

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ია ტრაპაიძე

**AlGaAs-GaAs ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე მზის
კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული
მოდულების დამუშავება**

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
სადოქტორო პროგრამა “საინჟინრო ფიზიკა”, შიფრი 0404

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2015 წელი

საავტორო უფლება © 2015 წელი, ია ტრაპაიძე

თბილისი

2015 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის,
ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის,
საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტში.

ხელმძღვანელი: პროფესორი, გელა გოდერძიშვილი

რეცენზენტები: -----

დაცვა შედგება ----- წლის "-----" -----, ----- საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის -----
----- ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს
კოლეგიის
სხდომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატის - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი პროფესორი, თინათინ კაიშაური

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით „იატრაპაიბის“ მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „AlGaAs-GaAs ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული მოდულების დამუშავება“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის საგამოცდო კომისიაში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: პროფესორი

გელა გოდერძიშვილი

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2015

ავტორი: ტრაპაიძე ია
დასახელება: „AlGaAs-GaAs ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე
მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტო-
ელექტრული მოდულების დამუშავება“
ფაკულტეტი: „ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების“
ხარისხი: აკადემიური დოქტორი
სხდომა ჩატარდა: 2015 წლის

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ
ზემომოყვანილი დასახელების ნაშრომის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის
შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების
უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც
მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან
სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი
ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო
უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა
ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ
მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია
სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს
პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ენერჯის ალტერნატიულ და განახლებად წყაროებს შორის მზის ენერჯის გარდაქმნა უშუალოდ ელექტრო ენერჯიად იქცევის სულ უფრო მეტად მზარდ ყურადღებას. საზოგადოების ცნობიერებაში მკვიდრდება აზრი, რომ მომავლის ენერჯეტიკა უნდა იყოს დაყრდნობილი მზის ენერჯის ფართომასშტაბიან გამოყენებაზე. ეს არის ეკოლოგიურად სუფთა, უბ-მაურო და საიმედო ენერჯის წყარო. მოწყობილობები რომლებიც მზის ენერჯიას პირდაპირ გარდაქმნიან ელექტრო ენერჯიად, არიან სრულიად თანამედროვენი, როგორც სამეცნიერო ასევე ტექნიკური თვალსაზრით.

მზის ენერჯის გარდაქმნის პროცესის შესწავლა არის თანამედროვე მეცნიერების დარგის „ფოტოენერჯეტიკის“ ამოცანა. ფოტოენერჯეტიკა არ არის ახალი ტექნოლოგია: კოსმოსური ერის პირველივე დღეებიდანვე მზის ბატარეებით ხდებოდა კოსმოსური ხომალდების ელექტრული ენერჯით მომარაგება. სიახლე მდგომარეობს იმაში, რომ ტექნოლოგიამ თავისი გან-ვითარების დონოთ მიაღწია იმ სტადიას, როცა შესაძლებელია შეიქმნას რამოდენიმე მილიონი ვატი სიმძლავრის ელექტროსადგურები. დღეისა-თვის მზის ენერჯია ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა სფეროში: მაღალ-მთიან რეგიონებში; ქალაქიდან დაშორებულ რაიონებში სადაც არ არის ცენტრალიზებული ელექტრომომარაგება.

დღევანდლამდე მზის გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნე-ლები პრაქტიკულად მზადდებოდა მხოლოდ კრისტალურ სილიციუმზე. მკვლევართა მიზანს წარმოადგენს ფოტოელექტრული გარდამქმნელი სისტემების ეფექტურობის გაზრდა და ღირებულების შემცირება. კვლევები მზის ელემენტების და მოდულების განვითარებისათვის ძირითადად მიმდინარეობს: ახალი მასალების შექმნასა და მათი შემადგენლობის ოპტი-მიზაციაზე; ახალი ტიპის სტრუქტურების დამუშავებასა და კასკადური ფოტოელექტრული გარდამქმნელების შექმნაზე, რომლებშიც გამოიყენება ნახევარგამტარები სპეციალურად შერჩეული აკრძალული ზონის სიგანით. მზის ფოტოელექტრული გარდამქმნელების ეფექტურობის გაზრდის მიზნით ბოლო პერიოდში ასევე ფართოდ გამოიყენება კონცენტრატორული სისტემები. კონცენტრატორული სისტემების, ჰეტერო და კასკადური სტრუქტურების დამზადება საკმაოდ რთული და ძვირადღირებული პროცესია. მაგრამ მომავალში მათი გამოყენება მომგებიანია, ვინაიდან მნიშვნელოვნად იზრდება ეფექტურობა და საერთო ჯამში შესაძლებელია მათი ღირებულების შემცირება.

ამ აქტუალურმა პრობლემებმა განსაზღვრა მოცემული **ნაშრომის თემა და მიზანი**: დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიის მეთო-დით დამზადებული AlGaAs-GaAs სტრუქტურების საფუძველზე მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ეფექტური ფოტოელექტრული გარდამქ-მნელი ელემენტების დამზადების ტექნოლოგიის და კონსტრუქციის დამუ-შავება, მათი ელექტრო-ფიზიკური თვისებების შესწავლა.

დასახული მიზნის მისაღწევად გადავწყვიტეთ შემდეგი ამოცანები:

1. მრავალფენიანი ჰეტეროსტრუქტურის საფუძველზე დავამუშავეთ მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელი ელემენტის და მოდულის კონსტრუქცია და დამზადების ტექნოლოგია.
2. დაბალტემპერატურული ტექნოლოგიური მეთოდებით დამზადებულ ფოტოელექტრულ p-n ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე შევქმენით მზის ელემენტების და მოდულის ლაბორატორიული ვარიანტი.
3. დავამუშავეთ მოდულების და ლინზების ლაბორატორიულ და საველე პირობებში ტესტირების მეთოდები და ჩავატარეთ ტესტირება.
4. მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე შევიმუშავეთ რეკომენდაცია მზის კონცენტრირებული გამოსხივების მოდულის საწარმოო ვარიანტის შესახებ.

ნაშრომის შედეგები და მეცნიერული სიახლე:

1. გამოკვლეულია მყარბინარის GaAs-AlAs მრავალფენიანი ჰეტეროსტრუქტურების მიღების დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიის მეთოდი და დადგენილია ცალკეული ფენის ზრდის პროცესის ტემპერატურულ-დროითი რეჟიმები.
2. დამუშავებულია მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდულის კონსტრუქცია და დამზადების ტექნოლოგია, ლაბორატორიულ და საველე პირობებში ტესტირების მეთოდები.
3. შესწავლილია მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდულის ფოტოელექტრულ მახასიათებლებსა და საექსპლუატაციო პარამეტრებზე კონსტრუქციული და ტექნოლოგიური ფაქტორების გავლენა.

ნაშრომში ჰეტეროსტრუქტურების დამზადებისათვის გამოვიყენეთ დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიური მეთოდი, რომელშიც შევიტანეთ ცვლილებები და დავადგინეთ: მრავალფენიანი ჰეტეროსტრუქტურების ცალკეული ფენების მყარ ხსნართა ქიმიური შემადგენლობა; ოპტიმალური სისქეები; მალეგირებელი ნივთიერების ტიპი და კონცენტრაცია; ზრდის პროცესების ტემპერატურულ-დროითი რეჟიმები. რის შედეგადაც მიღებულ ჰეტეროსტრუქტურებში მიღწეული იქნა მზის კონცენტრირებული გამოსხივების გარდაქმნის მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაღალი მნიშვნელობა 23,4%-მდე ($K=100-500$ პირობებში) და ტექნოლოგიური პროცესის სტაბილურობა. ამ მეთოდის გამოყენების შედეგად დამზადებულ ფოტოელექტრულ გარდამქმნელებს გააჩნიათ მქკ-ის მაღალი ტემპერატურული სტაბილურობის უნარი და მზის სპექტრის მოკლელტალღოვან არეში შედარებით უფრო მაღალი მგრძნობიარობა.

მიღებული ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე კონცენტრირებული გამოსხივების მოდულისათვის დავამუშავეთ მზის ელემენტების კრისტალების ტოპოლოგია და მათ საფუძველზე შევქმენით მოდულის კონსტრუქცია ფრენელის ლინზების პანელის გამოყენებით. ორგანული ფოტოპოლიმერული მასალა, რომლისგანაც დამზადებულია ლინზები, ოპტიკურად ეფექტურია და დედამიწის პირობებში ნორმალურად მუშაობს. ელემენტების და მოდულების ტესტირების მეთოდების გამოყენებით შევისწავლეთ ძირითადი პარამეტრები როგორც ლაბორატორიულ ასევე საველე პირო-

ბეზში. ფოტოელექტრული სისტემების საველე პირობებში გამოცდა გულისხმობს, სისტემის ექსპლუატაციის მაქსიმალურად მიახლოებულ პირობებში, ყველა იმ აუცილებელი პარამეტრის გაზომვას და დაზუსტებას, რომლებიც ვერ ხერხდება ლაბორატორიულ პირობებში და საჭიროა: ტესტირებისა და ექსპლუატაციისთვის; პროექტირების პროცესის განხორციელებისთვის; საინტერესოა მომხმარებლისთვის. საველე კვლევისთვის ავირჩიეთ სამი რაიონი: ე. თბილისი, ფოთი და გუდაური. ხსენებულ რეგიონებში ჩატარებული საველე გამოცდებით მიღებული შედეგების საფუძველზე, რომლებიც აისახა გარდამქმნელი სისტემის პარამეტრებზე და მის დატვირთვის მახასიათებლებზე, ჩანს, რომ არსებობს გარკვეული კორელაცია გარდაქმნის ეფექტურობასა და ორ ძირითად პარამეტრს შორის - ატმოსფერული ფენის სისქე (AM) და მოცემულ რეგიონში ატმოსფეროს მდგომარეობა.

დავამუშავეთ კონსტრუქცია და დავმზადეთ მცირე სიმძლავრის ტურისტული მობილური ფოტოელექტრო სისტემის საპილოტო მოდელი. სისტემას აქვს უნარი იმუშაოს ნებისმიერ სავალე პირობებში. ის შეიძლება გამოყენებული იქნას, როგორც ელექტრო ენერჯის წყარო მთიანი, მიუვალი ადგილების, ტურისტული ჯგუფების, მონადირეთა, მეთევზეთა, მცირე ფერმერული მეურნეობის და სხვა ობიექტების ავტონომიური ელექტრო ენერჯით მომარაგების უზრუნველსაყოფად. დაშლილ მდგომარეობაში სისტემა მთლიანად თავსდება მოხერხებულ წყალგაუმტარ ჩანთაში.

სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება: ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე მიღებული შედეგები და მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდულის დამუშავებული კონსტრუქცია, დამზადების ტექნოლოგია, თვისებებისა და პარამეტრების შესწავლის მეთოდები საშუალებას იძლევა დავამუშაოთ ახალი კონსტრუქციის მზის მოდულები და მათი საწარმოო ვარიანტი.

ABSTRACT

Among the alternative and renewable sources of energy the transformation of solar energy directly into electric energy attracts more growing attention. In consciousness of society the idea is being established that energetic of future should be based on a wide scale application of solar energy. The devices which directly transform the solar energy into the electric energy are fully modern ones both from the scientific and technical point of view.

Study of the process of solar energy transformation is task of the field of modern science - the "Photo-energetic". The photo-energetic is not a new technology. The novelty is that technology by its level of development has achieved the stage when it is possible to create the electric stations with the power of several Watts. For today solar energy is widely used in various fields.

Till present the photoelectric transformers of solar radiation practically have been prepared only on crystalline silicon. The goal of researchers is to increase efficiency of photoelectric transforming systems and to lower the cost. The investigations are mainly carried out for development of solar elements and modules, for creation of new materials and optimization of their composition, for processing of structures of a new type and creation of cascade photoelectric transformers in which there are used the semiconductors with the width of specially selected forbidden gaps. With the aim to increase the efficiency of solar photoelectric transformers for the last period there are widely used as well the concentrated systems. Fabrication of concentrating systems, hetero and cascade structures is rather complex and costly process. But in future their application is very profitable, so as the efficiency is considerably increased and totally it is possible that their price will be decreased.

These actual problems have defined **theme and goal of the given work:** On the basis of AlGaAs-GaAs structures prepared by epitaxial method of low-temperature liquid-phase to develop the technology and construction of preparation of photoelectric transforming elements of solar concentrated radiation, study of their electro-physical properties.

For realization of the target we have decided to solve following tasks:

1. On the basis of multilayer hetero-structure we have labored out the design and technology fabrication of photoelectric transforming element and module of solar concentrated radiation.
2. On the basis of p-n hetero-structures prepared by the low-temperature technological methods we have created a laboratory version of solar cells and module.
3. We have worked out the methods of testing modules and lenses in the field conditions and have carried out the testing.
4. On the basis of analysis of the received results we have labored out a recommendation about the industrial version of solar concentrated radiation.

The results and scientific novelty of the work:

1. The epitaxial method of low-temperature liquid-phase for receiving the solid solution *GaAs-AlAs* multi-layer hetero-structures has been investigated and temperature-time modes of growth of separate layers have been identified.
2. The design and technology of preparation of photo-electric transforming module of solar concentrated radiation has been labored out, as well testing methods in laboratory and field conditions.
3. The influence of designing and technological factors on exploitation parameters and photoelectric characteristics of photoelectric transforming module of solar concentrated radiation has been studied.

In the present work for fabrication of hetero-structures we have used the low-temperature liquid-phase epitaxial method in which we have introduced the changes and identified: a chemical composition of solid solutions of separate layers of multilayer hetero-structures; the optimal thicknesses; type and concentration of doping material; the temperature-time modes of the growing processes. As a result in the obtained hetero-structures the high value of efficiency coefficient of solar concentrated radiation up to 23,4% ($K=100-500$) and stability of technological process have been achieved.

On basis of obtained hetero-structures for module of concentrated module we have developed the topology of the crystals of solar cells and on their basis we have created the design of module by using the panel of Fresnel lenses. By using of testing methods of elements and modules we have studied the main parameters both in laboratory and field conditions. On the basis of results obtained from field testing carried out in the mentioned regions which have been reflected on the parameters of transforming system and on its loading characteristics, it is shown that there exists the definite correlation between the transformation efficiency and two main parameters – thickness of atmospheric layer (AM) and state of the atmosphere in a given region.

We have developed design and fabricated a pilot model of low power tourist mobile photoelectric system.

The practical validity of work: The results obtained as a result of experimental researches and processed construction of photoelectric transformer module of solar concentrated radiation, fabrication technology, the methods of study of properties and parameters give us a possibility to labor out solar modules of a new design and their industrial version.

შინაარსი

შესავალი	19
თავი 1.	23
1.1. მზის ენერგეტიკის საწყისი პერიოდი, განვითარების ეტაპები და ბოლო წლების მონაცემები	23
1.2. მზის გამოსხივება	24
1.3. მზის გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელები	26
1.4. ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე დამზადებული მზის ელემენტები	28
1.5. მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდაქმნა	33
1.6. მზის ენერჯის ნანოჰეტეროსტრუქტურული ფოტოელექტრული გარდამქმნელები	37
1.7. მზის ენერჯის ფოტოელექტრული გარდაქმნელები ქვანტურწერტილიან ჰეტეროსტრუქტურებზე	43
თავი 2.	50
თხევადფაზური ეპიტაქსიით დამზადებული AlGaAs-GaAs სტრუქტურების საფუძველზე მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრო გარდამქმნელი ელემენტების დამუშავება	50
2.1. ფოტოელექტრო გარდამქმნელის (ფეგ) ჰეტეროსტრუქტურის დამზადების ლაბორატორიული ტექნოლოგია	51
2.2. დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიის მეთოდით გაზრდილი AlGaAs-GaAs სტრუქტურების საფუძველზე მზის გამოსხივების კონცენტრატორიანი ფოტოელექტრული ელემენტების დამზადების ტექნოლოგიის და კონსტრუქციის დამუშავება	64
2.2.1. სტრუქტურაში ჩაშენებული ბრეგის ამრეკლავიანი მზის ელემენტების კონსტრუქცია, დამუშავება და დამზადება	79
2.2.2. მზის ელემენტის სტრუქტურა და მისი დამზადება	81
2.3. შიდა და გარე ტესტირების ტექნოლოგიის დამუშავება	85
2.3.1. ოპტიკური ელემენტების ლაბორატორიულ პირობებში ტესტირება ..	85
2.3.2. შენობის შიგნით მზის ელემენტის ჩვეულებრივი ტესტირება	89
2.3.3. გარე (საველე პირობებში) ტესტირება	89
2. კონცენტრატორიანი ფოტოელექტრული მოდულის კონსტრუქცია	91
2.4. მზის ფოტოელექტრული სისტემის გამოცდა საველე პირობებში	95

2.5.1. მზის ფოტოელექტრული სისტემის საველე პირობებში გამოცდის სპეციფიკა და აუცილებელი პირობები.....	96
თავი 3.	102
მცირე სიმძლავრის მზის ფოტოელექტრო სისტემის დამუშავება და ექსპერიმენტული (საპილოტო) მოდელის შექმნა.....	102
3.1. ამოცანის მიზნიდან გამომდინარე მოსამზადებელი სამუშაოები	102
3.2. ექსპერიმენტული მოდელი და მისი კონსტრუქცია	106
საერთო დასკვნები:	116
გამოყენებული ლიტერატურა	118

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. თეორიულად მოსალოდნელი და რეალურად მიღწეული მქკ-ის მნიშვნელობები კასკადური მზის ელემენტებისათვის	32
ცხრილი 2. ჰეტეროფოტოგარდამქმნელის (ჰფგ) დამზადების ტექნოლოგიური პროცესის ბლოკ-სქემა.....	61
ცხრილი 3. ცხრილში წარმოდგენილია ეპიტაქსიური ზრდის პროცესში გამოყენებულ წვეთ-ნალღობთა შემადგენლობა	70
ცხრილი 4. სხვადასხვა ანტიამრეკლავი (ARC) დანაფენით დაფარული ელემენტების ფოტოდენის სიმკვრივები და ამ ელემენტებში J_{sc} -ს შეფარდება $ZnS+MgF_2$ ფენებით შექმნილი ARC დანაფარით დაფარულ ელემენტის J_{sc} -თან.	74
ცხრილი 5. მზის ელემენტების მახასიათებლები როგორც ფუნქცია კონცენტრირების შეფარდებისა AM1,5D-თან.....	76
ცხრილი 6. საუკეთესო მზის ელემენტების ტესტირების შედეგად მიღებული მახასიათებლები AM0 და AM1,5-სათვის.	85
ცხრილი 7. აკუმულატორის ტევადობის განსაზღვრის კოეფიციენტები	105
ცხრილი 8. 25W – სიმძლავრის, 12 ვოლტიანი მოდულის ტექნიკური მახასიათებლები	109
ცხრილი 9. ეფექტურობის დამოკიდებულება მოდულის დახრის კუთხეზე.....	110
ცხრილი 10. ჰერმეტიკული აკუმულატორის პარამეტრები.....	112
ცხრილი 11. რეგულატორის ელექტრული პარამეტრები და მახასიათებლები	113
ცხრილი 12. მცირე სიმძლავრის მობილური ფოტოელექტროსისტემის ელექტრული პარამეტრები და მახასიათებლები.....	114

ნახაზების ნუსხა

ნახ.1. მზის გამოსხივების სპექტრული განაწილება: 1-AM0 სპექტრი, 2-AM1 სპექტრი.....	25
ნახ. 2. მზის ფოტოელემენტი.....	26
ნახ.3. ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ძირითადი წერტილები, რითაც ხასიათდება მზის მოდული	27
ნახ.4. მზის ელემენტის მაქსიმალურად მიღწეული ეფექტურობის (η_{max}) დამოკიდებულება მასალის აკრძალული ზონის სიგანეზე (ΔE_g).	29
მთლიანი ხაზი - AM0 მზის სპექტრისათვის, პუნქტირით - AM1.5d სპექტრისათვის (გამოსხივების $1sun$ და 1000-ჯერადი კონცენტრირების)..	29
ნახ. 5. pAlGaAs-pGaAs-nGaAs ჰეტეროგადასვლიანი მზის ელემენტების ზონური დიაგრამა: ა) სტრუქტურა ჩაშენებული ელექტრული ველით;	30
ბ) სტრუქტურა ჩაშენებული ძლიერი ელექტრული ველით;	30
გ) სტრუქტურა ფართოზონიანი ფენით ზურგის მხრიდან;.....	30
დ) სტრუქტურა პოტენციური n^+ GaAs ბარიერით.....	30
ნახ.6. AlGaAs/GaAs-ის მრავალფენიანი, ერთ p-n გადასვლიანი მზის ელემენტების სქემატური დიაგრამა: ა) მზის ელემენტის სტრუქტურა ზურგის მხრიდან პოტენციალური ბარიერით და თხელი ფართოზონიანი AlGaAs-ის ფანჯრით; ბ) მზის ელემენტის სტრუქტურა ჩაშენებული ამრეკლავი ფენით.....	31
ნახ. 7. ა) კონცენტრირებული მოდულის განივი ჭრილი: 1-ლინზური პანელის ფუძე; 2-ფრენელის მიკროლინზა; 3-მოდულის; 4-მზის მოდულის ფუძე; 5-სამონტაჟო და 6-მზის ელემენტი.	36
ნახ.8. ფოტოელექტრული მოდულის ექსპერიმენტული ვარიანტი.....	36
ნახ.9. მზის ფოტოგარდამქმნელი დამზადებული ბრეგის ამრეკლავიან ნანოჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე	38
ნახ.10. კასკადური მზის ფოტოგარდამქმნელი ჰეტეროსტრუქტურა, რომელიც უზრუნველყოფს $\eta_{max} > 35\%$ -ზე 1000-ჯერადი კონცენტრირების შემთხვევაში.	39
ნახ.11. ნანოჰეტეროსტრუქტურების და Si -ის ფოტოგარდამქმნელების მკვ-ს ზრდის დინამიკა	40
ნახ.12. ორგადასასვლელიანი GaInP/GaAs მზის ელემენტის ნანოსტრუქტურის სქემა და განივი ბზარის ფოტოგრაფია.....	40

ნახ.13. MOSIVD - ტექნოლოგიით მიღებული ნანოსტრუქტურაში კასკადურ GaInP/GaAs მზის ფოტოგარდამქნელებში P, As, In, Al, Ga, Zn, C, Si ელემენტების კონცენტრაციის განაწილება.....	41
ნახ.14. GaInP/GaAs/Ge მზის ფოტოგარდამქმნელის სამ გადასლიან ნანოსტრუქტურაში ფოტოგამოსხივების სპექტრული მახასიათებელი	41
ნახ.15. ჯამური მქკ-ის 35%-იანი მიღწევის დემონსტრირება GaInP/GaAs (მქკ= 30%) სტრუქტურაში, სადაც „ზედა“ ფენა გამჭვირვალეა ხოლო „ქვედა“ ფენა მგრძნობიარეა ინფრაწითელი გამოსხივების მიმართ	42
ნახ.16. მზიანი დღის განმავლობაში გენერირებული სიმძლავრის ხვედრითი მნიშვნელობის (ვტ/მ ²) ცვლილება (მრუდი 1, 3) და გამომუშავებული ელექტრული ენერგია (კვტსთ/მ ²) (მრუდები 2,4). Si-ის მზის ელემენტზე (მრუდი 1,2) და ნანოჰეტეროსტრუქტურის საფუძველზე (3,4)	42
ნახ.17. სილიციუმის ფეგ-ით გარდაქმნილი მზის სპექტრის ნაწილი მარცხნივ და კასკადური ნანოსტრუქტურების ფეგ-ით მარჯვნივ.....	45
ნახ.18. A ³ B ⁵ მყარი ხსნარის აკრძალული ზონის სიგანის დამოკიდებულება მესერის მუდმივაზე და იმ მასალის შემადგენლობაზე რომლისგანაც მზადდება ფოტოელექტრული გარდამქმნელები.....	45
ნახ.19. მრავალფენიანი ფოტოელექტროგარდამქმნელის მქკ -ს დამოკიდებულება დღის სხვადასხვა პერიოდში.....	46
ნახ.20. მზის ელექტროენერგიის ღირებულების შემცირების პროგნოზი, რომელიც მიიღება კასკადურ ჰეტეროგადასვლიან სტრუქტურების საფუძველზე დამზადებული კონცენტრატორიანი ენერგოდანგარებით	46
ნახ.21. III და V ჯგუფის შენაერთების საფუძველზე დამზადებული მრავალგადასვლელიანი ჰეტეროსტრუქტურები	47
ნახ.22. (ა, ბ) მზის ელემენტის სტრუქტურა კვანტური წერტილებით.....	48
ნახ.23. ბუფერული ფენის ეპიტაქსიური ზრდის პროცესის ტემპერატურულ-დროითი რეჟიმის დიაგრამა	53
ნახ. 24. გრაფიტის ნავის საერთო ხედი და მისი ძირითადი კონსტრუქციული ელემენტები	54
ნახ. 25. მყარი ხსნარის ეპიტაქსიური და თანმდევი დიფუზიური პროცესების ტემპერატურული რეჟიმის დიაგრამა	55
ნახ. 26. წყალბადში თუთიის დიფუზიის ტემპერატურული რეჟიმის დიაგრამა	56
ნახ.27. ტემპერატურული რეჟიმის დიაგრამა	61
ნახ. 28. ტექნოლოგიური პროცესების გრაფიკული სურათი_1-16 ოპერ.	63
ნახ. 29. ტექნოლოგიური პროცესების გრაფიკული სურათი:_6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,14,15,17 და 18 ოპერაციები.....	64

ნახ. 30. ჰეტეროსტრუქტურა მაგნიუმით ლეგირებული p-GaAs ემიტერით და BSF $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0,1-0,2$) ფენით.....	65
ნახ. 31. ჰეტეროსტრუქტურა n^+GaAs (Te)-ის ფენის კრისტალიზაციის შედეგად მიღებული ეპიტაქსიური BSF ფენით და Mg ან Ge (Zn) ლეგირებული ორფენიანი ემიტერით.....	66
ნახ.32. ჰეტეროსტრუქტურა BSF ფენით (მიღებული მაღალლეგირებული n^+GaAs ფუძეშრის გამოყენებით) და Ge-ით ლეგირებული ორფენიანი p-GaAs ემიტერით.	66
<i>ნახ. 33. p-GaAs ემიტერში თავისუფალი მუხტის გადამტანების (ხვრელების) სიმკვრივის გადანაწილება (სისქის გაზომვა ხდება p-AlGaAs/p-GaAs-ის გამყოფი საზღვრის ხაზიდან): 1. p-GaAs ფენა, Mg ლეგირებული ზრდის პროცესში Zn-ის დიფუზიის შემდგომ; 2. p-GaAs, რომელიც გაზრდილია სამი ერთმანეთისგან მაგნიუმის კონცენტრაციით განსხვავებული ფენების კრისტალიზაციით.</i>	<i>67</i>
ნახ. 34. p-GaAs ემიტერში Zn და Mg ატომური კონცენტრაციის SIMS პროფილი (Mg-ით ლეგირება განხორციელებულია Zn-ის დიფუზიის შემდეგ და p-GaAs ემიტერის საერთო სისქეა 1,6 მკმ).....	68
ნახ. 35. p-GaAs ემიტერში Ge ატომთა კონცენტრაციის SIMS პროფილი (p-GaAs ემიტერის საერთო სისქეა 1,4 მკმ).....	68
ნახ. 36. Mg-ით ლეგირებული და Zn-ით დიფუზია ჩატარებული p-GaAs ემიტერში თავისუფალი მუხტის გადამტანების კონცენტრაციის განაწილება (გაზომილი ანოდური დაჟანგვის ყველა ეტაპზე გაბნეული სპექტროსკოპიის მეთოდით), ფოტოაქტიური p-GaAs-ის ფენის სრული სისქეა 1,3 მკმ.....	69
ნახ. 37. მაღალკონცენტრირებული მზის ელემენტებისათვის ეპიტაქსიური სტრუქტურის ზრდის ტემპერატურული რეჟიმი, როდესაც Ge-ით ემიტერის ლეგირება ხდება თანდათან (ამ შემთხვევაში p-GaAs არ არის დაცული საკონტაქტო ფენით).	70
ნახ. 38. მაღალკონცენტრირებული მზის ელემენტების საერთო სახე, განათებული უბნის საპროექტო ზომაა 6,6 მმ ² (ა) და 2,0 მმ ² (ბ.გ.).....	71
ნახ. 39. ა) GaAs-ის საფუძველზე შექმნილი ერთგადასვლიანი მზის ელემენტი ZnS-ის ანტიამრეკლავი დანაფენითა და პრიზმული ხუფით.ბ) GaAs-ის საფუძველზე შექმნილი მაღალკონცენტრირებული მზის ელემენტი, ფენით მაიზოლირებელ SiO ₂ -ზე.....	72
ნახ. 40. Al _{0.75} Ga _{0.15} -ის “ფანჯრის“ ფენიდან არეკვლა, რომელიც დაფარულია სხვადასხვა ანტიამრეკლავი დანაფენებით.	72
ნახ.41. მზის ელემენტის სპექტრული გამოძახილი, როცა ელემენტის ზედაპირზე დაფენილია სხვადასხვა ანტიამრეკლავი ფენები. ელემენტებში საკონტაქტო მესერის თითებს შორის დაშორება არის 50 მკმ, ჩაბნელებულია ზედაპირის 22 %.	73

ნახ. 42. შვესების ფაქტორი (FF), როგორც კონცენტრირების ფუნქცია ელემენტში სხვადასხვა თითებისა და ღია შუალედებისათვის: 0,2 მმ (მრუდი 1); 0,1 მმ - (მრუდი 2,3); 0,05 მმ (მრუდი 4) და განათებული არის სხვადასხვა საპროექტო სიგანით 7 მმ ² (მრუდი 1,2) და 2 მმ ² (მრუდი 3,4).....	75
ნახ.43. შვესების ფაქტორი (FF), როგორც კონცენტრირების ფუნქცია ელემენტში თითების ერთმანეთისგან 50 მკმ დაშორების შემთხვევაში (ელემენტის მახასიათებლები წარმოდგენილია ცხრილ 5-ში).....	75
ნახ.44. გახსნილი წრედის ძაბვა, როგორც კონცენტრირების ფუნქცია (FF) ფაქტორიანი ელემენტისათვის, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 43-ზე (ელემენტის მახასიათებლები წარმოდგენილია ცხრილ 3-ში).....	77
ნახ.45. ეფექტურობა, როგორც კონცენტრირების ფუნქცია FF ფაქტორიან და V _ფ მნიშვნელობის ელემენტისათვის, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 43 და ნახ. 44-ზე (ელემენტის მახასიათებლები წარმოდგენილია ცხრილ 5-ში).....	77
ნახ.46. გახსნილი წრედის ძაბვის შედარება, როგორც კონცენტრირების ფუნქცია სხვადასხვა მზის ელემენტებისათვის: მრუდი 1 - ცხრილ 5-ში წარმოდგენილ პარამეტრების მქონე LPE მზისელემენტი;მრუდი 2 - MOCVD ელემენტი ზემოდან დაფარული p- GaAs საკონტაქტო ფენით; მრუდი 3 – LPE ელემენტი p- GaAs ემიტერზე საკონტაქტო თითებით და შინით, რომლებიც განლაგებულია SiO ₂ -ის საიზოლაციო ფენაზე;მრუდი 4 - თეორიული ზღვარი.	78
ნახ.47. ბრეგის ამრეკლავის პერიოდზე დამოკიდებული არეკვლის უნარიანობის პიკი.....	80
ნახ.48. ბრეგის 12-პერიოდიანი ამრეკლავის ექსპერიმენტულად.....	81
გაზომილი არეკვლის უნარიანობა.....	81
ნახ. 49. მზის ელემენტის სტრუქტურა ჩაშენებული ბრეგის ამრეკლავით ...	82
ნახ.50. ჩაშენებულ ბრეგის ამრეკლავიანი სტრუქტურის გარე კვანტური გამოსავალიაღწევს 32,7 მა/სმ ² . ნახ.2.5-ზე.....	83
ნახ. 51. ბრეგის ამრეკლავიანი 23,4 %-იანი ეფექტურობის მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები	83
ნახ. 52. მზის ელემენტების ტესტირების შედეგად მიღებული მახასიათებლები AM0 და AM1,5 პირობებში განათებისათვის (ფრაიბურგში, მზის ენერგეტიკის ფრანკოფერის სახელობის ინსტიტუტში).	84
ნახ. 53. ფრენელის ლინზის ტესტირების ოპტიკური სქემა	86
ნახ. 54. ფრენელის ლინზის ოპტიკური კონცენტრატორის ფოკალურ სიბრტყეში ფოტონების ნაკადის და სინათლის ძალის გაზომილი პროფილი	87
ნახ.55. ლინზური მონობლოკის კონტროლის ხელსაწყოს ოპტიკური სქემა	88
ნახ. 56. ეკრანზე ფოკალური ლაქის განლაგების მაგალითი.....	88

ნახ.57. ოპტიკური სისტემა „ოპტიკური ხელსაწყო-პოლირებული ზედაპირი-PV მოდული“	90
ნახ. 58. კონცენტრატორიანი ფოტოელექტრული მოდულის კონსტრუქცია	91
ნახ. 59. I და II ტიპის მოდულების ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები.....	94
ნახ. 60. მზის ელემენტების დატვირთვის საშუალო მახასიათებელი კონცენტრატორის გამოყენებით (ა), კონცენტრატორის გარეშე (ბ);	100
ნახ. 61. მცირე სიმძლავრის მზისფოტოელექტრული მობილური სისტემის ბლოკ-სქემა: 1. მზის გენერატორი; 2. აკუმულიატორთა ბატარეა; 3. დამუხტვა-განმუხტვის რეგულიატორი; 4. ინვენტორი; 5. ცვლადი დენის მომხმარებელი; 6. მუდმივი დენის მომხმარებელი.....	108
ნახ. 62.მზის მოდულის მახასიათებელი მნიშვნელოვანი წერტილები ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე	109
ნახ.63 ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდული.....	109
ნახ. 64. რეგულატორის გარეგანი სახე.....	113

მადლიერება

მადლობას უხდი ჩემს სამეცნიერო ხელმძღვანელს, პროფესორ გელა გოდერძიშვილს დისერტაციაზე მუშაობის პერიოდში გაწეული სამეცნიერო და პედაგოგიური შრომისათვის. ასევე დიდი მადლიერების გრძნობა მინდა გამოვხატო იმ მხარდაჭერისთვის რასაც ვგრძნობდი ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის და ფიზიკის დეპარტამენტის ხელმძღვანელობისა და თანამშრომლების მხრიდან.

შესავალი

მზე, ამოუწურავი ენერჯის წყარო, ყოველწამიერად დედამიწას აწვდის იმდენ ენერჯიას, რაც რამოდენიმე ათასჯერ მეტია მთელი მსოფლიოს ელექტროსადგურების მიერ ჯამში გამომუშავებულ ენერჯიაზე. ენერჯის ალტერნატიულ და განახლებად წყაროებს შორის მზის ენერჯეტიკა იქცევა სულ უფრო მეტად მზარდ ყურადღებას. საზოგადოების ცნობიერებაში მკვიდრდება აზრი, რომ მომავლის ენერჯეტიკა უნდა იყოს დაყრდნობილი მზის ენერჯის ფართომასშტაბიან გამოყენებაზე. მზის ენერჯის გამოყენების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მაგალითია, მისი გამოსხივების ენერჯის, ფოტოელექტრული ნახევარგამტარული გარდაქმნელების საშუალებით (PV სისტემა), გარდაქმნა პირდაპირ ელექტრო ენერჯიად. ეს არის ეკოლოგიურად სუფთა, უხმაურო და საიმედო ენერჯის წყარო. მომავლის ფართომასშტაბიან მზის ენერჯეტიკაში ეს მოწყობილობები არიან სრულიად თანამედროვენი, როგორც სამეცნიერო ასევე ტექნიკური თვალსაზრით.

მზის ენერჯის გარდაქმნის პროცესის შესწავლა იქცა ახლად შექმნილი თანამედროვე მეცნიერების დარგის „ფოტოენერჯეტიკის“ ამოცანად. ფოტოენერჯეტიკა არ არის ახალი ტექნოლოგია: კოსმოსური ერის პირველივე დღეებიდანვე მზის ბატარეებით ხდებოდა კოსმოსური ხომალდების ელექტრული ენერჯით მომარაგება. სიახლე მდგომარეობს იმაში, რომ ტექნოლოგიამ თავისი განვითარების დონით მიაღწია იმ სტადიას, როცა შესაძლებელია შეიქმნას რამოდენიმე მილიონი ვატი სიმძლავრის ელექტროსადგურები. დღეისათვის მზის ენერჯია ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა სფეროში: მაღალმთიან რეგიონებში; ქალაქიდან დაშორებულ რაიონებში სადაც არ არის ცენტრალიზებული ელექტრომომარაგება; ცალკეული სახლების ელექტრომომარაგებისათვის; ტელეკომუნიკაციის სისტემებში; განათების სისტემებში და ა.შ. ბოლო წლებში ამ მიზნებისთვის მზის მოდულები თავისი გამოყენების თვალსაზრისით წარმოადგენს საერთო ბაზრის 90%-ს. უმეტეს შემთხვევაში ფოტოელექტრული გარდაქმნელები მუშაობენ ქსელთან პარალელურ რეჟიმში და

გამოიმუშავებენ ეკოლოგიურად სუფთა ელექტრულ ენერგიას ცენტრალური ელექტრომომარაგების ქსელისთვის. მრავალ ქვეყანაში უკვე არსებობს მზის ენერგეტიკის განვითარების სპეციალური მხარდამჭერი საკანონმდებლო და ეკონომიკური მექანიზმები.

დღევანდლამდე მზის გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელები პრაქტიკულად მზადდებოდა მხოლოდ კრისტალურ სილიციუმზე. ასევე ყურადღებას იმსახურებენ სხვა მასალები. მათ მიეკუთვნებათ: სპილენძ-ირიდიუმის დისელენიდი, გალიუმის არსენიდი, კადნიუმის ტელური. მკვლევართა მიზანს წარმოადგენს ფოტოელექტრული გარდამქმნელი სისტემების ეფექტურობის გაზრდა და ღირებულების შემცირება. კვლევები მზის ელემენტების და მოდულების განვითარებისათვის ძირითადად მიმდინარეობს: ახალი მასალების შექმნასა და მათი შემადგენლობის ოპტიმიზაციაზე; ახალი ტიპის ჰეტეროსტრუქტურების დამუშავებასა და კასკადური ფოტოელექტრული გარდამქმნელების შექმნაზე, რომლებშიც გამოიყენება ნახევარგამტარები სპეციალურად შერჩეული აკრძალული ზონის სიგანით. მზის ფოტოელექტრული გარდამქმნელების ეფექტურობის გაზრდის მიზნით ბოლო პერიოდში ასევე ფართოდ გამოიყენება კონცენტრატორული სისტემები. კონცენტრატორული სისტემების, ჰეტერო და კასკადური სტრუქტურების დამზადება საკმაოდ რთული და ძვირადღირებული პროცესია. მაგრამ მომავალში მათი გამოყენება მომგებიანია, ვინაიდან მნიშვნელოვნად იზრდება ეფექტურობა და საერთო ჯამში შესაძლებელია მათი ღირებულების შემცირება.

აქვე მინდა ავღნიშნო, რომ საქართველო თავისი სპეციფიკით წარმოადგენს მეტად საინტერესო რეგიონს მზის ენერგეტიკის განვითარებისთვის აქ იდეალური ბუნებრივი პირობებია ალტერნატიული ენერგიის ათვისებისათვის. საქართველოს გეოგრაფიული მდებარეობის გათვალისწინებით მზის ეფექტური და ხანგრძლივი გამოსხივება 250-დან 280 დღემდე მერყეობს, რაც წელიწადში დაახლოებით 1900-2200 საათს შეადგენს. მზის

ენერჯის სრული წლიური თეორიული პოტენციალი საქართველოში შეფასებულია 108 მვტ-ის დონეზე.

ყველა ამ აქტუალურმა პრობლემამ განსაზღვრა მოცემული ნაშრომის მიზანი: დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიის მეთოდით დამზადებული AlGaAs-GaAs სტრუქტურების საფუძველზე მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ეფექტური ფოტოელექტრული გარდამქმნელი ელემენტების დამზადების ტექნოლოგიის და კონსტრუქციის დამუშავება, მათი ელექტრო-ფიზიკური თვისებების შესწავლა.

დასახული მიზნის მისაღწევად აუცილებელი იყო დაგვემუშავებინა და გადაგვეწყვიტა შემდეგი ამოცანები:

1. მრავალფენიანი ჰეტეროსტრუქტურის საფუძველზე მზის ელემენტების კონსტრუქცია და დამზადების ტექნოლოგია.
2. დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიის მეთოდით დამზადებული ფოტოელექტრული p-n ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე მზის ელემენტების და მოდულის ლაბორატორიული ვარიანტი.
3. მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელი ელემენტის და მოდულის კონსტრუქცია.
4. ფოტოელექტრული გარდამქმნელისათვის კონცენტრატორის პოლიმერული ლინზების კონსტრუქცია და დამზადების ტექნოლოგია.
5. მოდულების და ლინზების ლაბორატორიულ და საველე პირობებში ტესტირების მეთოდის დამუშავება და ტესტირების ჩატარება.
6. მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე მზის კონცენტრირებული გამოსხივების მოდულის საწარმოო ვარიანტის დამუშავება.

