

კონცენტრატორების ეფექტური გამოყენების
ზოგიერთი ასპექტი A^3B^5 მასალებზე დამზადებულ
მზის ენერგიის ფოტოელექტრულ გარდაქმნელებში

თ. ი. ხაჩიძე, ი. მ. ავალიანი, დ. მ. შალამბერიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ინსტიტუტი “ოპტიკა”
თბილისი, საქართველო
txachidz@gmail.com

მიღებულია 2015 წლის 8 სექტემბერს

ანოტაცია

კვლევის ძირითად მიზანს წარმოადგენს A^3B^5 ტიპის ნახევარგამტარული მზის ფოტოელექტრული გარდაქმნელებისათვის ეფექტური ლინზა-კონცენტრატორების დამუშავება. ეფექტურობაში იგულისხმება ის, რომ ფოტოელექტრული გარდაქმნისას მზის ენერგია, რომელიც ეცემა ლინზა-კონცენტრატორს, მინიმალური დანაკარგებით გავიდეს მასში და მიეწოდოს ნახევარგამტარულ ფოტოელემენტს. სფერული და ფრენელის ლინზები, რომლებიც გამოიყენება კონცენტრატორებად, ხასიათდება საკმაოდ დიდი ოპტიკური დანაკარგებით, რაც ძირითადად გამოწვეულია ქრომატული და გეომეტრიული აბერაციებით, არეკვლით ზედაპირიდან და დიდი კონცენტრაციისას (დიდი ლინზების გამოყენებისას) ფოკუსირებული სინათლის დიდი ზომებით (ფოკუსირებული სინათლე აჭარბებს ფოტოელემენტის ზომებს და არ ხდება მისი სრულად გამოყენება). ქრომატული და გეომეტრიული აბერაციების და ფოკუსირებული სინათლის ზომების შესამცირებლად ჩვენ მიზანშეწონილად ჩავთვალეთ მზის ენერგიის ფოტოელექტრული გარდაქმნელებისათვის დამუშავდეს და დამზადდეს ოპტიკური ლინზა-კონცენტრატორები ასფერული ზედაპირებით, ხოლო ზედაპირიდან სინათლის არეკვლის შესამცირებლად ლინზის ზედაპირი დაიფაროს განმარტებული საფარით.

დღეს მსოფლიოში ყველაზე მეტად გავრცელებულია სილიციუმის ფოტოელემენტები (მონო- და პოლიკრისტალური), მათი ხვედრითი წილი მზის ენერგიის ფოტოელექტრული გარდაქმნელების ბაზარზე 86 % აღემატება. მიუხედავად იმისა, რომ მესამე და მეხუთე ჯგუფის ელემენტებისაგან შემდგარ A^3B^5 ტიპის ფოტოელემენტებს მაღალი მქვ ახასიათებთ, ძალიან მოკრძალებულია მათი გამოყენება. ეს ძირითადად გამოწვეულია ამ ელემენტების მაღალი ფასით (განსაკუთრებით ორ- და სამკასკადიანი ელემენტებისა), რაც, თავის მხრივ, განპირობებულია იმ კრისტალური სტრუქტურის ღირებულებით, რომლითაც ისინი მზადდება. სამაგიეროდ, სილიციუმის ელემენტებისაგან განსხვავებით, მათ შეუძლიათ დანაკარგების გარეშე გარდაქმნან მზის გამოსხივების კონცენტრირებული ენერგია კონცენტრაციის საკმაოდ მაღალი ხარისხით (100-ზე მეტი). ანუ ფოტოელემენტის მცირე ფართობს მიეწოდება ბევრად მეტი მზის ენერგია და მიიღება მისი პროპორციული ელექტრული ენერგია. ეს, თავის მხრივ, მასალის (სტრუქტურის) ფართობის ეკონომიის საშუალებას იძლევა და, შესაბამისად, მცირდება ფოტოელემენტის ფასიც ყოველ გამომუშავებულ ვატზე [1].

