

## ანტიამრეკლი ფენები სხვადასხვა გეომეტრიული ფორმის მზის ენერჯის ოპტიკური ლინზა კონცენტრატორებისათვის

თენგიზ ხაჩიძე<sup>1,2</sup>, ნიკოლოზ ხაჩიძე<sup>1</sup>

<sup>1</sup>სსიპ ინსტიტუტი „ოპტიკა“

<sup>2</sup>საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### ანოტაცია

ნაშრომში მოყვანილია კვლევები, რომლებიც დაკავშირებულია მზის ენერჯის ლინზა კონცენტრატორებში ანტიამრეკლი ფენების გამოყენებასთან და მისი ეფექტურობის დამოკიდებულების დადგენასთან ლინზა კონცენტრატორის გეომეტრიულ ფორმაზე. ექსპერიმენტის პირველადი შედეგებით დადგინდა, რომ ფოტოელექტრული გარდამქმნელის ლინზა კონცენტრატორის ანტიამრეკლი ფენის ეფექტურობა დამოკიდებულია იმ ზედაპირის ფორმაზე რომელზეც ის არის დაფენილი მზის სხივური ენერჯის მისაღებად. მაქსიმალური ეფექტი მიიღება მაშინ, როდესაც იგი დაფენილია ბრტყელ ზედაპირზე. რასაც მივყავართ იმ დასკვნამდე, რომ ანტიამრეკლი ფენის მქონე კონცენტრატორის შესაქმნელად მიზანშეწონილია ბრტყელ ამოზნექილი ლინზის გამოყენება.

**საკვანძო სიტყვები:** ლინზა-კონცენტრატორი, ანტიამრეკლი ფენა, მზის ენერჯია.

ამ ბოლო დროს სულ უფრო აქტუალური ხდება მზის ენერჯით ელექტრული ენერჯის მისაღებად ფოტოელექტრული გარდამქმნელების გამოყენება. ფოტოენერჯეტიკის ბაზარი ყოველწლიურად 40%-ით იზრდება. ბაზარზე ძირითადად დომინირებს მონო და პოლიკრისტალურ სილიციუმზე შექმნილი მზის ფოტოელექტრული გარდამქმნელები, რომელთა ბაზარზე დამზადებული პანელები ბიუჯეტური და ხელმისაწვდომია ფართო მასებისათვის. ასეთი პანელების მარგი ქმედების კოეფიციენტი 10-20%-ის ფარგლებშია და საკმაოდ მისაღებია საყოფაცხოვრებო პირობებში გამოსაყენებლად. თუმცა სპეცტექნიკაში (სამხედრო დანიშნულების, კოსმოსური და სხვა) მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნას ფოტოელექტრული გარდამქმნელები უფრო მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტით. ამ შემთხვევაში აქცენტი ძირითადად კეთდება მზის ენერჯის მრავალკასკადიან ფოტოელექტრულ გარდამქმნელებზე. ასეთი გარდამქმნელების მარგი ქმედების კოეფიციენტი დღეისათვის უკვე 45%-ს აჭარბებს, მაგრამ მათი თვითღირებულება გამომუშავებულ ყოველ ვატზე ძალიან მაღალია, რადგან ძალიან ძვირი ჯდება

მრავალკასკადიანი კრისტალის დამზადება. ასეთ ელემენტებში გამომუშავებულ ყოველ ვატზე თვითღირებულების შესამცირებლად ფართო გამოყენება ჰპოვა ოპტიკურმა ლინზა-კონცენტრატორებმა. ამ დროს დიდი ფართობის ლინზა-კონცენტრატორზე დაცემული სხივური ენერგია ფოკუსირდება გაცილებით მცირე (შესაძლებელია რამდენიმე ასეულჯერ) ფოტოელექტრულ გარამქმნელზე და შესაბამისად იზოგება კრისტალის ფართობი (მასალა). ლინზა კონცენტრატორების გამოყენებისას დიდი მნიშვნელობა აქვს მათში სხივური დანაკარგების მინიმუმამდე დაყვანას [1].