ნაშრომის შედეგები და მეცნიერული სიახლე:

1. გამოკვლეულია მყარისნარის GaAs-AlAs მრავალფენიანი ჰეტეროსტრუქტურების მიღების დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიის მეთოდი და დადგენილია ცალკეული ფენის ზრდის პროცესის ტემპერატურულ-დროითი რეჟიმები.

2. დამუშავებულია მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდულის კონსტრუქცია და დამზადების ტექნოლოგია, ლაბორატორიულ და საველე პირობებში ტესტირების მეთოდები.
3. შესწავლილია მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდულის ფოტოელექტრულ მახასიათებლებსა და საექსპლუატაციო პარამეტრებზე კონსტრუქციული და ტექნოლოგიური ფაქტორების გავლენა.

სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება

ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე მიღებული შედეგები და მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდულის დამუშავებული კონსტრუქცია, დამზადების ტექნოლოგია, თვისებებისა და პარამეტრების შესწავლის მეთოდები საშუალებას იძლევა დავამუშაოთ ახალი კონსტრუქციის მზის მოდულები და მათი საწარმოო ვარიანტი.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იყო: Conference in Berlin, Germany (Deutsche Physucallische Gesellschaft – DPG, March 2012); საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 81-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე (თბილისი 2014 წ); International School of Nanophotonics and Photovoltaics – საქართველო-იტალია, 2014; 79th Annual Meeting of the DPG and DPG Spring Meeting (Deutsche Physikalische Gesellschaft), 2015, ბერლინი, გერმანია; ინფორმატიკის და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ფიზიკის დეპარტამენტის სამეცნიერო სემინარებზე.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავლის, სამი თავის, დასკვნის და 80 ციტირებული ლიტერატურის სიისაგან. დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 123 გვერდს, ნახაზების რაოდენობა- 64, ცხრილების რაოდენობა -12 .

თავი 1.

1.1. მზის ენერგეტიკის საწყისი პერიოდი, განვითარების ეტაპები და ბოლო წლების მონაცემები

მზის ბატარეების განვითარების ათვლის წერტილად ითვლება 1839 წელი, როდესაც აღმოჩენილი იქნა ფოტოგალვანური ეფექტი, ეს აღმოჩენა ეკუთვნის ედმონდ ბეკერელს. მზის ბატარეების ისტორიის შემდგომი ეტაპი იყო ჩარლ ფრისტის მოღვაწეობა. ბეკერელის აღმოჩენის ორმოცდაათი წლის შემდეგ, 1883 წელს ფრისტმა პირველად შექმნა ელემენტის კონსტრუქცია, რომელიც იყენებდა მზის ენერგიას. ძირითად აღმოჩენად იქცა სელენი, რომელიც ზემოდან დაფარეს ოქროს თხელი ფენით. გამომგონებელი მივიდა იმ დასკვნამდე, რომ ელემენტთა ურთიერთ-შეთვისებამ საშუალება მისცა, მინიმალური ხარისხით (1%-ზე ნაკლები) მზის ენერგია გარდაექმნა ელექტრულ ენერგიად [1]. ინტენსიური მოღვაწეობის პერიოდები იცვლებოდა დაღმავლობით. ბევრი თვლის, რომ მზის ბატარეების განვითარება თავის საწყისს იღებს ალბერტ აინშტაინის მოღვაწეობიდან. კერძოდ, დიდმა მეცნიერმა 1921 წელს მიიღო ნობელის პრემია გარე ფოტოეფექტის თავისებურებების შესწავლისათვის.

30-იან წლებში საბჭოთა მეცნიერების მიერ ფოტოეფექტის გამოყენებით მიღებული იქნა ელექტრული დენი. მათი მარგი ქმედების კოეფიციენტი იყო 1%-ზე მეტი, რაც იმ დროისათვის წარმოადგენდა სერიოზულ ნაბიჯს [2]. უკვე 1954 წელს ამერიკელ მეცნიერთა ჯგუფმა მიაღწია მქკ-ის ზრდას 6%-მდე და მსოფლიომ იხილა პირველი მზის ბატარეა სილიციუმზე [3]. ამავე პერიოდში დაიწყო A^3B^5 შენაეთების სინთეზი, რაც წარმოადგენდა ფოტოენერგეტიკის განვითარების სტიმულს [4]. მზის ბატარეების წარმატებული წარმოება დაიწყო 80-იანი წლების ბოლოდან და დღეს მიღწეულია 20 %-მდე მქკ-ს. მეცნიერებმა შექმნეს მოწყობილობები, რომლებიც დამზადებულია ლაბორატორიულ პირობებში და გააჩნდათ მქკ-ის 30%-ზე მეტი მნიშვნელობა.

მზის ბატარეების შემდგომი განვითარება და მათი გავრცელება ბევრად არის დამოკიდებული მეცნიერებისა და სახელმწიფო სტრუქტურების დაინტერესებაზე. ასეთი დაინტერესება არსებობს, ვხედავთ დარგი ვითარდება და ჩანს ახალი მიღწევები. მზის ენერჯია ხდება უფრო მიღწევადი, უსაფრთხო და მოსახერხებელი გამოყენებისათვის. ამერიკელი მეცნიერები ფიქრობენ, რომ უახლოეს პერიოდში კალიფორნიის მზის ენერჯია შეცვლის არაბულ ნავთობს. ფინანსები, რომლებიც ხმარდება კვლევების ჩატარებას გამართლებულია, ვინაიდან საგრძნობია ტრადიციული წყაროების გაძვირების ტენდენცია. მეწარმეთა დიდი უმრავლესობა ათვითცნობიერებს მიმართულების პერსპექტიულობას და გეგმავენ ჩადონ მნიშვნელოვანი თანხები მისი განვითარებისათვის.

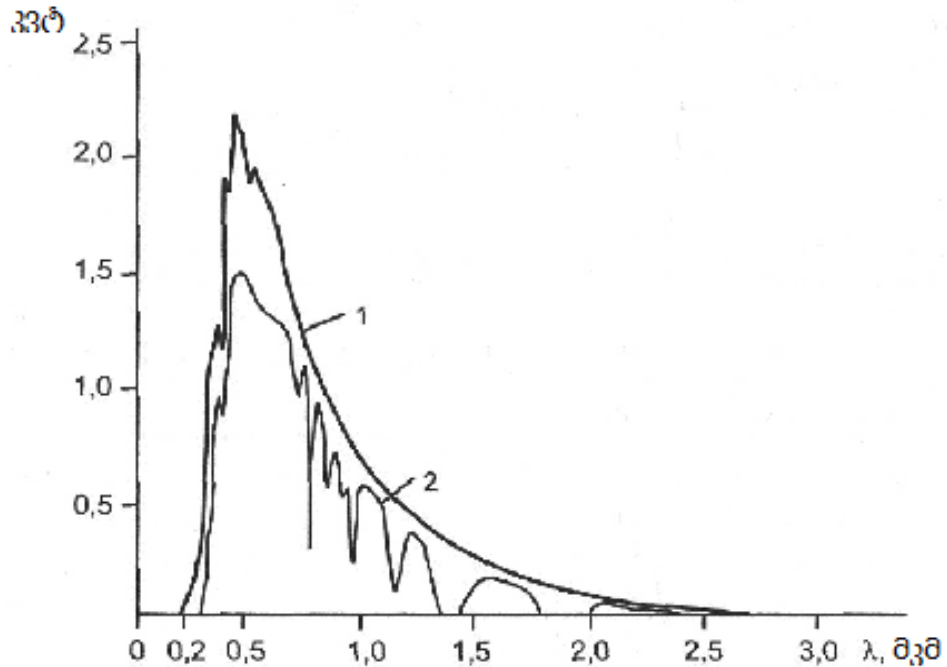
მსოფლიო ენერგეტიკული სააგენტოს (IEA) მონაცემებით მზის ენერგეტიკის ზრდის ტემპი 2030 წლისათვის 2004 წელთან შედარებით 60-ჯერ გაიზრდება.

1.2. მზის გამოსხივება

მზე მუდმივად ასხივებს დიდი რაოდენობის ენერჯიას. ნაწილი ენერჯიისა შთაინთქმება ატმოსფეროში ან აირეკლება და ბრუნდება უკან კოსმოსში. მზის სინათლის ინტენსივობა, რომელიც აღწევს დედამიწამდე, იცვლება დღე-ღამის და წლის განმავლობაში ადგილ-მდებარეობის და ამინდის პირობების მიხედვით. ენერჯიის საერთო რაოდენობა იზომება ვტ.სთ/მ² დღეში ან სხვა პერიოდში.

მზის სინათლე ატმოსფერულ ფენებში გავლისას მცირდება, ძირითადად წყლის ორთქლის მიერ ინფრაწითელი გამოსხივების შთაინთქმის შედეგად, ულტრაიისფერი გამოსხივება კი შთაინთქმება ატმოსფერული მტვრის ნაწილაკებით და აეროზოლით. დედამიწაზე მოსული გამოსხივების ინტენსიობაზე ატმოსფერული ზემოქმედების მაჩვენებელია „ჰაერის მასა“ (AM) და განისაზღვრება როგორც დედამიწასა და ზენიტს შორის არსებული კუთხის სეკანსი. ნახ.1-ზე წარმოდგენილია

სხვადასხვა პირობებისთვის მზის გამოსხივების ინტენსიობის სპექტრული განაწილება. ზედა მრუდი შეესაბამება ატმოსფეროს გარეთ (მაგ. კოსმოსური ხომალდის ბორტზე) სპექტრს, ე.ი. ჰაერის ნულოვან მასას (AM0).



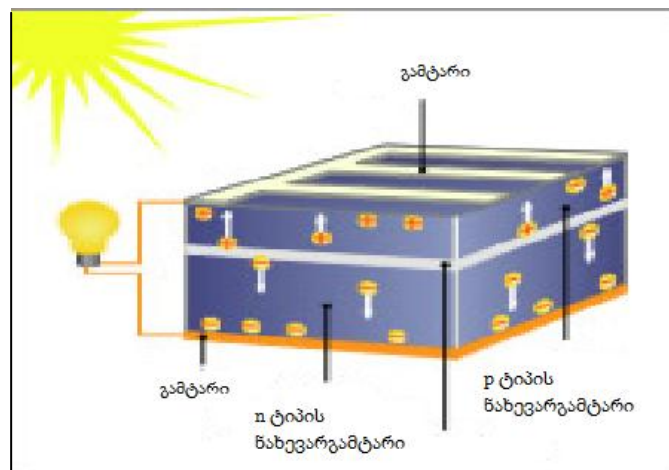
ნახ.1. მზის გამოსხივების სპექტრული განაწილება:
1-AM0 სპექტრი, 2-AM1 სპექტრი

AM1 გვიჩვენებს მზის გამოსხივების სპექტრულ განაწილებას დედამიწის ზედაპირზე, შესაბამისად როცა მზე ზენიტშია და კუთხე მზესა და ზენიტს შორის 60° -ია. დედამიწაზე საშუალო სიმძლავრე ემთხვევა გამოსხივების ინტენსივობას $AH=1,5$. AM2-შესაბამისად მზე ჰორიზონტთან შეადგენს 45° -იან კუთხეს) [5;6]. დედამიწის ზედაპირთან ახლოს მზიდან მოსული ენერგიის გამოთვლების გამარტივების მიზნით, მას ზოგადად გამოსახავენ მზის ნათების იმ საათებში, როცა ინტენსიობა არის 1000 ვტ/მ^2 , ე.ი. პირველი საათისთვის (შუადღეს). მნიშვნელოვანია არ აურიოთ ერთმანეთში პიკური და რეალური დრო. რეალური დროის განმავლობაში მზე იცვლის თავის ინტენსივობას, მაგრამ ჯამში არ გვაძლევს იმ ენერგიას, თითქოს ის გარკვეული დროის (მაგ. 5 სთ-ის) განმავლობაში ანათებდა

ინტენსიურად. ზუსტად მზის გამოსხივების ეს პიკური საათები გამოიყენება მზის მოდულების სიმძლავრის ანგარიშის დროს.

1.3. მზის გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდაქმნელები

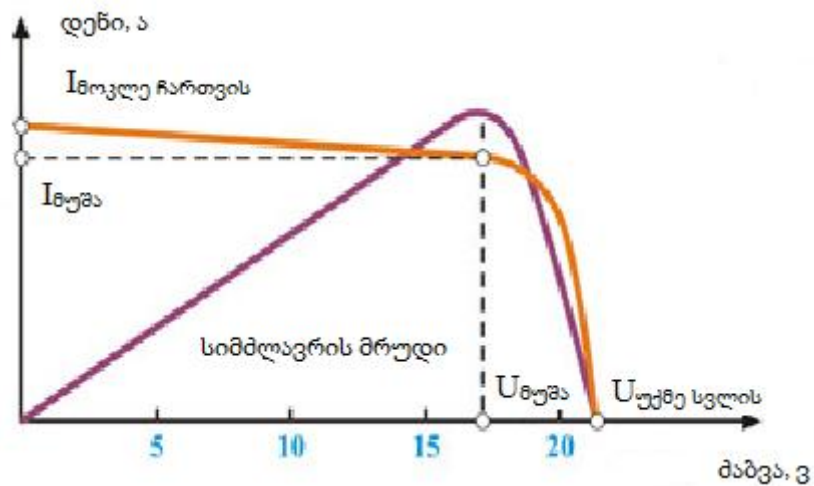
რა მასალისგანაც არ უნდა იყოს დამზადებული ელემენტი, მასში მზის ენერჯიის ელექტრულში გარდაქმნის პროცესი რჩება უცვლელი. ჩვენთვის ძირითად ინტერესს წარმოადგენს ნახევარგამტარში ელექტრული მუხტის გადამტანების წარმოქმნის და მათი გადაადგილების პროცესი, ვინაიდან ელექტრული დენი განპირობებულია ჩაკეტილ წრედში ამ გადამტანების ნაკადით. მზის ელემენტი თავის არსით არის დიდი ფართობის მქონე დიოდი (ნახ.2).



ნახ. 2. მზის ფოტოელემენტი

საკვანძო მომენტი, რაც ხდება მზის ელემენტში სინათლის ენერჯიის ელექტრულ ენერჯიაში გარდაქმნის პროცესში, არის ჩაშენებული ელექტრული ველის გავლენით სინათლის შთანთქმის შედეგად წარმოქმნილი მუხტის გადამტანების მოძრაობა ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით. დავუშვათ, რომ სინათლის შთანთქმის შედეგად გენერირებული გადამტანების მიმართ ველი ორიენტირებულია ელექტრონების მოსაზი-

დად და ხვრელების უკუგდებისათვის. ამ შემთხვევაში ველში ელექტრონები აჩქარდებიან და ხვრელები კი დარჩებიან იმ ადგილზე, სადაც ისინი წარმოიქმნენ. თავისუფალი ელექტრონები, რომლებმაც აჩქარებულად გაიარეს ველი, ვეღარ შეძლებენ უკან დაბრუნებას, ვინაიდან ველი ეწინააღმდეგება მათ უკან დაბრუნების პროცესს. შესაბამისად, მზის ელემენტის ხანგრძლივად განათების შემთხვევაში ერთი ტიპის მუხტის გადამტანები დაგროვდებიან ელემენტის ზედა ნაწილში, ხოლო სხვა ტიპის მუხტის გადამტანები - მის ქვედა ნაწილში. თუ ელემენტის ქვედა და ზედა ნაწილს შევადარებთ გამტართ, მაშინ მუხტის თავისუფალი გადამტანები მასში დაიწყებენ გადაადგილებას. ამრიგად წარმოიშვება ელექტრული დენი, რომელიც იარსებებს მანამ სანამ ელემენტი იქნება განათებული.



ნახ.3. ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ძირითადი წერტილები, რითაც ხასიათდება მზის მოდული

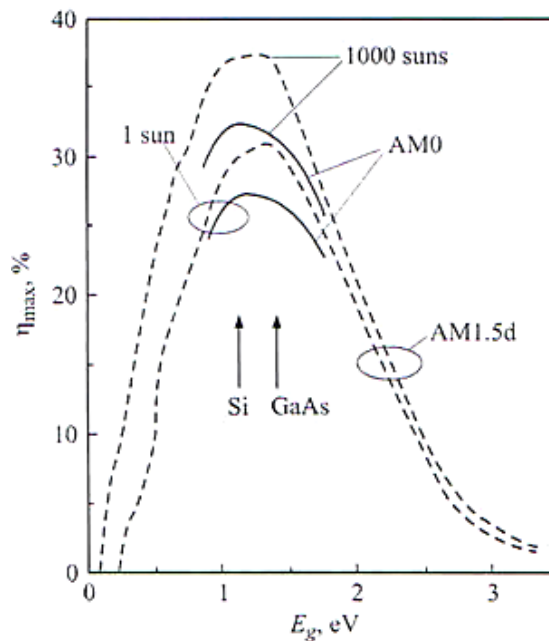
მზის მოდულს შეუძლია მუშაობა ძაბვისა და დენის ნებისმიერი კომბინაციის დროს. რეალურად მოდული მოცემულ დროში მუშაობს მრუდის ერთ წერტილში (ნახ.3), რომლის ამორჩევა ხდება იმ ქსელის ელექტრული მახასიათებლის მიხედვით, რომელზეც მიერთებულია მოდული.

1.4. ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე დამზადებული მზის ელემენტები

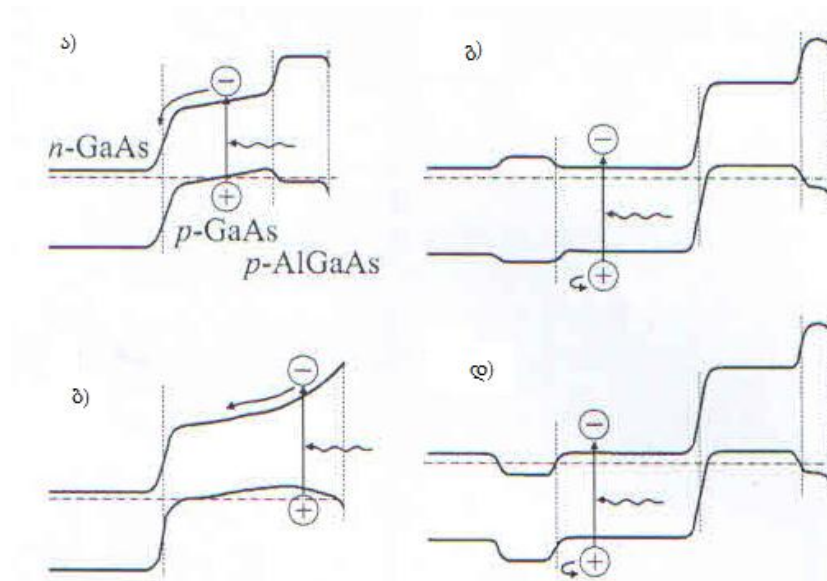
AlGaAs-GaAs-ის ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე მზის ელემენტების შექმნის შემდგომ მზის ფოტოენერგეტიკაში გაიხსნა სრულიად ახალი ფურცელი [7-9]. მნიშვნელოვანი იყო ჰეტეროსტრუქტურებში ოპტიკური ფანჯრის იდეის პრაქტიკულ რეალიზაციასთან დაკავშირებული ექსპერიმენტების შედეგები. p-n ჰეტეროგადასვლებში AlGaAs-ის (ფართო-ზონიანი ფანჯარა) და GaAs-ის (ფოტოაქტიური არე) ჩამოყალიბებით შესაძლებელი გახდა: ელექტრონულ-ხვრელური წყვილის გენერაციისათვის უდეფექტო ჰეტეროსაზღვრის ფორმირება და p-n გადასვლით მათი შეკრებისათვის შეიქმნა იდეალური პირობები; ფოტოაქტიური GaAs-ის ფენიანი ჰეტეროფოტოელემენტები აღმოჩნდნენ უფრო რადიაციულად მდგრადნი. ამის გამო მათ ძალიან სწრაფად მოიპოვეს გამოყენება კოსმოსურ ტექნიკაში, მიუხედავად მნიშვნელოვანი სიძვირისა სილიციუმის ფოტოელემენტებთან შედარებით.

სილიციუმი და გალიუმის არსენიდი წარმატებით აკმაყოფილებენ ფოტოელემენტების დამზადებისათვის „იდეალური“ ნახევარგამტარული მასალის მოთხოვნებს. თუ ამ მასალებს შევადარებთ მათი გამოყენების თვალსაზრისით ერთ p-n გადასასვლელიან მზის ფოტოელემენტების დამზადებისათვის, მაშინ მათი ფოტოელექტრული გარდაქმნის შესაძლო ზღვრული მნიშვნელობები აღმოჩნდება თითქმის ერთნაირი და ახლოს აბსოლუტურ მაქსიმუმთან (ნახ. 4). რა თქმა უნდა სილიციუმის უპირატესობად ითვლება: ბუნებაში მისი ფართოდ გავრცელება; არატოქსიკურობა და შედარებით ნაკლები ფასი; მათ საფუძველზე ნახევარგამტარულ ხელსაწყოთა წარმოების ფართო ინდუსტრია. მიუხედავად გარკვეული მცდელობებისა, შექმნილიყო სხვადასხვა ტიპის თხელფიროვანი მზის ბატარეები, დღეისათვის კრისტალურ სილიციუმს (მონო- და პოლიკრისტალურ მოდიფიკაციებს) უკავია მნიშვნელოვანი წილი დედამიწის პირობებში მომუშავე მზის ელემენტების წარმოებაში. 1980-იან წლებამდე მზის ფოტოელემენტებთან დაკავშირებული სამუშაოები,

როგორც სილიციუმზე ასევე გალიუმის არსენიდზე, ხორციელდებოდა შედარებით მარტივ სტრუქტურებზე და უბრალო ტექნოლოგიებით. სილიციუმის ფოტოელემენტებისათვის გამოიყენებოდა პლანარული სტრუქტურა დიფუზიური მეთოდით მიღებული თხელი p-n გადასასვლით. გალიუმის არსენიდის საფუძველზე, AlGaAs-ის ფართოზონიანი ფანჯრის გაზრდისათვის, გამოიყენებოდა ეპიტაქსიის შედარებით მარტივი მეთოდი, რომელიც ადრე დამუშავებული იყო პირველი თაობის ჰეტეროლაზერებისათვის. ფოტოელემენტის სტრუქტურაში საკმარისი იყო მხოლოდ ერთი ფართოზონიანი p-AlGaAs-ის ფენის გაზრდა, p-n გადასვლის ფორმირებისათვის კი n-GaAs-ის ბაზურ მასალაში p-ტიპის მინარევის დიფუზის განხორციელება (ნახ.5ა).



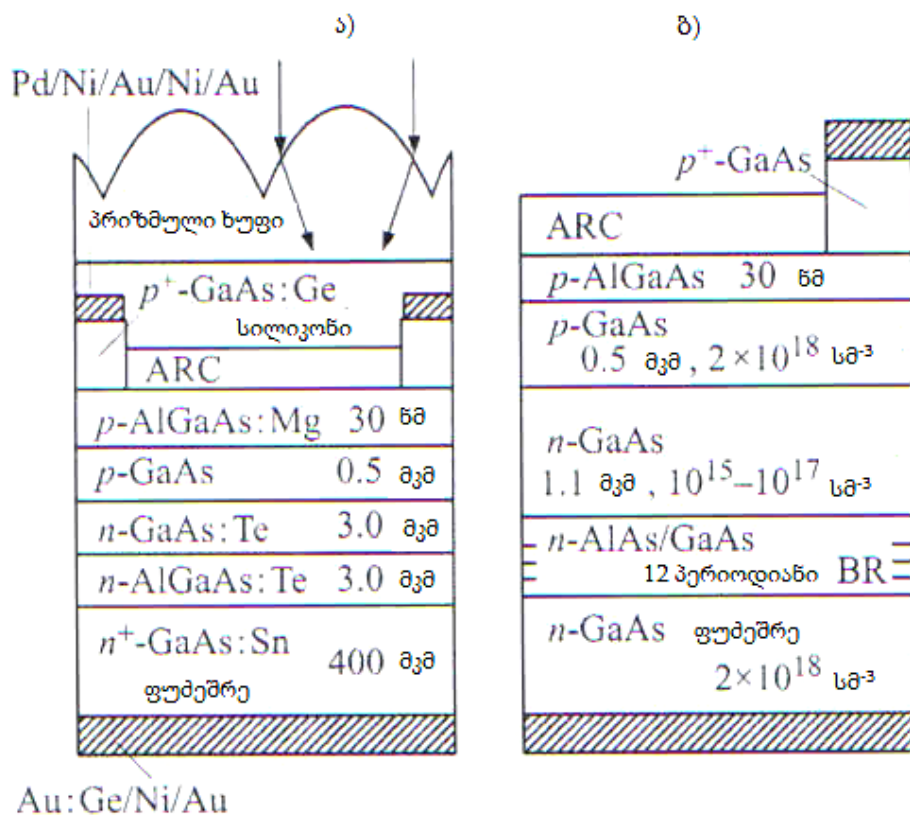
ნახ.4. მზის ელემენტის მაქსიმალურად მიღწეული ეფექტურობის (η_{max}) დამოკიდებულება მასალის აკრძალული ზონის სიგანეზე (ΔE_g). მთლიანი ხაზი - AM0 მზის სპექტრისათვის, პუნქტირით - AM1.5d სპექტრისათვის (გამოსხივების 1sun და 1000-ჯერადი კონცენტრირების).



ნახ. 5. $pAlGaAs-pGaAs-nGaAs$ ჰეტეროგადასვლიანი მზის ელემენტების ზონური დიაგრამა: ა) სტრუქტურა ჩამენებული ელექტრული ველით; ბ) სტრუქტურა ჩამენებული ძლიერი ელექტრული ველით; გ) სტრუქტურა ფართოზონიანი ფენით ზურგის მხრიდან; დ) სტრუქტურა პოტენციური n^+ GaAs ბარიერით.

80-იანი წლების მეორე ნახევრიდან ნახევარგამტარული მზის ფოტო-ენერგეტიკის სფეროში ფეხი მოიკიდა „მაღალმა ტექნოლოგიებმა“. სილიციუმის საფუძველზე შემოთავაზებული იქნა ახალი სტრუქტურები, რომლებიც იძლეოდნენ ოპტიკური და რეკომბინაციული დანაკარგების შემცირების საშუალებას. სტრუქტურების რეალიზაციის პირობებს ქმნიდა მრავალსაფეხურიანი ტექნოლოგიური პროცესები, რომლებიც საკმარისად კარგად იყო დამუშავებული ინტეგრალური მიკროსქემების დამზადების ტექნოლოგიისათვის სილიციუმის საფუძველზე. ამან განაპირობა სილიციუმის მზის ელემენტების პარამეტრების მკვეთრი ზრდა [10] და ლაბორატორიული ნიმუშების ეფექტურობა მიუახლოდა თეორიული ზღვარს (ნახ.4). მართალია მათი ღირებულება ბევრად აღემატება „ჩვეულებრივისას“. გალიუმის არსენიდზე დამზადებული მზის ელემენტებისათვის პროგრესი განაპირობა ჰეტეროგადასვლების მიღების ახალი ეპიტაქსიური მეთოდების გამოყენებამ - ესაა მეტალო-ორგანული ნაერთების გაზური ფაზიდან (MOCVD) ეპიტაქსია. ამ მეთოდის გამოყენებით მზის

ელემენტებისათვის დამზადებულ ჰეტეროსტრუქტურებში (ნახ.6 ა და ბ) განხორციელდა შემდეგი გაუმჯობესებები: პირველ რიგში მოხდა AlGaAs-ის ოპტიკური ფანჯრის ოპტიმიზაცია, ნანოზომამდე შემცირდა მათი სისქეები; ასევე ამ ფენამ შეასრულა ანტიამრეკლავი ARC ფენის ფუნქციაც; ფართოზონიანი ფენამ (შექმნილმა p-n გადასვლის ქვემოთ) შეამცირა p-n გადასვლის მიერ მუხტის გადამტანების შეგროვებამდე მათი რეკომბინაციული დანაკარგები (ნახ.5 გ); მიღებული იქნა მზის ელემენტები, რომელთა მქვ 100-ჯერადი კონცენტრირების პირობებისათვის (AM0) ტოლია 24,6% [11]; სტრუქტურებში შემცირებული იქნა ფოტოაქტიური ფენის სისქე, რამაც თავის მხრივ გაზარდა მდგრადობა რადიაციული ზემოქმედების მიმართ [12].



ნახ.6. AlGaAs/GaAs-ის მრავალფენიანი, ერთ p-n გადასვლიანი მზის ელემენტების სქემატური დიაგრამა: ა) მზის ელემენტის სტრუქტურა ზურგის მხრიდან პოტენციალური ბარიერით და თხელი ფართოზონიანი AlGaAs-ის ფანჯრით; ბ) მზის ელემენტის სტრუქტურა ჩაშენებული ამრეკლავი ფენით.

მქკ-ის გაზრდისათვის 1960-იანი წლებიდან უკვე განიხილებოდა კასკადური ფოტოელემენტის იდეა, როგორც რეალური მაგრამ შორეული პერსპექტივა. სიტუაცია საგრძნობლად შეიცვალა, როცა 1980-იან წლებში, მკვლევართა ჯგუფებმა კონცენტრირება გაუკეთეს თავიანთ საქმიანობას შეექმნათ სხვადასხვა ტიპის ორკასკადიანი მზის ელემენტები [13]. ცხრილ 1-ში წარმოდგენილია მრავალკასკადიანი მზის ელემენტებისათვის მქკ-ის ზრდის პერსპექტივა.

პირველ ეტაპზე მქკ-ის კარგი შედეგები მიღებული იყო მექანიკურად შეპირისპირებულ ფოტოელემენტებზე, თუმცა სინამდვილეში პერსპექტიულად უნდა ჩათვლილიყო ფოტოელემენტები მონოლითური სტრუქტურით. ასეთი სტრუქტურები დამუშავებული იქნა განახლებადი ენერჯების ეროვნული ლაბორატორიის (NREL-აშშ) თანამშრომლების მიერ, მეტალო-ორგანული შენაერთებიდან ეპიტაქსიური მეთოდის გამოყენებით.

ცხრილი 1. თეორიულად მოსალოდნელი და რეალურად მიღწეული მქკ-ის მნიშვნელობები კასკადური მზის ელემენტებისათვის

მზის გამოსხივების სპექტრი	მქკ %					
	მნიშვნელობა	p-n გადასასვლელის რაოდენობა კასკადში				
		1	2	3	4	5
დედამიწასთან ახლოს კოსმოსის პირობებში(AM0)	თეორიული	28	33	38	42	45
	მოსალოდნელი	23	28	33	36	38
	რეალიზებული	21,8 [11]	27,2 [12]	29,3 [12]	-	-
დედამიწის ზედაპირის პირობებში (AM1,5)	თეორიული	30	36	42	47	49
	მოსალოდნელი	27	33	38	42	44
	რეალიზებული	25,1	30,3	31,0	-	-
დედამიწის ზედაპირის პირობებში კონცენტრაციით (AM1,5)	თეორიული	35	42	48	52	54
	მოსალოდნელი	31	38	43	47	49
	რეალიზებული	27,6	31,1	34,0	-	-

ამჟამად შემოთავაზებულია ფოტოელექტრული გარდამქმნელების მიმართ ახალი მიდგომა, რაც დაკავშირებულია კვანტურ წერტილიანი მასალების გამოყენებასთან. კერძოდ, საუბარია „შუალედური ზონის“ ფოტოაქტიური ფენის შექმნაზე [16]. ფოტოელემენტების მრავალკასკადურ სტრუქტურებში, მოცემული სპექტრის მშთანთქმელი ახალი მასალების გამოყენებასთან ერთად, შესაძლებელია გაუმჯობესდეს კომუტაციის ფუნქციის შემსრულებელი გვირაბული დიოდების მახასიათებლებიც (პიკური დენის გაზრდა), მათში p^+ და n^+ ფენებს შორის ზესტრუქტურის ჩანერგვით. არსებობს მქკ-ის გაზრდის სხვა იდეაც, კერძოდ მდორედ გარდამავალი ჰეტეროსტრუქტურის გამოყენება, რომლებშიც აუცილებელია მიღებული იქნას ეპიტაქსიური ფენების აკრძალული ზონის სიგანეებს შორის განსხვავების ფართო დიაპაზონი. ასევე აუცილებელია შენარჩუნებულ იქნას მუხტის გადამტანების მაღალი ძვრადობა. აღნიშნული მცდელობები მიმართული იყო ერთი მიზნისაკენ, მქკ რეალურად მიახლოებოდა თეორიულ თერმოდინამიკურ ზღვარს 93%-ს.

წინა წლების გამოცდილება გვიჩვენებდა, რომ მზის ელემენტებთან დაკავშირებული ყველა მიღწევა პირველ რიგში გამოიყენებოდა კოსმოსური მიზნებისათვის [14;15], ხოლო დედამიწის პირობებში მათი გამოყენება ელექტრული ენერჯის მიღებისათვის განიხილებოდა შორეულ პერსპექტივაში. მიუხედავად ამისა მზის ელემენტების განვითარების არსებულმა ტემპებმა, თავის მხრივ, დასაბამი მისცა წინსვლას მათი დედამიწის პირობებში გამოყენებისათვის.

1.5. მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდაქმნა

ფოტოელექტრული გარდამქმნელის მქკ-ის გაზრდის კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი გზაა მზის გამოსხივების ნაკადის წინასწარ კონცენტრირება და მისი შემდგომი გარდაქმნა. მზიდან დაშორებულ ობიექტზე გამოსხივების კონცენტრირების ჯერადობის ზღვრული გაანგარიშებული

მნიშვნელობა შეესაბამება დედამიწის ორბიტას და არის 46200-ის ტოლი. ზუსტად ამ ზომის კონცენტრირება გამოიყენება, სხვადასხვა ტიპის მზის ელემენტების, ეფექტურობის თერმოდინამიკური ზღვრული მნიშვნელობის შეფასების დროს. კერძოდ, რამოდენიმე ათეული კასკადისაგან შედგენილი ფოტოელემენტების, მქკ-ის ზღვრული მნიშვნელობა უახლოვდება კარნოს ციკლისას და არის თითქმის 87%. დღეისათვის მრავალგადასვლიანი ფოტოელემენტები იძლევიან მქკ-ის მაღალი მნიშვნელობის დემონსტრირების და მომავალში მისი გაზრდის შესაძლებლობას, ეი აქვთ საუკეთესო განვითარების პერსპექტივა დედამიწის პირობებში გამოყენებისათვის, სადაც ერთ-ერთი განმსაზღვრელი პირობაა ეკონომიკური ფაქტორი. მრავალგადასვლიანი ფოტოელემენტები სტრუქტურულად გაცილებით რთულნი არიან სხვა ნახევარგამტარულ ხელსაწყოებთან შედარებით. მათში აუცილებელია, რომ p-n გადასვლების ფოტოაქტიურ ფენებს, რომლებიც სტრუქტურაში მრავლად არიან, გააჩნდეთ ერთმანეთისაგან განსხვავებული აკრძალული ზონის სიგანეები. მნიშვნელოვანია ფენების ლეგირების დონის ვარირებაც, ვინაიდან სტრუქტურის ზრდის პროცესში მათ შორის ხორციელდება გამტარებლობის ტიპის უცაბედი ცვლილება. ზუსტად უნდა იყოს განსაზღვრული და დიდი სიზუსტით განხორციელებული ფოტოაქტიური ფენების სისქეები, რაც აუცილებელია ფოტოდენის განსაზღვრული მნიშვნელობის მიღებისათვის. ფენები, რომლებიც უზრუნველყოფენ გვირაბული p^+-n^+ გადასვლების ფორმირებას, სისქით უნდა იყვნენ ძალზე თხელი (ნანომეტრულ დიაპაზონში), ხოლო ფოტოაქტიური ფენები კი ორი რიგით მეტი სისქის. A^3B^5 მასალების მთლიანი ნაკრები (მათი მყარი ხსნარების სახით) ჩართული არიან ფოტოელემენტების მრავალფენიანი სტრუქტურის ფორმირების ამ მნიშვნელოვან პროცესში. სტრუქტურების გამოყენების ეკონომიკურ მხარეს კი განსაზღვრავს ტექნოლოგიის ავტომატიზაცია და კონცენტრატორული სისტემების გამოყენება.

ის, რომ GaAs-ის ჰეტეროფოტოელემენტებს შეუძლიათ ბრწყინვალედ მუშაობა მაღალი კონცენტრირების (10-დან 1000-მდე ჯერადობა) პირო-

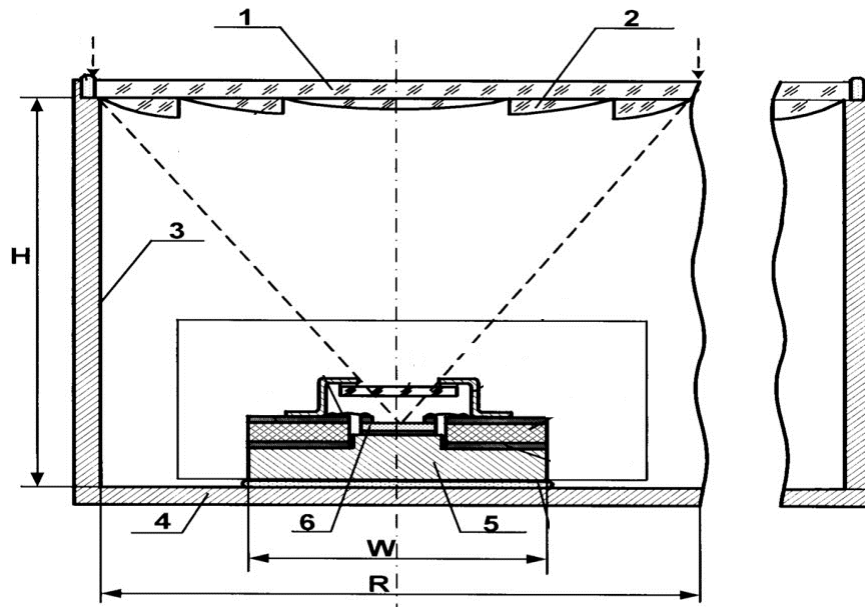
ბებში, მნიშვნელოვნად განასხვავებს სილიციუმის საფუძველზე დამზადებული მზის ელემენტებისაგან [17]: გენერირებული ენერჯია პროპორციულად იზრდება სინათლის ნაკადის ზრდასთან ერთად; დენის ძალის მატებასთან ერთად გამოსვლის ძაბვა იცვლება ლოგარითმული კანონით; კონცენტრირებული ნაკადის შემთხვევაში გამოსავალი სიმძალვრე იზრდება ზეწრფივად და შესაბამისად მატულობს ფოტოელექტრული გარდაქმნის ეფექტურობაც. ეს უკანასკნელი შესაძლებელია გამოყენებული ყოფილიყო პრაქტიკაში, რომ არა ის ფაქტი, როცა დენის ძალის მატება იწვევს ძაბვის ვარდნას ფოტოელემენტის შიდა წინაღობაზე. ამრიგად დგება შიდა გაღვანური დანაკარგების შემცირების პრობლემა, რაც მნიშვნელოვანი ფაქტორია მზის კონცენტრირებული ფოტოელემენტების დამუშავებისას. მთავარი მამოძრავებელი ძალა კონცენტრირებული სისტემების გამოყენებისა არის ძვირადღირებული ნახევარგამტარული მასალის დანახარჯის და შესაბამისად ფასის შემცირების შესაძლებლობის არსებობა. ე.ი. გაჩნდა წინაპირობა, რომ ამ სისტემებით აღჭურვილი მზის ფოტოელემენტი წარმატებით იქნას გამოყენებულია დედამიწის პირობებშიც.

1990 წლიდან კონცენტრირებული მზის ელემენტების შექმნის პრაქტიკაში წარმოიქმნა ახალი მიმართულება, რომელიც ემყარებოდა მცირე განზომილებიანი მოდულების კონცეფციას, რაც იძლეოდა საშუალებას შექმნილიყო ეკონომიკურად გამართლებული მზის ენერჯიის ფოტოელექტრული გარდაქმნელები [18-22].

კონცენტრატორების ხაზოვანი ზომების შემცირება, აპერტურასა და ფოკუსურ მანძილს შორის გარკვეული შეფარდების შენარჩუნება არის ჯერადობის განმსაზღვრელი პირობა. ამ შემთხვევაში ფოკუსური მანძილის შემცირების გამო მცირდება სისტემის სისქე, ასევე მცირდება ფოტოელემენტის გეომეტრიული ზომებიც, რაც ქმნის საშუალებას მნიშვნელოვნად შემცირდეს ძვირადღირებული ნახევარგამტარული სტრუქტურების დანახარჯები. დამატებით ყოველივე ზემოთ ჩამოთვლილს მივყავართ ფინანსური დანახარჯების ეკონომიისაკენ. მნიშვნელოვანია ის ფაქტიც,

რომ მარტივდება მოდულის აწყობის პროცესი. აღარ არის საჭირო რთული გაციების სისტემის გამოყენება და შედეგად საგრძნობლად მცირდება მეტალოდანახარჯები. მზის ენერგეტიკის განვითარების ფართომასშტაბიანი პერსპექტივის განხილვისას, გარდაქმნის ეფექტურობის მაღალი მნიშვნელობის შემთხვევაში, ნებისმიერი დანახარჯები კონსტრუქციულ მასალებზე შესაძლებელია ეკონომიურად იყოს გამართლებული.

