



ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

სადოქტორო პროგრამა: ფიზიკა

მოდული: მიკრო და ნანოელექტრონიკა

ნინო ფონჯავიძე

სადისერტაციო ნაშრომი თემაზე:

„ოქროსა და ვერცხლის ნანონაწილაკებით დოპირებული თხევადკრისტალური და პოლიმერული სტრუქტურების მიღება და კვლევა“

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

ფიზიკა–მათემატიკის აკადემიური დოქტორი გია პეტრიაშვილი

პროგრამის ხელმძღვანელი:

ფიზიკა–მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი პროფესორი ამირან ბიბილაშვილი



Ivane Javakhishvili Tbilisi State University
Faculty of Exact and Natural Sciences

Doctoral Program: **Physics**

Module: **Micro and Nanoelectronics**

Nino Ponjavidze

Dissertation Thesis:

**“Preparation and Investigation of Silver and Gold Nanoparticle Doped Polymer and
Liquid Crystal Nanocomposites”**

Scientific Supervisor:

Academi Doctor of Phys-Math Sciences **Gia Petriashvili**

Program Supervisor:

Doctor of Phys-Math Sciences Professor: **Amiran Bibilashvili**

Tbilisi 2018

სარჩევი

შესავალი.....	8
I თავი.....	21
1.1 ნანონაწილაკები და ნანოკომპოზიტები.....	22
1.2 პოლიმერები	28
1.3 თხევადი კრისტალები.....	32
1.3.1 ქოლესტერული თხევადი კრისტალები.....	33
IIთავი.....	38
2.1 სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპი.....	38
2.2 ატომურ-ძალური მიკროსკოპი	41
2.3 კონფოკალური მიკროსკოპი.....	43
2.4 სპექტროფოტომეტრი	45
2.5 პოლიმერული ფირების დამზადების ტექნოლოგია.....	46
2.6 ქოლესტერული ნარეგების დამზადების ტექნოლოგია	47
IIIთავი	50
3.1 ექსპერიმენტის ჩატარება.....	50
3.2 ფოტო-თერმული გარდაქმნა ვერცხლის ნანონაწილაკებითა და თერმოქრომული საღებარით დამატებულ პოლიმერულ ნანოკომპოზიტში	53
III თავის დასკვნა.....	60
IVთავი.....	63
4.1 სინათლის გამოსხივების გაძლიერება ქოლესტერულ თხევად კრისტალში ლუმინესცენციური საღებარის და ოქროს ნანონაწილაკების დამატებით.....	65
4.2 ექსპერიმენტის ჩატარება	74
4.3 ოქროს ნანონაწილაკებით მოდიფიცირებული სელექტიური ამრეკლაობის წანაცვლება ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში ოქროს ნანონაწილაკების სხვადასხვა კონცენტრაციების დროს.....	77
4.4 ლუმინესცენციის გაძლიერება ოქროს ნანონაწილაკებით და ლუმინესცენციური საღებარებით დამატებულ ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში.....	79

4.5 ქაღალდის საფუძველზე დამზადებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე	82
4.5.1 მიღებული სამეცნიერო შედეგები.....	82
4.5.2 დრეკადი თხევადკრისტალური სარკის დამზადება.....	84
4.5.3 ფოტოპოლიმერიზაცია.....	85
4.6 ტემპერატურის განაწილების ვიზუალიზაცია ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებულ ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში	88
4.7 ოპტიკურ–თერმული გარდაქმნების შედეგად ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადი კრისტალის სელექტიური ამრეკლობის პიკების წანაცვლება	89
4.8 თხევადკრისტალური ნახევარგამტარები	90
4.9 მოლეკულების ორიენტაციაზე დამოკიდებული გამტარებლობა	91
4.10 სინათლით მართვადი გამტარებლობა	92
IV თავის დასკვნა	93
საბოლოო შედეგები.....	94
გამოყენებული ლიტერატურა	96

აბსტრაქტი

წინამდებარე დისერტაციაში წარმოდგენილია თანამედროვე ნანომეცნიერებისა და ნანოტექნოლოგიების ისეთი აქტუალური საკითხები, როგორებიცაა: კეთილშობილი მეტალური (ვერცხლის და ოქროს) ნანონაწილაკებით დამატებულ პოლიმერულ და თხევადკრისტალურ ნანოკომპოზიტებში ოპტიკურ-თერმული და ოპტიკურ-ოპტიკური გარდაქმნების შესწავლა. შესაბამისად, დისერტაციაში განხილულია ორი სტრატეგიული საკითხი:

1. დამზადებულია და გამოკვლეულია ვერცხლის ნანონაწილაკებითა და თერმოქრომული საღებარებით დისპერგირებული პოლიმერული ნანოკომპოზიტები. მოცემულ ნანოკომპოზიტებში მიღწეულია ვერცხლის ნანონაწილაკების თანაბრად განაწილება ისეთი სახით, რომ არ ხდება მათი კლასტერიზაცია. ნაჩვენებია, რომ ასეთი სახის ნანოკომპოზიტები მოქმედებს, როგორც თერმოქრომული ნივთიერება, რომელსაც გააჩნია ისეთი გამორჩეული პარამეტრები, როგორებიცაა: ოპტიკური სპექტრის ფართო უბანში შთანთქმისა და ლუმინესცენციის ზოლების ტემპერატურულად მართვადი თანაბარი და უწყვეტი გადაწყობა. შესწავლილია სინათლის ზემოქმედებით ოპტიკურ-თერმული გარდაქმნები, როდესაც მოქმედი სინათლის სიხშირე ემთხვევა ვერცხლის ნანონაწილაკების ზედაპირული პლაზმონური ელექტრონების რეზონანსული რხევების სიხშირეებს. ნაჩვენებია ოპტიკურ-თერმული გარდაქმნების შედეგად სითბური ველების განაწილების ვიზუალიზაცია ნანო და მიკრო მასშტაბებში.

2. დამზადებულია ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული თხევადკრისტალური ნანოკომპოზიტები და შესწავლილია მათი ფიზიკური პარამეტრები. განსხვავებით აქამდე ცნობილი ექსპერიმენტებისა, მასპინძელ მატრიცად გამოყენებულია ქოლესტერული თხევადი კრისტალი, რომლის სელექტიური არეკვლის პიკი მდებარეობს ოპტიკური სპექტრის ხილულ უბანში და მოხდა მოცემული სელექტიური პიკების უწყვეტი და თანაბარი გადაწყობა. შემუშავებული ინოვაციური მეთოდის საფუძველზე განხორციელდა ოქროს ნანონაწილაკების ექსტრემალურად დიდი რაოდენობით დამატება ქოლესტერულ თხევადკრისტალურ სტრუქტურებში, ისე რომ არ წარმოიქმნა ოქროს ნანონაწილაკების აგრეგაცია (კლასტერიზაცია).

დისერტაციაში შესრულებული სამუშაოების შედეგები თავის გამოყენებას ჰპოვებს ისეთ მიმართულებებში როგორებიცაა:

ახალი თაობის, ფოტონურ კრისტალებზე დაფუძნებული ნანოსტრუქტურირებული ნივთიერებებისა და ხელსაწყოების, თერმოდრესირებადი ლუმინესცენციური დისკლებებისა და თერმო-ოპტიკური პრინტერების, გარემოსადმი უსაფრთხო, თერმოქრომული ტანსაცმლის დამზადება. მოწყობილობები ტემპერატურების მიკრო და ნანომასშტაბებში განაწილების ვიზუალიზაციისათვის, თხევადკრისტალური ნახევარგამტარები, ახალი სახეობის მზის ელემენტები გაზრდილი ფოტოოპტიკური მახასიათებლებით, ახალი თაობის ამრეკლავი დისკლები, ნანოზომების მქონე, კვანტური ინფორმაციის დაგროვების ხელსაწყოები, თერმულად მართვადი ოპტიკური ფილტრები, ჭკვიანი ფანჯრები და გამოსახულების ინფრაწითელი გარდამქმნელები. მედიცინაში: ბიოლოგიურ ქსოვილებში ფლუორესცენციური გამოსხივების გაძლიერება სპექტრის ხილულ და ინფრაწითელ უბნებში და ფოტო-თერმული თერაპიის გამოყენების შესაძლებლობები.

Abstract

In the presented thesis are discussed such actual and topical issues of the modern nanoscience and nanotechnology, as an investigation of optical-thermal and optical-optical transformations in polymer and liquid crystal nanocomposites doped with noble metals (silver and gold) nanoparticles. Accordingly, the thesis discusses two strategic issues:

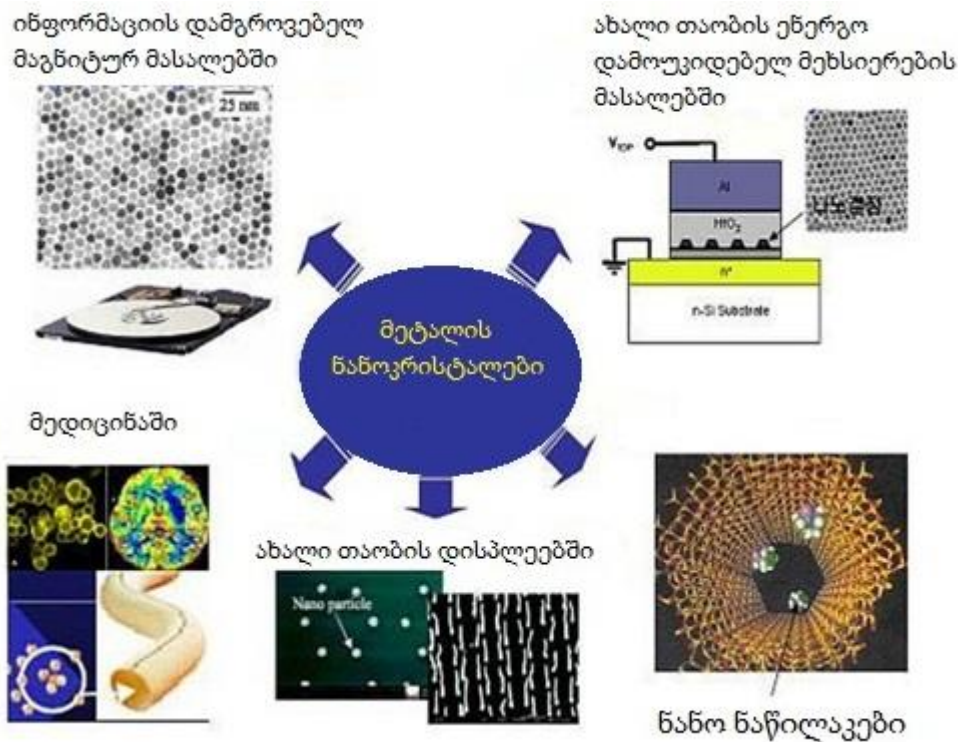
1. Were prepared and investigated the polymer nanocomposites dispersed with silver nanoparticles and thermochromic dyes. In these nanocomposites, silver nanoparticles are distributed homogeneously in such a way to avoid their clustering. It is shown that such kind of nanocomposites act as a thermochromic substance that has such distinctive parameters as the smooth and continuous tuning of the absorption and luminescence bands in a wide range of optical spectrum controlled by temperature. Upon exposure to light was investigated the optical-thermal transitions when the frequency of the operating light coincides with the frequencies of surface plasmon electrons of silver nanoparticles. Was shown the distribution of thermal fields at the nano and micro scales as a result of optical-thermal transformations.
2. Were prepared liquid crystalline nanocomposites, doped with gold nanoparticles and were investigated their physical parameters. Unlike to the previously known experiments, as the host did not occur.

The results of the works performed in the thesis can find its application in the following areas: Manufacture of the nanostructured substances and devices based on the new generation of photon crystals, thermodynamic luminescence displays and thermo-optical printers, fabrication of safe thermo chromic wears. Devices for the visualization of temperature distribution at micro-and nano scales, liquid crystal semiconductors, new types of solar elements with increased photo-optical characteristics, new generation of reflective displays, nano scale quantum information storages, thermally controlled optical filters, smart windows and infrared image converters. In medicine: amplification of the fluorescent emission in biological tissues in the visible and infrared ranges of the spectrum and the possibilities of using in photo-thermal therapy.

matrix is used cholesteric liquid crystal whose selective reflection peaks are located in the visible range of the optical spectrum and was carried out their continuous tuning. Based on the developed innovative method, in cholesterol liquid crystal structures was doped an extremely large number of gold nanoparticles so that, the aggregation (clustering) of gold nanoparticles

შესავალი

ნანომეცნიერებისა და ნანოტექნოლოგიების განვითარებამ საშუალება მოგვცა შეგვექმნა გამორჩეული ელექტრული, ოპტიკური და თერმო-ოპტიკური თვისებების მქონე ახალი ნანო ზომის მქონე მასალები, რომელთა თვისებები მკვეთრად განსხვავდება მათი მოცულობითი (მასური) მდგომარეობისაგან [1]. ნანონაწილაკების თვისებების დამოკიდებულება მათსავე ზომებზე, შეისწავლება და გამოიყენება სხვადასხვა დანიშნულებისა და სახეობის მქონე ელექტრონულ და ოპტიკურ ხელსაწყოებში [2]. ნანონაწილაკებს აქვთ მრავალი პოტენციური გამოყენება ელექტროოპტიკაში, როგორც ინფორმაციის ზეჩქარი გადამტანები, ინფორმაციის ოპტიკური მატარებლები [3]. თანამედროვე ბიო-ნანო-ტექნოლოგიაში, მარკერის სახით [4], ბიოსენსორებად [5] და სხვა. ინტენსიური კვლევა-ძიება მიმდინარეობს ნანონაწილაკების კოლექტიური თვისებების დასადგენად და ამ თვისებების სამართავად [6-8].



სურათი 1. ნანონაწილაკების გამოყენების სფეროები

ნანონაწილაკებს (1-100 ნმ) აქვთ უნიკალური ელექტრონული, მაგნიტური, ოპტიკური, ფოტონური და კატალიზური თვისებები [9,10].

ნანონაწილაკები შეიძლება შეყვანილი იქნას სხვადასხვა ნივთიერებებში, მაგალითად მეტალებში, ნახევარგამტარებში [11], ბირთვ-გარსიანი შედგენილობის სტრუქტურებში [12] და ორგანული პოლიმერებში [13].

ცნობილია რომ, მეტალების მიერ სინათლის შთანთქმა ხდება უპირატესად ელექტრონულ – ზონური გადასვლებით. მეტალურ ნანონაწილაკებში არსებობს გადასვლების სამი ტიპი:

1. ზონათაშორისი გადასვლა (ელექტრონების გადასვლა სავალენტო ზონიდან გამტარებლობის ზონის თავისუფალ დონეებზე).
2. ზონის შიდა გადასვლები (გადასვლები რომლებიც ხდება გამტარებლობის ზონის დონეებს შორის).
3. პლაზმონური ზონური გადასვლები (გამტარებლობის ზონაში მყოფი ელექტრონების კოლექტიური ოსცილაცია, რომელთაც ასევე ეწოდებათ ნაწილაკური, ანუ ზედაპირული პლაზმონები).

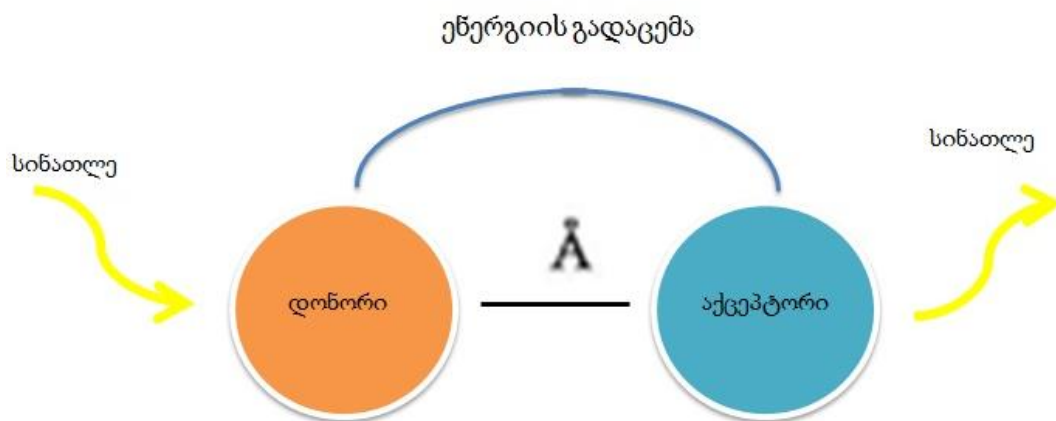
მეტალის ნანონაწილაკების ოპტიკური თვისებები უმთავრესად დამოკიდებულია მის ზედაპირულ პლაზმონურ რეზონანსზე, სადაც პლაზმონი წარმოადგენს მეტალის ნანონაწილაკების თავისუფალი ელექტრონების კოლექტიურ ოსცილაციებს. რეზონანსული პიკის ტალღის სიგრძე და შთანთქმის სპექტრის სიგანე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ნანონაწილაკების ზომებზე [14,15], ფორმებზე [16–18], მეტალის სახეობაზე [19], ასევე გარემოსა და ექსპერიმენტის პირობებზე [20].



სურათი 2. სხვადასხვა მეტალების წყალხსნარები

ოპტიკური ენერჯის თერმულად გარდაქმნის ვიზუალიზაცია და კონტროლი ნანო და მიკრო სტრუქტურებში წარმოადგენს ძირითად გამოწვევას თანამედროვე მეცნიერებების მრავალ მიმართულებებში, რომლებიც გამოყენებადია ისეთ სფეროებში, როგორებიცაა: ნანოსითხეები, ნანოკატალიზები, სიმსივნის ფოტო-თერმული თერაპია, წამლის მიწოდება, გამოსახულების მიღება და სპექტროსკოპია, ინფორმაციის დაგროვება და დამუშავება ნანომასშტაბებში და მზის ენერჯის გარდაქმნა [21,22]. მოცემულ ნაშრომში ჩვენ განვიხილავთ და შევისწავლით ვერცხლისა და ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებულ ნანოკომპოზიტებს. კერძოდ: თუ გვაქვს აღმგზნები სინათლის ველი, ზედაპირულ პლაზმონები შეიძლება იყოს მიზეზი სინათლის შთანთქმის, გაბნევის და ლოკალური ველების გაძლიერების. ამ პირობის დაკმაყოფილება შეუძლიათ ზოგიერთ ლითონებს მაგალითად ვერცხლს, სპილენძს, ალუმინს, ნატრიუმს და ინდიუმს. კეთილშობილი მეტალების ოქროს და ვერცხლის ნანონაწილაკების ზედაპირული პლაზმონური რეზონანსის პიკი მდებარეობს ოპტიკური სპექტრის ხილულ უბანში.

სითბოს გამოთავისუფლების მექანიზმი მარტივია - ლაზერის ელექტრული ველი ნანოკრისტალის შიგნით ძლიერად არხევს მობილურ გადამტანებს და ამ გადამტანების რხევის შედეგად ადგილი აქვს სითბური ენერჯის გარდაქმნას.



სურათი 3. ენერჯის გადაცემა

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, სითბოს წარმოქმნა განსაკუთრებით ძლიერად მიმდინარეობს პლაზმური რეზონანსის შემთხვევაში [1]. ფაზური გარდაქმნების არ არსებობის გამო, ტემპერატურის განაწილება ოპტიკურად სტიმულირებული ნანონაწილაკების გარშემო აღიწერება ჩვეულებრივი სითბური განტოლებით:

$$P(r) C(r) = \partial T(r, t) / \partial t = \Delta K(r) \times \Delta T(r, t) + Q(r, t) \quad (1)$$

სადაც r და t არის კოორდინატი და დრო, $T(r, t)$ ლოკალური ტემპერატურა, ნივთიერების პარამეტრები: $P(r)$ სიმკვრივე, $C(r)$ კუთრი სითბო და $K(r)$ თბოგამტარობა. ფუნქცია $Q(r, t)$ არის ენერჯის წყარო, რომელიც მოდის ნანონაწილაკებზე სინათლის გაბნევით

$$Q(r, t) = J(r, t) \times E(r, t) \quad (2)$$

სადაც $J(r, t)$ არის დენის სიმკვრივე და $E(r, t)$ სისტემის მასტიმულირებელი ელექტრული ველი.

გათბობის ეფექტის გაძლიერება დამოკიდებულია ნანონაწილაკების რაოდენობაზე. თითოეული ნანონაწილაკის მიერ გენერირებული სითბური ნაკადების შეკრებით ვლდებულობთ სითბოს დაგროვების ეფექტს და აღიწერება თერმული დიფუზიის განტოლებით (3).

ენერჯის წყარო ამ განტოლებაში შეიძლება ჩაიწეროს როგორც ყველა ნანონაწილაკის ენერჯიების ჯამი.

$$Q(r, t) = \sum_k Q_k(r, t) \quad (3)$$

სადაც $Q_k(r, t)$ აღწერს k -ური ნანონაწილაკის მიერ გენერირებულ სითბოს. ნანონაწილაკების რაოდენობის გაზრდა, იწვევს სისტემის ტემპერატურის მნიშვნელოვან გაზრდას [23,24].

1948 წელს, თეოდორ ფოსტერმა თავის ცნობილ ნაშრომში [25] ჩამოაყალიბა არარადიაციული ენერჯის გადასვლის თეორიის “Forster Resonance Energy Transfer “ (FRET) აღმწერი ფორმულები რითაც გამოსახულია ფორსტერის ენერჯის გადასვლის კვანტურ- მექანიკური მახასიათებლები. პირველი პარამეტრი, რომელიც ახასიათებს დონორ- აქცეპტორულ წყვილს ფორსტერის რადიუსი, არის მანძილი დონორსა და აქცეპტორის მოლეკულებს შორის ენერჯის გადაცემის ეფექტურობა არის 50% და მოცემულია ფორმულით:

$$R_0^6 = \frac{9000 \ln(10) k^2 Q_D}{128 \pi^5 N n^4} \int_0^\infty F_D(\lambda) \epsilon_A(\lambda) \lambda^4 d\lambda \quad (4)$$

სადაც k^2 არის ორიენტაციული ფაქტორი, Q_D დონორი ფლუოროფორის კვანტური გამოსავალი, n გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი, N ავოგადროს რიცხვი. (4) ფორმულის ინტეგრალური ნაწილი გამოხატავს ურთიერთგადაფარვის ხარისხს

დონორის გამოსხივების სპექტრსა და აქცეპტორის შთანთქმის სპექტრს შორის და მოცემული $J(\lambda)$,

$$J(\lambda) = \int_0^\infty F_D(\lambda) \epsilon_A(\lambda) \lambda^4 d\lambda \quad (5)$$

სადაც $F_D(\lambda)$ არის ნორმალიზებული ფლუორესცენციული გამოსხივების ინტენსიობა და $\epsilon_A(\lambda)$ არის აქცეპტორის მოლარული მშთანთქმელობა. ამ შემთხვევაში პრობლემატურს წარმოადგენს ორიენტაციული ფაქტორი k^2 , რომელიც ამ მოვლენის შედარებით რთულად განსაზღვრადი პარამეტრია და მოცემულია როგორც:

$$k^2 = (\cos \theta_T - 3 \cos \theta_D \cos \theta_A)^2 \quad (6)$$

სადაც θ_T არის კუთხე დონორის გამოსხივების დიპოლსა და აქცეპტორის შთანთქმის დიპოლს შორის. θ_D და θ_A არის კუთხეები ამ დიპოლებსა და იმ ვექტორებს შორის, რომლებიც გადაკვეთს დონორსა და აქცეპტორს [26]. ზოგადად შეუძლებელია განისაზღვროს დონორისა და აქცეპტორის ზუსტი ურთიერთ ორიენტაცია, ანუ k^2 – ის ზუსტი სიდიდე. თუმცა იგი მდებარეობს 0–სა და 4–ს შორის [26]. $k^2 = 0$ როცა გადასვლის დიპოლები ურთიერთ პერპენდიკულარული არიან და $k^2 = 4$, როცა ისინი ურთიერთ პარალელური არიან. უმეტეს კვლევებში ჩათვლილია, რომ დონორები და აქცეპტორები ქაოსურად არიან მობრუნებული და $k^2 = 2/3$ –ის ტოლია [27,28].

ენერჯის გადაცემის ეფექტურობა, როგორც ფუნქცია მოლეკულათშორისი მანძილის და ფორსტერის რადიუსისა R_0 ფორმულირებულია, როგორც

$$E[R] = \frac{R_0^6}{R_0^6 + R^6} \quad (7)$$

სადაც, R არის დონორისა და აქცეპტორის მოლეკულებს შორის მანძილი.

შესაბამისად ენერჯის გადაცემის ხარისხი მოცემულია შემდეგი ტოლობით:

$$k_T[R] = \frac{1}{\tau_D} \left(\frac{R_0}{R} \right)^6 \quad (8)$$

τ_D არის დონორის სიცოცხლის ხანგრძლიობა, ანუ ის დრო, როცა დონორი რჩება ალგუნებულ მდგომარეობაში. ჩვეულებრივ, არარადიაციული რელაქსაციის

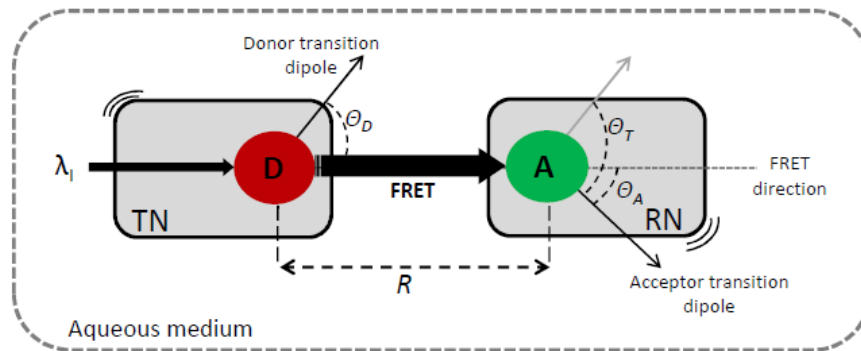
პროცესის არ არსებობისას, იგი განისაზღვრება მხოლოდ k_R -ით და მოცემულია როგორც

$$\tau_D = \frac{1}{k_R} \quad (9)$$

FRET-ის შემთხვევაში აქცეპტორისაკენ ენერგიის გადასვლა იწვევს დონორის აღზნებულ მდგომარეობაში სიცოცხლის ხანგრძლივობის შემცირებას და ფორმულირებულია, როგორც

$$\tau_{DA} = \frac{1}{k_R + k_T} \quad (10)$$

სადაც τ_{DA} არის დონორის სიცოცხლის ხანგრძლივობა აღზნებულ მდგომარეობაში, როდესაც იგი ენერგიას გამოყოფს FRET-ის საშუალებით.



სურათი 4. ენერგიის გარდაქმნა FRET

სითბური ენერგიის გარდაქმნის ვიზუალიზაცია და კონტროლი ოპტიკური საშუალებით ნანო და მიკრო ზომის სტრუქტურებში არის გასაღები მრავალი ისეთი მეცნიერებებისათვის, რომელთა გამოყენების არეალი არის ნანოკატალიზი, ნანოსითხეები, მზის ენერგიის დაგროვება, ინფორმაციის შენახვა-დამუშავება, სპექტროსკოპია და ვიზუალიზაცია, წამლის მიწოდება, კიბოს ფოტო-თერმული თერაპია და სხვა.

1. წინამდებარე სამუშაოს ძირითად მიზანს წარმოადგენს:

1. მიკრო და ნანო მასშტაბებში ოპტიკურ–თერმული გარდაქმნების ვიზუალიზაცია ვერცხლის ნანონაწილაკებით დამატებულ პოლიმერულ ნანოკომპოზიტებში.
2. სინათლის გაძლიერება ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებულ თხევადკრისტალურ ნანოკომპოზიტებში.

დასახული მიზნების განსახორციელებლად და სასურველი მინარევის მისაღებად გამოვიყენეთ კომერციულად მისაწვდომი და სერთიფიცირებული ნივთიერებები. ამ ნივთიერებების საფუძველზე მოხდა შესაბამისი ნარევების დამზადება და მათი თერმული, ოპტიკური, თერმო და ფოტო–ოპტიკური თვისებების შესწავლა. შესაბამისად, დისერტაციაში დასმულია და გადაწყვეტილია შემდეგი ამოცანები:

- პოლიმერული (პვპ) და თხევად კრისტალური ნივთიერებების მიღების ტექნოლოგიის დამუშავება.
- პოლიმერული და თხევად კრისტალური ფირების მიღების ტექნოლოგიის დამუშავება.
- შესაბამისი პროცედურების შერჩევა, ოქროს და ვერცხლის ნანონაწილაკების დისპერგირების პროცესის ჩასატარებლად.
- ვერცხლის ნანონაწილაკებითა და თერმოქრომული საღებარებით დამატებული პოლიმერული ნანოკომპოზიტების დამზადება და შესწავლა.
- ოქროს ნანონაწილაკებითა და ლუმინესცენციური საღებარების დამატებული თხევადკრისტალური ნანოკომპოზიტების დამზადება და შესწავლა.
- ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული, ქალაღდის საფუძვლის მქონე დრეკადი, ამრეკლავი სარკის დამზადება და შესწავლა.
- ფირების ოპტიკური, ფოტონური და ფოტო–ოპტიკური თვისებების გამოკვლევა.
- პოლიმერულ ნანოკომპოზიტებში ოპტიკურ–თერმული გარდაქმნების ვიზუალიზაცია.
- თხევადკრისტალურ ნანოკომპოზიტებში ოპტიკურ–ოპტიკური გარდაქმნები და სინათლის გაძლიერება.

2. ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე

პოლიმერში (პოლივინილპიროლიდონი) ან თხევად კრისტალებში ინკორპორირებული მეტალური ნანონაწილაკები და საღებარები წარმოადგენს უნიკალურ კომპოზიტებს, რომლებშიც ნანომასშტაბურ დონეზე სინერგიულად არიან გაერთიანებულები პოლიმერები ან თხევადი კრისტალები და მათი შემაჯავებლები.

