

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის
თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტის,
ელექტრული და ელექტრონული ინჟინერიის ბაკალავრიატის
გიორგი ხარხელის

სადიპლომო ნაშრომი

დიფუზიური პროცესების შესწავლა მყარ სხეულებში

ხელმძღვანელი:

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო

მეცნიერებათა ფაკულტეტის

ასოცირებული პროფესორი

ა. ბიბილაშვილი

თბილისი 2013

შინაარსი

ანოტაცია (ქართულად).....	3
ანოტაცია (ინგლისურად).....	4
შესავალი.....	5
1. ლიტერატურული მიმოხილვა	6
1.1 დიფუზიისა და დასხივების პროცესები.....	6-10
1.2 p-n გადასასვლელი.....	10-11
1.3 ფოტოლიტოგრაფია.....	12-13
2. ექსპერიმენტული მეთოდები.....	13-20
2.1 ნახევარგამტარული ნიმუშები და მათი ზედაპირების ქიმიური დამუშავება.....	14
2.2 p-n გადასასვლელის მიღების ტექნოლოგიური მარშრუტი.....	15
2.2.1 მასალის არჩევა.....	15
2.2.2 ქიმიური დამუშავება.....	15-16
2.2.3 ფოსფორო- და ბოროსილიკატური მინის დაფენა.....	16
2.2.4 ფოსფორის და ბორის დიფუზია.....	16-18
2.5 ფოსფორო- ბოროსილიკატური მინის მოხსნა.....	18
2.6 ალუმინის დაფენა.....	18
2.7 ალუმინის დიფუზია.....	18-19
2.8 დიფუზიის შემდეგ ალუმინის მოხსნა.....	19
2.9 ფოტოლიტოგრაფია.....	19-20
2.10 ზედაპირული წინაღობის და გამტარობის ტიპის განსაზღვრა.....	20-21
3. ექსპერიმენტული შედეგები და მათი ანალიზი.....	21-31
3.1 დიფუზია.....	21-22
3.2 ფოსფორის დიფუზია.....	23-24
3.3 ზედაპირული წინაღობის განსაზღვრა.....	24-26
3.4 მეტალის დაფენა.....	26-27
3.5 ალუმინის დიფუზია.....	27
3.6 ფოტოლიტოგრაფია.....	27-28
3.7 ფირის გამტარებლობის ტიპის დადგენა.....	28
3.8 დიფუზიური ფენის სისქის განსაზღვრა.....	28-29

3.9 ჩატარებული სამუშაოების შემდეგ ანალიზის გაკეთება.....	29-31
4. დასკვნა.....	31-32
ლიტერატურა.....	32

ანოტაცია

ნახევარგამტარული ხელსაწყოებისა და ინტეგრალური მიკროსქემის (იმს) ერთ-ერთ მთავარ კომპონენტს წარმოადგენს p-n გადასასვლელი, რომელიც ფორმირდება ერთი ტიპის ნახევარგამტარში ისეთი მასალის დიფუზიით, რომ შეიცვალოს მოცემული ნახევარგამტარის ტიპი. ამიტომ წინამდებარე საბაკალავრო სამუშაოს მიზანია: **დიფუზიური პროცესების ჩატარება p- და n-ტიპის სილიციუმის საფენზე, მასზე p-n გადასასვლელის მისაღებად.**

დასახული მიზნის მისაღწევად შემუშავდა ტექნოლოგიური მარშუტი, რომელიც ითვალისწინებდა p-n გადასასვლელის მიღებას: 1) დაბალტემპერატურული ფოტონური და 2) შედარებისთვის - ტრადიციული, მაღალტემპერატურული დიფუზიური პროცესების დამუშავებას. ორივე შემთხვევაში დიფუზიის წინა პროცესები ტარდებოდა ერთნაირად: ა) ნიმუშები ქიმიურად სუფთავდებოდა, ბ) ეფინებოდა p-ტიპის სილიციუმზე ფოსფორსილიკატური, ხოლო n-ტიპზე - ბოროსილიკატური მინა. დიფუზიური პროცესები ჩატარების შემდეგ გაზომილ იქნა დიფუზიური არის სიღრმე, ზედაპირული წინაღობა და გამტარებლობის ტიპი და გადაღებულ იქნა ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები.

ნაჩვენები იქნა, რომ დაბალტემპერატურული, ფოტონური დიფუზიით მიღებული არეები უფრო მკვეთრია და მაღალხარისხიანი.

ANNOTATION

Semiconductor devices and integrated circuits (IC) are one of the main components of the p-n junction, which is formed by diffusion different materials in the semiconductor to change type of semiconductor. **The aim of the present undergraduate work is: studying diffusion processes in p- and n-type silicon substrate and p-n junction.**

To achieve these goals were developed technological route, which includes p-n junction: 1) low- temperature photonic and 2) to compare – traditionally, high-temperature diffusion processes. In the both cases before diffusion processes samples were cleaned chemically, then on the p-type silicon was deposited phosphorosilicafilm , and on n-type silicon borosilicafilm. After diffusion process were measured diffusion depth, surface resistance, type of conductivity and current – voltage characteristic.

It was shown that in the low-temperature process diffusion areas received by photonic technique are more sharpness and high quality.

შ ე ს ა ვ ა ლ ი

მიკროდა ნანოელექტრონიკა მეცნიერების და ტექნიკის განვითარების ერთ-ერთი ყველაზე დინამიურად მზარდი და პერსპექტიული მიმართულებებია. მიკროელექტრონიკასთანაა დაკავშირებული ადამიანის მიერ კოსმოსის ათვისების დაწყება, თანამედროვე კომპიუტერული სისტემების, ინტერნეტის მობილური კავშირ-გაბმულობის სისტემების შექმნა და სხვა, რომელთა ჩამოთვლა შორს წაგვიყვანდა. მიკროელექტრონული სქემების და ნახევარგამტარული ხელსაწყოების ფუნქციონური განვითარების ძირითადი ტენდენციაა ინტეგრაციის ხარისხისა და სწრაფქმედების განუხრელი ზრდა, მათი შექმნის ტექნოლოგიის ტემპერატურის შემცირებით. ყოველივე ეს ხორციელდება მიკროსქემის ელემენტების გეომეტრიული ზომების შემცირებით და ტექნოლოგიაში ახალი დაბალტემპერატურული პროცესების დანერგვით. მიკრო და ნანოელექტრონული ხელსაწყოები ხასიათდებიან დაბალი ფასით, რადგან ისინი ერთ ტექნოლოგიურ პროცესში, ერთ ქვესაფენზე მზადდებიან (რამდენიმე ასეული).

ნახევარგამტარული ხელსაწყოებისა და ინტეგრალური მიკროსქემის (იმს) ერთ-ერთ მთავარ კომპონენტს წარმოადგენს p-n გადასასვლელი, რომელიც ფორმირდება ერთი ტიპის ნახევარგამტარში ისეთი მასალის დიფუზიით (ლეგირებით), რომ შეიცვალოს მოცემული ნახევარგამტარის ტიპი. ასე მაგალითად, p ტიპის სილიციუმის მისაღებად საჭიროა მასში შევიყვანოთ მენდელეევის სისტემის მე-3 ჯგუფის ელემენტი, ხოლო n- ტიპის მისაღებად - მე-5 ჯგუფის ელემენტი.

იმს-ის მიღების დღევანდელი დიფუზიური ტექნოლოგია მაღალტემპერატურულია, რომელიც ტარდება დიფუზიურ ღუმელებში 1150°C ტემპერატურაზე. მაღალ ტემპერატურაზე ხდება არასასურველი მინარევების დიფუზია, p-n გადასასვლელის არეების განრთხმა, საფენთან ადგეზიის გაუარესება და ა.შ. ამიტომ იმს-ის მიღების ერთ-ერთი მთავარი ამოცანაა მისი მიღების ტემპერატურის შემცირება. ამიტომ ჩვენი საბაკალავრო სამუშაოს მიზანია: დიფუზიური პროცესების ჩატარება საფენზე დიფუზანტის ფოტონური დასხივებით.

1. ლიტერატურული მიმოხილვა

1.1. დიფუზიისა და დასხივების პროცესები

ნახევარგამტარის ლოკალური უბნების ელექტრო-ფიზიკური თვისებების ცვლილება (ელექტრო გამტარებლობის ტიპი, ხვედრითი წინააღმდეგობა, არაპირითადი მატარებლების დიფუზიის სიგრძე და სიცოცხლის ხანგრძლივობა) შესაძლებელია ლეგირებით, ანუ მინარეული ატომების მასში კონტროლირებადი შეყვანით. იმის შესაძლებლობა ტექნოლოგიაში ძირითადად გამოიყენება მინარევით ლეგირების ორი მეთოდი – თერმული დიფუზია და იმპულსურ-ფოტონური დასხივება

ა) მინარევის თერმული დიფუზია.

მაღალ ტემპერატურაზე ($\sim 1000-1200^{\circ}\text{C}$) ნახევარგამტარის ზედაპირის გავლით მინარეული ატომები ვრცელდებიან მის მოცულობაში სითბური მოძრაობის შედეგად.