გარდამქმნელები საჭიროა დაცული იყოს გარემო ზემოქმედებისაგან, რისთვისაც გამართლებულია „მთლიანად მინის“ მოდულების კონსტრუქცია (ნახ. 7 და ნახ.8). ამ ტიპის გარდამქმნელები პირველად დამუშავდა



ნახ. 7. ა) კონცენტრირებული მოდულის განივი ჭრილი: 1-ლინზური პანელის ფუძე; 2-ფრენელის მიკროლინზა; 3-მოდულის; 4-მზის მოდულის ფუძე; 5-სამონტაჟო და 6-მზის ელემენტი.



ნახ.8. ფოტოელექტრონული მოდულის ექსპერიმენტული ვარიანტი

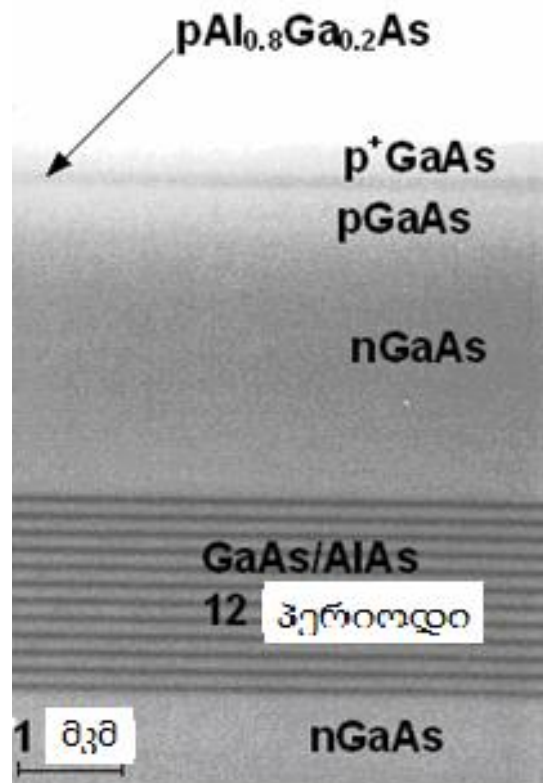
ა.ფ. იოფეს სახ. (სანკ-პეტერბურგი) და მზის ენერგეტიკის ფრანკოფერის (ქ. ფრაიბურგი) ინსტიტუტების მიერ [20; 21]. „მთლიანად მინის“ მოდულებში ფრენელის ლინზის ეფექტურობა აღწევს 89 %-ს, მოდულის მკკ-ის მნიშვნელობა 24,8%-ს. ხშირ შემთხვევაში ეფექტურობის გასაზრდელად გამოიყენება მეორადი ლინზები (ნახ. 7) [22; 23].

არსებობს მრავალრიცხოვანი ეკონომიკური შეფასებები [24-26], რომელთა თანახმად კონცენტრატორული ფოტოენერგეტიკა, მზის ფოტოენერგეტიკაში არსებულ სხვა ვარიანტებს შორის, უახლოეს მომავალში იქნება ყველაზე უფრო ეკონომიურად მომგებიანი. ასევე მნიშვნელოვანი კვლევები მიმდინარეობს კონცენტრატორული ლინზების სისქისა და პარამეტრების გაუმჯობესების მიმართულებით [27-29].

1.6. მზის ენერჯის ნანოჰეტეროსტრუქტურული ფოტოელექტრული გარდამქმნელები

ნანოჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე დამზადებულ ფოტოელექტრულ გარდამქმნელებს გააჩნიათ გამოყენების დიდი პერსპექტივა კოსმოსურ და სახმელეთო ფოტოენერგეტიკულ დანადგარებში. კოსმოსური აპარატების საბორტო სისტემების მოთხოვნილებამ ელექტრული ენერჯით უზრუნველყოფის შესახებ, მიიყვანა მეცნიერები და კონსტრუქტორები მზის ბატარეების შექმნის აუცილებლობამდე. რომლებსაც ექნებათ უფრო მომატებული ენერგეტიკული და საექსპლუატაციო მახასიათებლები მუშაობის ხანგრძლივი რესურსის პირობებში. ამ ამოცანების შესრულებისთვის ყველაზე უფრო პერსპექტიული გზა არის GaAs-სა და მის მონათესავე შენაერთების საფუძველზე ნანოჰეტეროსტრუქტურების შექმნა, რომლებიც პირველად 1969 წელს იქნა შექმნილი ა. იოფეს სახელობის სანკტ-პეტერბურგის ფიზიკა-ტექნიკურ ინსტიტუტში [18; 30-33]. უკანასკნელი ათწლეულების განმავლობაში დაგროვილია საკმარისად დიდი გამოცდილება მზის ბატარეების გამოყენების სფეროში, რომლებიც დამზადებულია AlGaAs/GaAs AlInGaP/GaAs/Ge ნანოსტრუქტურების საფუძველზე

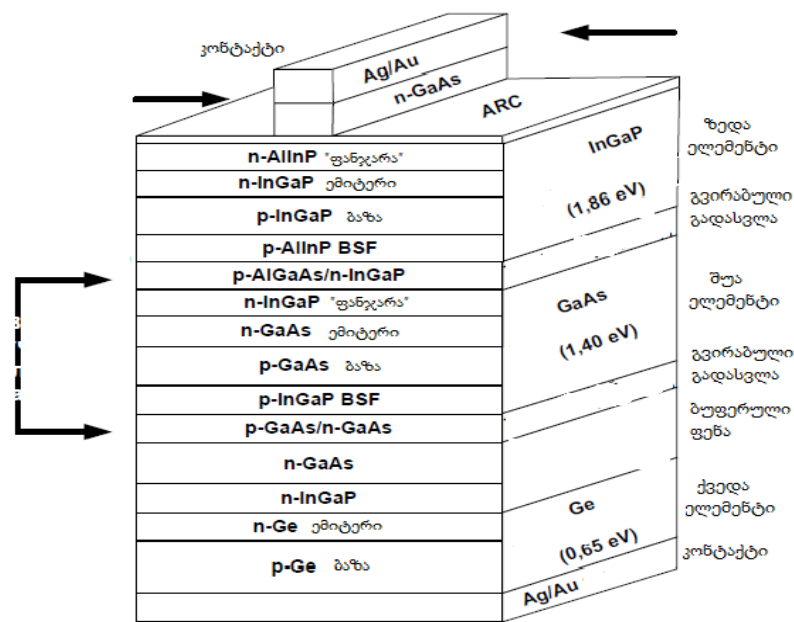
(ნახ.9). ეს ბატარეები უზრუნველყოფენ მაღალ მქკ-ს, მომატებულ რადიაციულ მდგრადობას სილიციუმის ბატარეებთან შედარებით. მიუხედავად ჰეტეროსტრუქტურული ბატარეების მაღალი ღირებულებისა, მათი გამოყენება თითქმის ორჯერ ამცირებს ჯამურ დანახარჯებს. ვინაიდან თითქმის ორჯერ იზრდება ენერგომომარაგების დონე, იზრდება რესურსი და მცირდება ორბიტაზე ბატარეის მიტანისათვის საჭირო საწვავის ხარჯი, ასევე უმჯობესდება კოსმოსური აპარატის ორიენტაცია და სტაბილიზაცია.



ნახ.9. მზის ფოტოგარდამქმნელი დამზადებული ბრევის ამრეკლავიან ნანოჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე

მაღალეფექტური ნანოსტრუქტურები ასევე პერსპექტიულია სახმელეთო ენერგოსისტემების დასამზადებლად, რომლებშიც გამოყენებულია მზის ენერგიის კონცენტრატორული სისტემები. ასეთი კონცენტრირება (1000 და მეტი ჯერადობის შემთხვევაში) შესაძლებელია განხორციელდეს ფრენელის იაფადღირებული ლინზების გამოყენებით. მაგალითად მზის გამოსხივება, რომელიც ეცემა 40X40 მმ ზომის ლინზის ზედაპირს, კონცენტრირდება 3მმ²-

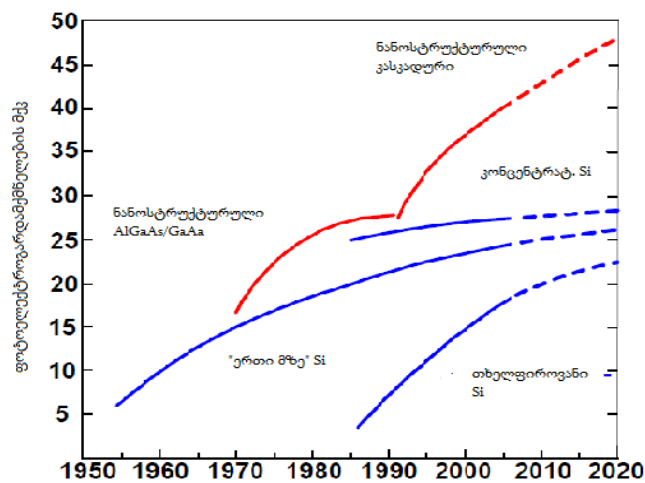
ზე ნაკლებ ფართობის ელემენტზე. ელემენტები ამ შემთხვევაში არ ცხელდება მზის გამოსხივების მცირე ერთეულოვანი სიმძლავრის (~1,5ვტ) გამო. ასეთი ტიპის კონცენტრატორიან ფოტოელექტრულ სისტემაში გამო-
 მუშავებული ელექტრული ენერჯის ღირებულება შეიძლება შემცირდეს 2-
 ჯერ, მზის ელემენტის სამუშაო ფართობის 1000-ჯერ შემცირების ხარჯზე.
 ამასთან ერთად კონცენტრატორული ფოტოელექტრული სისტემის მქკ-ს
 გაზრდის და მზის მიმართ მუდმივად ზუსტად ორიენტირების ხარჯზე,
 გაიზრდება მისი ენერგოგამომუშავება.



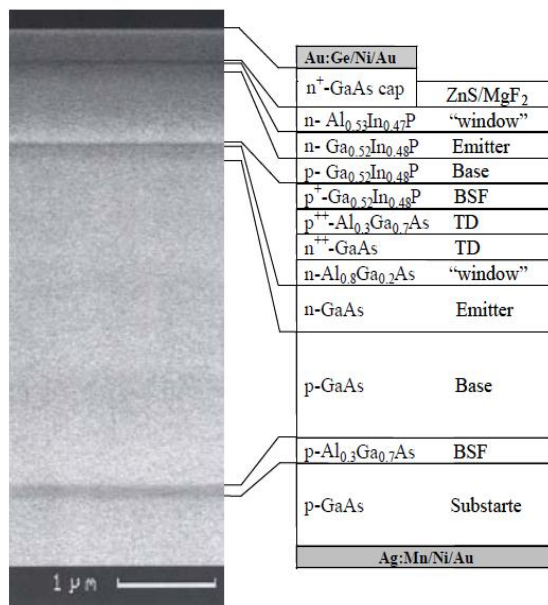
ნახ.10. კასკადური მზის ფოტოგარდამქმნელი ჰეტეროსტრუქტურა, რომელიც უზრუნველყოფს მქკ>35%-ზე 1000-ჯერადი კონცენტრირების შემთხვევაში.

მზის ენერჯის კონცენტრირებული გამოსხივების ელემენტებისთვის, ნანოჰეტეროსტრუქტურების და კასკადური ტიპის ფოტოგარდამქმნელების შექმნის სფეროში, უკანასკნელი წლების განმავლობაში მიღწეულია მნიშვნელოვანი პროგრესი [29; 34-39]. ნახ.10-ზე წარმოდგენილ ნანო-ჰეტეროსტრუქტურის სამკასკადიან ფოტოელექტრულ გარდამქმნელზე ხორციელდება „მზის გამოსხივების გახლეჩა“ სამ სპექტრულ უბნად,

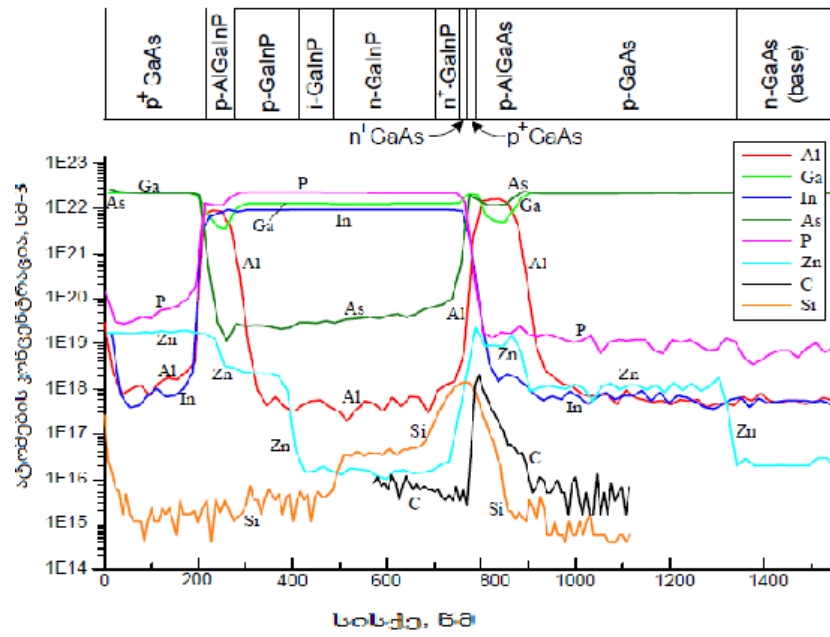
თითოეულისათვის შერჩეულია ოპტიმალური ნახევარგამტარი (Ge, GaAs, GaInP) იმისათვის, რომ მოხდეს ეფექტურად გარდაქმნა 50%-მდე მქკ-ით (ნახ.11). ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტს გააჩნია მეტალო-ორგანული შენაერთებისგან ეპიტაქსიური ზრდის თანამედროვე დანადგარი, რომელიც იძლევა საშუალებას გაიზარდოს მრავალფენიანი კასკადური სტრუქტურები. ამ სტრუქტურების საფუძველზე დამზადებულია კასკადური მზის ელემენტები, რომელთა მქკ=35% კონცენტრირების გამოყენებით (ნახ. 12-16).



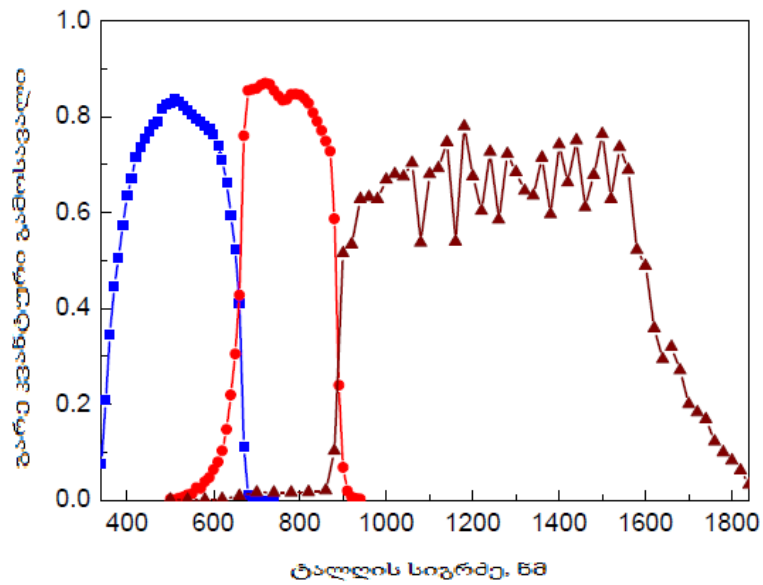
ნახ.11. ნანოჰეტეროსტრუქტურების და Si -ის ფოტოგარდამქმნელების მქკ ს ზრდის დინამიკა



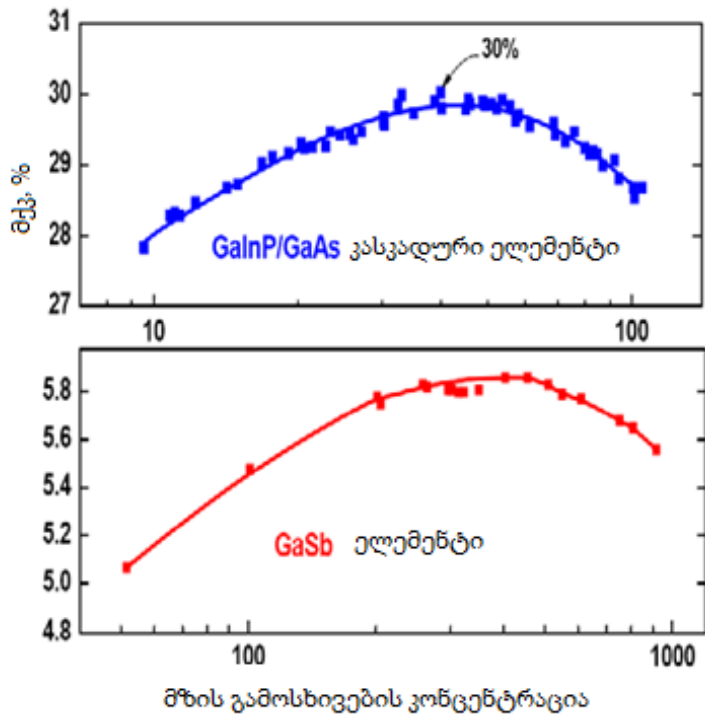
ნახ.12. ორგანო-ორგანული ნახევარგამტარის ელემენტის ნანოსტრუქტურის სქემა და განივი ბზარის ფოტოგრაფია



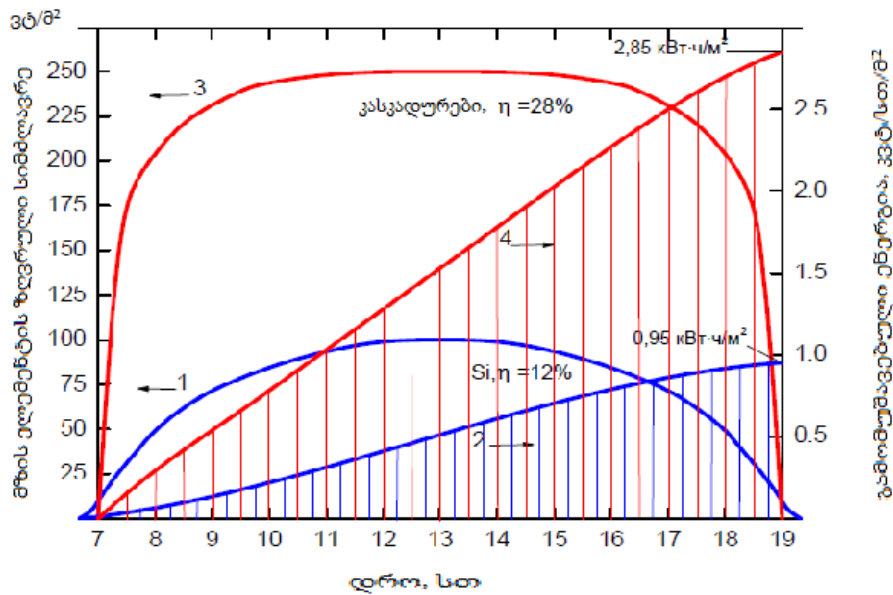
ნახ.13. MOSIVD - ტექნოლოგიით მიღებული ნანოსტრუქტურაში კასკადურ GaInP/GaAs მზის ფოტოგარდამქმნელებში P, As, In, Al, Ga, Zn, C, Si ელემენტების კონცენტრაციის განაწილება



ნახ.14. GaInP/GaAs/Ge მზის ფოტოგარდამქმნელის სამ გადასლიან ნანოსტრუქტურაში ფოტოგამოსხივების სპექტრული მახასიათებელი



ნახ.15. ჯამური მქც-ის 35%-იანი მიღწევის დემონსტრირება GaInP/GaAs (მქც= 30%) სტრუქტურაში, სადაც „ზედა“ ფენა გამჭვირვალეა ხოლო „ქვედა“ ფენა მგრძნობიარეა ინფრაწითელი გამოსხივების მიმართ



ნახ.16. მზიანი დღის განმავლობაში გენერირებული სიმძლავრის ხვედრითი მნიშვნელობის (ვტ/მ^2) ცვლილება (მრუდი 1, 3) და გამომუშავებული ელექტრული ენერჯია (კვტსთ/მ^2) (მრუდები 2,4). Si-ის მზის ელემენტზე (მრუდი 1,2) და ნანოჰეტეროსტრუქტურის საფუძველზე (3,4)

ნანოჰეტეროსტრუქტურებზე შექმნილია კონცენტრატორიანი მზის ენერგოდანადგარების პროტოტიპები, რომელთა გამოცდა ხანგრძლივად მუშაობაზე იძლევა საშუალებას გაკეთდეს პროგნოზი მათი მუშაობის 20 წლიან საიმედოობაზე [40-42]. ამან კონცენტრატორული ფოტოგარდამქმნელების გამომუშავებული ხვედრითი ენერგია შესაძლებელია გაიზარდოს 3-ჯერ მქკ-ის გაზრდის და მზის მიმართ მუდმივად და ზუსტად ორიენტირების შედეგად. ამ ტიპის ფოტოგარდამქმნელების სახმელეთო მოწყობილობების წარმოების პროცესების გამართვა საშუალებას შექმნის საგრძნობლად გაიზარდოს ნახევარგამტარული მასალის ხარჯვის შედეგად მიღებული ეკონომია (ერთი გრამი ნახევარგამტარული მასალა, რომელიც იმუშავებს 25 წელს ექვივალენტურია 5 ტონა საწვავის).

დამუშავებული ნანოტექნოლოგიების გამოყენებით შესაძლებელია ფოტოელემენტების (მოდულების) ფართომასშტაბიანი წარმოების გამართვა. ერთი ვტ-ის თვითღირებულება შეადგენს 2\$-ზე ნაკლებს. ე.ი. შესაძლებელია ღირებულება 2-ჯერ შემცირდეს არსებულ მსოფლიო დონესთან შედარებით. კონცენტრატორიანი მზის ენერგოდანადგარების გამოყენება იმ რაიონებში, სადაც არ არის ცენტრალური ელექტრომომარაგება, შესაძლებელს გახდის ეს ადგილები გახდეს ვარგისი ცხოვრებისთვის.

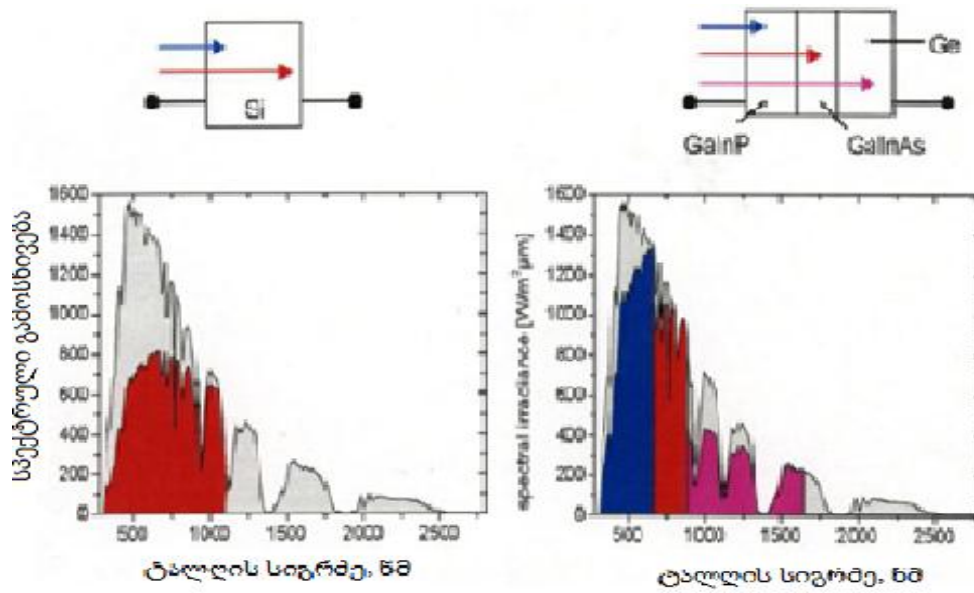
1.7. მზის ენერჯის ფოტოელექტრული გარდაქმნელები კვანტურწერტილიან ჰეტეროსტრუქტურებზე

ფოტოენერგეტიკის განვითარების ტემპმა წელიწადში, უკანასკნელი 10 წლის განმავლობაში, მიაღწია 35%-მდე. მოსალოდნელია, რომ უახლოეს 20 წელიწადში მზის ფოტოენერგეტიკა შექმნის 2 მილიონამდე სამუშაო ადგილს, შეამცირებს სათბურის გაზების გამოტყორცნას ატმოსფეროში, 350 მლნ ტონით CO₂-ს და 2030 წლისათვის მზის ფოტოენერგეტიკის საერთო სიმძლავრე გადააჭარბებს 650 გვტ-ს [43].

წარმოების განვითარების თანამედროვე დონეზე 100 გვტ საერთო სიმძლავრის სილიციუმის მზის ელემენტების დასამზადებლად საჭიროა 1 მლნ ტონამდე მაღალი ხარისხის სისუფთავის სილიციუმი. იმისათვის, რომ მიღწეული იქნას მზის ენერგეტიკის განვითარების 2030 წლის მოსალოდნელი დონე საჭიროა, დღეისათვის უკვე შესაძლებელი იყოს, სუფთა სილიციუმის წარმოება ყოველწლიურად 200 000 ტონამდე. რაც წარმოადგენს არა მარტო რთულ ტექნოლოგიურ და ფინანსურ, არამედ ეკოლოგიურ პრობლემასაც, რადგან სუფთა სილიციუმის წარმოების პროცესი ეკოლოგიურად დამაბინძურებელია.

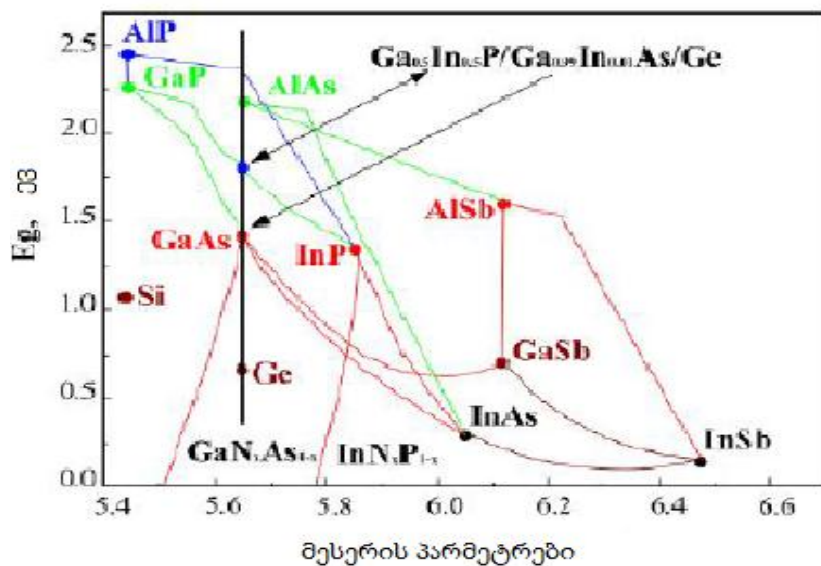
სილიციუმის ტრადიციული მზის ბატარეებს სხვა ნაკლოვანებაა მათი შედარებით დაბალი ენერგეტიკული ეფექტურობა - მათი მქვ საშუალოდ შეადგენს 11%-ს. ჰეტეროგადასვლების გამოყენება საშუალებას იძლევა [44] გარკვეულწილად გაუმჯობესდეს მზის ფოტოელექტრული გარდამქმნელების ეფექტურობა. GaP-GaAs, Ge-GaAs [45; 46] ჰეტეროგადასვლების ფოტოელექტრული თვისებების გამოკვლევისას დადგინდა, რომ ჰეტეროგადასვლების გამოყენებამ შესაძლებელია მნიშვნელოვნად გაზარდოს ფოტოგარდამქმნელის ეფექტურობა. ჯერ მარტო GaAs-AlAs სისტემის ჰეტეროგადასვლების გამოყენებით, შესაძლებელი გახდა შექმნილიყო ფოტოელემენტები, რომლებიც ეფექტურობით აღემატებიან Si-ის და GaAs-ის ჰეტეროგადასვლებზე შექმნილ ანალიგიურ ხელსაწყოებს [47].

დღეისათვის ჰეტეროგადასვლებზე შექმნილი კასკადური მზის ელემენტების ეფექტურობა შეადგენს 35-40%. ძირითადი ფაქტორი რაც იძლევა კასკადურ სტრუქტურაზე ეფექტურობის გაზრდის შესაძლებლობას მდგომარეობს იმაში, რომ ელემენტზე დაცემული მზის გამოსხივების ენერჯის დიდი ნაწილი ეფექტურად გარდაიქმნება ელექტრულ ენერჯიად (ნახ.17). ნანოჰეტეროსტრუქტურული კასკადური მზის ელემენტები ფართოდ გამოიყენება კოსმოსურ მზის ბატარეებში, როგორც Si-ის ელემენტების ალტერნატიული და გაცილებით ეფექტურნი. მასალები, რომელთა საფუძველზეც ისინი მზადდებიან, წარმოდგენილია ნახ.18-ზე. ელექტრუ-

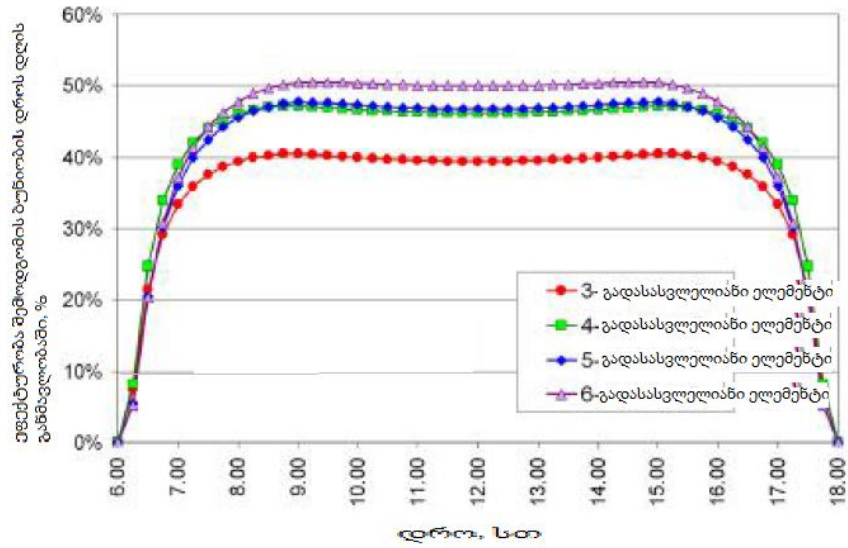


ნახ.17. სილიციუმის ფეგ-ით გარდაქმნილი მზის სპექტრის ნაწილი (მუქად შეფერილი) მარცხნივ და კასკადური ნანოსტრუქტურების ფეგ-ით მარჯვნივ

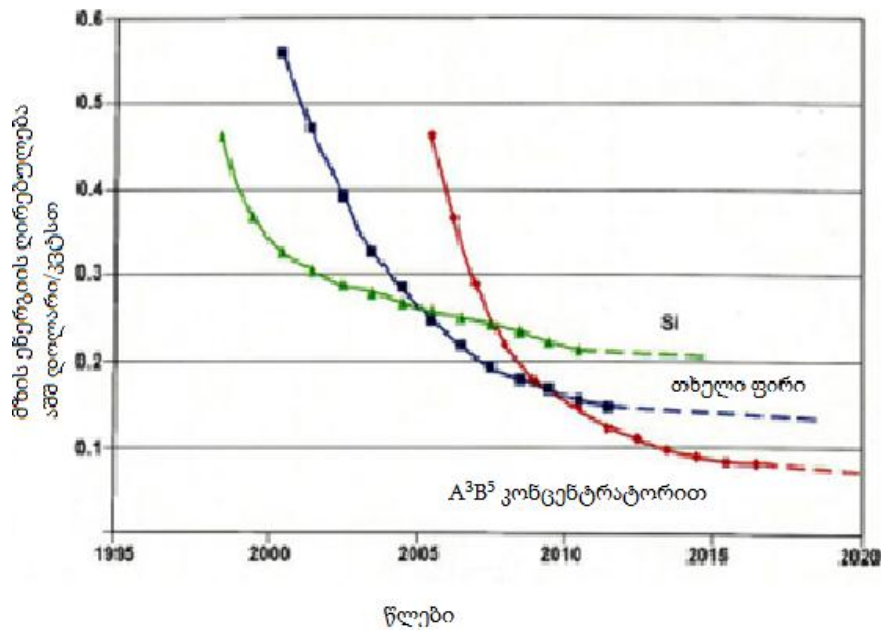
ლი ენერჯის სიმძლავრე, რომელიც მიიღება მრავალფენიანი სტრუქტურებით, კონცენტრატორებით და მზის მიმართ ორიენტირების სისტემებით აღჭურვილი დანადგარებით, გაცილებით მაღალია სილიციუმის ბატარეებით (ნახ.19) გამოიმუშავებულზე.



ნახ.18. A^3B^5 მყარი ხსნარის აკრძალული ზონის სიგანის დამოკიდებულება მესერის მუდმივაზე და იმ მასალის შემადგენლობაზე რომლისგანაც მზადდება ფოტოელექტრონიკული გარდაქმნელები



ნახ.19. მრავალფენიანი ფოტოელექტროგარდამქმნელის მქკ-ს დამოკიდებულება დღის სხვადასხვა პერიოდში

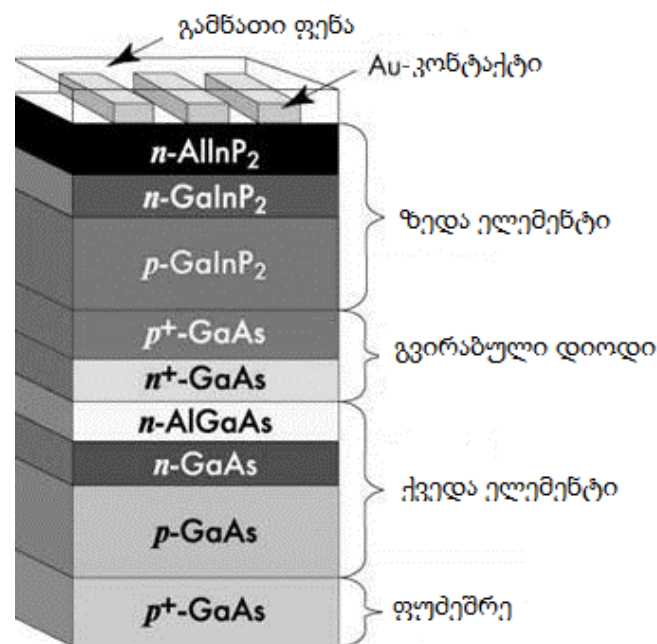


ნახ.20. მზის ელექტროენერჯიის ღირებულების შემცირების პროგნოზი, რომელიც მიიღება კასკადურ ჰეტეროგადასვლიან სტრუქტურების საფუძველზე დამზადებული კონცენტრატორიანი ენერგოდანგარებით

ევროკომისიის სამუშაო ჯგუფის „EU PV Technology platform“ მიერ მომზადებული ანგარიშის თანახმად გამოსხივების კონცენტრატორებით

აღჭურვილ სისტემებს შეუძლია უზრუნველყონ „მზის“ ელექტროენერჯის მინიმალური ღირებულება უკვე უახლოეს წლებში (ნახ.20).

სანკტ-პეტერბურგის ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის მკვლევარებმა შექმნეს მზის ელექტრო დანადგარები მაღალი ეფექტურობის ფრენელის ლინზებიანი კონცენტრატორების და ნანოსტრუქტურებზე დამზადებული კასკადური მზის ელემენტების გამოყენებით, რომელზეც მიაღწიეს 36-40%-იან მქკ-ს [48-53]. III და V ჯგუფის ელემენტების შენაერთებზე დამზადებული მრავალფენიანი ფოტოგარდამქმნელების (ნახ.21) მნიშვნელოვანი ღირებულებაა მათ უნარი ეფექტურად გარდაქმნან 500-1000 ჯერადობის მზის გამოსხივების კონცენტრირებული ენერჯია, რაც არ შეუძლია შეასრულოს სილიციუმის საფუძველზე შექმნილ მზის ელემენტებს.



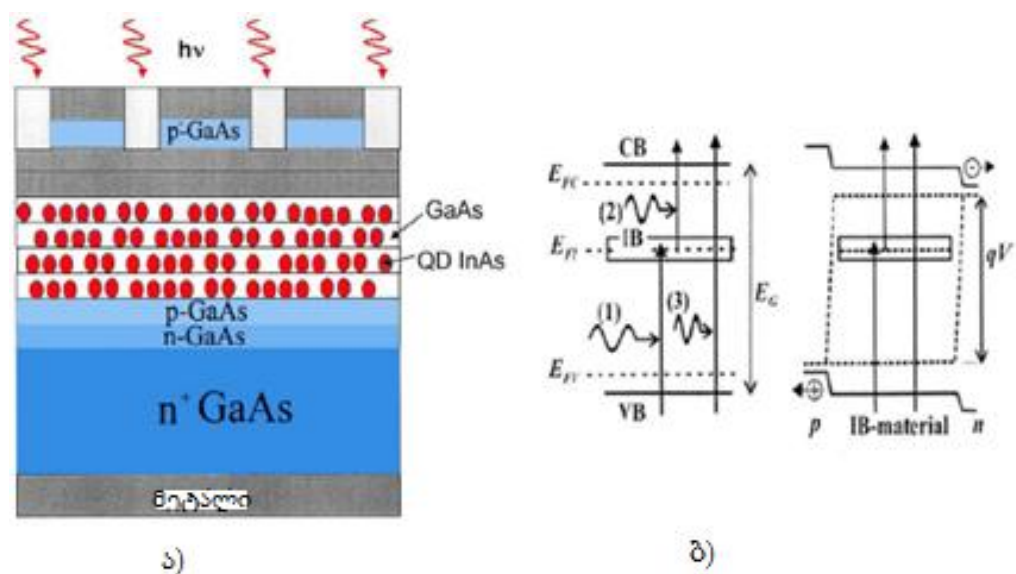
ნახ.21. III და V ჯგუფის შენაერთების საფუძველზე დამზადებული მრავალგადასვლელიანი ჰეტეროსტრუქტურები

როდესაც მზის გამოსხივების კონცენტრირების ხარისხი $K=500$ ჯერადობას, მაშინ მოდულის ღირებულება არის უმნიშვნელო და ნახევარგამტარული მასალის დანახარჯი მცირდება დაახლოებით 400-ჯერ. მზის ენერგოდანადგარის თვითღირებულება მოდულებთან და მზეზე ორიენტი-

რების სისტემებთან ერთად შეადგენს 5\$/ვტ., რაც თითქმის ორჯერ ნაკლებია მსოფლიო ფასებზე.

აღსანიშნავია, რომ მრავალგადასვლიანი ფოტოგარდამქმნელები თავისი სტრუქტურით ძალიან რთული აგებულებისაა [54-57]. უფრო მეტიც ისინი ერთ-ერთი ყველაზე რთული ნახევარგამტარული ხელსაწყოებია. ის რაც თეორიულადაა ნაწინასწარმეტყველები ჯერ-ჯერობით ექსპერიმენტულად არ არის მიღწეული. ექვსკასკადიანი სტრუქტურა უნდა იძლეოდეს 50%-ზე მეტ ეფექტურობას, დღეისათვის მიღებული რეკორდული დონე კი არის 40,8 % [58-63].

მე-3 თაობის მზის ელემენტებს მიეკუთვნებიან მზის ელემენტები კვანტური წერტილებით. [59-67] შრომაში თეორიულად იყო ნაჩვენები მზის ელემენტში ვიწროზონიანი ნახევარგამტარული მასალის (მაგ. InAs-ის) შეტანით ფართო ზონიანში (მაგ. GaAs-ში), საშუალებას იძლევა მიღწეულ იქნას 70%-ზე მეტი ეფექტურობა. სინათლის ორი გრძელტალღოვანი კვანტის ენერჯის შეჯამების ხარჯზე, რომელთა შთაინთქმება არ ხდება ფართოზონიან ნახევარგამტარულ მასალაში, მაგრამ შთაინთქმება კვანტურ წერტილებიანი მასალის მიერ (ნახ.22 ა და ბ).



ნახ.22. (ა, ბ) მზის ელემენტის სტრუქტურა კვანტური წერტილებით

მცდელობამ, გაზური ფაზიდან ეპიტაქსიის მეთოდით InAs-ის კვანტური წერტილებით შეექმნათ მაღალეფექტური სტრუქტურა GaAs-ზე უჩვენა, რომ ასეთ ფოტოგარდამქმნელებში ხდება გამოსხივების სპექტრის ინფრაწითელი არის შთანთქმა კვანტურ წერტილებზე. თეორიული ანალიზი გვიჩვენებს, რომ სპექტრის მოკლე და გრძალტალღოვანი არეების უტილიზაციით კვანტურ წერტილიან სტრუქტურაში, შესაძლებელია მიღწეული იქნას მზის ელემენტის თერმოდინამიკური ზღვრული მნიშვნელობა 93 %-მდე.