ჩვენ აქ წარმოგიდგენთ ვერცხლის და ოქროს ნანონაწილაკების ირგვლივ ტემპერატურის ნანო და მიკრო მასშტაბებში შეფასების ახალ მეთოდს, რომელშიც გამოვიყენეთ თერმოქრომული ნივთიერება, საღებარი „ნილოსის წითელი“. ნანოკომპოზიტების ეს ტიპები, პოლიმერში და ქოლესტერულ თხევადკრისტალში შერეული ნანონაწილაკები, იქცევენ განსაკუთრებულ ინტერესს, რადგან მათში გაერთიანებულია ორი ან მეტი ნივთიერების თვისებები ახალი მექანიკური, ელექტრული, ფოტო, ოპტიკური და თერმული თვისებების მისაღებად.

ძირითად პრობლემად რჩება მეტალის ნანონაწილაკების ერთგვაროვანი დისპერსია და მათი სტაბილურობა მატრიცაში, რადგან მეტალის ნანონაწილაკებს ახასიათებთ აგრეგაციისაკენ მიდრეკილება, ზედაპირული თავისუფალი ენერჯის, ჰაერთან დაჟანგვის და ტენიანობის გამო. ამ ფაქტორებს შეუძლიათ მკვეთრად შეცვალონ ნანოკომპოზიტური ნივთიერებების თვისებები.

ნაშრომში წარმოდგენილი ერთი–ერთი ნანოკომპოზიტი შედგება პოლივინილპიროლიდონში (პვპ) თანაბრად დისპერგირებული ვერცხლის ნანონაწილაკებისა და ორგანული საღებარებისაგან და გამოიყენება თხელი ფირის სახით. როდესაც ნანოკომპოზიტს ვასხივებთ ხილული სინათლით, ოპტიკურ–თერმული გარდაქმნების შედეგად წარმოიქმნება ფერთა გამა, რომელიც მყისიერად იძლევა ინფორმაციას ვერცხლის ნანონაწილაკების გარშემო ტემპერატურის ცვლილებაზე. რაც წარმოადგენს ნივთიერებაში ნანონაწილაკების გარშემო ტემპერატურის შეფასების ინსტრუმენტს.

მეორე სახეობის ნანოკომპოზიტს წარმოადგენს ქოლესტერულ თხევადკრისტალებში დისპერგირებული ოქროს ნანონაწილაკები და ლუმინესცენციური საღებარი. მასპინძელ მატრიცად გამოვიყენეთ ქოლესტერული თხევადი კრისტალები და მოვახდინეთ დიდი კონცენტრაციით ნანონაწილაკების

დამატება აგრეგაციების გარეშე. მიღებული ნარევი შევიყვანეთ ოპტიკურ უჯრედში და მოვახდინეთ ლაზერული სხივით დასხივება.

შედეგად მივიღეთ ფოტოლუმინესცენციური და ლაზერული გამოსხივების გამძლიერება და მოწესრიგების პარამეტრის გაუმჯობესება.

3. ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ბოლო დროს დიდ ყურადღებას იქცევს ნანონაწილაკების მიერ გენერირებული სითბური ენერგია, რაც წარმოადგენს სადისერტაციო ნაშრომის ერთ–ერთ ძირითად თემას. შემოთავაზებული ნანოკომპოზიტების მიღების ტექნოლოგიების საფუძველზე შესაძლებელია ისეთი ხელსაწყოების დამზადება, რომლებიც გამოიყენება:

- ნანო-მედიცინაში, როგორც ეფექტური საშუალება, ადამიანის სხეულის კონკრეტულ ადგილას, სითბოს საშუალებით კიბოვანი უჯრედების დასაშლელად.
- თერმოდრესირებადი ლუმინესცენციური დისპლეებისა და თერმო-ოპტიკური პრინტერების დასამზადებლად.
- თერმულად მართვადი ოპტიკური ფილტრების და ჰკვიანი ფანჯრების დასამზადებლად.
- თხევადკრისტალური, ამრეკლავი, დრეკადი, ენერგოდამზოგავი დისპლეებისათვის.
- ნანონაწილაკებით და ლუმინესცენციური საღებარებით დამატებულ თხევად კრისტალური ნანოკომპოზიტები სინათლის გამამძლიერებლებისა და ლაზერებისათვის.
- ნანოზომების მქონე, კვანტური ინფორმაციის დაგროვების ხელსაწყოებისათვის.
- ნახევარგამტარულ თხევადი კრისტალებში.
- ახალი თაობის მზის ელემენტებსა და ენერჯის დაგროვების სისტემებში.

4. სადისერტაციო ნაშრომი წარმოდგენილია შემდეგი ძირითადი შედეგებით:

- 40 ნმ ზომის ვერცხლის ნანონაწილაკებისა და თერმოქრომული ლუმინესცენციური საღებარის (ნილოსის წითელი) დამატებით მიღებულია პოლიმერულ ნანოკომპოზიტებში, 99.98% { 90% EtOH + 10% PVP } + 0.02% Nile red, სინათლის შთანთქმისა და ლუმინესცენციის ზოლების ტემპერატურულად მართვადი, თანაბარი და უწყვეტი გადაწყობა ოპტიკური სპექტრის ფართო უბნებში 300 ნმ–დან 700 ნმ –მდე.
- მოვახდინეთ ვერცხლის ნანონაწილაკებისა და თერმოქრომული ლუმინესცენციური საღებარების დამატებით მიღებულ პოლიმერულ ნანოკომპოზიტებში არაწრფივი სინათლით (ლაზერული) მართვადი გარდატეხის მაჩვენებლის სივრცულ – დროითი მოდულაცია.
- ვაჩვენეთ, რომ 5 ნმ ზომის მქონე ოქროს ნანონაწილაკებითა და ლუმინესცენციური საღებარით (ნილოსის წითელი), დამატებულ ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში 76w%BL-036 + 26w%MLC-6247 + 4w% Au ადგილი აქვს სინათლის ~ 2 - ჯერად გაძლიერებას.
- ქოლესტერული თხევადი კრისტალის ქაღალდზე დაფენის შედეგად მიღებული იქნა ახალი სახეობის ქაღალდის საფუძველზე დამზადებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე, რომელიც გამოირჩევა ექსპლოატაციის ხანგრძლივი დროით (10 წელი), არის დრეკადი, იაფი, მაღალი გარჩევადობის. მოცემული სარკეების გამოყენებით შესაძლებელია დამზადდეს დიდი ზომის მქონე ამრეკლავი დისკლები, რომლებიც გამოიყენებენ გარე განათების წყაროებს (მზე, ნათურა, და ა.შ).
- ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში მიღებული იქნა ოქროს ნანონაწილაკებით მოდიფიცირებული სელექტიური ამრეკლაობის პიკების წანაცვლება 525 ნმ–დან 750 ნმ–მდე, რომლებიც დამოკიდებულია ოქროს ნანონაწილაკების კონცენტრაციებზე (0% –დან 19.4%– მდე).

ჩატარებული სამუშაოების გამოყენების პერსპექტივებია

- ზემოთ მიღებული ორი სამუშაოს გაერთიანების საფუძველზე (ლუმინესცენციის გაძლიერება ნანონაწილაკებით და ლუმინესცენციური საღებარებით დამატებულ თხევადკრისტალურ ნანოკომპოზიტებში და ქალაღდის საფუძველზე დამზადებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე) შესაძლებელია დამზადდეს მაღალი ეფექტურობის მქონე თხევადკრისტალური ამრეკლავი დისკლები.
- ტემპერატურის განაწილების ვიზუალიზაცია ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებულ ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში.
- ოპტიკურ-თერმული გარდაქმნების შედეგად ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადი კრისტალის სელექტიური ამრეკლავობის პიკების წანაცვლება.
- ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული თხევადკრისტალური ნახევარგამტარების მიღება.
- ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული თხევადკრისტალური მოლეკულების ორიენტაციაზე დამოკიდებული გამტარებლობა.
- ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებულ თხევადკრისტალებში სინათლით მართვადი ელექტრო გამტარებლობა.

5. ნაშრომის აპრობაცია

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული და განხილული იყო საერთაშორისო კონფერენციებზე:

- **4th International Conference “Nanotechnologies” October 24 – 27, 2016, Tbilisi, Georgia.**
- **3rd Italian-Brazilian Workshop on Liquid Crystals and 12th National Conference of SICL Portonovo (An), June 20-23, 2016**
- **4th International Caucasian Symposium on Polymers and Advanced Materials Batumi Georgia 1-4 July, 2015**

ასევე ამ სადისერტაციო თემის ფარგლებში მოპოვებული იქნა გრანტი:

- აშშ-ს სამოქალაქო კვლევებისა და განვითარების ფონდის (CRDF -GLOBAL), სსიპ - შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდისა და საქართველოს სამეცნიერო-ტექნოლოგიური განვითარების ფონდის (სსგფ) მიერ გამოცხადებული „ქართველი ქალებისათვის სამეცნიერო კვლევითი გრანტის პროგრამა“, 2014

6. პუბლიკაციები:

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ ჟურნალებში:

- Gia Petriashvili, Ridha Hamdi, Mario Ariosto Matranga, Maria Penelope De Santo, Nino Ponjavidze, Alfredo Mazzulla & Riccardo Barberi. „[Thermochromism, a perspective of light to heat conversion mediated by metal nanoparticles.](#)“ *Molecular Crystals and Liquid Crystals* . 2017წ 649(1):38-44
- G. Petriashvili, N. Ponjavidze. „[Microscale Temperature Visualization in Silver Nanoparticle Doped Polymer Nanocomposite.](#)“ *Taylor & Francis Group, Chemical Engineering of Polymers*. 2017წ. Chapter 11 pp.129-138
- G. Petriashvili, L. Devadze, Ts. Zurabishvili, N. Sepashvili, N. Ponjavidze, Kokhta Japaridze, Maria P. De Santo, Mario A. Matranga, Ridha Hamdi, Federica Ciuchi, Riccardo Barberi . „Paper like cholesteric interferential mirror“ . *OPTICS EXPRESS*. 2013წ. Vol. 21, No. 18 p.20821-20830
- G. Petriashvili, A. Chanishvili, N. Ponjavidze, M. Aronishidze, S. Tavzarashvili, K. Tevdorashvili. „Thermochromic Properties of the Silver Nanoparticles and Organic Luminescence Dye-Doped Polymer Nanocomposite“ . *GEORGIAN ENGINEERING NEWS*. 2013წ. N1, v 65, 134-142

7. ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა

დისერტაცია შედგება შესავალის, 4 თავის, დასკვნებისა და ციტირებული ლიტერატურის ნუსხისგან.

პირველ თავში მოცემულია იმ ლიტერატურის მიმოხილვა, რომელიც ეხება დისერტაციაში დასმულ ამოცანებს და შესაბამისად დასმული ამოცანების საფუძველზე ჩამოყალიბებულია ნაშრომის მიზნები და ამოცანები.

მეორე თავში აღწერილია გამოყენებული ხელსაწყოების, კერძოდ ოპტიკური, ფლუორესცენციული, ატომურ-ძალოვანი მიკროსკოპების და სპექტრომეტრის მუშაობის პრინციპის აღწერა. ასევე მოცემულია დისერტაციაში გამოყენებული საწყისი ნივთიერებების და მათ საფუძველზე შექმნილი პოლიმერული და თხევადკრისტალური ნანოკომპოზიტების ფოტო და თერმო- ოპტიკური თვისებები.

მესამე თავში განხილულია ვერცხლის ნანონაწილაკებით და თერმოქრომული საღებარებით დამატებულ პოლიმერულ ნანოკომპოზიტებზე ჩატარებული ექსპერიმენტები და მოცემულია მიღებული შედეგები.

მეოთხე თავში წარმოდგენილია ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ნანოკომპოზიტები. აღწერილია ჩვენს მიერ შემუშავებული მეთოდის საფუძველზე ქოლესტერული თხევად კრისტალებში ანომალურად დიდი რაოდენობის (20% წონითი მიხედვით) ოქროს ნანონაწილაკების შეყვანა. მიღებულია ქოლესტერული თხევადკრისტალური სელექტიური არეკვლის პიკების ოქროს ნანონაწილაკების კონცენტრაციაზე დამოკიდებული წანაცვლება და სინათლის გამოსხივების გაძლიერება, როგორც კოჰერენტულ, ისე არაკოჰერენტულ შემთხვევებში. ასევე წარმოდგენილია ქალაღის საფუძველზე დამზადებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე. მოცემული თავის ბოლოს განხილულია აღნიშნული ნანოკომპოზიტების გამოყენების პერსპექტივები.

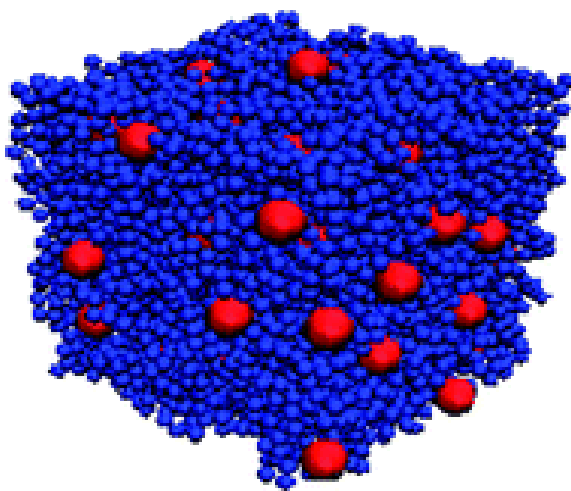
თავი პირველი

ლიტერატურული მიმოხილვა

უკვე მრავალი წელია ინტენსიურად მიმდინარეობს ნანონაწილაკების და ნანოკომპოზიტების კვლევა, რაც განპირობებულია მათი თანამედროვე მეცნიერებაში, ტექნიკაში, მედიცინაში, ყოფა-ცხოვრებაში გამოყენების ფართე არეალით. ამის შესაბამისად მოცემულ მიმართულებაში საკმაოდ დიდი ინფორმაცია დაგროვდა, როგორც ელექტრონულ ისე არაელექტრონულ ინფორმაციის გადმოცემის საშუალებებში. წარმოდგენილ დისერტაციაში მიმოხილულია ის უახლოესი ნაშრომები და მიღწევები, რომლებიც უშუალო კავშირშია ჩატარებულ სამუშაოებთან.

რა არის ნანოკომპოზიტი?

კომპოზიტი ეს არის, ორი ან მეტი ფიზიკურად ან ქიმიურად მკვეთრად განსხვავებული თვისებების მქონე ნივთიერების შეერთებით მიღებული სრულიად განსხვავებული თვისებების მქონე ახალი ნივთიერება. თუ მიღებული ნიმუშის ერთი განზომილება მაინც არის ნანო ზომის რიგის, მაშინ მას ნანოკომპოზიტს უწოდებენ [29].



სურათი 5. ნანოკომპოზიტი

1.1 ნანონაწილაკები და ნანოკომპოზიტები

მოუხედავად იმის, რომ ნანონაწილაკები დაკავშირებულები არიან თანამედროვე მეცნიერებასთან, მათ უფრო დიდი ხნის ისტორია აქვთ [30]. ნანონაწილაკები გამოყენებული იყო IV საუკუნის რომში ცნობილი ლიკურიუსის თასისათვის, რომელიც დამზადებული იყო დიქროული მინისაგან, ასევე IX საუკუნის მესოპოტამიელი ხელოსნების მიერ ჭურჭლის ზედაპირზე მზინვარების ეფექტების მისაღებად. ეხლაც კი შუა საუკუნეებისა და რენესანსის დროინდელი კერამიკა ინარჩუნებს ოქროს და სპილენძის ფერ მზინვარებას. ეს მზინვარება გამოწვეულია მეტალის ფირფიტის ფენით, რომელიც დატანილია მინის გამჭვირვალე ზედაპირზე. მზინვარება/სიკაშკაშე მანამ არის შესამჩნევი სანამ ფირი გაუძღებს ატმოსფერული გარე ფაქტორების მოქმედებას: დაჟანგვას, გამოფიტვას და სხვა...

სინათლის სიკაშკაშე წარმოიქმნებოდა ფირში, კერამიკულ მინანქარში, რომლის მინის მატრიცაში ერთგვაროვნად იყო დისპერგირებული ვერცხლის და სპილენძის ნანონაწილაკები [31,32]. ეს ნანონაწილაკები მიღებული იყო სახალხო რეწვის ოსტატების მიერ ნიმუშების ზედაპირებზე ვერცხლის და სპილენძის მარილების და ოქსიდების ძმართან ერთად, კაჟის და თიხის დამატებით, მანამ სანამ კერამიკის ზედაპირზე მიიღებდნენ მინანქარს. შემდეგ ობიექტს ათავსებდნენ ღუმელში და აცხელებდნენ დაახლოებით 600 °C ტემპერატურაზე და აცივებდნენ ატმოსფერულ ტემპერატურამდე. სიცხეში მინანქარი რბილდებოდა და წარმოიქმნებოდნენ ვერცხლის და სპილენძის იონები, რომლებიც გადაადგილდებოდნენ მინანქრის გარე ფენებში. გაცივებისას იონების მხოლოდ მცირე ნაწილი უბრუნდებოდა მეტალს. დარჩენილი იონები თავს იყრიდნენ ერთად და ქმნიდნენ ნანონაწილაკებს, რაც იძლეოდა ფერს და შესაბამის ოპტიკურ ეფექტებს.

მზინვარების მიღების ასეთმა მეთოდმა აჩვენა, რომ ძველ ოსტატებს ჰქონდათ ნივთიერებების აგებულების ღრმა ემპირიული ცოდნა. თავად ტექნოლოგია აღმოცენდა მუსულმანურ სამყაროში ბზინვარება [33]. იმის გამო, რომ მათ ეკრძალებოდათ ოქროს გამოყენება მხატვრულ შემოქმედებაში და რეწვით საქმიანობაში, ისინი ეძებდნენ გზებს მსგავსი ეფექტების მისაღებად ოქროს გამოყენების გარეშე და მათ იპოვეს გამოსავალი, კერძოდ ზემოთ აღწერილი მეთოდის საშუალებით მიიღეს ოქროს მსგავსი ბზინვარება.



სურათი 6. მესოპოტამიელი რეწვის ოსტატების მიერ მოპირკეთებული თასი

1857 წელს მაიკლ ფარადეიმ პირველმა აღწერა მეცნიერულად ნანომასშტაბების ზომების მეტალების ოპტიკური თვისებები და ასახა თავის კლასიკურ შრომებში [34]. მომდევნო შრომებში ავტორი ამბობს: „ცნობილია, რომ ოქროს და ვერცხლის თხელი ფირფიტები კარგად ეკვრიან მინის ზედაპირს და ცხელდებიან წითელ ტემპერატურამდე ($\approx 500\text{ }^{\circ}\text{C}$). თვისებების მნიშვნელოვანი ცვლილებები ხდება მაშინ, როდესაც ირღვევა მეტალის ფირის მთლიანობა. შედეგად თეთრი სინათლე თავისუფლად გადის და აირეკლება, ხოლო ელექტრული წინაღობა მნიშვნელოვნად იზრდება.“

თანამედროვე ეპოქაშიც ნანონაწილაკები იწვევენ დიდ სამეცნიერო ინტერესს, რამდენადაც წარმოადგენენ ხიდს ნივთიერებების მოცულობით მდგომარეობებსა და ატომურ და მოლეკულურ სტრუქტურებს შორის. ნანო-მასშტაბებში ხშირად დაიმზირება ისეთი თვისებები, რომლებიც დამოკიდებულია ნივთიერების ზომებზე. ამგვარად, გვაქვს ნივთიერების თვისებების ცვლილება ზომის ცვლილებასთან

ერთად, როდესაც ისინი უახლოვდებიან ნანო ზომებს და ატომების წილი ზედაპირზე ხდება საგრძნობლად დიდი.

ნანონაწილაკების შემთხვევაში მცირე მოცულობაში გვაქვს დიდი ზედაპირის ფართობები და აქედან გამომდინარე ფიზიკური პარამეტრების მნიშვნელოვანი ცვლილებები და შედეგად მიიღება ნანონაწილაკების უჩვეულო ოპტიკური, თერმული, თერმო-ოპტიკური, მექანიკური, აკუსტიკური და ა.შ თვისებები.

მაგალითად, ოქროს ნანონაწილაკების წყალხსნარის ფერი შეიძლება იცვლებოდეს ყვითელიდან მუქ წითლამდე. ოქროს ფირფიტებისაგან განსხვავებით, რომლებიც დნებიან 1064°C , მაგალითად ოქროს 2.5 ნმ ზომის ნანონაწილაკები დნებიან $\approx 300^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე [30]. გაირკვა, რომ მზის გამოსხივების შთანთქმა გაცილებით მაღალია ოქროს ნანონაწილაკებისგან მიღებულ მასალებში, ვიდრე ოქროს მთლიან თხელ ფირებში. მზის გამოსხივების ფოტო-ელექტრული და სითბური ეფექტები, მზის ენერჯის შთანთქმისას, შეგვიძლია ვაკონტროლოთ ორივე შემთხვევაში ნანონაწილაკების ზომების, ფორმების და ნივთიერების გვარობიდან გამომდინარე.

კიდევ ერთი, ზომაზე დამოკიდებული თვისება არის კვანტური პოტენციალის გაჩენა ნახევარგამტარების ზედაპირული პლაზმონური რეზონანსისას, ხოლო ზოგიერთი მაგნიტურ მეტალურ ნანონაწილაკებში ჩნდება სუპერპარამაგნეტიზმი. ნანონაწილაკებიან ხსნარებში ადგილი აქვს ნანონაწილაკების ზედაპირების ურთიერთქმედებას ხსნარის ნაწილაკებთან, რაც შეიძლება იყოს საკმაოდ ძლიერი იმისთვის რომ დაძლიონ ნებისმიერი სიმკვრივე.

ნანონაწილაკების ზედაპირების დაფარვას გადაწყვეტი მნიშვნელობა აქვს მათი თვისებების დასადგენად. კერძოდ, შესაძლებელია დადგინდეს მათი სტაბილურობა, ხსნადობა და მიზნობრიობა. საფარი, რომელიც შეიძლება იყოს მრავალვალენტიანი ან პოლიმერის იძლევა დიდ სტაბილურობას. ნანომასალების ფუნქცია როგორც კატალიზატორის შესაძლებელია გამოყენებული იყოს კატალიზისთვის მრავალ ორგანულ რეაქციებში.

ზოგად ნანონაწილაკების და მათ შორის ოქროს ნანონაწილაკების ენერჯის გაბნევის ერთ-ერთ საშუალებას წარმოადგენს ფოტონების გამოსხივება. თუმცა მისი კვანტური გამოსავალი ანუ ეფექტურობა საკმაოდ დაბალია. Dulkeith და სხვა..

აჩვენეს რომ ნანონაწილაკების ლუმინესცენციის კვანტური გამოსავალი საკმაოდ მცირეა 0.0001 % და ეს არაა დამოკიდებული ნანონაწილაკების ზომებზე [35].

ელექტრონების ინდუცირებული კოლექტიური ოსცილაციები, რომლებიც დაკავშირებულია ზედაპირულ პლაზმონურ რეზონანსთან, ზრდის ნანონაწილაკების ზედაპირებთან ახლოს მდებარე ლოკალურ ელექტრულ ველს. ინდუცირებული ელექტრული ველი, რომელიც წარმოიქმნება რეზონანსული ოსცილაციის დროს ნანონაწილაკების მუხტების განცალკევებით არის ძალიან ძლიერი ზედაპირებთან ახლო მანძილებზე. Hao და Schatz-მ ჩაატარეს გამოთვლები 20 ნმ დიამეტრის ზომის მქონე ვერცხლის ნანონაწილაკების შემთხვევაში და ნახეს, რომ ზედაპირული პლაზმონური რეზონანსის შედეგად აღძრული ელექტრული ველი გაზრდილი იყო 13-ჯერ [36] და ეს გაძლიერება მცირდებოდა, ზედაპირებს შორის მანძილების გაზრდის მიხედვით [37]. ლოკალური ველების ეს გაძლიერება პასუხისმგებელია მეტალური ნანოსტრუქტურების ზედაპირების ველზე დამოკიდებულ გაძლიერების პროცესებზე.

კეთილშობილური მეტალური ნანონაწილაკების კერძოდ, ოქროს და ვერცხლის ნანონაწილაკებმა სერიოზული ყურადღება მიიქციეს თავიანთი მიმზიდველი ფოტო, თერმო, ელექტრო და ქიმიური თვისებების გამო, რითაც განპირობებულია მათი პოტენციური გამოყენება თანამედროვე მეცნიერებებისა და ტექნოლოგიების მიმართულებებში. მეცნიერების ბოლო დროინდელი მიღწევების გამო, ოქროს და ვერცხლის სხვადასხვა ნანომასალების შესწავლამ მიგვიყვანა მათ მნიშვნელოვან გამოყენებამდე ისეთ სფეროებში როგორცაა: ბიოსენსორები [38], დიაგნოსტიკური ვიზუალიზაცია, კიბოს დიაგნოსტიკა და თერაპია [39,40]

ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს ტემპერატურის გაზომვა ნანო და მიკრო მასშტაბებში. რაც არის უმნიშვნელოვანესი პარამეტრი ნანონაწილაკებისათვის ნანო -მედიცინაში. გოვროვმა და სხვა [41] სცადეს გაეზომათ ტემპერატურა ოქროს ნანონაწილაკების სიახლოვეს, შეექმნათ მათგან მატრიცა და ჩაეჭირათ ისინი ოპტიკურად. მათ გამოიყენეს ყინულის მატრიცა, მისი ცნობილი თერმოდინამიკური თვისებების გამო და აკვირდებოდნენ დნობის ეფექტს, სითბოს რაოდენობას, რომელსაც გამოყოფდნენ ნანო-გამაცხელებლები მცირე სიმძლავრის სინათლით დასხივებისას. შესაძლებელი იყო მატრიცაში ოქროს

ნანონაწილაკების საშუალო რაოდენობის განსაზღვრა და ასევე ლაზერის სხივის და სინათლის სიმძლავრის თანდათანობით გაზრდით დნობის ინტენსივობის ზღვრის დადგენა, რომელიც შეიძლება გამოყენებული იქნეს ნანონაწილაკების ოპტიკურად გენერირებული სითბური ეფექტის განსასაზღვრავად.

სხვა შრომებში იგივე ავტორები იყენებდნენ წყლის მატრიცას, პოლიმერს და ოქროს ნანონაწილაკებით გარშემორტყმულ CdTe- ის კვანთურ წერტილებს და აკვირდებოდნენ ოპტიკურად მოძრავი ნანონაწილაკების მიერ გამოყოფილ სითბოს [42].

Carlson et all. გამოიყენეს $Al_{0,94}Ga_{0,06}N$ -ის თხელი ფირები, სადაც Al-ის წილი არის 94% და Ga-ის 6%. ჩანერგილი იყო Er^{3+} -ის იონები, როგორც ტემპერატურის ოპტიკური სენსორები. ოპტიკურად აღზნებული ოქროს ნანოსტრუქტურების გარშემო ტემპერატურის გამოსახულების დასამზერად [43].

გარდა ამისა, Van de Broek et all. აჩვენეს თუ როგორ შეიძლება გაიზომოს ნანონაწილაკების ტემპერატურა ოქროს მესრის პარამეტრებზე თერმული ზემოქმედებით (გამოიყენეს X - სხივების შთანთქმის სპექტროსკოპია) [44]. 2009-ში Baffou et all. გამოაქვეყნეს მეთოდიკა დაფუძნებული ფლუორესცენციის პოლარიზაციის ანიზოტროპიის გაზომვებზე ტემპერატურული რუკით ნანოზომების ზომის გამათბობლების გარშემო [45]. მეთოდიკა მდგომარეობდა ნივთიერებაში ფლუორესცენციული მოლეკულების შეყვანაში და ფლუორესცენციული პოლარიზაციული ანიზოტროპიული შერევის დასურათებაში, რომელიც უშუალოდ არის დაკავშირებული ბრუნვით დიფუზიასთან ინდუცირებული მოლეკულების ბროუნის დინამიკით. ამ მეთოდიკის ამოსავალი წერტილი იყო ის რომ, ტემპერატურის გაზრდა იწვევდა ანიზოტროპიის შემცირებას, რაც იწვევდა მოლეკულების სწრაფ ბრუნვას. მეთოდიკის ტემპერატურული სიზუსტე არის 0,1 °C და გავრცელების არის სიდიდე იყო 300 ნმ.

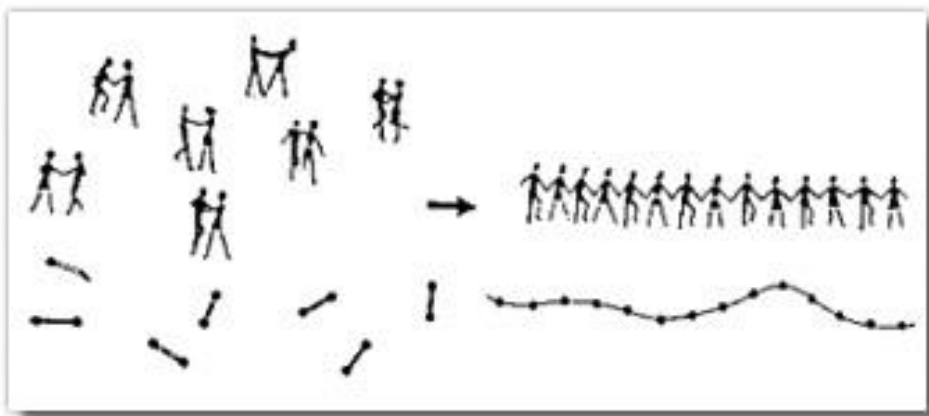
სრულიად ახლახანს Baffou და მისმა თანამშრომლებმა წარმოადგინეს თერმული მიკროსკოპიის მეთოდი, რომელშიც სინათლის გარდატეხის მაჩვენებელი მგრძნობიარეა გარემოს ტემპერატურული ცვლილების მიმართ [46]. ამ მეთოდში გამოიყენება CCD (მუხტით დაკავშირებული მოწყობილობა) კამერით აღჭურვილი ოპტიკური მიკროსკოპი, რომელიც კომბინირებული იყო Haltman-ის დიფრაქციულ

მესერთან. მათი მეთოდი იძლეოდა საშუალებას დაეფიქსირებინათ ტემპერატურის ცვლილება 1K სიზუსტით. უპირატესობას წარმოადგენდა ის ფაქტი რომ არ საჭიროებდა ფლუორესცენციული ჩანართების არსებობას. საბოლოოდ 2015 Umeton-მა და მისმა კოლეგებმა გაზომეს ტემპერატურა მეტალის ნანონაწილაკების ზედაპირზე [47]. ოპტიკურ გამნათებლად გამოიყენეს მოკლე ბიჯის მქონე თხევად-კრისტალური ნარევი. ამ მეთოდმა უჩვენა თავისი ეფექტურობა ნანონაწილაკების გარშემო ტემპერატურის გაზომვისას, მგრძნობელობით 0,35°C.