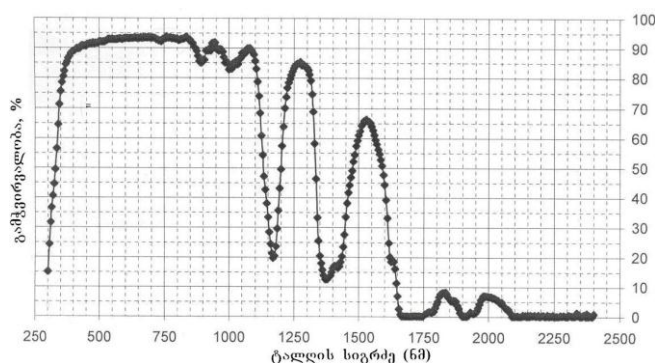
მზის ენერგიის კონცენტრირებისათვის ძირითადად გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის (სფერული, ფრენელის და სხვ.) ლინზები და სარკეები. თავისთავად მზის ენერგიის ელექტრულ ენერგიად გარდაქმნისას პიველ რიგში მინიმალური უნდა იყოს

დანაკარგები მისი კონცენტრირებისას. ანუ რაც შეიძლება მეტმა სხივურმა ენერგიამ უნდა მიაღწიოს ფოტოელემენტამდე. ამ ამოცანის გადასაჭრელად საჭიროა კვლევების ჩატარება ახალი ეფექტური კონცენტრატორების დასამუშავებლად.

აქედან გამომდინარე, ჩვენი სამუშაოს ძირითად მიზანს წარმოადგენდა, კვლევების ჩატარება ოპტიკური კონცენტრატორების გამოყენების ეფექტურობის გასაზრდელად მენდელეევის ქიმიურ ელემენტთა პერიოდული სისტემის მესამე და მეხუთე ჯგუფის ელემენტებისაგან შემდგარი – A^3B^5 -ტიპის ნახევარგამტარული ფოტოელემენტებისათვის. ექსპერიმენტისათვის ძირითადად გამოყენებული იქნება GaInP / GaAs / Ge სტრუქტურის მქონე ფოტოელემენტი, აქტიური ზედაპირის ფართობით 1×1 სმ². კვლევების ჩატარება პირველ რიგში მოითხოვს ოპტიკური კონცენტრატორებისათვის მასალის შერჩევას და შემდგომ ამ მასალით კონცენტრატორების კონსტრუქციისა და დამზადების ტექნოლოგიის დამუშავებას.

კონცენტრატორად შესაძლებელია გამოყენებული იქნას, როგორც ლინზები ასევე სარკეები. მათ დასამზადებლად იყენებენ მინას ან ოპტიკურად გამჭვირვალე ორგანულ მასალებს. მასალის შერჩევისას ძირითადი კრიტერიუმებია მისი სპექტრალური გამჭვირვალობისა და ფოტოელემენტის სპექტრალური მგრძნობიარობის თანხვედრა და დამზადების ტექნოლოგიის სიმარტივე (სიიაფე).

მასალებიდან ერთ-ერთი ხელმისაწვდომია პოლიმეთილაკრილატი PMMA. ამ პოლიმერულ მასალას გააჩნია კარგი ოპტიკური მახასიათებლები (გამჭვირვალობა). **ნახაზზე 1** მოცემულია გამჭვირვალობის (პროცენტებში) დამოკიდებულება მზის ენერგიის ტალღის სიგრძეზე (ნანომეტრებში).



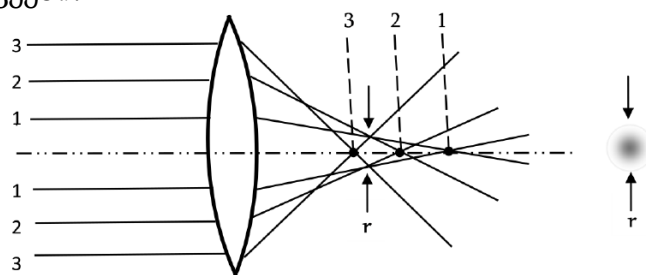
ნახაზი 1. გამჭვირვალობის (%) დამოკიდებულება მზის ენერგიის ტალღის სიგრძეზე.

როგორც ვხედავთ, ამ მასალას გააჩნია საკმაოდ მაღალი გამჭვირვალობა სპექტრის ხილულ არეში. ამ მახასიათებლებიდან, აგრეთვე, ჩანს, რომ პოლიმეთილაკრილატის გამჭვირვალობის სპექტრის მაქსიმუმი სრულად მოიცავს A^3B^5 სტრუქტურის მქონე ფოტოელემენტების მგრძნობიარობის სპექტრს. გამომდინარე აქედან, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ პოლიმეთილაკრილატისაგან დამზადებული კონცენტრატორების გამოყენება GaInP / GaAs / Ge სტრუქტურის ფოტოელემენტებთან საკმაოდ ეფექტური იქნება.