კრისტალურ მესერში მინარეული ატომის შეღწევა ძირითადად ხდება მესერის ვაკანსიებში თანმიმდევრული გადაადგილებით. შესაძლებელია აგრეთვე გადაადგილება კვანძთაშორის და შემდეგ ჩანაცვლება კვანძში. უნდა აღინიშნოს, რომ მინარეული ატომი ელექტრულად აქტიურია, ანუ არის ან დონორი, ან აქცეპტორი, მხოლოდ მაშინ, როცა ის არის კვანძში. შესაბამისად იმისათვის, რომ იქნას მიღებული ძლიერად ლეგირებული უბნები საჭიროა ვაკანსიის დიდი კონცენტრაცია ნიმუშის ზედაპირის უბანში. ტემპერატურის ზრდით იზრდება ვაკანსიების რიცხვი, თანახმად გამოსხივებისა:

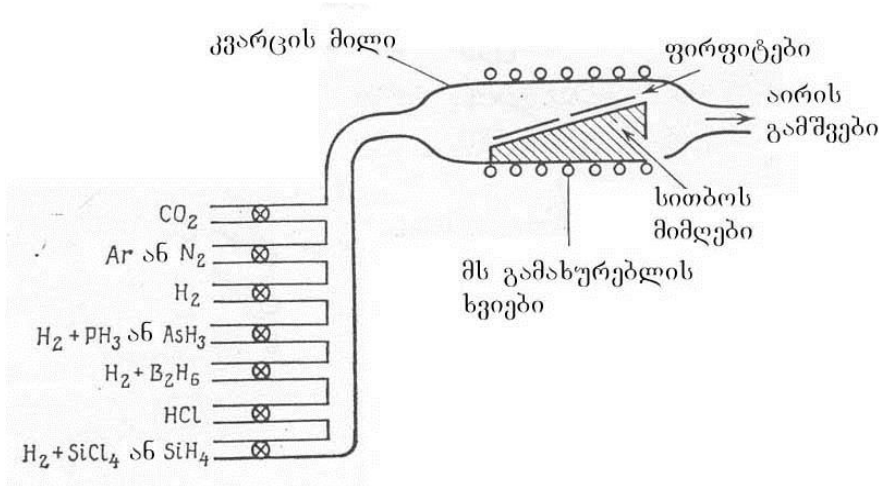
$$N_{\text{ვკ}} = N \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1.1)$$

სადაც N - კრისტალის კვანძებში მყოფი ატომების რიცხვია, E - ვაკანსიის შექმნის ენერგია, k - ბოლცმანის მუდმივა და T - აბსოლუტური ტემპერატურა. სითბური რხევების მოქმედებით მინარეულ ატომს შეუძლია დაიკავოს მეზობელი ვაკანსიის ადგილი და ასე გადაადგილდეს კრისტალში. კვანძიდან ვაკანტურ კვანძში მინარეული ატომის გადასვლის ალბათობა დამოკიდებულია მეზობლად ვაკანსიის არსებობის W ალბათობაზე და პოტენციალური ჯებირის გადალახვის ალბათობაზე, რომელიც არსებობს ატომსა და ვაკანსიის ადგილს შორის:

$$W \sim e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (1.2)$$

სადაც ΔE - დიფუზიის პროცესის აქტივაციის ენერგიაა, რომელიც შეიცავს ვაკანსიის გაჩენისა და მინარეული ატომის ვაკანსიაში ჩაჯდომის ენერგიებს.

დიფუზიის დანადგარის სქემა მოცემულია ნახ.1.1-ზე, რაზედაც შესაძლებელია შენაცვლებით ორივე პროცესის ჩატარება. თერმული დიფუზიის პროცესი ტარდება



ნახ. 1.1 დიფუზიის დანადგარის სქემა

კვარცის ლუმებში, სადაც მისაბმელ აპარატში იქნება შესაბამისი მინარევი ნაერთთან, რომელიც არის თხიერი, მაგალითად AsH_3 , B_2H_6 , BBr_3 , ან $POCl_3$.

სილიციუმში ბევრი მინარეული ატომი დიფუნდირებს კვანძთაშორის და ჩერდება მათში, ე.ი. ქმნიან ჩანერგვის მყარ ხსნარებს. რაგდგანაც ატომის კვანძთაშორის გადასვლის ალბათობა უფრო მეტია, ვიდრე კვანძიდან კვანძში, ამიტომ მინარევის ჩანერგვის დიფუზია უფრო სწრაფად მიმდინარეობს, ვიდრე ჩანაცვლების. დიფუზიის მეთოდით ნახევარგამტარში შეიძლება შევიყვანოთ მინარევი მოცემულ ტემპერატურაზე, ზღვრულ გამხსნელობაზე ნაკლები კონცენტრაციით. ნივთიერების დიფუზიური გადატანის პროცესების აღწერა შესაძლებელია ფიკის კანონებით.

დიფუზიის პირველი განტოლება (ფიკის I კანონი) განსაზღვრავს მინარეული ატომების ნაკადს მისი დიდი კონცენტრაციის უბნიდან ნაკლები კონცენტრაციის უბნისაკენ.

$$F = -D \frac{dN}{dx} \quad (1.3)$$

სადაც D - დიფუზიის კოეფიციენტი რიცხობრივად ტოლია მინარეული ატომების რაოდენობისა, გამავალი დროის ერთეულში დიფუზიის მიმართულების მართობ ფართის ერთეულში, როცა მინარეული კონცენტრაციის გრადიენტი $\frac{dN}{dx}$ ერთის ტოლია. ნიშანი მიუთითებს, რომ დიფუზია მიდის კონცენტრაციის შემცირების მიმართულებით.

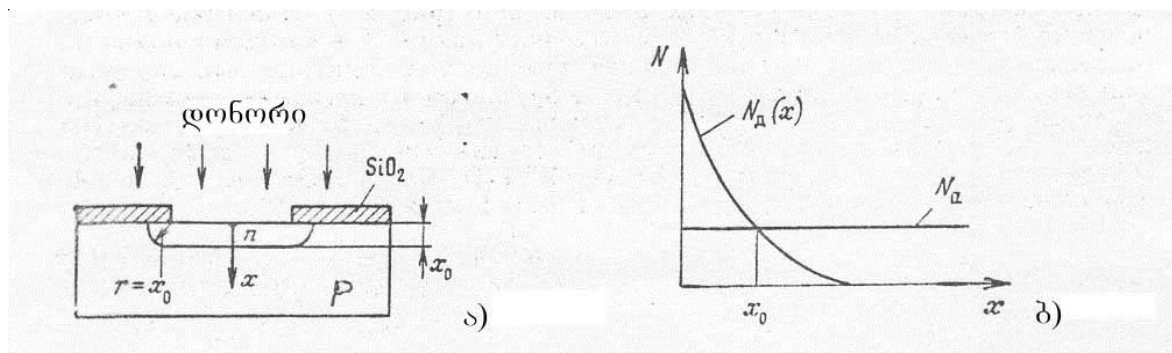
დიფუზიის მეორე განტოლება (ფიკის II კანონი) გადმოდის პირველიდან იმ დაშვებით, რომ დიფუზიის კოეფიციენტი არაა დამოკიდებული კონცენტრაციაზე:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (1.4)$$

ფიკის II კანონი გამოსახავს დიფუზიის ძირითად კანონს. ის განსაზღვრავს მოცემულ ტემპერატურაზე ნახევარგამტარში შეყვანილი მინარევის კონცენტრაციას დროის ნებისმიერ მომენტში, ზედაპირიდან ნებისმიერ მანძილზე.

ხშირ შემთხვევაში, მიკრო და ნანო იმს-ის ელემენტების შექმნისას დიფუზიურ პროცესებს ატარებენ ორ სტადიად. პროცესის პირველი სტადია, ე.წ. ზედაპირზე შედევნა, ეთანადება დიფუზიის უსასრულო წყაროს და დიფუზიანტი შედის ნახევარგამტარის მცირე შრეში; მეორე სტადია, ე.წ. ზედაპირიდან სიღრმეში განდევნა, ეთანადება დიფუზიას სასრული, პირველ სტადიაში შექმნილი წყაროდან. ამ დროს ხდება ზედაპირიდან განსაზღვრულ სიღრმემდე ნახევარგამტარში მინარევის გადანაწილება და ხდება ზედაპირული კონცენტრაციის შემცირება მოცულობაში მინარეული კონცენტრაციის გაზრდის შედეგად.

როგორც წესი, სილიციუმში მინარევის დიფუზია ხდება ლოკალურად, SiO_2 -ის ნიღაბის გამოყენებით, სისქით 0.5 მკმ (ნახ.1.2ა.). მინარევის კონცენტრაციაა



ნახ.1.2. დიფუზიის პროცესი (ა) და მინარევის განაწილება სიღრმეში (ბ).

მაქსიმალურ ზედაპირზე დაეცემა ფირფიტის მოცულობაში (ნახ.1.2.ბ). x_0 მანძილს, სადაც მინარეული დონორული კონცენტრაცია ემთხვევა საწყის აქცეპტორულ კონცენტრაციას ეწოდება დიფუზიური შრის სისქე. ამავე დროს ამ შემთხვევაში x_0 ეთანადება $p-n$ გადასასვლელის მეტალურგიულ საზღვარს. მინარევი ასევე დიფუნდირებს ნიღბის ქვეშ, $Si - SiO_2$ გამყოფი საზღვრის გასწვრივ თითქმის იგივე მანძილზე, რაც სიღრმეში (ნახ.1. 2. ა). ეს ეფექტი უნდა იქნას გათვალისწინებული იმის შემთხვევაში.