პეტრიაშვილი და სხვა. თავიანთ ნაშრომში გვთავაზობენ იდეას გამოვიყენოთ თერმოტროპული ქოლესტერული თხევადკრისტალური მიკრო წვეთები ტემპერატურის არაინვაზიური ვიზუალიზაციისათვის და გაზომვებისათვის მიკრომასშტაბებზე [48]. კერძოდ, ახდენდნენ მეტალის ნანონაწილაკებით მიღებული ოპტიკური ენერჯის სითბოს ვიზუალიზაციის ფოკუსირებას. ოპტიკური ალგზნების შედეგად ოქროს და ვერცხლის ნანონაწილაკებს შესწევთ სითბოს ეფექტური გამოყოფის უნარი. ლაზერის სხივით ალგზნებისას ლაზერის ელექტრული ველი ძლიერად ალაგზნებს მეტალის ნანონაწილაკების მობილურ გადამტანებს და ენერჯია გარდაიქმნება სითბოდ. სითბოს გენერაცია განსაკუთრებით ძლიერია პლაზმონური რეზონანსის დროს. სითბოს გავრცელება ხდება ნანონაწილაკების გარშემო, რაც იწვევს ქოლესტერული თხევადი კრისტალის სელექტიური ამრეკლაობის პიკის წანაცვლებას და შესაძლებელია ამ პიკის წანაცვლების მონიტორინგი. მათ გამოიყენეს წყლის და ქოლესტერული თხევადი კრისტალის ემულსია და ვერცხლის ნანონაწილაკები. ეს შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ბიოტექნოლოგიებში, ტემპერატურის გასაკონტროლებლად 28°C– დან 49°C–მდე.

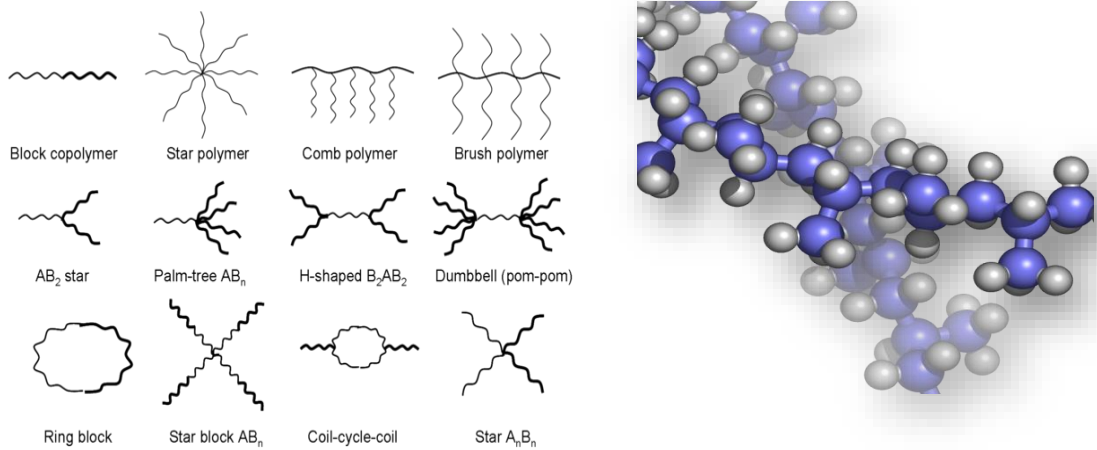
1.2 პოლიმერები

ერთ–ერთ ძირითადი ნივთიერება, რომელიც დისერტაციაშია გამოყენებული, არის პოლიმერული კომპოზიცია. პოლიმერი მაღალმოლეკულური ქიმიური ნაერთია, რომელიც შედგება მონომერების განმეორებითი ბმებისაგან და ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე ტექნიკაში. (polymeros –ბერძნული სიტყვაა და მრავალი ნაწილისგან შემდგარს ნიშნავს) [49, 50]. ტერმინი „პოლიმერები“ შემოტანილი იქნა 1833 წელს ი. ბარცელიუსის მიერ.



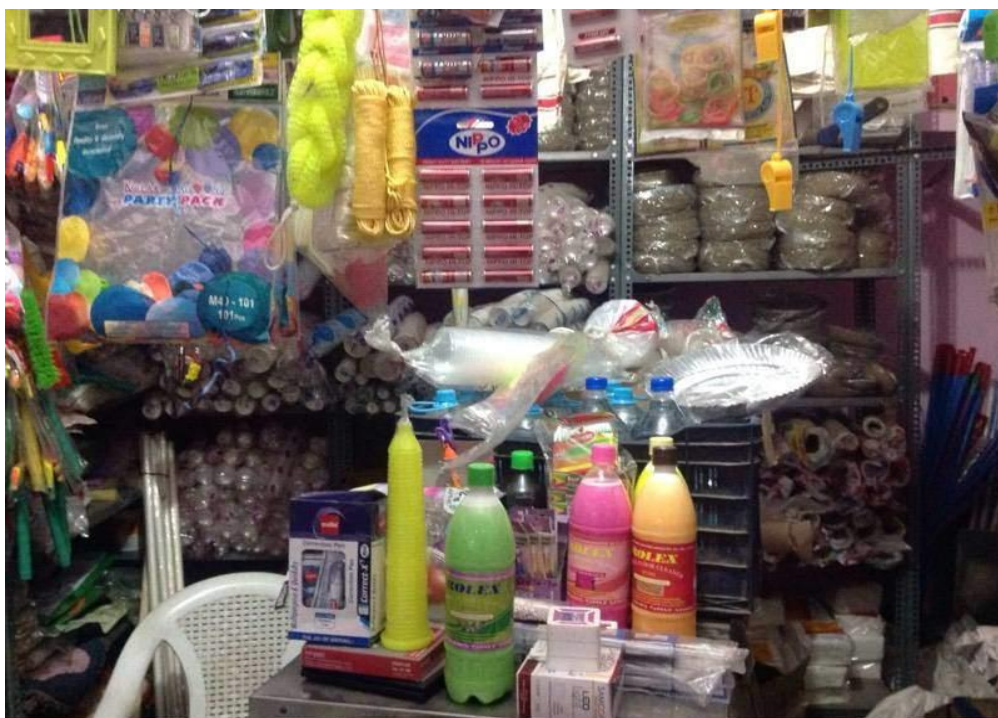
სურათი 7. პოლიმერული ჯაჭვი

პოლიმერების მაკრომოლეკულები შედგებიან დიდი რაოდენობის ურთიერთ შეკავშირებული მონომერების განმეორებადი ბმებისაგან. პოლიმერების მოლეკულური მასა შეიძლება იცვლებოდეს რამოდენიმე ათასიდან რამოდენიმე მილიონამდე. პოლიმერების გეომეტრიული ზომები შესაძლოა იყოს იმდენად დიდი, რომ ამ ნივთიერების ხსნარი თვისებებით უახლოვდება კოლოიდურ ხსნარებს. წარმოშობის მიხედვით პოლიმერები იყოფიან ბუნებრივად, ბიოპოლიმერებად (ცილები, ნუკლეინის მჟავები და სხვა.) და სინთეზურად (პოლიეთილენის, პოლიამიდები.). მიღების მეთოდებია პოლიმერიზაცია და პოლიკონდენსაცია. ფორმის მიხედვით პოლიმერი შეიძლება იყოს წრფივი, განშტოებული და ბადისებური. ბუნებით ორგანული, არაორგანული. ხაზოვანი და განშტოებული პოლიმერები ხასიათდება რთული სპეციფიკური თვისებებით.



სურათი 8. პოლიმერული სტრუქტურები

მათგან შესაძლებელია დამზადდეს ბოჭკოვანი სადენები და ფირები. ასევე მაღალი ელასტიურობის მასალები. პოლიმერებისაგან ძირითადად ღებულობენ პლასტმასებს, ქიმიურ ბოჭკოებს, რეზინებს, საღებავებს, წებოს და სხვა. ბიოპოლიმერებისაგან არის აგებული ყველა ცოცხალი ორგანიზმის უჯრედები.



სურათი 9 პოლიმერული მასალების საფუძველზე დამზადებული საყოფაცხოვრებო ნივთები

პოლიმერიზაციის რეაქციის დროს გაზური ან თხევადი მდგომარეობიდან ნივთიერება გადადის უფრო სქელ თხევად ან მყარ მდგომარეობაში. პოლიმერიზაციის რეაქციას თან არ ახლავს რაიმე სხვა დაბალმოლეკულური პროდუქტის წარმოშობა (გამოყოფა). პოლიმერიზაციის დროს პოლიმერებს და მონომერებს აქვთ ერთნაირი შემადგენლობა. პოლიმერში უნდა იყოს დიდი რაოდენობით მონომერები, წინააღმდეგ შემთხვევაში მას უწოდებენ „ოლიგომერს“. მოლეკულას ეწოდება პოლიმერი თუ მონომერული რგოლის დამატება მასში არ ახდენს თვისობრივ ცვლილებებს. პოლიმერიზაცია მიმდინარეობს ჯაჭვური მექანიზმით. ჯაჭვური რეაქციის დასაწყებად აუცილებელია, რომ საწყის ინერტულ მასაში გაჩნდეს/წარმოიშვას აქტიური ნაწილაკები. ჯაჭვურ რეაქციაში ერთი ნაწილაკი თან წაიყოლებს ათასობით არააქტიურ მოლეკულას და წარმოქმნის გრძელ ჯაჭვს. პირველადი აქტიური ცენტრები არიან თავისუფალი რადიკალები და იონები.

რადიკალები –ესაა მოლეკულის ნაწილი, რომელიც წარმოიქმნება ელექტრონული წყვილის გახლეჩისას და შეიცავს გაუწყვილებელ ელექტრონს (მაგალითად, მეთილის CH_3^\cdot , ფენილ $\text{C}_6\text{H}_5^\cdot$, $\text{C}_2\text{H}_5^\cdot$ ეთილის ჯგუფი, და სხვა...) საწყისი რადიკალების და იონების ფორმირება შეიძლება მოხდეს სხვადასხვა ფაქტორების ზემოქმედებით: გათბობით, სინათლით, მაიონიზირებელი გამოსხივებით, სხვადასხვა სპეციალურად შეყვანილი კატალიზატორებით და ა.შ.

პოლიმერიზაციის გარდა პოლიმერები შეიძლება მივიღოთ პოლიკონდენსაციით. პოლიკონდენსაციის რეაქციის დროს ხდება პოლიმერული ატომების დაჯგუფება და წყლის ან სხვა დაბალმოლეკულური ნივთიერების გამოცალკევება.

პოლიმერების მექანიკური თვისებებია: ელასტიურობა– შექცევადი დეფორმაციის უნარი მცირე ძალით დატვირთვისას (კაუჩუკი), მსხვრევადობა– მინისმაგვარ და კრისტალურ პოლიმერებში (ოპტიკური ბოჭკო, ორგანული მინა). მექანიკური ველის მიმართულებით მაკრომოლეკულების ორიენტირების უნარი (გამოიყენება ბოჭკოების და ფირების დამზადებაში).

პოლიმერულ ხსნარებს ახასიათებთ: მაღალი სიბლანტე პოლიმერის მცირე კონცენტრაციისას, პოლიმერის დაშლა ხდება გაფუების/გაჯირჯვლების შემდეგ.

პოლიმერების ქიმიური თვისებებია ის, რომ მცირე რეაგენტების დამატებით შესაძლებელია მკვეთრად შეიცვალოს ოპტიკური, თერმული, ფოტო და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები.

პოლიმერების განსაკუთრებული თვისებები აიხსნება არა მარტო მათი დიდი მოლეკულური მასებით, არამედ იმით რომ მაკრომოლეკულებს აქვთ ჯაჭვური სტრუქტურა და ახასიათებთ მოქნილობა.

პოლიმერებს განასხვავებენ პოლარობის მიხედვით. (გავლენას ახდენს სხვადასხვა სითხეებში მათ ხსნადობაზე). პოლიმერული კავშირების პოლარობა განისაზღვრება გახლეჩილი დიპოლების არსებობით პოლიმერში – იმის მიხედვით თუ როგორაა განაწილებული დადებითი და უარყოფითი მუხტები მოლეკულაში. არაპოლარულ კავშირებში ატომებს შორის დიპოლური მომენტები ურთიერთკონპენსირდება. პოლიმერებს, რომელთა ბმებს აქვთ მნიშვნელოვანი პოლარობა, ეწოდება ჰიდროფილური ანუ პოლარული, ხოლო პოლიმერებს რომელთა ბმები არაპოლარულია ჰიდროფობური. ჰიდროფობური მოლეკულები გაურბიან წყალთან კონტაქტს და არ იხსნებიან მასში. მაგალითად ალკანები, ზეთები, ცხიმები და სხვა; პოლიმერებს, რომლებიც შეიცავენ როგორც პოლარულ ისე არაპოლარულ ბმებს ამფიფილურ პოლიმერებს უწოდებენ. ჰომოპოლიმერებს, რომლებიც შეიცავენ როგორც პოლიმერულ ისე არაპოლიმერულ ჯგუფებს ამფიფილურ ჰომოპოლიმერებს უწოდებენ.

გათბობის მიმართ პოლიმერები იყოფიან თერმოპლასტიკურებად და თერმორეაქტიულებად. თერმოპლასტიკური პოლიმერები გათბობისას რბილდებიან, ზოგიერთი დნება და გაცივებისას მყარდება (პოლიეთილენი, პოლიპროპილენი, პოლისტიროლი) და ეს შექცევადი პროცესია. თერმორეაქტიული პოლიმერებში გათბობისას ხდება ქიმიური შეუქცევადი დესტრუქტურიზაცია დნობის გარეშე. თერმორეაქტიულ პოლიმერებს აქვთ არაწრფივი სტრუქტურა, წრფივი სტრუქტურებისგან შედგენილი. ელასტიური თვისებები თერმორეაქტიულ პოლიმერებში უფრო მაღალია ვიდრე თერმოპლასტიკურში, თუმცა მათ არ გააჩნიათ დენადობა რის გამოც არიან უფრო მეტად მყიფე.

ბუნებრივი ორგანული პოლიმერები წარმოიქმნება მცენარეთა და ცხოველთა ორგანიზმებში. მათგან ყველაზე მნიშვნელოვანია პოლისაქარიდები, ცილები და

ნუკლეინის მჟავები. რომლებიც ცხოველების და მცენარეების ორგანიზმებში მოიპოვება და დედამიწაზე სიცოცხლის ფუნქციონირებას უზრუნველყოფს. ითვლება რომ, დედამიწაზე სიცოცხლის წარმოქმნის გადამწყვეტი ეტაპი მარტივი მოლეკულებიდან რთული მაღალმოლეკულური ნაერთების წარმოქმნა იყო.

1.3 თხევადი კრისტალები

კიდევ ერთ განსაკუთრებულ ნივთიერებათა კლასს წარმოადგენს თხევადი კრისტალები, რომლებსაც ვიყენებთ ექსპერიმენტებში.

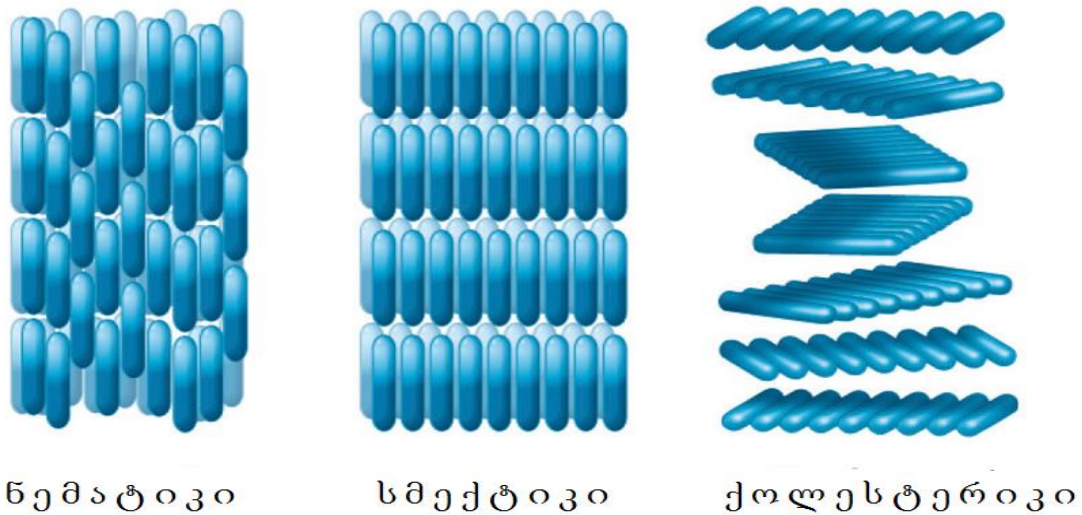
ისინი მიეკუთვნება ნივთიერებათა განსაკუთრებულ სახეობას, რომელსაც შუალედური მდგომარეობა უკავია მყარ სხეულებსა და სითხეებს შორის და ხასიათდება ორივე აგრეგატული მდგომარეობის დამახასიათებელი თვისებებით. კერძოდ, სითხეების მსგავსად მათ ახასიათებთ დენადობა და ამავე დროს არიან ანიზოტროპულნი ელექტრომაგნიტური, სითბური და აკუსტიკური ველების მიმართ.



სურათი 10. მოლეკულების განლაგება მყარ, თხევად და თხევად კრისტალურ გარემოში

თხევადი კრისტალები შედგება წაგრძელებული ფორმის მქონე მოლეკულებისაგან, რომლებიც სივრცეში ქმნიან გარკვეულ სიმეტრიას. თხევად კრისტალებს აქვს რამდენიმე ფაზა, მათ შორის მნიშვნელოვანია: ნემატური, ქოლესტერული და სმექტიკური ფაზები. ნემატური თხევადი კრისტალების მოლეკულებს გააჩნიათ მხოლოდ ორიენტაციული სიმეტრია, სმექტიკური თხევადი

კრისტალების მოლეკულები ერთმანეთის მიმართ სიმეტრიულია როგორც მიმართულებებით, ასევე 1 ან 2 განზომილებიანი მასათა ცენტრებით. რაც შეეხება ქოლესტერულ თხევად კრისტალურ ფაზას, იგი შედგება კვაზინემატური ფენებისაგან, როლებიც ერთმანეთის მიმართ გარკვეული კუთხით არიან მობრუნებული, ისე რომ სივრცულად 1D განზომილებიან სიმეტრიას ქმნიან.



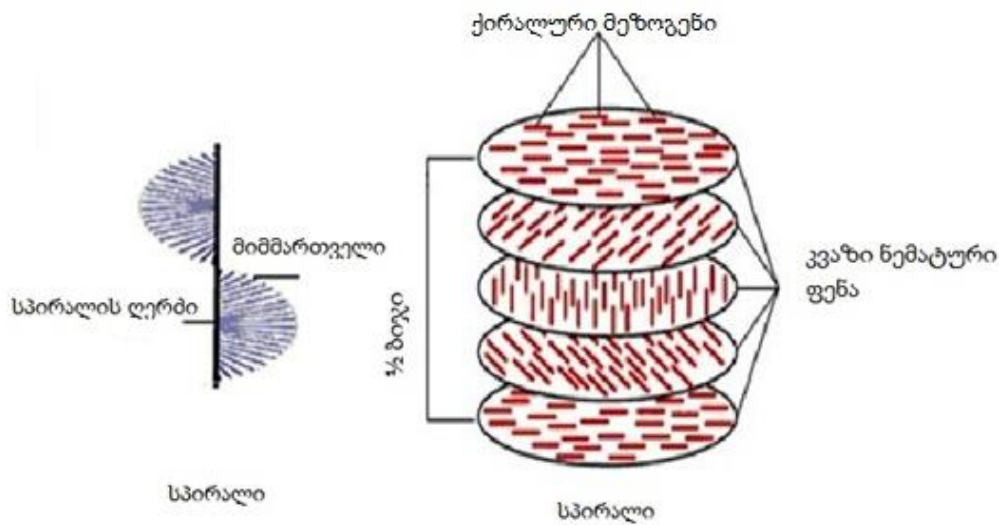
სურათი 11. თხევადკრისტალური ფაზები

თხევადი კრისტალების თვისებები მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ისეთი გარეშე ფაქტორების ზემოქმედებებზე, როგორებიცაა თერმული, ფოტო, ელექტრული, მაგნიტური, აკუსტიკური და ზედაპირები [51]. ყოველივე ეს განაპირობებს ამ ნივთიერებების ფართოდ გამოყენებას სტიმულირებად-რეაგირებად სისტემებში.

1.3.1 ქოლესტერული თხევადი კრისტალები

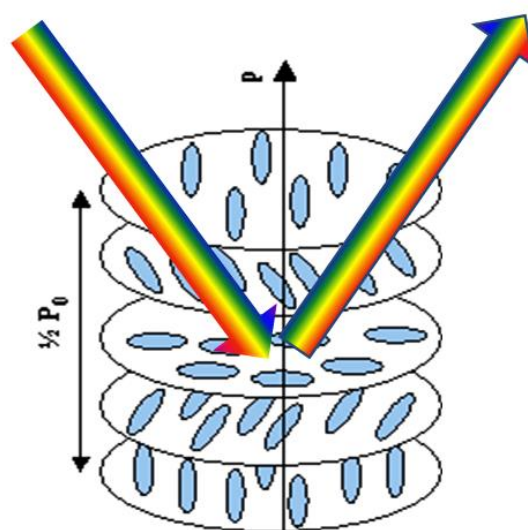
იმ შემთხვევაში, როდესაც მოლეკულები ქირალურია, ან არაქირალურ მოლეკულებს ჩამატებული აქვთ ოპტიკურად აქტიური დანამატი, წარმოიქმნება სპირალური სტრუქტურა, რომელსაც ქოლესტერული თხევადი კრისტალი (ქთკ) ეწოდება. ქთკ-ის მიერ ხდება სინათლის სელექტიური არეკვლა და ეს არეკვლა

დამოკიდებულია ისეთ გარე ზემოქმედებაზე, როგორებიცაა: ტემპერატურა, წნევა, სინათლე, ელექტრო-მაგნიტური და აკუსტიკური ველები. [52]



სურათი 12. ქოლესტერული თხევადი კრისტალის სტრუქტურა

ქოლესტერული თხევადი კრისტალის სპირალური, სუპრამოლეკულური სტრუქტურა განაპირობებს მის მრავალ უნიკალურ თვისებებს. იმ შემთხვევაში, როდესაც სპირალის ბიჯი (პერიოდი) ემთხვევა დაცემული სინათლის ტალღის სიგრძეს, განაწილებული ოპტიკური უკუკავშირი იძლევა სელექტიურ ამრეკლობასა და გიგანტურ ოპტიკურ აქტიურობას, სურათი 13.



სურათი 13. სინათლის სელექტიური ამრეკლობა ქოლესტერული თხევადი კრისტალის მიერ

მოლეკულების ორიენტაცია თხევად კრისტალებში დამოკიდებულია მოწესრიგების პარამეტრზე S . $S = 0$ სითხე და $S = 1$ ნემატიკი.

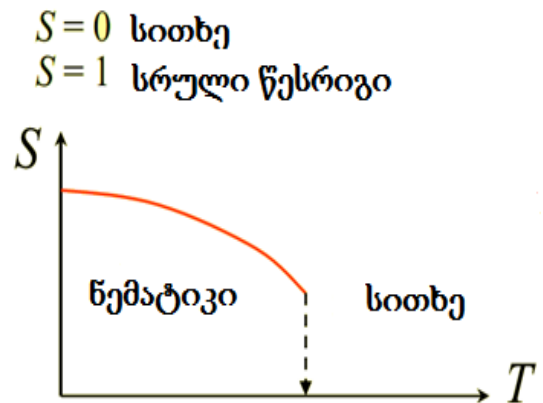
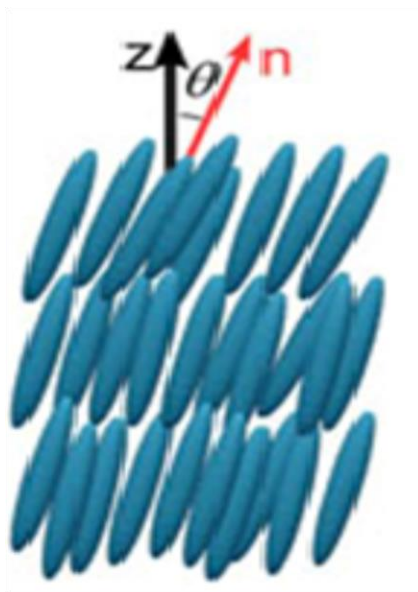
ვექტორული

$$S = \langle P_2(\cos \theta) \rangle = \left\langle \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} \right\rangle$$

ტენზორული

$$Q_{\alpha\beta} = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \left(\frac{3}{2} \hat{u}_{i\alpha} \hat{u}_{i\beta} - \frac{1}{2} \delta_{\alpha\beta} \right), \quad \alpha, \beta = x, y, z,$$

სადაც P სპირალის ნახევარბიჯია, ხოლო θ კუთხე დირექტორსა (n) და ვერტიკალურ ღერძს შორის



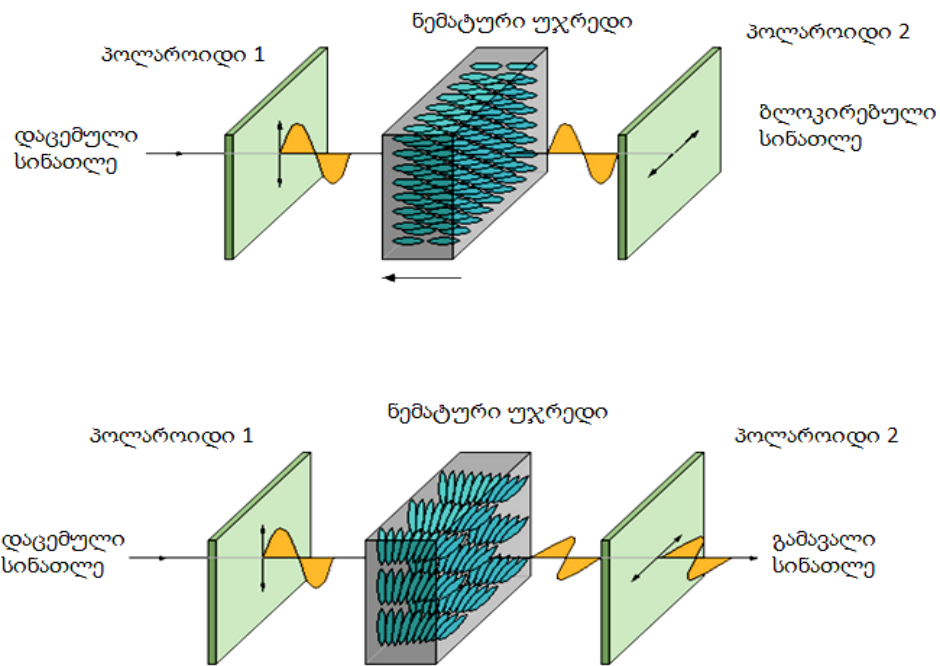
სურათი14. თხევადი კრისტალის მოწესრიგების პარამეტრი

სპირალის ბიჯის სიდიდის ეფექტური კონტროლი გარეშე ელექტრომაგნიტური ველებისა და ტემპერატურების საშუალებით ქოლესტერულ თხევად კრისტალს აქცევს უკიდურესად პერსპექტიულად ისეთი სახის ფოტონურ და ელექტრონულ მოწყობილობებში, როგორებიცაა: ფოტონური კრისტალები,

სინათლის გადამრთველები და ჩამკეტები, ახალი სახეობის დისპლეები, ადაპტურ-ლაზერული სისტემები და ახალი ტიპის ლაზერული წყაროები [53–56].
თხევადი კრისტალების გამოყენების სფეროებია:

- ახალი სახეობის მზის ელემენტები
- ახალი თაობის ამრეკლავი დისპლეები [57]
- ქიმიური და ბიოლოგიური ნივთიერებების დეტექტორები
- მაღალი სიმკვრივის მქონე ინფორმაციის ჩამწერები და ტალღამტარები
- ახალი სახეობის ფოტონური კრისტალები და "ჭკვიანი" ზედაპირები
- მედიცინაში - სიმსივნური უჯრედების ვიზუალიზაცია და მათი თერმო-ოპტიკური დაშლა [58]

თანამედროვე თხევადკრისტალური ტექნოლოგიების ყველაზე გავრცელებულ ასახვას თხევადკრისტალური დისპლეები წარმოადგენს. დაწყებული ჩვეულებრივი მაჯის საათებიდან და დამთავრებული თანამედროვე სამგანზომილებიანი (3D) დისპლეებით, ისინი გადაიქცნენ ინფორმაციის ასახვის ძირითად და მრავალდანიშნულებიან სისტემებად. უნდა აღინიშნოს, რომ ამჟამად არსებულ „სუპერ ტვისტ“ ტექნოლოგიებზე დაფუძნებულ თხევადკრისტალურ დისპლეებში გენერირებული სინათლის მხოლოდ 4-6 % აღწევს მომხმარებელამდე. ძირითადი დანაკარგები გამოწვეულია სინათლის მშთანთქმელი წრფივი პოლარიზაციული ფირებისა და ფერადი ფილტრების გამოყენების შედეგად [59,60].



სურათი 15. ნემატურ ტვისტ – ეფექტზე დაფუძნებული დისპლეის მუშაობის პრინციპი.

აქედან გამომდინარე, თანამედროვე თხევადკრისტალური დისპლეები საჭიროებენ ისეთ შიდა განათებას, რომლებიც დააკმაყოფილებენ ინფორმაციის წაკითხვის შესაძლებლობას როგორც სიბნელის, ისე მძლავრი გარე განათების პირობებში (მზე, სინათლის ხელოვნური წყაროები და ა. შ) [61–63].

მეორე თავი

მოცემულ თავში აღწერილია პოლიმერული ფირების და თხევად კრისტალური ნარევების მიღების ტექნოლოგია და გამოყენებული ხელსაწყოების მუშაობის პრინციპები.