ეფექტური მუშაობისათვის კონცენტრატორებს უნდა გააჩნდეთ კარგი ოპტიკური მახასიათებლები. ამიტომ დიდი მნიშვნელობა აქვს ასეთი მახასიათებლების მქონე ლინზების გათვლისა და დამზადების იაფი და საიმედო ტექნოლოგიის შექმნას.

ტექნიკური მოთხოვნებიდან გამომდინარე, ლინზა-კონცენტრატორის დამუშავებამდე საჭიროა განისაზღვროს მისი ტიპი. დღეისათვის მზის

ფოტოელექტრულ გარდამქმნელებში ლინზა-კონცენტრატორებად ფართოდ გამოიყენება ფრენელის ლინზები. მათი ძირითადი უპირატესობა მცირე სისქეა, მაგრამ მათ კონსტრუქციაში მაღალია სინათლის პარაზიტული გაბნევა კონცენტრირებული წრეების გადასასვლელებზე, რაც იწვევს ამ ტიპის ლინზის მიერ კონცენტრირებული სხივური ენერგიის საკმაოდ მაღალ დანაკარგებს. გამომდინარე აქედან, ჩვენ უპირატესობა მივანიჭეთ ისეთ ლინზებს და სარკეებს რომლებშიც ნაკლებია სხივური ენერგიის დანაკარგები. ასეთებია სფერული, ასფერული და ხაზოვანი ფოკუსის ლინზები და პარაბოლური სარკეები.



ნახაზი 2. სხივთა სვლა სფერულ ლინზაში.

სფერული ლინზები (ნახაზი 2) საკმაოდ გავრცელებულია, მაგრამ ამ ტიპის ლინზების ნაკლოვანებას წარმოადგენს სფერული აბერაცია ანუ მათი ოპტიკური ძალა ნაპირებზე ცენტრთან შედარებით გაცილებით მეტია. შესაბამისად, ლინზის სხვადასხვა უბანს სხვადასხვა ფოკუსური მანძილი აქვს და სხივთა პარალელური ნაკადის ზუსტად ერთ წერტილში დაფოკუსირება შეუძლებელია. როგორც ნახაზიდან 2 ჩანს, 1, 2 და 3 სხივები ლინზის სხვადასხვა უბანს ეცემა და ლინზის ზედაპირთან დაცემის კუთხეც სხვადასხვა აქვთ. შესაბამისად, ლინზაში გავლის შემდეგ ისინი სხვადასხვა წერტილში იკრიბებიან და დაფოკუსირებულ სინათლის ლაქას გარკვეული r რადიუსი გააჩნია და ამ ლაქაში სინათლის ინტენსივობა არათანაბრადაა განაწილებული. დიდი დიამეტრის ($d > 200$ მმ) ლინზების შემთხვევაში $r > 10$ მმ. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ მცირე ზომის ფოტოელემენტებისათვის კონცენტრირებული სინათლის ნაწილი გავა ელემენტის საზღვრებს გარეთ და, რადგანაც სწორედ კიდეებზე კონცენტრირდება სინათლის დიდი ნაწილი, გვექნება სხივური ენერგიის საგრძნობი დანაკარგები. გარდა ამისა, კონცენტრირებისას სხივური ენერგიის არათანაბარი განაწილება ფოტოელემენტზე იწვევს მის არასტაბილურ მუშაობას, რადგან შესაძლებელია მისი კიდეები უფრო გადაცხელდეს, ვიდრე ცენტრალური ნაწილი.

სფერული ლინზის აღნიშნული ნაკლოვანებები თითქმის სრულად აღმოიფხვრება ასფერული ლინზების შემთხვევაში. ასფერული ლინზის სიმრუდის რადიუსი ზედაპირის სხვადასხვა წერტილში განსხვავებულია და ისეა შერჩეული, რომ მის ზედაპირზე პარალელური სხივები (კონკრეტული ტალღის სიგრძისათვის) ერთ ფოკუსში იკვეთებიან ანუ სინათლის დაფოკუსირება შესაძლებელია ერთ წერტილში.