თავი 2.

თხევადფაზური ეპიტაქსიით დამზადებული AlGaAs-GaAs სტრუქტურების საფუძველზე მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტროგარდამქმნელი ელემენტების დამუშავება

სამუშაო პერიოდში სადისერტაციო ნაშრომის მიზნისა და ამოცანების განსახორციელებლად ჩვენს მიერ ჩატარებული იქნა შემდეგი კვლევები:

1. მზის ელემენტებისათვის მრავალფენიანი ჰეტეროსტრუქტურის კონსტრუქციის და მისი დამზადების თხევადფაზური ეპიტაქსიური ტექნოლოგიის დამუშავება, ეპიტაქსიური ფენების ოპტიმალური ქიმიური შემადგენლობის შერჩევა, სტრუქტურების დამზადება.
2. დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიის მეთოდით დამზადებული AlGaAs-GaAs ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე მაღალეფექტური კონცენტრატორული ფოტოელექტრული ელემენტების დამზადების ტექნოლოგიის და კონსტრუქციის დამუშავება.
3. მაღალეფექტური ფოტოელექტრული სტრუქტურების საფუძველზე დამზადებული ელემენტების გამოყენებით მზის გამოსხივების კონცენტრირებული გამოსხივების გარდამქმნელი მოდულების დამუშავება.
4. ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდულებისათვის პოლიმერული ლინზების კონსტრუქციის და დამზადების ტექნოლოგიის დამუშავება, ლინზური პანელების დამზადება.
5. მზის გამოსხივების კონცენტრირებული გამოსხივების გარდამქმნელი მოდულის საცდელი ნიმუშის დამზადება.
6. მოდულებისა და ლინზების შიდა და საველე პირობებში ტესტირების ტექნიკის დამუშავება, ტესტირების ჩატარება, მიღებული შედეგების ანალიზი.
7. ანალიზის შედეგების საფუძველზე რეკომენდაციების შემუშავება და მზის კონცენტრირებული გამოსხივების მოდულის საწარმოო ვარიანტის დამუშავება.

2.1. ფოტოელექტრო გარდამქმნელის (ფეგ) ჰეტეროსტრუქტურის დამზადების ლაბორატორიული ტექნოლოგია

სამუშაოში გამოყენებული ჰეტეროსტრუქტურების დამზადებისათვის გამოვიყენეთ დაბალტემპერატურული ეპიტაქსიური მეთოდი, რომელშიც შევიტანეთ ცვლილებები და დავამუშავეთ შესაბამისი ტექნოლოგიური რეჟიმები. ქვემოთ არის განხილული ფოტოელექტრული გარდამქმნელისათვის (ფეგ) ამ ჰეტეროსტრუქტურების დამზადების ჩვენს მიერ დამუშავებული ტექნოლოგიური მეთოდის ორი ვარიანტი: პირველი ვარიანტი (ცხრილი 2, ბლოკ-სქემის მარცხენა მხარე) - თხევადი ფაზიდან Zn-ის დიფუზიის გამოყენებით p-n გადასვლის და GaAs-ის წინა სამუშაო ზედაპირზე საკონტაქტო ფენის ფორმირება; მეორე ვარიანტი (ცხრილი 2, ბლოკ-სქემის მარჯვენა მხარე) - ორთქლის ფაზიდან Zn-ის დიფუზიის გამოყენებით მყარი ხსნარის ეპიტაქსიურ ფენაში ერთდროულად p-არის ფორმირება და მის ზედაპირზე საკონტაქტო ფენის ჩამოყალიბება.

პირველი ვარიანტის გამოყენებით მიიღწევა მზის კონცენტრირებული გამოსხივების გარდაქმნის მქკ-ის მაღალი მნიშვნელობა ($K=100-500$) და ტექნოლოგიური პროცესის მაღალი მწარმოებლურობა.

მეორე ვარიანტის გამოყენებით შესაძლებელია შეიქმნას დაბალი ხვედრითი წინაღობის (2×10^3 ომი.სმ) მქონე ფოტოაქტიური p-არე, რაც საშუალებას იძლევა უფრო ეფექტურად გარდაიქმნას მზის კონცენტრირებული გამოსხივება როცა $K=500-1000$ -ის დროს. ამ ვარიანტის გამოყენების შედეგად დამზადებულ ფეგ-ებს ასევე გააჩნიათ მქკ-ის მაღალი ტემპერატურული სტაბილურობის უნარი და მზის სპექტრის მოკლევადიან არეში შედარებით უფრო მომატებული მგრძობიარობა.

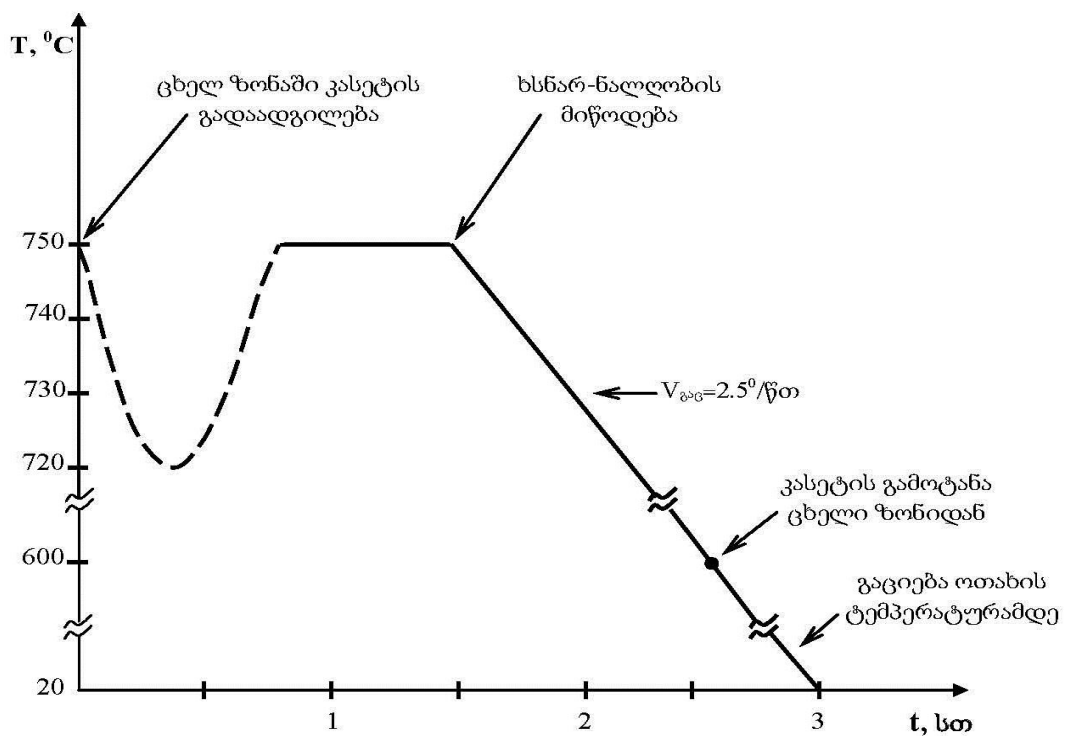
პირველი ვარიანტი: ოპერაცია 1. ბუფერული ფენის გაზრდა, რომლის განსახორციელებლად საჭიროა ეპიტაქსიური პროცესის წინ ფუძემშრის მომზადება. ფუძემშრის ზედაპირის მოსამზადებლად ტარდება შემდეგი პროცესები: განცხიმვა მდუღარე ოთხქლორიან ნახშირბადის ან ტოლუო-

ლის ორთქლში; შემდგომ გაწმენდა მდულარე აცეტონში; გარეცხვა დეიონიზირებული წყალის გამდინარე ნაკადით (ოთახის ტემპერატურა); გაშრობა ცენტრიფუგის ან აზოტის (ინერტული გაზი) ნაკადის გამოყენებით (ოთახის ტემპერატურაზე); ქიმიურ-დინამიკური მოწამვლა შემადგენლობის ხსნარში $H_2SO_4:1H_2O_2:1H_2O$ 10-30 წთ-ის განმავლობაში ოთახის ტემპერატურაზე (საფენის 100-ორიენტაციისათვის) ან $5H_2SO_4:2H_2O_2:1H_2O$ შემადგენლობის მომწამვლელობაში 1-2 წთ-ის განმავლობაში $100^{\circ}C$ (საფენის 111-ორიენტაციისათვის); გამდინარე დეიონიზირებულ წყალში გავლება; ცენტრიფუგით ან აზოტის ნაკადით გაშრობა, ოთახის ტემპერატურაზე. კაზმის მომზადება გულისხმობს მყარი ხსნარი-ნალღობის შემადგენელი კომპონენტების აწონას (გარკვეული წონითი შეფარდებით), გამოყენებული მასალები უნდა იყოს ქიმიურად მოწამლული (მოწამვლა ხორციელდება კვირაში ერთხელ): GaAs იწამლება $3H_2SO_4:2H_2O_2:1H_2O$ (ახლადმოზადებულ ხსნარში) 3 წუთის განმავლობაში, დამატებითი გაცხელების გარეშე; Zn – HCl, ოთახის ტემპერატურაზე; Al – $19H_3PO_4:1HNO_3$ (3 წუთი, $T=40-50^{\circ}C$);

შენიშვნა: ტენოლოგიურ პროცესებში გამოყენებული ქიმიური რეაქტივები უნდა იყოს „განსაკუთრებული სისუფთავის“.

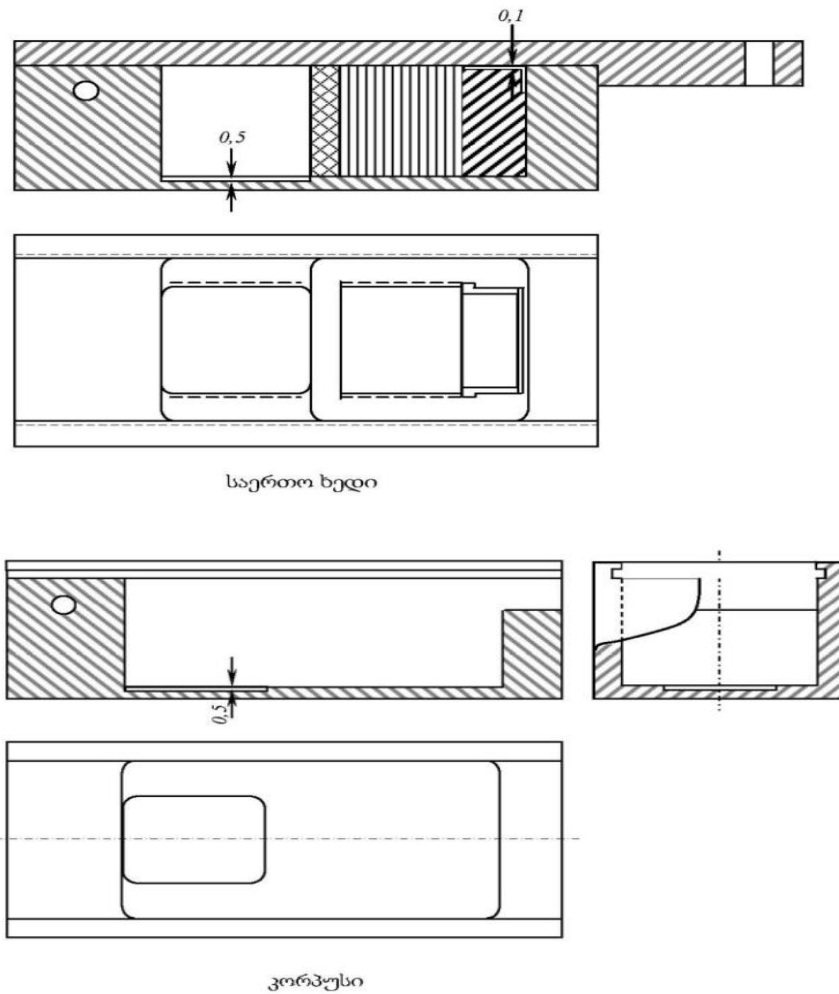
ოპერაცია 2 და 3. ეპიტაქსიურ სტრუქტურაში ბუფერული ფენის ზრდის ტექნოლოგიური პროცესი. პროცესის მიმდინარეობისათვის კასეტაში ხდება საფენის და ხსნარი-ნალღობის კომპონენტების ჩატვირთვა, შემდეგი თანმიმდევრობით: Sn, გამდნარი Ga, GaAs (Ga ყველა მხრიდან კონტაქტში უნდა იყოს მოსული GaAs-ფუძე შრესთან), Al (ფრთხილად თავსდება ხსნარი-ნალღობის ზედაპირზე); კასეტა თავსდება რეაქტორში; რეაქტორიდან ამოიტუმბება ჰაერი და ამის შემდგომ რეაქტორში უშვებთ წყალბადის ნაკადს (წყალბადის ნაკადით განიავება), რეაქტორიდან ჰაერის ამოტუმბვის და წყალბადით განიავების დროს აუცილებლად გამოყენებული უნდა იქნას ვაკუუმური სისტემა უზეთო ტუმბოთი ($P=10^{-3}$ მმ.ვც.წყ.სვტ.) და წყალბადის გასუფთავების სისტემა (გამოიყენება წყალბადი მინუს 70° -ან ნამის წერტილით). ეპიტაქსიური პროცესი ტარდება ეპიტაქსიურ

დანადგარზე (რეჟიმით ნახ. 23), რომელიც აღჭურვილია რეაქტორის გადასაადგილებელი დამატებითი მოწყობილობით, პროგრამული გაციების სისტემით ($V_{\text{გაც.}}=0,2-3$ გრადუსი/წუთი), რეაქტორის ჰერმეტიზაციის და კასეტის მონიპულაციის 0,5მმ-იანი სენდვიჩ-ლრეჩოს რეჟიმიანი სისტემებით (ნახ.24). ეპიტაქსიური პროცესის დასრულების შემდგომ კასეტას გამოვიღებთ რეაქტორიდან ხდება მისი განტვირთვა და სტრუქტურების ზედაპირიდან ხსნარი-ნალღობის ნარჩენების მოცილება ეთანოლით.



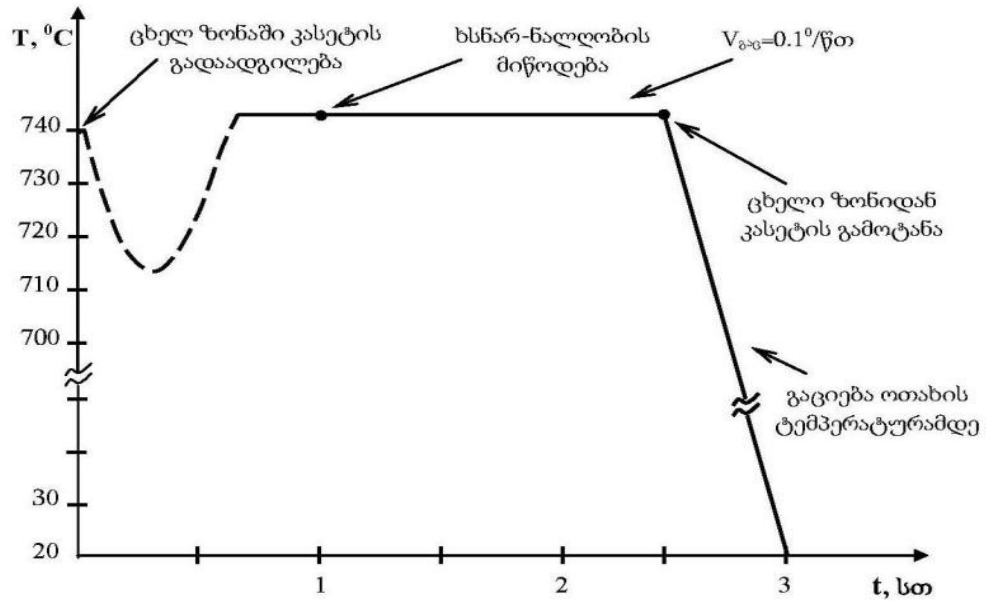
ნახ.23. ბუფერული ფენის ეპიტაქსიური ზრდის პროცესის ტემპერატურულ-დროითი რეჟიმის დიაგრამა

ოპერაცია 4. ეპიტაქსიური მყარი ხსნარის ფენის ზრდის პროცესი თხევადი ფაზიდან Zn-ის დიფუზიით და მისი მომზადება მოიცავს შემდეგ (გამოიყენება იგივე დანადგარი, როგორც ოპერაცია 2-ში) ოპერაციებს: ნალღობისათვის კომპონენტების (Ga, p-GaAs, Al, Zn) აწონვა; Zn- წინასწარი მოწამლვა ხსნარში



ნახ. 24. გრაფიტის ნავის საერთო ხედი და მისი ძირითადი კონსტრუქციული ელემენტები

$2\text{HNO}_3:\text{IH}_2\text{O}$ (10-20 წმ. ოთახის ტემპერატურაზე); სტრუქტურების და კომპონენტების ჩატვირთვა კასეტაში (პროცესი ხორციელდება ოპერაცია 2-ის ანალოგიურად, მხოლოდ კალა შეცვლილია თუთიით); კასეტის ჩატვირთვა რეაქტორში; ჰაერის ამოტუმბვა რეაქტორიდან და მისი განიავება წყალბადით; ეპიტაქსიური პროცესის ჩატარება (რეჟიმით ნახ. 25) სენდვიჩ-ღრეჩოს 0,5მმ-იანი რეჟიმის სისტემებით (ნახ. 24); კასეტიდან სტრუქტურის ამოღება; სტრუქტურის ზედაპირიდან ხსნარი-ნალღობის ნარჩენების მოცილება; $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $x=0,85$ ზედაპირული ფენის მოწამვლა H_3PO_4 -ში (1-2 წთ, $T=50^\circ\text{C}$).

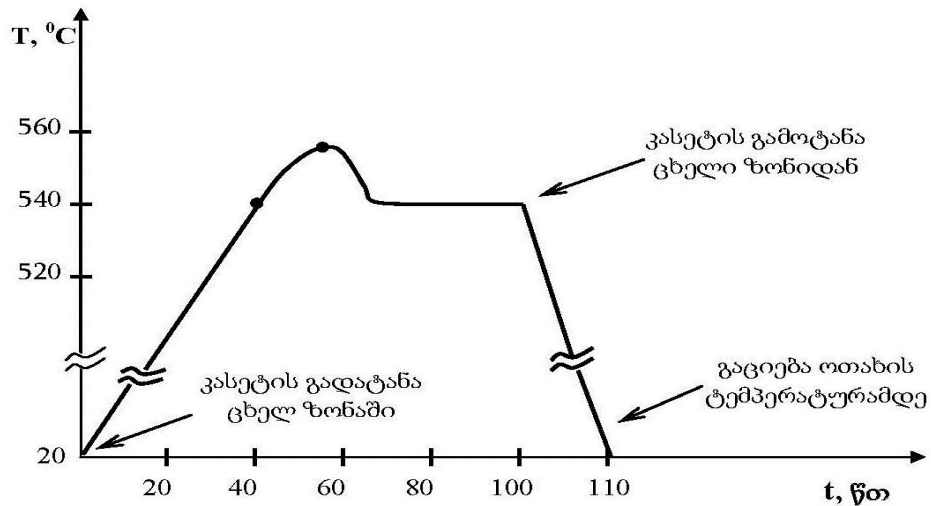


ნახ. 25. მყარი ხსნარის ეპიტაქიური და თანმდევი დიფუზიური პროცესების ტემპერატურული რეჟიმის დიაგრამა

ოპერაცია 5. წყალბის გარემოში თუთიის დიფუზიის განსახორციელებლად საჭიროა კასეტაში ჩაიტვირთოს (გამოიყენება მოწყობილობები, როგორც ოპერაცია 2-ში) სტრუქტურა, თუთია ($100 \text{ მგ } 1 \text{ სმ}^3$) და GaAs(InAs)-ის ფხვნილი. კასეტა თავსდება რეაქტორში, რეაქტორიდან ჰაერის გამოქაჩვისა და წყალბადით განიავების შემდგომ დიფუზიური პროცესის განხორციელება ხდება ნახ. 26-ზე მითითებული რეჟიმით. პროცესის დასრულების შემდგომ ხდება კასეტიდან სტრუქტურების ამოღება.

ოპერაცია 6. მოიცავს სტრუქტურის უკანა მხრიდან p-n გადასვლის მოშორების პროცესს, რითვისაც სტრუქტურის სამუშაო ზედაპირი, დაცვის მიზნით, იფარება ქიმიურად მდგრადი ლაქით და ხდება საფენის მხარიდან 5 მკმ-მდე სისქის ფენის მოწამვლა. მომწავლელად შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ქვემოთ ჩამოთვლილი ქიმიური მომწამვლელებიდან ერთ-ერთი (შემდეგი მოცულობითი შეფარდებით): $1,00 \text{ ნაწილი იზოპროპილის სპირტი}; 10\% \text{ Na}_3\text{PO}_4 - 0.33 \text{ ნაწ.}; 30\% \text{ H}_2\text{O} - 0.23 \text{ ნაწ.}; \text{H}_3\text{PO}_4 - 0.43 \text{ ნაწ.}$ მოწამვლა $10-12$ წთ-ის განმავლობაში ოთახის ტემპურაზე (მომწამვლელი შესაძლოა გამოყენებულ იქნას დამზადების შემდეგ, 3 დღის

განმავლობაში). ოპერაცია სრულდება ქიმიურად მედეგი ლაქის მოცილებით, დეიონიზირებულ წყალში გავლებით და გაშრობით.



ნახ. 26. წყალბადში თუთიის დიფუზიის ტემპერატურული რეჟიმის დიაგრამა

ოპერაცია 7. წინა სამუშაო მხრიდან სტრუქტურის ზედაპირის ანოდური დაჟანგვა ხორციელდება ელექტროლიტურ ხსნარში. შემადგენელი ქიმიური კომპონენტები ხსნარში ერთმანეთთან შემდეგი მოცულობით თანაფარდობითაა: 5 %-იანი ღვინის მჟავის ხსნარი 6 ნაწილი ($C_4H_6O_6$), ამიაკის 25%-იანი წყალხნარი 1 ნაწილი (NH_4OH) და 2-4 ნაწილი ეთილენგლიკოლი. ელექტროდებზე მოდებული მუდმივი ძაბვის მნიშვნელობა იცვლება 0-დან 60ვ-მდე (ანოდის დამჭერზე მაგრდება სტრუქტურა, კათოდის დამჭერზე კი პლატინის ფირფიტა). ხსნარში დენის სიმკვრივის მნიშვნელობა სტრუქტურის ფართის ერთეულზე გაანგარიშებით უნდა იყოს 5-10მა/სმ². ელექტროლიტი შესაძლოა გამოყენებულ იქნას ერთი წლის განმავლობაში. ოპერაცია სრულდება სტრუქტურის გარეცხვით დეიონიზირებულ წყალში და გაშრობით.

ოპერაცია 8. სტრუქტურის პარამეტრების კონტროლისთვის გამოიყენება ფოტოელექტრო ლუმინესცენციის მეთოდი, რომლის მიზანია სტრუქტურის

ეპიტაქსიური ფენის ერთგვაროვნების დადგენა, სტრუქტურის ლუმინესცენციური თვისებების და p-n გადასვლის არეში გაჟონვის ლოკალური არხის გამოვლენა. პროცესი ტარდება შემდეგნაირად: სტრუქტურა თავსდება ვერცხლიწყლის ნათურის მიერ გამოსხივებული სინათლის ნაკადის არეში (გამოიყენება მიკროსკოპ MJI-5-ის გამანათებელი); ფილტრად გამოიყენება 100 მკმ სისქის ქრომის სუსტი წყალხსნარის ფენა და მინის ფილტრი C3C-23; ლუმინესცენციის ერთგვაროვნობაზე დაკვირვებისთვის გამოიყენება სატელევიზო დანადგარი ПTV-50 და ელექტრო-ოპტიკური გარდამქმნელი (ობიექტივის წინ დამონტაჟებული KC-19 ფილტრით).

ოპერაცია 9. ფოტოლითოგრაფიულ პროცესი: პროცესისის წინ სტრუქტურას უტარდება განცხიმვა CCl_4 -ით; ხდება ნიმუშის გავლება დეიონიზირებულ წყალში და გაშრობა თერმოსტატში ($100^{\circ}C$, 30წთ); სამუშაო ზედაპირზე ეფინება $\Phi P-25$ ფოტორეზისტის 2 მკმ სისქის ფენა 08 $\Phi H-125/200-004$ დანადგარზე; ფოტორეზისტის გაშრობის რეჟიმით (30 წთ $T=80-90^{\circ}C$ ტემპერატურის პირობებში); ფოტორეზისტზე გამოსახულების გადატანა ხდება კონტაქტური პროექცირებით ($\Xi M-576$ დანადგარზე); ტუტე გამამჟღავნებელში ფოტორეზისტი სცილდება განათებას დაქვემდებარებული უბნებიდან და ირეცხება დეიონიზირებულ წყალში; ფოტორეზისტის დაშლილობა რეჟიმით $T=100^{\circ}C$ და $t=30$ წთ.

ოპერაცია 10. ანოდური ჟანგის შედეგად მიღებულ დიელექტრიკულ ფირში ზოლების ფორმირებისათვის ფირი იწამლება მომწამვლელში, რომელიც შედგება (მოცულობითი თანაფარდობით) ხუთი ნაწილი 40%-იანი ამონიუმის ფტორიდით და ერთი ნაწილი HF-ით (1წთ, ოთახის ტემპერატურაზე), მომწამვლელი გამოყენებისათვის ვარგისია ერთი თვის განმავლობაში. ნიმუში ირეცხება დეიონიზირებულ წყალში. პროცესი სრულდება მყარი ხსნარის ზოლებად მოწამვლით, ვრეცხავთ დეიონიზირებულ წყალში და ვაშრობთ თერმოსტატში.

ოპერაცია 11. სტრუქტურას, სამუშაო ზედაპირზე, ვაკუუმური დაფენის დანადგარში (ვაკუმი $5 \cdot 10^{-6}$ მმ.ვც.სტ) ეფინება Ag(Cr+Ni) ფენები. დაფენის

პროცესში სტრუქტურის ტემპერატურა უნდა $T=180-200^{\circ}\text{C}$. სტრუქტურის ზედაპირზე დაფენილი ფენების ჯამური სისქე უნდა შეადგენდეს დაახლოებით 0,1 მკმ-ს.

ოპერაცია 12. ფოტორეზისტის მოხსნა (აფეთქებით ფოტოლიტოგრაფია) ტარდება დიმეთილფორმამიდში დუდილით, ამ დროს მეტალის ფენა რჩება საკონტაქტო ზოლებში. ფოტორეზისტის მოხსნის შემდეგ ტარდება სტრუქტურის გარეცხვა დეიონიზირებულ წყალში და გაშრობა თერმოსტატში.

ოპერაცია 13. 88%Au:12%Ge-ის ფენის დაფენა ხორციელდება ოპერაცია 11-ის შესაბამისად.

ოპერაცია 14. კონტაქტების შეცხოვა ხორციელდება ფოტონურ იმპულსურ დანადგარზე ($T=350-400^{\circ}\text{C}$, $t=1\text{სთ}$) ან მაღალსიხშირულ ლუმელში ($T=400^{\circ}\text{C}$, I წთ).

ოპერაცია 15. სტრუქტურის ორივე მხარეს ეფინება ნიკელის ფენა ელექტრო-ქიმიური მეთოდით ელექტროლიტში: ნიკელის სულფატი NiSO_4 – 70-50გ/ლ; ნატრიუმის სულფატი Na_2SO_4 – 40-50 გ/ლ; ბორის მჟავა – H_3BO_3 – 20-25გ/ლ; ნატრიუმის ქლორიდი – NaCl – 5-10გ/ლ. დენის სიმკვრივის 6-8 მა/სმ² პირობებში 3 წუთის განმავლობაში (ნიკელის ფირფიტა ანოდი). ელექტროლიტი შესაძლებელია შეინახოს ერთი წლის განმავლობაში. მეტალის დაფენის შემდეგ სტრუქტურები ირეცხება დეიონიზირებულ წყალში და ხდება გაშრობა.

ოპერაცია 16. ხორციელდება კალით დაფარვის პროცესი: ფირფიტის ზედაპირზე ხდება ფლუსის დატანა (ფლუსი შედგება: 1,00 ნაწილი თუთიის ქლორიდი ZnCl_2 , 0,25 ნაწილი ამონიუმის ქლორიდი NH_4Cl , 0,17 ნაწილი გლიცერინი და წყლი H_2O); ხორციელდება ფირფიტის სწრაფად ჩაშვება გამდნარ კალაში და ნაღობიდან ფრთხილად (ნელა) ამოღება; გარეცხვა მდუღარე დეიონიზირებულ წყალში და გაშრობა.

ოპერაცია 17. ოპერაციის შედეგად ტარდება ფირფიტების პაკეტად შეწებება სპეციალური შემადგენლობის ფისის საშუალებით და პაკეტის კიდეების ჩამოჭრა (მოხეხვა) ჩარხზე.

ოპერაცია 18. ოპერაცია მოიცავს: ფირფიტების პაკეტის თითოეული მხრიდან 100-150 მკმ-ის მოწამვლას წყალხსნარში ($5H_2O:1$ ამიაკი) ერთი წუთის განმავლობაში ოთახის ტემპერატურაზე; ფირფიტების განცალკევების მიზნით პაკეტს ვათასებთ ფისის გამხსნელ ხსნარში და ვასუფთავებთ; ვრეცხვთ დეიონიზირებულ ან გამოხდილ წყალში და ვაშრობთ.

ოპერაცია 19. მზის ელემენტების შემოწმების ოპერაცია მოიცავს: ფოტოდენის გაზომვას მზის გამოსხივების იმიტატორით (ინტენსიობა შეესაბამება ერთ მზის მუდმივას) დატვირთვის ისეთი წინაღობის დროს, რომელიც უზრუნველყოფს 0,5ვ ძაბვის ვარდნას; ნიმუშებზე დატვირთვის მახასიათებლის შერჩევითი, გაზომვა ზონდიანი კონტაქტების მქონე მოწყობილობით: ა) მიკროსკოპის იმპულსური გამომსხივებელი (ქსენონის ნათურა ИСК-25 ელექტრონული დამაგროვებლითა და ანთების სქემით); ბ) ვიდეო მიწყობილობა ან ელექტრო-ოპტიკური გარდამქმნელი. გ) დამახსოვრების უნარის მქონე ოსცილოგრაფი C8-13, ИУ-12А ბლოკი; დ) მცირე ინდუქციური წინაღობის მაღალია 0-დან 100ომი-მდე, ბიჯით 0,01ომი. ელექტროლუმინესცენციის სპექტრზე შერჩევითი დაკვირვება, მზის ელემენტებზე დენის იმპულსების გაშვების დრო 1-10მკწმ, სიხშირე 10^2 - 10^3 ჰც, ამპლიტუდა 20ა-მდე, შინაგანი წინაღობის განაწილებაზე მომქმედი კომპონენტების გამოვლენის მიზნით, საჭიროა ხელსაწყოები: ა) იმპულსური გენერატორი; ბ) ოსცილოგრაფი; გ) დენის ტრანზისტორული გამალიერებელი; დ) ვიდეო მიწყობილობა ან ელექტრონულ-ოპტიკური გარდამქმნელი.

ოპერაცია 20. მქვ განსაზღვრა, რისთვისაც საჭიროა: ძაბვის გაზომვა დატვირთვის განსაზღვრული მნიშვნელობებისთვის, როცა მზის ელემენტზე ეცემა სინათლის ეთჯერადი იმპულსი. გაზომვის ჩასატარებლად საჭირო ხელსაწყოები: ა) მიკროსკოპის იმპულსური გამომსხივებელი МЛ-5 ნათურით ИСК-25; ბ) ოსცილოგრაფი C8-13 ან სწრაფქმედი პიკური ვოლტმეტრი 500 მკწმ.

შენიშვნა: პერიოდულად ხორციელდება დაკალიბრებული მზის ელემენტის გამოსხივების ინტენსიობის კონტროლი. (შერჩევით) დაკვირვება

ლუმინესცენციის ერთგვაროვნობაზე (ოპერაცია 19-ის ანალოგიურად) მზის ელემენტებში ბზარების აღმოჩენის მიზნით.

მეორე ვარიანტი: ოპერაცია 1. საფენების მომზადება ხორციელდება ვარიანტი 1-ის ანალოგიურად. მეორე ვარიანტში გამოიყენება ერთ პროცესში ორი ფენის ეპიტაქსიური ზრდა კასეტით, სადაც საწყისი ნალღობებისთვის არის დგუშისებრი ტიპის ორი კამერა. კაზმის მომზადება მდგომარეობს პირველი (Ga, n-GaAs და Al) და მეორე (Ga, n-GaAs და Al) შენადნობისთვის კომპონენტების აწონვაში. ამ შემთხვევაში იმისათვის, რომ პირველი წვეთი მთლიანათ იქნას ჩანაცვლებული მეორეთი, ის უნდა იყოს პირველზე წონით ორჯერ მეტი.

ოპერაცია 2 და 3. ვარიანტი 1-ის ანალოგიურად და ნახ. 27-ზე მითითებული რეჟიმის შესაბამისად.

ოპერაცია 4. ოპერაცია 8, ვარიანტი 1-ის ანალოგიურად.

ოპერაცია 5. ოპერაცია 5 ვარიანტი 1-ის ანალოგიურად, 580°C ტემპურატურის დროს, 2 სთ.

ოპერაცია 6. ოპერაცია 6 ვარიანტი 1-ის ანალოგიურად.

ოპერაცია 7. SiO₂ დაფენა შესაძლებელია პიროლიზის მეთოდით (სილანის პიროლიზის მეთოდით ჟანგბადის გარემოში T=400°C) ან ვაკუუმური გაფრქვევის ხელსაწყოებში. ფირის სისქე უნდა იყოს 0,1-0,15 მკმ.

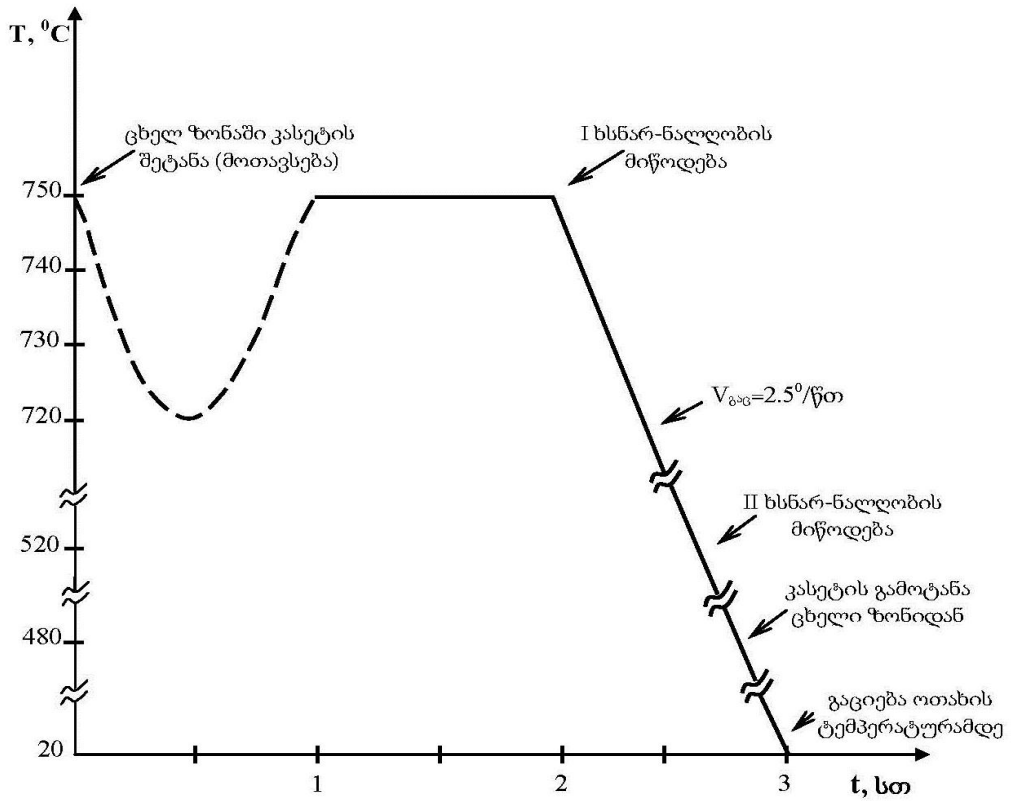
ოპერაცია 8. ოპერაცია 9-ის ანალოგიურად, ვარიანტი 1.

ოპერაცია 9. SiO₂-ის ფირში ფანჯრების გახსნა ხორციელდება ანოდური ჟანგის მოწამვლელ ხსნარში მოწამვლით (იხ. ოპერაცია 10, ვარიანტი 1); მყარი ხსნარის ფენის მოწამვლა კი მდულარე HCl-ში 1-2 წმ-ით მოთავსებით.

ოპერაცია 10-16. ოპერაცია 11-17 -ის ვარიანტი 1-ის ანალოგიურად.

ოპერაცია 17. SiO₂-ის ფირში ფანჯრების გახსნა ანოდური ჟანგის მოწამვლელ ხსნარში მოწამვლით (იხ. ოპერაცია 10, ვარიანტი 1).

ოპერაცია 18-20. ოპერაცია 7, 19-20-ის ანალოგიურად.