კვლევის მეთოდად გამოყენებულია ოპტიკურ-სპექტროსკოპიული მეთოდი და ოპტიკურ სპექტრალური ანალიზი. ექსპერიმენტებში გამოყენებულია შემდეგი ხელსაწყოები; სპექტრომეტრი Avaspec 2048, დიოდური ლაზერი DPSSL, ტალღის სიგრძით 457ნმ, მყარტანიანი ლაზერი Nd-YAG $\lambda=532$ ნმ ტალღის სიგრძით, სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპი JSM-7800F, ატომურ-ძალური MFP-3D Origin AFM და კონფოკალური Leica TCS SP8 STED მიკროსკოპები, ვერცხლისწყლის ნათურა OI-18A, ოპტიკური ფილტრები და სხვა დამხმარე ოპტიკური ხელსაწყოები.

2.1 სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპი

სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპი (სემ - JSM-7800F) მიეკუთვნება ელექტრონული მიკროსკოპების ტიპს, რომელიც ფოკუსირებული ელექტრონების ნაკადის სკანირების საშუალებით, გვაძლევს საკვლევი ნიმუშის ზედაპირულ გამოსახულებას [64]. ელექტრონების ნაკადი ურთიერთქმედებს ნიმუშის ატომებთან და იძლევა განსხვავებულ სიგნალებს ნიმუშის ტოპოგრაფიისა და შედგენილობის მიხედვით. ელექტრონების ნაკადი ახორციელებს ნიმუშის სკანირებას და თან იძლევა მის გამოსახულებას ეკრანზე. სემ –ით შესაძლებელია სკანირება 10 ნმ და უფრო მეტი გარჩევადობის სიზუსტით. ნიმუშის სკანირება შესაძლებელია როგორც მაღალი, ისევე დაბალი ვაკუუმის პირობებში, ცვალებადი წნევის, კრიოგენური ან მომატებული ტემპერატურის ფართო სპექტრში სპეციალური ინსტრუმენტებით.

სემ-ის ყველაზე გამოყენებადი რეჟიმი არის მეორადი ელექტრონების დაფიქსირება, რომლებიც წარმოიქმნება ელექტრონების ნაკადით ნიმუშის ატომებზე

ზემოქმედებისას. წარმოქმნილი ელექტრონების რიცხვი დამოკიდებულია ნიმუშის ტოპოლოგიაზე. ნიმუშის სკანირებით და მეორადი ელექტრონების სპეციალური დამგროვებელი დეტექტორებით ხდება ეკრანზე ნიმუშის ზედაპირის ტოპოგრაფიული გამოსახულების მიღება.

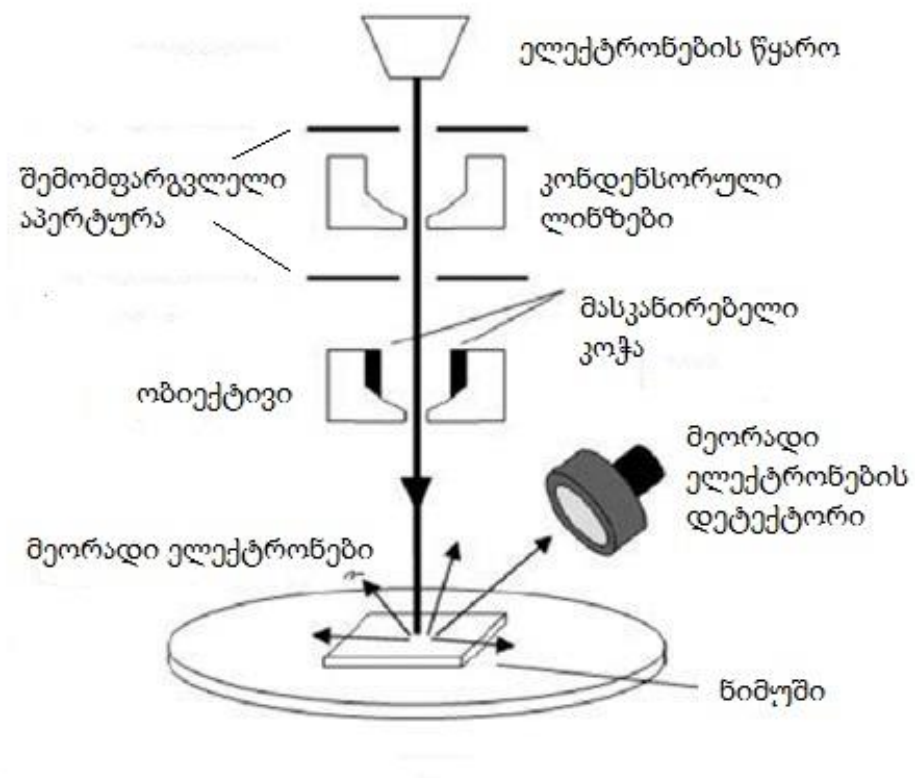
სიგნალი, რომელსაც სემ მიკროსკოპი იყენებს ნიმუშის გამოსახულების მისაღებად, წარმოადგენს ელექტრონების ნაკადისა და ნიმუშის სიღრმეში არსებული ატომების ურთიერთქმედების შედეგს. მსგავსი ტიპის მიკროსკოპებში შესაძლებელია სხვადასხვა ტიპის სიგნალების მიღება, მაგალითად: მეორადი ელექტრონების, არეკვლილი ან უკუგაბნეული ელექტრონების, მახასიათებელი რენტგენული სხივების და კატოდოლუმინესცენცირებადის, შთანთქმის დენებით მიღებული და გამტარებლობის ელექტრონებით. მეორადი ელექტრონების დეტექტორები არის ყველა სახის სემ მიკროსკოპებში და ძალიან იშვიათად შეიძლება ჰქონდეს მიკროსკოპს ყველა სხვა სახის დეტექტორები ერთად.

სემ-ით სკანირებისთვის გამოიყენება ისეთი ნიმუშები, რომლებსაც შეუძლიათ გაუძლონ ვაკუუმის პირობებს, მაღალი ენერგიების მქონე ელექტრონების ნაკადს და ასევე შეესაბამებოდნენ მიკროსკოპის ნიმუშის ზომებს. როგორც წესი, ნიმუში მაგრდება ნიმუშის დამჭერებით ან ამაგრებენ გამტარი წებოს საშუალებით. სემ ფართოდ გამოიყენება ნახევარგამტარული ფირფიტების დეფექტების ანალიზისათვის და დამატებითი ინსტრუმენტების საშუალებით შესაძლებელია 300 მმ სიდიდის ნიმუშის ნებისმიერი უბნის სკანირება. ასევე შესაძლებელია 45° იანი კუთხით კამერის დახრა და 360° –ით ნიმუშის მოტრიალება.

როგორც წესი, დამუშავებული გამოსახულებები ხელოვნურად არის გაფერადებული. ეს შეიძლება გაკეთდეს ესთეტიკური ეფექტის, სტრუქტურის გასარკვევად ან ნიმუშისადმი რეალური სახის მისაცემად. ასევე გაფერადება შეიძლება შესრულდეს ხელით ფოტო-რედაქტირების პროგრამით, ან ნახევრად ავტომატურად, სპეცილური პროგრამების გამოყენებით [65,66].



სურათი 16. სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპი JSM-7800F

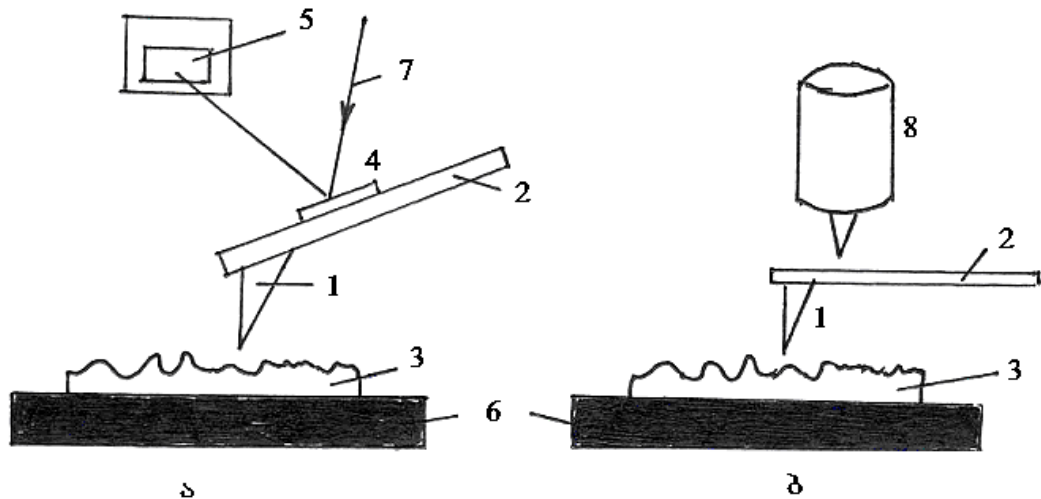


სურათი 17. სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპის სქემა

2.2 ატომურ-ძალური მიკროსკოპი

ატომურ-ძალური მიკროსკოპია (აძმ) შექმნა ბინინგმა, თანავტორებთან ერთად, გვირაბული მიკროსკოპის შექმნიდან მოკლე ხანში. ყველა სახის აძმ-ის (MFP-3D Origin AFM) მუშაობის პრინციპი მდგომარეობს ზონდისა და ზედაპირის მცირე მანძილზე ურთიერთმოქმედი ე.წ. დისპერსიული ძალის გაზომვაში [67]. ეს ძალა თვითაღზნებადი, ფლუქტუაციური ძალაა, რომელიც მყისიერად წარმოიქმნება დიპოლური მომენტების შექმნით. შექმნილი დიპოლი ახდენს მეზობელი ატომების ელექტრონული გარსის პოლარიზაციას და მცირე მანძილზე მათში ქმნის ლოკალურ დიპოლურ მომენტს. ინდუცირებული მომენტების მოქმედება მცირე მანძილზე იწვევს ატომების მიზიდვას, რომელიც კიდევ უფრო მიახლოებისას იცვლება განზიდვით, რომელიც გამოწვეულია ელექტრონული გარსების მოქმედებით. ასეთი თვითაღზნების ძალების გაჩენის მექანიზმი დაამუშავა გასული საუკუნის 30-იან წლებში ინგლისელმა ფიზიკოსმა ლონდონმა და უწოდა დისპერსიული ურთიერთქმედება.

როგორც წესი, ზონდი თავსდება დრეკადი ფირფიტის ერთ ბოლოზე, რომლის მეორე ბოლო ხისტადაა დამაგრებული (სურ.18) ორ მოლეკულას შორის მოქმედების ძალა მკვეთრადაა დამოკიდებული მათ შორის მანძილზე. ურთიერთქმედი სხეულებია ზონდი (1) და საკვლევი ზედაპირი (3) მათი დაახლოება საჭირო მანძილამდე და სკანირება ხორციელდება პიეზოელექტრული ტრანსლიატორით (6). ძალების აღძვრისას (მიზიდვა და განზიდვა) შეიცვლება მანძილი ზონდსა და ზედაპირს შორის, რაც დაფიქსირდება ან ფოტოდოდით (5) ან გვირაბული ზონდით(8). ზონდად შეიძლება გამოყენებული იქნას 5–50 ნმ-ის დიამეტრის სილიციუმის მონოკრისტალი ან ვოლფრამი.



სურათი 18. ატომურ-ძალური მიკროსკოპის მუშაობის პრინციპი, სიგნალის ფოტოდოდით (ა) ან გვირაბული ზონდით (ბ) ფიქსაციით: 1-ზონდი (ნემსი); 2-დრეკადი ფირფიტა; 3-საკვლევი ზედაპირი; 4-სარკე; 5-ფოტოდოდით; 6-პიეზოელექტრული ტრანსლიატორი; 7-ლაზერის სხივი და 8-გვირაბული ზონდი.

უკუკავშირის მექანიზმი რეაგირებს ოპტიკური სხივის სვლის ცვლილებაზე და მოქმედებს პიეზოელექტრულ გარდამქმნელზე, რომელიც არეგულირებს ზედაპირიდან ზონდამდე მანძილს. აძმ-ში საკვლევი ზედაპირის სკანირება ხდება „ზედაპირზე მუდმივი ძალით“ (როგორც მგმ-ში „მუდმივი დენით“). პრეციზიული მართვის პრინციპი, რომელიც დამყარებულია უკუკავშირზე და საკვლევი ზედაპირის რელიეფის ნანოსკოპური გაზომვა აძმ და მგმ-ს აქვთ ერთნაირი.

აძმ შეიძლება გამოყენებული იქნას ნებისმიერი მასალის (გამტარის, დიელექტრიკის და ნახევარგამტარის) ზედაპირის რელიეფის ნანო დონეზე განსაზღვრისათვის. მისი საშუალებით დაიმზირება სტრუქტურული ლოკალური დეფექტები, მინარევები, სხვადასხვა ჩართვების საზღვრები, ბიოლოგიური ობიექტები და სხვა ფუნდამენტალური თუ გამოყენებითი ხასიათის ამოცანები.

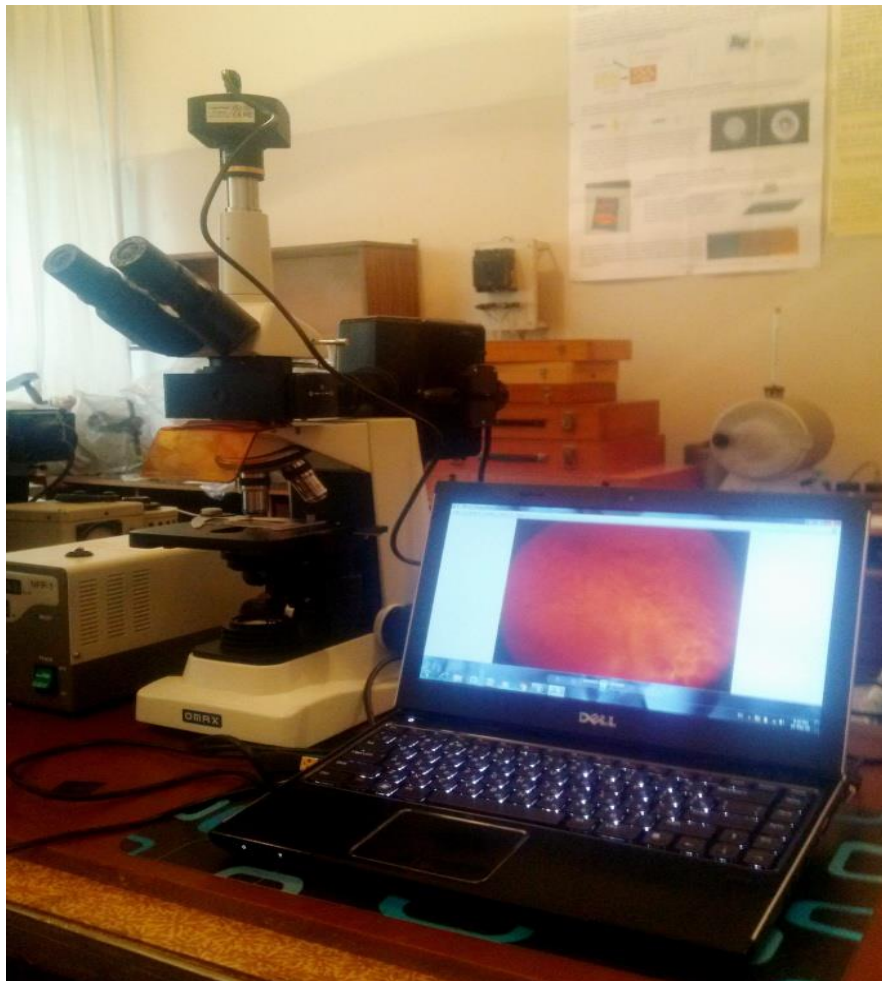
2.3 კონფოკალური მიკროსკოპი

კონფოკალური მიკროსკოპი (Leica TCS SP8 STED) ფართოდ გავრცელებული ლაზერული სკანირებადი მიკროსკოპია, რომელიც გამოირჩევა კარგი ოპტიკური გარჩევადობით და კონტრასტულობით, რადგან მასში გამოიყენება დიაფრაგმა (ოპტიკური ფირფიტა, რომელსაც აქვს ხვრელი) და ბლოკავს სინათლის სხივებს არასასურველი უბნებიდან. [68]. ნიმუშის მრავალი 2D გამოსახულებების დაფიქსირება საშუალებას იძლევა 3D სტრუქტურების რეკონსტრუქციისას ობიექტის შიგნით. ეს მეთოდი ფართოდ გამოიყენება სამეცნიერო და სამრეწველო მიმართულებებში. ასევე სიცოცხლის შემსწავლელ მეცნიერებებში, ნახევარგამტართა კვლევებში და მასალათმცოდნეობაში.

კონფოკალური ვიზუალიზაციის პრინციპი დაპატენტებული იყო 1957 წელს მარვინ მინსკის მიერ და მიზნად ისახავდა ტრადიციული ფლუორესცენციული მიკროსკოპის გარკვეულ შეზღუდვებს. ჩვეულებრივ ფლუორესცენციულ მიკროსკოპში ნიმუშის ზედაპირი ერთნაირად ნათდება სინათლის წყაროს საშუალებით. ხდება მთლიანი ნიმუშის აღზნება და მიკროსკოპის კამერა აფიქსირებს მთლიან სინათლეს, რომელსაც თან ახლავს არასასურველი ფონი. ხოლო კონფოკალურ მიკროსკოპში დიაფრაგმის საშუალებით გვაქვს წერტილოვანი სინათლის წყარო და კამერის წინ მოთავსებული მეორე დიაფრაგმაც მხოლოდ გარკვეულ სინათლეს ატარებს. აქედან წარმოსდგება სახელიც კონფოკალური მიკროსკოპი.

ფლუორესცენციული მიკროსკოპი არის ოპტიკური მიკროსკოპი, რომელიც ასკანერებს ფლუორესცენციულ ნიმუშებს. ის შედგება გამადიდებელი ლინზებისგან, დიქროული სარკის და ფილტრებისგან. პირველი ფილტრი სინათლის წყაროდან გამოარჩევს სინათლეს (მაგ. ლურჯს), რომელიც აღაგზნებს ნიმუშში არსებულ ფლუოროფორებს. სინათლის ნაკადი ანათებს ნიმუშის დიდ ზედაპირს და ხდება ნიმუშში ნებისმიერ ადგილას მყოფი ფლუოროფორების აღზნება. ისინი გამოასხივებენ სხვა ტალღის სიგრძის სინათლის მქონე სინათლეს (ლურჯის შემთხვევაში მწვანეს) დიქროული სარკე და მეორე ფილტრი ატარებს მხოლოდ

სასურველ სინათლეს და შესაბამისად, მიმღები კამერა დეტექტირებას უკეთებს ნიმუშის ფლუოროსცენციულ ნაწილს.



სურათი 19. ფლუორესცენციული მიკროსკოპი OMAX

ფლუორესცენციულ მიკროსკოპს შეუძლია აღმოაჩინოს ბიოლოგიური ნიმუშის მოლეკულების ძალიან მცირე რაოდენობაც კი და განსაზღვროს მათი მდებარეობა. კონფოკალურ მიკროსკოპში დამატებულია ორი დიაფრაგმა. პირველი ფილტრიდან გამოსული სინათლე ფოკუსირდება პირველ დიაფრაგმაში და ანათებს ნიმუშის მხოლოდ მცირე ნაწილს. თუ ნიმუშის ამ არეში არის ფლუოროფორები ისინი აღიგზნებიან და გამოასხივებენ სინათლეს რომელიც ფილტრისა და სარკის გავლის შემდეგ ხვდება მეორე დიაფრაგმაში. ამ შემთხვევაში კამერაში აღწევს მხოლოდ გარკვეული უბნიდან წამოსული სინათლე, ხელის შემშლელი ფონის გარეშე.

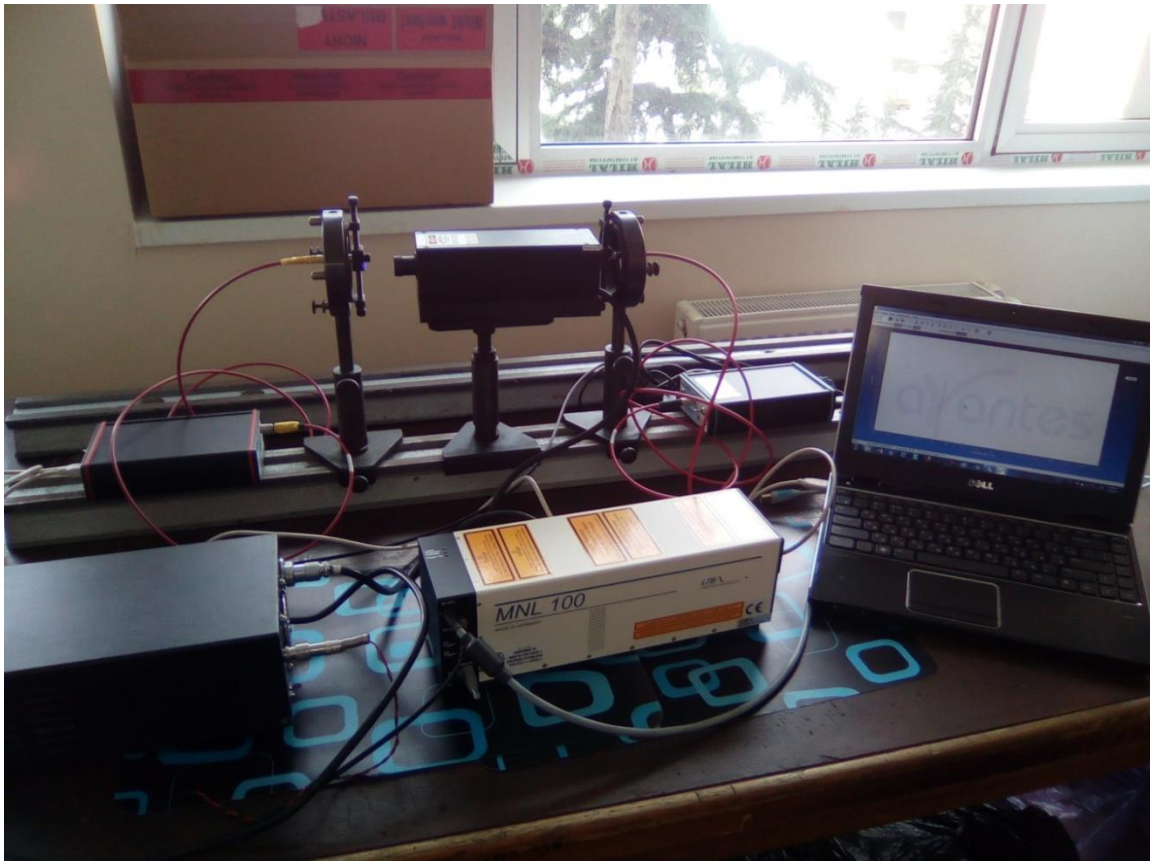
ნიმუშის ზედაპირის სკანირება შესაძლებელია მისი ან სინათლის ნაკადის მოძრაობით და ეს საშუალებას იძლევა შეიქმნას ნიმუშის ორგანოზომილებიანი გამოსახულება გარკვეულ მოცულობაში. სხივს შეუძლია ასევე იმოძრაოს სიმაღლეზე და დააფიქსიროს გამოსახულების გარკვეული სიმაღლეები. ნიმუშის მოცულობითი გამოსახულების მისაღებად საჭიროა სათანადო პროგრამული უზრუნველყოფა.

2.4 სპექტროფოტომეტრი

სპექტროფოტომეტრი Avaspec 2048, წარმოადგენს ორ მცირე ზომის ბლოკს, რომელთაგან ერთი არის კვების წყარო და მეორე მიმღები მოწყობილობა. კვების წყარო უერთდება დენს, ხოლო მიმღები USB სადენით კომპიუტერს, რომელზეც დაინსტალირებულია შესაბამისი პროგრამა და შემდეგ პროგრამის საშუალებით ხდება გაზომვის პარამეტრების და პროცესის შერჩევა. ორივე ბლოკთან ერთდება ოპტიკურ-ბოჭკოვანი სადენები, რაც ძალიან მოსახერხებელია ექსპერიმენტის სხვადასხვა ადგილას გაზომვების ჩასატარებლად. სპექტრომეტრი საშუალებას გვაძლევს გაზომვები ვაწარმოოთ სპექტრის ულტრაიისფერ, ხილულ და ახლო ინფრაწითელ უბნებში.

ოქროსა და ვერცხლის ნაწილაკებს პლაზმონური რეზონანსის პიკები მდებარეობს ოპტიკური სპექტრის ხილულ უბანში, რომელთა გამოსაკვლევად მოსახერხებელია სპექტრომეტრის გამოყენება.

ჩვენ ვიყენებთ დიოდურ ლაზერს DPSSL, ტალღის სიგრძით 457ნმ. ლაზერის ტალღის სიგრძე თანხვედრაშია ვერცხლის ნაწილაკების შთანთქმის პიკის სიდიდესთან და ნიმუშის დასხივებისას გვაქვს ეფექტური შთანთქმის სურათი. რასაც ასევე სპექტრომეტრის საშუალებით ვხედავთ.



სურათი 20. სპექტროფოტომეტრი Avaspec 2048

2.5 პოლიმერული ფირების დამზადების ტექნოლოგია

თერმოქრომული პოლიმერული ნანოკომპოზიტის მისაღებად ჯერ დავამზადეთ შემდეგი ნარევი: პვპ–ში გავხსენით კოლოიდური მონოდისპერსიული ვერცხლის ნანონაწილაკები პროპორციით 8მგ/1მლ და ვურიეთ მინიმუმ 3 საათის განმავლობაში ოთახის ტემპერატურაზე, რათა თავიდან აგვეცილებინა აგრეგაციები და მიგვეღო ჰომოგენური ნარევი. შემდეგ მეთანოლში გავხსენით პვპ პროპორციით 12მგ/1მლ და დავუმატეთ საღებარი 0.02მგ/1მლ მასური კონცენტრაციით მიღებულ ნარევს ვურივდით 1 საათის განმავლობაში ოთახის ტემპერატურაზე და შემდეგ დავაფინეთ დეიონიზირებული წყლით გასუფთავებულ მინის ზედაპირზე. შევინახეთ 24 საათი ოთახის ტემპერატურაზე. მოგვიანებით კი გამხსნელების ასაორთქლებლად 2 საათის განმავლობაში გამოვაშრეთ ღუმელში 70 °C –ზე. ამ ყველა

პროცედურის შემდეგ მივიღეთ ერთგვაროვანი ფენა, სისქით 20–30 μ . რომელიც დავასხივეთ 457 ნმ ტალღის სიგრძის მქონე ლაზერით და მოვახდინეთ მიღებული ცვლილებების სპექტრალური ანალიზი.

2.6 ქოლესტერული ნარევების დამზადების ტექნოლოგია

სასურველი თვისებების მქონე ნიმუშების მისაღებად დაგჭირდა სხვადასხვა ნარევების დამზადება:

78.8% BL006 +21.2% MLC-6248	$\partial P/\partial T=0$,	$\lambda_0=722\text{nm}$	$\Delta\lambda=132\text{nm}$
76% BL006 +24% MLC-6248	$\partial P/\partial T=0$,	$\lambda_0=634\text{nm}$	$\Delta\lambda=110\text{nm}$
73% BL006 +27% MLC-6247	$\partial P/\partial T=0$,	$\lambda_0=560\text{nm}$	$\Delta\lambda=112\text{nm}$
76% BL090+24% MLC-6248	$\partial P/\partial T=0$,	$\lambda_0=550\text{nm}$	$\Delta\lambda=106\text{nm}$
75% BL090+25% ZLI-811	$\partial P/\partial T \approx 0$,	$\lambda_0=632\text{nm}$	$\Delta\lambda=110\text{nm}$
72% BL090+28% ZLI-811	$\partial P/\partial T \approx 0$,	$\lambda_0=560\text{nm}$	$\Delta\lambda=108\text{nm}$
68% BL090+32% ZLI-811	$\partial P/\partial T \approx 0$,	$\lambda_0=507\text{nm}$	$\Delta\lambda=104\text{nm}$
68.5% BL090+31.5% MLC-6248	$\partial P/\partial T =0$,	$\lambda_0=434\text{nm}$	$\Delta\lambda=102\text{nm}$
70% BL090+15% ZLI-811+ 15% MLC-6247	$\partial P/\partial T =0$,	$\lambda_0=501\text{nm}$	$\Delta\lambda=106\text{nm}$
68% BL090+17% ZLI-811+ 15% MLC-6247	$\partial P/\partial T =0$,	$\lambda_0=480\text{nm}$	$\Delta\lambda=102\text{nm}$
70% BL090+20% ZLI-811+ 10% MLC-6247	$\partial P/\partial T =0$,	$\lambda_0=498\text{nm}$	$\Delta\lambda=104\text{nm}$
67.5% BL006+22.5% ZLI-811+ 10% MLC-6247	$\partial P/\partial T =0$,	$\lambda_0=516\text{nm}$,	$\Delta\lambda=106\text{nm}$
95% [72.5% BL090+27.5% MLC-6248]+5% RM257 ,	$\partial P/\partial T =0$,	$\lambda_0=510\text{nm}$	$\Delta\lambda=110\text{nm}$
95% [76% BL090+24% MLC-6248]+5% RM257	$\partial P/\partial T =0$,	$\lambda_0=550\text{nm}$	$\Delta\lambda=114\text{nm}$

95% [73% BL090+27% MLC-6248]+5% RM257	$\partial P/\partial T = 0,$	$\lambda_0=630\text{nm},$	$\Delta\lambda=118\text{nm}$
95% [69% BL090+15% MLC-6247+17% ZLI-811]+5% RM257	$\partial P/\partial T = 0,$	$\lambda_0=480\text{nm}$	$\Delta\lambda=108\text{nm}$
95.5% [69% BL006+10% MLC-6247+22.5% ZLI-811]+4.5% RM257	$\partial P/\partial T = 0,$	$\lambda_0=470\text{nm}$	$\Delta\lambda=106\text{nm}$
96% [66% BL006+10% MLC-6247+24% ZLI-811]+4% RM257	$\partial P/\partial T = 0,$	$\lambda_0=491\text{nm}$	$\Delta\lambda=104\text{nm}$
96% [66.5% BL006+14% MLC-6247+20.5% ZLI-811]+4% RM257	$\partial P/\partial T = 0,$	$\lambda_0=486\text{nm}$	$\Delta\lambda=102\text{nm}$
92% [66.5% BL006+14% MLC-6247+20.5% ZLI-811]+8% RM257	$\partial P/\partial T = 0,$	$\lambda_0=514\text{nm}$	$\Delta\lambda=108\text{nm}$
75.4% MLC-6815+24.6% MLC-6247	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=580\text{nm}$	$\Delta\lambda=34\text{nm}$
77.4% MLC-6815+22.6% MLC-6247	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=632\text{nm}$	$\Delta\lambda=38\text{nm}$
68% MLC-6815+32% MLC-6247	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=456\text{nm}$	$\Delta\lambda=36\text{nm}$
66% MLC-6815+34% MLC-6247	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=430\text{nm}$	$\Delta\lambda=30\text{nm}$
64% MLC-6815+36% MLC-6247	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=420\text{nm}$	$\Delta\lambda=28\text{nm}$
63% MLC-6815+37% MLC-6248	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=415\text{nm}$	$\Delta\lambda=26\text{nm}$
74% MLC-6816+26% MLC-6248	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=573\text{nm}$	$\Delta\lambda=32\text{nm}$
73% MLC-6816+27% MLC-6247	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=550\text{nm}$	$\Delta\lambda=32\text{nm}$
69.7% MLC-6816+30.3% MLC-6247	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=496\text{nm}$	$\Delta\lambda=30\text{nm}$
68.9% MLC-6816+31.1% MLC-6247	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=482\text{nm}$	$\Delta\lambda=28\text{nm}$
92% (73% MLC-6816+27% MLC-6247)+8%RM 257	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=576\text{nm}$	$\Delta\lambda=30\text{nm}$
92% (70% MLC-6816+30% MLC-6247)+8%RM 257	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=525\text{nm}$	$\Delta\lambda=28\text{nm}$

96% (68% MLC-6816+32% MLC-6247)+4%RM 257	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=474\text{nm}$ $\Delta\lambda=26\text{nm}$
97% (73.5% MLC-6816+26.5% MLC-6247)+3%RM 257	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=570\text{nm}$ $\Delta\lambda=32\text{nm}$
96% (68.9% MLC-6816+31.1% MLC-6247)+4%RM 257	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=490\text{nm}$ $\Delta\lambda=28\text{nm}$
95% (67.5% MLC-6816+23.5% MLC-6248)+5%RM 257	$\partial P/\partial T = 0$	$\lambda_0=460\text{nm}$ $\Delta\lambda=26\text{nm}$

სადაც, ნემატურ მატრიცად აღებულია შემდეგი ნივთიერებები: BL-006, BL-090, BL-036, MLC-6815, MLC-6816. ხოლო ოპტიკურად აქტიურ დანამატებად შერჩეულია შემდეგი ნივთიერებები: ZLI-811, MLC-6247, MLC-6248. თხევადკრიტალური მატრიცების პოლიმერიზაციისათვის გამოყენებული იყო RM 257. ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი ნივთიერებები შემენილი იყო Merck-ის ფირმაში.

