

ივ.ჯავახიშვილის სახელობის
თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტის,
ელექტრული და ელექტრონული ინჟინერიის ბაკალავრიატის

გიორგი დადუნაშვილის

სადიპლომო ნაშრომი

მზის ელემენტების დამზადების არატრადიციული ტექნოლოგიის
დამუშავება

ხელმძღვანელი:

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო

მეცნიერებათა ფაკულტეტის

ასოცირებული პროფესორი

ა.ბიბილაშვილი

2013

ს ა რ ჩ ე ვ ი

გვ.

ანოტაცია	4
შესავალი	6
1. ლიტერატურული მიმოხილვა	7
1.1. მზის ელემენტის მუშაობის პრინციპი	7
1.2. ნახევარგამტარში დიფუზიის პროცესი	11
1.3. p-n გადასასვლელი	15
1.4. ფოტოლიტოგრაფია	16
2. ექსპერიმენტული მეთოდები	18
2.1. ნახევარგამტარული ნიმუშები და მათი ზედაპირების ქიმიური დამუშავება	18
2.2. მზის ელემენტის დამზადების ტექნოლოგიური მარშრუტი	19
2.3. ფოსფორო-სილიკატური მინის დაფენა	20
2.4. n და p-ტიპის Si-ზე მაღალი ხარისხის p-n გადასასვლელები მზის ელემენტების შესაქმნელად	21
2.5. p-n გადასასვლელების მიღების იმპულსური-ფოტონური დასახივების ოპტიმალური რეჟიმები	23
2.6. ზედაპირული წინააღობის და გამტარობის ტიპის განსაზღვრა	24
2.7. ალუმინის დაფენა	25
2.8. ალუმინის დიფუზია	25
2.9. ზედა კონტაქტის დაფენა	26

2.10. ფოტოლიტოგრაფია	26
3. ექსპერიმენტული შედეგი და ანალიზი	27
3.1. დიფუზია	27
3.2. ფოსფორის დიფუზია ნიმუშში დიფუზიური ღუმელის საშუალებით	27
3.3. ნიმუშის ხვედრითი წინაღობის გაზომვა	28
3.4. მეტალის დაფენა	29
3.5. ფოტოლიტოგრაფია	29
3.6. კონტაქტების დამზადება და შედეგების ანალიზი	30
დასკვნა	33
გამოყენებული ლიტერატურა	34

ა ნ ო ტ ა ც ი ა

კაცობრიობის განვითარების თანამედროვე ეტაპი მოითხოვს დიდ ენერგომომხმარებას, რაც უცილობლად შეამცირებს დედამიწაზე ენერგორესურსებს. ენერგიის მარაგის შემცირება და ენერგეტიკის კვლავგანვითარებასთან დაკავშირებული მზარდი ეკოლოგიური სიძნელეები აიძულებს ადამიანებს მონახონ ენერგიის მიღების ახალი, არატრადიციული მეთოდები, რომელთა შორის ერთ-ერთ პერსპექტიულ მეთოდად ითვლება მზის ენერგიის გარდაქმნის ფოტოელექტრული მეთოდი. ის ეკოლოგიურად სუფთაა და იძლევა ენერგიას დიდი ეფექტურობით. ეს ხელსაწყო აგებულია ნახევარგამტარულ მასალაზე, რომელიც კარგადაა შესწავლილი.

მზის ელემენტების მისაღებად ნახევარგამტარულ ფირფიტაზე ფრონტალური მხრიდან საჭიროა შეიქმნას p-n გადასასვლელი. ამიტომ წინამდებარე სადიპლომო ნაშრომის **მიზანია: სილიციუმის საფენზე მიღებულ იქნას p-n გადასასვლელი თერმული მეთოდით, შემდგომში მზის ელემენტის შექმნისთვის.** ამისთვის სილიციუმის ფირფიტაზე ფრონტალური მხრიდან ეფინება ფოსფოროსილიკატური მინა (p-ტიპის სილიციუმის შემთხვევაში), ან ბოროსილიკატური მინა (n-ტიპის სილიციუმის შემთხვევაში). შემდეგ ეტაპზე, 1050°C ტემპერატურაზე კეთდება დიფუზია თერმულ ლუმელში. შემდეგ ეფინება ომური კონტაქტები ორივე მხრიდან და კეთდება ფოტოლიტოგრაფია ფრონტალური მხრიდან მზის მაქსიმალური დასხივებისთვის.

გაზომილ იქნა მიღებული p-n გადასასვლელის და მზის ელემენტის პარამეტრები: p-n გადასასვლელის სიღრმე, დიფუზიის ტიპი, ზედაპირული წინღობა და მ.ქ.კ. მიღებული პარამეტრები კარგ თანხვედრაშია სტანდარტულ მიღებულ მზის ელემენტების პარამეტრებთან.

Annotation

The modern phase of human development requires large power consumption, which would definitely reduce the earth's energy. Reduction of energy supply and still growing ecological problems compels people to find a new, non-traditional methods, among which is considered solar energy conversion. It is polluting and provides great energy efficiency. This method has been studied on semiconductor material.

To form semiconductor solar cells it is necessary to form on the front side of the plate p-n junction. The aim of present diploma is to create the p-n junction on the silicon substrate by thermal method and then create solar cells. For that on the front side of the silicon substrate is deposited phosphorosilicafilm (in the case of p-type silicon), or borosilicafilm (in the case of n-type silicon). Next step was thermal diffusion process at 1050°C temperature. Then deposition ohmic contacts on the both sides of silicon. After contacts was done photolithography process and finally step was to measure parameters of solar cell at the maximum solar irradiation.

There were measured the obtained p-n junction and solar battery parameters: depth of p-n junction, type of diffusion, surface resistance and energy conversion efficiency. Obtained parameters good fit with the standard solar battery parameters.

შ ე ს ა ვ ა ლ ი

კაცობრიობის განვითარების თანამედროვე ეტაპი მოითხოვს დიდ ენერგომომხმარებას, რაც უცილობლად შეამცირებს დედამიწაზე ენერგორესურსებს. ენერგიის მარაგის შემცირება და ენერგეტიკის კვლავგანვითარებასთან დაკავშირებული მზარდი ეკოლოგიური სიძნელეები აიძულებს ადამიანებს მონახონ ენერგიის მიღების ახალი, არატრადიციული მეთოდები, რომელთა შორის ერთ-ერთ პერსპექტიულ მეთოდად ითვლება მზის ენერგიის გარდაქმნის ფოტოელექტრული მეთოდი.

მზის გამოსხივება წარმოადგენს პრაქტიკულად ენერგიის უწყვეტ წყაროს, რომლის გონივრული გამოყენება ეკოლოგიურად სუფთა იქნება, დიდი მარგი ქმედების კოეფიციენტით (მქკ). მაშასადამე, მზის გამოსხივებაზე აგებული ენერგიის მომცემი ხელსაწყო არის მცირე მასის და მოცულობის, ამდენად მოსახერხებელია ინდივიდუალური ხმარებისთვის. ის ეკოლოგიურად სუფთაა და იძლევა ენერგიას დიდი ეფექტურობით. ეს ხელსაწყო აგებულია ნახევარგამტარულ მასალაზე, რომელიც კარგადაა შესწავლილი.