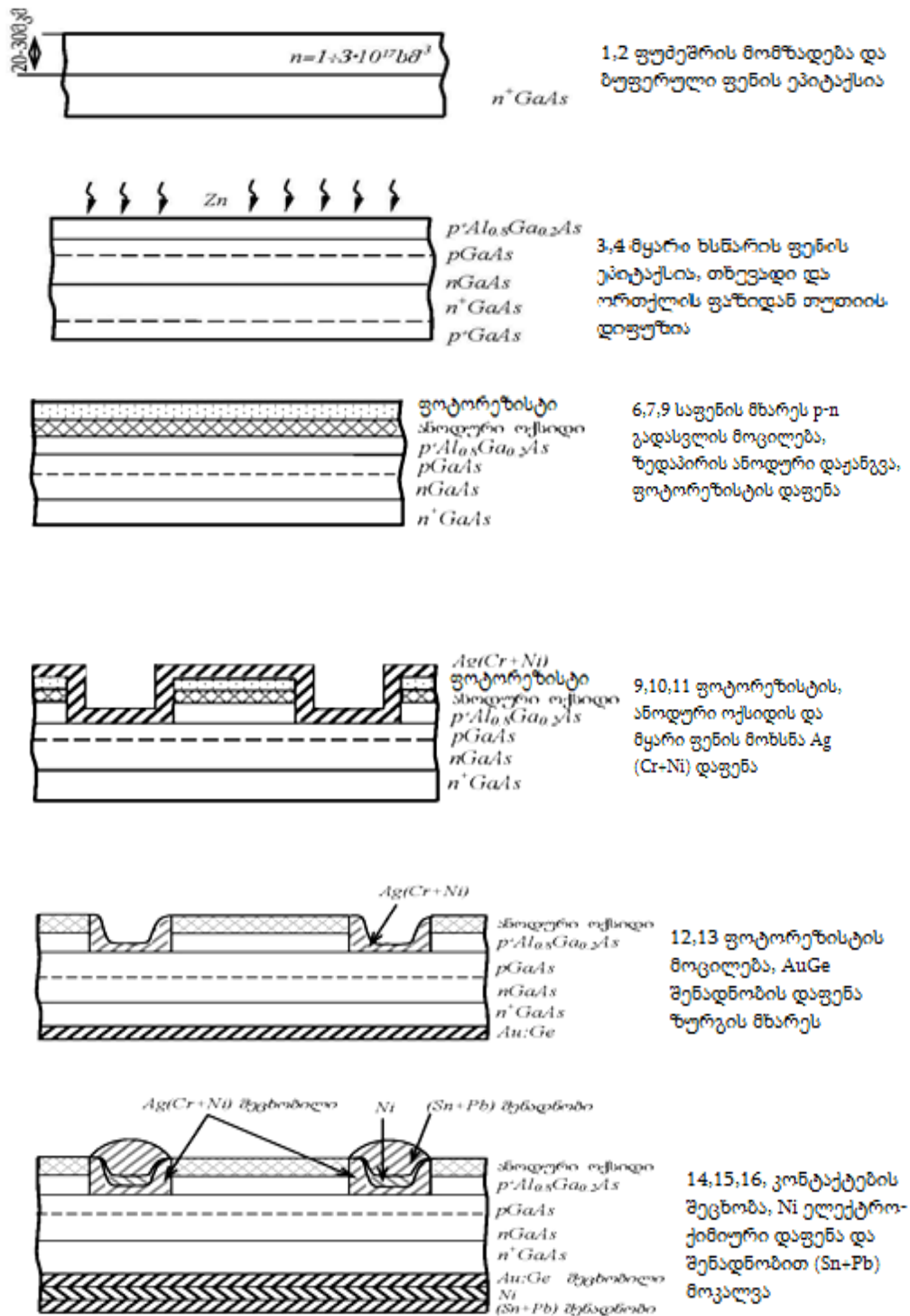
ნახ.27. ტემპერატურული რეჟიმის დიაგრამა

ცხრილი 2. ჰეტეროფოტოგარდამქმნელის (ჰფგ) დამზადების ტექნოლოგიური პროცესის ბლოკ-სქემა

I ვარიანტი (ნახ.28)	II ვარიანტი (ნახ.29)
1. ფუძემდრისა და ხსნარ-ნალღობის კომპონენტების მომზადება	1. ფუძემდრისა და ხსნარ-ნალღობის კომპონენტების მომზადება
2. ბუფერული ფენის ეპიტაქსია	2. ბუფერული და მყარი ხსნარი ფენების ეპიტაქსია
3. რეაქტორის განტვირთვა და კასეტის გამოტანა	3. რეაქტორის განტვირთვა და კასეტის გამოტანა
4. თხევადი ფაზიდან მყარი ხსნარის ეპიტაქსიური პროცესის მომზადება და ჩატარება Zn-ის თანმდევი დიფუზიით	4. სტრუქტურის პარამეტრების კონტროლი ფოტოლუმინესცენციური მეთოდით
5. თუთიის დიფუზია წყალბადის არეში	5. თუთიის დიფუზია წყალბადის არეში

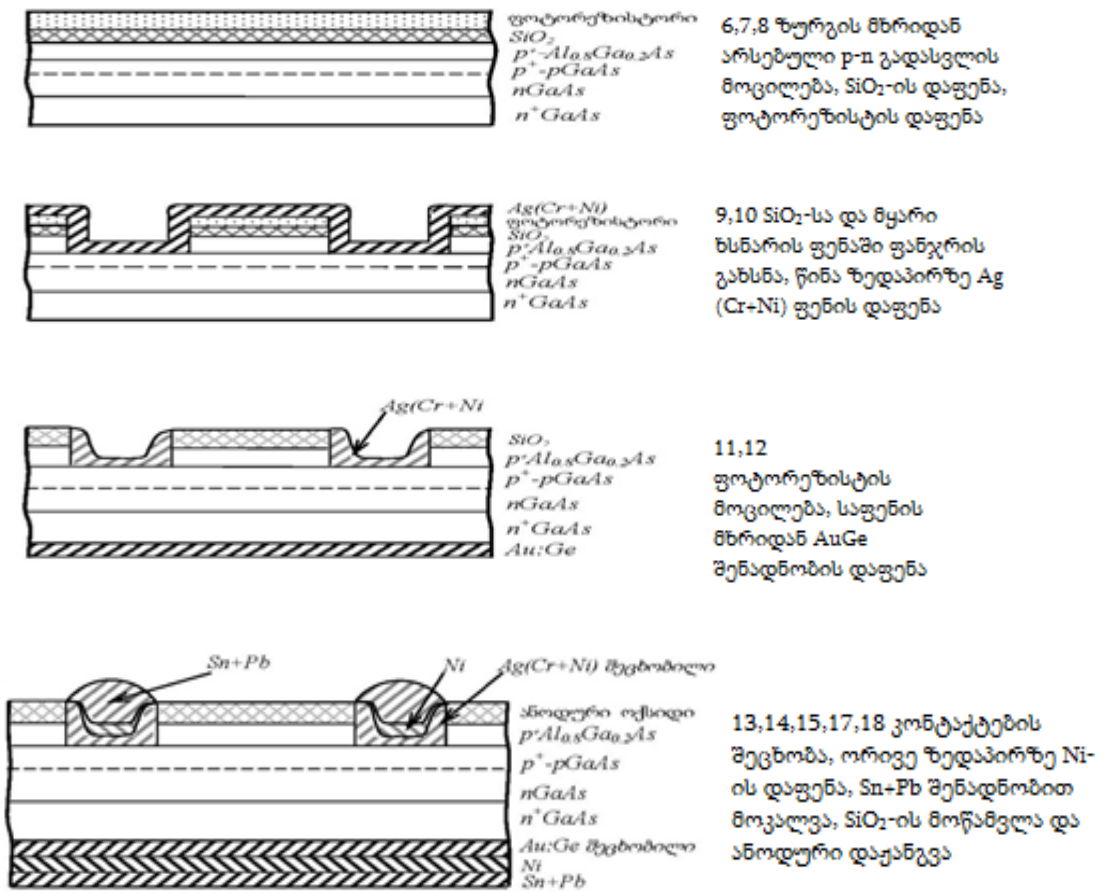
6. საფენის მხრიდან p-n გადასვლის მოცილება	6. საფენის მხრიდან p-n გადასვლის მოცილება
7. წინა სამუშაო ზედაპირის ანოდური დაჟანგვა (მაბვა 60 ვ)	7. წინა სამუშაო ზედაპირის ანოდური დაჟანგვა (მაბვა 60 ვ)
8. ფოტოლუმინესცენციური მეთოდით სტრუქტურის პარამეტრების კონტროლი	8. ფოტოლითოგრაფია
9. ფოტოლითოგრაფია	9. მყარი ხსნარსა და ანოდურ ჟანგში ფანჯრების გახსნა
10. მყარი ხსნარსა და ანოდურ ჟანგში ფანჯრების გახსნა	10. Ag (Cr+Ni) დაფენა წინა სამუშაო ზედაპირზე
11. Ag (Cr+Ni) დაფენა წინა სამუშაო ზედაპირზე	11. ფოტორეზისტის მოშორება
12. ფოტორეზისტის მოშორება	12. საფენის მხრიდან Au:Ge შენადნობის დაფენა
13. საფენის მხრიდან Au:Ge შენადნობის დაფენა	13. კონტაქტების შეცხობა
14. კონტაქტების შეცხობა	14. სტრუქტურის ორივე მხარეს ელექტროქიმიური მეთოდით Ni-ის დაფენა
15. სტრუქტურის ორივე მხარეს ელექტროქიმიური მეთოდით Ni-ის დაფენა	15. მოკალვა (Sn+Pb) სარჩილის საშუალებით
16. მოკალვა (Sn+Pb) სარჩილის საშუალებით	16. კიდეების ჩამოჭრა
17. კიდეების ჩამოჭრა	17. SiO ₂ -ის მოწამვლა
18. ქიმიური მოწამვლა და გვერდითი წახნაგების პასივიზაცია	18. წინა სამუშაო ზედაპირის და გვერდითი წახნაგების ანოდური დაჟანგვა
19. მზის ელემენტების პარამეტრების შემოწმება	19. მზის ელემენტების პარამეტრების შემოწმება
20. მზის ელემენტების კორპუსში დამონტაჟება	20. მზის ელემენტების კორპუსში დამონტაჟება
21. ჰერმეტიზაცია	21. ჰერმეტიზაცია
22. საბოლოო კონტროლი	22. საბოლოო კონტროლი

ჰეტეროფოტოგარდამქმნელის (ჰფგ) დამზადების ტექნოლოგიური პროცესის ბლოკ-სქემა (I ვარიანტი)



ნახ. 28. ტექნოლოგიური პროცესების გრაფიკული სურათი 1-16 ოპერაციები

ჰეტეროფოტოგარდამქმნელის (ჰფგ) დამზადების ტექნოლოგიური პროცესის ბლოკ-სქემა (II ვარიანტი)



ნახ. 29. ტექნოლოგიური პროცესების გრაფიკული სურათი: 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,14,15,17 და 18 ოპერაციები

2.2. დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიის მეთოდით გაზრდილი $AlGaAs-GaAs$ სტრუქტურების საფუძველზე მზის გამოსხივების კონცენტრაციონი ფოტოელექტრული ელემენტების დამზადების ტექნოლოგიის და კონსტრუქციის დამუშავება

წარმოდგენილია კონცეტირების 100-ჯერადობის (100 sun) პირობებში მომუშავე მზის ელემენტებისათვის დაბალტემპერატურული (500-600°C) თხევადფაზური ეპიტაქსიის (LT LPE) მეთოდით დამზადებული ახლად დამუშავებული ჰეტეროსტრუქტურების საინტერესო შედეგები [68; 69].

უკანასკნელ წლებში იოფეს ფიზიკო-ტექნიკის ინსტიტუტში მზის ელემენტებზე, ზომიერი (100 sun) კონცენტრირების პირობებში, (AM0)-ზე მიღებულია 24% და (AM1.5)-ზე 27,5% ეფექტურობა [54]. GaAs-ის ერთ p-n გადასვლიან მზის ელემენტზე შესაძლებელია, რომ მიღებულ იქნას მაღალი ეფექტურობა 500 sun კონცენტრირების შემთხვევაშიც. ჰეტეროსტრუქტურაში, მასალათა მაღალი ხარისხის და ელემენტთა ოპტიმალური გაერთიანების შედეგად, შესაძლებელია ასეთი კონცენტრირების პირობებში მიღებული იქნას ასეთივე მაღალი ეფექტურობა. მზის ელემენტებისათვის GaAs-ის საფუძველზე (LT LPE) მეთოდით შექმნილ სტრუქტურები (ნახ.30; ნახ.31; და ნახ. 32), რომლებიც თავის თავში შეიცავენ: n-GaAs-ის ფუძემრეს; $n^+Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ ან $n^+GaAsBSF$ ფენებს. n-GaAs ($n=3 \times 10^{17} \text{სმ}^{-3}$) Te-ით ლეგირებული (3-4 მკმ სისქის) ბაზას; p-GaAs ($p=0,2-2 \times 10^{19} \text{სმ}^{-3}$)-ს; Mg, Ge ან Zn-ით ლეგირებულ 1,0-1,5 მკმ სისქის ემიტერს; p- $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ (Mg-ით ლეგირებული 0,04-0,06 მკმ სისქის) ფანჯარას.

(ოპტიკური ფანჯარა) $p-Al_{0.85}Ga_{0.15}As$	40-70 nm
(ემიტერი) $p-GaAs(Mg) (0.8-2) \times 10^{19} \text{სმ}^{-3}$	1.2 μm +/- 0.2 μm
(ბაზა) $n-GaAs 1-2 \times 10^{17} \text{სმ}^{-3}$	3-3.5 μm
(სარკული ფენა) $AlGaAs$ $x=0.1-0.2$	10-12 μm
n^+-GaAs ფუძემრე $2 \times 10^{18} \text{სმ}^{-3}$	

ნახ. 30. ჰეტეროსტრუქტურა მაგნიუმით ლეგირებული p-GaAs ემიტერით და BSF $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0,1-0,2$) ფენით.

სტრუქტურები ოპტიმიზირებულია მაღალი (~500 sun) კონცენტრირების პირობებში სამუშაოდ. კერძოდ, მათ საფუძველზე დამზადებულ ელემენტებს გააჩნიათ დაბალი კონტაქტური წინაღობა, რომელიც მიიღწეული იქნა p-GaAs-ის ემიტერში სისქისა და ლეგირების ხარისხის

გაზრდით. ამასთან ამ ფენებში შევინარჩუნეთ ელექტრონების დიფუზიური განარბენის სიგრძის მაღალი მნიშვნელობა. ამ მოთხოვნების შესრულება შესაძლებელი გახდა p-GaAs-ის ემიტერში ჩაშენებული ველის საშუალებით. ასეთი ჩაშენებული ველის მისაღებად ზოგიერთ სტრუქტურაში ჩატარდა ზრდის პროცესის შემდგომ Zn-ის დიფუზია (ეს ჩაშენებული ველი მიიღება ხვრელების კონცენტრაციის გრადიენტით) [68; 71; 72]. ელემენტებში p-ტიპის GaAs-ის ფენის სისქე გაზრდილი იქნა 1-1,5 მკმ-მდე

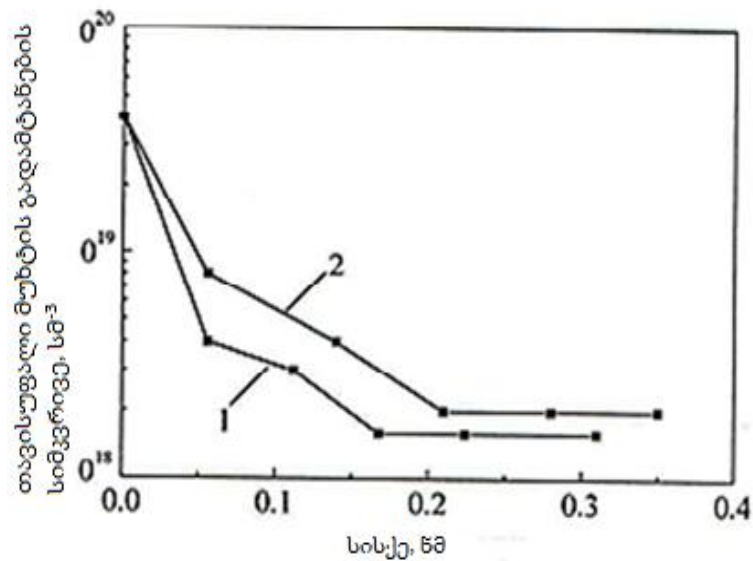
(ოპტიკური ფანჯარა) p-Al _{0.85} Ga _{0.15} As(Mg)	W=40 - 50 nm
(ემიტერი 2) P ⁺ -GaAs:Mg(Ge) 2x10 ¹⁹ სმ ⁻³	d=0.2 - 0.3 μm
(ემიტერი 1) p-GaAs(Ge) 10 ¹⁸ სმ ⁻³	d=1 μm
(ბაზა) n-GaAs(Te) 1-2x10 ¹⁷ სმ ⁻³	d=3-4.5 μm
n ⁺ -GaAs ფუძემრე 2x10 ¹⁸ სმ ⁻³	

ნახ. 31. ჰეტეროსტრუქტურა n⁺GaAs (Te)-ის ფენის კრისტალიზაციის შედეგად მიღებული ეპიტაქსიური BSF ფენით და Mg ან Ge (Zn) ლეგირებული ორფენიანი ემიტერით.

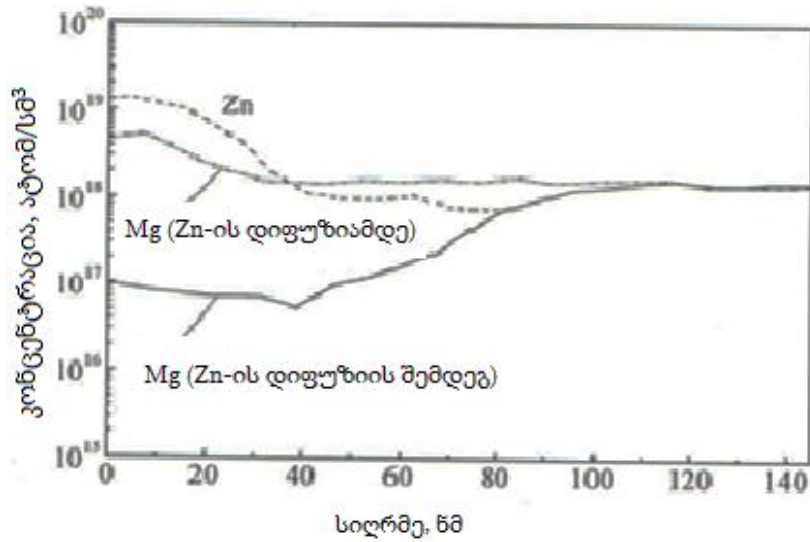
(ოპტიკური ფანჯარა) p-Al _{0.85} Ga _{0.15} As(Mg)	W=40 - 50 nm
(ემიტერი 2) P ⁺ -GaAs:Mg(Ge) 2x10 ¹⁹ სმ ⁻³	d=0.2 - 0.3 μm
(ემიტერი 1) p-GaAs(Ge) 10 ¹⁸ სმ ⁻³	d=1 μm
(ბაზა) n-GaAs(Te) 1-2x10 ¹⁷ სმ ⁻³	d=3-4.5 μm
(სარკული ფენა) AlGaAs x=0.1-0.2	10-12 μm
n ⁺ -GaAs ფუძემრე 2x10 ¹⁸ სმ ⁻³	

ნახ.32. ჰეტეროსტრუქტურა BSF ფენით (მიღებული მაღალლეგირებული n⁺GaAs ფუძემრის გამოყენებით) და Ge-ით ლეგირებული ორფენიანი p-GaAs ემიტერით.

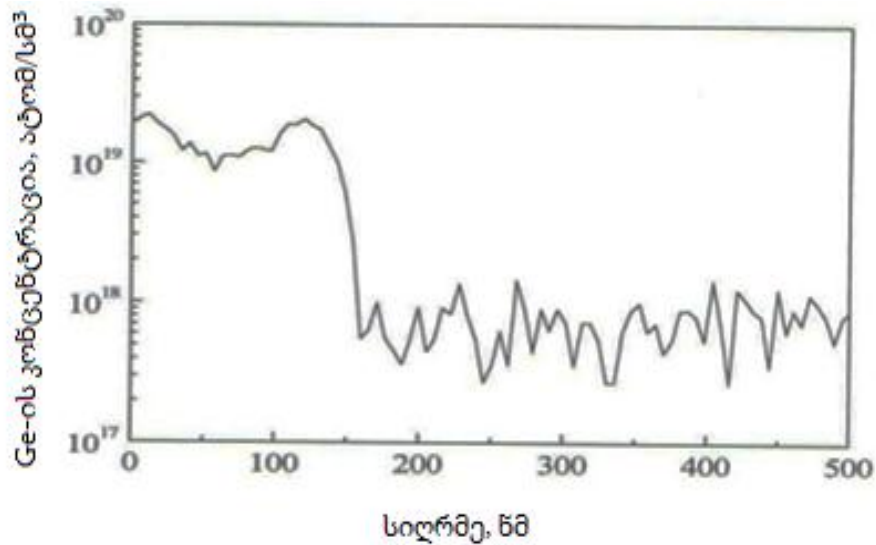
და აქცეპტორების კონცენტრაცია დიფუზიურ ფენაში $\sim 10^{19}$ სმ⁻³-მდე (ნახ.33-ზე გრაფიკი 1, ნახ.34). ხვრელების ასეთი განაწილება მიიღება p-GaAs-ის ორი ან სამი ფენის კრისტალიზაციით, რომლებიც ლეგირებულია Mg-ით ან Ge-ით. პირველი ფენა არის $\sim 1,0$ მკმ სისქის და $N_A=(2-3)\times 10^{18}$ სმ⁻³ კონცენტრაციის, დამატებითი თხელი ფენები კი 0,1-0,2 მკმ სისქის და $N_A\sim 10^{19}$ სმ⁻³ კონცენტრაციის (ნახ. 33-ზე გრაფიკი 2 და ნახ.35). შეიმჩნევა, რომ



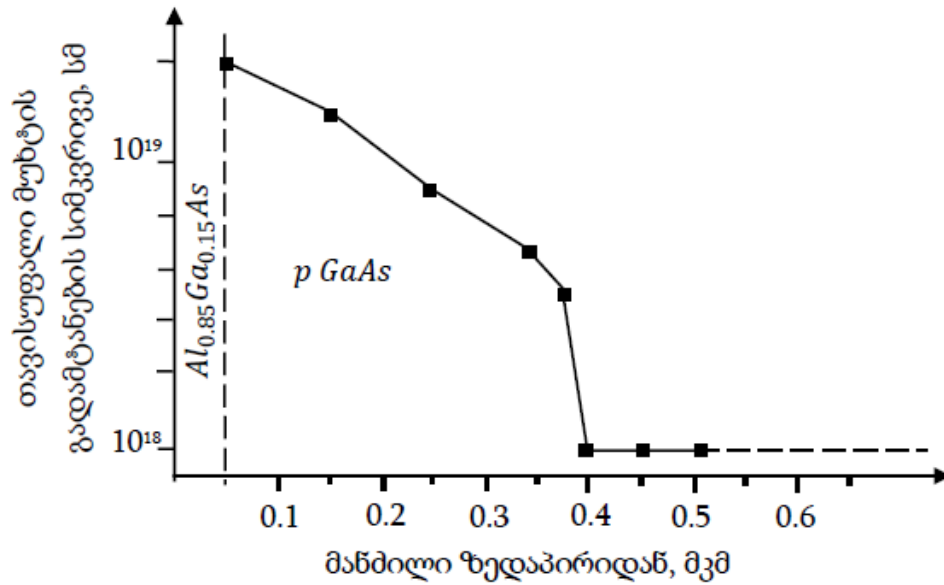
ნახ. 33. p-GaAs-ში თავისუფალი მუხტის გადამტანების (ხვრელების) სიმკვრივის განაწილება (სისქის გაზომვა ხდება p-AlGaAs/p-GaAs-ის გამყოფი საზღვრის ხაზიდან): 1. p-GaAs ფენა, Mg ლეგირებული ზრდის პროცესში Zn-ის დიფუზიის შემდგომ; 2. p-GaAs, რომელიც გაზრდილია სამი ერთმანეთისგან მაგნიუმის კონცენტრაციით განსხვავებული ფენების კრისტალიზაციით.



ნახ. 34. *p-GaAs* ემიტერში Zn და Mg ატომური კონცენტრაციის SIMS პროფილი (Mg-ით ლეგირება განხორციელებულია Zn-ის დიფუზიის შემდეგ და *p-GaAs* ემიტერის საერთო სისქეა 1,6 მკმ).

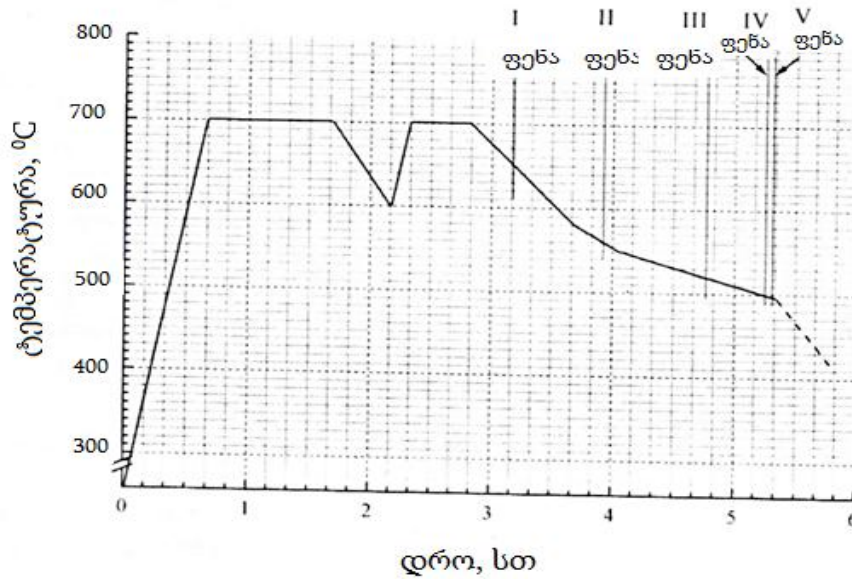


ნახ. 35. *p-GaAs* ემიტერში Ge ატომთა კონცენტრაციის SIMS პროფილი (*p-GaAs* ემიტერის საერთო სისქეა 1,4 მკმ).



ნახ. 36. Mg-ით ლეგირებული და Zn-ით დიფუზია ჩატარებული p-GaAs ეპიტერში თავისუფალი მუხტის გადამტანების კონცენტრაციის განაწილება (გაზომილი ანოდური დაჟანგვის ყველა ეტაპზე გაბნეული სპექტროსკოპიის მეთოდით), ფოტოაქტიური p-GaAs-ის ფენის სრული სისქეა 1,3 მკმ.

დიფუზიური პროცესის გახანგრძლივების შემთხვევაში Mg-ის ატომების კონცენტრაცია მცირდება იმ არეში, სადაც Zn-ის კონცენტრაცია მაღალია (ნახ.34 და ნახ.35). ამ ეფექტის მიუხედავად, Zn-ის დამატებითი დიფუზიის შემდგომ მუხტის თავისუფალი გადამტანების კონცენტრაცია შესაძლებელია საკმაოდ ამაღლდეს (ნახ.36). Ge-ით მდორედ ლეგირებული ეპიტაქსიური სტრუქტურების ზრდის პროცესისათვის წვეთ-ნალღობთა შემადგენლობები წარმოდგენილია ცხრილ 3-ში. ნახ.37-ზე ნაჩვენებია ეპიტაქსიური სტრუქტურის ზრდის რეჟიმების დიაგრამა.

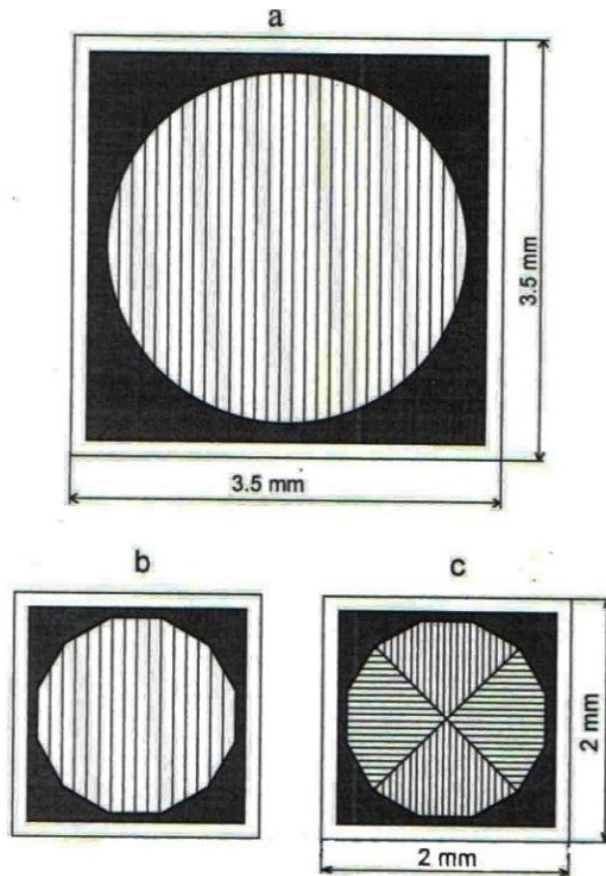


ნახ. 37. მაღალკონცენტრირებული მზის ელემენტებისათვის ეპიტაქსიური სტრუქტურის ზრდის ტემპერატურული რეჟიმი, როდესაც Ge-ით ემიტერის ლეგირება ხდება თანდათან (ამ შემთხვევაში p-GaAs არ არის დაცული საკონტაქტო ფენით).

ცხრილი 3. ცხრილში წარმოდგენილია ეპიტაქსიური ზრდის პროცესში გამოყენებულ წვეთ-ნალღობთა შემადგენლობა

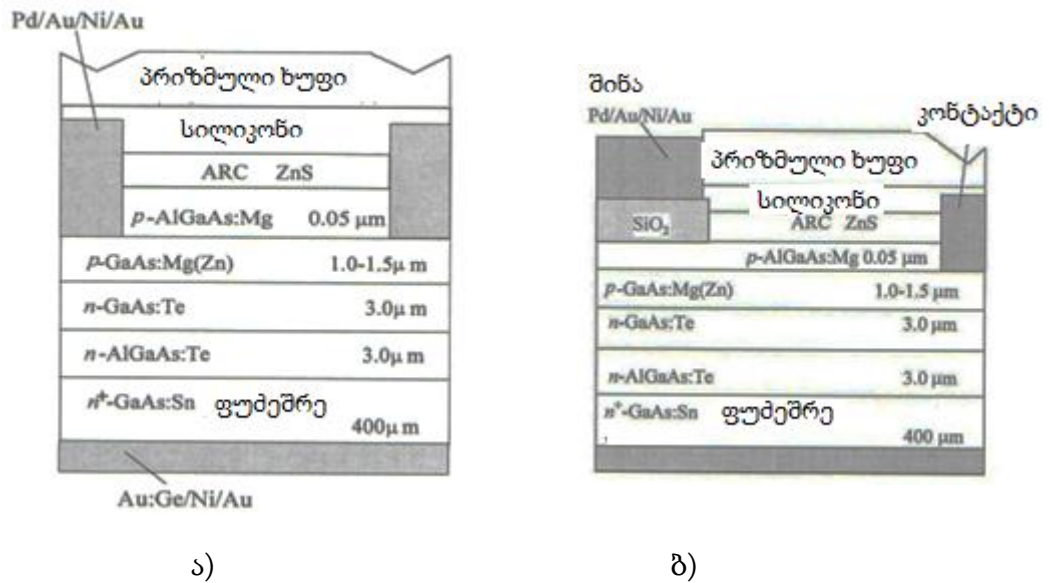
I ნალღობი		II ნალღობი		III ნალღობი			IV ნალღობი			V ნალღობი			
Ga	GaAs	Ga	GaAs	Ga	GaAs	Ge	Ga	GaAs	Ge	Ga	GaAs	Al	Mg
6 გ	109,0 მგ	6 გ	60 მგ	6 გ	45,0 მგ	8,5 მგ	6 გ	35,5 მგ	115 მგ	6 გ	8,5 მგ	13,8 მგ	3,2 მგ
	ლეგირებული Te-ით		ლეგირებული Te-ით		არა ლეგირებული			არა ლეგირებული			არა ლეგირებული		

მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ელემენტების საერთო სახე, რომელთა აქტიური (განათებული) უბნის ზომებია 6,6მმ² და 2მმ² (ნახ.38-ზე).



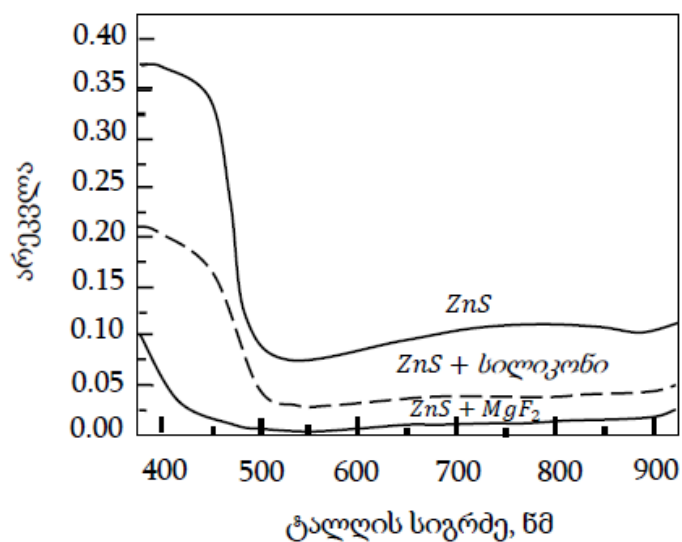
ნახ. 38. მაღალკონცენტრირებული მზის ელემენტების საერთო სახე, განათებული უბნის საპროექტო ზომაა 6,6 მმ² (ა) და 2,0 მმ² (ბ,ვ).

საკონტაქტო ბადის თითებს შორის უბნის ზომებია 0,1 და 0,05 მმ, თითების სიგანეა 10 მკმ და მათი სისქე კი 3-4 მკმ. გარშემოვლებული ორშრიანი ZnS/MgF₂ ფენა გამოიყენება როგორც ანტიამრეკლავი (ARC) დანაფარი იმელებენტებისათვის, რომელშიც არ გამოიყენება პრიზმული ხუფი. ZnS-ის ერთფენიანი დანაფენი კი გამოიყენება ფოტონების არეკვლის მინიმიზაციისათვის იმ ფრონტალური ზედაპირიდან, რომელზეც პრიზმული ხუფი ესაზღვრება მზის ელემენტს (ნახ.39) [54].



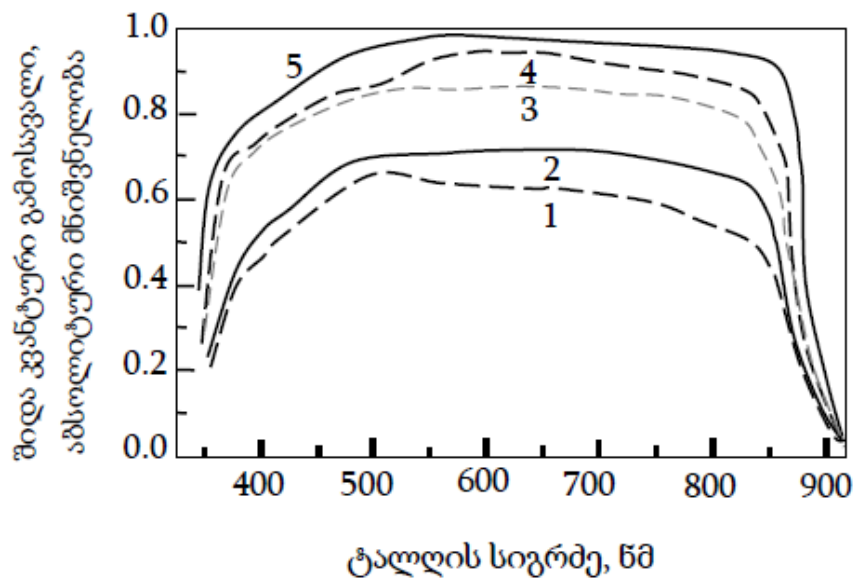
ნახ. 39. ა) GaAs-ის საფუძველზე შექმნილი ერთგადასვლიანი მზის ელემენტი ZnS-ის ანტიამრეკლავი დანაფენითა და პრიზმული ხუფით. ბ) GaAs-ის საფუძველზე შექმნილი მაღალკონცენტრირებული მზის ელემენტი, ფენით მაიზოლირებელ SiO_2 -ზე.

ნახ. 40-ზე წარმოდგენილი მრუდი გვიჩვენებს არეკვლის სპექტრს $Al_{0.85}Ga_{0.15}As$ ფანჯრის ფენიდან, რომელიც დაფარულია სხვადასხვა ანტიამრეკლავი დანაფენებით: ZnS; ZnS+ სილიკონი და ZnS+MgF₂. ელემენტზე მინიმალური (2%-ის ფარგლებში) ოპტიკური დანაკარგები მიღწეულია ორფენიანი ZnS+MgF₂ (ARC) ფირების გამოყენებით.



ნახ. 40. $Al_{0.75}Ga_{0.15}$ -ის “ფანჯრის“ ფენიდან არეკვლა, რომელიც დაფარულია სხვადასხვა ანტიამრეკლავი დანაფენებით [54].

დამატებით სილიკონის ფენით დაფარულ ელემენტზე მინიმალური 5%-ის ფარგლებში ოპტიკური დანაკარგები მიღწეულია ერთფენიანი ZnS (ARC) ფირის გამოყენებით. ნახ.41-ზე ნაჩვენებია მაღალი კონცენტრირებისათვის ოპტიმიზირებული მზის ელემენტის სპექტრული გამოძახილი. p-GaAs ემიტერის სისქის და ლეგირების ხარისხის ამაღლებას მაღალკონცენტრირებულ მზის ელემენტებში მივყავართ გარე კვანტური გამოსავლის უმნიშვნელო ცვლილებამდე. ამის მიუხედავად ელემენტების ტესტირების პროცესში ფოტოაქტიურ უბანზე მიღებული იქნა ფოტოდენის მაღალი სიმკვრივე 35მა/სმ² (1 sun, AM0-ზე) და 29მა/სმ² (AM1.5D). პრიზმული ხუფით დაფარულ ელემენტებზე, სადაც საკონტაქტო მესერის ბიჯი იყო 50 მკმ, მიღებულია $J_{sc}=25,1\text{მა/სმ}^2$ და ფოტოდენის სიმკვრივის გაანგარიშება ხდება განათების პროექტული უბნის მიხედვით (ცხრილი 4).



ნახ.41. მზის ელემენტის სპექტრული გამოძახილი, როცა ელემენტის ზედაპირზე დაფენილია სხვადასხვა ანტიამრეკლავი ფენები. ელემენტებში საკონტაქტო მესერის თითებს შორის დაშორება არის 50 მკმ, ჩაბნელებულია ზედაპირის 22 % [54].

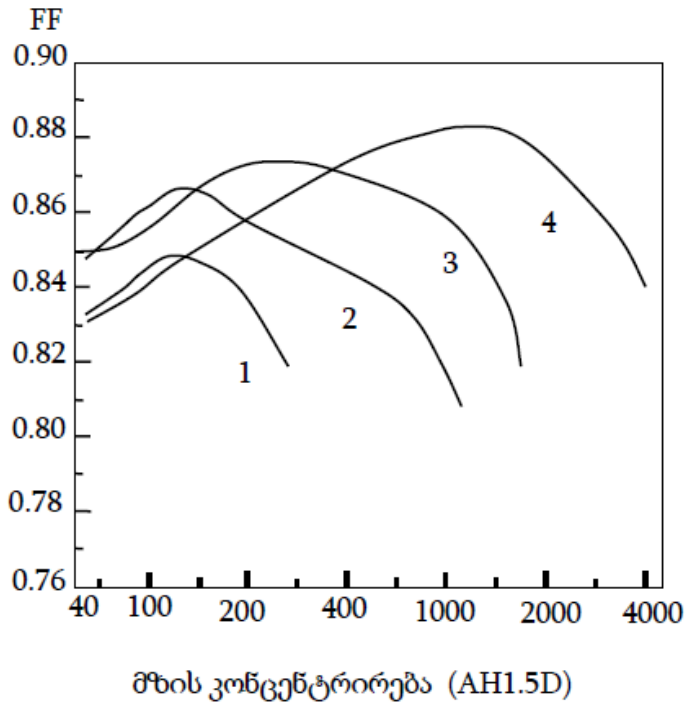
ცხრილში წარმოდგენილი სტრუქტურები Ge-ით მდორეთაა ლეგირებული და ემიტერის ზედაპირზე ოპტიკური ფანჯრის (საკონტაქტო GaAs-ის

ფენა დანაფართო არ არის დაცული) ეპიტაქსიური ზრდისათვის საჭირო ნალღობების შემადგენლობები გაანგარიშებულია ცხრილი 3-ის მიხედვით.

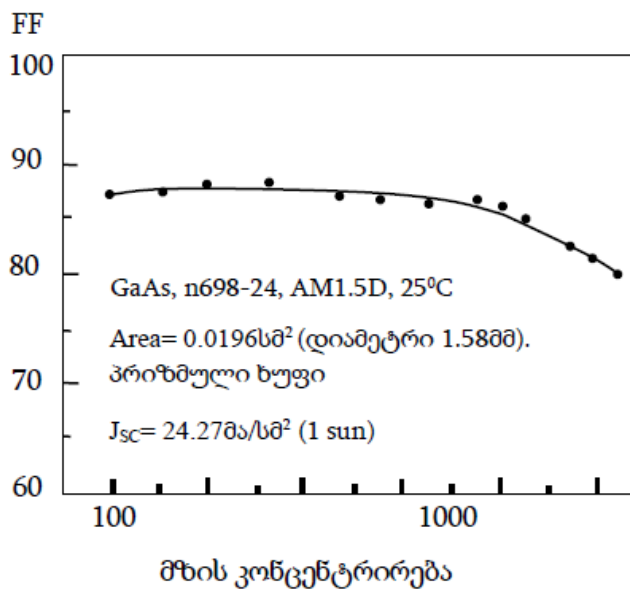
ცხრილი 4. სხვადასხვა ანტიამრეკლავი (ARC) დანაფენით დაფარული ელემენტების ფოტოდენის სიმკვრივეები და ამ ელემენტებში J_{sc} -ს შეფარდება $ZnS+MgF_2$ ფენებით შექმნილი ARC დანაფართო დაფარულ ელემენტის J_{sc} -თან.

Curve- რაოდენ ობა	ARC ტიპი და სფერო	AM0, 1 sun	AM1,5D, 1 sun	
		J_{sc} მს/სმ ²	J_{sc} მს/სმ ²	J_{sc}/J_{sc0}
1	ZnS, საპროექტო დანასათებელი არე	23,7	18,53	0,638
2	ZnS+სილიციუმი, საპროექტო დასანათებელი არე	26,15	21,1	0,727
3	ZnS+პრიზმული სახურავი	31,14	25,1	0,865
4	ZnS+ სილიციუმი, ფოტოაქტიური არე	33,31	26,89	0,927
5	ZnS+MgF ₂ ფოტოაქტიური არე	$J_{sc}=35,98$	$J_{sc}=28,99$	1,0

მზის მაღალკონცენტრირებული გამოსხივების ელემენტებისათვის ძალზე მნიშვნელოვანია სწორი ბალანსის შერჩევა საკონტაქტო მესერის თითებსა და რეზისტორულ დანაკარგებს შორის. ნახ. 42-ზე წარმოდგენილია მზის ელემენტის შევსების (FF) ფაქტორის გაზომილი მნიშვნელობები: როდესაც მესერის თითებს შორის დაშორება არის 0,2 მმ (მრუდი 1), 0,1 მმ (მრუდი 2, 3) და 0,05 მმ (მრუდი 4); დაშორება 0,1 მმ უზრუნველყოფს შევსების ფაქტორის შენარჩუნებას 0,85-დან 1300 ჯერადობამდე. ელემენტი, სადაც, $d=2\text{მმ}^2$ (მრუდი 3), ხოლო დაშორება 0,05მმ უზრუნველყოფს შევსების ფაქტორის 0,85 მნიშვნელობის შენარჩუნებას 4000 sun-მდე [73].