ვერცხლს ნანოკომპოზიტების მისაღებად გამოვიყენეთ თერმოქრომული ნარევი 99.98%{90% EtOH + 10% PVP} +0.02% Nile red, რომელსაც შემდეგ დავამატეთ 40 ნმ ზომის ვერცხლის ნანონაწილაკები.

ოქროს ნანოკომპოზიტების მისაღებად შევარჩიეთ ქოლესტერული თხევადი კრისტალი BL-036 ნემატური მატრიცის და MLC-6247 ოპტიკურად აქტიური დანამატით შემდეგი პროპორციულობით 76w% BL-036 + 26w% MLC-6247, და დავამატეთ 5 ნმ ზომის მქონე ოქროს ნანონაწილაკები 4% -ის ოდენობით. ვურევდით მაგნიტური სარეველათი 24 საათის განმავლობაში, 80 გრადუსს ტემპერატურაზე რათა ოქროს ნანონაწილაკები თანაბრად განაწილებულიყო ქოლესტერულ მატრიცაში. მორევის სიჩქარე იყო 1200 rpm.

მიღებული ნარევი კაპილარული ძალების მეშვეობით შევიყვანეთ ოპტიკურ უჯრედში, რომელიც შედგება ორი პარალელური მინისაგან, მინებს შორის მანძილია 20 მიკრონი, რომელიც დაფიქსირებულია ტეფლონის ფირის გამოყენებით.

ოპტიკური უჯრედის ხარისხს და ნივთიერების განაწილებას ვაკვირდებოდით მიკროსკოპის საშუალებით.

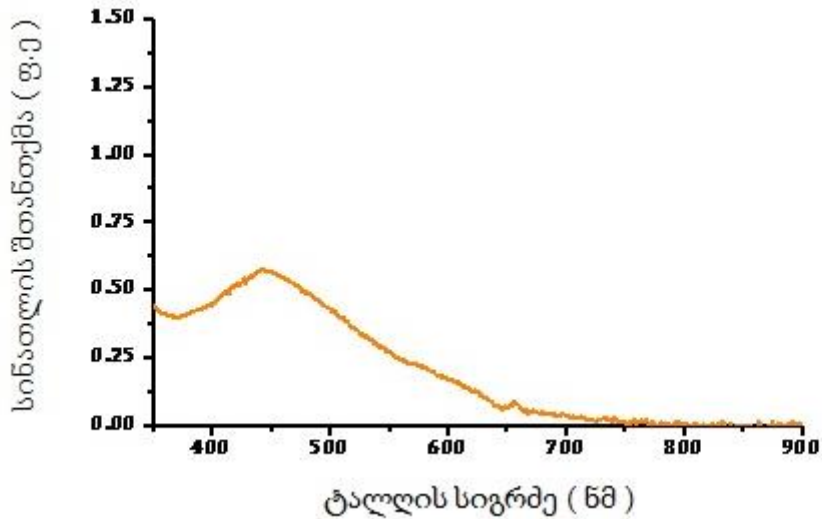
თერმო და ფოტო–ოპტიკური თვისებების გამოსაკვლევად გამოვიყენეთ ოპტიკური მაგიდა, სპექტროფოტომეტრი Avantes 2048, ლაზერი, ვერცხლისწყლის ნატურა, მიკროსკოპები და სხვა ოპტიკური ხელსაწყოები.

მესამე თავი

ტემპერატურის ვიზუალიზაცია და გაზომვა მიკრო და ნანო მასშტაბებში განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს თანამედროვე მეცნიერებისა და ტექნიკის ისეთ მიმართულებებში, როგორებიცაა: მზის ელემენტები, თერმო და ფოტო ადრესირებადი დისპლეები, გარემოს მავნე ნივთიერებებით დაბინძურების მონიტორინგი, ულტრაიისფერი და მავნე რადიაციული გამოსხივების დოზიმეტრები, ბიოლოგიურ ქსოვილებში ტემპერატურის განაწილების ვიზუალიზაცია და სიმსივნური უჯრედების კონტროლირებადი ფოტო–თერმული დაშლა. მოცემულ თავში წარმოდგენილია ვერცხის ნანონაწილაკებითა და თერმოქრომული საღებარებით დისპერგირებულ პოლიმერულ ნანოკომპოზიტებში სინათლით სტიმულირებული ფოტო–თერმული გარდაქმნების შედეგად მიღებული სითბური ველების განაწილების ვიზუალიზაცია მიკრო და ნანომასშტაბებში [69-75].

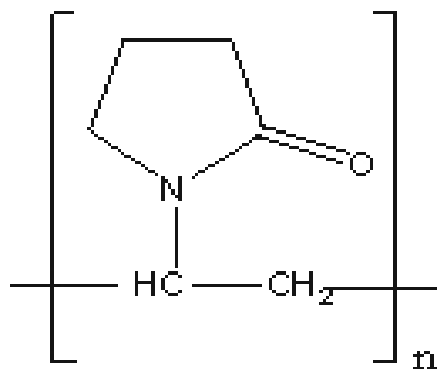
3.1 ექსპერიმენტის ჩატარება

ჩვენს ხელთ არსებული ვერცხლის (Ag) ნანონაწილაკები, ზომით ≈ 40 ნმ, არის კომერციულად ხელმისაწვდომი, სერთიფიცირებული, შეძენილი Sigma-Aldrich-ის ფირმიდან. მათი შთანთქმის სპექტრი მოცემულია სურ. 21–ზე, საიდანაც ჩანს რომ შთანთქმის მაქსიმუმი შეესაბამება 440 ნმ ტალღის სიგრძეს.



სურათი 21. ვერცხლის ნანონაწილაკების ზედაპირული პლაზმონური ელექტრონების შთანთქმის სპექტრი

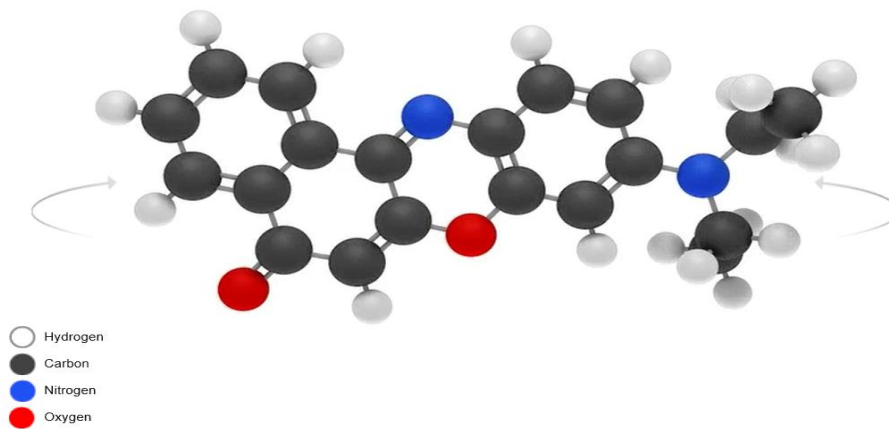
პოლიმერი, პოლივინილ პიროლიდონი (პვპ) წარმოადგენს მონომერების ერთობლიობას, რომელიც გახსნილია წყალში. იგი ასევე იხსნება სპირტში, ტოლუოლში და სხვა გამხსნელებში. იგი სტაბილურია ქიმიურად, ფოტოქიმიურად და მექანიკურად. ახასიათებს დნობის მაღალი ტემპერატურა. არატოქსიკურია და გამოიყენება სისხლის შემცვლელის ერთ-ერთ ძირითად კომპონენტად.



სურათი 22. პოლიმერი პოლივინილ პიროლიდონი – პვპ (PVP)

საღებარის სახით გამოყენებულია თერმოქრომული, არატოქსიკური, სერტიფიცირებული და კომერციულად ხელმისაწვდომი Sigma-Aldrich-ის ფირმის

წარმოების საღებარი: ნილოსის წითელი (Nile red) რომელიც არის სტაბილური და გააჩნია ლუმინესცენციის მაღალი ქვანტური გამოსავალი.



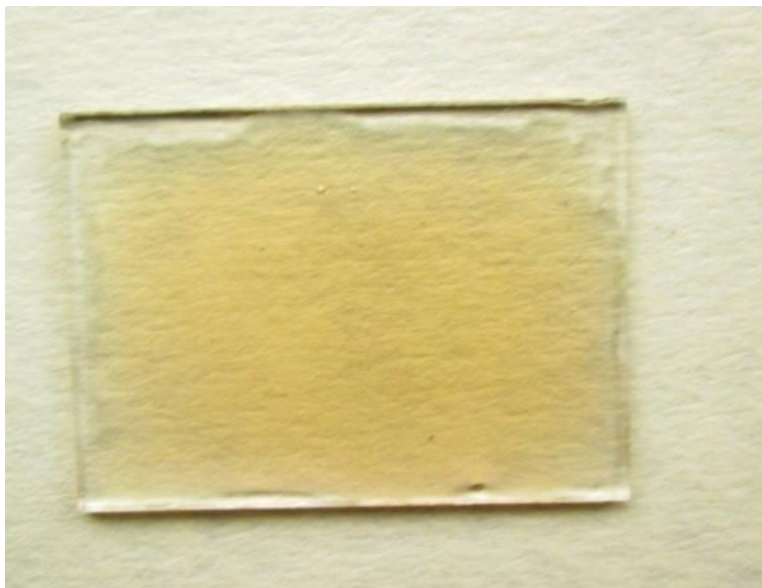
სურათი 23. თერმოქრომული საღებარი– ნილოსის წითელი (Nile red)

თერმოქრომული პოლიმერული ნანოკომპოზიტის მისაღებად თავდაპირველად დავამზადეთ შემდეგი ნარევი: პვპ–ში გავხსენით კოლოიდური მონოდისპერსიული ვერცხლის ნანონაწილაკები პროპორციით 8 მგ / 1 მლ და მოვურიეთ მინიმუმ 3 საათის განმავლობაში ოთახის ტემპერატურაზე, რათა თავიდან აგვეცილებინა აგრეგაციები და მიგველო ერთგვაროვანი (ჰომოგენური) ნარევი. შემდეგ მეთანოლში გავხსენით პვპ პროპორციით 12 მგ / 1 მლ და დავუმატეთ საღებარი, ნილოსის წითელი 0.02 მგ / 1 მლ მასური კონცენტრაციის. მიღებულ ნარევს ვურევდით 1 საათის განმავლობაში ოთახის ტემპერატურაზე და შემდეგ დავაფინეთ დეიონიზირებული წყლით გასუფთავებულ მინის ზედაპირზე. შევინახეთ 24 საათი ოთახის ტემპერატურაზე. მოგვიანებით კი გამხსნელების ასაორთქლებლად 2 საათის განმავლობაში გამოვაშრეთ ღუმელში 70 °C –ზე. ჩატარებული პროცედურების შემდეგ მივიღეთ ერთგვაროვანი ფენა, სისქით 20–30 მკმ. რომელიც დავასხივეთ 457 ნმ ტალღის სიგრძის მქონე ლაზერით და მოვახდინეთ მიღებული შედეგების სპექტრალური ანალიზი.

3.2 ფოტო-თერმული გარდაქმნა ვერცხლის ნანონაწილაკებითა და თერმოქრომული საღებარით დამატებულ პოლიმერულ ნანოკომპოზიტში.

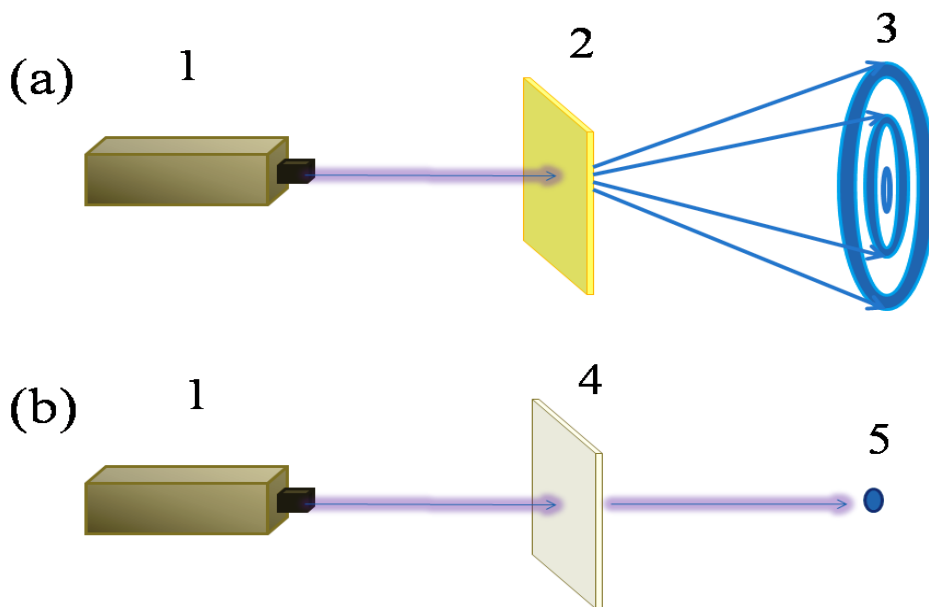
ოპტიკურ-თერმული გარდაქმნების ვიზუალიზაციისათვის ავირჩიეთ ორი სტრატეგია და ორივე შემთხვევაში დაცემული სინათლის სიხშირე ემთხვეოდა ვერცხლის ნანონაწილაკების ზედაპირული ელექტრონების პლაზმონურ სიხშირეს. პირველი, როდესაც ადგილი აქვს ტემპერატურულად ინდუცირებულ გარდატეხის მაჩვენებლის მოდულაციას და ეს მოდულაცია კორელაციაშია ლაზერული სხივის გაუსიანის განაწილებასთან. და მეორე, თერმოქრომულ ეფექტზე დაფუძნებული მოვლენა, როდესაც ტემპერატურის განაწილების ვიზუალიზაცია ხდება თერმოქრომული საღებარების საშუალებით. ქვემოთ დეტალურადაა წარმოდგენილი თითოეული მეთოდი.

პირველი მეთოდი: პოლიმერში შევიყვანეთ ვერცხლის ნანონაწილაკები და შემდეგ დავაფინეთ მინაზე და გამოვაშრეთ ლუმელში $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე. ასევე მეორე მინაზე დავაფინეთ პოლიმერი ვერცხლის ნანონაწილაკების გარეშე. ვერცხლის ნანონაწილაკების როლის დასადგენად ოპტიკურ-თერმულ გარდაქმნებში ორივე ნიმუში დავასხივეთ ლაზერის საშუალებით, რომლის ტალღის სიგრძე არის $\lambda = 457\text{ნმ}$.



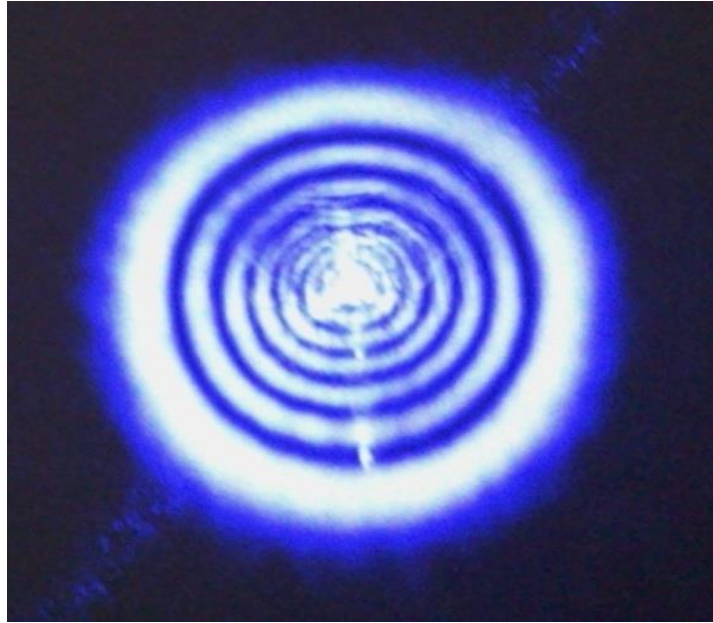
სურათი 24. მინაზე დაფენილი პოლიმერული ნანოკომპოზიტი

ჯერ დავასხივით ნიმუში, რომელშიც მხოლოდ პოლიმერული მატრიცა იყო ნანონაწილაკების გარეშე, ხოლო შემდეგ ნიმუში, რომელიც შედგებოდა პოლიმერში დამატებული ვერცხლის ნანონაწილაკებისაგან. იმის გამო, რომ პოლიმერულ მატრიცაში არ გვაქვს ვერცხლის ნანონაწილაკები, ლაზერის სხივი არ შთაინთქმება და ეკრანზე მიიღება სხივის გამოსახულება უცვლელად. ხოლო იმ შემთხვევაში, როდესაც გვაქვს პოლიმერში დამატებული ვერცხლის ნანონაწილაკები, ლაზერის სხივი შთაინთქმება და ადგილი აქვს ოპტიკურ-თერმულ გარდაქმნას, რაც ეკრანზე აისახება ლაზერული სხივის კონცენტრირებული რგოლების პროექცირების სახით. სურათი 25.



სურათი 25. ლაზერის სხივის გავლა პოლიმერულ მატრიცაში, რომელშიც დამატებულია ვერცხლის ნანონაწილაკები **a)** და **b)** ნანონაწილაკების გარეშე

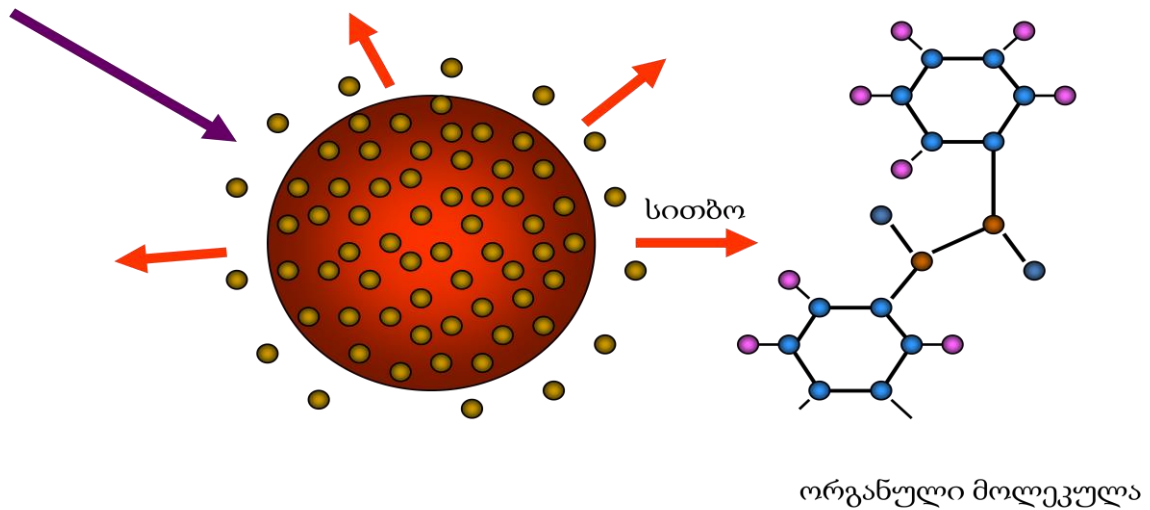
სურათი 26-ზე ნაჩვენებია ლაზერის სხივის ზემოქმედებით მშთანთქმელ გარემოში ოპტიკურ-თერმული გარდაქმნა



სურათი 26. ლაზერის დასხივების შედეგად გარემოში ინდუცირებული გარდატეხის მაჩვენებლის მოდულაცია

მეორე მეთოდის არსი მდგომარეობს სითბოს ნანო და მიკრო მასშტაბებში განაწილების ვიზუალიზაციაში თერმოქრომული საღებარის საშუალებით.

იმ შემთხვევაში, როდესაც დაცემული სინათლის ტალღის სიხშირე ემთხვევა ნანონაწილაკების ზედაპირული ელექტრონების პლაზმონურ სიხშირეს, ხდება დაცემული სინათლის ეფექტური შთანთქმა. შედეგად ელექტრონები გადადიან აღზნებულ მდგომარეობაში და შემდეგ ძალიან სწრაფად კოლექტიურად ბრუნდებიან საწყის ენერგეტიკულ მდგომარეობაში. ეს გადასვლა ხდება პიკოწამებში, რაც იწვევს ენერჯის კოლოსალური რაოდენობის გამოყოფას ძირითადად სითბოს სახით. გამოყოფილი სითბოს შედეგად ხდება ვერცხლის ნანონაწილაკების გაცხელება და ეს სითბო ვრცელდება ნანო და მიკრო განზომილებების მქონე უბნებში. იმისათვის, რომ მოვახდინოთ ამ გამოყოფილი სითბოს ვიზუალიზაცია ნანოკომპოზიტს დავუმატეთ თერმოქრომული საღებარი ნილოსის წითელი.



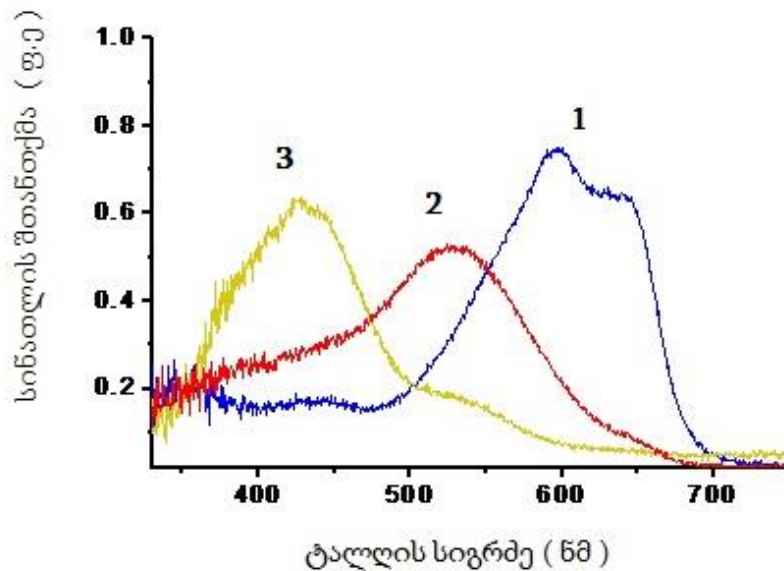
სურათი 27. სინათლის ზემოქმედებით ვერცხლის ნანონაწილაკებიდან ხდება სითბოს გადაცემა თერმოქრომული საღებარის მოლეკულებზე

მოცემული საღებარის თერმოქრომულობის საჩვენებლად დავამზადეთ პოლიმერული ფირი, რომელშიც არის დავამატეთ შერჩეული საღებარი, დავაფინეთ ფოლგაზე და გავაცხელეთ.



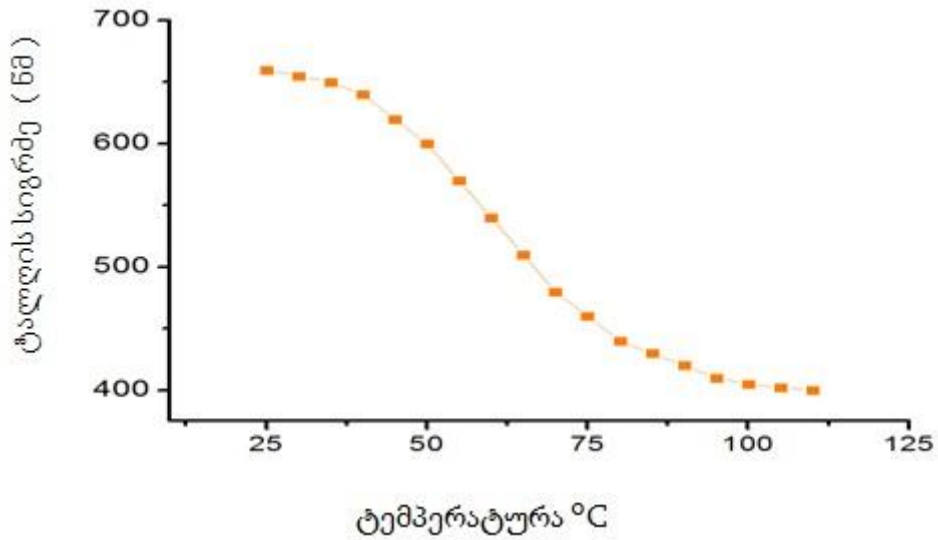
სურათი 28. თერმოქრომული პოლიმერული ფირის საშუალებით ნაჩვენებია ტემპერატურის განაწილება. კერძოდ, ლურჯი შეესაბამება ოთახის ტემპერატურას, წითელი 50–70 °C, და ყვითელი 80–90°C.

28-ე სურათზე ლურჯი ფერი შეესაბამება ოთახის ტემპერატურას, წითელი 50–70 °C, ყვითელი 80–90 °C ქვემოთ ნაჩვენებია სპექტრის ცვლილება, ტემპერატურის გაზრდით ხდება შთანთქმის პიკის წანაცვლება გრძელტალღოვანი უბნიდან მოკლეტალღოვანი უბნისკენ.



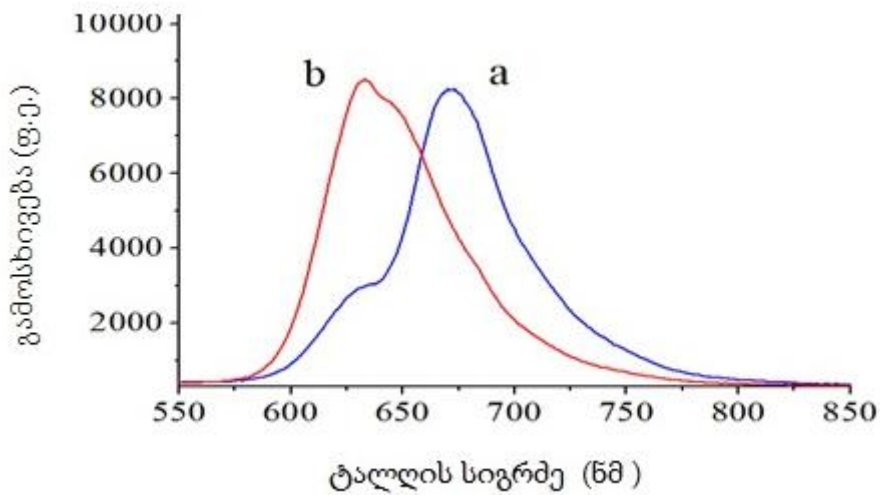
სურათი 29. პოლიმერული თერმოქრომული ნანოკომპოზიტის შთანთქმის ზოლის ტემპერატურული წანაცვლება გრძელტალღოვანი უბნიდან მოკლეტალღოვანი უბნისაკენ. 1) შეესაბამება ოთახის ტემპერატურას, 2) შეესაბამება 50–70 °C და 3) შეესაბამება 80–90 °C

გარდა ამისა, ჩვენ დავაკალიბრეთ შთანთქმის პიკების წანაცვლება ტემპერატურის მიხედვით, რათა ზუსტად გვცოდნოდა ტემპერატურის დამოკიდებულება შთანთქმის პიკების წანაცვლებაზე.



სურათი 30. პოლიმერული ნანოკოპოზიციის შთანთქმის პიკების ტემპერატურული დამოკიდებულება

და ვნახეთ რომ გაცხელების შედეგად არა მარტო შთანთქმები წანაცვლდება, არამედ წანაცვლდება ლუმინესცენციებიც. სურათი 31.