ბ) მინარევის იმპულსურ-ფოტონური დასხივებით დიფუზია

იმპულსურ-ფოტონური დამუშავება ხდებოდა დანადგარზე **PPAE-06** (სურ. 1) არამონოქრომატული გამოსხივების წყაროდ გამოყენებულია ჰალოგენური ნათურები KT-1000/220. გამოყენებული 19 ნათურიანი სექციის კონსტრუქცია იძლეოდა 100სმ^2 ზედაპირის თანაბარი დამუშავების საშუალებას. ნათურები განლაგებული იყვნენ პარალელურად მინიმალური დაშორებით. ნათურები მოთავსებულია კერსელის ყუთში რომელსაც აქვს კარგი ამრეკლი ზედაპირი. ფოტონური დამუშავების დროს ნიმუშები იმყოფებოდნენ ჰაერში. ნიმუშები თავსდებოდა ნათურების სექციის ქვეშ, სპეციალურ კვარცის სადგამებზე. მანძილი ნათურებსა და ნიმუშებს შორის შეადგენდა 3,3 სმ-ს.

PPAE-06 გვაძლევს საშუალებას ვცვალოთ გამოსხივების სიმძლავრე 1-დან 19 კვტ-მდე და იმპულსის ხანგრძლივობა 0,1 წმ-დან 1000 წმ-მდე 0,1 წმ-ის ბიჯით.

დასხივების პირობების დადგენა ხება იმისდა მიედვით თუ რა მასალებს ვასხივებთ და რა ფიზიკური პარამეტრების მიღება გვინდა. მაგალითად ეს იქნება სილიციუმში ალუმინის,



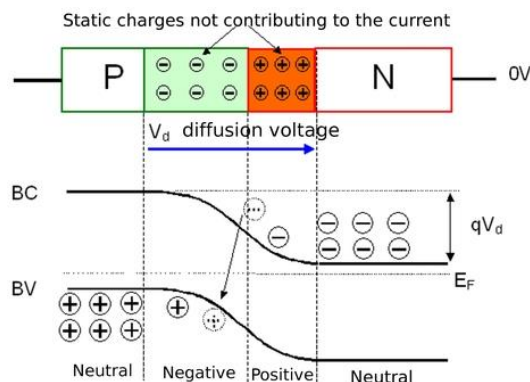
სურ. 1 იმპულსურ-ფოტონური დამუშავების დანადგარი PPAE-06

1.2. p-n გადასავლელი

ორი სხვადასხვა ტიპის გამტარებლობის ნახევარ გამტარი ქმნის p-n გადასავლელს. ისინი ხასიათის მიხედვით იყოფიან მკვეთრ და მდორე, სიმეტრიულ და ანტისიმეტრიულ გადასასვლელად. მკვეთრ p-n გადასასვლელების გამყოფ საზღვარზე დონორის კონცენტრაცია n-ტიპის ნახევარგამტარში და აქცეფტორების p-ტიპის ნახევარგამტარში ნახტომისებურად იცვლებიან. ასეთ შემთხვევაში ერთ მხარეს არის დონორები მუდმივი n_a კონცენტრაციით, მეორე მხარეს აქცეფტორები მუდმივი კონცენტრაციით n_d . ასეთი გადასასვლელები არის მარტივი ანალიზისთვის. მდორე p-n გადასასვლელში არის კონცენტრაციის გრადიენტი. სიმეტრიულ p-n გადასასვლელში მინარევები ორივე მხარეს თითქმის ერთნაირადაა შეყვანილი. ისე რომ სრულდება პირობა: $n_{dn} \approx n_{ap}$, სადაც n_{dn} და n_{ap} მინარევების კონცენტრაციებია შესაბამის შრეებში. ასეთი გადასასვლელები არ გამოიყენებიან ნახევარგამტარულ ტექნოლოგიებში. ასიმეტრიული p-n გადასასვლელების

შემთხვევაში მინარეული კონცენტრაციები განსხვავდება 2–3 რიგით და აღნიშნავენ $n^+ - p$ ან $p^+ - n$ -ით სადაც + აღნიშნულია შრე უფრო დიდი მინარეული კონცენტრაციით. ასეთები გამოიყენებიან ძალიან ხშირად ნახევარგამტარულ ტექნოლოგიებში.

ორი სხვადასხვა გამტარებლობის ტიპის ნახევარგამტარების შეხებისას, რადგან n შრეში ელექტრონების კონცენტრაცია ბევრად მეტია, ვიდრე p შრეში, n შრიდან დაიწყება ელექტრონების დიფუზია p შრეში. ამიტომ p -ტიპის ნახევარგამტარის ზედაპირისწინა უბანში დაგროვდება ჭარბი ელექტრონები, რომლებიც მოახდენენ რეკომბინაციას ხვრელებთან მანამ, სანამ არ დამყარდება წონასწორობა. შესაბამისად ამ უბანში შემცირდება ხვრელების კონცენტრაცია და დარჩება მხოლოდ არაკომპენსირებული უარყოფითი მუხტი. მსგავსათ ამისა, n შრეში იქნება დონორული ატომების არაკომპენსირებული დადებითი მუხტი, ანუ იქ საიდანაც წავიდნენ ელექტრონები. ანალოგიურად შეგვიძლია ჩავატაროთ მსჯელობა p შრიდან დიფუნდირებული ხვრელებისათვის, მაგრამ ცალმხრივ გადასასვლელში, სადაც $p_{p0} \ll n_{n0}$ ხვრელების დიფუზია გაცილებით მცირეა n შრიდან, ვიდრე ელექტრონების დიფუზია (ნახ.1.7). ზედაპირისწინა არეებში შექმნილი სივრცული მუხტი ქმნის გაღარიბებულ უბნებს, სადაც არიან მატარებლების კონცენტრაციები შემცირებული ძვრადობით. უშუალოდ შემხებ ზედაპირს ეწოდება მეტალურგიული ზედაპირის გამოყოფს ერთმანეთისგან ამ გაღარიბებულ უბნებს. p - n გადასასვლელი მთლიანობაში ნეიტრალურია, რადგან n შრეში დადებითი მუხტი p შრეში უარყოფითი მუხტის ტოლია. მაგრამ მუხტის სიმკვრივე მკვეთრად განსხვავდება, რადგან მინარევის კონცენტრაცია არის სხვადასხვა. ეს თავს იჩენს იმაში, რომ სხვადასხვა გაღარიბების უბნის შედგენის სიღრმეები.



ნახ. 1.3 p - n გადასასვლელის ელექტრული სახე

ელექტრონების გადასვლა შეწყდება მაშინ, როცა მოცულობითი მუხტების პოტენციალთა სხვაობა გააკომპენსირებს გამოსვლის მუშაობათა სხვაობას. ამ შემთხვევაში ფერმის დონე n და p ნახევარგამტარში წონასწორობისას იქნება ერთ სიღრმეზე.

1.3 ფოტოლიტოგრაფია

ინტეგრალური მიკროსქემის (იმს) შექმნაში ლიტოგრაფიას უკავია წამყვანი ადგილი. ლიტოგრაფიის პროცესი ნიშნავს შაბლონიდან სურათის დიდი სიზუსტით გადატანას ფირფიტის ზედაპირზე. მისი საშუალებით ხდება „ფანჯრების“ გახსნა ნიღბის ფირფიტაში, რომელშიც ხდება მინარევის დიფუზია ან ლეგირება, შემდეგ დიელექტიკული ფირფიტისათვის საჭიროა ფორმისა და ზომის მიცემა და მეტალიზაცია .

ფოტოლიტოგრაფია დაფუძნებულია ფოტომგრძობიარე პოლიმერული მასალის – ფოტორეზისტის გამოყენებაზე, რომელიც შეიძლება იყოს პოზიტიური და ნეგატიური. ფოტოლიტოგრაფიაში გამოყენებული ფოტორეზისტები მგრძობიარენი არიან ულტრაიისფერი გამოსხივების მიმართ 350–450ნმ ტალღის სიგრძის ინტერვალში. მათში შეყვანილია სპეციალური მინარევი ფირფიტის ზედაპირზე მათი ადგეზიის გაუმჯობესებისათვის და მაღალ ტემპერატურაზე მჟავების და ტუტეების მოქმედების მედეგობის ხარისხის ამაღლებისათვის. ფოტორეზისტის დასხივებისას ხდება ქიმიური ბმის გაწყვეტა. ამის შემდეგ დასხივებული არეების მედეგობა მცირდება გამსხსნელის მიმართ. გამსხსნელის მიმართ რეაქციისას მიიღება ადვილად აქროლებადი ნაერთი, რაც საერთო ჯამში იძლევა ფოტორეზისტის მთლიანად მოცილებას ზედაპირიდან. ფირფიტის ზედაპირზე მიღებული ფოტორეზისტის ლოკალური არეები იმეორებენ ფოტოშაბლონის სურათებს.

ფოტოლიტოგრაფიის პროცესი მიმდინარეობს შემდეგი თანმიმდევრული სტადიებით: 1)ნახევარგამტარული ქვესაფენის დაქანგვა; 2) მასზე ფოტორეზისტის დატანა; 3) ფოტოშაბლონის გამოყენებით ფოტორეზისტის ლოკალური დასხივება ულტრაიისფერისხივით, ანუ ექსპონირება; 4) ფოტორეზისტის გამჟღავნება და გამაგრება და 5) ფოტორეზისტით დაუცველ არეებში ჟანგის ფირის ამოწმვლა, რის შემდეგაც მიიღება ლოკალურად ჟანგით დამცავი ნიღაბი.