ნახ. 42. შევსების ფაქტორი (FF), როგორც კონცენტრირების ფუნქცია ელემენტში სხვადასხვა თითებისა და ღია შუალედებისათვის: 0,2 მმ (მრული 1); 0,1 მმ - (მრული 2,3); 0,05 მმ (მრული 4) და განათებული არის სხვადასხვა საპროექტო სიგანით 7 მმ² (მრული 1,2) და 2 მმ² (მრული 3,4).

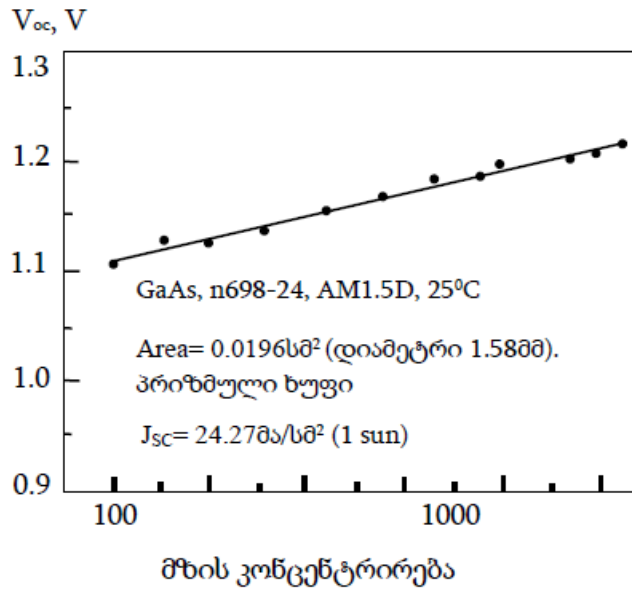


ნახ.43. შევსების ფაქტორი (FF), როგორც კონცენტრირების ფუნქცია ელემენტში თითების ერთმანეთისგან 50 მკმ დაშორების შემთხვევაში (ელემენტის მახასიათებლები წარმოდგენილია ცხრილ 5-ში)

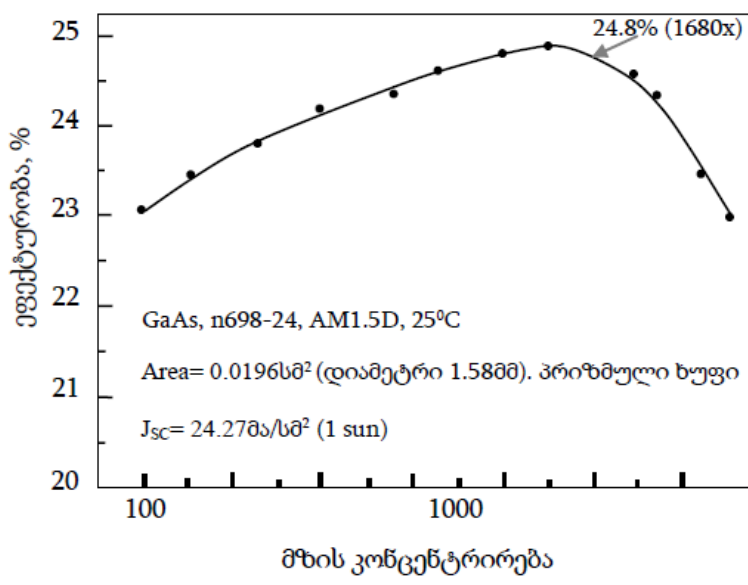
პრიზმული ხუფით აღჭურვილი ერთ-ერთი ელემენტის მახასიათებელი 100-4000 sun-მდე (AM1.5D-ს შემთხვევაში) წარმოდგენილია ნახ.43; ნახ.44, ნახ.45 და ცხრილ5-ში. ამ ელემენტზე მიღწეული იყო ეფექტურობა 24,8 % 1680 sun-ის შემთხვევაში, 24,3% - 2900 sun-ზე, 23,5 % - 4280 sun-ზე და 23%-5800 sun-ზე. მიღებული შედეგები დადასტურებული იქნა მზის ენერგეტიკის სისტემების ფრანკოფერის ინსტიტუტის ტესტირების ცენტრის მიერ ჩატარებული გაზომვებით.

ცხრილი 5. მზის ელემენტების მახასიათებლები როგორც ფუნქცია კონცენტრირების შეფარდებისა AM1,5D-თან.

კონცენტრირება K_c , sun	ეფექტურობა, %	ღია წრედის ძაბვა, V_{oc} , ვ	დაფენის ფაქტორი, %
112,73	23,09	1,096	86,7
167,02	23,65	1,125	86,6
240,34	23,8	1,12	87,5
324,8	24,13	1,129	88
525,6	24,26	1,145	87,3
720,8	24,5	1,161	86,9
1111,13	24,72	1,164	86,5
1678,57	24,82	1,178	86,8
2907,56	24,34	1,177	85,1
3132,35	24,25	1,196	83,5
4277,31	23,51	1,189	81,4
4750	23,4	1,194	80,7
5817,23	22,99	1,193	79,4



ნახ.44. გახსნილი წრედის ძაბვა, როგორც კონცენტრირების ფუნქცია (FF) ფაქტორიანი ელემენტისათვის, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 43-ზე (ელემენტის მახასიათებლები წარმოდგენილია ცხრილ 3-ში).

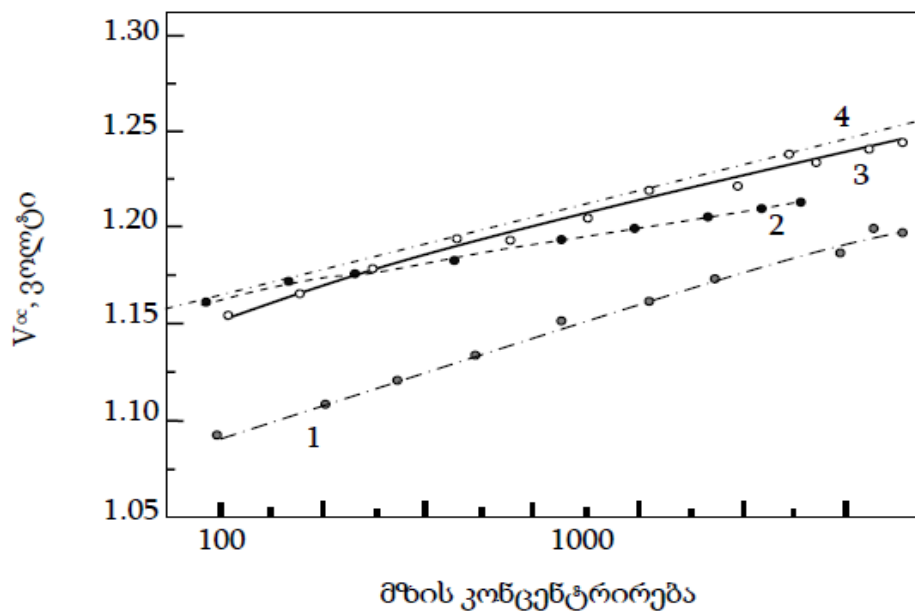


ნახ.45. ეფექტურობა, როგორც კონცენტრირების ფუნქცია FF ფაქტორიან და V_{oc} მნიშვნელობის ელემენტისათვის, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 43 და ნახ. 44-ზე (ელემენტის მახასიათებლები წარმოდგენილია ცხრილ 5-ში).

არსებობს პესრსპექტივა გაიზარდოს დამუშავებული მზის ელემენტების ეფექტურობა, მათში ოპტიკური დანაკარგების შემცირების და

გახსნილი წრედის ძაბვის გაზრდის გზით. ნახ. 46-ზე წარმოდგენილია სხვადასხვა კონსტრუქციის ელემენტებისათვის გახსნილი წრედის V_{oc} ძაბვის მიღწეული მნიშვნელობების ურთიერთ შედარება: მრუდი 1 – LPE ელემენტი, დამზადებული იოფეს ინსტიტუტში, ფრონტალური კონტაქტით პირაპირ p-GaAs ემიტერზე; მრუდი 2 - MOCVD ელემენტი ზემოდან დაფარული p- GaAs საკონტაქტო ფენით; მრუდი 3 – LPE ელემენტი p- GaAs ემიტერზე საკონტაქტო თითებით და შინით, რომლებიც განლაგებული არიან SiO₂-ის საიზოლაციო ფენაზე; მრუდი 4 - თეორიული ზღვარი.

შეგვიძლია დავინახოთ (ნახ.46, მრუდი 4), რომ V_{oc} შეიძლება გავზარდოთ 1,23 ვ-მდე 2000 sun-ის და AM1.5D-ს შემთხვევაში. ფოტოდენის შესაძლო ზრდასთან ერთად 27მა/სმ²-მდე (1sun, AM1.5D), ოპტიკური დანაკარგების შემცირების ხარჯზე, შესაძლებელია პრიზმული ხუფით აღჭურვილ ელემენტებში მივიღოთ 27,5% ეფექტურობა 1000-2000sun კონცენტრირების დროს [54].



ნახ.46. გახსნილი წრედის ძაბვის შედარება, როგორც კონცენტრირების ფუნქცია სხვადასხვა მზის ელემენტებისათვის: მრუდი 1 - ცხრილ 5-ში წარმოდგენილ პარამეტრების მქონე LPE მზის ელემენტი; მრუდი 2 - MOCVD ელემენტი ზემოდან დაფარული p- GaAs საკონტაქტო ფენით; მრუდი 3 – LPE ელემენტი p- GaAs ემიტერზე საკონტაქტო თითებით და შინით, რომლებიც განლაგებულია SiO₂-ის საიზოლაციო ფენაზე; მრუდი 4 - თეორიული ზღვარი.

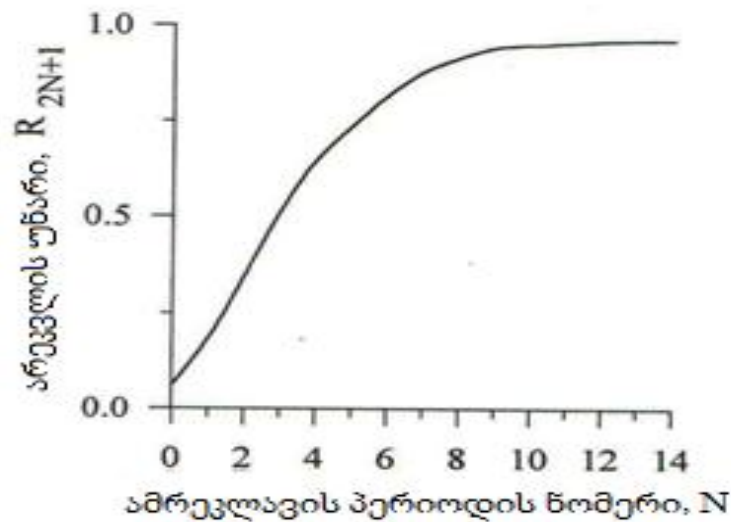
2.2.1. სტრუქტურაში ჩაშენებული ბრეგის ამრეკლავიანი მზის ელემენტების კონსტრუქცია, დამუშავება და დამზადება

სამუშაოს ამ ნაწილში წარმოდგენილია კვლევის შედეგები, რომელიც დაკავშირებულია ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე დამზადებული მზის ელემენტების ეფექტურობის, მუშაობის საიმედოობის და რადიაციული მდგრადობის გაზრდის გადაწყვეტის გზებთან. ჰეტეროსტრუქტურაში გამოყენებულია კვაზი-დიელექტრიკული რეფლექტორი (ბრეგის ამრეკლავი) ჩაშენებული სელექციური სარკის სახით. ის ასრულებს შთანთქმული სინათლის არეკვლის და უკუ ზედაპირის პოტენციალური ბარიერის ფუნქციას იმისათვის, რომ ბაზის არეში განხორციელდეს მუხტის გადამტანების დაგროვება.

ბრეგის ამრეკლავი ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის ოპტო- და მიკროელექტრონულ მოწყობილობებსა და ხელსაწყოებში. მრავალფენიანი დიელექტრიკული ამრეკლავის მუშაობის პრინციპი საკმაოდ კარგადაა ცნობილი. 100%-თან ახლოს მყოფი არეკვლა, რომელიც მიიღწევა განსხვავებული არეკვლის კოეფიციენტების მასალათა შუალედური ფენების გამოყენებით, შეზღუდულია ტალღის სიგრძეთა გარკვეულ ინტერვალში. ამ ფენებიდან თითოეულის სისქე შესაბამისად ირჩევა ასარეკლი ტალღის სიგრძის მეოთხედის მიხედვით $h_1 = \lambda_0 / 4n_1$, $h_2 = \lambda_0 / 4n_2$ (1): სადაც, h არის დიელექტრიკული ფენის სისქე, n -მისი გარდატეხის მაჩვენებელი, რომელიც უნდა შეესაბამებოდეს გარკვეულ ტალღის სიგრძეს. არეკვლის პერიოდი არის h_1 და h_2 -ის ჯამი.

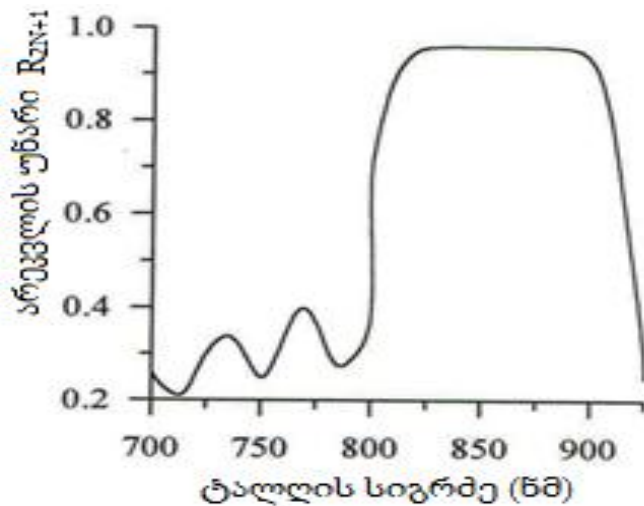
სამუშაოში გამოყენებულია ეპიტაქსიური მეთოდით მიღებული ბრეგის ამრეკლავი, სადაც გამოყენებულია ნახევარგამტარული GaAs-ის და AlAs-ის ფენების წყვილი. ბრეგის ამრეკლავის არეკვლის მაჩვენებელი R_{2N+1} მონოტონურად იზრდება წყვილთა N რაოდენობის ზრდის შედეგად და ასიმპტოტურად მიისწრაფვის 1-საკენ და აღწევს 96%-ს, როცა წყვილთა რაოდენობა $N=12$ (ნახ.47). ეს რაოდენობა შერჩეულია იმ თვალსაზრისით, რომ წყვილთა რაოდენობის ზრდის შემთხვევაში ფენების მიერ

შთანთქმის პროცესი. ამ შემთხვევაში ბრეგის ამრეკლავის პარამეტრები გათვლილი იყო, როცა ტალღის სიგრძე $\lambda_0=860$ ნმ. ამ შემთხვევაში შთანთქმის გარეშე დარჩენილი ფოტონების არეკვლა მაქსიმალურია, როცა მზის ელემენტის ბაზურ არეში $\Delta\lambda$ არის 825-900 ნმ ტალღის დიაპაზონში.



ნახ.47. ბრეგის ამრეკლავის პერიოდზე დამოკიდებული არეკვლის უნარიანობის პიკი

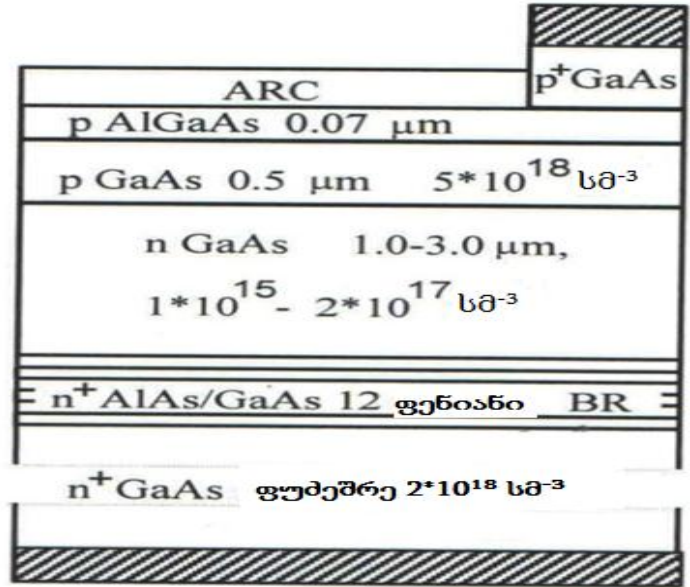
$\Delta\lambda=860$ ნმ-თვის ფენების ასაგებ მასალად არჩეულ იქნა AlAs, რომლის გარდატეხის მაჩვენებელი $n_1=3,0$ და GaAs-ის $n_2=3,64$. განსხვავება n_1 -სა და n_2 -ს შორის განსაზღვრავს არეკვლის მაქსიმალურ მნიშვნელობას და არეკვლილი ტალღის სიგრძის შედარებით ფართო დიაპაზონს. (1) განტოლების ამოხსნა იძლევა შემდეგ სისქისათვის მნიშვნელობებს: h_1 (AlAs ფენისათვის) $=0,072$ მკმ და (GaAs ფენისათვის) $h_2=0,059$ მკმ. ნახ.48-ზე წარმოდგენლია 12-პერიოდიანი ბრეგის ამრეკლავის არეკვლის უნარიანობა [74].



ნახ.48. ბრეგის 12-პერიოდიაანი ამრეკლავის ექსპერიმენტულად გაზომილი არეკვლის უნარიანობა.

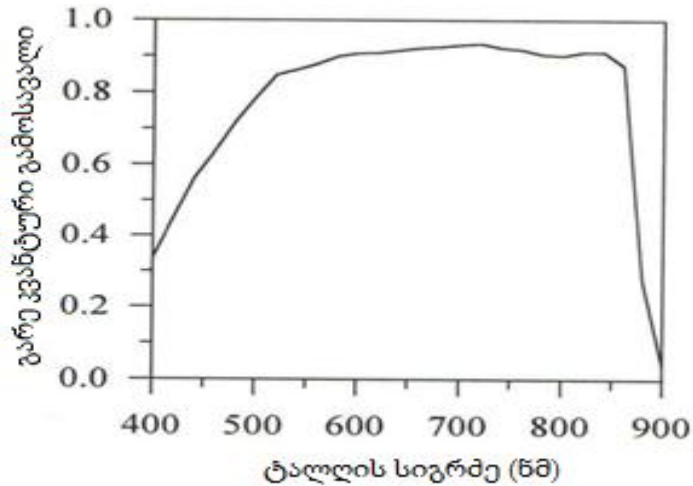
2.2.2. მზის ელემენტის სტრუქტურა და მისი დამზადება

მოცემულ სამუშაოში გამოყენებული მზის ელემენტის ტიპიური სტრუქტურა წარმოდგენილია ნახ.49-ზე. ჰეტეროსტრუქტურა შეიცავს: 0,3 მკმ სისქის ზედა p ტიპის GaAs-ის საკონტაქტო ფენას; 0,07მკმ სისქის პასივიზაციის და ფანჯრის ფუნქციის შემსრულებელ p-Al_{0.85}Ga_{0.15}As-ის ფენას; 0,5მკმ სისქის p ტიპის GaAs-ის ფოტოაქტიურ ფრონტალურ რეგიონს; 1,0-3,0მკმ სისქის n-GaAs-ის ბაზურ ფენას; ბრეგის ამრეკლავს, გაზრდილს n ტიპის GaAs-ის (100) ორიენტაციის ფუძეშრეზე. ბრეგის ამრეკლავი შედგება 12 წყვილი AlAs/GaAs ფენებისაგან. ამრეკლავის ჯამურ სისქეში არის AlAs 0,072 მკმ-ის საერთო სისქის და 0,059 მკმ საერთო სისქის GaAs ფენები. ზოგიერთი მზის ელემენტისთვის, სტრუქტურაში ბრეგის ამრეკლავის მაგივრად, გაზრდილი იყო (SLS) სტრუქტურა იმავე MOCVD მეთოდით. ამ შემთხვევაში n ტიპის GaAs-ის ბაზური ფენის სისქე იყო 3,5-4,0 მკმ [70; 75].

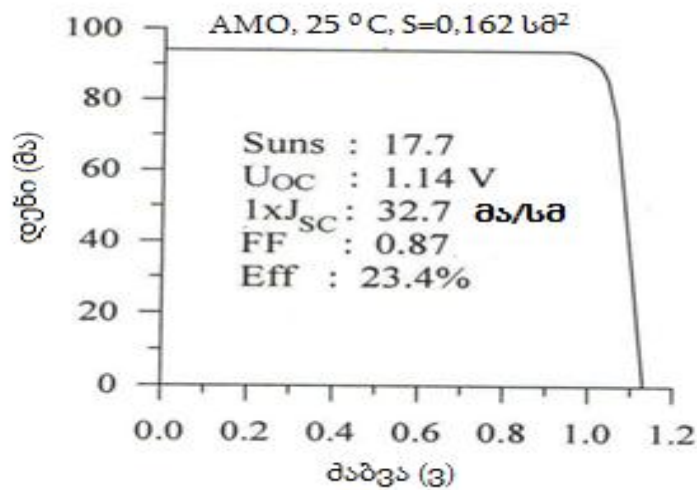


ნახ. 49. მზის ელემენტის სტრუქტურა ჩამოთვლილი ბრევის ამრეკლავით

მზის ელემენტების დამზადება ხორციელდება შემდეგნაირად: მესერის კონფიგურაციის გადატანა სტრუქტურის ზედაპირზე ხორციელდება ფოტოლითოგრაფიული მეთოდით; შემდგომ თერმული გაფრქვევით შემონაფენებზე ეფინება საკონტაქტო ფენები Au:Ge/Ni უკანა ზედაპირიდან და Ag:Mn-წინა სამუშაო ზედაპირზე; წინა სამუშაო კონტაქტის გაძლიერება ხდება ელექტროქიმიური მეთოდით დაფენილი Ni და Au-ის ფენებით. ამის შემდგომ ელემენტის გარშემო ფოტოლითოგრაფიით ხდება მეზასტრუქტურის ფორმირება. მეზასტრუქტურის პერიმეტრის გასწვრივ რეკომბინაციული დანაკარგების თავიდან აცილების მიზნით ზედაპირზე ხორციელდება ჟანგის თხელი ფირის ფორმირება ანოდური დაჟანგვის მეთოდით. დამზადებული იქნა 4,5x4,5 მმ² ზომის კრისტალები მზის ელემენტებისათვის, რომელთა ზედაპირზე საკონტაქტო ბადის მეტალური ზოლის სიგანე იყო 185 მკმ. კრისტალში ელემენტის განათებული არისათვის განსაზღვრულია 0,167 სმ² ფართობი. კრისტალის სამუშაო ზედაპირზე ეფინება ZnS-ის ანტიამრეკლავი ფენა. ნახ.50-ზე წარმოდგენილია ბრევის ამრეკლავიანი მზის ელემენტის გარე კვანტური



ნახ.50. ჩაშენებულ ბრეგის ამრეკლავიანი სტრუქტურის გარე კვანტური გამოსავალიაღწევს 32,7 მა/სმ². ნახ.2.5-ზე



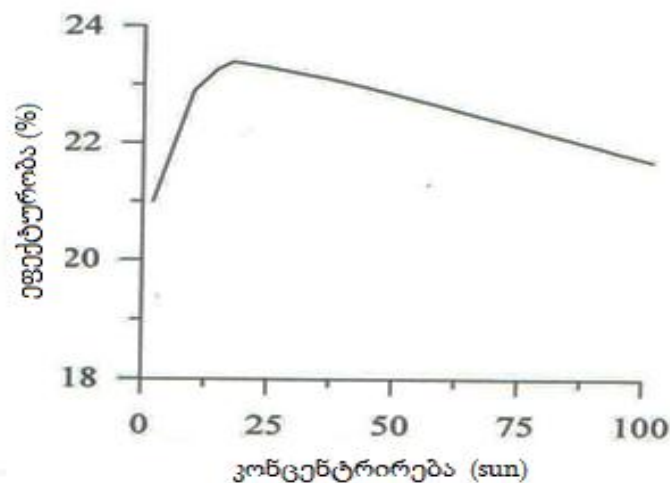
ნახ. 51. ბრეგის ამრეკლავიანი 23,4 %-იანი ეფექტურობის მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები

გამოსავალის გრაფიკული დამოკიდებულების მრუდი. მრუდზე არსებული დამატებითი აღმასვლა შეესაბამება და გვიჩვენებს გრძელტალღოვან ზონაში კვანტურ ეფექტურობაში ბრეგის ამრეკლავის მიერ შეტანილ წვლილს. ელემენტში ფოტოდენის სიმკვრივე (AM0) დროს. წარმოდგენილია პრიზმული ხუფით აღჭურვილ ელემენტზე გაზომილი ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი 17,7 sun-ისათვის. ეს გრაფიკი მიღებულია

იმპულსური ქსენონის ნათურის მიერ გამოსხივებული განათებით და შეესა-
ამება 23,4%-იან (AM0, 25° C-ის დროს) ეფექტურობას. 22,5% (AM0) ეფექტუ-
რობაზე მეტი მიიღწევა 15-17 sun განათებისას (ნახ.51 და ნახ.52) [72; 76].

დამუშავებული მზის ელემენტებისათვის ასევე ჩატარდა პარამეტრე-
ბის გაზომვები გარე (საველე) პირობებშიც. პირდაპირი მზის სინათლით
893 ვტ/მ² განათების შემთხვევაში მიიღება 24,8მა/სმ² დენის სიმკვრივის
მნიშვნელობა.

ეს ექსპერიმენტი ჩატარდა სპეციალური კოლიმატორული მილის
გამოყენებით. კოლიმატორული მილი მზის დისკოდან და ცის განათებული
რაიონიდან გამოყოფს კუთხის 5°-იან უბანში მოქცეული სინათლის ნაკადის
ენერგიას. მზის პირდაპირი გამოსხივების გაზომვა ხორციელდება ეტა-
ლონური ელემენტის საშუალებით, რომელიც წინასწარაა დაკალიბრებული
AM1,5D-ზე.



*ნახ. 52. მზის ელემენტების ტესტირების შედეგად მიღებული
მახასიათებლები AM0 და AM1,5 პირობებში განათებისათვის (ფრაიბურგში,
მზის ენერგეტიკის ფრანკოფერის სახელობის ინსტიტუტში).*

როდესაც განათებისათვის გამოყენებული იყო ქსენონის იმპულსური
ნათურა, 23,4% sun-ის პირობებში ეფექტურობა გაიზარდა 27,2%-მდე.
ცხრილი 6-ში წარმოდგენილია საუკეთესო მზის ელემენტებზე მიღებული
შედეგები AM0 და AM1,5 განათებულობისას [77].

ცხრილი 6. საუკეთესო მზის ელემენტების ტესტირების შედეგად მიღებული მახასიათებლები AM0 და AM1,5-სათვის.

გამოსხივება	ფოტოდენის სიმკვრივე, J, მა/სმ ²	კონცენტრირების ჯერადობა, Suns	მზის ელემენტის დენი, I _{sc} , მა	მზის ელემენტის ძაბვა, V _{sc} , ვ	შევსების ფაქტორი, FF	ეფექტურობა μ , %
AM0	32.7	17.7	94	1.14	0.87	23.4
AM 1.5	24.8	23.4	94	1.14	0.87	27.2

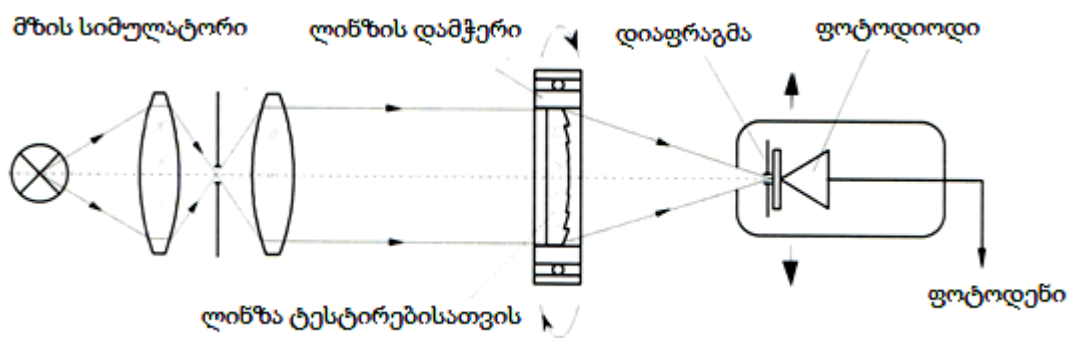
2.3. შიდა და გარე ტესტირების ტექნოლოგიის დამუშავება

დამუშავებულია ტესტირების მეთოდი, რომელიც გამოიყენება მოდულისათვის ელემენტების დამზადების ყველა ეტაპზე. მეთოდი მხედველობაში ღებულობს შემდეგ ძირითად ფაქტორებს: ლინზათა ფოკალურ სიბრტყეში სინათლის ინტენსიობის ჰაუსის განაწილებას; ცალკეული ლინზების ღერძთა არაპარალელობას; ერთ საერთო საფუძველზე მდებარე წრედში გაერთიანებულ ელემენტებს შორის ურთიერთქმედებას; საერთო კარკასზე ელემენტების ელექტრულად და ოპტიკურად განლაგების უზუსტობას; სიმძლავრის დანაკარგებს და მთლიანობაში მოდულის სივრცეში ორიენტაციის დარღვევის შესაძლებლობას.

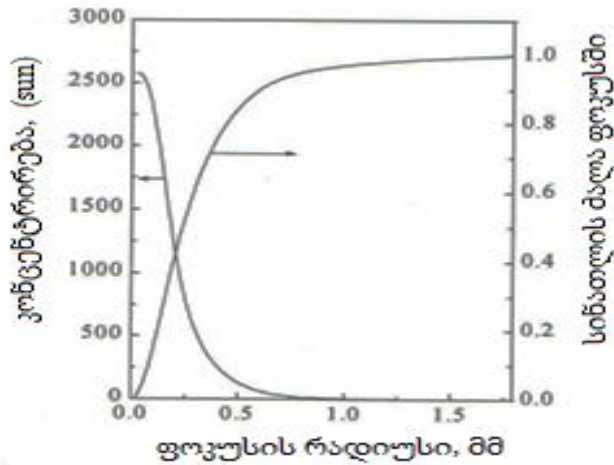
2.3.1. ოპტიკური ელემენტების ლაბორატორიულ პირობებში ტესტირება

ლინზების ტესტირება. ტესტირება გავლილ ლინზებს გააჩნიათ გაზომვებით დადასტურებული შემდეგი პარამეტრები: ფოკუსური მანძილი 32 მმ; ლინზის გეომეტრიული ზომები 25x25 მმ²; ფრენელის ლინზის კბილებს შორის ბიჯი - 0,4 მმ და ლინზის ფოკალურ სიბრტყეში ოპტიკური სინათლის ინტენსიობის განაწილება ჰაუსის პრინციპით. ნახ. 53 გვიჩვენებს

ოპტიკური ექსპერიმენტის სქემას. ტესტირება გასავლელი ლინზები მაგრდება სპეციალურ დამჭერზე და შეუძლია ოპტიკური ღერძის გარშემო შემობრუნება. ფოტოდiodი, რომელსაც წინ დამაგრებული აქვს 0,15მმ დიამეტრის დიაფრაგმა, გადაადგილდება ფოკუსურ სიბრტყეში სინათლის ფოკუსირებული ლაქის დიამეტრის გასწვრივ. გაზომვის ეს პროცედურა ტარდება სინათლის წყაროს გამოყენებით, რომელიც იძლევა მზის სხივების განშლადობის იმიტაციას. ფოტოდენის მიღებული მნიშვნელობის შედარება ხდება, 1-sun კონცენტრირებული სინათლით მიღებული ფოტოდენის მნიშვნელობასთან, რაც იძლევა შესასწავლი ლინზის კონცენტრირების ლოკალურ შეფარდებას ფოკუსური ლაქის წერტილში. ნახ. 54-ზე ნაჩვენებია ფრენელის ლინზის ოპტიკური კონცენტრატორის ფოკალურ სიბრტყეში ფოტონების ნაკადის გაზომილი პროფილი და სინათლის ძალა. როგორც ჩანს სინათლის ძალის 90 %-ზე მეტი კონცენტრირდება 1-2 მმ, ხოლო 98%-ზე მეტი კი 2-4 მმ დიამეტრის სინათლის ლაქის არეში. ე.ი. მეტნაკლებად მუდმივი გამოსავალი სიმძლავრის უზრუნველყოფა ხდება 3 მმ დიამეტრის განათებული არის მქონე მზის ელემენტის საშუალებით, რომელიც თავისი



ნახ. 53. ფრენელის ლინზის ტესტირების ოპტიკური სქემა

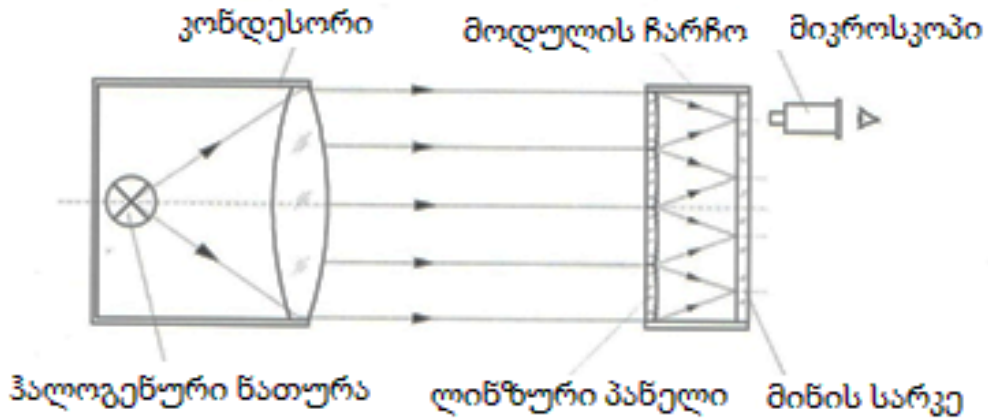


ნახ. 54. ფრენელის ლინზის ოპტიკური კონცენტრატორის ფოკალურ სიბრტყეში ფოტონების ნაკადის და სინათლის ძალის გაზომილი პროფილი

სიბრტყით მზისკენაა მიმართული $\pm 1^\circ$ სიზუსტით. ამ ელემენტებისათვის საშუალო გამოსხივება შეადგენს დაახლოებით 90 მზეს და ფოკალური სიბრტყის ცენტრში ლოკალურად 2500 sun-ზე მეტს (ნახ 54).

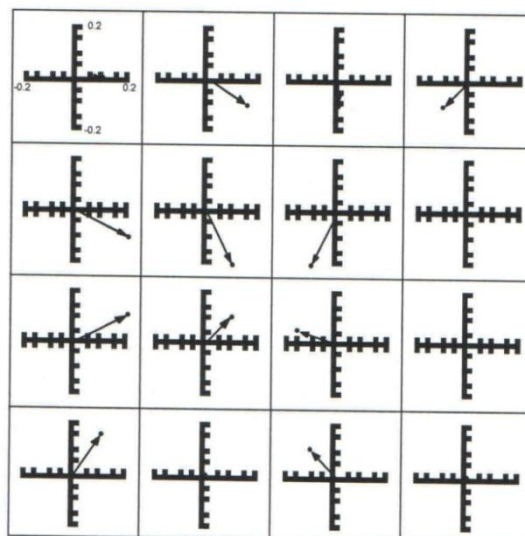
ლინზის პანელების ტესტირება. ლინზების 4x4 მონობლოკი დამზადებული იყო ცხელი დაწნეხვის მეთოდით. ლინზების ოპტიკურ ღერძებს შორის პარალელურობის დარღვევა წარმოიშვება ცალკეული დაწნეხილი ლინზების შტამპების წრფივი ან კუთხური შეუსაბამობის შედეგად, რაც შესაძლებელია გამოსწორდეს მექანიკური კორექტირებით, 4x4 მონობლოკის ერთი მთლიანი შტამპის ფორმირებით. ამ წესით შტამპის დამზადების შემდგომ დამატებით ხდება მოდულის ელემენტების ოპტიკური და ელექტრული შეუსაბამობების კორექტირება. ნახ. 55-ზე წარმოდგენილია ლინზური მონობლოკის კონტროლის ხელსაწყო ოპტიკური სქემა. ზუსტი გაზომვების განსახორციელებლად გამოიყენება პარალელურ სხივთა კონა. ამ შემთხვევაში ფოკალური ლაქა, რომელიც სპეციალური მინით მიიღება ეკრანზე ნაკლებია, ვიდრე მზის სხივებით მიღებული ლაქის ზომები. ტესტირება ჩასატარებელი ლინზების პანელი და ეკრანი, რომელზეც დატანილია 0,05 მმ საკორდინტო ბადე, მაგრდებიან მოდულის კარკასის

ერთმანეთის მოპირდაპირე მხარეებზე. ფოკუსის მდებარეობის რეგისტრირება (დაფიქსირება) ხდება ვიზუალურად მიკროსკოპის საშუალებით. როგორც ნახ.56-დან ჩანს ფოკალური ლაქის მაქსიმალური გადახრა ლინზის ოპტიკური ცენტრის კოაქსიალური განლაგებიდან არის 0,2 მმ.



ნახ.55. ლინზური მონობლოკის კონტროლის ხელსაწყოს ოპტიკური სქემა

ფოკალური ლაქის ამ სტატიკურმა გადახრებმა შეიძლება გამოიწვიოს PV მოდულის მახასიათებელთა ორიენტაციის ცვლილება და არასიმეტრიული გადახრა.



ნახ. 56. კვრანზე ფოკალური ლაქის განლაგების მაგალითი

2.3.2. შენობის შიგნით მზის ელემენტის ჩვეულებრივი ტესტირება

საკონტროლო ტესტირება თავის თავში მოიცავს შემდეგ სტადიებს: ა) მზის ელემენტის აბსოლუტური ფოტოდენის გაზომვა; ბ) სიბნელეში მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის შემოწმება.

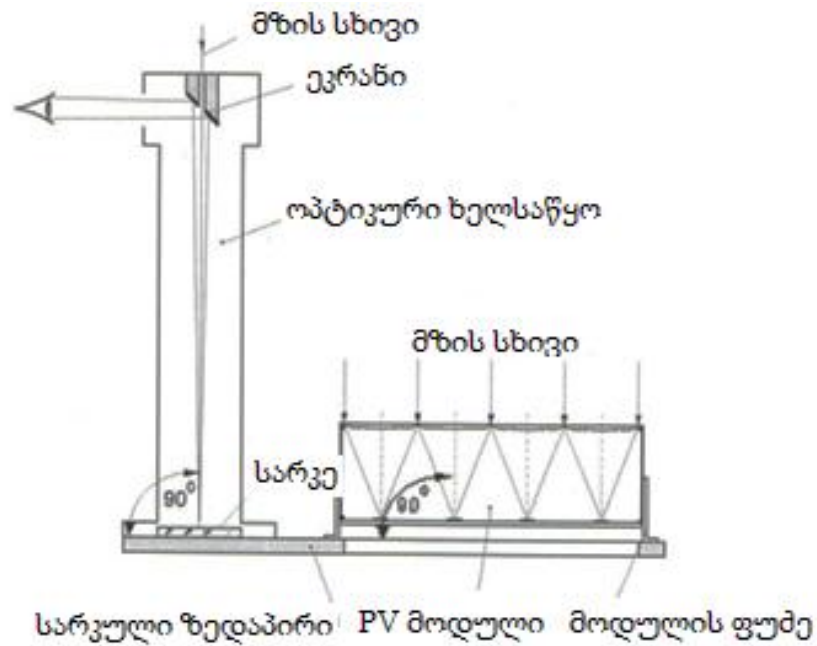
გაზომვის პირველი სტადია ტარდება 1 sun სინათლის იმიტატორის გამოყენების პირობებში. ტესტირება ჩასატარებელი მზის ელემენტის ფოტოდენის აბსოლუტური მნიშვნელობის შედარება ხდება ეტალონურ GaAs-ის მზის ელემენტთან. ეტალონურ ელემენტს აქვს იგივე სტრუქტურა, რაც ტესტირება ჩასატარებელს.

ტესტირების მეორე სტადია საშუალებას იძლევა შერჩეულ იქნას მზის ელემენტები ექვივალენტურნი ფოტოდენის აბსოლუტური მგრძობიარობის და ერთნაირი სპექტრული გამოძახილის მახასიათებლებით. ეს მზის ელემენტები იძლევა საშუალებას შემცირდეს წრედში დენის დანაკარგები ერთმანეთთან მათი პარალელური და მიმდევრობითი შეერთების დროს.

2.3.3. გარე (საველე პირობებში) ტესტირება

მზის მოდულის საველე პირობებში ტესტირება ტარდება მისი ფოტოელექტრული მახასიათებლების შესამოწმებლად, როცა ელემენტები უკვე ჩამონტაჟებულია კარკასში. ამ შემთხვევაში გამოიყენება მზეზე დამიზნების (მზის მიმართ ორიენტირების) მოწყობილობა. ტესტირება ჩასატარებელი PV მოდული მაგრდება ბრტყელ გაპრიალებულ ზედაპირზე, რომელიც ოპტიკური ხელსაწყო გამოყენებით, პერპენდიკულარულადაა ორიენტირებული მზის სინათლის დაცემული სხივების მიმართ. ოპტიკური ხელსაწყო სიზუსტეა $\pm 0,15^\circ$. ნახ.57-ზე წარმოდგენილია ოპტიკური სისტემა „ოპტიკური ხელსაწყო-პოლირებული ზედაპირი-PV მოდული“. ეტალონური ელემენტი კოლიმატორული მილით, თერმოელექტრული ანტისიმეტრონი და თერმოელექტრული პირომეტრი მაგრდება მოძრავ პლატფორმაზე, რომელსაც შეუძლია ღერძის გარშემო შემობრუნება.