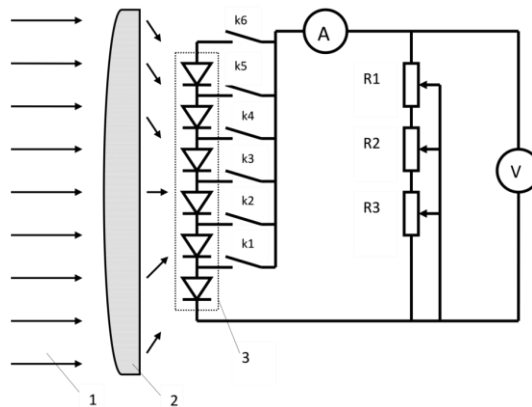
მიუხედავად იმისა, რომ ასფერული ლინზის გამოყენებით პრაქტიკულად იხსნება სფერული აბერაციის პრობლემა და სხივები უნდა ფოკუსირდებოდეს ერთ წერტილში, რეალურ პირობებში ფოკუსირებულ სინათლეს მაინც აქვს გარკვეული ზომები, რაც ქრომატული აბერაციითაა გამოწვეული ანუ სხვადასხვა ტალღის სიგრძის სხივები სხვადასხვა კუთხით გარდატყდება და სხვადასხვა ფოკუსში იკრიბება.

ასფერული ლინზების უპირატესობის შესამოწმებლად დამზადდა და GaInP / GaAs / Ge სტრუქტურის ფოტოელემენტთან გამოიცადა ერთი და იგივე დიამეტრის სფერული და ასფერული ლინზები (ცხრილი 1).

ცხრილი 1.

ლინზის ზომები, მმ	ლინზის ზედაპირი	კონცენტრირებული სინათლის ლაქის მინიმალური დიამეტრი, მმ	ფოტოელემენტის ფართობი, მმ	კონცენტრაციის ხარისხი, F_1 / F_2	მიღებული ელექტრული სიმძლავრე, ვტ
Ø 195	სფერული	11	10 × 10	298	6.1
Ø 195	ასფერული	8	10 × 10	298	6.4

ცხრილში 1 მოყვანილი ლინზების დიამეტრი და, შესაბამისად, კონცენტრაციის ხარისხი შეირჩა, როგორც მაქსიმალურად შესაძლებელი, იმ პირობიდან გამომდინარე, რომ ფოტოელემენტის ტემპერატურა არ აცილებოდა 60°C სპეციალური გაცივების სისტემების გარეშე (ფოტოელემენტი განთავსებული იყო 300 სმ^2 ზედაპირის ფართობის ალუმინის რადიატორზე). ცხრილიდან ჩანს, რომ კონცენტრირებული სინათლის ლაქის მინიმალური დიამეტრი ასფერულ ლინზას საგრძნობლად ნაკლები აქვს, რაც საშუალებას იძლევა კონცენტრირებული სინათლის ნაკადი ფოტოელემენტის ზედაპირზე ჩავტოვოთ და არ დავკარგოთ, რაც, თავის მხრივ, აისახა მიღებული ელექტრული სიმძლავრის სიდიდეზე. რითაც დასტურდება ასფერული ზედაპირის ლინზების უპირატესობა სფერულთან შედარებით.



ნახაზი 3. ხაზოვანი ფოკუსის მქონე კონცენტრატორის ერთ ხაზზე განლაგებული ფოტოელემენტების გამოსაკვლევი სტენდის სქემა.

1 – მზის გამოსხივება, 2 – ხაზოვანი ფოკუსის მქონე კონცენტრატორი და 3 – ერთ ხაზზე განლაგებული ფოტოელემენტების მატრიცა.

შემდგომი კვლევები დაეთმო ცილინდრული ასფერული ლინზის კონცენტრატორად გამოყენებას. ასეთი ლინზების ფოკუსურ ლაქას ხაზი წარმოადგენს, რომლის სიგრძეც ლინზის სიგანის ტოლია. გამოკვლეული იქნა ხაზოვან ფოკუსში მოთავსებული ფოტოელემენტის მიერ გამომუშავებული ელექტროენერგიის სიდიდის შეფასება გრძივ ფოკუსში ერთ ხაზზე დალაგებულ ფოტოელემენტებთან. უნდა აღვნიშნოთ, რომ ასეთი სქემით ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგები ტექნიკურ ლიტერატურაში ვერ იქნა მოძიებული. ამასთან ასეთი სქემა იძლევა რიგ დადებით შედეგებს. უპირველეს ყოვლისა ფოტოვოლტური ბლოკი ბევრად მარტივდება. მარტვდება ასევე ელექტრული წრედის სქემის მუშაობაც და ამასთან აშკარად იაფდება, რადგანაც ლინზა კონცენტრატორების რაოდენობა ბევრად მცირდება. ჩატარებული ცდების სქემა მოცემულია **ნახაზზე 3** [2].

