მოხვდეს წყლიდანაც, რომელიც წარმოადგენს მის შემადგენელ ნაწილს. ჩვეულებრივი საყოფაცხოვრებო მოხმარების წყალი ასევე დისტილირებული წყალიც კი შეიცავს დიდი რაოდენობით სხვადასხვა ლითონთა იონებს. ამიტომაც ნახევარგამტარულ წარმოებაში ელექტროლიტების დასამზადებლად იყენებენ მხოლოდ დეიონიზირებულ წყალს [23-24].

გარდა ამისა, ელექტროლიტი არასასურველი მინარევები შეიძლება მოხვდეს ანოდის მასალიდანაც, ამიტომაც აუცილებელია მისი სისუფთავისა და შემადგენელი კომპონენტების კონტროლირება. მინარევების მოსაცილებლად, რომლებიც შესაძლებელია აღმოჩნდეს მისი მექანიკური დამუშავებისას (შტამპირების, ხარატული დამუშავებისას და ა.შ)

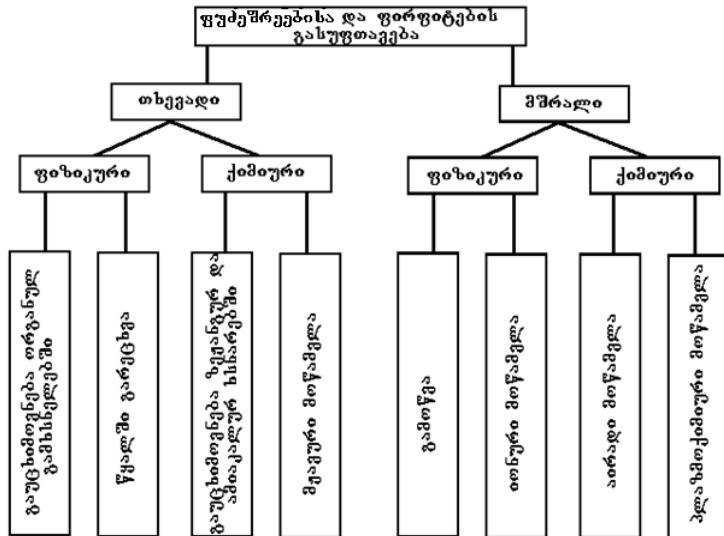
დამზადებულ ანოდებს უტარებენ სპეციალურ მოწამვლას და საგულდაგულოდ რეცხავენ დეიონიზირებული წყლით [24,27].

ცხრილი I. ნახევარგამტარული ფუძეშრევების და ფირფიტების ტიპიური დაბინძურების წყაროები

დაპირისპირება	შესაძლო მტაროები
გრაჭკო (ცეილონი, ცელულუზა და ა.შ)	ტანსაცემელი, ქსოვილი, ჰალალის ნაკვირებები
სილიკატები	მინეს ქანები, ქვიშა, ნიადაგი, ნაცარი, ვერცხლი
მქანები	ზოგიერთი ლითონითა ქანების პროდუქტები
ზეთები და ცხინვები	მანქანური დამუშავების ზეთები, თითის ანაგვჭდები, ცხინვები სებულის ღია ნაყილებიდან, თმის მოვლის საჭულებები, გადამოები, ლისირნები
სილიკონები	აეროზოლებით მიმგასინვის, პრიმები, ხელის ლისირნები, საკრები
ლითონები	მანქანური დამუშავებისა და გამლივვის ზენდილები და ნარჩენები; ლითონის ქილის ნაყილდაკები
0196-ით მინარევები	სპირიტის არომატები, თითის ანაგვჭდები (ნატრიუმის ქლირიდი); მინარევები გამჭვიდვი სხნარებიდან, რომლებმიც შეიცავს 0196-ის დეტერგენტებს; მინარევები ზონასარი ძიმიური რეარაციებისან, ისეთები, როგორიცაა მოწამელა და ლილინიაცია
არა0196-ით მინარევები	არა0196-ით დეტერგენტები, დასამუშავებლად გამოყენებადი ლიგანული მასალები
სსნადი მინარევები	გამჭვიდვი გამხსნელები და სსნარები