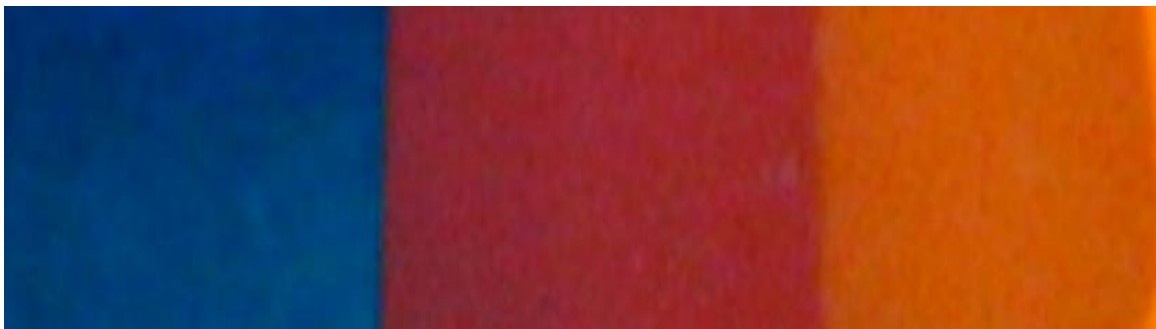


სურათი 31. ტემპერატურის ცვლილების შედეგად ლუმინესცენციების წანაცვლება ხდება a) გრძელტალღოვანი უბნიდან b) მოკლეტალღოვანი უბნისაკენ

ნანონაწილაკების სიახლოვეს ტემპერატურის შესაფასებლად ნიმუში დავასხივებთ 100 ვტ სიმძლავრის ვერცხლისწყლის ნათურით mercury lamp HG 100 AS. 390–450 ნმ ტალღის სიგრძის ოპტიკური ფილტრის გამოყენებით. ნათურასა და

ნიმუშს შორის მანძილი იყო 15 სმ. სინათლის ინტენსივობა ნიმუშის ზედაპირზე არის 0.2 მკ/სმ^2 და მთლიანი დასხივების დრო 12 წუთი.

როდესაც სინათლე ეცემა ნიმუშს, ნანოკომპოზიტი იცვლის ფერს, ნანონაწილაკების სიახლოვეს მყოფი თერმოქრომული საღებარების ფერის ცვლილების გამო. ნიმუშის ზედაპირზე გვაქვს განსხვავებული ფერები დასხივების დროის მიხედვით. $t=0$ დროის მომენტისთვის ნიმუშს აქვს ლურჯი ფერი, $t=6$ წუთი დასხივებისას ნიმუშმა მიიღო მოწითალო-მოყავისფრო ფერი, ხოლო $t=12$ წუთის შემდეგ გახდა მონარინჯო-მოყვითალო ფერის.



სურათი 32. ტემპერატურის განაწილება ვერცხლის წყლის ნათურით დასხივების დროს, $t=0$ დროის მომენტისათვის ნიმუშს აქვს ლურჯი ფერი, $t=6$ წუთი მოწითალო-მოყავისფრო ფერი, $t=12$ წუთის შემდეგ მონარინჯო-მოყვითალო ფერის.

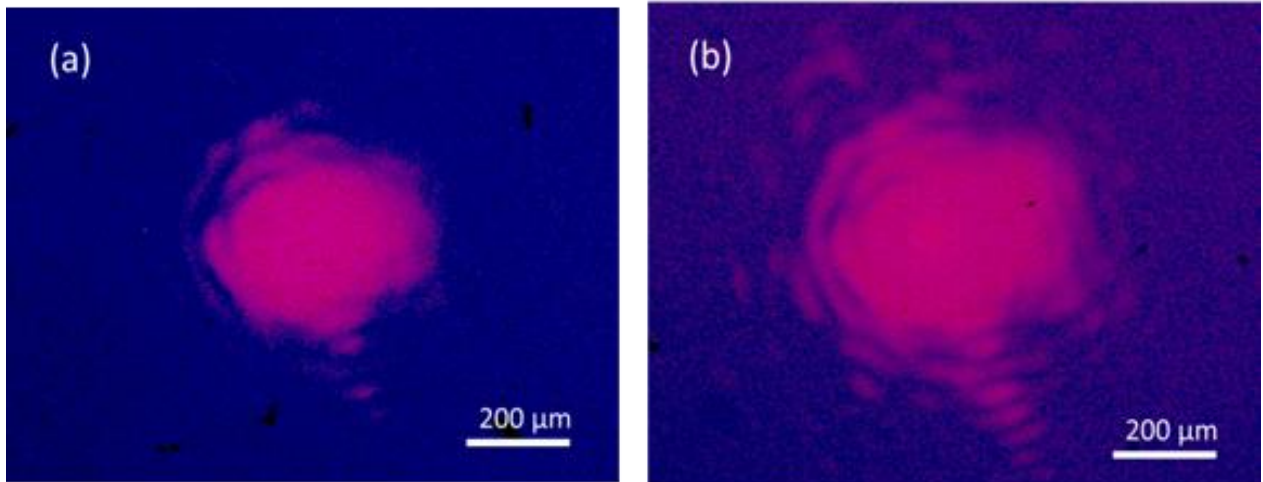
შემდეგ დავამზადეთ ისეთივე თერმოქრომული ფირი, მხოლოდ ნანონაწილაკების გარეშე და გავიმეორეთ იგივე ექსპერიმენტი. პოლიმერულმა ფირმა ფერი არ შეიცვალა, რაც იმის მაჩვენებელია რომ ნიმუშს ფერს უცვლიდა ვერცხლის ნანონაწილაკების არსებობა.



სურათი 33. პოლიმერული ფირი ნანონაწილაკების გარეშე $t=12$ წუთის დასხივების შემდეგ

ბოლოს ნანონაწილაკებიანი ფირი დავასხივეთ $\lambda = 405$ ნმ ტალღს სიგრძის მქონე ლაზერით და დასხივების შემდეგ ნიმუში დავათვალიერეთ მიკროსკოპით .

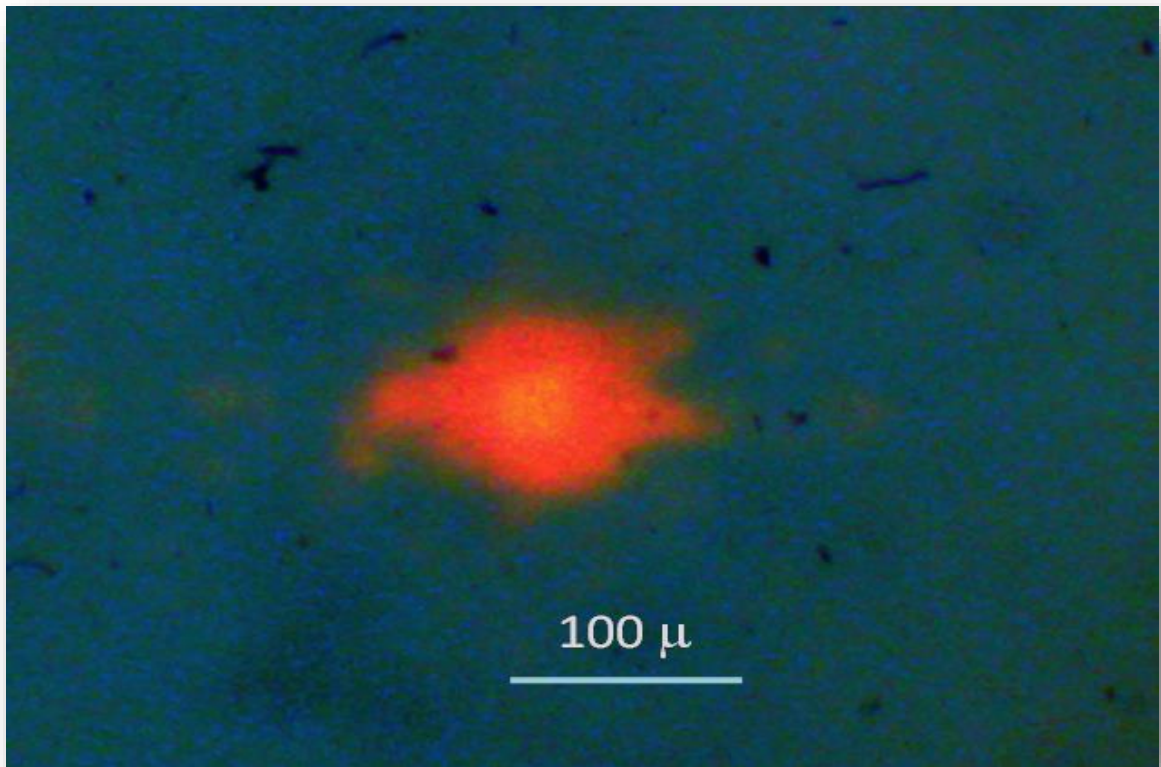
პირველ შემთხვევაში ნიმუში სხივდებოდა 30 წამის განმავლობაში 150 მკ სიმძლავრით, ხოლო მეორეში 90 წამი იგივე სიმძლავრით. სურათზე გვაქვს სითბოს გავრცელება ლაზერის სხივის დაცემის წერტილის სიახლოვეში.



სურათი 34. სითბოს განაწილება ლაზერის სხივის დაცემის წერტილის გარშემო a) $t = 30$ წმ და b) $t = 90$ წმ ის დროს

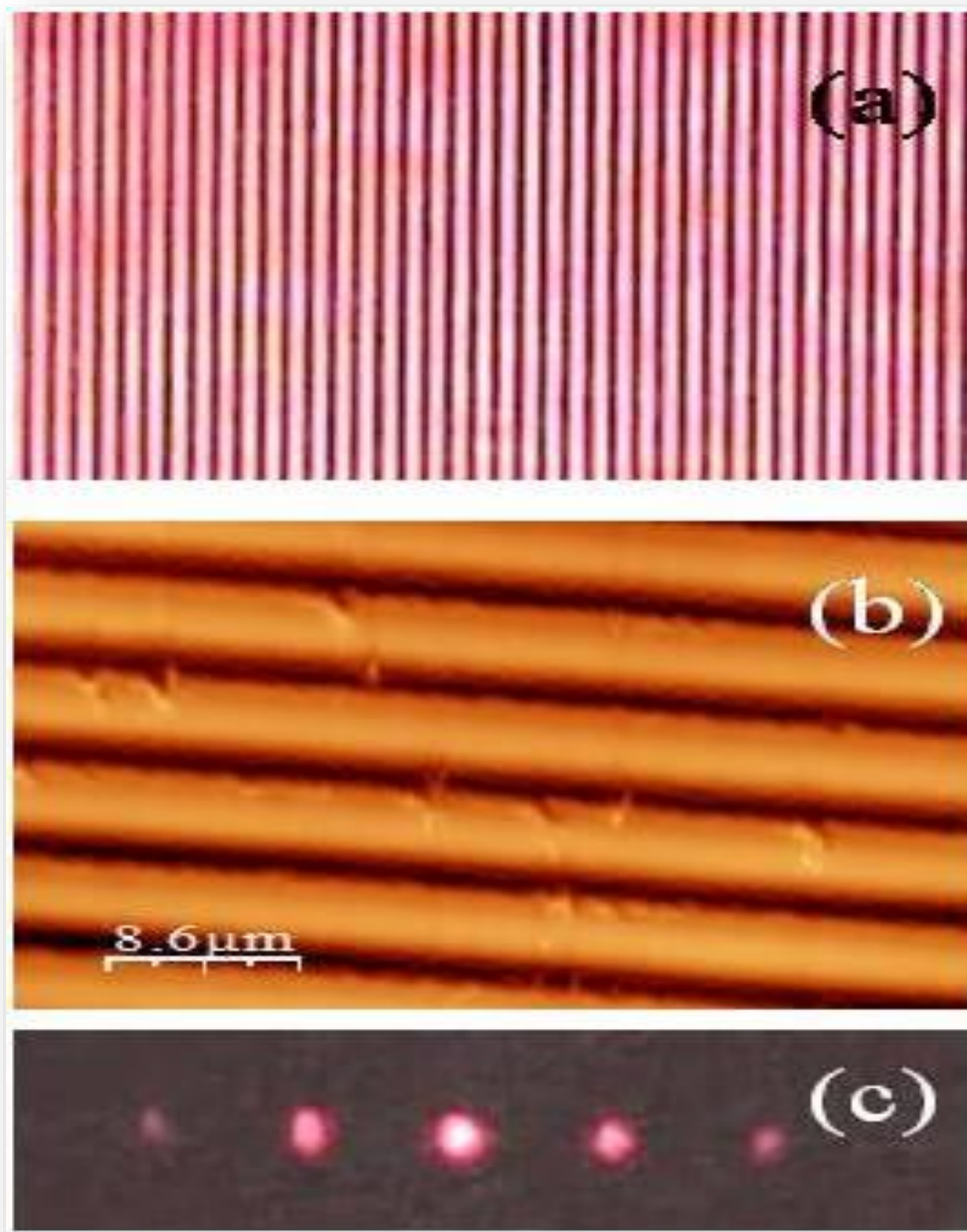
III თავის დასკვნა

ჩვენს მიერ დამზადებული იყო პოლიმერული ნანოკომპოზიტი, რომელიც შედგება თანაბრად დისპერგირებული ვერცხლის ნანონაწილაკებისა და თერმოქრომული ლუმინესცენციური საღებარებისაგან. ნაჩვენები იყო, რომ ასეთი სახის კომპოზიცია მოქმედებს როგორც თერმოქრომული ნივთიერება, რომელსაც გააჩნია ისეთი გამორჩეული პარამეტრები როგორებიცაა: ოპტიკური სპექტრის ფართო უბანში შთანთქმისა და ლუმინესცენციის ზოლების ტემპერატურულად მართვადი თანაბარი და უწყვეტი გადაწყობა.



სურათი 35. სითბოს მიკროზომებში გავრცელების ვიზუალიზაცია

ჰოლოგრაფიული მეთოდის გამოყენებით მოცემულ ნანოკომპოზიტებში მოხდა დიდი სიმკვრივის მქონე სტაბილური მესერების ჩაწერა სურ 36.



სურათი 36. a და b გამოსახავს პოლიმერულ ნანოკომპოზიტში ჩაწერილ მესერს, რომელიც მიღებულია ჰოლოგრაფიული მეთოდის გამოყენებით. ხაზებს შორის მანძილი არის 4.0μ . ხოლო c წარმოადგენს ლაზერის დასხივების შედეგად მიღებულ სინთლის დიფრაქციულ რიგებს.

ვვარაუდობთ, რომ უახლოეს მომავალში ჩვენი ნანოკომპოზიტი შესაძლებელია განხილული იქნას როგორც ახალი თვისებების მქონე ნივთიერება, რომელიც

სწრაფად მოიპოვებს თავისი გამოყენების პოზიციებს ისეთ მიმართულებებში, როგორცაა:

- თერმოადრესირებადი ლუმინესცენციური დისპლეებისა და თერმოოპტიკური პრინტერების დამზადება.
- იკვეთება ახალი შესაძლებლობები სითბოს ნანოზომებში გავრცელების გაზომვისათვის.
- ასევე ნანოზომების მქონე, კვანტური ინფორმაციის დაგროვების ხელსაწყოებისათვის,
- თერმულად მართვადი ფილტრების, ფანჯრებისა და ჭკვიანი ფენებისათვის.
- გამოსახულების ინფრაწითელი გარდამქმნელებისათვის.
- გარემოსადმი უსაფრთხო, თერმოქრომული ტანსაცმლის დამზადება.
- მედიცინაში: ბიოლოგიურ ქსოვილებში სითბოს განაწილების ვიზუალიზაციისათვის

მეოთხე თავი

ამ თავში შესწავლილია ოქროს ნანონაწილაკებითა და ლუმინესცენციური საღებარებით დისპერსირებული თხევად კრისტალური ნანოსტრუქტურები. ასეთი სახის ნანოსტრუქტურებს დიდი ყურადღება ეთმობა, რადგან მათ საფუძველზე შეიძლება შეიქმნას ნანონაწილაკების კონტროლირებად განაწილებაზე დაფუძნებული ახალი სახეობის ნივთიერებები და მოწყობილობები. ექსპერიმენტებმა გვიჩვენა, რომ ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ნარევი წარმოადგენენ თვით ორგანიზებულ სტრუქტურებს, რომლებიც გამოირჩევიან საინტერესო და გამოყენების თვალსაზრისით პერსპექტიული ოპტიკური, თერმული, ელექტრული და ფოტო-ოპტიკური ნიშან-თვისებებით.

ჩვენ შევიმუშავეთ ახალი კონცეფცია, რომელიც საშუალებას იძლევა ქოლესტერულ თხევად კრისტალში გავხსნათ დიდი კონცენტრაციით (20 % wt)

ოქროს ნანონაწილაკები, ისე რომ არ მოხდეს ქოლესტერული თხევადი კრისტალის სტრუქტურული დაშლა. მომზადებული ნარევების თვისებები გამოკვლეული იქნა ოპტიკურად, თერმულად, ელექტრო და ფოტო-ოპტიკურად, შედეგად მივიღეთ:

- სინათლის გამოსხივების გაძლიერება ქოლესტერულ თხევად კრისტალში ლუმინესცენციური საღებარის და ოქროს ნანონაწილაკების დამატებით.
- ტემპერატურის განაწილების ვიზუალიზაცია ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებულ ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში.
- ოქროს ნანონაწილაკებით მოდიფიცირებული სელექტიური ამრეკლაობის წანაცვლება ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში ოქროს ნანონაწილაკების სხვადასხვა კონცენტრაციების დროს.

ექსპერიმენტების დროს დადგინდა, რომ შესაძლებელია ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული თხევადკრისტალური ნახევარგამტარების მიღება, თხევადკრისტალური მოლეკულების ორიენტაციული და სინათლით მართვადი ელექტრო გამტარებლობა [76-86].

ჩატარებული კვლევების მეცნიერული სიახლეებია:

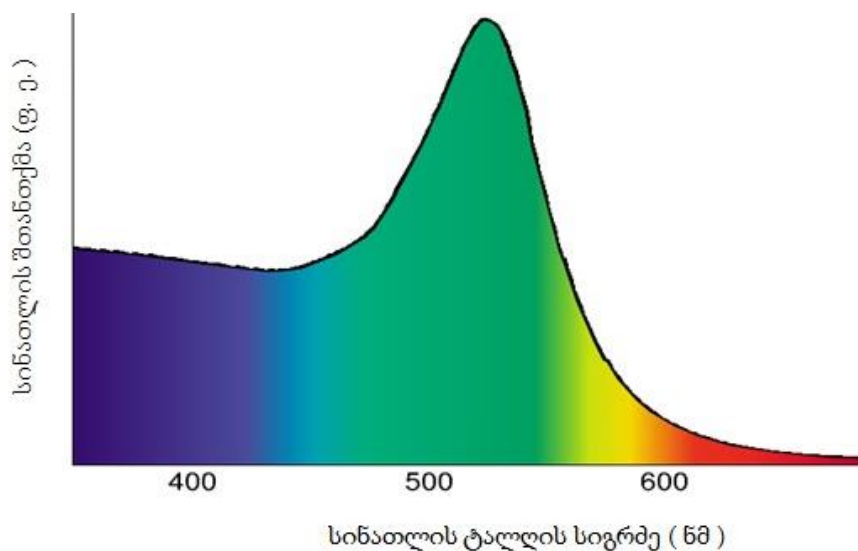
ა) განსხვავებით აქამდე ცნობილი ექსპერიმენტებისა, მასპინძელ მატრიცად გამოყენებული იქნა ქოლესტერული თხევადი კრისტალი, რომლის სელექტიური არეკვლის პერიოდი მდებარეობს ოპტიკური სპექტრის ხილულ უბანში და მოვახდინეთ მისი უწყვეტი გადაწყობა.

ბ) შემუშავებული ინოვაციური მეთოდიკის საფუძველზე განვახორციელეთ ოქროს ნანონაწილაკების ექსტრემალურად დიდი რაოდენობით დამატება ქოლესტერულ თხევად კრისტალურ სტრუქტურებში, ისე რომ არ მოხდა ოქროს ნანონაწილაკების აგრეგაცია (კლასტერიზაცია). ყოველივე ეს საშუალებას მოგვცემს დავამზადოთ თვისობრივად ახალი სახეობის ნანოკომპოზიტები, ხოლო ოქროს ნანონაწილაკების ზომების, ფორმების, კონცენტრაციების, ურთიერთგანლაგებისა და დაშორების მანძილების ვარირებით მივიღოთ შესაბამისი სტრუქტურები დასახული ამოცანების შესასრულებლად, რაც მდგომარეობს ახალი სახეობის, მრავალფუნქციონალური ნანოკომპოზიტების შექმნასა და მათი ოპტიკური, ელექტრო, თერმო და ფოტო ოპტიკური თვისებების დემონსტრირებაში.

4.1 სინათლის გამოსხივების გაძლიერება ქოლესტერულ თხევად კრისტალში ლუმინესცენციური საღებარის და ოქროს ნანონაწილაკების დამატებით.

ახალი სახეობის ხელოვნური კომპოზიციური ნივთიერებები, რომელთაც ხშირად უწოდებენ „მეტანივთიერებებს“, ფლობენ უზარმაზარ გამოყენებით პოტენციალს მეცნიერებისა და ტექნიკის თანამედროვე მიმართულებებში. განსაკუთრებით აღსანიშნავია ნანო-განზომილების მქონე სტრუქტურები, რომელთაც გააჩნიათ უნიკალური ოპტიკური და ელექტრონული თვისებები. და რომლებიც მკვეთრად განსხვავდება ამავე ნივთიერებების მიერ შექმნილი მოცულობითი მდგომარეობებისაგან

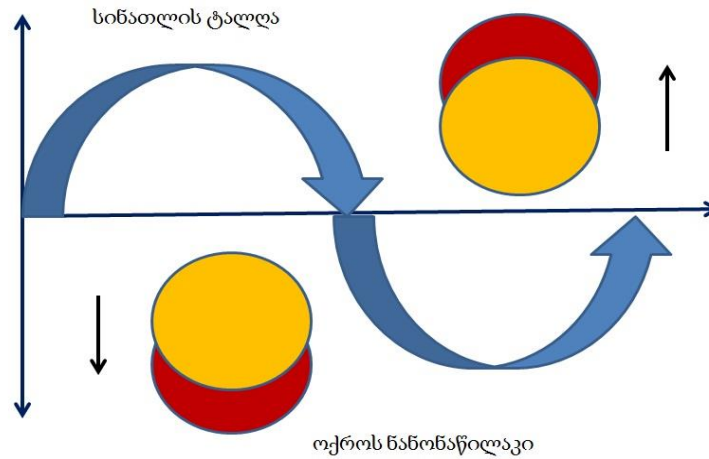
მეტალურ ნანონაწილაკებს შორის ოქროს ნანონაწილაკების შესწავლას განსაკუთრებული ადგილი უკავია, რადგან მათ გააჩნიათ მეტად საინტერესო და მიმზიდველი თვისებები, როგორებიცაა: მათი ორგანიზებული განაწილება სხვადასხვა სტრუქტურებში, ზომებზე დამოკიდებული ელექტრული, მაგნიტური, თერმული და ოპტიკური თვისებები, ზედაპირული პლაზმონური ელექტრონების შთანთქმის და გაბნევის პიკის მდებარეობა ოპტიკური სპექტრის ხილულ უბანში, სურათი 37.



სურათი 37. ოქროს ნანონაწილაკების ზედაპირული პლაზმონური ელექტრონების შთანთქმის სპექტრი

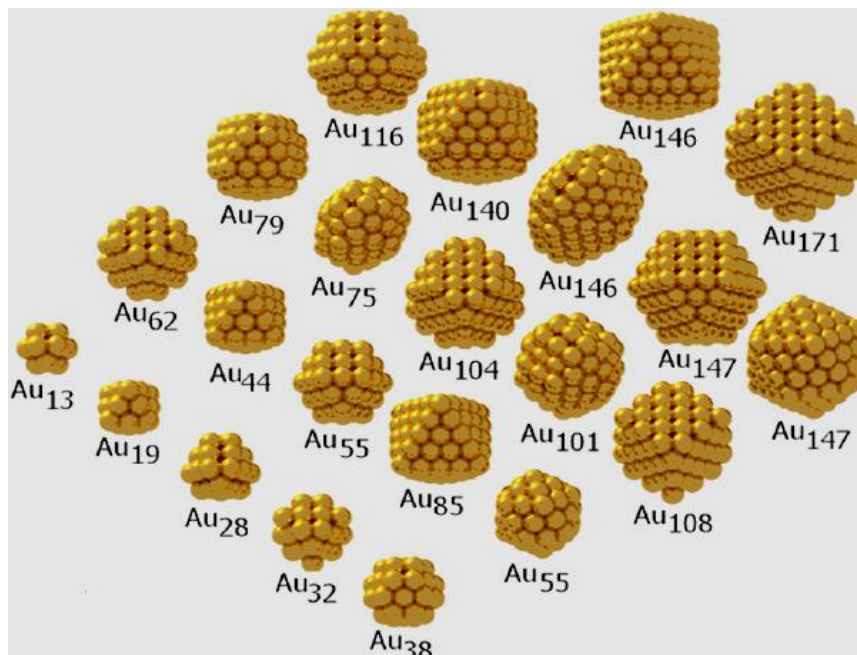
სინათლით ზემოქმედებისას, როდესაც დასხივებული სინათლის ტალღის სიხშირე ემთხვევა ოქროს ნანონაწილაკების პლაზმონური ელექტრონების რხევის

სიხშირეს, ადგილი აქვს მოცემული პლაზმონური ელექტრონების წანაცვლებას და აქედან გამომდინარე, შესაბამის ელექტრო, მაგნიტურ, თერმო და აკუსტიკურ ეფექტებს.



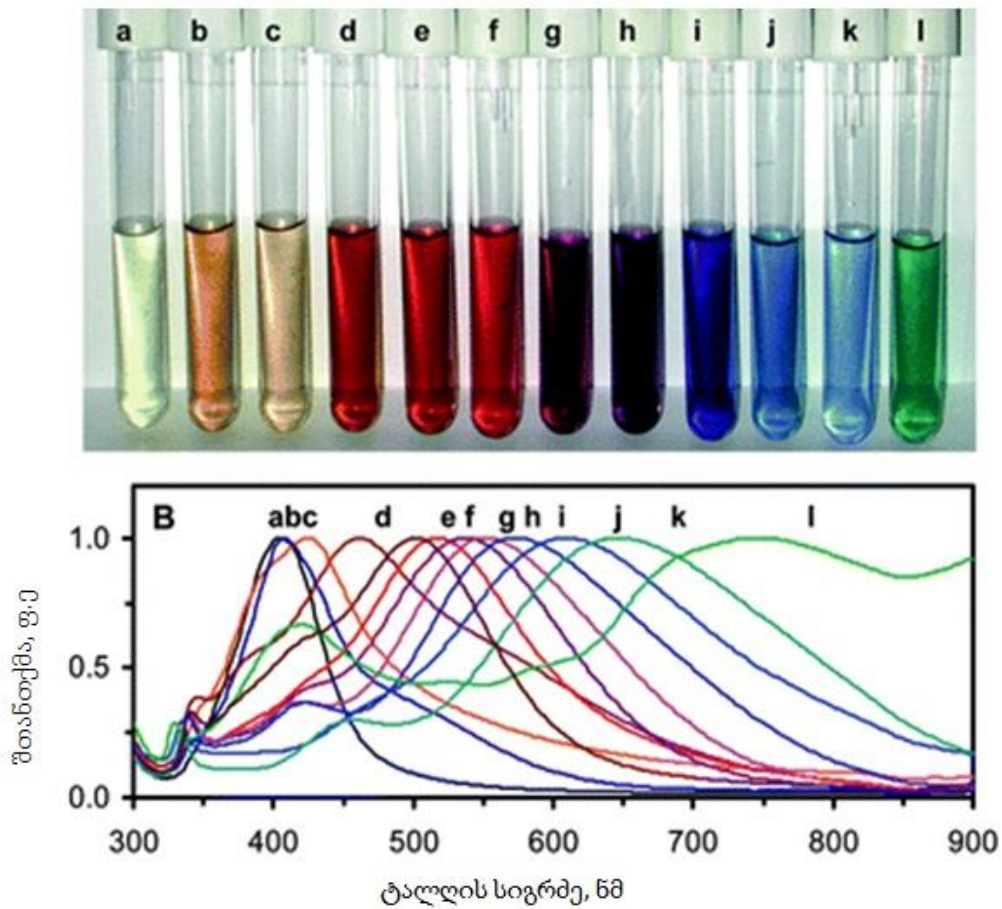
სურათი 38. სინათლის ზემოქმედებით ოქროს ნანონაწილაკების პლაზმონური ელექტრონების წანაცვლება

ოქროს ნანონაწილაკები ხშირად მოხსენებულია როგორც საფუძველი და ქვაკუთხედი მასალა 21 -ე საუკუნის ნანომეცნიერებასა და ნანოტექნოლოგიებში, სურათი 39.



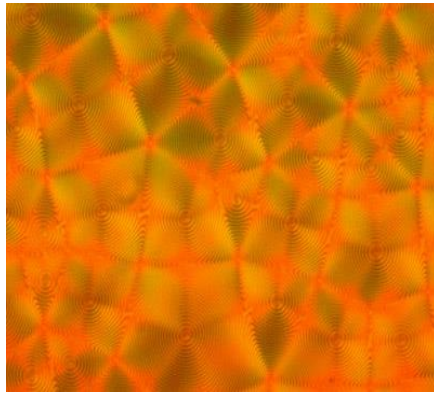
სურათი 39. ოქროს ნანონაწილაკების მიერ შექმნილი სხვადასხვა სივრცული სტრუქტურები

ოქროს ნანონაწილაკების პლაზმონური პიკების სპექტრალური მდებარეობები დამოკიდებულია მათსავე ზომებსა და ფორმებზე, სურათი 40.