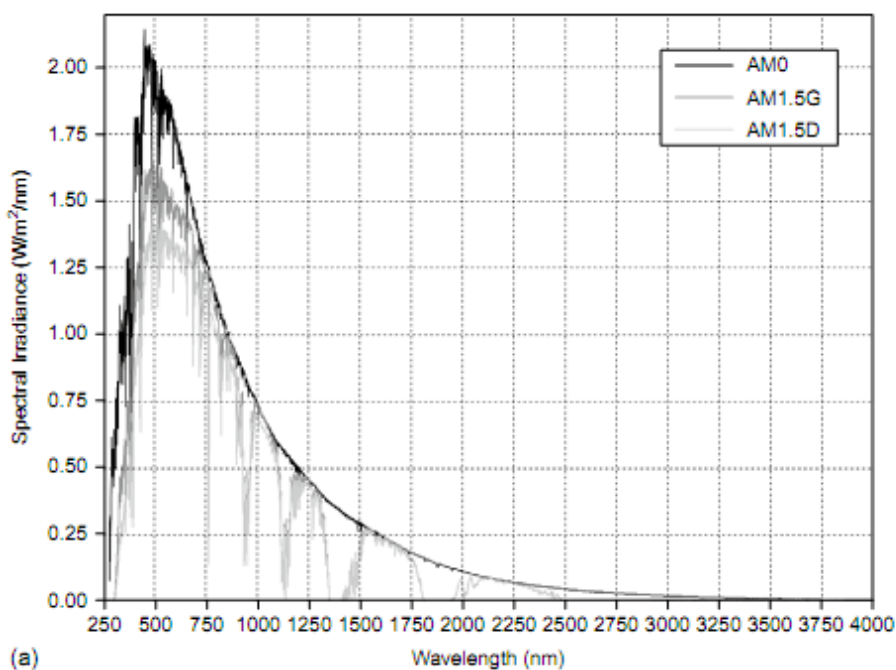
სამხედრო, და არა მარტო სამხედრო პირთათვის საველე და განსაკუთრებულად რთულ პირობებში მცირე ელექტროენერგიის ავტონომიური ბუნებრივი დენის წყაროების მისაღებად, Si-ის ბაზაზე მზის ელემენტების შექმნა აქტუალურია და აქვს დიდი პრაქტიკული გამოყენება.

როგორც ცნობილია, მზის ელემენტების შექმნისას ძირითად ტექნოლოგიურ პროცესს წარმოადგენს ნახევარგამტარზე p-n გადასასვლელების და ომური კონტაქტების ფორმირება. ამიტომ, მოცემული საბაკალავრო სამუშაოს მიზანია: **Si-ის ბაზაზე შეიქმნას იაფი და მაღალხარისხოვანი მზის ელემენტები.**

1. ლიტერატურული მიმოხილვა

1.1. მზის ელემენტის მუშაობის პრინციპი

მზის ელემენტის ენერგიის მარაგი მზიდან მომავალი ფოტონებია. ეს შენატანი განაწილებულია სხვადასხვა ტალღის სიგრძეზე, რომელიც დამოკიდებულია ისეთ ცვლადებზე როგორიცაა განედი, დრო და ატმოსფერული პირობები. სხვადასხვა შესაძლებელ განაწილებებს მზის სპექტრი ეწოდება. მზის ელემენტის შემთხვევაში მზის ენერგიის წვლილის შედეგი არის სასარგებლო ელექტრო ენერგია, დენის ძალისა და ძაბვის სახით. დედამიწაზე არსებული ზოგიერთი „სტანდარტული“ მზის ენერგიის მარაგები ნაჩვენებია ნახ. 1.1-ში [1].



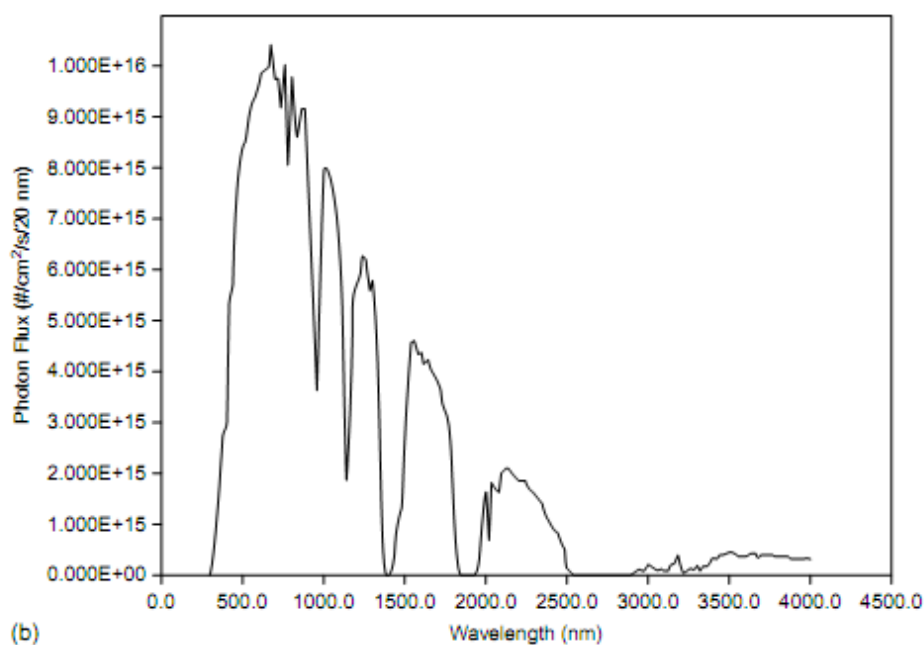
ნახ.1.1. მზიდან წამოსული ენერგიის სპექტრი

ალტერნატიული, ჩვენს ატმოსფეროში მოსული სპექტრები ნაჩვენებია ნახ. 1.2-ში.

ნახაზ 1.1-ს სპექტრი გვიჩვენებს დაჯახების ძალას 1 მეტრ კვადრატზე 1 ნმ განივკვეთის სიგრძის ტალღაზე და რომელიც მიმართულია თითოეული ტალღისკენ. ამ ნახაზში, AM0

სპექტრი დაფუძნებულია ASTM standard E 490-ზე და გამოიყენება სატელიტების დამზადებაში. ის ინტეგრირდება 1000 W/m^2 .

ნახაზ 1.2-ს სპექტრა მიღებულია AM1.5G სპექტრიდან, ძალის (power) წამში cm^2 -ზე ფოტონებით ჩანაცვლებით და 20 ნმ განივკვეთის გამოყენებით. ფოტონის სპექტრები $\Phi(\lambda)$, რომელიც ნაჩვენებია ნახ.1.2-ში, უფრო მოსახერხებელია მზის ელემენტებში გამოსაყენებლად, რადგან ოპტიმალურ შემთხვევაში ერთი ფოტონი გადაიქცევა ერთ თავისუფალ ელექტრონად.



ნახ.1.2. მზიდან წამოსული სპექტრი ჩვენ ატმოსფეროში

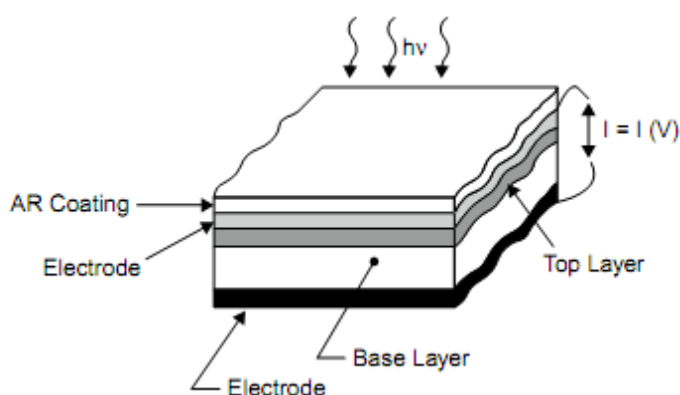
მზის ელემენტების გამოსაკვლევად, ჩამოსაყალიბებლად და სავაჭროდ გასატანად საჭიროა გამოვიყენოთ სტანდარტული სპექტრები, რადგან რეალური სპექტრების დაჯახების ძალა მუშა ელემენტზე იცვლება ამინდის, სეზონის, დროის და ადგილმდებარეობის მიხედვით. სტანდარტული სპექტრების არსებობა საშუალებას იძლევა ერთი დანადგარის ექსპერიმენტალური ელემენტის მუშაობა შედარდეს სხვა დანადგარისას და ობიექტურად შეფასდეს, რადგან ელემენტები დასხივდებიან წინასწარ შეთანხმებული სპექტრებით. შედარება შეიძლება ლაბორატორიაშივე ჩატარდეს ვინაიდან სტანდარტული განაწილების დუბლიკაცია შესაძლებელია მზის სიმულატორების გამოყენებით.