ზედაპირული დაბინძურებების მოსაცილებლად გამოიყენება სხვადასხვა მეთოდები, რომელთა ფიზიკურ პრინციპებზე შეიძლებავებენ გასუფთავების პროცესებს. პროცესების მსვლელობის მექანიზმის მიხედვით გასუფთავების უკელა მეთოდი კლასიფიცირდება ორ

ჯგუფად ფიზიკურად და ქიმიურად, ხოლო გამოყენების საშუალებების მიხედვით კი – თხევადად მშრალად (ნახ.4).



სურ. 4. ფუძემშრების (ფირფიტების) გასუფთავების მეთოდთა კლასიფიკაცია

ამოსავალ ნივთიერებებს, რომლებიც გამოიყენება ელექტროლიტების დასამზადებლად, უყენებენ სფერიკურ მოთხოვნებს, რომელიც დაკავშირებულია დაფენის ტექნოლოგიურ პროცესთან: თბომედებობა, მჟავებში, ტუტებში და წყალში ხსნადობა, მდგრადობა დღის სინათლისადმი, მდგრადობა ხანგრძლივად შენახვაზე, დროში შემადგენლობის უცვლელობა და ა.შ. მასალები, რომლისგანაც მზადდება ელექტროლიტი, არ უნდა გამოილექტოდეს ნაწილებთან ურთიერთქმედებისას.

ელექტროლიტურ დაფენის რეჟიმის ცვალებადობისას (ტემპერატურა, დენის სიმკვრივე, ურთერშერევის სიჩქარის (მორევის) ცვლილება და სხვ) ელექტროლიტი არ უნდა წარმოქმნიდეს ბუშტუკებს, მყარ დანალექებს და აირად გამონაყოფებს [25-26].

ელექტრული დენი, რომელიც გადის ელექტროლიტში დაფენის პროცესისას, შეიძლება იყოს მუდმივი (დროში არაცვალებადი) ასევე ცვალებადიც (დროის მიხედვის გარკვეული სახით ცვალებადი). ელექტრული დენის შერჩევა ხდება დაფენის მოთხოვნების, და სასურველი შედეგების მიღების შესაბამისად.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე გალვანური დაფენის პროცესი შეიძლება დაიყოს ოთხ სტადიად. პირველი სტადია მოიცავს ელექტრული დენის ზემოქმედებით ელექტროლიტის მოცულობაში ლითონის დამუხტული იონების წარმოქმნას. მეორე სტადია მდგომარეობს ლითონის დამუხტული იონების ელექტროლიტის მოცულობიდან ნახევარგამტარულ საფენის ზედაპირზე (კათოდზე) გადატანაში. მესამე სტადია წარმოადგენს საკუთრივ ელექტროქიმიურ რეაქციას, რომლის მსვლელობისას დამუხტული იონები ნახევარგამტარულ საფენის ზედაპირზე გადაიქცევიან ადსორბირებულ იონებად და ატომებად. მეოთხე სტადიაზე მიმდინარეობს ნ/გ საფენის ზედაპირზე ადსორბირებული იონების დიფუზიის პროცესი ლითონური ფირის ზრდის ადგილებში. (მონაკვეთებში). ნახევარგამტარულ მოწყობილობებისა და ინტეგრალური მიკროსქემების წარმოებაში გამოიყენება სპილენძის, ვერცხლის, ოქროს,

კალის, თუთიის, კადმიუმის, ქრომის და ინდიუმის გალვანურად დაფენის მეთოდები [4, 25].