ყოველივე ამ სტადიის პროცესებში მოქმედებენ ფაქტორები, რომლებიც ამახინჯებენ ფოტოშაბლონის საბოლოო, საჭირო სურათს.

მაშასადამე, ფოტოშაბლონიდან სურათს ელემენტის ზუსტი გადატანისთვის ფირფიტის ზედაპირზე ფოტოლიტოგრაფიის პროცესს უნდა ქონდეს მთლიანობაში შესაბამისი გარჩევის უნარიანობა. მას აფასებენ $1\mu\text{m}$ -ში მოთავსებული ხაზების მაქსიმალური რიცხვით:

$R=1000/2a_{\text{min}}$ სადაც a_{min} ხაზის სიგანეა [მკმ]-ში. პრაქტიკაში ხშირად გარჩევის უნარიანობას აფასებენ უბრალოდ a_{min} სიდიდით.

ფოტოლიტოგრაფიაში ფოტოშაბლონი არის ძირითადი ინსტრუმენტი, მისი საშუალებით ხდება ფოტორეზისტის ლოკალური დასხივება და იმს-ის ტოპოლოგიის ზუსტი გადატანა ფირფიტის ზედაპირზე. იმს-ის შექმნისათვის საჭიროა მრავალჯერადი

ფოტოლიტოგრაფია, ფოტომაბლონების კომპლექტის გამოყენებით. ის არის ბრტყელ-პარალელურიანი მინის ან კვარცის ფირფიტადაფარული საჭირო კონფიგურაციის, ულტრაიისფერი სხივისთვის გაუმჭვირვალე და ა.შ. ფირფიტით. ფოტომაბლონის კომპლექტის დამზადების პროცესი იწყება იმს-ის ტოპოლოგიური ნახაზის –ფოტოორიგინალის შექმნით შესაბამისი შრეების მიხედვით.

იმს-შექმნისას ხდება მრავალჯერადი ფოტოლიტოგრაფია შესაბამისი ფოტომაბლონის გამოყენებით. ამიტომ არსებითია ფოტომაბლონის ზუსტი შეთავსება ფირფიტაზე წინა ფოტოლიტოგრაფიით შექმნილ სურათთან. წინააღმდეგ შემთხვევაში ის არ იმუშავებს. ზუსტი შეთავსებისათვის ყოველ ფოტომაბლონზე გათვალისწინებულია სპეციალური ნიშნების მოთავსება, რომლებიც ზუსტად მეორდებიან და გადადიან ფირფიტის ზედაპირზე. ფოტომაბლონის ფირფიტის ზედაპირზე დადებისას, უთავსებენ წინა ლიტოგრაფიით მიღებულ ნიშნებს და ამ ფოტომაბლონის ნიშნებს ერთმანეთს და ამით აღწევენ შეთავსების სიზუსტის გაზრდას.

2. ექსპერიმენტული მეთოდისა

2.1. ნახევარგამტარული ნიმუშები და მათი ზედაპირების ქიმიური დამუშავება

ექსპერიმენტისთვის გამოყენებული იყო სილიციუმის ფირფიტა n ტიპის გამტარებლობის ხვედრითი წინააღმდეგობით 4.5 ომი.სმ, p ტიპის გამტარებლობის ხვედრითი წინააღმდეგობით 10 ომი.სმ, (100) ზედაპირული ორიენტაციით და 14 კლასის სისუფთავით.

ექსპერიმენტების წინ ტარდებოდა სილიციუმის ზედაპირის სტანდარტული ქიმიური დამუშავება, რადგან ფირფიტის ზედაპირზე, გაუწყვილებელი ქიმიური ბმის გამო, ყოველთვის არსებობენ ატმოსფეროდან მოხვედრილი ცხიმოვანი ზეთები და სხვადასხვა ქიმიური ელემენტები, რომლებიც ქმნიან ზედაპირზე „საკუთარ ჟანგს“.

განცხიმვა შესაძლებელია წარიმართოს ისეთ ქიმიურ ნაერთში, რომელიც შლის ცხიმის მოლეკულებს, მაგრამ არ ახდენს გავლენას დასამუშავებელ ფირფიტაზე. ხსნარში გადადიან დაშლის რეაქციის პროდუქტები, რის შედეგადაც უკურეაქცია არ ხდება. განცხიმვის მიზნით საჭიროა ტოლუოლში დუღილი 5 წუთის განმავლობაში.

გარეცხვა გამდინარე დეიონიზებულ წყალში 15 წუთი და შემდეგ ცენტრიფუგაზე გამრობა.

ფირფიტის ზედაპირიდან არასასურველი, უკონტროლო „საკუთარი ქანგის“ მოწამვლა ხდება:

1. მოწამვლა ქიმიურ ნარევი: $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O = 350 : 1500 : 560$ (მლ) 5 წუთის განმავლობაში;

2. მოწამვლა ქიმიურ ნარევი $NH_4OH : H_2O_2 : H_2O = 400 : 200 : 400$ (მლ), 10 წუთის განმავლობაში, დეიონიზირებულ გამდინარე წყალში გარეცხვა 15 წუთი და ცენტრიფუგაზე გამრობა.

ეს პროცესები ფართოდ გამოიყენება ნახევარგამტარული ხელსაწყოების და ინტეგრალური სქემების დამზადების ტექნოლოგიაში.

ქიმიური დამუშავების შემდეგ სილიციუმის ქვესაფენის ზედაპირები ვიზუალურად კონტროლირდებოდა ოპტიკურ მიკროსკოპ („Leitz“)--ზე.

2.2 p-n გადასასვლელის მიღების ტექნოლოგიური მარშრუტი

1. Si -ის ფირფიტების ზედაპირების ქიმიური გაწმენდა;
2. 0,5 მკმ-ის სისქის Al -ის ფირის დაფენა, შემდგომი იონურ-ფოტონური დასხივების ჩატარებისთვის;
3. ფოსფორო და ბორო სილიკატური თხევადი მინის დატანება Si -ის ზედაპირზე, შემდგომი თერმული დიფუზიური პროცესების ჩატარებისთვის n და p ტიპის არეების მისაღებად;
4. p-nგადასასვლელის ფორმირება თერმული დიფუზიის პროცესების საშუალებით;
5. p-nგადასასვლელის ფორმირება იმპულსურ-ფოტონური დასხივების საშუალებით;
6. მიღებული სრუქტურების ქიმიური დამუშავება;

7. Al-ისფირის დაფენა ფირფიტის სამუშაო (ზედა) მხარეზე კონტაქტების შესაქმნელად;

7. ფოტოლიტოგრაფიის ჩატარება Al-ის სამუშაო (ზედა) საკონტაქტო მხარეზე, შემდგომი ელექტრო-ფიზიკური პარამეტრების გაზომვისთვის.

2.2.1 მასალის არჩევა

სილიციუმის ფირფიტას ქარხნულად მოჰყვება აღნიშვნები, რომლებიც განსაზღვრავენ მის პარამეტრებს. სამუშაო იქნა ჩატარებული სხბ-10 ფირფიტაზე. აბრევიატურა განსაზღვრავს შემდეგ პარამეტრებს: ს - სილიციუმი; ხ - ხვრელური გამტარობის (P-ტიპი); ბ - ლეგირებული ბორით (აქცეპტორული მინარევი); 10 - (ρ) კუთრი წინაღობა ომი x სმ. ასევე სეფ 4,5, რომელიც ასე იშიფრება: ს - სილიციუმი; ე-ელექტრული გამტარებლობის (n-ტიპის); ფ-ფოსფორით ლეგირებული (დონორული მინარევი); 4,5 - (ρ) კუთრი წინაღობა ომი x სმ.

2.2.2 ქიმიური დამუშავება - ფირფიტის არჩევის შემდეგ აუცილებელია ჩატარებული იქნას ქიმიური დამუშავების პროცესი, რათა ფირფიტა იყოს სუფთა ყოველივე ჭუჭყისგან.

- I. განცხიმვა აცეტონში;
- II. გარეცხვა წყალში (აუცილებელია გამოხდელი წყლის გამოყენება);
- III. $NH_4OH + H_2O_2 + H_2O$ (1:1:4 კონცენტრაციით). ვიყენებთ ამ ხსნარს შესაძლო მეტალის ნარჩენების ან ჭუჭყის მოსახსნელად. საჭიროა მოვათავსოთ ფირფიტა ზემოთ აღნიშნულ ხსნარში 45°C ტემპერატურაზე 10 წუთის განმავლობაში.
- IV. გარეცხვა წყალში 10 წუთის განმავლობაში.
- V. SiO_2 მოხსნა $HF + H_2O$ (1:5 კონცენტრაციით) ნაერთით. სადაც HF წილია 1 ხოლო H_2O -ს წილი არის 5.
- VI. გაშრობა ცენტრიფუგაზე.

2.2.3 ფოსფორო- და ბოროსილიკატური მინის დაფენა, გვადლევს საშუალებას შევიყვანოთ ფოსფორი და ბორი შემდგომი დიფუზიის პროცესით. ფოსფორის შეყვანა საჭიროა ფირფიტის n-ტიპისარის მისაღებად, ხოლო ბორისა - p ტიპის.