სინათლის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები გვიჩვენებს განსხვავებას ელემენტების მახასიათებლებსა და ლინზის ოპტიკურ მახასიათებლებს შორის, რომლებიც ერთიანად მოქმედებენ მოდულის სიმძლავრის მახასიათებლებზე. სავსე ტესტირება დემონსტრაციას უწევს სიმძლავრის დამატებით დანაკარგებს, რომელიც გამოწვეულია ცალკეული ელემენტების ფოტომგრძობიარობების და ლინზების ეფექტურობების არსებული განსხვავებით. ეს გარემოებები შეუძლებელია აღმოჩენილ იქნას შენობის შიგნით ტესტირების დროს, ვინაიდან წინასწარ შეუძლებელია ყველა შესაძლო ვარიანტის გათვალისწინება, რასაც შეიძლება ადგილი ჰქონდეს რეალურ სიტუაციაში სავსე პირობებში ტესტირების დროს.

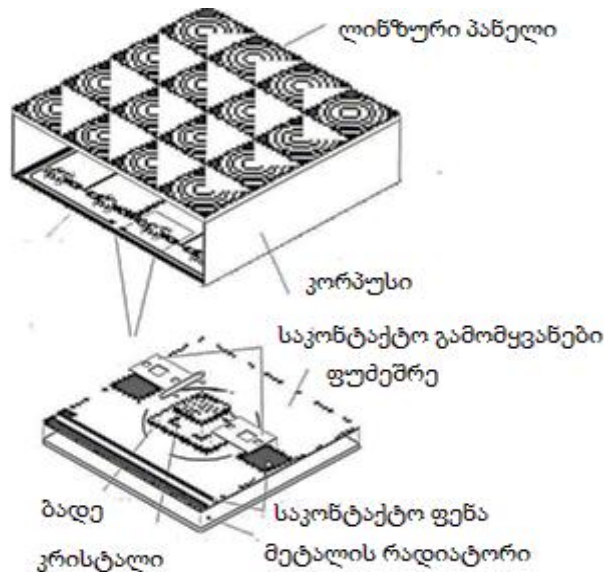


ნახ.57. ოპტიკური სისტემა „ოპტიკური ხელსაწყო-პოლირებული ზედაპირი-PV მოდული“

გარე და შიდა ტესტირების დამუშავებული ტექნოლოგია საშუალებას იძლევა ოპტიკურ და ელექტროგენერირების ელემენტებს კონტროლი ჩატარდეს მათი დამზადების ყველა ეტაპზე [71; 72].

2. კონცენტრატორიანი ფოტოელექტრული მოდულის კონსტრუქცია

დამუშავებული მოდულის კონსტრუქცია, რომელიც ეფუძნება ფრენელის წერტილოვან ფოკუსიანი ლინზების პანელის გამოყენებას, წარმოდგენილია ნახ.58. ბეჭდური პლატის (წრედების განაწილება) 4x4 ელემენ-



ნახ. 58. კონცენტრატორიანი ფოტოელექტრული მოდულის კონსტრუქცია

ტით. დამონტაჟება ხდება უშუალოდ ფიჭური პანელის უკანა ზედაპირზე, ხოლო ლინზების პანელი კი მაგრდება მოდულის წინა ზედაპირზე. მინი ლინზებს აქვთ 32მმ-ის ტოლი ფოკუსური მანძილი და აპერტურის კვადრატი $2,5 \times 2,5 \text{ მ}^2$ ($6,25 \text{ მ}^2$ ფართობი). მინი ლინზები ისეა კონსტრუირებული, რომ ფოკუსურ სიბრტყეზე იძლევიან 1,5მმ დიამეტრის განათებულ ლაქას. მზის ელემენტის აქტიური უბნის დიამეტრი არის 3,0მმ, ეს კი იძლევა საშუალებას ვაკონტროლოთ კუთხის გადახრა $\pm 2^\circ$ სიზუსტით, ელემენტის საშუალო გამოსხივება შეადგენს დაახლოებით 90 sun (გეომეტრიულად) და საშუალოდ 1500 sun ფოკალური ლაქის ცენტრში. ლინზების ოპტიკური ეფექტურობა შეადგენს 80-85%-ს. მისი გაზრდა შეიძლება, თუ

გამოყენებული იქნება მის ზედაპირზე დაფენილი ანტიამრეკლავი დანაფენი.

ფრენელის ლინზების პანელის დასამზადებლად შერჩეულია სილიკონის ორგანული ფოტოპოლიმერული მასალა, რომელიც უზრუნველყოფს მაღალ ოპტიკურ ეფექტურობას და დედამიწის პირობებში ნორმალურად მუშაობის უნარს. ამობურცული ლინზების გამოყენება იძლევა საშუალებას ნაკლები მოთხოვნები წაუყენოთ გამოდევნების მექანიზმის სიზუსტეს. საწყისი ექსპერიმენტების და ოპტიკური გაზომვების ჩასატარებლად ვიყენებდით აკრილატისგან დამზადებული ლინზების პანელების კოპიოებს. დამატებითი ამობურცული ოპტიკური ლინზები იძლევიან მზის ელემენტების დაცვის საშუალებას და ამცირებენ მოთხოვნას დამიზნების სიზუსტის მიმართ. დამატებითი ლინზები, რათა მათ სტაბილურად იმუშაონ, შეიძლება დამზადდეს კვარცისაგან. დამატებითი ლინზების ფიქსაციისთვის ვიყენებდით სილიკონის წებოს. სხვა ტიპის ფოტომიმლემენტებისათვის, რომლებისთვისაც არ გამოიყენებოდა ამობურცული ლინზები, დამატებით ვიყენებდით სილიკონის პრიზმულ ხუფებს.

ფოტომიმლემენტების დამაგრებისათვის საფუძვლად გამოიყენება 0,3 მმ სისქის ალუმინის ფირფიტა. ფოტომიმლემენტების დამაგრება ხორციელდება, ჯერ ელექტრულ გამოყვანებ დატანილ ბადეზე, შემდეგ კი სპილენძისაგან დამზადებულ თერმოგამტარ რადიატორზე. ელემენტი და თერმოგამტარი რადიატორი ერთმანეთისგან იზოლირებულია სილიციუმის საფენებით. ამ უბანს n-p-n სტრუქტურასთან ერთად აქვთ ძალიან კარგი თერმოწინააღმდეგობა, რაც აუმჯობესებს და ამარტივებს მონტაჟის პროცესს, როცა ალუმინის ფუძეზე ხდება დიდი რაოდენობის ჩიპების დამონტაჟება.

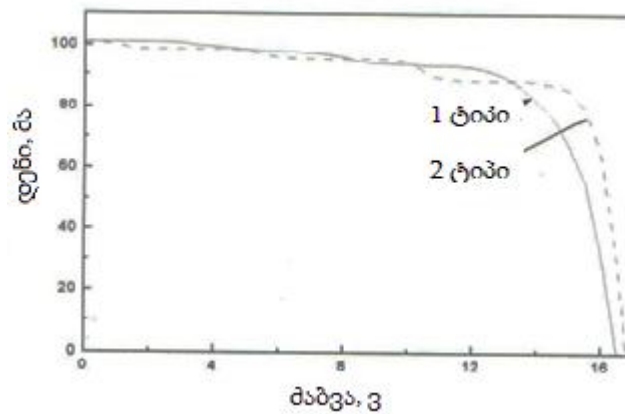
ფოტომიმლემენტები ელემენტების მირჩილევად პირველად ხდება Si-ის n-p-n შემონაფენთან, რომელიც ელემენტებთან ამცირებს მექანიკურ წინააღმდეგობას თერმო პროცესების დროს. მეორე ეტაპზე ელემენტები, რომლებსაც აქვთ მირჩილვისათვის მეტალური კონტაქტები, პანელზე მაგრდებიან პერფორირებული ფირის საშუალებით, რომელსაც გააჩნიათ

მეტალის გამტარი არხები. ბოლო სტადიაზე კი მექანიკური განლაგება და ელემენტების ელექტრული შეერთება ალუმინის ბაზასთან ხდება დენგამტარი წებოს საშუალებით.

ლინზების და ალუმინის კონსტრუქციული ფუძის მყარად დაფიქსირება და პოზიციის შენარჩუნება ხდება ალუმინის ფიჭური სტრუქტურის საშუალებით. ლინზები მაგრდება ფიჭური სტრუქტურის ერთ მხარეს, ხოლო ალუმინის ფუძე კი მეორე მხარეს. ასეთი კონცენტრატორული მოდულის საერთო სისქე არის 3,2სმ, სისქეს განსაზღვრავს ლინზის ფოკალური მანძილი. მოდულის ტესტირება ხორციელდება ლაბორატორიაში იმპულსური განათების სისტემის საშუალებით სავსე კი ბუნებრივ პირობებში. ხორციელდება ტესტირების ელექტროლუმინესცენციური პროცესის ჩატარება და ლუმინესცენციური სურათის რეგისტრირება, როგორც რეზულტატი ელემენტების ელექტროლუმინესცენციური გამოსხივებისა, რომელიც გაივლის კონცენტრატორის ლინზას. სარეგისტრაციო სისტემა შედგება ტელესკოპური ლინზისა და ინფრაწითელი კამერისაგან. მანძილი, რომელზეც ხდება ლუმინესცენციის სურათზე დაკვირვება, უნდა იყოს საკმარისად დიდი იმისათვის, რომ მოცულობაში თითოეული კონცენტრატორისათვის კუთხური ზომა იყოს ნაკლები მზის კუთხურ ზომასთან შედარებით. მარეგისტრირებელი სისტემის ცენტრალურ ნაწილში, ელემენტში გამავალი დენის ძალის ვარიაციის შედეგად, შესაძლებელია იდენტიფიცირება გაუწიოთ მზის ელემენტებს მათი p-n გადასვლების გათვალისწინებით (მომატებული კოლექტორული წინაღობის ან გარღვეული წრედის მიხედვით). ტესტირება ჩასატარებელი კონცენტრატორების ლუმინესცენციის ლაქის კუთხური ზომა იძლევა ინფორმაციას იმ კუთხის ზომის შესახებ, რომლის ფარგლებში ელემენტს შეუძლია მიიღოს მზის გამოსხივება. ტესტირების სისტემის წინ მოდულის ბრუნვით, შეგვიძლია აღმოვაჩინოთ ის ელემენტები, რომელთა ოპტიკური ღერძი არ არის სხივების პარალელური. ეს მეთოდი ასევე გამოიყენება ექსპერიმენტში მაღალკონცენტრირებული AlGaAs/GaAs მზის ელემენტების პარამეტრების

და კონცენტრატორული ლინზების პანელების შეფასებისათვის. ასეთივე წარმატებით ტესტირების ეს მეთოდი შეიძლება გამოყენებულ იქნას სხვა ტიპის მოდულების გამოკვლევისათვისაც.

მოდულის საერთო სიმაღლე შეიძლება იცვლებოდეს 32 მმ-დან (SC ფოკალურ სიბრტყეში. I ტიპის), 30 მმ-მდე (SC ფოკალური სიბრტყის გარეთ, სინათლის უფრო თანაბარი გადანაწილებით. ტიპი II). II-ტიპის მოდული დემონსტრირებას უკეთებს შევსების ფაქტორის და გარდაქმნის ეფექტურობის დემონსტრირებას უკეთებს შევსების ფაქტორის და გარდაქმნის ეფექტურობის ზრდას I-ტიპის მოდულებთან შედარებით.



ნახ. 59. I და II ტიპის მოდულების ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები

ნახ. 59-ზე ნაჩვენებია I და II ტიპის მოდულების ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები იმ ბლოკისთვის, სადაც მზის ელემენტები შეერთებულია ერთმანეთთან მიმდევრობით. სავსე პირობებში ტესტირება დემონსტრირებას უკეთებს სიმძლავრის დამატებით დანაკარგებს, რომელიც გამოწვეულია ცალკეული ელემენტების ფოტომგრძობიარობის მნიშვნელობების და ლინზების პარამეტრების ერთმანეთისგან განსხვავებით. მოდულის I-ტიპიდან II-ტიპზე გადასვლა ამცირებს ელემენტების მიმდევრობით წინაღობას წრედში, ზრდის შევსების ფაქტორს და ენერჯის გარდაქმნის ეფექტურობას. I-ტიპის მოდულისათვის აუცილებელია შედარებით უფრო ზუსტი მზის დამიზნების სისტემის ($\pm 1,0$) გამოყენება [72; 78].

2.4. მზის ფოტოელექტრული სისტემის გამოცდა საველე პირობებში

მზის ფოტოელექტრული სისტემების საველე პირობებში გამოცდა გულისხმობს სისტემის ექსპლუატაციის მაქსიმალურად მიახლოებულ პირობებში ყველა იმ აუცილებელი პარამეტრის გაზომვას და დაზუსტებას: რომელიც საჭიროა ტესტირებისა და ექსპლუატაციისთვის; პროექტირების პროცესის განხორციელებისთვის; საინტერესოა მომხმარებლისთვის. მზის ფოტოელექტრული სისტემის გამოცდის პირობები გამორიცხავს სრულ-მასშტაბიანი კომპლექსური კვლევის ჩატარების შესაძლებლობას. ამიტომ ამ პირობებში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება, რომ დადგენილი იქნას მისი ძირითადი პარამეტრები, რომელთა გაზომვაც არის აუცილებელი. მიღებული ინფორმაციის მინიმალური სიმკვრივე უნდა იყოს იმდენად საკმარისი, რომ ჩატარდეს: ანალიზი და კონსტრუქციულ-ტექნოლოგიურ გადაწყვეტილებათა კორექტირება, დამატებითი კვლევები თუ ამას მოითხოვს აუცილებლობა.

ნაშრომში წარმოდგენილია კვლევის შედეგები, რომელიც ჩატარდა 100 SUN მზის კონცენტრირების პირობებში, ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე შექმნილ კონცენტრატორიან ფოტოელექტრულ გარდამქმნელ ელემენტებზე. ერთი p-n გადასვლიანი ჰეტეროსტრუქტურები დამზადებული იქნა დაბალტემპერატურული (500-600°C) თხევადფაზური ეპიტაქსიური (LT LPE) მეთოდით. მასალების მაღალი ხარისხი, ოპტიმალური კონსტრუქციის ელემენტები ჰეტეროსტრუქტურებზე და მაღალი ოპტიკური პარამეტრების მქონე კონცენტრატორები საშუალებას იძლევა მიღებული იქნას მაღალ ეფექტური ამ ტიპის კონცენტრატორიანი სისტემები.

2.5. მზის ფოტოელექტრული სისტემის საველე პირობებში გამოცდის სპეციფიკა და აუცილებელი პირობები

საველე გამოცდების ჩატარების სპეციფიკა გულისხმობს თავისებური ლაბორატორიის შექმნას. ასეთი ლაბორატორიისათვის გამზომი აპარატურის შერჩევასა და უნდა მოხდეს რიგი მნიშვნელოვანი მომენტების გათვალისწინება:

- ზღვის დონიდან სხვადასხვა სიმაღლეზე გამოცდების ჩატარების აუცილებლობა;
- ძნელად მისაღწევი ადგილის (რაიონის) რელიეფი;
- თავისი გამზომი ტექნიკით გადასაადგილებელი ლაბორატორიის ელექტროენერგიით მომარაგებასთან დაკავშირებული სირთულეები.

ასევე მხედველობაშია მისაღები ის სირთულეები, რომლებიც დაკავშირებულია კონცენტრატორიან სისტემებში გამოყენებული მზის მიმართ ორიენტირების მოწყობილობებთან. ეს პრობლემები განსაზღვრავს ზუსტად იმ ელექტრული პარამეტრების ალტერნატიული არჩევანის გაკეთებას გაზომვების დროს.

ჩვენი აზრით, საველე პირობებში გაზომილი და შესწავლილ უნდა იქნას ქვემოთ ჩამოთვლილ შემდეგი პარამეტრები და მახასიათებლები:

1. $I_{0, \text{კმ}}$ - მოკლეჩართვის დენის ძალა;
2. $U_{\text{უსვ}}$ - უქმესვლის ძაბვა;
3. გარდამქმნელის დატვირთვის მახასიათებლები;
4. გარემოს ტემპერატურა, ჰაერის ტენიანობა, სიმაღლე ზღვის დონიდან;
5. მზის გამოსხივების ინტეგრალური ინტენსივობა, რომელიც მოდის ჩვენი პლანეტის მოცემულ რეგიონში ზედაპირის ერთეულოვან ფართობზე.

საველე და ლაბორატორიულ პირობებში გამოცდების შედეგების ურთიერთშედარება სამუალებას მოგვცემს დამუშავების პროცესის ადრეულ სტადიაზე განვსაზღვროთ მზის გარდამქმნელი სისტემის ეფექტურობა და მუშაობის რესურსი.

საველე გამოცდების ჩატარების ასეთი მეთოდოლოგიური მიდგომა უპირველეს ყოვლისა განსაზღვრავს იმ აუცილებელ სიდიდეთა რაოდენობას, რომელიც ექვემდებარება გაზომვებს და შემდგომ ქმნის პირობებს რათა საველე პირობებში გამოცდებისთვის დამუშავდეს მზის გარდამქმნელების პარამეტრების შემოწმების და მახასიათებელთა დადგენის მეთოდები.

კონცენტრატორული სისტემის გარდამქმნელის ელემენტებზე მზის სხივების ფოკუსირებისთვის ჩვენს მიერ დამუშავებული იქნა სპეციალური მოწყობილობა, რომელიც ჩვენი აზრით მოსახარბებელია საველე პირობებში გამოცდების ჩატარებისთვის. ეს მოწყობილობა წარმოადგენს სამფეხა პლატფორმას, რომელიც აღჭურვილია ხრახნიანი ზუსტი მონიპულატორებით, რაც საშუალებას იძლევა რთული რელიეფის პირობებშიც კი მოვახდინოთ იუსტირება და ჩავატაროთ შესაბამისი გაზომვები. ზუსტი იუსტირების შეფასების კრიტერიუმს წარმოადგენს $I_{\text{კვ}}$ მოკლე ჩართვის დენის ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა. დროის ის მცირე ინტერვალი, რომელის განმავლობაშიც არ არის აუცილებელი იუსტირების განხორციელება, საშუალებას იძლევა ოპერატიულად და დაუბრკოლებლად ჩატარდეს სათანადო პარამეტრების გაზომვა, ავიღოთ ის ძირითადი ანათვლები რომელიც საჭიროა დატვირთვის მახასიათებლების აგებისთვის.

საველე პირობებში გამოცდების შედეგების ანალიზისთვის არანაკლები მნიშვნელობა აქვს რეგიონული ფაქტორის ასახვას - ზღვის დონიდან სიმაღლე და მზის გამოსხივების ენერგია მოცემულ ადგილზე. იმ შემთხვევაში თუ გვაქვს ადგილის გეოგრაფიული რუკა, მაშინ რათქმა უნდა სიმაღლის გაზომვა აღარ არის აუცილებელი, ხოლო რაც შეეხება ენერგეტიკულ მახასიათებლებს აქ უკვე შეიძლება შეგვხვდეს გარკვეული სირთულეები. ზუსტი კორელაცია ადგილმდებარეობის გეოგრაფიულ სიმაღლესა და მზის გამოსხივების ინტენსივობას შორის არ არსებობს, ამ გამოსხივებაზე მოქმედებს მრავალი სხვა ფაქტორები.

ლაბორატორიულ პირობებში კვლევების ჩატარებისთვის გამოიყენება მზის გამოსხივების სხვადასხვა იმიტატორები და ამიტომ მათი ენერგეტიკული პარამეტრების დაზუსტება არ წარმოადგენს სირთულეს. რეალურ პირობებში კი მოწყობილობის საექსპლუატაციო მახასიათებლების დადგენისთვის მნიშვნელოვანია უფრო მკაცრად იქნეს განსაზღვრული მზის გამოსხივების ენერგია რაიონის მოცემული ადგილმდებარეობისთვის.

მზის გამოსხივების ენერგიის ინტეგრალური ინტენსივობის გაზომვის მეთოდიკა გარკვეულად რთულია. ამ მხრივ საველე ლაბორატორია ვერ მოგვცემს სტანდარტული მეთოდოლოგიით გათვალისწინებული გაზომვების ჩატარების საშუალებას. საველე პირობებში შედარებით ზუსტი და მოსახერხებლად იოლი გაზომვების ჩასატარებლად საჭიროა გამოვიყენოთ ლუქსმეტრები. ასევე აუცილებელია გაზომვის შედეგების კორექტირებისთვის გავითვალისწინოთ წინასწარ დადგენილი ემპირიული კოეფიციენტები.

მზის ფოტოელექტრულ გარდამქმნელ სისტემაზე ჩვენს მიერ საველე გამოცდების ჩატარების დროს გამოვიყენეთ საქართველოს ჰიდრომეტცენტრის მონაცემები.

ასეთი მიდგომა გამართლებულია, ვინაიდან ჩვენს მიერ გამოცდები და შესაბამის გაზომვები ჩატარდა სტაციონალურ მეტეოროლოგიურ სადგურებთან ახლოს მდებარე ტერიტორიებზე.

ნახევარგამტარული ფოტოელექტრული გარდამქმნელი სისტემის ელექტრული მახასიათებლების გაზომვები განვახორციელეთ შემდეგნაირად:

1. უქმესვლის ძაბვის მნიშვნელობა გავზომეთ გათიშულ წრედზე;
2. მოკლედ ჩართვის დენის გაზომვის დროს გარდამქმნელზე მიმდევრობით ჩართული გვქონდა 0,8 ომი დატვირთვა (წინააღმდეგობის მაღაზიიდან);
3. დატვირთვის მახასიათებლების ასაგებად დეტალური გაზომვები განხორციელებული იქნა დატვირთვის წინააღმდეგობის სხვადასხვა ნომინალების შერჩევის გზით (წინააღმდეგობათა მაღაზიიდან).

კვლევის მოცემულ ეტაპზე საველე პირობებში მზის ფოტოელექტრული გარდამქმნელი სისტემის ელექტრული პარამეტრების და დატვირთვის მახასიათებლების შესწავლისთვის არჩეული იქნა თავისებური „პოლიგონი“, რომლის არჩევაც გამართლებულია შემდეგი გააზრებით:

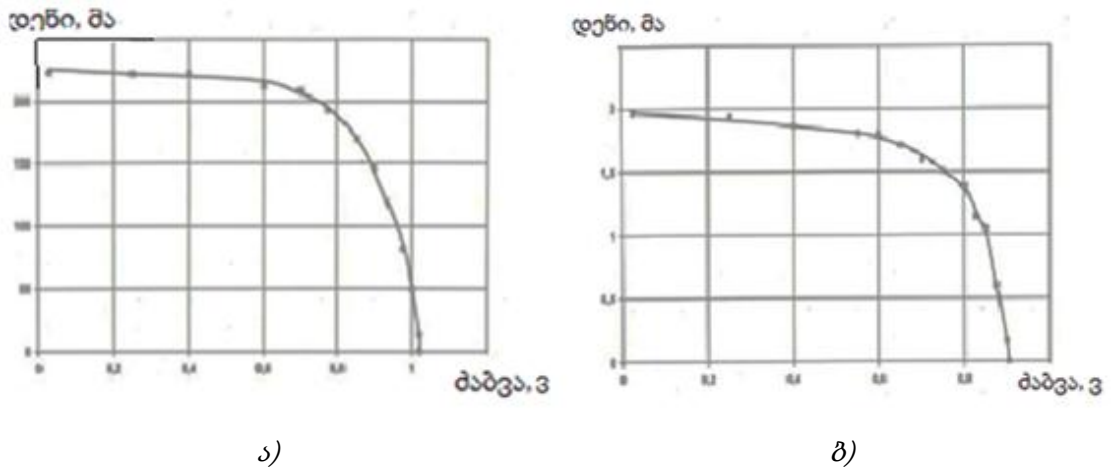
- მზის გარდამქმნელის არაწრფივი ელემენტის საექსპლუატაციო მახასიათებლებზე ძლიერ ზემოქმედებას ახდენს მოცემული რეგიონის მზის გამოსხივების ენერგეტიკული ინტენსივობა;
- მზის სხივური ენერგია, რომელიც მოდის დედამიწის ერთეულოვან ფართობზე დამოკიდებულია არამარტო ატმოსფეროს სისქეზე არამედ მის მდგომარეობაზეც;
- გამოცდების ჩატარებისთვის შერჩეული „პოლიგონები“ AM პარამეტრის მიხედვით გარკვეულწილად უნდა კონტროლირდებოდეს;
- რთულად მისაღვომ რაიონებთან სასურველია, რომ შესაძლებელი იყოს ტრანსპორტით გადაადგილების საშუალება;
- საქართველოს ჰიდრომეტცენტრის მიერ ატმოსფეროს მდგომარეობის შესახებ მონაცემების მოწოდების შესაძლებლობა.

მზის კონცენტრატორიან ფოტოელექტრულ სისტემებზე ამ ტიპის გამოცდების ჩატარებისათვის საქართველოს ტერიტორიას გააჩნია უნიკალური შესაძლებლობები. შედარებით მცირე გეოგრაფიულ ფართობზე არსებობს აშკარად გამოხატული პოლარული პირობები, უდაბნო და ნახევრადუდაბნო, ტროპიკული და სუბტროპიკული, მაღალმთიანი, ტერიტორია კონტინენტური ჰავით და აშ. ასევე გასათვალისწინებელია გარკვეულ რეგიონებში არსებული კლიმატის სტაბილურობაც. საქართველოს უმეტეს ტერიტორიაზე წლის განმავლობაში საშუალოდ 250 მზიანი დღეა.

აქედან გამომდინარე კვლევისთვის მოცემულ ეტაპზე არჩეულ იქნა სამი რაიონი: ქ. თბილისი, ფოთი და გუდაური. ხსენებულ რეგიონებში ჩატარებული საველე გამოცდებით მიღებული შედეგების საფუძველზე, რომლებიც აისახა გარდამქმნელი სისტემის პარამეტრებზე და მის დატვირთვის მახასიათებლებზე, ჩანს, რომ არსებობს გარკვეული

კორელაცია გარდაქმნის ეფექტურობასა და ორ ძირითად პარამეტრს შორის - ატმოსფერული ფენის სისქე (AM) და მოცემულ რეგიონში ატმოსფეროს მდგომარეობა.

როგორც ადრეც ავლინებთ ჩატარებული კვლევის მიზანი იყო კონცენტრატორული მოწყობილობების მოქმედების ეფექტურობის სრული სურათის განსაზღვრა. წინასწარ ჩატარებული იქნა კვლევა ცალკეული ელემენტების ელექტრული პარამეტრების და დატვირთვის მახასიათებლების დადგენისათვის. ამ მიზნით დამზადებული იქნა სპეციალური მოწყობილობა, რომელზეც შესაძლებელი იყო დაგვეყენებინა სხვადასხვა ფოკუსური მანძილის და ზომის ლინზები და დამცველი მინები. ჩვენი აზრით ასეთმა მოწყობილობამ საშუალება მოგვცა დაგვედგინა გარდაქმნილი



ნახ. 60. შზის ელემენტების დატვირთვის საშუალო მახასიათებელი კონცენტრატორის გამოყენებით (ა), კონცენტრატორის გარეშე (ბ);

სისტემის ეფექტურობა. ვინაიდან მოკლეჩართვის დენის, უქმესვლის ძაბვის და დატვირთვის მახასიათებლები შესაძლებელია შესწავლილ იქნას როგორც კონცენტრატორული ლინზების გამოყენებით, ასევე მათ გარეშე. შედარებისათვის მახასიათებლები წამოდგენილია ნახ. 60. ამ გრაფიკებზე ნაჩვენებია გასაშუალოებული მნიშვნელობები. ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავების დროს ჩვენ ძირითადი ინტერესი გამოვიჩინეთ დატვირთვის მრუდის გადაღუნვის წერტილში კუთხის ტანგენსის მნიშვნელობის განსაზღვრის მიმართ.

კვლევისთვის დამზადებულ კონცენტრატორიან მზის ფოტოელექტრულ გარდამქმნელ სისტემაში გამოყენებული იყო 4X4 სმ ზომის და $F=8.5$ სმ ფოკუსური მანძილის შემკრები ლინზები. ფოტოელექტრულ გარდამქმნელში ელემენტები დამზადებული იყო ზემოთ განხილული ტიპის ჰეტეროსტრუქტურების საფუძველზე [72; 77-80].

თავი 3.

მცირე სიმძლავრის მზის ფოტოელექტრო სისტემის დამუშავება და ექსპერიმენტული (საპილოტო) მოდელის შექმნა

3.1. ამოცანის მიზნიდან გამომდინარე მოსაშზადებელი სამუშაოები

ჩვენს მიზანს შეადგენდა: მცირე სიმძლავრის მზის ფოტოელექტრო მობილური სისტემის დამუშავება და შექმნა. რომლის დანიშნულებაა, შეასრულოს ავტონომიური კვების წყაროს როლი, მცირე სიმძლავრის სხვადასხვა ელექტრო ხელსაწყოების კვებისათვის საველე და სააგარაკო პირობებში. ამ ტიპის ფოტოელექტრული სადგურის აგებისათვის საჭიროა მზის ფოტოელექტრო სისტემის პარამეტრების გაანგარიშების ოპტიმიზაცია და შესაბამისად უნივერსალური დატვირთვის მქონე საპილოტო მოდელის აგება.

მზის ფოტოელექტრო სისტემის საიმედო ფუნქციონირებისათვის, ტექნიკური ამოცანიდან გამომდინარე საჭიროა თითოეული მისი შემადგენელი კომპონენტის პარამეტრების გაანგარიშება და მთლიანად სისტემის კონსტრუქციული გადაწყვეტილების მიღება. ჩვენს მიერ დამუშავებულია ფოტოელექტრული სადგურის ტურისტული ვარიანტი, რომელიც მოსახერხებელია მთიანი, მიუვალი ადგილების, ტურისტული ჯგუფების, მონადირეთა, მეთევზეთა, მცირე ფერმერული მეურნეობების და სხვა ობიექტების ავტონომიური ელექტრო მომარაგების უზრუნველსაყოფად.

კვლევის პერიოდში დავადგინეთ, რომ საჭირო იყო შეგვესრულებინა შემდეგი სამუშაოები:

1. შეგვერჩია მცირე სიმძლავრის მზის ფოტოელექტრო მობილური სისტემის შემადგენელი კომპონენტები.
2. დაგვემუშავებინა უნივერსალური ფუნქციონალური დატვირთვის მქონე მცირე სიმძლავრის მზის ფოტოელექტრო სისტემის კონსტრუქცია.

3. დაგვემზადებინა მცირე სიმძლავრის მზის ფოტოელექტრო სისტემა და ჩაგვეტარებინა ექსპერიმენტული კვლევები, შეგვესწავლა სისტემის ძირითადი მახასიათებლები, ოპტიკური და ელექტრული პარამეტრები.
4. ჩაგვეტარებინა მოხმარების სფეროს მარკეტინგი, შეგვემუშავებინა რეკომენდაციები ფოტოელექტრო მობილური სისტემის გამოყენების არეალის და მისი სამრეწველო რეალიზების პერსპექტივების შესახებ.

მზის ელექტროსადგურის ან ფოტოელექტრული სისტემის პროექტირების ყველაზე მნიშვნელოვანი მომენტის, მისი პარამეტრების და შემადგენელი კომპონენტების განსაზღვრის პროცესი განვახორციელებთ რამდენიმე ეტაპად:

I. შევადგინეთ ყველა შესაძლო დატვირთვის სია და მოხმარებული ენერჯიის მნიშვნელობა, დატვირთვის რაოდენობა და თითოეული ხელსაწყო სადღეღამისო მუშაობის დროის ხანგრძლიობა.

განათება – ტრადიციული სინათლის წყაროების ნაცვლად გამოყენებული უნდა იქნას ნათურები შუქდიოდების საფუძველზე. შუქდიოდებს არა აქვთ მინის ბალონი და ვარვარების ძაფი, რის გამოც ისინი საიმედო და მექანიკურად მტკიცეა. გაცხელების და მაღალი ძაბვის არ არსებობა მათი ელექტრო და ხანძარუსაფრთხოების გარანტიაა. მაგ. 3,7 ვტ სიმძლავრის ამ ტიპის ნათურების განათების უნარი – 90ლმ/ვტ-ის ტოლია, რაც თითქმის უტოლდება 60 ვატიანი ნათურისას. თუ ჩავთვლით, რომ განათებისათვის გამოვიყენებთ ორ ცალ ამ ტიპის ნათურას 10 სთ-ის განმავლობაში დაიხარჯება – 74 ვტ.სთ.

რადიო მიმღები 0,5 ვატიანი ვამუშაოთ 10 სთ-ის განმავლობაში – 5 ვტ.სთ.

ტელევიზორი 10 ვატიანი ვამუშაოთ 5 სთ-ის განმავლობაში – 50 ვტ.სთ.

ნოუტბუქი 20 ვატიანი 2 სთ-ის განმავლობაში – 40 ვტ.სთ.

მობილური ტელეფონის, ვიდეო კამერის, ფოტოაპარატის, ფანარის დამუხტვა საშუალოდ 10 ვტ.სთ და დამატებული სხვა განსხვავებული ხელსაწყოები – 10 ვტ.სთ.

სულ ჯამში გამოგვივიდა: 189 ვტ.სთ.

II. ხელსაწყოები ავირჩიეთ მაქსიმალურად ენერგო ეფექტურები. ასევე უმჯობესია გამოვიყენოთ ისეთი ხელსაწყოები, რომლებიც მუშაობენ მუდმივ ძაბვაზე. რაც დამატებით მოგვცემს შემდეგ უპირატესობებს:

- გამორიცხავს დანაკარგებს ინვენტორში, რომელიც აღწევს ~10%. ზოგ შემთხვევაში საერთოდ შესაძლებელია უარი ვთქვათ ინვენტორზე, რაც დამატებითი გვაძლევს ფასის ეკონომიასაც;
- სისტემის შემადგენელი ერთ-ერთი კვანძის შესაძლო ამორთვა, ზრდის მის საიმედოობას. უმეტეს ხელსაწყოებში გამოიყენება ადაპტერები, ამ შემთხვევაში გვერდს აუვლით ძაბვის ორმაგ გარდაქმნას;
- ძაბვის გარდაქმნაზე ე.ი. მაღალ 220 ვოლტის ძაბვაზე უარის თქმა, შესაბამისად ზრდის სისტემის უსაფრთხოებასაც;

სისტემის ექსპლუატაციის პროცესში უმჯობესია, რომ შევეცადოთ ყველა აუცილებელი სამუშაო შევასრულოთ დღის განმავლობაში, მაქსიმალურად გამოვიყენოთ მზის მოდულის მიერ გამომუშავებული ელექტრული ენერგია. პირდაპირ დავმუხტოთ: ტელეფონი, ნოუტბუქი, კამერა, ფანარი და ა.შ. ვინაიდან რაც უფრო ახლო მანძილს გადის ელექტრონი საბოლოო წერტილამდე, მით ნაკლებია დანაკარგები, აზრი არა აქვს ჯერ დავმუხტოთ შუალედური აკუმულიატორი და შემდეგ დავმუხტოთ ნოუტბუქი.

III. ყოველივე ამის შემდეგ დავადგინეთ სისტემის მთლიანი ენერგო-მოხმარება (კვტ.სთ-ში). მობილური მცირე სიმძლავრის სისტემისათვის ავირჩიეთ ~0,2 კვტ.სთ (მინიმალური მოხმარება). ღამით მოხმარებული ენერგიის სიდიდე კი მინიმუმ 0,04 კვტ.სთ.

IV. მნიშვნელოვანია აკუმულიატორის ტევადობის განსაზღვრა. რეკომენ-დირებულია, რომ აკუმულიატორის განმუხტვის სიღრმე არ აღემატებოდეს 50-60%-ს. აკუმულიატორის ტევადობის განსაზღვრისათვის საჭიროა: მესამე პუნქტში გამოთვლილი ენერგიის მნიშვნელობა გავამრავლოთ "მიღებული" დღეების რაოდენობაზე და ამრიგად გამოთვლილი ენერგიის სიდიდე

გვადლევს აკუმულატორის ტევადობის ზემოთხსენებულ 50-60%-ის მნიშვნელობას. დანაკარგები, რომლებიც მიიღება იმ შემთხვევისათვის როცა გარემოს ტემპერატურა განსხვავდება 25°C – ტემპერატურისაგან, განისაზღვრება ცხრილი 7-ის საშუალებით, მასში მითითებულ შესაბამის კოეფიციენტზე გამრავლებით.

ცხრილი 7. აკუმულატორის ტევადობის განსაზღვრის კოეფიციენტები

ტემპერატურა °C	25	20	15	10	5	0	-5
კოეფიციენტი	1,00	1,03	1,10	1,20	1,28	1,36	1,5

თუ გამოთვლებს ჩავატარებთ აღნიშნული თანმიმდევრობით დავადგენთ, რომ სისტემაში გამოყენებისათვის საჭიროა 7-8 ა.სთ-იანი ტევადობის 12 ვოლტიანი აკუმულატორი. შეიძლება გამოვიყენოთ უფრო მეტი ტევადობის აკუმულატორიც, მაგრამ ამ შემთხვევაში გაიზრდება სისტემის ღირებულება და წონა – დაემატება დამატებითი კილოგრამები.

V. ამავე მეთოდით განვახორციელოთ ინვენტორის სიმძლავრის გამოთვლაც.

VI. შემდეგი ეტაპი იყო – მზის მოდულის (მოდულების) ჯამური სიმძლავრის განსაზღვრა. ამასთან გაანგარიშების პროცესში მოვახდინეთ გამოთვლილი მონაცემების და შემდეგი ფაქტორების გათვალისწინება: მზის სადგურის განლაგების ადგილი; გამოყენების პერიოდი (მთელი წლის განმავლობაში, ზაფხული, ზამთარი); ადგილზე შესაძლებელია თუ არა მოდულის დაჩრდილვა (ნაგებობები, ხეები და სხვა); მზის მოდულის ორიენტაციის შესაძლებლობები.

საერთო გამოთვლები უმჯობესია გაკეთდეს დეკემბრის პერიოდში ვინაიდან მზის ინსალაციის მნიშვნელობა ამ თვეში ყველაზე მინიმალურია. სიმძლავრის (კვტ.სთ)-ში გამოთვლისათვის გამოვიყენეთ:

$$W=kP_{\Sigma}E/1000$$

სადაც, W - სიმძლავრეა, k - (მნიშვნელობა ზაფხულში - 0,5, ზამთარში - 0,7) კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს მზის სხივების დაცემის დახრის კუთხეს მზის მოდულის ზედაპირის მიმართ დღის განმავლობაში,

მოდულის გათბობას და სხვა ფაქტორებით გამოწვეულ დანაკარგებს. E – მზის ინსალაცია მოცემულ პერიოდში E (კვტ.სთ/მ²).

ამის შემდეგ გამოითვლება მოდულის ჯამური სიმძლავრე ფორმულით: $P_{\Sigma}=1000W/kE$, სადაც P_{Σ} -არის მზის მოდულის საძიებო ჯამური სიმძლავრე. დღეისათვის საქართველოში საკმარის დონეზეა შესწავლილი მზის ენერგეტიკული რესურსები, განხორციელებულია მზის ენერჯის კადასტრული შეფასება და რეგიონის მიხედვით მზის ენერგეტიკული რესურსების განაწილება. მაგ. თბილისში წლის განმავლობაში მზის წლიური რადიაცია 1861კვტ.სთ/მ²-ის ტოლია. ე.ი. საშუალოდ დღე-ღამეში 7,4კვტ.სთ/მ². თუ გავითვალისწინებთ მზის მოდულის გარდაქმნის მარგი ქმედების კოეფიციენტს (მქკ=10%) შესაბამისად მივიღებთ, რომ ერთი კვადრატული მეტრი ფართობის მოდულის საშუალებით შეგვიძლია მივიღოთ 0,72 კვტ.სთ ელექტრო ენერჯია.

თუ ამ მონაცემებით ვიანგარიშებთ მზის მოდულის საძიებო ჯამურ სიმძლავრეს P_{Σ} მივიღებთ, რომ ჩვენი სისტემის დამზადებისათვის საკმარისია 25 ვატიანი სიმძლავრის მზის მოდული.