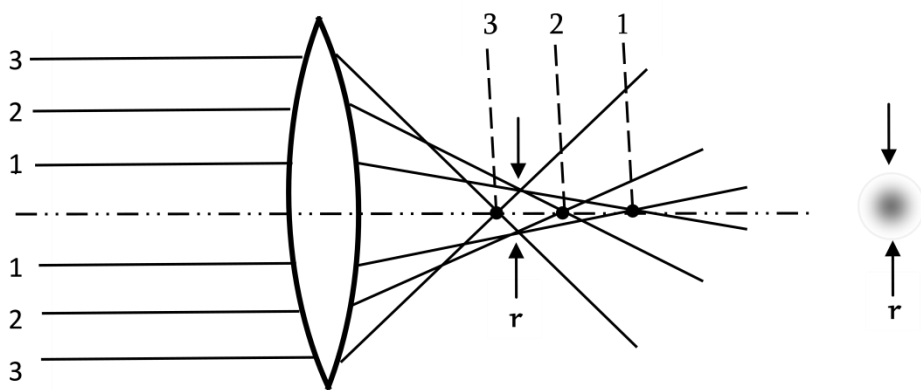
სხივური ენერგიის დანაკარგები ოპტიკურ კონცენტრატორებში ისევე როგორც ნებისმიერი ლინზაში ძირითადად განპირობებულია ზედაპირებიდან არეკვლით. ამის გამომწვევი მიზეზი ის არის, რომ მზის სხივის დაცემისას ლინზა-კონცენტრატორზე ჰაერიდან მყარ გარემოში (ლინზაში) გადასვლისას მათი (ჰაერისა და ლინზა-კონცენტრატორის) გარდატეხის მაჩვენებლებს შორის დიდი სხვაობის გამო სინათლის სხივის ნაწილი აირეკლება კონცენტრატორის ორივე ზედაპირიდან და ვერ აღწევს ფოტოელექტრულ გარამქმნელამდე. არეკვლის პროცენტული სიდიდე დამოკიდებულია კონცენტრატორის მასალაზე. არეკვლაზე დანაკარგები ლინზა-კონცენტრატორების გამოყენების შემთხვევაში საშუალოდ 10% აღემატება. ეს იმას ნიშნავს, რომ მზის ენერგიის მნიშვნელოვანი ნაწილი ვერ აღწევს ფოტოელექტრულ გარამქმნელამდე და შესაბამისად ამცირებს მზის ენერგიის ელექტრულ ენერგიად გარდაქმნის ეფექტურობას.

ამ პრობლემის გამოსასწორებლად ჩვენს მიერ შემოთავაზებული იქნა ოპტიკურ კონცენტრატორებზე დაფენილიყო ანტიამრეკლი ფენები იმ სპექტრულ დიაპაზონისათვის რომლის მიმართადაც მაქსიმალური მგრძობიარობა გააჩნია მზის ენერგიის ფოტოელექტრულ გარამქმნელს. განხორციელდა ექსპერიმენტი რომელმაც დაადასტურა, რომ ლინზა კონცენტრატორი მასზე დაფენილი ანტიამრეკლი ფენით რამდენიმე პროცენტით ზრდიდა ფოტოელექტრული გარამქმნელიდან გამომავალ ელექტრულ სიმძლავრეს. რაც მიუთითებდა ასეთი მეთოდით კონცენტრირებული მზის ენერგიის გარდაქმნის ეფექტურობის გაზრდაზე [2,3]. თუმცა კვლევების გაგრძელებამ გვიჩვენა, რომ ელექტრული სიმძლავრის პროცენტული ნაზრდი დამოკიდებული იყო დღის მონაკვეთზე, რომელზეც კვლევები ტარდებოდა და გამოყენებულ ლინზაზე. კვლის შედეგები ერთი და იგივე ლინზისთვის დღის სხვადასხვა მონაკვეთში მოცემულია ცხრილში-1 [4].