ფოსფორო-სილიკატური მინა წარმოადგენს შემდეგ ნაერთს:

$P_2O_5 + SiO_2 +$ (ორგანული ნაერთი). დაფენა მოვახდინეთ ცენტრიფუგაზე, რომლის ბრუნვის სიხშირე იყო 2000 ბრ/წთ. ცენტრიფუგა იყო ჩართული 30 წამის განმავლობაში. დაფენის შემდეგ გავაშრეთ ფირფიტა 120°C ტემპერატურაზე 20 წუთის განმავლობაში, რის შედეგადაც

ორგანული ნაერთი აორთქლდა და დაგვრჩა $P_2O_5 + SiO_2$ (ფხვნილი) ფენა 0,1-0,15 მკრ სისქის. იმის გამო რომ ფოსფორი არის V ვალენტიანი, ხოლო სილიციუმი IV ვალენტიანი, კოვალენტური ბმის მეშვეობით დაგვრჩა ერთი ელექტრონი ზედმეტი, შესაბამისად მივიღეთ n ტიპის არე.

იგივე მეთოდით Si-ის ფირფიტებზე ეფინება ბოროსილიკატური მინა, შემადგენლობით: $B_2O_3 \cdot SiO_2$ (ფხვნილი), 0,1 – 0,15 მკმ სისქის. რადგან ბორი III ვალენტია ის IV ვალენტთან სილიციუმში იძლევა p ტიპის არეს.

2.2.4 ფოსფორის და ბორის დიფუზია

ა) **თერმული დიფუზია** ნახევარგამტარებში არსებობს დიფუზიის რამოდენიმე მექანიზმი. სელიციუმში როგორც წესი ხორციელდება ვაკანსიური დიფუზიის მექანიზმი, მასში არსებული დეფექტების გამო. დეფექტები წარმოადგენენ ვაკანსიებს, რომლებიც წარმოიქმნებიან კრისტალური მესრის რხევის გამო. ჩვენს მიერ ფოსფორის და ბორის დიფუზია იქნა ჩატარებული CDO-4 ლუმელში, რომელიც შედგება რეაქციული მილისგან და ელექტროწყაროსგან.

რეაქციული მილი შედგება სუფთა კვარცისგან ხოლო იმისგან, რომელიც

რომსით ბოთანაბრად გადანაწილდეს მილში, მასგააჩნია კერამიკული ფენა. ნიმუში იმყოფებოდა ლუმელში $1100^{\circ}C$ -ზე, 5 წუთის განმავლობაში.

ბ) იმპულსურ-ფოტონური დასხივებით დიფუზია

დასხივება ხდება დანადგარზე, რომელსაც ჰქვია „იმპულსურ-ფოტონური დასხივების დანადგარი“ (სურ1). დანადგარი შედგება 16 ჰალოგენური ნათურისაგან, თითოეულის სიმძლავრეა 1კვტ. ეს ნათურები შეერთებულია პარალელურად. ერთი დასხივების დროს მიიღება 16კვტ საერთო სიმძლავრე. ეს ყველაფერი მოთავსებულია კერსელის ყუთში. ჩვენი პროცესი შედგება 3 იმპულსისაგან, თითოეული 5 წამიანი

დასხივებით.



სურ.2 იმპულსურ-ფოტონური დასხივების დანადგარი

2.5 ფოსფორო- ბოროსილიკატური მინის მოხსნა

დიფუზიის შედეგად მიღებული დიელექტრიკული ფენის მოხსნა აუცილებელია, რათა ჩატარდეს შემდგომი გაზომვები. სილიკატის მოხსნა ხდება შემდეგი პროცესით:

1) ფირფიტის მოთავსება $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ (1:15 კონცენტრაციით) ხსნარში 20-30 წამით 2) გარეცხვა წყალში.

2.6 ალუმინის დაფენა - P ტიპის არის მიღებისთვის n ტიპის სილიციუმში, იონურ-ფოტონური დასხივებით საჭიროა ალუმინის შეყვანა, რადგან ალუმინი წარმოადგენს III ვალენტიან აქცეპტორულ ნივთიერებას. ალუმინის დაფენა მოვახდინეთ YBH-2M-1 დაფენის დანადგარზე. დაფენა მიმდინარეობს ვაკუუმში, ამიტომ სანამ დავაფენთ კონტაქტს, საჭიროა ვაკუუმის მიღება. სამუშაო კამერაში უნდა მივიღოთ ჯერ დაბალი ვაკუუმი მექანიკური ტუმბოს საშუალებით. მექანიკური ტუმბოს საშუალებით ვიღებთ წნევას $P=10^{-3}$ მმ ვწყ სვ. შემდეგ, უფრო მაღალი ვაკუუმის მისაღებად, დიფუზიური ტუმბოს საშუალებით ვიღებთ ვაკუუმს $P=10^{-6}$ მმ ვწყ სვ წნევით. დაბალი ვაკუუმის გაზომვა ხდება თერმოწყვილური ვაკუუმმეტრით, ხოლო მაღალი ვაკუუმის გაზომვა BMB-14 ვაკუუმმეტრით.

2.7 ალუმინის დიფუზია

ალუმინის დიფუზია მოვახდინეთ ორი გზით ესენი არის:

ა) იმპულსურ-ფოტონური დასხივება

ბ) თერმული დიფუზია

ა) ქვედა კონტაქტური ძლიერად ლეგირებული არის მიღება საგრძნობლად ამცირებს ომური კონტაქტის წინაღობას და აუმჯობესებს მის ელექტრო-ფიზიკურ მახასიათებლებს.

ამისათვის p ტიპის ფუძეშრეზე ეფინებოდა ერთიანი 0,5მკმ სისქის ალუმინის ფენა. დაფენა წარმოებდა ვაკუუმურ დანადგარში. დაფენის შემდეგ იმპულსურ-ფოტონური დასხივების საშუალებით ხორციელდებოდა ალუმინის ფოტოსტიმულირებული დიფუზია p-Si-ში. ამისათვის ფირფიტა თავსდებოდა ფოტონური დასხივების დანადგარში.

ფოტო დასხივება წარმოებდა სტრუქტურის მხრიდან(არასამუშაო მხრიდან), დასხივების სიმძლავრის სიმკვრივე შეადგენდა 180ვტ სმ²-ზე, დრო 5 წამი . რის შედეგადაც მიიღწეოდა ალუმინის დიფუზია ფუძე შრეში და გარდამავალი p⁺ ფენის მიღება.

ბ) პირველ რიგში უნდა შევაცხოთ **Al** მოცემულ ფირფიტაზე. იმის გამო, რომ ზედაპირზე ზედმეტი ალუმინი არ გვქონდეს, საჭიროა ზედაპირი ქიმიურად დავამუშავოთხ სნარით **H₂PO₄** 30 წუთის განმავლობაში. შემდგომ უნდა მოვახდინოთ **Al** -ის დიფუზია თრმულ ლუმელში **800C^o** 5 წუთის განმავლობაში.

2.8 დიფუზიის შემდეგ ალუმინის მოხსნა - ალუმინსახასიათებს მის ზედაპირზე საკმაოდ მტკიცე ალუმინის ოქსიდის აკვის სწრაფი წარმოქმნა. ამისათვის საჭიროა ანგის მოხსნა ხსნარით $H_2PO_4 + H_2O$ სადაც წილების შეფარდებით 10:2-ან. ნიმუშს ვამუშავებთ ამ ხსნარში 10 წუთის განმავლობაში $70C^{\circ}$ ტემპერატურაზე, შემდეგი პროცესია გარეცხვა დეიონიზირებულ წყალში 8 – 10 წუთის განმავლობაში და გამრობა ცენტროფუგაზე.

2.9 ფოტოლიტოგრაფია - ფირფიტის სამუშაო მხარეს ნარჩენი ალუმინის გაწმენდის შემდეგ საჭიროა გაკეთდეს საკონტაქტო ბადე. ბადის გაკეთება შესაძლებელია ოპტიკური ლიტოგრაფიის (სურ. 3 ბ) (ფოტოლიტოგრაფიის) მეშვეობით. ფოტოლიტოგრაფია გვადლევს საშუალებას გავაკეთოდ ნებისმიერი ფორმის ბადე ფოტომაბლონის (სურ. 3 ა) დახმარებით. ბადის შესაქმნელად ჩავატარეთ შემდეგი სამუშაო: (i) ფოტორეზისტის დაფენა (CLARIANT AZ5214E) ცენტრიფუგაზე 2000 ბრ/წთ 30 წამის განმავლობაში. (ii) გამრობა ღუმელზე (Hotplate) $t=120^{\circ}C$ ტემპერატურაზე 45 წამის განმავლობაში. (iii) ფოტომაბლონის მოთავსება ფირფიტის სამუშაო ზედაპირზე და დასხივება ულტრაიისფერი სხივებით 830-II-CARL ZEISS დანადგარზე. (iv) ფოტორეზისტის გამჟღავნება NaOH (0,8%) ხსნარში. გარეცხვა წყალში და გამრობა ცენტრიფუგაზე. (v) Al მოწამვლის წინ გაცხელება $t=140^{\circ}C$ 30 წუთის განმავლობაში. (vi) Al მოწამვლა H_3PO_4 (80%) ხსნარში $t=70^{\circ}C$ ტემპერატურაზე 55 წამის განმავლობაში. (vii) ფოტოლიტოგრაფიის შემდეგ ვაკეთებთ ქიმიურ დამუშავებას მე-2 პუნქტის მიხედვით.