როგორც ვხედავთ, ამ ერთი ლინზის ხაზოვანი ფოკუსის ქვეშ გვერდი გვერდ მიერთებულია ექვსი ფოტოელემენტი. ცდების შედეგად დადგინდა, რომ გამომუშავებული ელექტრული ენერგია ერთ ხაზზე დალაგებული ელემენტების რაოდენობის პროპორციულად იზრდებოდა (იხ. ცხრილი 2). აქედან შეიძლება დავასკვნათ, რომ ელემენტების რაოდენობა შეზღუდული არ არის. ის დამოკიდებულია მხოლოდ ლინზის სიგანეზე და, თუ საჭიროა ფოტოელემენტების გრძელი ზოლი, რომელიც აღემატება მოცემული ლინზა-კონცენტრატორის სიგანეს, მაშინ შესაძლებელი გვერდზე მიდგმით – მეორე ხაზოვანი ფოკუსის მქონე ანალოგიური პარამეტრების მქონე ლინზის დამატებით.

ცხრილი 2.

ფოტოელემენტების რაოდენობა	კონცენტრატორის გარეშე			კონცენტრატორით (კონცენტრაცია = 17)		
	ძაბვა, ვ	დენის ძალა, მე	ელექტრული სიმძლავრე, მეგ	ძაბვა, ვ	დენის ძალა, მე	ელექტრული სიმძლავრე, მეგ
ერთი ელემენტი	0.7	0.81	0.567	0.7	13.6	9.52
ორი ელემენტი	1.4	0.81	1.134	1.4	13.5	18.40
სამი ელემენტი	2.1	0.82	1.722	2.1	13.5	28.35
ოთხი ელემენტი	2.8	0.82	2.296	2.8	13.5	37.80
ხუთი ელემენტი	3.5	0.81	2.835	3.5	13.4	46.90
ექვსი ელემენტი	4.2	0.81	3.400	4.2	13.5	56.70

ხაზოვანი ფოკუსის ლინზების გამოყენება საგრძნობლად ამცირებს კონცენტრატორების რაოდენობას (ერთი კონცენტრატორი სჭირდება ელემენტებს ზოლს და არა თითოეულ ელემენტს), ამარტივებს ფოტოვოლტური ბლოკის აწყობას, ზრდის მის საიმედოობას და ამცირებს მის ფასს. ამჟამად ჩვენს მიერ წარმოებს სამუშაოები ხაზოვანი ფოკუსის სარკეების გამოყენებაზე კონცენტრატორებად. სარკეების შესაძლო უპირატესობაა ნაკლები დანაკარგები ქრომატულ აბერაციაზე.

მაგრამ, როდესაც მზის სხივები ეცემა ფოტოელექტრული გარდამქმნელის ოპტიკურ ლინზა-კონცენტრატორს, ჰაერიდან მყარ გარემოში გადასვლისას მისი დიდი ნაწილი გარდატყდება და აღწევს ფოტოელექტრულ გარდამქმნელამდე, ნაწილი კი იმის გამო, რომ დიდია სხვაობა ჰაერისა და ლინზა-კონცენტრატორის გარატების მაჩვენებლებს შორის აირეკლება კონცენტრატორის როგორც ზედა, ასევე – ქვედა ზედაპირიდან. არეკვლის პროცენტული სიდიდე დამოკიდებულია კონცენტრატორის მასალაზე. ჩვენს მიერ დამუშავებული და PMMA მასალაზე დამზადებული ლინზა-კონცენტრატორები ზედაპირებიდან აირეკლავენ მზიდან მოსული ენერგიის 10 % მეტს. უფრო მაღალია არეკვლაზე დანაკარგები მინის ლინზა-კონცენტრატორების გამოყენების შემთხვევაში. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ მზის ენერგიის საკმაოდ დიდი ნაწილი ვერ აღწევს ფოტოელექტრულ გარდამქმნელამდე და, შესაბამისად, მცირდება მზის ენერგიის ელექტრულ ენერგიად გარდაქმნის ეფექტურობა. იმისათვის, რომ ლინზა-კონცენტრატორების ეს ნაკლოვანება გამოვასწოროთ, საჭიროა შევამციროთ ლინზიდან არეკვლილი სინათლე იმ სპექტრარულ დიაპაზონში, რომლის მიმართაც აქვს მაქსიმალური მგრძნობიარობა მზის ენერგიის ფოტოელექტრულ გარდამქმნელს.