მოცემული ფოტონის სპექტრი $\Phi_0(\lambda)$ -სთვის, ელემენტის ფართობზე მოსული მთლიანი სიმძლავრე არის დროის ერთეულში, ფართობის ერთეულზე და განივკვეთის ერთეულ არეზე მოსული ენერგიის ინტეგრალი მთელ ფოტონის სპექტრზე (ნახ.1.2.). მაგალითისთვის

$$P_{IN} = \int_{\lambda} \frac{hc}{\lambda} \Phi_0(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

სადაც $\Phi_0(\lambda)$, გამოსახულია, როგორც ფოტონი დაცემული დროის ერთეულში, ფართობის ერთეულზე, h პლანკის მუდმივაა და c სინათლის სიჩქარე [2].

ნახ.1.3 მოცემულია მზის ელემენტის საბოლოო სახე.



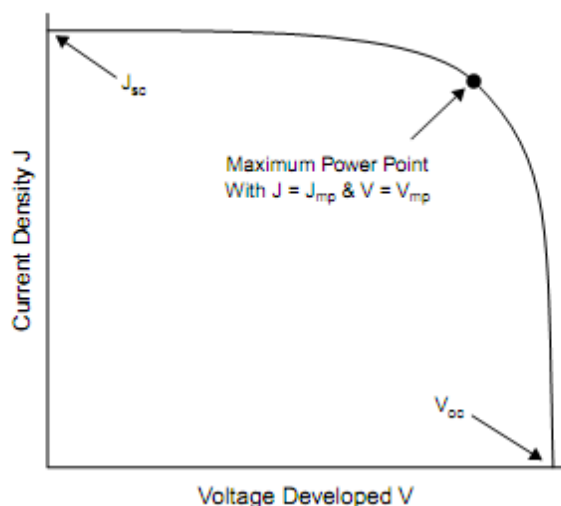
ნახ.1.3. მზის ელემენტის სახე

ნახ.1.4-ზე გამოსახულია დენისა და ძაბვის დამოკიდებულების გრაფიკი მზის ელემენტისათვის. V ვოლტაჟზე მომუშავე და მიღებული მზის ენერგიის შედეგად გამომუშავებული I დენის ძალის მომცემი ელემენტის მიერ გამომუშავებული ელექტრული სიმძლავრე ფართობის ერთეულზე არის მუხტი I -ს ნამრავლი V -ზე და გაყოფილი ფართობზე.

თუკი შემოვიღებთ ახალ ცნებას - არსებული სიმკვრივე J , რომელიც არის I გამოყოფილი ფართობზე, შესაძლებლობა მოგვეცემა ფორმულა 1.1 დავწეროთ როგორც

$$P_{OUT} = JV \quad (1.2)$$

სურათ 1.3-ის ელემენტის შესაძლებელი J-V სამუშაო წერტილების (ე.წ. „მსუბუქი“ J-V მახასიათებლები) ნახაზი ნაჩვენებია სურ. 1.4-ზე. წერტილები J_{sc} და V_{oc} არიან უკიდურესი შემთხვევები როცა ძაბვა არ წარმოიქმნება კათოდსა და ანოდს შორის (მაგალითად, განათებულ ელემენტზე მოკლე ჩართვის მოხდენა) და როცა მუხტი არ მოძრაობს კათოდსა და ანოდს შორის (როდესაც განათებულია მზის ელემენტი) [3].



ნახ.1.4. დენისა და ძაბვის დამოკიდებულების გრაფიკი

ნახ. 1.4-ზე ნაჩვენებ დანარჩენ სამუშაო წერტილებში POUT მოცემულია როგორც JV ნამრავლი.

POUT-ის რაოდენობა არის მისი საუკეთესო მნიშვნელობა მაქსიმალურ ძაბვის წერტილში რომელიც მონიშნულია არსებული სიმკვრივით J_{mp} და ვოლტაჟით V_{mp} სურათ 1.4-ზე მოცემულ „მსუბუქ“ J-V მახასიათებელზე. ეს სამუშაო წერტილი გვაძლევს მაქსიმალურ მიღწევად JV ნამრავლს. შესაბამისად, ელემენტისთვის ფოტოვოლტაჟური ენერგიის გარდაქმნის საუკეთესო თერმოდინამიკური ეფექტურობა η არის

$$\eta = \frac{(J_{mp} V_{mp})}{P_{IN}}, \quad (1.3)$$

რაც გულისხმობს რომ ფოტონის დაჯახების ფართობი და მუხტის გამომუშავებული ფართობი ერთი და იგივეა, როგორც ეს ნაჩვენებია სურათ 1.4-ში. იმ ელემენტებისთვის რომლებისთვისაც სინათლის შემგროვებელი ფართობი მეტია ვიდრე მუხტის გამომუშავებული ფართობი, ეს ფორმულა იცვლება:

$$\eta = \frac{A_s}{A_c} \frac{(J_{mp} V_{mp})}{P_{IN}} \quad (1.4)$$

სადაც A_s არის მზის ელემენტის მუხტის გამომმუშავებელი ფართობი და A_c არის ფოტონების შემგროვებელი ფართობი. კონცენტრატორის უპირატესობა მდგომარეობს იმ ფაქტში, რომ მას შეუძლია მეტი მომავალი მზის ენერგიის შეგროვება მოცემული ელემენტის ზომით.

ნახ. 1.4-დან ჩანს რომ საუკეთესო შემთხვევაში J-V მახასიათებლების ფორმა არის მართკუთხა და მით მეტია V_{oc} . ასეთი მახასიათებლისთვის, მაქსიმალური სიმძლავრის წერტილს ექნება არსებული სიმკვრივე J_{sc} და V_{oc} ვოლტაჟი. ცნება შევსების ფაქტორი შეიქმნა რათა გაიზომოს რამდენად ახლოსაა მოცემული მახასიათებელი იდეალურ მართკუთხა ფორმასთან. შევსების ფაქტორი მოცემულია

$$FF = \frac{J_{mp} V_{mp}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (1.5)$$

განმარტებიდან გამომდინარე შევსების ფაქტორი ≤ 1

ნახ.1.4-ზე გამოსახულია ელემენტის J-V მახასიათებლების ის ნაწილი რომლისთვისაც გამომუშავდება სიმძლავრე. მარტივად რომ ითქვას, პირველ კვადრატულ ნახაზში, პირობითი მუხტი წარმოიშობა ელემენტის ანოდისა და კათოდის შორის. პირობითი მუხტი შედის ანოდში, რეზისტორში და დიოდში. ელემენტის სიმძლავრის მაწარმოებელი კვადრატი იქნება მეოთხე კვადრატი რათა ყველაფერი შესაბამისობაში იყოს რეზისტორისა და დიოდის ნახაზებთან რომლებიც იქნება პირველი და მესამე კვადრატები.

1.2. ნახევარგამტარში დიფუზიის პროცესი.

ნახევარგამტარის ლოკალური უბნების ელექტროფიზიკური თვისებების ცვლილება (ელექტროგამტარებლობის ტიპი, ხვედრითი წინააღმდეგობა, არაძირითადი მატარებლების დიფუზიის სიგრძე და სიცოცხლის ხანგრძლივობა) შესაძლებელია მინარეული ატომების მასში

კონტროლირებადი შეყვანით. იმს-ის შექმნის ტექნოლოგიაში ძირითადად გამოიყენება თერმული დიფუზია. მაღალ ტემპერატურაზე ($\sim 1000 \div 1200^\circ\text{C}$) ნახევარგამტარის ზედაპირის გავლით მინარევული ატომები ვრცელდებიან მის მოცულობაში სითბური მოძრაობის შედეგად. კრისტალურ მესერში მინარეული ატომის შეღწევა ძირითადად ხდება მესერის ვაკანსიებში თანმიმდევრული გადაადგილებით. შესაძლებელია აგრეთვე გადაადგილება კვანძთა შორის 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:

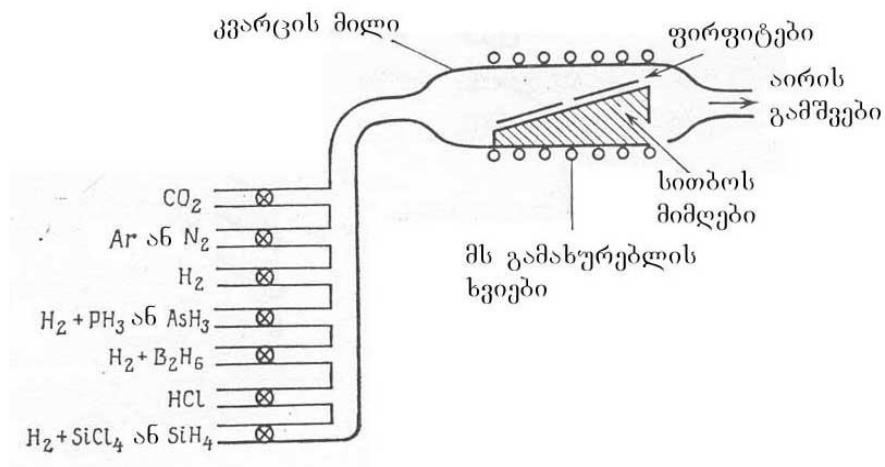
$$N_{\text{ვკ}} = N \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1.6)$$

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 W ალბათობა დამოკიდებულია მეზობლად ვაკანსიის არსებობის ალბათობაზე და ატომსა და ვაკანსიას შორის პოტენციალური ჯებირის გადალახვის ალბათობაზე:

$$W \sim e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (1.7)$$

სადაც ΔE - დიფუზიის პროცესის აქტივაციის ენერგიაა, რომელიც შეიცავს ვაკანსიის გაჩენისა და მინარეული ატომის ვაკანსიაში ჩაჯდომის ენერგიებს [4].

დიფუზიის დანადგარის სქემა მოცემულია ნახ.1.5-ზე, რაზედაც შესაძლებელია შენაცვლებით ორივე პროცესის ჩატარება. თერმული დიფუზიის



ნახ.1.5. დიფუზიის დანადგარის სქემა.

პროცესი ტარდება კვარცის ღუმელებში, 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 ჩერდებიან მათში, ე.ი. ქმნიან ჩანერგვის მყარ ხსნარებს. რადგანაც ატომის კვანძთა შორის 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

$$F = -D \frac{dN}{dx} \quad (1.8)$$

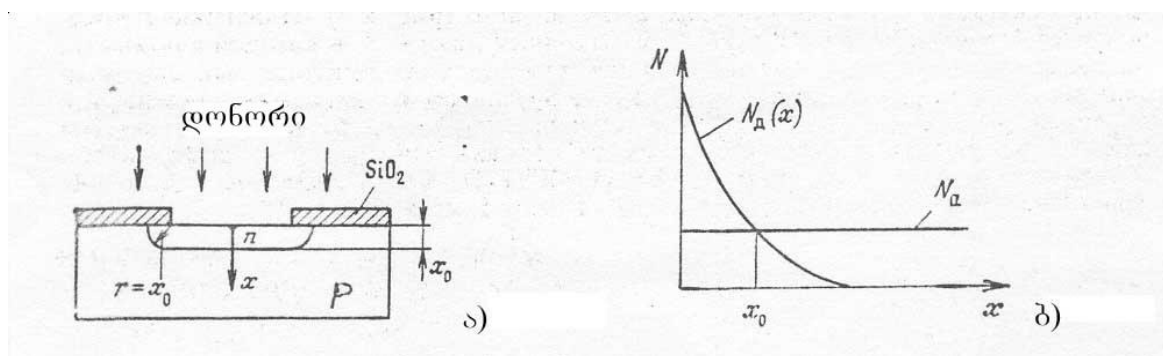
სადაც D - დიფუზიის კოეფიციენტი რიცხობრივად ტოლია მინარეული ატომების რაოდენობისა, გამავალი დროის ერთეულში დიფუზიის მიმართულების მართობ ფართის ერთეულში, როცა მინარეული კონცენტრაციის გრადიენტი $\frac{dN}{dx}$ ერთის ტოლია. ნიშანი მინუსი მიუთითებს, რომ დიფუზია მიდის კონცენტრაციის შემცირების მიმართულებით.

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

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (1.9)$$

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 ნილბის გამოყენებით, სისქით 0.5 მკმ (ნახ.1.6ა). მინარევის კონცენტრაციაა



ნახ.1.6. დიფუზიის პროცესი (ა) და მინარევის განაწილება სიღრმეში (ბ).

მაქსიმალური ზედაპირზე და ეცემა ფირფიტის მოცულობაში (ნახ.1.6ბ). x_0 მანძილს, სადაც მინარეული დონორული კონცენტრაცია ემთხვევა საწყისს აქცეპტორულ კონცენტრაციას ეწოდება დიფუზიური შრის სისქე. ამავე დროს ამ შემთხვევაში x_0 ეთანადება $p-n$ გადასასვლელის მეტალურგიულ საზღვარს. მინარევი ასევე დიფუნდირებს ნილბის ქვეშ, $\text{Si}-\text{SiO}_2$ გამყოფი საზღვრის გასწვრივ თითქმის იგივე

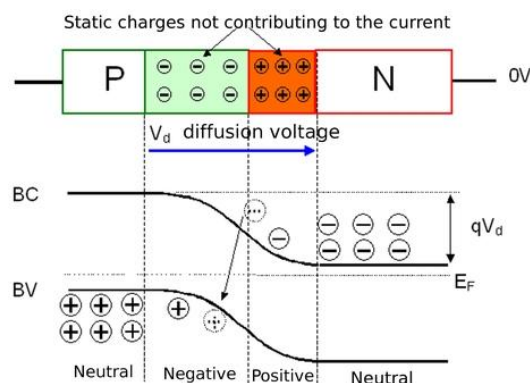
მანძილზე, რაც სიღრმეში (ნახ.1.6ა). ეს ეფექტი უნდა იქნას გათვალისწინებული იმს-ს შექმნისას.

1.3. p-n გადასასვლელი

ორი სხვადასხვა ტიპის გამტარებლობის ნახევარ გამტარი ქმნის p-n გადასასვლელს. 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 [5]. 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 $p_{p0} < n_{n0}$ 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 ზედაპირი.ის 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 სხვადასხვაა გაღარიბების უბნის შეღწევის სიღრმეები.



ნახ. 1.7. 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.

1.4. ფოტოლიტოგრაფია

ინტეგრალური მიკროსქემის (იმს) შექმნაში ლიტოგრაფიას უკავია წამყვანი ადგილი. ლიტოგრაფიის პროცესი ნიშნავს შაბლონიდან სურათის დიდი სიზუსტით გადატანას ფირფიტის ზედაპირზე. მისი საშუალებით ხდება „ფანჯრების“ გახსნა ნილბის ფირფიტაში, რომელშიც ხდება მინარევის დიფუზია ან ლეგირება, შემდეგ დიელექტიკული ფირფიტისათვის საჭიროა ფორმისა და ზომის მიცემა და მეტალიზაცია [6].

ფოტოლიტოგრაფია დაფუძნებულია ფოტომგრძნობიარე პოლიმერული მასალის – ფოტორეზისტის გამოყენებაზე, რომელიც შეიძლება იყოს პოზიტიური და ნეგატიური. ფოტოლიტოგრაფიაში გამოყენებული ფოტორეზისტები მგრძნობიარენი 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 დაჟანგვა; 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 ნილაბი.

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 1მმ -ში მოთავსებული ხაზების მაქსიმალური რიცხვით:

$R=1000/2a_{\min}$ 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, ფოტოშაბლონების კომპლექტის გამოყენებით. ის არის ბრტყელ-პარალელურიანი მინის ან კვარცის ფირფიტადაფარული საჭირო კონფიგურაციის, ულტრაიისფერი სხივისთვის გაუმჭვირვალე და ა.შ. ფირფიტით. ფოტოშაბლონის კომპლექტის დამზადების პროცესი იწყება იმს-ის ტოპოლოგიური ნახაზის – ფოტო ორიგინალის შექმნით შესაბამისი შრეების მიხედვით.

იმს-შექმნისას ხდება მრავალჯერადი ფოტოლიტოგრაფია შესაბამისი ფოტოშაბლონის გამოყენებით. ამიტომ არსებითია ფოტოშაბლონის ზუსტი შეთავსება ფირფიტაზე წინა ფოტოლიტოგრაფიით შექმნილ სურათთან. წინააღმდეგ შემთხვევაში ის არ იმუშავებს. ზუსტი შეთავსებისათვის ყოველ ფოტოშაბლონზე გათვალისწინებულია სპეციალური ნიშნების

მოთავსება, რომლებიც ზუსტად მეორდებიან და გადადიან ფირფიტის ზედაპირზე. ფოტოშაბლონის ფირფიტის ზედაპირზე დადებისას, უთავსებენ წინა ლიტოგრაფიით მიღებულ ნიშნებს და ამ ფოტოშაბლონის ნიშნებს ერთმანეთს და ამით აღწევენ შეთავსების სიზუსტის გაზრდას.