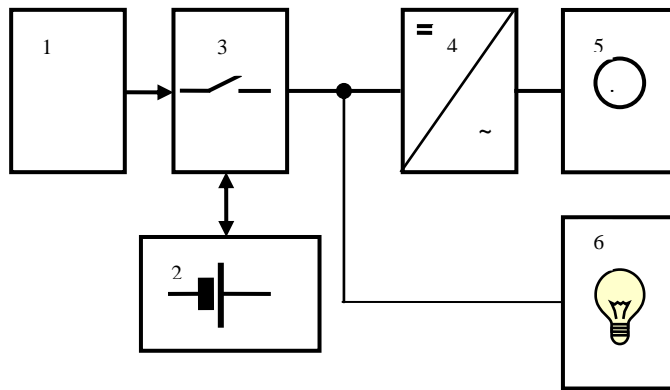
3.2. ექსპერიმენტული მოდელი და მისი კონსტრუქცია

ზოგადად ფოტოელექტრული სისტემა იყოფა ორ ნაირსახეობად: სრულიად ავტონომიური და ნახევრად ავტონომიური (ჩართული ერთიან ელექტრო ქსელში). ავტონომიური სისტემის დანიშნულებაა ელექტრული ენერჯით მოამარაგოს მობილური ობიექტი ან ობიექტები, რომლებიც მოშორებულია ძირითად ელექტრო გადაცემის ხაზებს. მეორე ტიპის სისტემებს შეუძლია არასაკმარისი ენერჯია მიიღონ ელექტრო ქსელიდან ან პირიქით ჭარბი ენერჯია მიაწოდონ ქსელს. როგორც ცნობილია ფოტოელექტრული სადგურის შემადგენლობაში შედის: უშუალოდ მზის მოდულები, აკუმულატორული ბატარეა, აკუმულატორის დატენვა-განმუხტვის რეგულატორი, შემაერთებელი კაბელები და თუ საჭიროა ცვლადი ძაბვა მაშინ კომპლექტს ემატება ძაბვის ინვენტორიც.

საწყის ეტაპზე დავამუშავეთ მზის ფოტოელექტრული მობილური სისტემის კონსტრუქციის ესკიზური ვარიანტი. დამუშავების პროცესში გავითვალისწინეთ, რომ სისტემა უნდა იყოს კომპაქტური და ზომიერი წონის, რაც აძლევს საშუალებას იყოს მოხერხებული. ხშირად კი შეუცვლელი ხანგრძლივი ლაშქრობებისა და იმ ფერმერული მეურნეობისათვის, რომლებიც სისტემატურად იცვლიან ადგილსამყოფელს. ამასთან სისტემა არ უნდა მოითხოვდეს მომსახურე პერსონალის მაღალ კვალიფიკაციას ამ ტიპის სისტემების მომსახურებისა და ექსპლუატაციის სფეროში. ყოველივე ზემოთქმულის გათვალისწინებით განვახორციელეთ სისტემის კონსტრუქციის დამუშავება და შემადგენელი კომპონენტების შერჩევა.

დამუშავებული სისტემა 25 ვატი სიმძლავრისაა, მასში გამოყენებულია 25 ვატი სიმძლავრის ერთი ცალი მზის ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდული. სისტემაში გათვალისწინებულია სიმძლავრის გაზრდის ვარიანტი 50ვტ-მდე, ორი მოდულის ურთიერთ პარალელურად შეერთებით, სისტემის სხვა შემადგენელი კომპონენტები ამის საშუალებას იძლევა დამატებების გარეშე. სისტემის შემადგენლობაში შედის დამუხტვა-განმუხტვის რეგულატორი (კონტროლიორი), აკუმულატორული ბატარეა და ინვენტორი. ცალ-ცალკე განვიხილოთ სისტემის შემადგენელი ძირითადი კომპონენტები, მათი ელექტრო-ფიზიკური და კონსტრუქციული პარამეტრები, ფუნქციონალური დანიშნულება. ჩვენს მიერ დამუშავებული სისტემის ბლოკ-სქემა წარმოდგენილია ნახ.61-ზე.

მზის მოდულები. მზის მოდულები ფოტოელექტრო სისტემის ძირითადი ნაწილია. ჩვენი მიზნის განსახორციელებლად გამოვიყენეთ, საუკეთესო ვარიანტი, მონოკრისტალური სილიციუმის საფუძველზე დამზადებული მზის მოდულები, რომელთათვისაც დამახასიათებელია 10%-ზე მეტი მარგი ქმედების კოეფიციენტის მნიშვნელობა, სტაბილური ელექტრო-ფიზიკური პარამეტრები და ხანგრძლივად მუშაობის უნარი. ასევე შესაძლებელია გამოგვეყენებინა პოლიკრისტალური სილიციუმის სა-



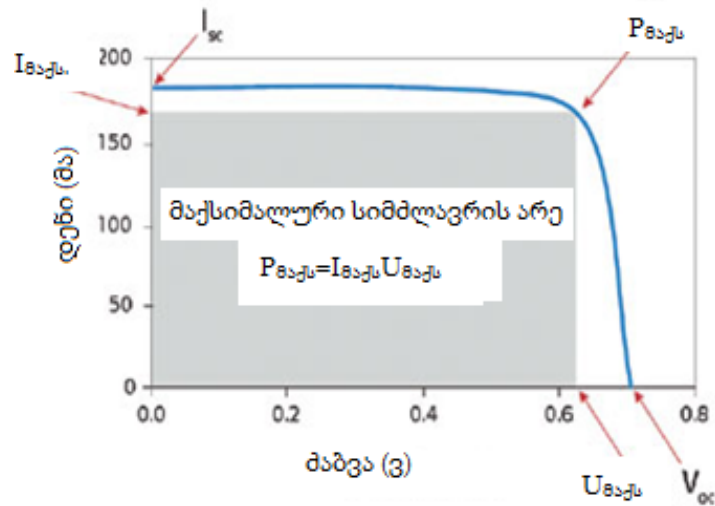
ნახ. 61. მცირე სიმძლავრის მზისფოტოელექტრული მობილური სისტემის ბლოკ-სქემა: 1. მზის გენერატორი; 2. აკუმულიატორთა ბატარეა; 3. დამუხტვა-განმუხტვის რეგულიატორი; 4. ინვენტორი; 5. ცვლადი დენის მომხმარებელი; 6. მუდმივი დენის მომხმარებელი.

ფუძველზე დამზადებული მზის მოდულები (მათი ღირებულება შედარებით დაბალია), მაგრამ მათი მქვ 10%-ზე ნაკლებია და ასევე ნაკლებია მათი მუშაობის ხანგრძლიობის უნარიც.

მოდულის ელექტრული პარამეტრები წარმოდგენილია პასპორტულ მონაცემებში (ცხრილი 8) და გრაფიკულად მისი ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი (ნახ. 62), რომელიც გადაღებულია სტანდარტულ პირობებში (Standart Test Condition – STC) ე.ი. როდესაც მზის რადიაცია შეადგენს 1000 ვტ/მ², ელემენტების ტემპერატურა 25°C, მზის სპექტრი კი შეესაბამება 45° გრძედზე არსებულს. სისტემაშიგამოვიყენეთ “Ampex”-ის წარმოების #6649SB მოდელის მზის 25W-იანი მოდული, რომელიც წარმოდგენილია ნახ. 63-ზე.

ცხრილი 8. 25W – სიმძლავრის, 12 ვოლტიანი მოდულის ტექნიკური მახასიათებლები

პარამეტრების დასახელება	პარამეტრების მნიშვნელობა
მაქსიმალური სიმძლავრე, $W_m(W)$	25
მაქსიმალური სიმძლავრის შესაბამისი დენი, $I_m(A)$	1,5
მაქსიმალური სიმძლავრის შესაბამისი ძაბვა $U_m(V)$	17,1
მოკლე ჩართვის დენი, $I_{sc}(A)$	1,76
უქმი სვლის ძაბვა, $U_{dc}(V)$	21,8
ტემპერატურული დიაპაზონი, °C	მინუს 50-დან +70-მდე
ფარდობითი ტენიანობა, %	100-მდე
სეტყვის მიმართ მდგრადობა	40მმ-მდე დიამეტრის, 15მ/წმ სიჩქარით მოძრავი სეტყვა
მუშაობის უნარი, წელი	12
გაზარიტული ზომები, მმ	650X340X28
წონა, კგ	2,2



ნახ. 62. მზის მოდულის მახასიათებელი მნიშვნელოვანი წერტილები ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე



ნახ.63 ფოტოელექტრული გარდამქმნელი მოდული

ენერჯის ალტერნატიული წყაროს გამოყენებისათვის აუცილებელია გარკვეული უნარ-ჩვევების გამომუშავება. შეგვიძლია გამოვიყენოთ მხოლოდ ის რაოდენობა ელექტრო ენერჯისა, რომელიც მიიღება გარდაქმნის შედეგად და დამოკიდებულია: რეგიონის მზის ინსალაციის დონეზე, ატმოსფეროს სისუფთავეზე, ნისლის სიმკვრივეზე, ასევე მისი სწორად დაყენებაზე (ორიენტაციაზე). თუ მზის მოდულის ორიენტაციას ავირჩევთ აღმოსავლეთით ან დასავლეთით ამით, შესაძლო გარდასაქმნელი ენერჯიდან, გამოვიყენებთ დილის ან საღამოს ინსალაციის საათებს. ამ შემთხვევაში მზის ინსალაციის ყველაზე პროდუქტიული დღის მზის გამოყენების ეფექტი საგრძნობლად შემცირდება და გამომუშავებული ელექტრული ენერჯია მცირდება 50-70%-ით, ეს კი არ არის სწორი. მზის მოდულის ორიენტაცია უნდა ვეცადოთ მივმართოთ მკაცრად სამხრეთი-საკენ. ზუსტად სამხრეთიდან მოდის "ფოტონთა" მაქსიმალური რაოდენობა, გაივლის რა ატმოსფეროს პირდაპირი კუთხით, მინიმალური დანაკარგებით. ჰორიზონტისადმი მოდულის დაყენების კუთხე მთელი წლის განმავლობაში უნდა ემთხვეოდეს რეგიონის ადგილმდებარეობის პარალელს. კარგია თუ არსებობს კუთხის ცვლილების შესაძლებლობა 45⁰-დან 75⁰-მდე. ცხრილ 9-ში წარმოდგენილია დახრის კუთხეზე მოდულის ეფექტურობის დამოკიდებულების მონაცემები.

ცხრილი 9. ეფექტურობის დამოკიდებულება მოდულის დახრის კუთხეზე

დახრის კუთხე	პ ა რ ა მ ე ტ რ ე ბ ი				
	სამხრეთი	სამხრეთ /აღმოსავლეთი	სამხრეთ /დასავლეთი	ჩრდილო-აღმოსავლეთი	ჩრდილოეთი
ჰორიზონტალურად			90%		
30 ⁰	100%	96%	85%	73%	68%
45 ⁰	98%	93%	80%	64%	60%
60 ⁰	92%	86%	72%	56%	47%
ვერტიკალურად	69%	66%	54%	41%	35%

ჩვენს მიერ დამუშავებული სისტემისათვის მოდულის ორიენტაცია თავისუფლად შეგვიძლია ვცვალოთ დღის განმავლობაში. შეგვიძლია ვცვალოთ როგორც დახრის კუთხე ასევე მოდულის ორიენტაცია აღმოსავლეთით, სამხრეთით და დასავლეთით. ამით შევძლებთ დღის განმავლობაში მაქსიმალურად გამოვიყენოთ მზის მიერ გამოსხივებული ენერჯია და გავზარდოთ სისტემის ეფექტურობა.

აკუმულატორული აკუმულატორის შერჩევის დროს ძირითადად ყურადღება ექცევა ისეთ ფაქტორებს როგორცაა: მდგრადობა მუშაობის ციკლურ რეჟიმში; უნარი გაუძლოს ღრმა განმუხტვას; თვითგანმუხტვის დაბალი მაჩვენებელი; ნაკლებად რეაგირების უნარი დამუხტვის და განმუხტვის რეჟიმების დარღვევის მიმართ; მუშაობის ხანგრძლიობის პერიოდის მაღალი მაჩვენებელი; მოხმარების სიმარტივე; ჰერმეტიულობა (ვინაიდან არ შეუქმნას პრობლემები მოხმარებელს ხანგრძლივი ტრანსპორტირების დროს).

მნიშვნელოვანი პარამეტრი გადასატანი (პერიოდულად მონტაჟსა და დემონტაჟში მყოფი) მზის სისტემისათვის არის აკუმულატორის კომპაქტურობა და ჰერმეტიულობა. ამ პირობებს ყველაზე უკეთ აკმაყოფილებს აკუმულატორები, რომლებიც დამზადებულია "DRIFIT" და AGH ტექნოლოგიით. ამ ტექნოლოგიით დამზადებული აკუმულატორები ჰერმეტიულია და დამუხტვის დროს გამოყოფილი გაზი აკუმულატორიდან გარეთ არ გამოდის, ამიტომ არ ხდება ელექტროლიტის ხარჯვა და არ საჭიროებს მომსახურეობას. ამასთან ამ ტიპის აკუმულატორებს გააჩნიათ: ექსპლუატაციის ხანგრძლივობა – 15 წელი; მდგრადობა ციკლური მუშაობის რეჟიმში – 1200 ციკლი; არ მოითხოვენ მომსახურეობას მთელი მუშაობის ხანგრძლიობის პერიოდში; თვითგანმუხტვა – საშუალოდ 3% თვეში;

ჩვენს სისტემაში გამოვიყენეთ კომპიუტერული მოწყობილობებისათვის განკუთვნილი UPS-ის ჰერმეტიული აკუმულატორი, რომლის პარამეტრებიც წარმოდგენილია ცხრილ 10-ში.

ცხრილი 10. ჰერმეტიკული აკუმულატორის პარამეტრები

პარამეტრის დასახელება	პარამეტრის მნიშვნელობა
აკუმულატორის ძაბვა, ვ	12,5±1,5
აკუმულატორის ტევადობა, ა.სთ	7
აკუმულატორის სრული დატენვის დრომზის ბატარეიდან, სთ	8
გაბარიტები, მმ	150x65x111
წონა, კგ	2,2

დამუხტვა-განმუხტვის რეგულატორი. მისი მუშაობის ხარისხზეა დამოკიდებული სისტემის გამართულად ფუნქციონირება. მისი საშუალებით ხდება დაცვის სისტემის ავტომატურად გათიშვა მაშინ, როცა ძაბვა აკუმულატორზე ეცემა ნორმაზე დაბლა. გათიშვის შემდგომ დატვირთვა არ ჩაირთვება მანამ სანამ ძაბვა არ მიაღწევს განსაზღვრულ ზღვარს (ჩართვის ძაბვას). ზოგიერთი მოდელის რეგულატორში დატვირთვის მოსალოდნელი გათიშვის შესახებ შეტყობინება ხდება ხმოვანი სიგნალით. ძაბვის დასაშვები მნიშვნელობის მიღწევისას, აკუმულატორის ზედმეტად დამუხტვის თავიდან ასაცილებლად, რეგულატორი ზღუდავს დამუხტვის დენს. ამ დროს ძაბვა იწყებს შემცირებას მანამ სანამ არ მიაღწევს დამუხტვის განახლების ძაბვის მნიშვნელობას. რეგულატორი ასევე იცავს სისტემას დატვირთვაში მომხდარი მოკლე ჩართვის და აკუმულატორის პოლარობის არასწორად ჩართვის დროს, ახდენს ზღვრული დენის კომპენსაციას.

სისტემაში გამოვიყენეთ PHOCOS-CA08-2 მზის რეგულატორი, რომლის დანიშნულებაც მცირე სიმძლავრის მზის სისტემებში მუშაობა. ნახ. 64-ზე წარმოდგენილი რეგულატორის გარეგანი სახე, რეგულატორის ტექნიკური მახასიათებლები კი ცხრილ 11-ში.



ნახ. 64. რეგულატორის გარეგანი სახე

ცხრილი 11. რეგულატორის ელექტრული პარამეტრები და მახასიათებლები

დასახელება	პარამეტრი
დისკლეი	3 შუქდიოდზე
დატვირთვის მაქსიმალური დენი, ა	8,0
ძაბვა, ვ	12
ზომები, მმ	80X100X32
საკუთრად მოხმარებული ენერგია, მა	≤4
წონა, გრამი	180
დაცვის ტიპი	IPZO

ინვენტორი. ავტონომიურ სისტემისათვის განკუთვნილ ინვენტორს უნდა ახასიათებდეს: უნარი გაუძლოს გადატვირთვებს; გააჩნდეს მცირე დანაკარგები სუსტი დატვირთვის და უქმე სვლის შემთხვევაში; გამოსასვლელი (გარდაქმნილი) ძაბვის სტაბილიზაციის უნარი; ჰარმონიკების დაბალი კოეფიციენტი; მაღალი მქვ; რადიოსიხშირეზე ხმაურის არ არსებობა. ჩვენს სისტემაში გამოვიყენეთ JEC ტიპის და CC-885 მოდიფიკაციის ინვენტორი.

მცირე სიმძლავრის მობილური ფოტოელექტრო სისტემის საპილოტო მოდელის კონსტრუქცია. დამუშავებულია 25 ვატი სიმძლავრის და 12 ვოლტიანი ნომინალური ძაბვის მზის ფოტოელექტრო სისტემის

კონსტრუქცია და დამზადებულია საპილოტო მოდელი. სისტემა მთლიანად ავტონომიურია, არ მოითხოვს დამატებით დამუხტვას და მომსახურებას, საიმედოა მუშაობაში, მარტივია ასაწყობად და ექსპლოატაციისათვის არ მოითხოვება მომხმარებელთა მაღალი კვალიფიკაცია. მცირე სიმძლავრის ტურისტული მობილური ფოტოელექტრო სისტემის აწყობისათვის საჭიროა ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი კომპონენტები სადენების საშუალებით შევაერთოთ (სადენები შედის სისტემის კომპლექტში) ნახ. 62-ზე წარმოდგენილი სქემის მიხედვით. ჩვენს მიერ ჩატარდა სისტემის პარამეტრების შესწავლა სხვადასხვა პირობებში და დავადგინეთ მისი ძირითადი ელექტრული, კლიმატური და კონსტრუქციული პარამეტრები, რომელიც წარმოდგენილია ცხრილ 12-ში. სისტემას აქვს უნარი იმუშაოს ხანგრძლივი ტურისტული ლაშქრობების დროს და ნებისმიერ სავალე პირობებში. დაშლილ მდგომარეობაში სისტემა მთლიანად თავსდება მოხერხებულ წყალგაუმტარ ჩანთაში, რომელიც იცავს სისტემას ტრანსპორტირების დროს მექანიკური დაზიანებისაგან, ასევე წვიმისა და თოვლისაგან.

ცხრილი 12. მცირე სიმძლავრის მობილური ფოტოელექტროსისტემის ელექტრული პარამეტრები და მახასიათებლები

დასახელება	პარამეტრი
ნომინალური ძაბვა, ვ	12
მაქსიმალური სიმძლავრე, ვტ	25
აკუმულატორის ელექტრო ტევადობა, ა.სთ	7
აკუმულატორის მიერ გაცემული ენერჯის მაქსიმალური მნიშვნელობა, ვტ სთ	28
აკუმულატორის დამუხტვის დენის ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა, ა	0,7
აკუმულატორზე მინიმალური დასაშვები ძაბვის მნიშვნელობა, ვ	11,5
მზის ელემენტის საშუალებით აკუმულატორის სრულად დამუხტვის დრო, სთ	8
მუშაობის ტემპერატურული დიაპაზონი, °C	მინუს 30 +45
სისტემის მთლიანი წონა, კგ	9

ჩვენს მიერ დამუშავებული სისტემა გამოყენებული იქნება საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სასწავლო პროცესში ლაბორატორიული სამუშაოების ჩასატარებლად და სტუდენტთა პრაქტიკისათვის, საგნებში: “ოპტოელექტრონიკა” და “ენერჯის არატრადიციული ალტერ-ნატიული წყაროების მუშაობის ფიზიკური საფუძვლები”.

მიღებული შედეგები საშუალებას გვაძლევს, რომ მიზანშეწონილად ჩავთვალოთ აღნიშნული მიმართულებით სამუშაოების გაგრძელება, მცირე მასშტაბიანი წარმოების გამართვისათვის და მარკეტინგული სამუშაოების ჩასატარებლად. დამუშავებული კონსტრუქციის მცირე სიმძლავრის მზის ფოტოელექტრო სადგური არის საქართველოს ბაზრისთვის ახალი პროდუქტი, რომელიც ავსებს არსებულ სიცარიელეს მომხმარებელთა ავტონომიური ელექტრომომარაგების სფეროში განახლებადი ეკოლოგიურად სუფთა ენერჯის წყაროს გამოყენებით.

საერთო დასკვნები:

1. დამუშავებულია მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრული გარდაქმნელი ელემენტებისათვის მრავალფენიანი ჰეტეროეპიტაქსიური სტრუქტურების თხევადფაზური ეპიტაქსიური მეთოდით დამზადების ტექნოლოგიური რეჟიმები.
2. დადგენილია მრავალფენიანი ჰეტეროსტრუქტურების შემადგენელი ფენების მყარ ხსნართა ქიმიური შემადგენლობა, ოპტიმალური სისქეები, მალეგირებელი ნივთიერების ტიპი და კონცენტრაცია, ეპიტაქსიური ზრდის პროცესების ტემპერატურულ-დროითი რეჟიმები.
3. დამუშავებულია ჰეტეროსტრუქტურებში თხელი ეპიტაქსიური ფირების მიღების დაბალტემპერატურული თხევადფაზური ეპიტაქსიის ტექნოლოგიური რეჟიმები, დადგენილია მყარ ხსნართა შემადგენლობა და თითოეული ფენის ზრდის პროცესისათვის საჭირო კაზმში კომპონენტების წონითი თანაფარდობა, შესწავლილია მიღებული სტრუქტურების თვისებები;
4. დადგენილია, რომ დაბალტემპერატურული მეთოდი საშუალებას იძლევა გავზარდოთ უფრო თხელი და სრულყოფილი ფენები, რის შედეგადაც შექმნილ სტრუქტურებს გააჩნიათ მაღალი ტემპერატურული სტაბილურობის უნარი და მზის სპექტრის მოკლელტალღოვან არეში შედარებით უფრო მომატებული მგრძობიარობა.
5. მიღებული ჰეტეროეპიტაქსიური სტრუქტურების საფუძველზე დამუშავებულია მზის ელემენტების კრისტალების ტოპოლოგია და დამზადების ტექნოლოგია, მათი ტესტირების მეთოდები და შესწავლილია ძირითადი პარამეტრები. შეფასებულია ფოტოელექტრული გარდაქმნის მარგი ქმედების კოეფიციენტი.
6. დამუშავებულია ოპტიკური ლინზების და მზის კონცენტრირებული გამოსხივების მოდულის კონსტრუქცია, მათი დამზადების და ტესტირების მეთოდები.

7. დამუშავებულია მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტო-ელექტრული გარდაქმნელი დანადგარის ლაბორატორიულ და საველე პირობებში ტესტირების მეთოდები, განსაკუთრებული ყურადღება გამახვილებულია საველე პირობებში მათ ტესტირებაზე, ვინაიდან ის იძლევა სრულ სურათს ექსპლუატაციის მიახლოებულ პირობებში დანადგარის ეფექტურად მუშაობის შესახებ. კვლევები ჩატარებულია საქართველოს სამ რეგიონში (თბილისი, ფოთი, გუდაური).
8. დამუშავებულია მცირე სიმძლავრის მზის ფოტოელექტრო სისტემის კონსტრუქცია და დამზადებულია საპილოტო მოდელი, სისტემა მთლიანად ავტონომიურია, საიმედოა მუშაობაში, ასაწყობად მარტივია და ექსპლუატაციისათვის არ მოითხოვება მომხმარებელთა მაღალი კვალიფიკაცია.
9. სისტემა შეიძლება გამოყენებული იქნეს, როგორც ელექტროენერჯის წყარო მთიანი, მიუვალი ადგილების, ტურისტული ჯგუფების, მცირე ფერმერული მეურნეობის და სხვა ობიექტების ავტონომიური ელექტროენერჯით მომარაგების უზრუნველსაყოფად.
10. დამუშავებული კონსტრუქციის მცირე სიმძლავრის მზის ფოტოელექტრო სადგური არის საქართველოს ბაზრისთვის ახალი პროდუქტი, რომელიც განახლებადი ეკოლოგიურად სუფთა ენერჯის წყაროს გამოყენებით ავსებს მომხმარებელთა ავტონომიური ელექტრო მომარაგების სფეროში არსებულ სიცარიელეს.
11. შეფასებულია სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება და მისი განვითარების პერსპექტივა, ფოტოელექტრული გარდაქმნელი ელემენტების ეფექტურობის და მუშაობის სტაბილურობის გაზრდის მიზნით კვლევები უნდა გაგრძელდეს ნანო და კვანტურ წერტილიან ჰეტერო-ეპიტაქსიურ სტრუქტურებზე, ვინაიდან მათ საფუძველზე შესაძლებელია მიღებულ იქნას ეფექტური (60%-ზე მეტი) გარდაქმნელები.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Adams W.G., Day R.E. "The Action of Light on Selenium". Phil. Trans. R. Soc., 1977, 167 (part 1) p. 313.
2. Ioffe A.F., Ioffe A.V. "Semiconductors in Contemporary Technology" Phys. Z. Sov. Un., 7, 343 (1935).
3. Chapin D.M., Fueller C.S., Pearson G.L. "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power" J. Appl. Phys., 1954, 25, p. 676.
4. Горюнова Н.А. Автореф. Дис. ЛГУ – ФТИ, 1951.
5. Осадчий Г.Б. Солнечная энергия, её производные и технологии их использования (Введение в энергетику ВИЭ). Омск: ИПК Макшеевой Е.А., 2010. 572 с.
6. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии/Дж. Твайделл, А. Уэйр. М.: Энергоатомиздат, 1990. 392 с.
7. Лунин Д.С., Марончук И.Е., Сысоев И.А. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии.
8. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д., "Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения" - изд. «Наука» 1989.
9. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Каган М.Б., Протасов И.И., Трофим В.Г. "Солнечные преобразователи на основе гетеропереходов p-Al_xGa_{1-x}As - n-GaAs" ФТП. 1970, 4. p. 12.
10. Green M.E., Emery K., King D.L., Igary S., Warta W. "Solar Cell Efficiency Tables" Progr. Photovolt.: Res. Appl., 2002, 10, 355.
11. Andreev V.M., Kazantsev A.B., Khvostikov V.P., Paleeva E.V., Rummyantsev V.D., Shvarts M.Z. "High-Efficiency (24.6%, AM 0) LPE Growin AlGaAdGaAs Concentrator Solar Cells and Modules" Proc. 1 st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion (Hawaii, 1994) δ. 2096.
12. Andreev V.M., Kochnev I.V., Lantratov V.M., Shvarts M.Z. "Solar photovoltaics: Trends and prospects" Proc. 2nd World Conf. on Photovolt.Solar Energy Conversion (Vienna, 1998) p. 3757.
13. Alferov Zn.I., Lott J.A.. "Quantum-Dot Heterostructure Lasers" IEEE J. Select. Topics. Quant. Electron., 2000, 6, 439.
14. Bailey S.G., Flood D.F.. "Space photovoltaics", Progr.Photovolt., 1998, 6, 1.
15. King R.R. et al. High-Efficiency Space and Terrestrial Multijunction Solar Cells Through Bandgap Control in Cell Structures Proc. 28th IEEE Photovolt. Specialists Conf. (IEEE, N.Y., 2000) p. 998.
16. Luque A., Marti A., Wahnnon P., Tablero C., Cuadra L. "The path to ultra-high efficient photovoltaics" Workshop Proc. The path to ultra-high efficient photovoltaics. Ispra, Italy, 2002. p. 40.
17. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Арипов Х.П., Ларионов В.Р., Румянцев В.Д., "Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики" Гелиотехника, 1981, 6,3.

18. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rumyantsev V.D. Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight (John Wiley & Sons Ltd, 1997).
19. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Rumyantsev V.D., Paleeva E.V., Shvarts M.Z., Algora C. 5800 suns AlGaAs/GaAs Concentrator Solar Cells Technical Digest of the International PVSEC-11 (Sapporo, Japan, 1999) p. 147.
20. Rumyantsev V.D., Hein M., Andreev V.M., Bett A.W., Dimroth F., Lange G., Letay G., Shvarts M.Z., Sulima O.V. Concentrator array based on GaAs cells and Fresnel lens concentrators Proc. 16th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. (Glasgow, 2000) p. 2312.
21. Hein M., Meusel M., Baur C., Dimroth F., Lange G., Siefer G., Tibbits T.N.D., Bett A.W., Andreev V.M., Rumyantsev V.D.. Proc. 17th Eur. Photovolt.Solar Energy Conf. (Munich,Germany, 2001) p. 496.
22. Rumyantsev V.D., Chosta O.I., Grilikhes V.A., Sadchikov N.A., Soluyanov A.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M. "Terrestrial and space concentrator PV modules with composite (glass-silicone) Fresnel lenses" Proc. 29th IEEE Photovolt Specialists Conf. (New Orleans, 2002), p. 1596.
23. Rumyantsev V.D., Andreev V.M., Sadchikov N.A., Bett A.W., Dimroth F., Lange G. "Experimental installations with high-concentration PV modules using III-V solar cells" Proc. Conf. PV in Europe. (Rome, 2002).
24. Cotal H.L. et al. "The Results of the First World Photovoltaic Scale Recalibration" Proc. 28th IEEE Photovolt. Specialists Conf. (Anchorage, 2000) p. 955.
25. Yamaguchi M. "The path to ultra-high efficient photovoltaics" Workshop Proc. The path to ultra-high efficient photovoltaics. (Ispra, Italy, 2002) p. 15.
26. Yamaguchi M., Luque A. IEEE "Transactions on Electron Devices". 1999, 46, 41.
27. Andreev V.M., Larionov V.R., Lantratov V.M., Grilikhes V.A., Khvostikov V.P., Rumyantsev V.D., Sorokina S.V., Shvarts M.Z., Yakimova E.V. "Space concentrator module based on short focus linear Fresnel lens and GaAs/GaSb tandem stacks" Proc. 28th IEEE Photovolt. Specialists Conf. (Anchorage, 2000) p. 1157.
28. Neill M.J.O., Piszczor M.F., Eskenazi M.I., Botke M.M., Brandhorst H.W., Edwards D.L., Jaster P.A. "Fabrication of high efficiency, III-V multi-junction solar cells" Proc. 29th IEEE Photovolt. Specialists Conf. (New Orleans, 2002) p. 916.
29. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики. ФТП, 2004, том 38, вып. 8. стр.937-948.
30. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. «Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения (монография)», изд-во «Наука», 1989.
31. Шадрин В.И., Автономные солнечные энергетические установки с концентраторами солнечного излучения. Сборник докладов на Международной конференции "Возобновляемая энергетика 2003: состояние, проблемы, перспективы. Г. С. Петербург 4-6 ноября 2003.г. ,

32. Алферов Ж.И. Фотоэлектрическая солнечная энергетика / В сб.: Будущее науки. М.: Знание, 1978.С. 92–101.
33. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989.
34. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Romyantsev V.D. “III-V heterostructures in photovoltaics” in: “Concentrator Photovoltaics”, Eds.: A.Luque, V.Andreev, Springer Series in Optical Sciences, vol.130, 2007, pp. 25-50.
35. Лантратов В.М., Калюжный Н.А., Минтаиров С.А., Тимошина Н.Х., Шварц М.З., Андреев В.М. «Высокоэффективные двухпереходные GaInP/GaAs солнечные элементы, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии», ФТП, том 41, вып. 6, 2007, стр. 751-755.
36. Андреев В.М., Румянцев В.Д., Лантратов В.М., Шварц М.З., Калюжный Н.А., Минтаиров С.А. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН Наногетероструктурные фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии.
37. Алферов Ж.И. (Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2000) Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК Том 172, №9 Сентябрь 2002 г.
38. Norman A.G., Hanna M.C., Dippo P. at al. InGaAs/GaAs QD Superlattices: MOVPE Growth, Structural and Optical Characterization, and Application in Intermediate-Band Solar Cells//Prepared for the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition Lake Buena Vista, Florida January 3–7, 2005, NREL/CP-520-37405.
39. Дубровский В.Г. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур – М.: Физматлит, 2009. 350 с.
40. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов /Я.И. Френкель. Л.: Наука, 1972. 369 С.
41. Cánovas E., Martí A., Fuertes D. // Proceedings 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 September, 1CV.1.21 (2008), Valencia, Spain.
42. Sakato I. Band Discontinuities in Gallium Phosphide/I. Sakato H. Kawanami /Crystalline Silicon Heterojunctions Studied by Internal Photo-emission// Applied Physics Express. № 1 (2008). 091201.
43. Reported by Shell International Petroleum Co. and the G8 Renewable Energy Task Force Energy from the Desert, James & James 2003 (Science Publishers) Ltd 8-12 Camden High Street, London NW1 0JH.
44. Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. М.: Советское радио, 1975, 327 с.
45. Алферов Ж.И. и др. Некоторые фотоэлектрические свойства р-п-гетеропереходов фосфид-галлия – арсенид-галлия. ФТП, 1965, т. 7. № 4. С. 1235.
46. Алферов Ж.И. и др. р-п-гетеропереходы GaAs-GaP. В кн.: Физика р-п-переходов. Рига, «Зинатне», 1966, С. 220.

47. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Каган М.Б. и др. Солнечные преобразователи на основе гетеропереходов $p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-n\text{GaAs}$ – ФТП, 1970, т. 4 № 12, С. 2378.
48. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. и др. Патент РФ на полезную модель №47497 «Солнечная фотоэлектрическая установка». Дата приоритета от 22.02.2005.
49. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Патент РФ на изобретение №2286517 «Солнечная фотоэлектрическая установка». Дата приоритета 21.02.2005.
50. Romyantsev V.D., Solar concentrator modules with silicone-on-glass Fresnel lens panels and multijunction cells, *Optics Exp.* 2010, V. 18, Issue 101, pp. A17-A24.
51. Bagienski Will; Kinsey Geoffrey S. Li, Mingguo; Nayak Adi; Garboushian Vahan. Open circuit voltage temperature coefficients vs. concentration: Theory, indoor measurements, and outdoor measurements. *AIP Conference Proceedings*; Oct. 2012, Vol. 1477 Issue 1, p.148.
52. Gerstmaier Tobias; Van Riesen Sascha; Schulz-Gericke Jan; Gombert Andreas; Behrendt Tanja; Lorenz Elke; Steiner Marc; Schachtner Michael; Siefer Gerald; Bett Andreas W. Spectrally resolved DNI measurements: Results of a field comparison of spectroradiometers, component cells and the SOLIS satellite model. *AIP Conference Proceedings*; Oct. 2012, Vol. 1477 Issue 1, p. 131.
53. Vannier Godefroy; Zara Henri; Voarino Philippe. LED illumination: A new way to characterize cells and modules at low and medium concentration. *AIP Conference Proceedings*; Sep. 2013, Vol. 1556 Issue 1, p.152.
54. Алферов Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики/ В.М. Андреев, В.Д. Румянцев//ФТП, 2004, т.38, в.8, С.937- 948.
55. Андреев В.М., Давидюк Н.Ю., Малевски Д.А., Паньчак А.Н., Румянцев В.Д., Садчиков Н.А., Чекалин А.В., Luque A. Концентраторные модули нового поколения на основе каскадных солнечных элементов: конструкция, оптические и температурные свойства, ЖТФ, 2014. том 84, вып. 11. стр. 72-79.
56. Antonio Luque J. Will we exceed 50% efficiency in photovoltaics? *Appl. Phys.* 110, 031301 (2011) (19 pages).
57. Romyantsev V.D. Solar concentrator modules with silicone-on-glass Fresnel lens panels and multijunction cells. *Opt. Express* 18(S1), A17-A24 (2010).
58. King R.R., Pathways to 40% Efficient Concentrator Photovoltaics // Law D.C., Fetzez C.M., Sherif R.A., Edmondson K.M., Kurtz S.//Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference 6-10 June, 2005, Barcelona, Spain.
59. García-Linares P., López E., Ramiro I., Datas A., Antolín E., Shoji Y., Sogabe T., Okada Y., Martí A. and Luque A., "Voltage limitation analysis in strain-balanced InAs/GaAs N quantum dot solar cells applied to the intermediate band concept," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2014, vol. 132, pp. 178-182.
60. Romyantsev V.D., Chekalin A.V., Davidiyuk N.Yu., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Pan'chak A.N. Cell chip temperature measurements in different operation regimes of HCPV modules. *AIP Conf. Proc.* 2013, 1556, 138.
61. Romyantsev V. D., Davidiyuk N. Yu., Ionova E. A., Malevskiy D. A., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N. A.; Sturm M. HCPV Modules With Primary And Secondary Minilens Panels. CPV-6. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1277.

62. Rumyantsev V.D., Larionov V.R., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Chekalin A.V., Shvarts M.Z. Evaluation of the solar cell internal resistance in I-V measurements under flash illumination AIP Conf. Proc. 2012, 1477, 152.
63. Cuadra L., Marti A., Lopez N. II 3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, Japan, 2003. PCD IPL-B2-01.
64. Norman A.G. InGaAs/GaAs QD Superlattices: MOVPE Growth, Structural and Optical Characterization, and Application in Intermediate-Band Solar Cells // Han-na M.C., Dippo P., Levi D.H., Reedy R.C., Ward J.S. and Al-Jassim M.M. Prepared for the 31 IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition Lake Buena Vista, Florida Jan. 3-7, 2005 February 2005, NREL/CP-520-37405.
65. Марончук И.Е. Кулюткина Т.Ф., Марончук А.И., Найденова М.В., Чорный И.В. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава/Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. М.: Наука. Интерпериодика. 2005. №12. С. 97-101.
66. Марончук И.Е, Кулюткина Т.Ф. Формирование наногетероэпитаксиальных структур из жидкой фазы, საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „გამოყენებითი ფიზიკის აქტუალური საკითხები“, მარტი, 2011.
67. Nozik A.J. Quantum Dot Super Solar Cells // Physic E. 2002, V.14.- P.115 120.
68. Trapaidze I., Goderdzishvili G., Chikovani R., Minashvili T. Photo electric converters (Photovoltaic) and the energy power systems, DPG Spring Meeting (Deutsche Physikalische Gesellschaft), 30 Mar.-04 Apr. 2014, Dresden, Germ.
69. ტრაპაიძე ი. მზის ენერჯის ფოტოელექტრო გარდამქმნელი მოდულები და მათ საფუძველზე აგებული ენერგეტიკული სისტემები, (მოხსენება), სტუდენტთა 81-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2014 წ.
70. Trapaidze I.T., Avaliani J.J., Avaliani I.M., Chikovani R.I., Khachidze T.I., Increase of efficiency of photoelectric transformers of solar concentrated energy on the basis of A³B⁵ semiconductor compounds with allowance of quantity of released heat, International School of Nanophotonics and Photovoltaics – italia, September, 2013.
71. Goderdzishvili G., Berakchiani V., Jghenti M. “Photovoltaic instalations with sunlight concentrators”. International school on New Materials and Renewable Energy, Programme and Abstracts, 19-23 September; Georgia, Tbilisi-2012.
72. ტრაპაიძე ი. თ., გოდერძიშვილი გ.ი., ჟღენტი მ.ი., ჭულუხაძე ნ.წ., „მზის კონცენტრირებული გამოსხივების ფოტოელექტრო გარდამქმნელი მოდულის დამუშავება“ Georgian Engineering News (GEN), 1, 2015.
73. Trapaidze I., Chikovani R., Goderdzishvili G., Khachidze T., Trapaidze L. Increase of efficiency of photoelectric transformers of solar concentrated energy systems on the basis of III-V semiconductor compounds, 79th Annual Meeting of the DPG and DPG Spring Meeting (Deutsche Physikalische-Gesellschaft), 15-20 March, 2015, Berlin, Germany.

74. Goderdzishvili G., Mkheidze T., Chikovani R., Trapaidze I. Prospects of the development of production of photoelectric semiconductor convertors of solar energy in Georgia, Georgian Engineering News N1, 2004.
75. Trapaidze I., Berkovitz B., Khasieva R., Minashvili T.A., Davitadze K.D., Iluridze G. Effect of optical anisotropy in barrier structure Au-GaAs (001), NOVA Science Publisher – “Georgian International Journal of Science and Technology”, USA, volume 3, issue 1, 2011.
76. Trapaidze I., Jghenti M., Berakchian V., Chulukhadze N. Elaboration of the method of local thermal oxidation for designing of integrated multielement light-emitting indicators, Georgian Engineering News (GEN), #1 (vol. 69) 2014.
77. Trapaidze I., Goderdzishvili G., Trapaidze L., Jghenti M., Chulukhadze N., Esiava N. Photovoltaic installations with sunlight concentrators”, International School of Nanophotonics and Photovoltaics ISNP, Italy-Georgia Georgian Technical University, Sept. 2014.
78. Trapaidze I., Chikovani R., Goderdzishvili G., Trapaidze L. Main direction of photoelectric converters research in Georgia. Conference Berlin, der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), NJP, Mar. 25-30, 2012.
79. Trapaidze I., Chikovani R., Goderdzishvili G. Prospects of Solar energy in Georgia. International School of Nanophotonics and Photovoltaics (ISNP) – italy, Sept. 2013;
80. Trapaidze I., Jgenti M., Trapaidze L., Goderdzishvili G. Treatment of light emitting equipment on the base of III-V semiconductive compound for information visual reflectionsystems. Conference Regensburg, der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), New Journal of Physics, Mar. 10-15, 2013.