თანამედროვე ოპტიკაში ობიექტივების დამზადებისას ეს ნაკლოვანება საგრძნობლად სწორდება ლინზების განშუქოვნებით, რითაც იზრდება ობიექტივების შუქძალა. მზის ფოტოენერგეტიკაში ჩვენს მიერ მოძიებული მასალებიდან გამომდინარე მზის კონცენტრატორების შუქძალის გაზრდის შესახებ ინფორმაცია არ არსებობს. სტატიებში და პატენტებში საუბარია მხოლოდ ფოტოელემენტის შთანთქმის კოეფიციენტის გაზრდაზე. ჩვენი აზრით, ლინზა-კონცენტრატორების განშუქოვნება ისევე, როგორც ობიექტივების ლინზების შემთხვევაში, საკმაოდ გაზრდის მათ შუქძალას და, შესაბამისად, ფოტოვოლტური ბლოკის ეფექტურობას.

ლინზის განშუქოვნება, გულისხმობს მის ზედაპირზე თხელი ფირის ან რამდენიმე ფირის დაფენას. გამომდინარე ფირის მასალიდან, სისქიდან და რაოდენობიდან, შესაძლებელია შეირჩეს სინათლის ტალღის სიგრძის ის დიაპაზონი რომლისათვისაც არეკვლა იქნება მინიმალური. განშუქოვნებით ლინზიდან არეკვლის შემცირება ემყარება ინტერფერენციის მოვლენას. როდესაც მყარ ოპტიკურ ზედაპირზე დაფენილია n_1 გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე თხელი ფირი (მაგალითად, სილიციუმის ორჟანგი), თუ ფირის სისქე დაცემული სხივის ტალღის სიგრძის მეოთხედია, მაშინ ფირის ზედა და ქვედა ზედაპირებიდან არეკვლილი სხივების ინტერფერენციის გამო (რადგან ისინი სხვადასხვა ფაზაშია) ერთმანეთს ჩააქრობენ და მათი ჯამური ინტენსივობა ნულის ტოლი გახდება.

აღნიშნულის განსახორციელებლად მინის ლინზებზე, გარდატეხის მაჩვენებლით $n = 1.5$, ჩვენს მიერ დაფენილი იქნა სამი ფენისაგან $\text{SiO}_2 - \text{ZrO}_2 - \text{SiO}_2$ შემდგარი განმაშუქებელი საფარი. მიღებული განშუქოვნებული ლინზა-კონცენტრატორი გამოიცადა ფოტოვოლტურ ბლოკში. ექსპერიმენტმა გვიჩვენა, რომ განშუქოვნებული ლინზა-კონცენტრატორების გამოყენებისას მიღებული ელექტრული სიმძლავრის ნაზრდი მნიშვნელოვანია და ის რამდენიმე პროცენტს აღწევს. აღნიშნული კვლევები ჩატარებული იქნა მინის ლინზაზე. ასევე მიმდინარეობს სამუშაოები ორგანული მინისაგან დამზადებული ლინზების განშუქოვნებისათვის, რისთვისაც საჭირო შეიქმნა ფირების ვაკუუმური დაფენის დანადგარის შემდგომი მოდერნიზაცია. რაც მალე დასრულდება და, სავარაუდოდ, გვექნება ორგანული მინისაგან დამზადებული განშუქოვნებული ლინზა კონცენტრატორები [3].

ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევების შედეგები საშუალებას იძლევა ფოტოვოლტური ბლოკისთვის კონცენტრატორის პროექტირებისას მინიმუმამდე იქნას დაყვანილი იმ სხივური ენერგიის დანაკარგები რომელიც კონცენტრატორის გავლით ეცემა ფოტოელემენტს.

დამოწმებანი

1. Ж. И. Алфёров, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики. ФТП., 2004, 38, 8, 937-948.
2. ჯ. ავალიანი, თ. ხაჩიძე. ფოტოვოლტაჟის ბლოკი ახალი სქემით, სადაც ფოტოელემენტები განლაგებულია ერთ ღერძზე, ოპტიკური კონცენტრატორების ხაზოვან ფოკუსში. ენერგია, 2009, 1 (49), 27-29.
3. ი. ავალიანი, რ. ჩიქოვანი, თ. ხაჩიძე, ზ. ბერიშვილი. განშუქოვნებული ლინზა-კონცენტრატორების დამუშავება და დამზადება ფოტოვოლტაიკური ბლოკის ენერგოეფექტურობის გასაზრდელად. Georg. Eng. News, 2014, 1, 27-31.