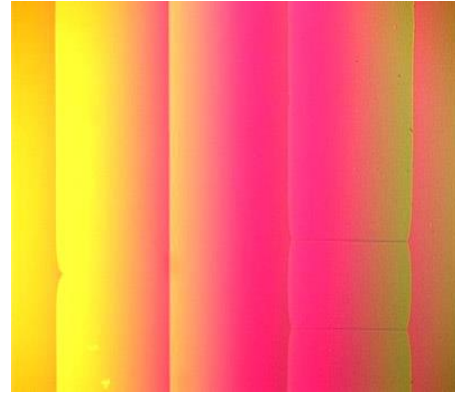


სურათი 40. ოქროს ნანონაწილაკების ზედაპირული პლაზმონური ელექტრონების შთანთქმის სპექტრალური დამოკიდებულება ნანონაწილაკების ზომებზე

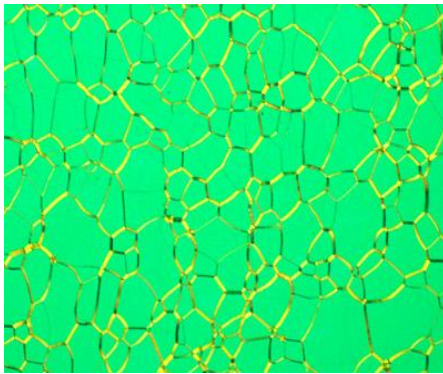
თხევადკრისტალური ნივთიერებები მათთვის დამახასიათებელი სივრცული მოწესრიგებითა და ლაბირულობით წარმოადგენენ უნიკალურ სტრუქტურებს ნანონაწილაკების ორგანიზებისათვის. 41-ე სურათზე (ა, ბ, გ, დ, ე, ვ) ნაჩვენებია სხვადასხვა თხევადკრისტალური ფაზები.



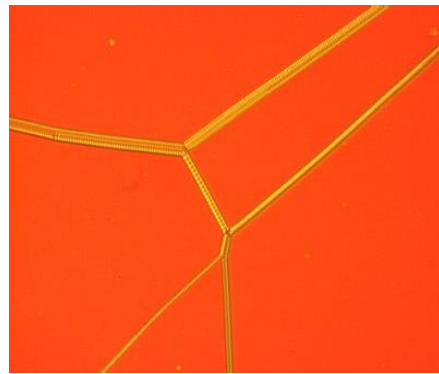
a)



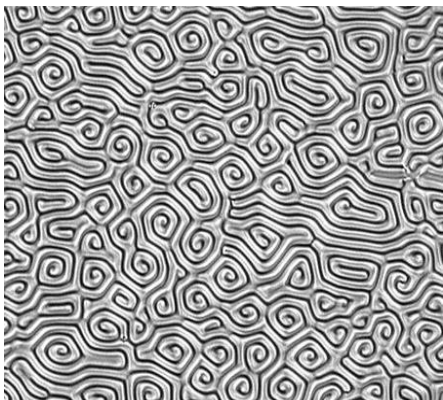
b)



g)



d)



e)



v)

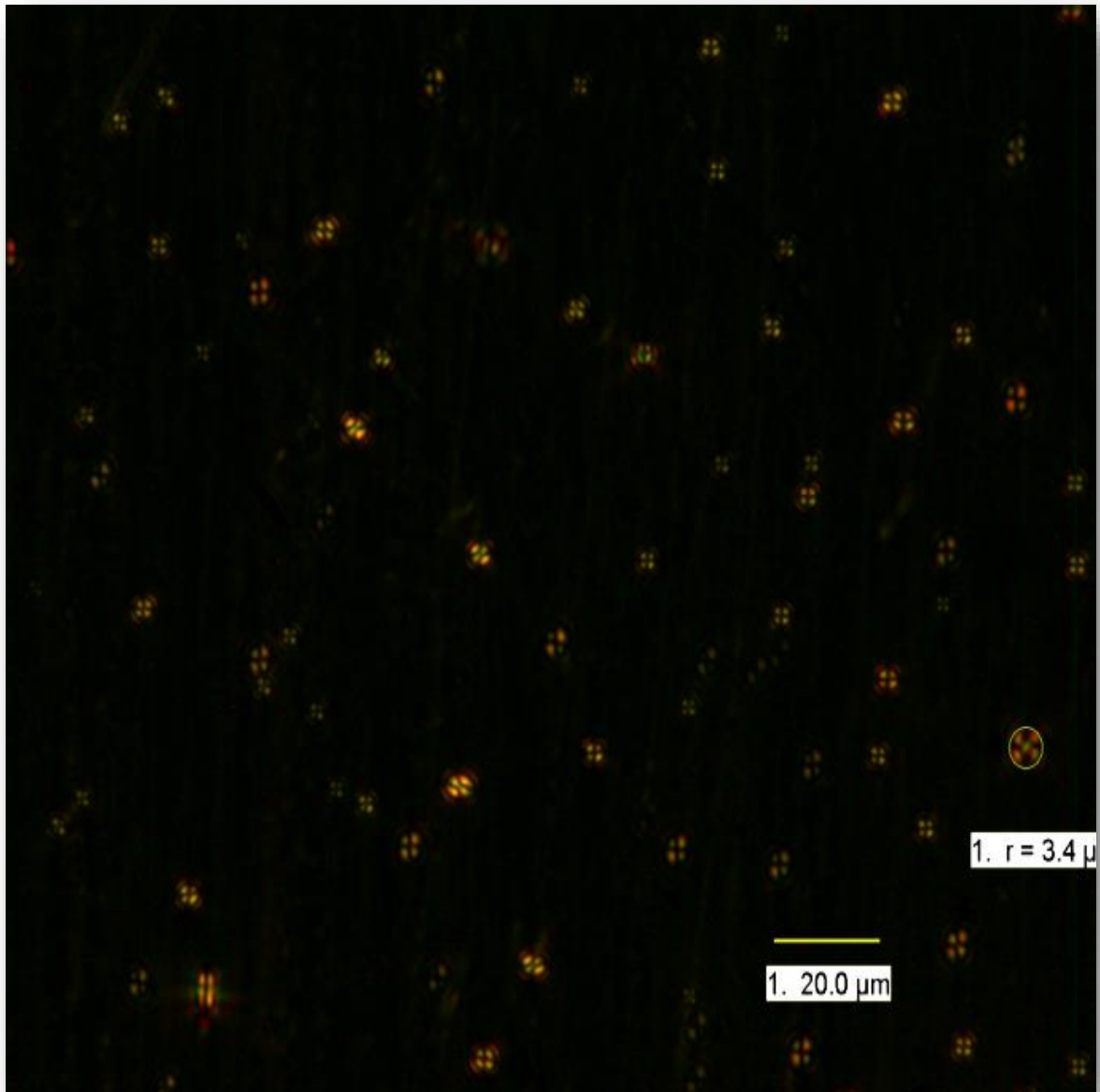
სურათი 41. თხევადკრისტალური ნივთიერებები

ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში მაღალი კონცენტრაციით ოქროს ნანონაწილაკების შეყვანა საშუალებას მოგვცემს დავამზადოთ სხვადასხვა სახეობისა და თვისებების მქონე მეტანივთიერებები, რომლებიც მნიშვნელოვნად გააფართოებს მათი პრაქტიკული გამოყენების სფეროებს.

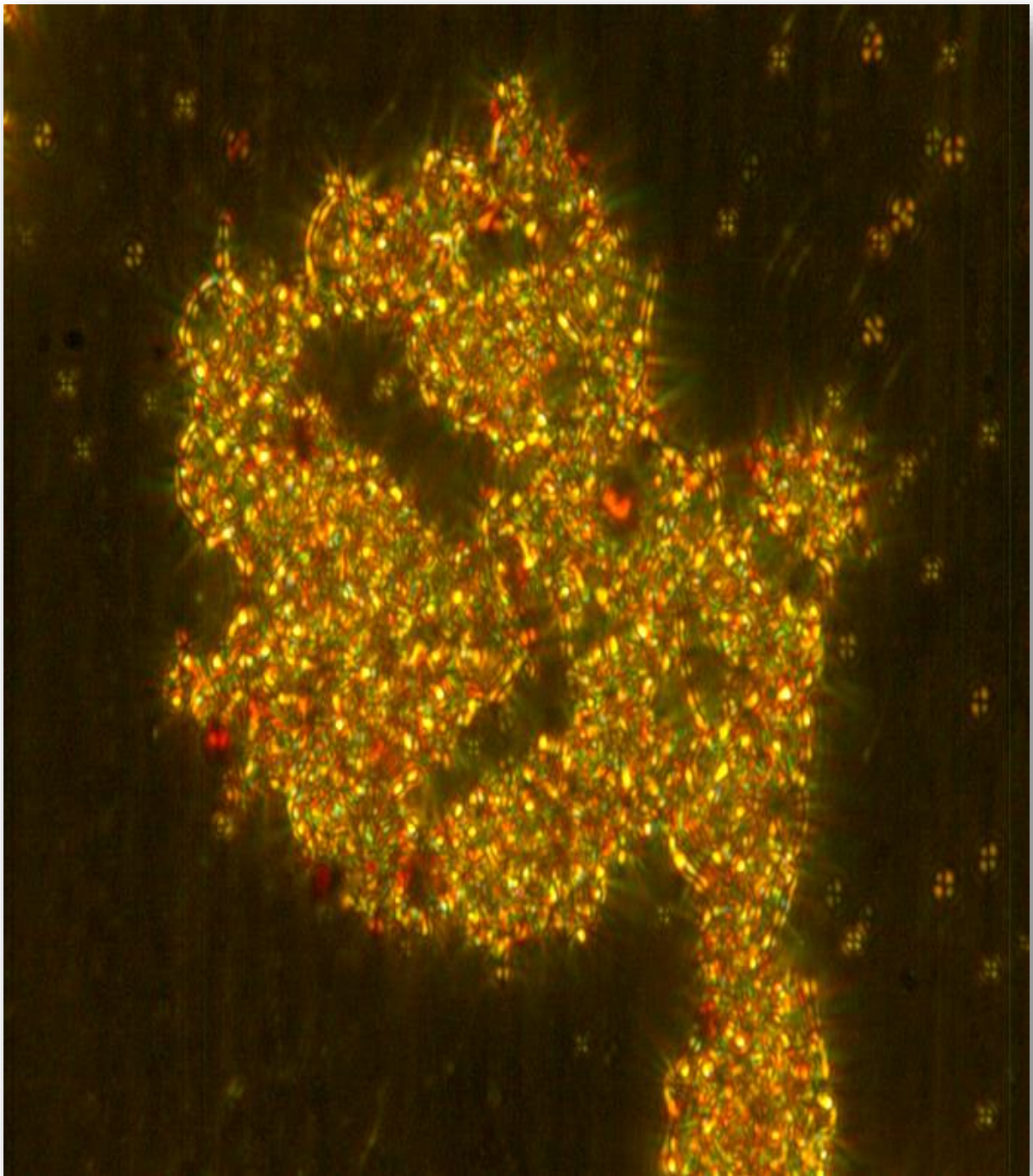
უკანასკნელი რამოდენიმე წლის განმავლობაში ნანონაწილაკებით დამატებული თხევადი კრისტალები ინტენსიურად შეისწავლება, რადგან ისინი გამოირჩევიან ისეთი ელექტრო და ფოტოოპტიკური თვისებებით, როგორებიცაა გაძლიერებული ფოტოლუმინესცენცია, შემცირებული მართვადი ძაბვები, გაუმჯობესებული მოწესრიგების პარამეტრი და დიელექტრიკული ანიზოტროპია, სწრაფი რეაქციის დრო და თხევადი კრისტალების სპონტანური ვერტიკალური ორიენტაცია. გაირკვა, რომ ნანონაწილაკებით დამატებული ნივთიერებების თვისებები მნიშვნელოვნად განსხვავდება მასპინძელი მატრიცისაგან. ყველაზე დიდი უპირატესობა, რომელიც გააჩნია ნანონაწილაკებით დამატებულ თხევად კრისტალებს, არის ნანონაწილაკების ელექტროოპტიკური და ფოტოოპტიკური თვისებების გადაწყობა და მართვა, რომლებიც სრულ თანხმობაშია თხევადი კრისტალების ფუნქციონალურ და სტრუქტურულ ლაბირულობასთან.

ჩვენ მიერ შესწავლილია თვისობრივად ახალი სახეობის ნანოსტრუქტურები, რომლებიც წარმოდგენილია ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადი კრისტალისაგან.

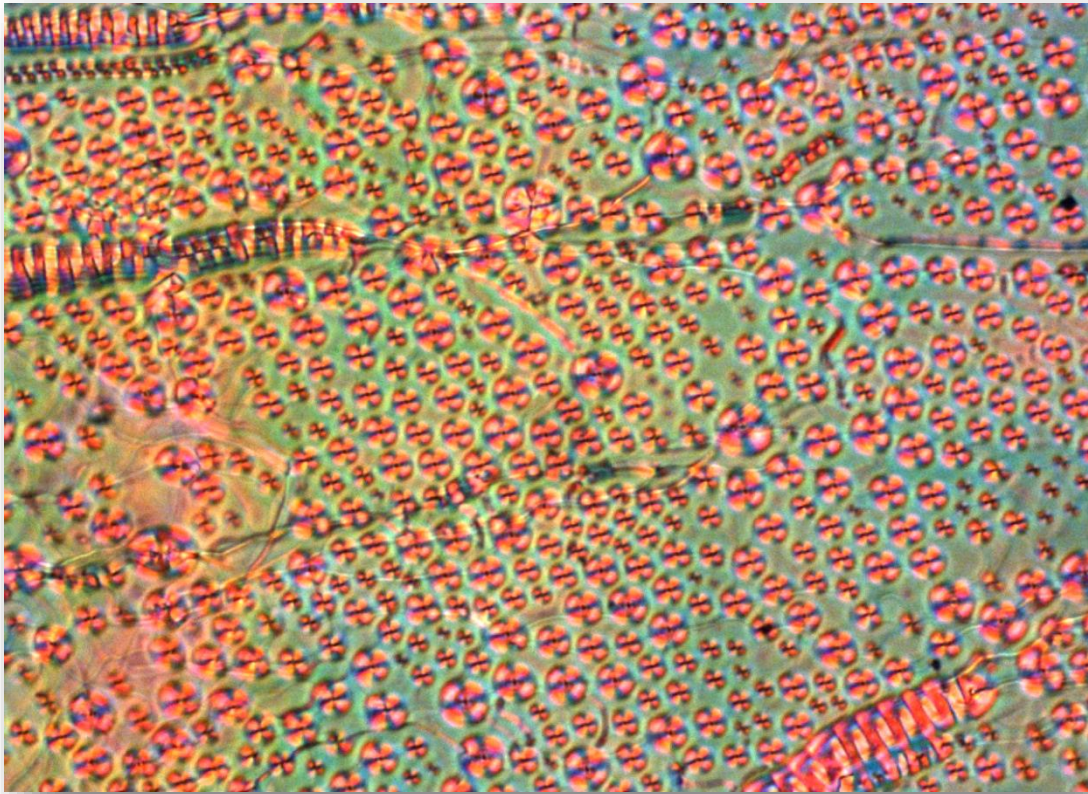
ოპტიკური მიკროსკოპის გამოყენებით შესწავლილი იყო ოქროს ნანონაწილაკების კლასტერების განლაგება ქოლესტერულ თხევად კრისტალში, სურათები 42-50.



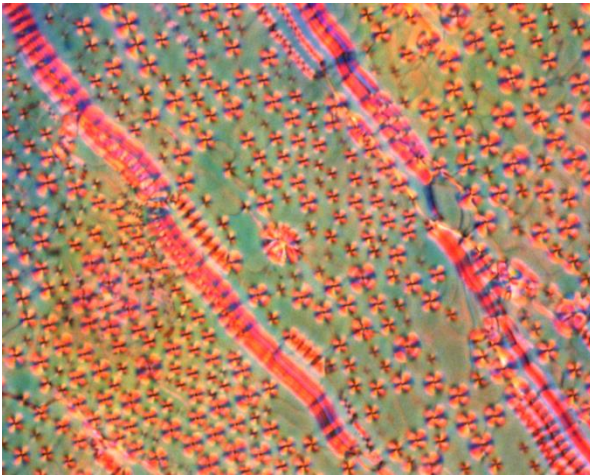
სურათი 42. ოქროს ნანონაწილაკების კლასტერების განლაგება ქოლესტერულ თხევად კრისტალში



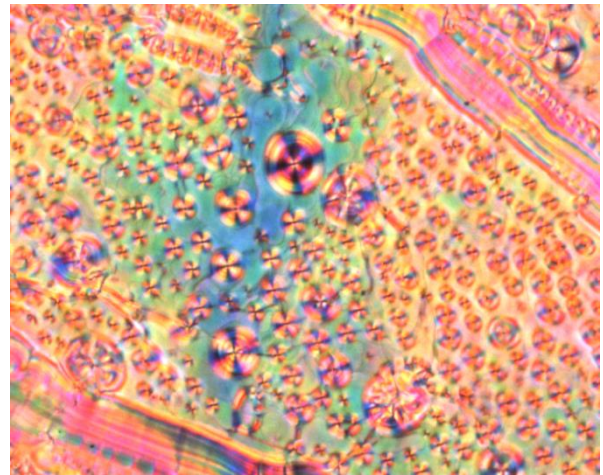
სურათი 43. ოქროს ნანონაწილაკების კლასტერების განლაგება ქოლესტერულ თხევად კრისტალში



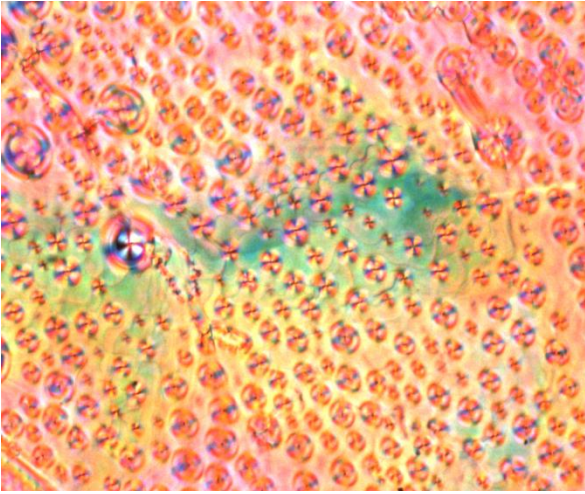
სურათი 44



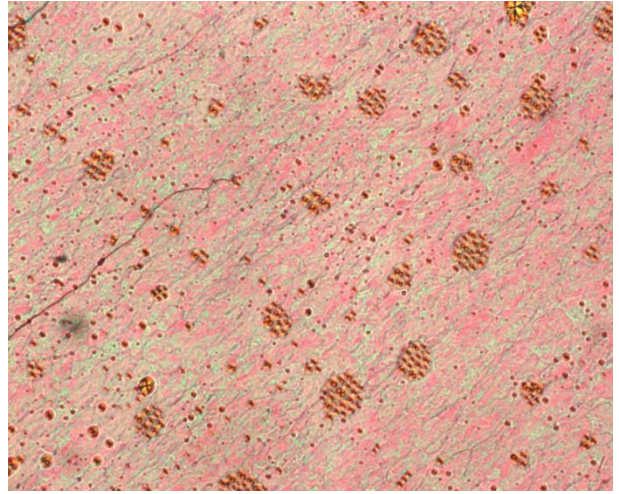
სურათი 45



სურათი 46



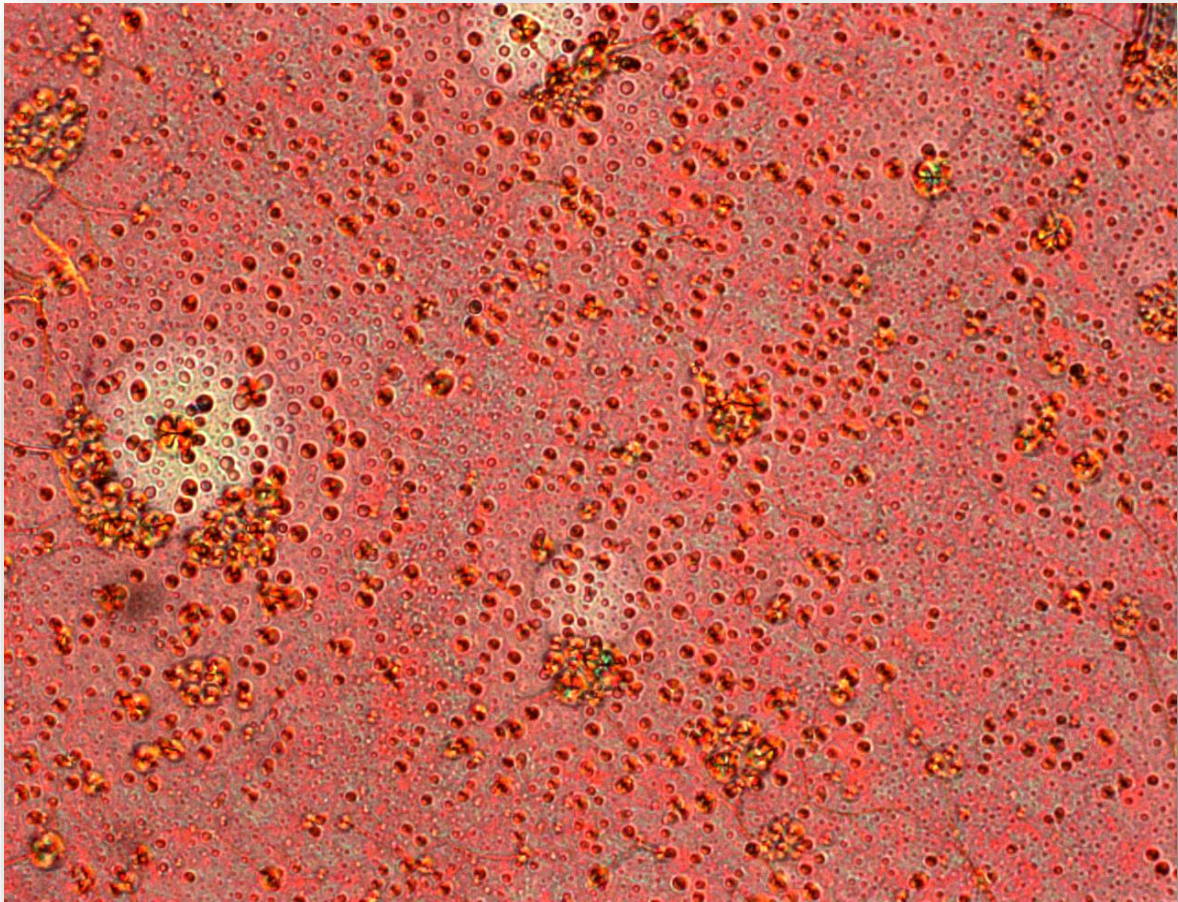
სურათი 47



სურათი 48



სურათი 49



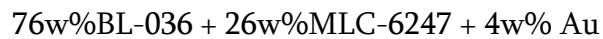
სურათი 50. ოქროს ნანონაწილაკების კლასტერების განლაგება ქოლესტერულ თხევად კრისტალში

4.2 ექსპერიმენტის ჩატარება

ჩატარებულ ექსპერიმენტებში კვლევის ობიექტებს წარმოადგენს ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ნანოკომპოზიტები, რომელთა დამზადება მოხდა ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალი

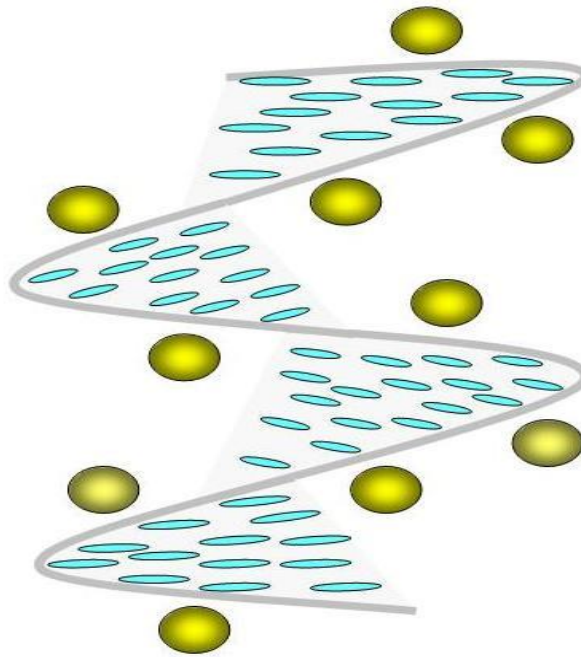
მეთოდის საფუძველზე, შემადგენელი კომპონენტების პარამეტრების საგულდაგულო შერჩევით.

შევარჩიეთ ოქროს ნანონაწილაკები, რომელთა საშუალო ზომა 5 ნანომეტრია. მოცემული ნანონაწილაკები 4%-ის ოდენობით დაემატა ქოლესტერულ თხევად კრისტალს, რომლის შემადგენლობა მოცემულია შემდეგი წონითი თანაფარდობით:

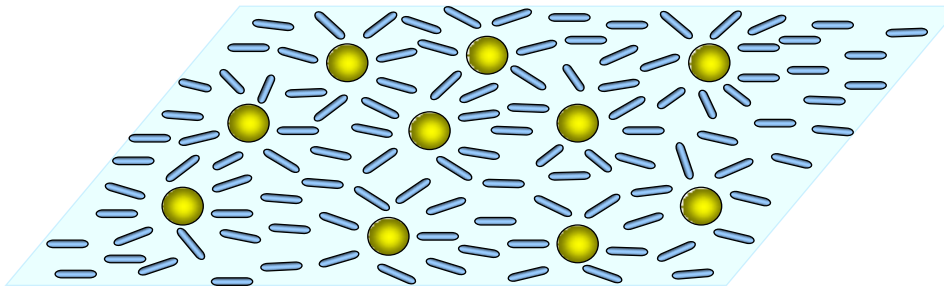


სადაც, BL-036 ნემატური მატრიცაა, MLC-6247 ოპტიკურად აქტიური დანამატი (შეძენილია Merck-ში), ხოლო Au ოქროს ნანონაწილაკი (შეძენილია Sigma-Aldrich-ში).

თავდაპირველად მომზადდა ქოლესტერული თხევადი კრისტალი და გაიზომა მისი ისეთი ოპტიკური და თერმო-ოპტიკური მახასიათებლები, როგორებიცაა: სელექტიური ამრეკლაობის პიკების სპექტრალური მდებარეობა და ამ მდებარეობის ტემპერატურული დამოკიდებულება. შემდგომ მოხდა ოქროს ნანონაწილაკების ჩამატება ჭურჭელში, რომელშიც მოთავსებული იყო ქოლესტერული თხევადი კრისტალი. მიღებული ნარევი დაიდგა გამაცხელებელზე და მოხდა მისი უწყვეტი მორევა 24 საათის განმავლობაში, 80 გრადუსს ტემპერატურაზე რათა ოქროს ნანონაწილაკები თანაბრად განაწილებულიყო ქოლესტერულ მატრიცაში. მორევის სიჩქარე იყო 1200 rpm. შემდეგ, მიღებული ნარევი კაპილარული ძალების მეშვეობით შევიყვანეთ ოპტიკურ უჯრედში, რომელიც შედგება ორი პარალელური მინისაგან და მინებს შორის ტეფლონის ფირის გამოყენებით დაფიქსირებული მანძილი იყო 20 მიკრონი. ქოლესტერულ თხევად კრისტალში ოქროს ნანონაწილაკების განლაგების სქემატური სახე ნაჩვენებია სურათზე 51, ხოლო მათი განლაგება ნემატურ თხევად კრისტალში ნაჩვენებია სურათზე 52.

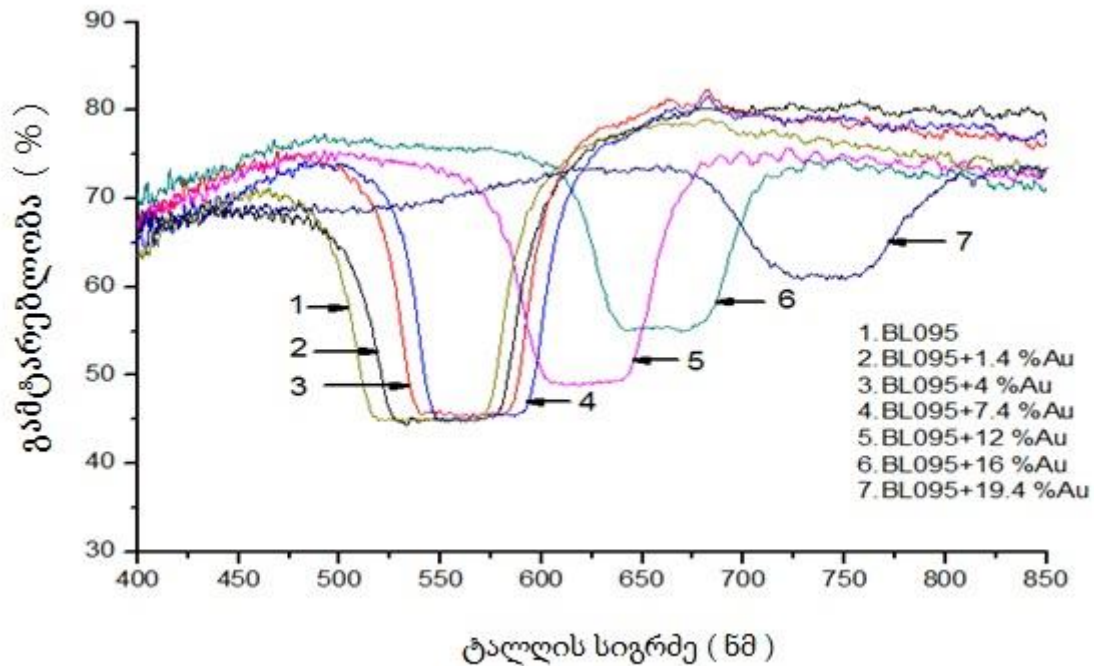


სურათი 51 ოქროს ნანონაწილაკების განლაგება ქოლესტერულ თხევად კრისტალში



სურათი 52 ოქროს ნანონაწილაკების განლაგება ნემატურ თხევად კრისტალში

4.3 ოქროს ნანონაწილაკებით მოდიფიცირებული სელექტიური ამრეკლაობის წანაცვლება ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში ოქროს ნანონაწილაკების სხვადასხვა კონცენტრაციების დროს.