2. ექსპერიმენტული მეთოდика

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 გაშრობა.

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

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

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

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. მზის ელემენტის დამზადების ტექნოლოგიური მარშრუტი

1. Si-ის ფირფიტების ზედაპირებს ქიმიური გაწმენდა;
2. 0,5 მკმ-ის სისქის ერთიანი Al-ის ფირის დაფენა ფირფიტის არასამუშაო(ქვედა) მხარეზე;
3. ფოსფორ სილიკატურ თხევადი მინის დატანება Si-ის ფირფიტის მუშა (ზედა) მხარეზე;
4. p-n გადასასვლელის ფორმირება იმპულსური ფოტონური დასხივების საშუალებით;
5. წარმოქმნილი ჟანგის ფენის მოხსნა ქიმიური მოწამვლის გზით;
6. 1,5 მკმ-ის სისქის ერთიანი Al-ის ფირის დაფენა ფირფიტის სამუშაო(ზედა) მხარეზე;
7. ფოტოლიტოგრაფიის ჩატარება Al-ის სამუშაო (ზედა) საკონტაქტო მხარეზე საკონტაქტო ბადის მისაღებად;
8. 1,5მკმ-ის სისქის ერთიანი Al-ის ფირის დაფენა ფირფიტის არასამუშაო (ქვედა) მხარეზე;
9. ფირფიტების კიდეების დამუშავება ზედა და ქვედა მეტალურ კონტაქტებს შორის მოკლე ჩართვის გამოსარიცხად;
10. მზის გამოსხივების იმიტატორზე მიღებული მზის ელემენტის ელექტროფიზიკური და ოპტიკური თვისებების გაზომვა;

მზის ელემენტი დამზადებული იქნა შემდეგი მიმდევრობით:

2.2.1. მასალის არჩევა

მზის ელემენტის დასამზადებლად ავირჩიეთ სილიციუმის ფირფიტა. 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) და 10 – (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. განცხიშვა აცეტონში;
- II. გარეცხვა წყალში (აუცილებელია გამოხდილი 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 $45^{\circ}C$ 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.

2.3. ფოსფორო-სილიკატური მინის დაფენა

ეს გვადლევს საშუალებას შევიყვანოთ ფოსფორი შემდგომი დიფუზიის პროცესით. ფოსფორის შეყვანა საჭიროა ფირფიტის უკანა (არასამუშაო) მხარეს n^+ კონცენტრაციის მისაღებად, რათა შემდგომში კონტაქტის დაფენისას მივიღოთ ომური კონტაქტი მეტალსა და ნახევარგამტარს შორის.

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 $120^{\circ}C$ ტემპერატურაზე 20 წუთის განმავლობაში, რის შედეგადაც ორგანული ნაერთი აორთქლდა და დაგვრჩა $P_2O_5 + SiO_2$ 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^+ ტიპს.

2.3.1. ფოსფორის დიფუზია - ნახევარგამტარებში არსებობს დიფუზიის რამოდენიმე მექანიზმი. სილიციუმში, როგორც წესი, ხორციელდება ვაკანსიური დიფუზიის მექანიზმი, მასში არსებული დეფექტების გამო. დეფექტები წარმოადგენენ ვაკანსიებს, რომლებიც წარმოიქმნებიან კრისტალური მესრის ტემპერატურული რხევის გამო. ჩვენს მიერ ფოსფორის დიფუზია იქნა ჩატარებული $CDO-4$ ლუმელში, რომლიც შედგება რეაქციული მილისგან და ელექტრო წყაროსგან. რეაქციული მილი შედგება სუფთა კვარცისგან ხოლო იმის გამო, რომ სითბო თანაბრად გადანაწილდეს მილში, მას გააჩნია კერამიკული ფენა. რეაქციულ ლუმელში შედის მშრალი ჟანგბადის ნაკადი.

ნიმუში იმყოფებოდა ლუმელში $1100^{\circ}C$ -ზე, 5 წუთის განმავლობაში.

2.3.2. ფოსფორო-სილიკატური მინის მოხსნა

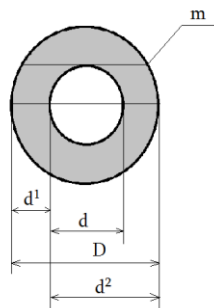
დიფუზიის შედეგად მიღებული დიელექტრიკული ფენის მოხსნა აუცილებელია, რათა ჩატარდეს შემდგომი გაზომვები. სილიკატის მოხსნა ხდება შემდეგი პროცესით:

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

2.4. n და p-ტიპის Si-ზე მაღალი ხარისხის p-n გადასასვლელები მზის ელემენტების შესაქმნელად

მზის ელემენტების მისაღებად საჭიროა Si-ის ფირფიტაზე ფრონტალური მხრიდან შეიქმნას p-n გადასასვლელი. ჩვენს მიერ გამოყენებულია p-n გადასასვლელის მიღება თერმული მეთოდით, რომელიც მდგომარეობს იმაში, რომ სილიციუმის ფირფიტაზე ფრონტალური მხრიდან ეფინება ფოსფოროსილიკატური მინა (p-ტიპის სილიციუმის შემთხვევაში), ან ბოროსილიკატური მინა (n-ტიპის სილიციუმის შემთხვევაში). შემდეგ ეტაპზე კეთდება დიფუზია თერმულ ლუმელში (CDO-4), სადაც მიიღება 1050°C ტემპერატურა ფოსფორის დიფუზიის შემთხვევაში, ან 1150°C ტემპერატურა ბორის დიფუზიის შემთხვევაში 10 წუთი ჟანგბადის ატმოსფეროში.

მზის ელემენტების პარამეტრებისათვის არსებითი მნიშვნელობა აქვს მინარევის დიფუზიის სიღრმეს და კონცენტრაციას, რომელთა დადგენა ხდება შარშლიფის მეთოდით (ნახ.2.19) და ოთხი ზონდის მეთოდით ზედაპირული წინააღმდეგობის (R_s) გაზომვით. ყოველი პროცესის წინ და შემდგომ ფირფიტები მუშავდება ქიმიურად სტანდარტული მეთოდით. 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) $m^2 / 4D_{\text{ზურთ}}$



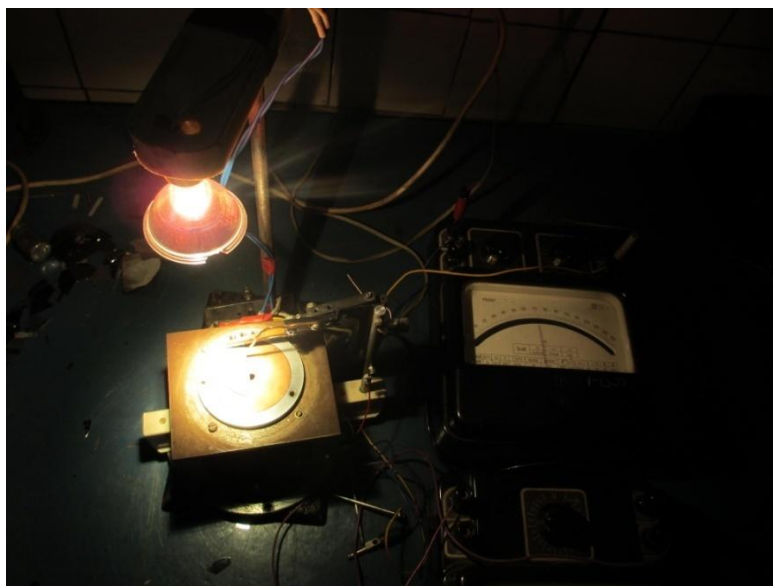
ნახ.2.1. p-n გადასასვლელის არე შარშლიფის მოქმედების შემდეგ

სილიციუმში ფოსფორის და ბორის დიფუზიები მიმდინარეობს მაღალტემპერატურაზე (1100°C) თერმულ ღუმელში CDO-4ში, რომლის ფოტო მოცემულია ფოტო 2.2-ზე.