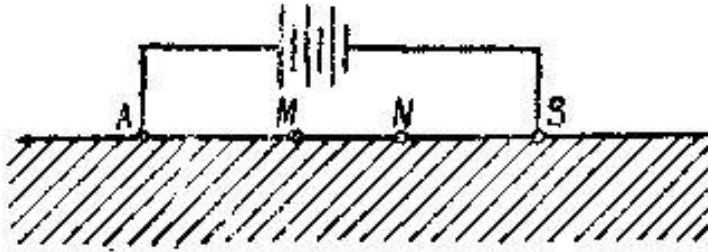
ა)



ბ)

სურ. 3 ა) ფოტომაბლონი, ბ) ოპტიკური ლიტოგრაფიის პროცესი

2.10 ზედაპირული წინაღობის და გამტარობის ტიპის განსაზღვრა - ზედაპირული წინაღობის გაზომვა შესაძლებელია ოთხზონდიანი მეთოდით.



ნახ.2.1 ოთხ ზონდიანი მეთოდი

ზედაპირული წინაღობის გასაზომად ვიყენებთ ИУС-2 ტიპის დანადგარს. ოთხზონდიანი გაზომვის მეთოდიკა შემდეგში მდგომარეობს - გასაზომი ნიმუშის ბრტყელ ზედაპირზე წრფის გასწვრივ განლაგებულია მცირე განიკვეთის ფართობის მქონე, ოთხი მეტალის ზონდი, ერთმანეთისგან განსაზღვრული მანძილით არიან დაშორებული. A და B ზონდში ელექტრული დენის გატარების შემდეგ, M და N მიღებული მნიშვნელობით ვადგენთ ρ კუთრი წინაღობის მნიშვნელობას, ხოლო ზონდებზე, ვოლტმეტრის მეშვეობით ვზომავთ ძაბვას. ზედაპირულ წინაღობას ვითვლით შემდეგი ფორმულით:

$$R_s = \rho d \quad (2.1)$$

სადაც, d ნიმუშის სისქეა.

აგრეთვე მიზანია, დავადგინოთ როგორ შეიცვალა ფირფიტის გამტარობის ტიპი დიფუზიის შედეგად. ამისთვის საჭიროა გალვანომეტრი და თერმოელექტროდი. მეთოდის პრინციპი მდგომარეობს შემდეგში: ვიღებთ წინასწარ ცნობილი ტიპის გამტარობის მქონე ნიმუშს, და მის მეშვეობით ვახდენთ გალვანომეტრის კალიბრებას. ამის შემდეგ ვზომავთ გამტარების ტიპს, ჩვენს მიერ დამუშავებულ ნიმუშზე. ზედაპირული წინაღობის და გამტარობის ტიპის განსაზღვრის შემდეგ ვაკეთებთ ქიმიურ დამუშავებას. ზედაპირული წინაღობის და გამტარობის ტიპის განსაზღვრის შემდეგ ვაკეთებთ ქიმიურ დამუშავებას მე-2 პუნქტის მიხედვით.

3.ექსპერიმენტული შედეგები და მათი ანალიზი.

3.1.დიფუზია

აღებული იქნა p ტიპის Si ფირფიტა რომლის დიამტრი იყო 50 მმ ხოლო ხვედრითი წინაღობა იყო 10ომ-სმ.

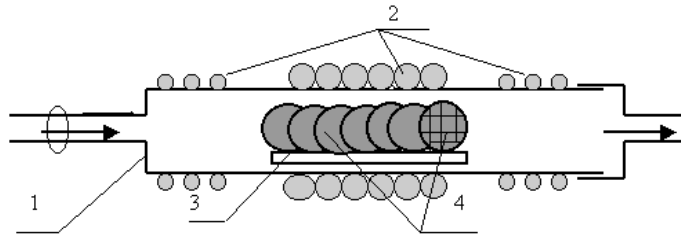
თავდაპირველად აუცილებელია ქიმიური დამუშავება, სადაც ჯერ ნიმუშის განცხიმვა ხდება აციტონის საშუალებით, ხოლო შემდგომ ხდება ნიმუშის დამუშავება ხსნარში : $NH_4OH + H_2O_2 + H_2O$ სადაც NH_4OH შეადგენს მთელი ხსნარის 1 წილს , H_2O_2 შეადგენს 1 წილს, ხოლო H_2O შეადგენს 4 წილს.

ხსნარში დამუშავების შემდეგ ნიმუში გაირეცხა გამოხდილ წყლში. შემდეგი ეტაპია ჟანგის (SiO_2) ლოკალური მოხსნა $HF + H_2O$ -ს საშუალებით სადაც HF წილია 1 ხოლო H_2O -ს წილი არის 5.

მოწამვლის რეაქციის დროს F ადვილად გამოდევნის ჟანგბადს SiO_2 ნაერთიდან, რადგან F -ს გააჩნია მცირე იონური რადიუსი(0.14მმ) ვიდრე ჟანგბადის იონური რადიუსი(0.16მმ). ჟანგის მოშორების შემდგომ, ნიმუში კვლავ ირეცხება გამოხდილ წყალში დაშრება. შემდეგ დავაფინეთ ორგანული ნაერთის ფენა ცენტრიფუგის საშუალებით, რომელიც შეიცავს ფოსფორ სილიკატურ მინას. ამ ეტაპისთვის საჭიროა ორგანული ნივთიერება, რომელიც შეიცავს P -ს კონცენტრაციით $CO = 5 * 10^{20}$ სმ⁻³.

ცენტრიფუგის სიხშირეა 2000 ბრ/წთ.

ნიმუში ცენტრიფუგაზე ბრუნავდა 30 წამის განმავლობაში. შემდგომმოვახდინეთ ნიმუშის გაშრობა $120C^0$ ზე 20წუთის განმავლობაში.



ნახ. 3.1 ექსპერიმენტული ნიმუშები დიფუზიის არეში

3.2 ფოსფორის დიფუზია

ა) თერმული დიფუზია

ნიმუშს ვათავსებთ 15 წუთით $1100C^0$ ტემპერატურაზე CDO-4 მარკის ლუმენლში, რომლიც შედგება რეაქციული მილისგან და ელექტრული წყაროსგან (ნახ.3.1 და

სურ.3.1.). რეაქციული მილიშედეგა სუფთა კვარცისგან ხოლო იმის გამო, რომ

სითბო თანაბრად გადანაწილდეს მილში მას გააჩნია კერამიკული ფენა.



სურ.3.1. თერმული ღუმელის CDO-4 ის ხედი

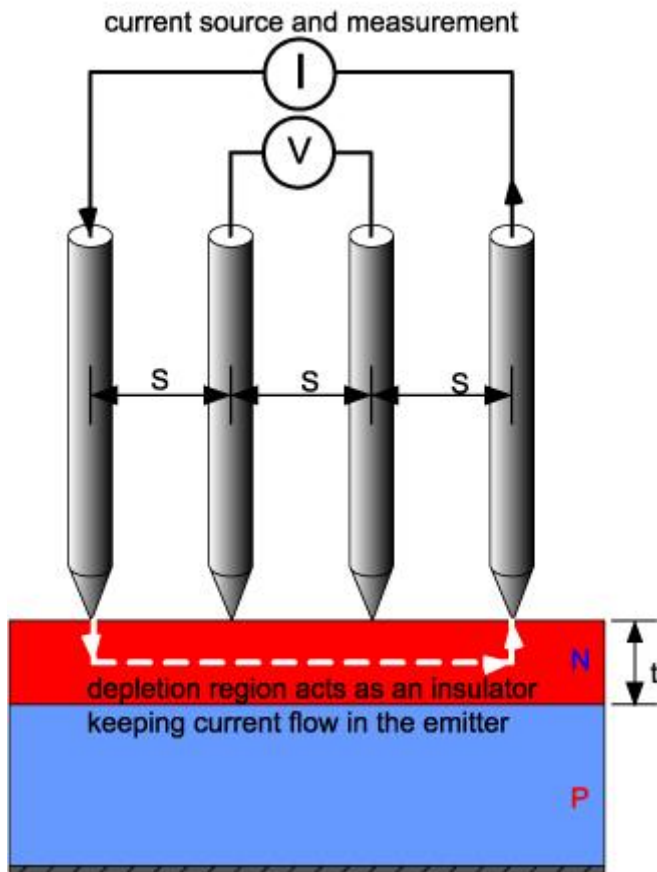
დიფუზიური ღუმელიდან ნიმუშის ამოღების შემდეგ, ზედაპირიდან უნდა მოვხსნათ ფოსფორსილიკატური მინა **HF**-ის საშუალებით. ამისათვის ნიმუშს ვათავსებთ ხსნარში 3 წუთის განმავლობაში. შემდგომ ნიმუშს ვრეცხავთ გამოხდილი წყლით და ვაშრობთ ცენტრიფუგაზე.

ბ) დიფუზია იმპულსურ-ფოტონური დასხივებით

იმპულსურ-ფოტონური დასხივებით დიფუზიისას დასხივება ხდება დანადგარზე „იმპულსურ-ფოტონური დასხივების დანადგარი“ (სურ 1). დანადგარი შედგება 16 ჰალოგენური ნათურისაგან. თითოეულის სიმძლავრე 1 კვტ. ეს ნათურები შეერთებულია პარალელურად. ერთი დასხივების დროს მიიღება 16 კვტ საერთო სიმძლავრე. ეს ყველაფერი მოთავსებული კერსელის ყუთში იმისათვის რომ ტემპერატურა არ გაიფანტოს. კონკრეტულად ჩვენი დიფუზიის პროცესი შედგება 3 იმპულსისაგან 5 წამიანი დასხივებით

3.3 ზედაპირული წინაღობის განსაზღვრა

ზედაპირული წინაღობის გაზომვა შესაძლებელია **ოთხზონდიანი მეთოდით**, რომელიც დაამუშავა ვალდესონმა.