**ცხრილი 1.**

მზის გამოსხივების ინტენსივობა, ვტ/მ <sup>2</sup> , (დრო, სთ)	ფოტოელემენტიდან მიღებული ელექტრული სიმძლავრე, ვტ x10 <sup>-3</sup>			
	კონცენტრატორის გარეშე	კონცენტრატორით, კონცენტრაციის ხარისხით 35		
		ანტიამრეკლი ფენის გარეშე	ანტიამრეკლი ფენით	მიღებული სიმძლავრის ნაზრდი,%
600 (12:00)	2,3	77	78,7	2,2
760(13:00)	2,91	90,5	92,6	2,3
740(14:00)	2,84	89,20	91,25	2,3
700(16:00)	2,68	84,8	86,7	2,25

როგორც ცხრილიდან ჩანს დროის სხვადასხვა მონაკვეთში ელექტრული სიმძლავრის პროცენტული ზრდა სხვადასხვაა. ჩვენი აზრით ეს განპირობებულია იმით, რომ დროის სხვადასხვა მონაკვეთში მზის გამოსხივების სპექტრალური შემადგენლობა სხვადასხვაა. ანტიამრეკლი ფენების ეფექტურობა კი დამოკიდებულია გამოსხივების სპექტრალურ დიაპაზონზე. ჩვენ შემთხვევაში გამოყენებული იქნა ანტიამრეკლი საფარი შემდეგი ფენებით -  $\text{SiO}_2$  - სისქით 85nm ( $n=1,47$ );  $\text{ZrO}_2$ - სისქით 63nm ( $n=1,98$ );  $\text{SiO}_2$  - სისქით 85nm ( $n=1,47$ ); მისი ეფექტურობა განსაკუთრებულად გამოხატული იყო სპექტრალურ დიაპაზონში 500-900ნმ [4]. შემდეგი კვლევა ჩატარდა დღის ერთი და იგივე მონაკვეთში ერთი და იგივე დიამეტრის და სხვადასხვა ფოკუსური მანძილის სფერული და ასფერული ლინზების გამოყენებით. კვლევებმა აჩვენა, რომ რაც უფრო მოკლეფოკუსიანია ლინზა ანტიამრეკლი ფენების გამოყენება ნაკლებ ეფექტს იძლევა. ეს განსაკუთრებით შეიმჩნეოდა სფერულ ლინზებში. ჩვენი ანალიზით ეს გამოწვეულია იმით, რომ მოკლეფოკუსიან ლინზებს გააჩნიათ მაღალი სიმრუდე. რის გამოც მასზე (ანტიამრეკლ ფენებზე) სხივების დაცემის კუთხე, რაც უფრო ვშორდებით ლინზის ცენტრს მით უფრო განსხვავებულია ვერტიკალურისაგან და შესაბამისად ანტიამრეკლი ეფექტი იკარგება. სფერულ ლინზებში ეს მოვლენა უფრო გამოხატულია, რადგან მათ გააჩნიათ სფერული აბერაცია ანუ მათი ოპტიკური ძალა ნაპირებზე ცენტრთან შედარებით გაცილებით მეტია ნახ.1. როგორც ნახაზიდან 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.



ნახ.1. სხივთა სვლა სფერულ ლინზაში

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 სიგრძის) ერთ ფოკუსში იკვეთებიან ანუ სინათლის დაფოკუსირება შესაძლებელია ერთ წერტილში [5]. მიუხედავად იმისა, რომ ასფერული ლინზის გამოყენებით პრაქტიკულად იხსნება სფერული აბერაციის პრობლემა და სხივები უნდა დაფოკუსირდებოდეს ერთ წერტილში, რეალურ პირობებში დაფოკუსირებულ