ფოტო 2.2. თერმული ღუმელის CDO-4 ის ხედი

მზის ელემენტის პარამეტრების განსაზღვრა ხდებოდა ორიგინალურ დანადგარზე, მზის გამოსხივების იმიტატორზე, რომლის ხედი მოცემულია ფოტო 2.3-ზე.



ფოტო 2.3. მზის გამოსხივების იმიტატორი

თერმული მეთოდით p-ტიპის სილიციუმის ($\varnothing 50$) ფირფიტაზე მიღებულია მზის ელემენტის შემდეგი პარამეტრები:

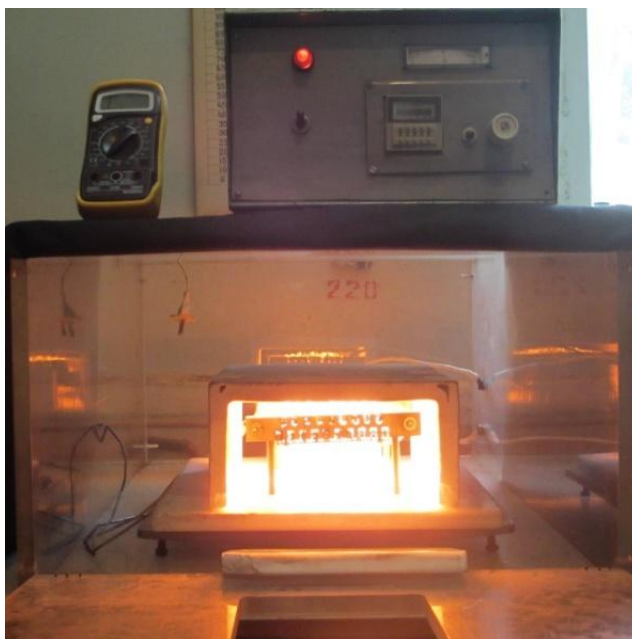
$V_x=0.52$ ვ; $I_{sc}=1.05$ ა, სადაც V_x არის უკმი სვლის ძაბვა, I_{sc} - მოკლე ჩართვის დენი. აღნიშნული პარამეტრები მიღებულია $K \approx 3$, სადაც K მზის ენერგიის კონცენტრაციის ხარისხია.

2.5. p-n გადასასვლელების მიღების იმპულსური-ფოტონური დასხივების ოპტიმალური რეჟიმები.

მიკრო და ნანოტექნოლოგიები ითვალისწინებს რა ელემენტების ზომების მინიმიზაციას ნანომაშტაბების დონეზე. ტექნოლოგიებს უყენებენ ურთულეს ამოცანებს რაც დაკავშირებულია დიფუზიური და აქტივაციური პროცესების კონტროლირებად ჩატარებასთან ატომებსშორისი მანძილების მასშტაბებში. ზემოთთქმული განსაკუთრებულად აქტუალურს ხდის ისეთი ტექნოლოგიების შექმნის აუცილებლობას, რომლებიც ეყრდნობა არა მარტო ტრადიციულ ღუმელებში თერმული დამუშავების პროცესებს არამედ ახალ მიდგომებს, როგორებიცაა, კატალიზატორების გამოყენება და/ან ფოტოსტიმულირებული პროცესების განხორციელება.

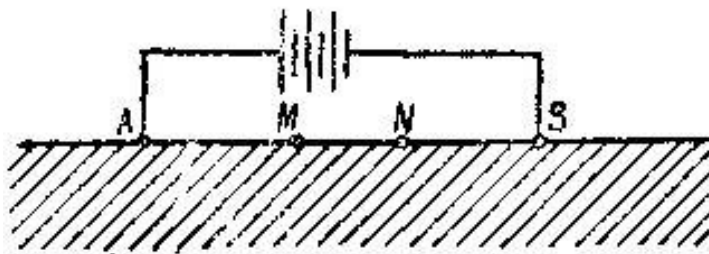
ჩვენს მიერ შემუშავებული და კონსტრუირებული იქნა მიკრო და ნანოელექტრონიკის ტექნოლოგიებში ფოტოსტიმულირებული პროცესების განხორციელებისათვის ფართო სპექტრალური დიაპაზონის ($\lambda=0,2-4,1$ მკმ) იმპულსური ფოტონური დასხივების დანადგარები (ფოტო 2.4.), რომლებიც იძლევიან საშუალებას რეგულირებადად ვმართოთ ($1-190$ ვტ/სმ²) როგორც დასხივების სიმძლავრის სიმკვრივე, ასევე ზემოქმედების დრო $0,1$ წმ-ის ბიჯით.

სამუშაოები ტარდებოდა p-ტიპის Si-ის პოლირებულ ფირფიტებზე კუთრი წინააღობით 10 ომი.სმ.



ფოტო 2.4. იმპულსურ ფოტონური დასხივების დანადგარის ხედი

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



ნახ.2.5. 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 (ნახ.2.5). 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 მე-2 პუნქტის მიხედვით.

2.7. ალუმინის დაფენა - ფირფიტის წინა (სამუშაო) მხარეს აუცილებელია P ტიპის მიღება. ამის გაკეთება შესაძლებელია ალუმინის შეყვანით, იმიტომ რომ ალუმინი წარმოადგენს III ვალენტიან აქცეპტორულ ნივთიერებას. ალუმინის დაფენას ვაწარმოებთ მე-3 პუნქტის მიხედვით, ანალოგიურად ფოსფორო-სილიკატური მინის დაფენისა.

2.8. ალუმინის დიფუზია

პირველ რიგში უნდა შევაცხოთ Al მოცემულ ფირფიტაზე. იმის გამო, რომ ზედაპირზე ზედმეტი ალუმინი არ გვქონდეს, საჭიროა ზედაპირი ქიმიურად დავამუშავოთ ხსნარით: H_3PO_4 30 წუთის განმავლობაში. შემდგომ უნდა მოვახდინოთ Al - ს დიფუზია ღუმელში $800C^\circ$ 5წუთის განმავლობაში.

2.8.1. ალუმინის მოხსნა - ალუმინს ახასიათებს მის ზედაპირზე საკმაოდ მტკიცე ალუმინის ოქსიდის აპკის სწრაფი წარმოქმნა. ამისათვის საჭიროა ჟანგის მოხსნა ხსნარით $H_3PO_4 + H_2O$ სადაც წილების შეფარდებით 10:2-ან. ნიმუშს ვამუშავებთ ამ ხსნარში 30წუთის განმავლობაში $70C^\circ$ ზე.

ალუმინის მოხსნის შემდეგ ვაწარმოებთ მე-6 პუნქტის მიხედვით გაზომვებს შემდგომი ქიმიური დამუშავებით მე-2 პუნქტის თანახმად.

2.9. ზედა კონტაქტის დაფენა - კონტაქტის 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. Ti -ს დაფენა ხდება ვაკუუმურ კამერაში. ტიტანი წარმოადგენს გარდამავალ ფენას რადგან მას გააჩნია კარგი ადგეზიის უნარი. ტიტანის შემდეგ ვაფენ ბრინჯაოს, ვაკუუმურ კამერაში. ბრინჯაო კარგია კონტაქტების გამოსაყვანად და ამავე დროს ამ “შრის” პარაზიტული წინაღობა ძალიან მცირეა. ანალოგიურად ვაფენთ ნიმუშის n^+ -ის მხარეს Ti –ს რომლის სისქე კვლავ 0,05 მიკრონი. Ti –ზე კი ვაფენთ ბრინჯაოს ფენას.