ამრიგად, დღეისათვის არსებულ, ნახევარგამტარზე ბარიერული და ომური კონტაქტების დამზადების სხვადასხვა ტექნოლოგიათაგან, ნახევარგამტარებზე ლითონების ელექტროქიმიური დაფენის მეთოდით შესაძლებელია მიღებული იქნას საჭირო მახასიათებელების მქონე ომური და ბარიერული კონტაქტები. მეთოდის უპირატესობას წარმოადგენს ის, რომ სხვა დანარჩენ მეთოდებთან შედარებით ის ყველაზე იაფი მეთოდია, რომელიც საშუალებას იძლევა მივიღოთ სისქის მიხედვით კონტროლირებადი ფენა რთული კონფიგურაციის ზედაპირზეც კი, არ საჭიროებს სპეციალურ დანადგარსა და ამასთან ვაკუმური დაფრქვევისგან განსხვავებით გამოირჩევა დასაფენი ლითონების ხარჯვის მიზერული რაოდენობით. გარდა ამისა, ელექტროქიმიური მოწამვლისა და ანოდირების პროცესებს, ნახევარგამტარზე ლითონების ელექტროქიმიურ დაფენებს ომური და გამმართველი კონტაქტების მიღების მიზნით გააჩნიათ განსაკუთრებული პრაქტიკული მნიშვნელობა ნახევარგამტარულ ნაერთების ბაზაზე აქტიური სტრუქტურების დამზადებისას. მეორეს მხივ ფიზიკური მოვლენებისა (ელექტროგამტარებლობა, ნახევარგამტარის შინაგანი სტრუქტურა, ზედაპირის სტრუქტურა) და ქიმიური პროცესების ერთობლივი ანალიზი საშუალებას იძლევა უფრო დრმად გავერკვეთ ნახევარგამტარული მასალების ბუნებაში, ზედაპირის მდგომარეობაში და მათზე გარემოს ზემოქმედების ხასიათში.

ლიტერატურა:

1. R. V. Ghita, C. Logofatu, C. Negrila, A. S. Manea, M. Cernea, M. F. Lazarescu Studies of ohmic contact and Schottky barriers on Au-Ge/GaAs AND Au-Ti/GaAs National Institute of Materials Physics, P. O. Box MG 7, Magurele, Bucharest, Romania ; Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 7, No. 6, December 2005, p. 3033 – 3037
2. Тагер А.С. // Литовский физический сборник. 1981. Т. XXI. № 4. С. 23.
3. В.А.Брук, В.В.Гаршенин, А.И.Курносов Производство Полупроводниковых Проборов; Профтехиздат, Москва 1963
4. В.А. Батенков Электрохимия полупроводников. Учеб. пособие. Изд. 2-е, допол. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2002. – 162 с
5. В. И. Старосельский “Физика полупроводниковых приборов” Москва. высшее образование · 2009
6. В.И.Гаман Физика Полупроводниковых Приборов Томск • 2000
7. Л.Д. Либов, С.С Мескин, Д.Н.Наследов, В.Е.Седов, Б.В.Царенков. ПТЭ, 1965, №4, 14
8. Стриха В.И. Контактные явления в полупроводниках Киев “Выща школа” 1982
9. С.Зи Физика “полупроводниковых приборов” Москва «Мир» 1984
10. Э.Х. Родерик - Контакты металл-полупроводник
11. В.А.Цымбал Исследование системы GaSb+Bi методом обратного рассеяния протонов, вопросы атомной науки и техники. 2001. №4
12. В. В. Чикун, А. Р. Крюков, Б. В. Маркин Влияние азотсодержащих соединений на параметры диодов шотки электронная техника. сер.электроника СВЧ, вып. 8(412), 1988, с.54-57ъ
13. В. А. Гуртов Твердотельная электроника Учебное пособие Петрозаводск 2004
14. Конюшков Г.В., Мусин Р.А. Специальные методы сварки давлением. Ай Пи Эр Медиа, 2009
15. Surface-Barrier Semiconductor Sensor Based on the GaP Schottky Contact, Laperaschvili T., Laperaschvili D.,and Immerlischvili I. Georgian Engineering News, N3, pp.64-70 (2004)
16. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. «Основы микроэлектроники» Радио и связь 1991