ნახ.3.1. ოთხ ზონდიანი დანადგარი „წრფივი“ ზონდებით

ზედაპირული წინაღობის გასაზომი დანადგარის სქემატური სახე მოცემულია ნახ.3.1-ზე. ოთხზონდიანი გაზომვის მეთოდიკა შემდეგში მდგომარეობს - გასაზომი ნიმუშის ბრტყელ ზედაპირზე წრფის გასწვრივ განლაგებულია მცირე განიკვეთის ფართობის მქონე, ოთხი მეტალის ზონდი (ნახ.3.1-ზე), რომლებიც ერთმანეთისგან განსაზღვრული S მანძილით არიან დაშორებული. განაპირა ზონდებში ელექტრული დენის გატარების შემდეგ, შუა ზონდებიდან ძაბვის მიღებული მნიშვნელობით ვადგენთ ρ კუთრი წინაღობის მნიშვნელობას:

$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi s \quad (3.1)$$

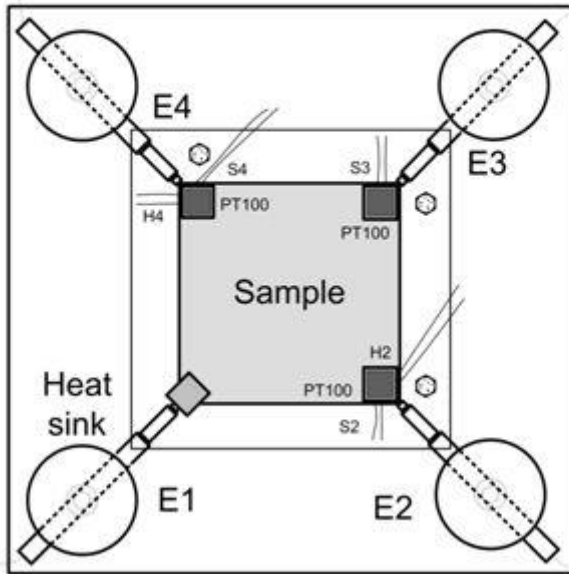
ზედაპირულ წინაღობას ვითვლით შემდეგი ფორმულით:

$$R_s = \rho d \quad (3.2)$$

სადაც, d ნიმუშის სისქეა. თუ დაფენილი ფირი ძალიან თხელია, მაშინ:

$$R_s = 4.53 \frac{U}{I} \quad (3.3)$$

გაზომვის დიდი სიზუსტისთვის ზონდებს ათავსებენ არა ერთ წრფეზე, არამედ კვადრატის ბოლოებში, როგორც ეს ნახ.3.2-ზეა გამოსახული.



ნახ.3.2. ოთხ ზონდიანი დანადგარი „კვადრატული“ ზონდებით

რომელიმე დიაგონალურ ზონდში ატარებენ დენს, ხოლო მეორე დიაგონალიდან ზომავენ ძაბვის მნიშვნელობას. გაზომვის უფრო დიდი სიზუსტისთვის, შემდეგ პირიქით, მეორე დიაგონალში ატარებენ დენს და პირველიდან იგებენ ძაბვის მნიშვნელობას. იღებენ დენების და ძაბვების საშუალო მნიშვნელობას და განსაზღვრავენ ზედაპირულ წინააღმდეგობას ფორმულით:

$$R_s = \frac{U 2\pi}{I \ln 2} = 9,06 \frac{U}{I} \quad (2.4)$$

ასეთი დანადგარი, რომელსაც ვიყენებდით ზედაპირული წინააღმდეგობის გასაზომად ჩვენთან იყო ИУС-2 ტიპის.

3.4. მეტალის დაფენა

ალუმინის დაფენა

ნახევარგამტარული ხელსაწყოწებისა და იმს-ის ელემენტების შეერთებებისა და საკონტაქტო ფართობების ფორმირებისთვის საჭიროა ვაკუუმურ კამერაში დავაფინოთ ალუმინი, ნიმუშის სამუშაო (წინა) მხარეს. ამ პრობლემის გადასაჭრელად ვიყენებთ რეზისტულ მეთოდს ანუ კამერაში ჯერ ხდება მეტალის გადნობა, მერე აორთქლება ჩვენს ნიმუშზე. პირველ რიგში, Al-ის Si-თან კარგი ადგეზიისთვის საჭიროა ნიმუშის წინასწარი გახურება 100°C ტემპერატურამდე, ხოლო დაფენის შემდეგ 300°C-მდე 10 წუთის

განმავლობაში. ოპტიკურ მიკროსკოპიულმა გაზომვებმა აჩვენა, რომ დაფენილი ალუმინის სისქე შეადგენდა ~0,55მკმ-ს.

3.5. ალუმინის დიფუზია

ალუმინის დიფუზია მოვახდინეთ ორი გზით ესენი არის:

ა) იმპულსურ-ფოტონური დასხივება

ბ) თერმული დიფუზია

ა) ქვედა კონტაქტური ძლიერად ლეგირებული არის მიღება საგრძნობლად ამცირებს ომური კონტაქტის წინაღობას და აუმჯობესებს მის ელექტრო-ფიზიკურ მახასიათებლებს.

ამისათვის p ტიპის ფუძემდრეზე ეფინებოდა ერთიანი 0,5მკმ სისქის ალუმინის ფენა. დაფენა წარმოებდა ვაკუუმურ დანადგარში. დაფენის შემდეგ იმპულსურ-ფოტონური დასხივების საშუალებით ხორციელდებოდა ალუმინის ფოტოსტიმულირებული დიფუზია p-Si-ში. ამისათვის ფირფიტა თავსდებოდა ფოტონური დასხივების დანადგარში.

ფოტო დასხივება წარმოებდა ნიმუშის სამუშაო მხრიდან(წინა მხრიდან), დასხივების სიმძლავრის სიმკვრივე შეადგენდა 180ვტ სმ²-ზე, დრო 5 წამი . რის შედეგადაც მიიღწეოდა ალუმინის დიფუზია ფუძე შრეში და გარდამავალი p⁺ ფენის მიღება.

ბ) პირველ რიგში უნდა შევაცხოთ **Al** მოცემულ ფირფიტაზე. იმის გამო, რომ ზედაპირზე ზედმეტი ალუმინი არ გვეკონდეს, საჭიროა ზედაპირი ქიმიურად დავამუშავოთ ხსნარით **H₂PO₄** 30 წუთის განმავლობაში. შემდგომ უნდა მოვახდინოთ **Al** -ის დიფუზია თრმულ ლუმელში **800C^o** 5 წუთის განმავლობაში.

3.6 ფოტოლიტოგრაფია

ფოტოლიტოგრაფიის პროცესის ჩატარებისთვის ნიმუშის **n⁺**-ის, ანუ მუშა მხარეს ვაფენთ (AZ1518A) მარკის ფოტორეზისტს ცენტრიფუგის საშუალებით 20 წამის განმავლობაში. ცენტრიფუგა ასრულებს 2000 ბრუნს წუთში. რეზისტის დაფენის შემდეგ ვახდენთ ნიმუშის

გაშრობას (Hotplate-ზე) 40 წამის განმავლობაში. შემდგომ ახდენთ ფოტოლიტოგრაფიას შაბლონის საშუალებით. მოცემულ ფირფიტაზე ვასხივებთ ულტრაისფერ სინათლეს 15 წამის განმავლობაში. სადაც ეცემა სინათლე, იქ ხდება რეზისტის მოლეკულების „გაწყვეტა“. სინათლის დასხივების შემდეგ მოვახდინეთ ფოტორეზისტის გამჟღავნება AZ400მარკის გამამჟღავნებელით.

ფოტორეზისტის გამჟღავნების შემდეგ ნიმუში გავრეცხეთ გამოხდილ წყალში, და გავაშვრეთ ცენტრიფუგაზე. შემდგომ ალუმინი მოვწამვლეთ $HNO_3 + HCL$ ქიმიური ნაერთის საშუალებით 1 წუთის განმავლობაში და შემდგომ ფოტორეზისტი მოვხსენით აცეტონის საშუალებით.

3.7. ფირის გამტარებლობის ტიპის დადგენა.

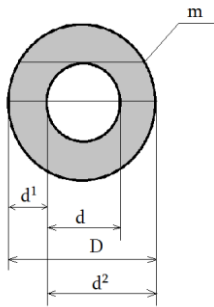
აგერთვე ჩვენი მიზანია, დავადგინოთ როგორ შეიცვალა ფირფიტის გამტარობის ტიპი დიფუზიის შედეგად. ამისთვის საჭიროა გალვანომეტრი და თერმოელექტროდი. მეთოდის პრინციპი მდგომარეობს შემდეგში: ვიღებთ წინასწარ ცნობილი ტიპის გამტარობის მქონე ნიმუშს, და მის მეშვეობით ვახდენთ გალვანომეტრის კალიბრებას. ამის შემდეგ ჩვენს მიერ დამუშავებულ ნიმუშის ზედაპირზე ვადებთ თერმოელექტროდს და მასთან ახლოს ელექტროდს გალვანომეტრით და ვსაზღვრავთ გამტარების ტიპს.