2.10. ფოტოლიტოგრაფია - ფირფიტის სამუშაო მხარეს საჭიროა გაკეთდეს საკონტაქტო ბადე. ბადის გაკეთება შესაძლებელია ოპტიკური ლიტოგრაფიის (ფოტოლიტოგრაფიის) მეშვეობით. ფოტოლიტოგრაფია გვაძლევს საშუალებას გავაკეთოდ ნებისმიერი ფორმის ბადე ფოტოშაბლონის დახმარებით. ბადის შესაქმნელად ჩავატარეთ შემდეგი სამუშაო: (I) ფოტორეზისტის დაფენა (CLARIANT AZ5214E) ცენტრიფუგაზე 2000 ბრ/წთ 30 წამის განმავლობაში. (II) გაშრობა ღუმელზე (Hotplate) $t=120^{\circ}C$ ტემპერატურაზე 45 წამის განმავლობაში. (III) ფოტოშაბლონის მოთავსება ფირფიტის სამუშაო ზედაპირზე და დასხივება ულტრაიისფერი სხივებით 830-II-CARL ZEISS დანადგარზე. (IV) ფოტორეზისტის გამჟღავნება $NaOH$ (0,8%) ხსნარში. გარეცხვა წყალში და გაშრობა 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.

3. ექსპერიმენტული მონაცემები და მათი შედეგები

3.1. დიფუზია

აღებული იქნა n ტიპის Si ფირფიტა რომლის დიამტრი იყო 50 მმ ხოლო ხვედრითი წინაღობა იყო 4,5 ომ-სმ.

მზის ელემენტის დასამზადებლად გვჭირდება p - n გადასასვლელი, ამის გამო ფირფიტის ორივე მხარეზე უნდა ჩავატაროთ ტექნოლოგიური პროცესები.

თავდაპირველად აუცილებელია ქიმიური დამუშავება, სადაც ჯერ ნიმუშის გაცხინება 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 უნდა გაირეცხოს გამოხდილი წყლის საშუალებით. შემდეგი ეტაპია ჟანგის (SiO_2) 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 და შრება.

ორგანული ნაერთის დაფენა ცენტრიფუგის საშუალებით, რომელიც შეიცავს ფოსფორსილიკატურ მინას. ამ ეტაპისთვის საჭიროა ორგანული ნივთიერება, რომელიც შეიცავს P -ს კონცენტრაციით $CO = 5 * 10^{20}$ სმ⁻³.

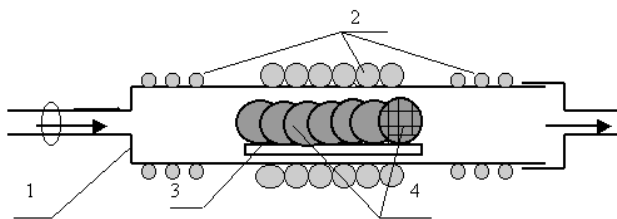
ცენტრიფუგის სიხშირეა 2000 ბრ/ წთ.

ნიმუში ცენტრიფუგაზე ბრუნავს 30 წამის განმავლობაში. შემდგომ ხდება ნიმუშის გაშრობა $120C^0$ ზე 20 წუთის განმავლობაში.

3.2. ფოსფორის დიფუზია ნიმუშში დიფუზიური ღუმელის საშუალებით.

ნიმუშს ვათავსებთ 15 წუთით $1100C^0$ ტემპერატურაზე CDO-4 მარკის ღუმელში, რომელიც შედგება რეაქციული მილისგან და ელექტრული წყაროსგან (ნახ.2.2). რეაქციული მილი შედგება სუფთა კვარცისგან ხოლო იმის გამო, რომ სითბო თანაბრად გადანაწილდეს

მილში მას გააჩნია კერამიკული ფენა. რეაქციულ ღუმელში შედის მშრალი ჟანგბადის ნაკადი.



ნახ.3.1. ექსპერიმენტული ნიმუშები დიფუზიის არეში

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.

3.3. ნიმუშის ხვედრითი წინააღობის გაზომვა.

ხვედრითი წინააღობის გაზომვა ხდება ოთხზონდიანი მეთოდით (ნახ.2.1). დიფუზიის შედეგად ჩატარებულმა ექსპერიმენტმა აჩვენა, რომ ნიმუშის ხვედრითი წინააღობა $\rho = 0,5$ ომ·სმ.

ჩატარებული გაზომვების შემდეგ, ჩვენ უნდა დავამაუშავოთ ქიმიურად მოცემული ნიმუში. სილიციუმის ფირფიტას ვუკეთებთ განცხიმვას აციტონის საშუალებით. ამის შემდეგ ფირფიტის დამუშავება ხდება ქიმიურ ხსნარში როგორიცაა $NH_4OH + H_2O_2 + H_2O_2$ სადაც NH_4OH შეადგენს 1წილს მთელი ხსნარისა, H_2O_2 შეადგენს მთელი ხსნარის 1 წილს, ხოლო H_2O_2 შეადგენს მთელი ხსნარის 10 წილს.

ზემოთ თქმული ხსნარით დამუშავების შემდეგ ნიმუში გავრეცხეთ გამდინარე გამოხდილ წყალში 15 წუთის განმავლობაში.

მომდევნო ეტაპია ჟანგის მოხსნა $HF + H_2O$ - ს საშუალებით სადაც HF წილია 1 ხოლო H_2O -ს წილი არის 5.

3.4. მეტალის დაფენა

ა) ალუმინის დაფენა

იმისათვის, რომ მივიღოთ P გადასასვლელი, საჭიროა ვაკუუმურ კამერაში დავაფინოთ ალუმინი, ნიმუშის მეორე მხარეს. ამ პრობლემის გადასაჭრელათ ვიყენებთ რეზისტიულ მეთოდს ანუ კამერაში ჯერ ხდება მეტალის გადნობა, მერე აორთქლება ჩვენს ნიმუშზე. პირველ რიგში უნდა შევაცხოთ Al მოცემულ ფირფიტაზე. იმის გამო, რომ ზედაპირზე ზედმეტი ალუმინი არ გვქონდეს, საჭიროა ზედაპირი ქიმიურად დავამუშავოთ ხსნარით : H_3PO_4 30 წუთის განმავლობაში. შემდგომ უნდა მოვახდინოთ Al - ს დიფუზია ღუმელში $800C^{\circ}$. ალუმინს ახასიათებს მის ზედაპირზე საკმაოდ მტკიცე ალუმინის ოქსიდის აპსკის სწრაფი წარმოქმნა. ამისათვის საჭიროა ჟანგის მოხსნა ხსნარით $H_3PO_4 + H_2O$ სადაც წილების შეფარდებით 10:2-ან. ნიმუშს ვამუშავებთ ამ ხსნარში 30წუთის განმავლობაში $70C^{\circ}$ ზე.

ბ) Ti -ს და ბრინჯაოს დაფენა

შემდგომი ეტაპია ნიმუშის P მხარეს Ti -ს დაფენა რომლის სისქე არის 0,05 მიკრონი. Ti -ს დაფენა ხდება ვაკუუმურ კამერაში. ტიტანი წარმოადგენს გარდამავალ ფენას რადგან მას გააჩნია კარგი ადგეზიის უნარი. ტიტანის შემდეგ ვაფენ ბრინჯაოს, ვაკუუმურ კამერაში. ბრინჯაო კარგია კონტაქტების გამოსაყვანად და ამავე დროს ამ “შრის”პარაზიტული წინაღობა მცირდება. ანალოგიურად ვაფენთ ნიმუშის n^{+} -ის მხარეს Ti -ს რომლის სისქე კვლავ 0,05 მიკრონია, ხოლო Ti -ზე კი ვაფენთ ბრინჯაოს ფენას.