სინათლეს მაინც აქვს გარკვეული ზომები, რაც ძირითადად ქრომატული აბერაციითაა გამოწვეული ანუ სხვადასხვა ტალღის სიგრძის სხივები სხვადასხვა კუთხით გარდატყდება და სახვადასხვა ფოკუსში იკრიბება და დაფოკუსირებულ სინათლის ლაქას გარკვეული მცირე რადიუსი მაინც გააჩნია, მაგრამ ამ ლაქაში სინათლის ინტენსივობა დაახლოებით თანაბრადაა განაწილებული. გარდა ამისა ლინზის კიდეებში სხივების დაცემის კუთხის ცვლილება ვერტიკალურისაგან ნაკლებია და შესაბამისად ნაკლებად იკარგება ანტიამრეკლი ეფექტი.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე ანტიამრეკლი ფენები მით უფრო მაღალეფექტურად მუშაობს რაც ნაკლებია ლინზის ზედაპირის სიმრუდე და ეფექტურობის მაქსიმუმს აღწევს ბრტყელ ზედაპირებზე. ამ მოსაზრებამ მიგვიყვანა იმ დასკვნამდე, რომ კონცეტრტორად ანტიამრეკლი ფენით გამოყენებული იქნას ბრტყელ ამოზნექილი ლინზა. ლინზის სწორედ ბრტყელი მხარე იქნას გამოყენებული მზის სხივური ენერჯის მისაღებად. ამ შემთხვევაში ლინზის ზედაპირზე დაცემული ყველა სხივი იქნება მისი მართობული და შესაბამისად ანტიამრეკლი ფენის მართობულიც და ანტიამრეკლი ეფექტიც მაქსიმალურად იმუშავებს. ეს მოსაზრება გამოიცადა ექსპერიმენტალურად.

პირველ შემთხვევაში ექსპერიმენტისთვის გამოყენებული იყო ორი იდენტური ლინზა, რომელთაგან ერთზე ანტიამრეკლი ფენა დაფენილი იყო ბრტყელ ზედაპირზე, ხოლო მეორეზე მრუდე ზედაპირზე. ორივე ლინზა რიგრიგობით გამოიცადა წყვილში ერთი და იმავე ფოტოელექტრულ გარდამქმნელთან მზის გამოსხივების ერთი და იგივე ინტენსივობისას. ექსპერიმენტის დროს მზის სხივური ენერჯია ლინზების იმ ზედაპირზე ეცემოდა, რომელზეც დაფენილი იყო ანტიამრეკლი ფენა. ექსპერიმენტმა გვიჩვენა, რომ სხივური ენერჯის დაცემისას ლინზაზე, რომლის ბრტყელ ზედაპირზეც დაფენილი იყო ანტიამრეკლი ფენა ვიღებდით დაახლოებით 1,7%-ით მეტ ელექტრულ სიმძლავრეს ფოტოელექტრული გარდამქმნელის გამოსასვლელზე.

მეორე ექსპერიმენტის შემთხვევაში გამოყენებული იქნა ერთი და იგივე ლინზა რომლის ორივე (ბრტყელ და მრუდე) ზედაპირზე იყო დაფენილი ანტიამრეკლი ფენა. მზის სხივური ენერჯია ჯერ ეცემოდა ბრტყელ ზედაპირზე დაფენილ ანტიამრეკლ ფენას შემდეგ მრუდე ზედაპირზე დაფენილ ანტიამრეკლ ფენას. ამ დროს ფოტოელექტრული გარდამქმნელის გამოსასვლელზე 1,4%-ით მეტი ელექტრული სიმძლავრე მივიღეთ იმ შემთხვევაში როდესაც სინათლე ბრტყელ ზედაპირზე ეცემოდა.