3.8 დიფუზიური ფენის სისქის განსაზღვრა.

p-n გადასასვლელის პარამეტრებისათვის არსებითი მნიშვნელობა აქვს მინარევის დიფუზიის სიღრმეს, რომლის დადგენა ხდება შარშლიფის მეთოდით (ნახ.3.3). ყოველი პროცესის წინ და შემდგომ ფირფიტები მუშავდება ქიმიურად სტანდარტული მეთოდით. შარშლიფის დანადგარი შედგება შემდეგი მოწყობილობისგან: ნიმუში მაგრდება სადგარზე გამოსაკვლევ დიფუზიური ფენით ზევით, განსაზღვრული ძალით ეხება განსაზღვრული დიამეტრის მქონე მბრუნავ ბურთულას. ბურთულა წინასწარ იფარება მექანიკურად სახეხი გელით და ხდება

გამოსაკვლევი ფენის ამილება „კრატერის“ სახით, რომლის სახე მოცემულია ნახ.3.3-ზე. CuSO_4 -ის ხსნარის მოქმედებით სხვადასხვა ფერად იფარება p- და n- ფენები, რაც იძლევა საშუალებას გავარჩიოთ ერთმანეთისგან ქვედა და ზედა დიამეტრები. შარშლიფის საშუალებით p-n გადასასვლელის სიღრმე გამოითვლება ფორმულებით:

- 1) $(D^2-d^2)/4D_{\text{ზურთ}}$; 2) $d^1 \cdot d^2 / D_{\text{ზურთ}}$; 3) $m^2 / 4D_{\text{ზურთ}}$



ნახ.3.3 p-n გადასასვლელის არე შარშლიფის მოქმედების შემდეგ

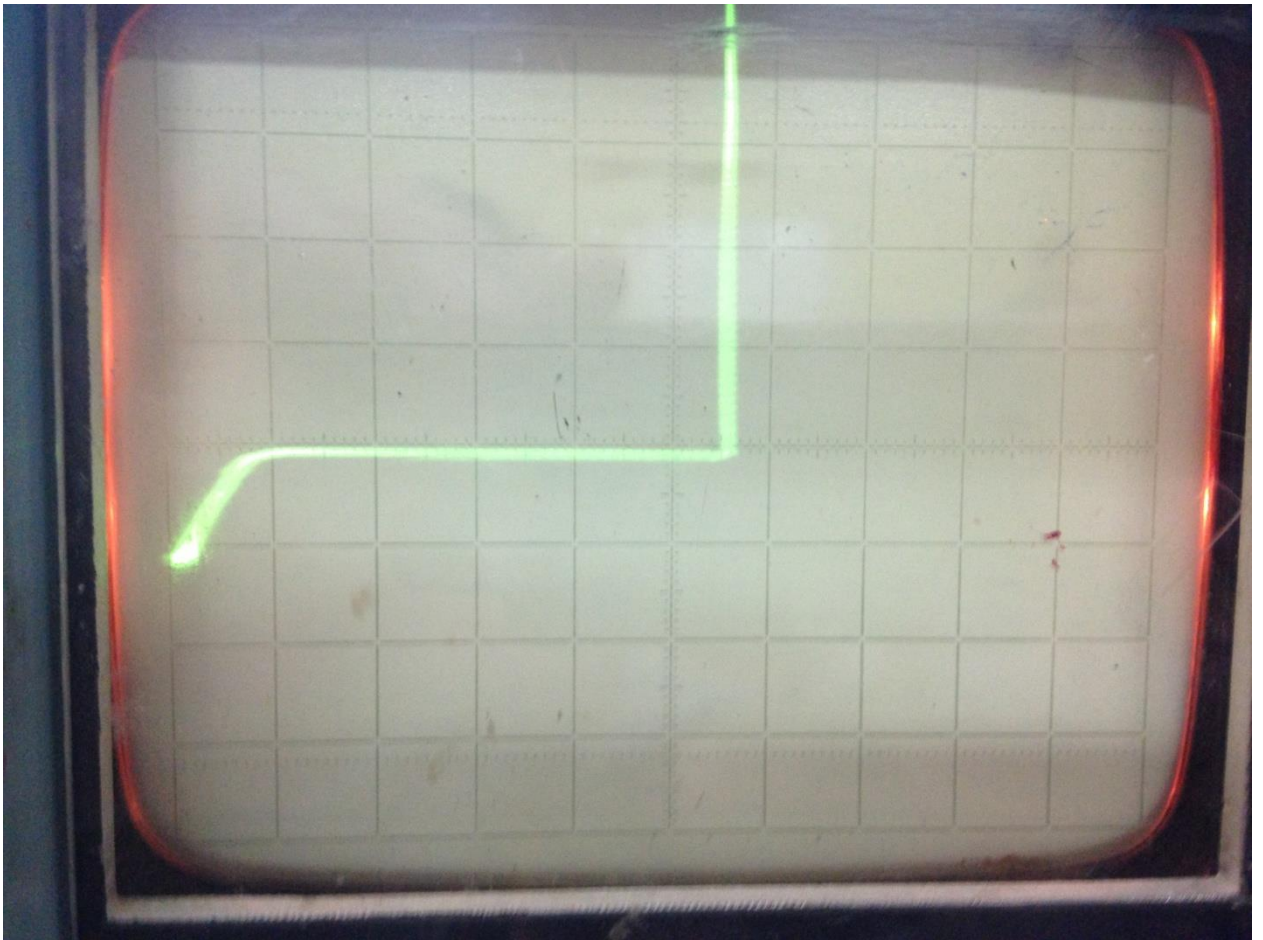
3.9 ჩატარებული სამუშაოების შემდეგ ანალიზის გაკეთება

როგორც ვხედავთ ჩვენ განვლეთ ყველა ტექნოლოგიური მარშრუტი Si-ში p-n გადასასვლელის მისაღებად. ახლა ჩვენი მთავარი მიზანია განვსაზღვროთ თუ როგორი p-n გადასასვლელი მივიღეთ. ამის დადგენის საუკეთესო საშუალებაა p-n გადასასვლელის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის დადგენა. ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის დადგენა ხდება სპეციალურ დანადგარზე ПНХТ-1 (სურ 3.2). ექსპერიმენტის დროს ვიმუშავე რამდენიმე ფირფიტაზე, ანუ p-n გადასასვლელი მივიღე რამდენიმე ფირფიტაზე. ეს p-n გადასასვლელები როგორც აქამდე ავლნიშნე მივიღე ორი გზით: თერმული ლუმენისდა იმპულსურ-ფოტონური დასხივებით. ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი გავზომე ამ ყველა ფირფიტაზე და საუკეთესო შედეგი მიღებული იქნა იმპულსურ-ფოტონური დასხივებით დამუშავების შედეგად.



სურ. 3.2 ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გამზომი აპარატი ПНХТ-1

ეს საუკეთესო შედეგი კარგად ჩეანს ჩემს მიერ გადაღებულ ფოტოზე(სურ 3.3). სადაც გამოსახულია ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გრაფიკი



დასკვნა

გამოკვლეული იქნა p-n გადასასვლელის მიღების ორი მეთოდი: თერმული ლუმელის საშუალებით და იმპულსურ ფოტონური დასხივებით მიღების მეთოდები.

თერმული ლუმელით მიღებული p-n გადასასვლელის უქმი სვლის დროს:

$$U=0,5V;$$

$$I=260mA;$$

იმპულსურ-ფოტონური დასხივების შედეგად მიღებული p-n გადასასვლელის უქმი სვლის დროს:

$$U=0,5V;$$

$$I=300mA;$$

ჩატარებული ექსპერიმენტებიდან შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი დასკვნები:

1. ორივე მეთოდი არის კარგად ნაცადი და აპრობირებული ამიტომ შეიძლება მათი გამოყენება ტექნოლოგიაში.
2. Si-ის ნათებად სტრუქტურებზე ომური კონტაქტების ფორმირების ტრადიციული თერმიული პროცესი შეცვლილია იმპულსური ფოტონური დამუშავებით, რის შედეგადაც საგრძნობლად გამარტივდა ამ პროცესის ჩატარება. დადგენილია ფოტონური ზემოქმედების ოპტიმალური რეჟიმები, რომლის დროსაც მიიღება ნათებადი სტრუქტურის სასურველი ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი.
3. კერძოდ მოგვეცა საშუალება საგრძნობლად შევამციროთ ომური კონტაქტის ფორმირების ტექნოლოგიური პროცესის ჩატარების ტემპერატურა და ხანგრძლივობა.
4. თერმულ პროცესთან შედარებით, იმპულსური ფოტონური ზემოქმედების გამოყენებით მნიშვნელოვნად მცირდება Si-ის სტრუქტურების საფუძველზე შექმნილი p-n გადასასვლელის თვითღირებულება

ლიტერატურა

1. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. //Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучени, Ленинград <<наука>> ленинградское отделение 1989;
2. Чопра К., Дас С. // Тонкопленочные солнечные элементы, перевод сонглийского, канд. техн. наук И. П. Гавриловой под редакцией д-ра техн. наук, М. М. Колтуна, Москва <<мир>> 1986;
3. Васильев А.М., Ландсман А.П. // Полупроводниковые фотопреобразователи, издательство <<советское радио>> Москва 1971;
4. ა. ბიბილაშვილი “ნახევარგამტარული მიკროელექტრონიკა” თსუ,2009, 416 გვ.;
5. И.П. Степаненко //Основы микроэлектроники//,М., «Сов.радио», 1980;
6. Л.Росадо //Физическая электроника и микроэлектроника//, перевод с исп., под ред. В.А. Терехова, М., «Высшая школа», 1991.