17. А. И. Костржицкий, В. Ф. Карпов, М. П. Кабанченко, О. Н. Соловьева Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме Машиностроение, 1991
18. А.И.Костржицкий,О.В.Лебединский. Многокомпонентные вакуумные покрытия, М.: Машиностроение, 1987
19. В.И.Смирнов Физико-химические основы технологии электронных средств, Учебное пособие Ульяновск 2005
20. Ф.А. Кузнецов, И.К. Игуменов, М.Л. Косинова, Н.Б. Морозова, В.И. Рахлин, Т.П. Смирнова, Н. И. Файнер CVD процессы в технологии приборов наноэлектроники. Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск
21. В.А. Батенков Электрохимия полупроводников. Барнаул – 2002
22. В. В. Кузнецов Определение pH Соросовский образовательный журнал, том 7 , № 4 , 2 0 0 1
23. International Union of Pure and Applied Chemistry Measurement of pH. DEFINITION,STANDARDS,AND PROCEDURES (IUPAC Recommendations 2002) Pure Appl.Chem., Vol.74, No.11, pp.2169–2200, 2002
24. Бахвалов Г.Т «защита металлов от коррозии», 1964, Металлургия.
25. А.И.Курносов, В.В.Юдин Технология производства полупроводниковых приборов и
26. К.Пирс, А.Адамс, Л.Кац, Дж.Цай, Т.Сейдел, Д.Макгиллис. Под редакцией С.Зи. Технология СБИС. М., "Мир", 1986
27. Беленький М.А., Иванов А.Ф. «Электроосаждение металлических покрытий».
28. Е.Берлин, Н.Морозовский, Л.Сейдман Электроника: Наука, Технология, Бизнес 2/2003
29. Угай Я.А.М Общая и неорганическая химия. Угай Я.А.М.: Высшая школа, 1997. - 527 с.

ს ა რჩ ე ვ ი

შესაბალი.....	3
დოლეუსტრული თხევადი პრისტალები ერთგანუომილებიანი ფოტონერი პრისტალები - ინფორმაციულ ტექნოლოგიებში 5	
საიროპირანების ნაწილებაზე ვოლფარგოვები ვოლფონგისათვის	233
კეტიროსტრუქტურული მზის ელემენტები	32
ტალღაგამტარების კლასიფიკაცია და არამრთებულების შემცველი სამართლიანი ტალღაგამტარის მოდელი	42
სტრუქტურული მოწყვესრიგებების გამოსწორების შემთხვევაში და მათი გავლენა აცილებულ ჰოლის ეფექტზე	700
გალიუმის არსენიდზე ლითონების ელექტროძირი და მიმიური დაფენა.....	788
ლითონისა და ნახევარბამტარის კონტაქტის გამოყენება ნახევარბამტარული მასალების აარაგერტოების შესასწავლად	92
გალიუმის არსენიდზე ზოტკის გარიერის უარმოქმნის მექანიზმები	109
გალიუმის არსენიდზე მცირევინადობიანი თმური კონტაქტების მიღება და კვლევა	121
თერმოდამუშავების გავლენა ნახევარბამტარისა და ლითონის კონტაქტის ვოლფელექტრულ მახასიათებლებზე	131
ტერაჟერცული სიხშირის გამომსხივებები და ვოლფონგი მიმღებები III-V ჯგუფის ნახევარბამტარების კვანტულურტილოვანი სტრუქტურების გაზარე.....	141
კომპენსირებული ნახევარბამტარების ვოლფბამტარება.....	152

ომური კონტაქტები III-V ჯგუფის ნახევარბამტარებელი.....	166
სამყდიცინო დანიშნულების მაბნიტური ნაწილითხვების სიცოვაზი	194
ნახევარბამტარზე პარიერული და ომური კონტაქტების დამზადების ტექნოლოგია	206

**საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის გლობალურ
ჟაგჰანიძის სახელობის პიბლიციტების ინსტიტუტი**

თბილისი 2011

08080808 აპტორთა მიერ ფარმაცებილი სახით

გადაეცა წარმოებას 01.03.2011 ხელმოწერილია დასაბეჭდად 02.05.2011. ქაღალდის ზომა 60X84 1/16. პირობითი ნატეჭდი თაბახი 16. ტირაჟი 100 ეგზ.

საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი”, თბილისი,
კოსტავას 77