როგორც ვხედავთ ორივე ექსპერიმენტმა აჩვენა, რომ ანტიამრეკლი ფენების გამოყენებისას მეტ ელექტრულ ენერჯიას ვიღებთ იმ შემთხვევაში ანტიამრეკლი ფენის მქონე ლინზის ზედაპირი, რომელსაც ეცემა სხივური ენერჯია ბრტყელია. მეორე ექსპერიმენტის შემთხვევაში ელექტრული სიმძლავრის ნაკლები პროცენტული მაჩვენებელი განპირობებულია იმით, რომ ამ შემთხვევაში ლინზას ორივე ზედაპირზე ჰქონდა ანტიამრეკლი ფენა და მათი ჯამური ეფექტურობა ვლინდებოდა. თუმცა უკეთესი შედეგი მაინც მიიღება, როდესაც სხივური ენერჯია ეცემა ბრტყელ ზედაპირზე დაფენილ ანტიამრეკლ ფენას.

კვლევები ჩატარებული იქნა ლინზების მცირე რაოდენობაზე. სიმძლავრის მატების ზუსტი პროცენტული სიდიდის დასადგენად საჭიროა ექსპერიმენტის ჩატარება დიდი რაოდენობით სხვადასხვა დიამეტრის და ფოკუსური მანძილის ლინზებზე. გარდა ამისა ექსპერიმენტში



გამოყენებული ლინზების რაოდენობა შეამცირებს ანტიამრეკლი ფენების პარამეტრების გადახრებით გამოწვეულ ცდომილებებს. აღნიშნული კვლევები შეიძლება ჩაითვალოს პირველადად, რითაც ჩვენ დავრწმუნდით, რომ ფოტოელექტრული გარდამქმნელის ლინზა კონცენტრატორზე დაფენილი ანტიამრეკლი ფენის ეფექტურობა დამოკიდებულია იმ ზედაპირის ფორმაზე რომელზეც ის არის დაფენილი მზის სხივური ენერჯის მისაღებად.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. I.I. Maronchuk, D.D. Sanikovich, V.I. Mironchuk. Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 62, No 2 (2019), pp. 105–123.
2. I.M. Avaliani, R.I. Chikovani, T.I. Khachidze, . Z.V. Berishvili. Designing and production of coated lenses-concentrators for enhancing the power efficiency of the photovoltaic unit. GEORGIAN ENGINEERING NEWS. 2014, No.1 (vol.69), pp. 27-31.
3. I.M. Avaliani, Z.V. Berishvili, T.I.Khachidze. Anti-Reflective coating lenses to boost solar energy efficiency of a III-V semiconductor photovoltaic cell. EU PVSEEC 2014 29<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Amsterdam, The Netherlands. 2014.
4. I. M. Avaliani, T.I. Khachidze, G.G. Dekanozishvili, Z.V. Berishvili. Antireflective and Hydrophobic Coated Lenses for Photovoltaic Moduls. American Journal of Nano Research and Applications. Volume 5, Issue 3-1, May 2017, Pages: 13-17.  
<http://www.sciencepublishinggroup.com/specialissue/226029>
5. T.I. Khachidze, I.M. Avaliani, D.M. Shalamberidze. Some aspects of efficient use of A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> materials-based concentrators for photovoltaic cells of solar energy converters. Nano Studies №12, 2015, p.p. 133-138.

## Anti-reflective coatings for solar power optical lens concentrators of different geometric shapes

Tengiz Khachidze<sup>1,2</sup>, Nikoloz Khachidze<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LEPL Institute "Optica"

<sup>2</sup> Georgian Technical University

---

### Abstract

The paper presents studies related to the use of anti-reflective coatings in lens concentrators of solar energy and determining the dependence of its efficiency on the geometric shape of the lens concentrator. According to the preliminary results of the experiment, it was determined that the efficiency of the anti-reflective layer of the concentrator lens of the photoelectric converter depends on the shape of the surface on which it is laid to receive solar radiation energy. The maximum effect is obtained when it is laid on a flat surface. Which leads to the conclusion that to create a concentrator with an anti-reflective layer, it is appropriate to use a flat convex lens.

**Keywords:** *anti-reflective coatings, lens concentrators, solar energy.*