3.5. ფოტოლიტოგრაფია

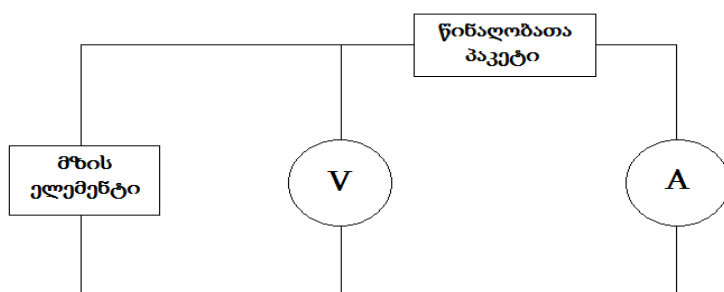
ფოტოლიტოგრაფიის პროცესის ჩატარებისთვის ნიმუშის n^{+} -ის მხარეს ვაფენთ (AZ1518) მარკის ფოტორეზისტს ცენტრიფუგის საშუალებით 20 წამის განმავლობაში. ცენტრიფუგა ასრულებს 2000 ბრუნს წუთში. რეზისტის დაფენის შემდეგ ვახდენთ ნიმუშის გაშრობას (Hotplate-ზე) 40 წამის განმავლობაში. შემდგომ ვახდენთ ბადის ფორმირებას n^{+} - ის მხარეს შაბლონის საშუალებით. მოცემულ ფირფიტაზე ვასხივებთ ულტრააიისფერ სინათლეს 15 წამის განმავლობაში, სადაც სინათლე ეცემა იქ ხდება რეზისტის

მოლეკულების „გაწყვეტა“. სინათლის დასხივების შემდეგ ხდება ფოტორეზისტის გამჟღავნება **AZ400** მარკის გამამჟღავნებელით.

გამჟღავნების შემდეგ ნიმუშს გამოხდილ წყალში ვრეცხავთ და ცენტრიფუგაზე ვაშრობთ. შემდგომი ეტაპია მოწამვლა **$HNO_3 + HCL$** ნაერთის საშუალებით 1წუთის განმავლობაში. ხოლო შემდგომ ფოტორეზისტს ვხსნით აციტონის საშუალებით.

3.6. კონტაქტების დამზადება და შედეგების ანალიზი

ჩვენი მიზანია დავთვალოთ მარგი ქმედების კოეფიციენტი, სიმძლავრე, მოკლე ჩართვის დენი და უქმე სვლის ძაბვა.



ნახ.3.2. მზის ელემენტისთვის მარგი ქმედების კოეფიციენტის გაზომვა წრედის საშუალებით

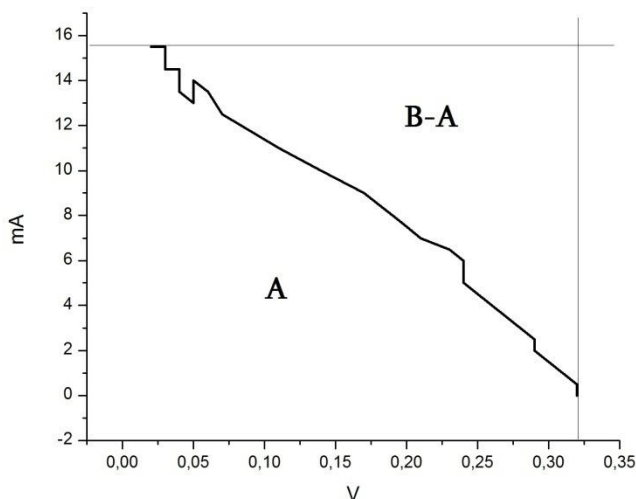
მოცემული სქემის საშუალებით ჩვენ შეგვიძლია გავზომოთ მოკლე ჩართვის დენი და უქმე სვლის ძაბვა. ძაბვა, რადგან ამპერმეტრის წინააღმდეგობა მიისწრაფვის ნულისკენ, ხოლო ვოლტმეტრის წინააღმდეგობა - უსასრულობისკენ. სიმძლავრის დასათვლელად საჭიროა წრედში აგრეთვე ჩავრთოთ დატვირთვა. დატვირთვის როლს ჩვენს გაზომვებში ასრულებდა წინააღმდეგობა პაკეტი.

სიმძლავრე დაითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$P=U \cdot I \quad (3.1)$$

სადაც U არის ძაბვა და I დენის ძალა.

სიმძლავრე დაითვლება გრაფიკული მეთოდით. გრაფიკიდან გამოვთვალეთ A არის ფართობი (ნახ.3.3), რომელიც წარმოადგენს სიმძლავრეს. მარგი ქმედების გამოსათვლელად გამოიყენება შემდეგი ფორმულა:



სურ.3.3. ძაბვის დენზე დამოკიდებულების გრაფიკი

$$\eta = F_f P_i \quad (3.2)$$

სადაც η მარგი ქმედების კოეფიციენტი, F_f შევსების ფაქტორი, ხოლო P_i ჩვენი ელემენტის სიმძლავრე იდეალურ პირობებში. P_i დასათვლელათ საჭიროა დავთვალოთ მზის ელემენტის სამუშაო ზადაპირი ანუ საკონტაქტო ბადის გარეშე, რადგან ბადე არ მონაწილეობს ენერგიის გარდაქმნაში. ცნობილია, რომ იდეალურ პირობებში 1 კვადრატულ მეტრზე მზის ელემენტის სიმძლავრე არის 200-300 ვატი.

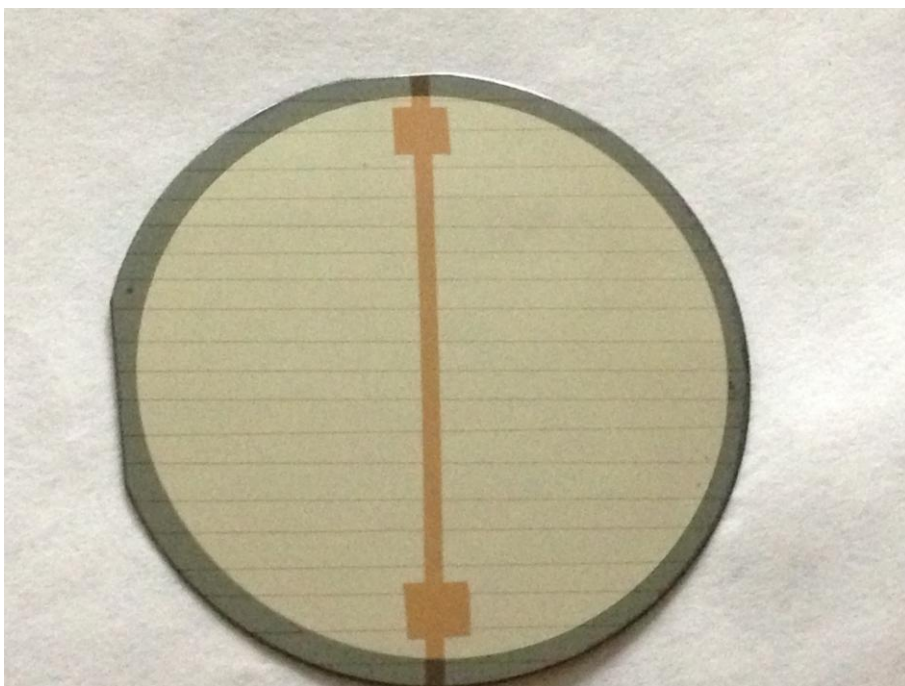
შევსების ფაქტორი დაითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$F_f = A/B \quad (3.3)$$

სადაც A არის ტეხილი არეს ფართობი, ხოლო B - მთელი არეს ფართობი.

გამოთვლების შედეგად მოკლე ჩართვის დენის ძალა უდრის 185 მლა, ხოლო უქმე სვლის ძაბვა უდრის 0.52ვ, რაც იძლევა ჩვენს მიერ დამზადებული მზის ელემენტისთვის $\eta=24,5\%$.

მზის ელემენტის საბოლოო სახე მოცემულია სურ.3.4 -ზე.



სურ. 3.4. ჩვენს მიერ დამზადებული მზის ელემენტი

დასკვნა

ჩატარებული ექსპერიმენტის საფუძველზე შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი ძირითადი დასკვნები:

1. სილიციუმის საფენზე დადგინდა ბოროსილიკატური და ფოსფოროსილიკატური მინის ორიგინალური დაფენების ოპტიმალური რეჟიმები და მათ საფუძველზე მიღებულ იქნა p-n გადასასვლელები;
2. გაიზომა p-n გადასასვლელის პარამეტრები და შემუშავდა მზის ელემენტების მისაღებად ტექნოლოგიური მარშუტი;
3. მიღებულ იქნა მზის ელემენტი, რომელმაც აჩვენა 40 მმ დიამეტრის ფართობზე დენის ძალის 185 მლა და ძაბვის 0,52 ვ-ის მნიშვნელობები, რამაც მოგვცა მ.ქ.კ.-ის 24,5% მნიშვნელობა.

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.