სურათი 53. ქოლესტერული თხევადი კრისტალის სელექტიური ამრეკლაობის პიკები

$$\lambda_{max} = Pn = P(n_e + n_o)/2 \quad \Delta\lambda = P\Delta n = P(n_e - n_o).$$

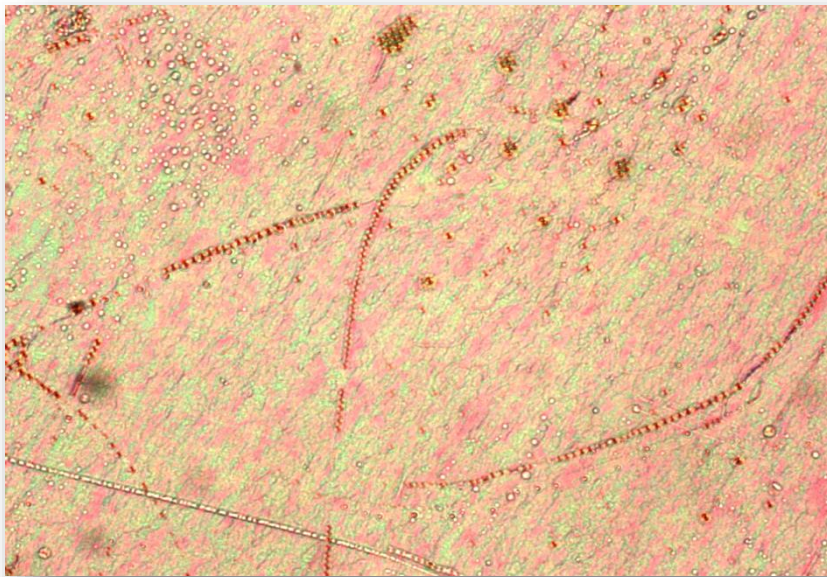
ქოლესტერული თხევადი კრისტალის სელექტიური ამრეკლაობის პიკი მგრძნობიარეა მასში ჩამატებული ოქროს ნანონაწილაკების კონცენტრაციებზე.

თუ ქოლესტერულ ნარევს ჩავამატებთ ნანონაწილაკებს და ნელ-ნელა მოვახდენთ ნანონაწილაკების კონცენტრაციის ზრდას, მივიღებთ სელექტიური პიკების წანაცვლებას ≈ 525 ნმ – დან 750 ნმ–მდე. ზოგადად ოქროს ნანონაწილაკების ქოლესტერულ თხევად კრისტალში დამატება საკმაოდ ძნელია, რადგან ადგილი აქვს აგლომერაციებს და ჩვენს მიერ მიღწეული 20% საკმაოდ კარგი შედეგია.

სურათზე 53–ზე ნაჩვენებია სელექტიური პიკის წანაცვლება ოქროს ნანონაწილაკების კონცენტრაციაზე დამოკიდებულებით, როდესაც დამატებული

ოქროს ნანონაწილაკების რაოდენობა აღწევს 20% დაიმზირება სელექტიური პიკის მაქსიმალური წანაცვლება დაახლოებით 300 ნანომეტრის ტოლი. ამრიგად, შესაძლებელი ხდება ოქროს ნანონაწილაკების რაოდენობის ცვლილებით ქოლესტერული თხევადი კრისტალის ამრეკლაობის სპექტრალური მოდულირება.

ასევე სინათლის გაძლიერება დამოკიდებულია ოქროს ნანონაწილაკების კონცენტრაციაზე. ნანონაწილაკების გარკვეულ კონცენტრაციამდე ადგილი აქვს სინათლის გაძლიერებას, ხოლო კონცენტრაციის შემდგომი გაზრდით ხდება გაძლიერების შემცირება და ჩაქრობა, რაც გამოწვეულია შემდეგი მიზეზებით: თხევადი კრისტალის სტრუქტურული ერთგვაროვნების შემცირება, ოქროს ნანონაწილაკების კლასტერიზაციით და შესაბამისად პლაზმონური ელექტრონების პიკების გაფართოებით.



სურათი 54. ოქროს ნანონაწილაკების 1% კონცენტრაციისას

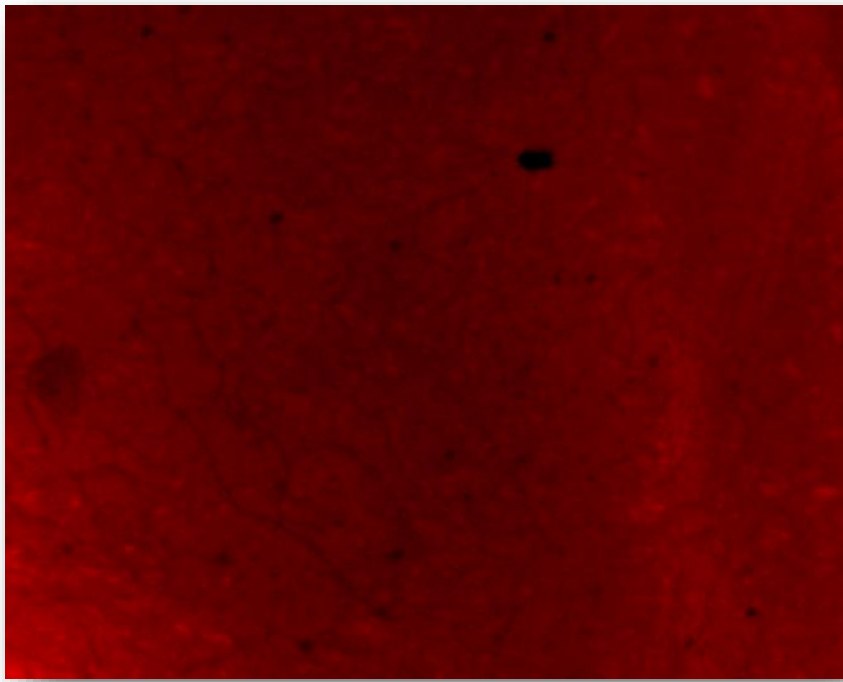


სურათი 55. ოქროს ნანონაწილაკების 5% კონცენტრაციისას

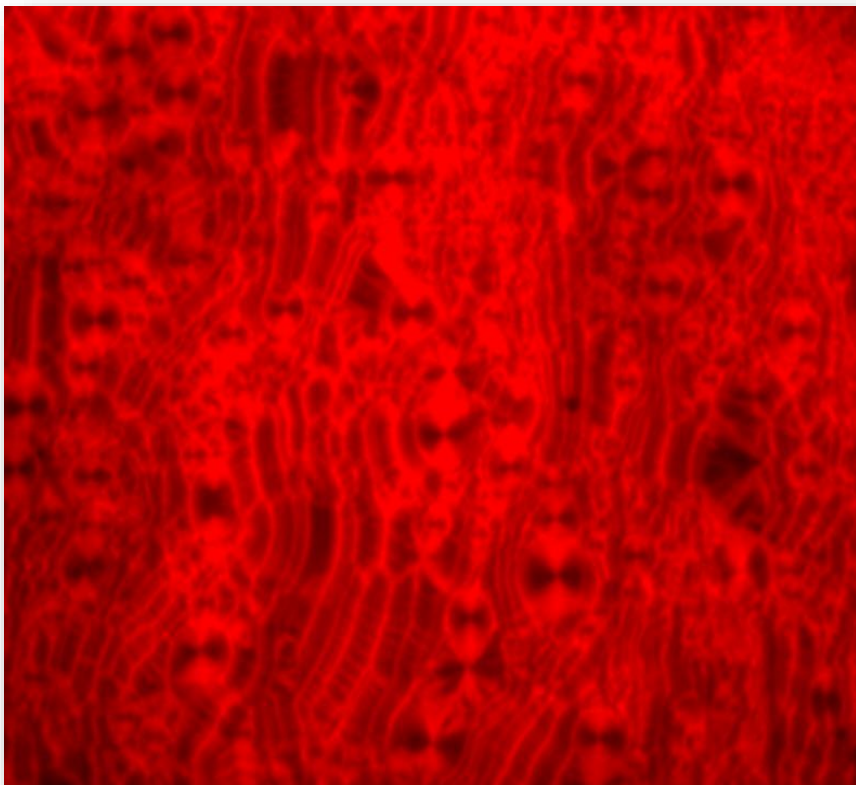
4.4 ლუმინესცენციის გაძლიერება ოქროს ნანონაწილაკებით და ლუმინესცენციური საღებარებით დამატებულ ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში.

ექსპერიმენტებში კონფოკალური მიკროსკოპის გამოყენების შედეგად აღმოჩნდა, რომ ლუმინესცენციური საღებარებით დამატებულ თხევად კრისტალებში ოქროს ნანონაწილაკების ჩამატებისას ადგილი აქვს ლუმინესცენციის მკვეთრ გაძლიერებას, რაც გამოჩნდა სპექტრალურად.

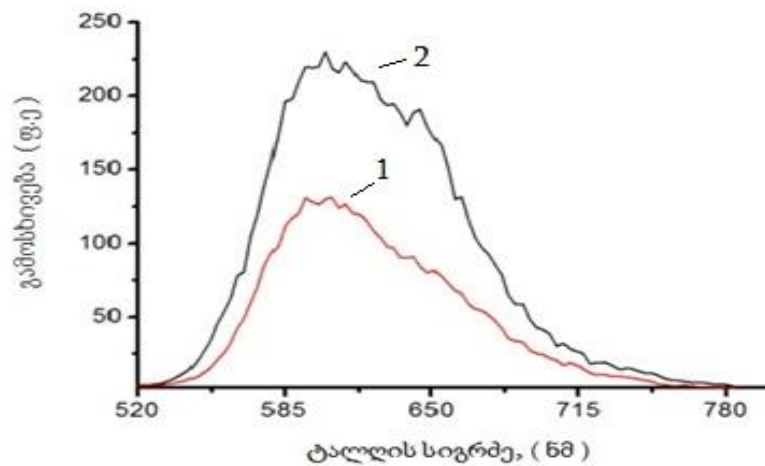
5% GNPs + 95% { 99.6 [74% BL-036 + 26% MLC-6247] + 0.4% Nile Red }



სურათი 56. ლუმინესცენციური ფირი ოქროს ნანონაწილაკების გარეშე

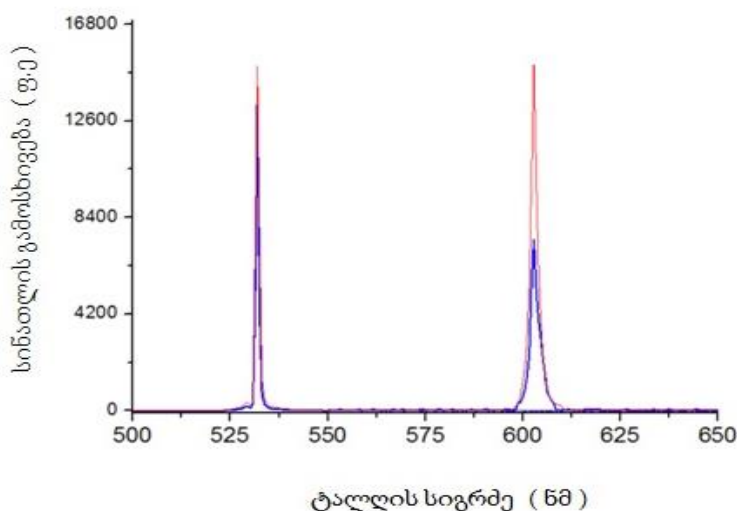


სურათი 57. ლუმინესცენციური ფირი ოქროს ნანონაწილაკებით



სურათი 58. სინათლის გამოსხივების გაძლიერება ოქროს ნანონაწილაკების გამოყენებით. 1–
წითელი გრაფიკით ნაჩვენებია სინათლის ინტენსიობა ოქროს ნანონაწილაკების გარეშე,
ხოლო 2– შავით სინათლის გამოსხივება ოქროს ნანონაწილაკების ჩამატებისას.

შემდეგ ექსპერიმენტით ვაჩვენეთ, რომ შესაძლებელია მოხდეს ლაზერული გამოსხივების გაძლიერება ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებულ ქოლესტერულ თხევადკრისტალურ ნანოკომპოზიტებში. როგორც 59–ე სურათზე ჩანს, ლაზერული გამოსხივების ინტენსიობა მკვეთრად იზრდება, როდესაც თხევადკრისტალურ ნარევეში ჩამატებული იყო ოქროს ნანონაწილაკები. ლაზერული გამოსხივების აღზნება ხდებოდა Nd:YAG –ის ლაზერის მეორე ჰარმონიკის გამოყენებით $\lambda=532\text{ნმ}$.



სურათი 59. ლაზერული გამოსხივების გაძლიერება ოქროს ნანონაწილაკებით
დამატებულ ქოლესტერულ თხევადკრისტალურ ნანოკომპოზიტში.

4.5 ქალაქის საფუძველზე დამზადებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე

ჩვენს მიერ შემუშავებულ ინოვაციურ იდეებსა და მიდგომებზე დაყრდნობით, განხილულია ახალი ტექნოლოგია, რომელიც საშუალებას იძლევა ქალაქის საფუძველზე დამზადდეს ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე ახალი სახეობის დრეკადი, იაფი და დიდი ზომის ამრეკლავი დისპლეები [87].

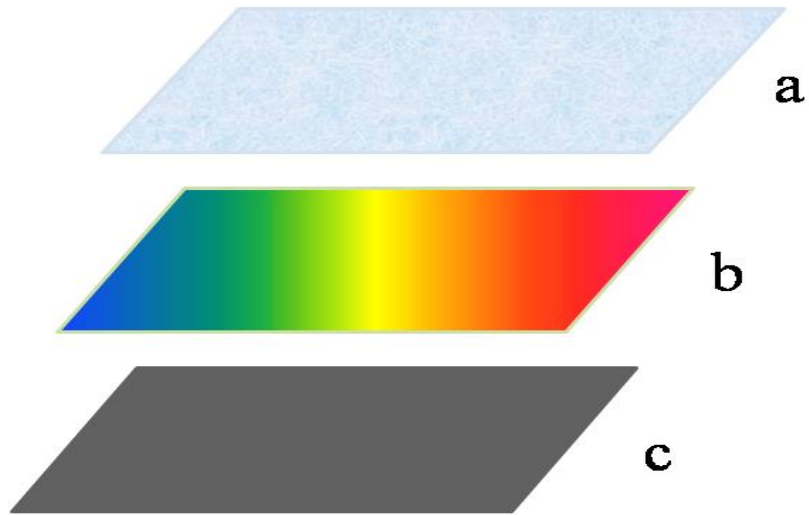
შევისწავლეთ მოცემული ინტერფერენციული სარკის ოპტიკური, თერმო და ფოტოოპტიკური მახასიათებლები. ამასთან ერთად, სინათლით ჩაწერის მეთოდის გამოყენებით ერთსა და იმავე ზედაპირზე შესრულდა სუბმილიმეტრული ზომების, სხვადასხვა სპექტრალური ამრეკლავობის მქონე სარკეების ფორმირება, რომელთა საშუალებითაც ხდება დაცემული სინათლის ეფექტური არეკვლა ოპტიკური სპექტრის სხვადასხვა უბნებში (ულტრაიისფერი, ხილული, ახლო ინფრაწითელი). სისტემა რომელიც დავამზადეთ და შევისწავლეთ მოქმედებს როგორც დრეკადი ინტერფერენციული სარკე, რომელიც ირეკლავს როგორც პოლარიზებულ, ისე არაპოლარიზებულ სინათლეს.

კვლევის მეთოდად გამოვიყენეთ ოპტიკურ-პოლარიზაციული სპექტროსკოპია და გაზომილი იქნა არეკვლილი სინათლის ისეთი მახასიათებლები, როგორებიცაა: ინტენსივობა, სელექტიური არეკვლის სპექტრალური მდებარეობა, დაცემული და არეკვლილი სინათლის პოლარიზაციული გარდაქმნები [88–98].

4.5.1 მიღებული სამეცნიერო შედეგები

ქალაქის საფუძველზე დამზადებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე შედგება სამი ძირითად ნაწილისაგან, (სურ.60):

- a) პოლიმერული ფირი,
- b) კარგად ორიენტირებული ქოლესტერული თხევად კრისტალური ფენა,
- c) ქალაქის საფუძველი.



სურათი 60. ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე

შეირჩა შემდეგი სერტიფიცირებული და სტაბილური თხევადკრისტალური კომპონენტები:

BL006, BL038 და MMLC-6816 (Merck) ნემატიკები,

ZLI-811 ოპტიკურად აქტიური დანამატი, (Merck)

RM -257, Ir-2100 რეაქტიული მონომერები. (Ciba, Swiss)

აღნიშნული ნივთიერებების საფუძველზე დამზადდა ქოლესტერული ნარევი, სასურველი თერმული, ოპტიკური და ფოტო-ოპტიკური თვისებებით

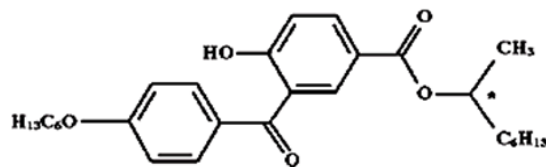
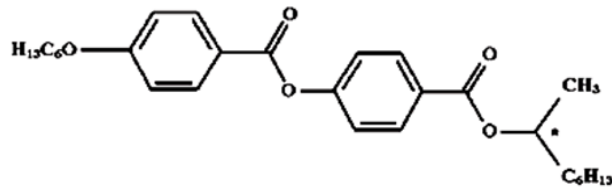
- 96% [68% BL-038 + 32 % ZLI-811] + 4 % [97% RM 257+3% Irgacure 2100]
- 96% [70% BL-006 + 30 % ZLI-811] + 4%[97% RM 257+3% Irgacure 2100]
- 96% [64% MLC-6816 + 36 % ZLI-811] + 4 % [97% RM 257+3% Irgacure 2100]
- 96% [65% BL-038 + 35 % ZLI-811] + 4 % [97% RM 257+3% Irgacure 2100]

ფოტომგრძნობიარე მასალად აქამდე ფართოდ აპრობირებული აზობენზოლების ნაცვლად, პირველად გამოვიყენეთ ახალი სახეობის ფოტოიზომერიზებადი კომპოზიციები, (სურ.61). აზობენზოლზე დაფუძნებული ნივთიერებებისაგან განსხვავებით, აღნიშნული კომპოზიციები სტაბილურები არიან

ხილული სინათლის მიმართ, მაშინ როდესაც, ულტრაიისფერი დასხივების შედეგად მკვეთრად იცვლიან მოლეკულურ ფორმას, რაც თავის მხრივ განაპირობებს ქთკ-ის სელექტიური არეკვლის პიკის მნიშვნელოვან წანაცვლებას [99–110].

ZLI-811

ულტრაიისფერი სინათლით დასხივებამდე

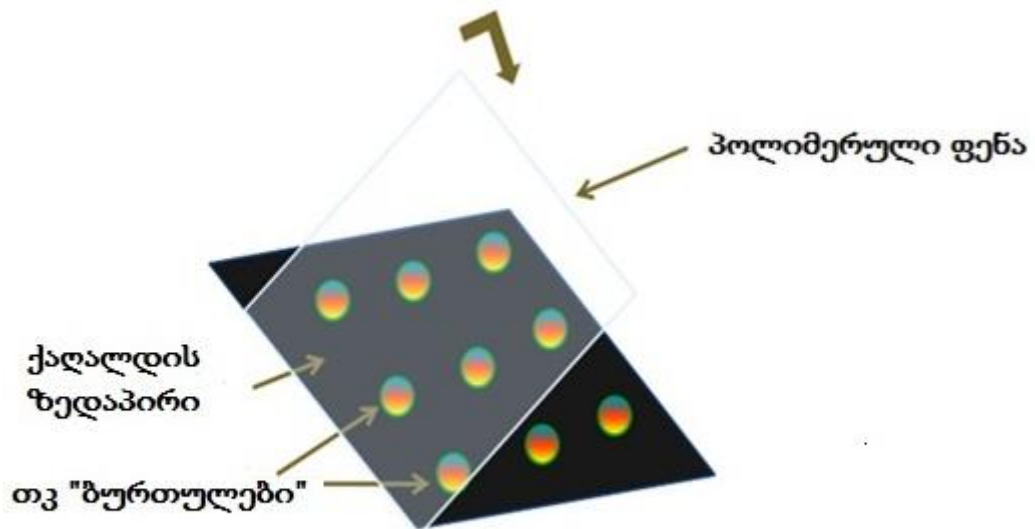


ულტრაიისფერი სინათლით დასხივების შემდეგ

სურ. 61 ულტრაიისფერი დასხივების შედეგად მკვეთრად იცვლიან მოლეკულურ ფორმას

4.5.2 დრეკადი თხევადკრისტალური სარკის დამზადება

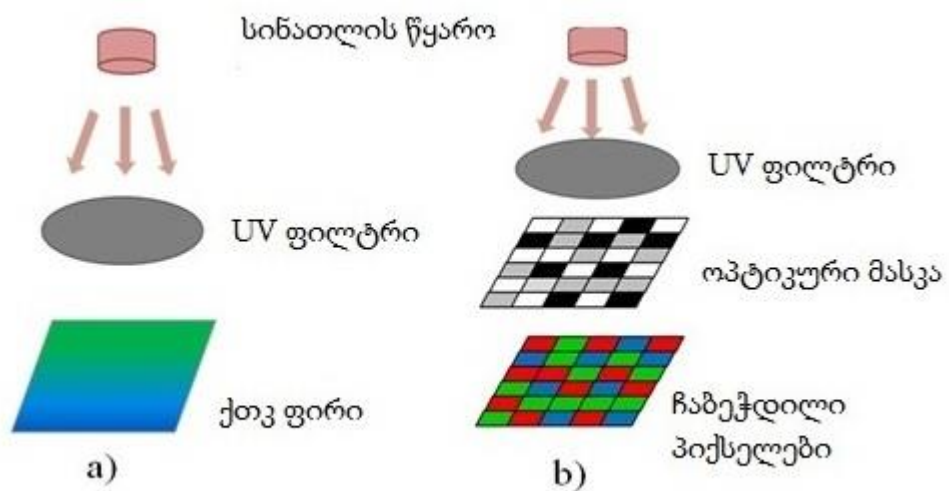
დრეკადი ამრეკლავი სარკის დასამზადებლად გამოყენებული იქნა სპეციალურად დამუშავებული ქალაღის ზედაპირი, ქოლესტერული თხევადკრისტალური „ბურთულები“ და ზედა პოლიმერული ფენა (სურ. 62), პოლიმერული ფირის დაფარების შემდეგ ხდება თხევადკრისტალური „ბურთულების“ თანაბრად გაშლა მთელს ზედაპირზე, ისე რომ მიღებული ფენის სისქე არის 2–3 მკმ



სურათი 62 დრეკადი ამრეკლავი სარკე

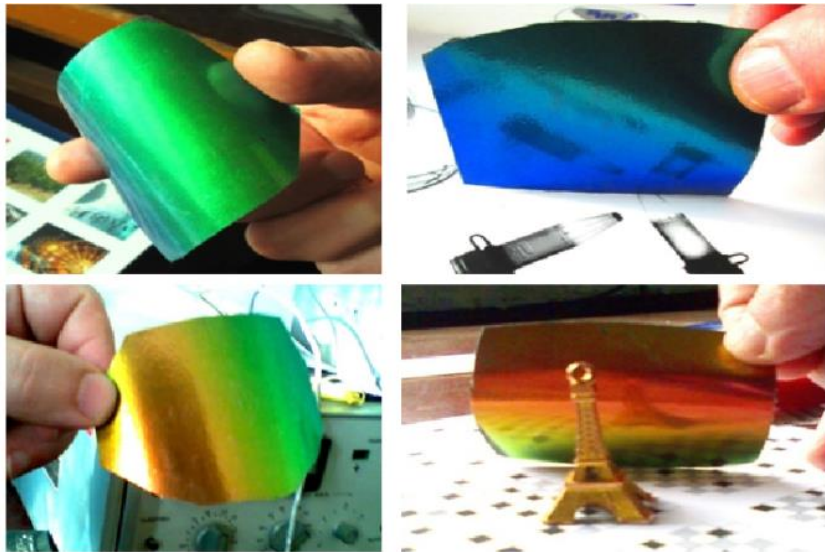
4.5.3 ფოტოპოლიმერიზაცია

ულტრაიისფერი ნათურის გამოყენებით ჩატარდა ფოტოპოლიმერიზაცია, a) მთლიანი ქოლესტერული სარკის ზედაპირის და b) ფერადი ამრეკლავი სარკეების (პიქსელების) ჩაწერა (სურ. 63).



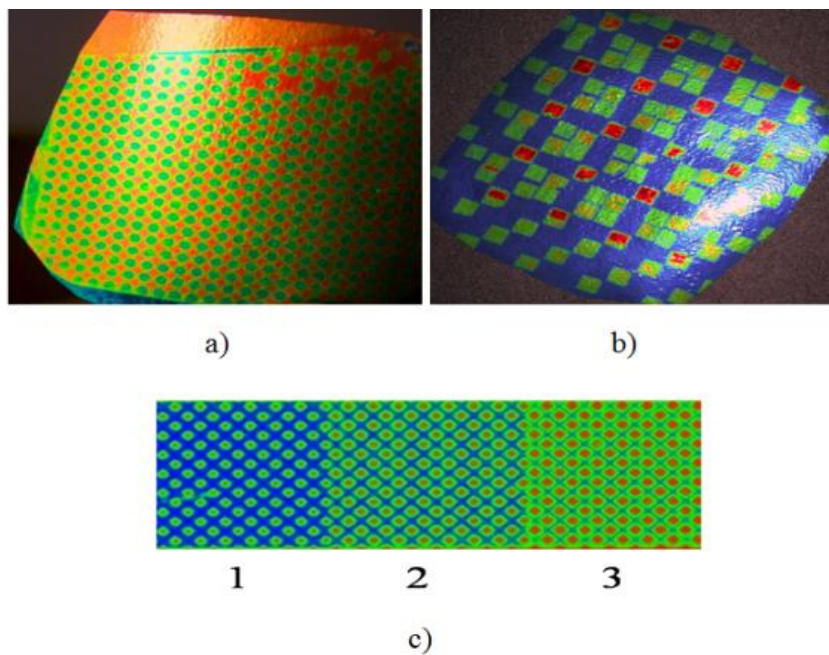
სურათი 63. ფოტოპოლიმერიზაცია

დამზადებული სარკეები მდგრადია მექანიკური დეფორმაციების მიმართ და ამავე დროს ინარჩუნებენ მაღალ სელექტიურ ამრეკლაობას, (სურ. 64).

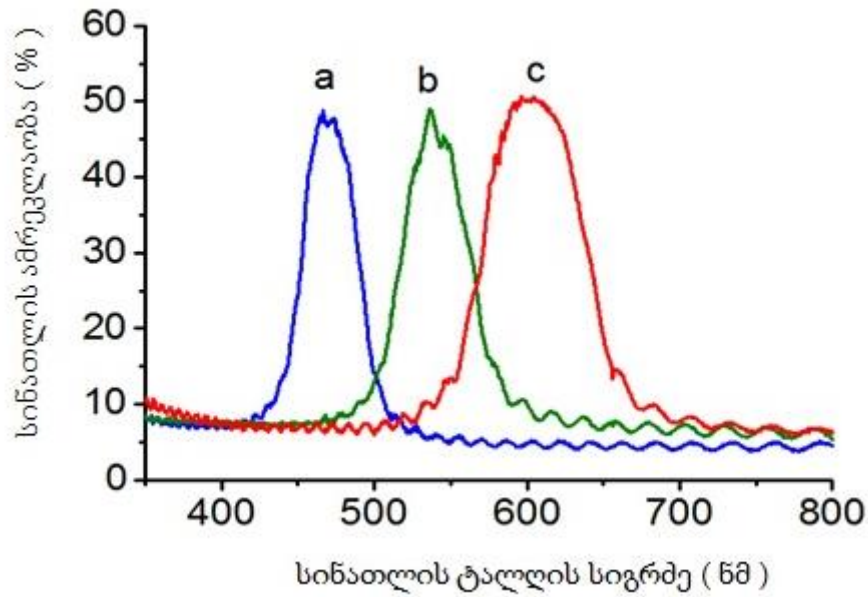


სურათი 64. ქოლესტერული სარკე

ულტრაიისფერი სინათლის გამოყენებით, რომლის ტალღის სიგრძეა $\lambda = 365$ ნმ, მოხდა სხვადასხვა სპექტრალური მდებარეობის მქონე ამრეკლავი სარკეების (RGB-პიქსელები) ჩაწერა ქოლესტერულ ფირზე, (სურ. 65).



სურათი 65. სხვადასხვა სპექტრალური მდებარეობის მქონე ამრეკლავი ქოლესტერული სარკეები

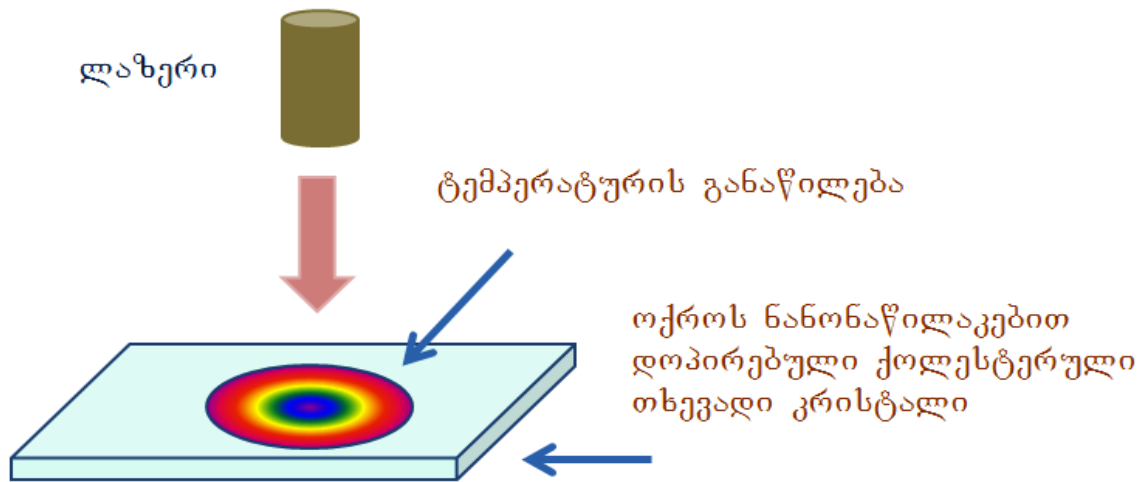


სურათი 66. ქოლესტერული სარკეების სელექტიური არეკვლის პიკების წანაცვლება

66-ე სურათზე წარმოდგენილი სპექტრომეტრის გამოყენებით მიღებული ქოლესტერული სარკეების სელექტიური არეკვლის პიკების წანაცვლება, დასხივების სხვადასხვა ექსპოზიციის დროს. a) დასხივებამდე, b) დასხივებიდან 9 წუთი, c) დასხივებიდან 18 წუთი.

ჩვენს მიერ ზემოთ მიღებული ორი სამუშაოს გაერთიანების საფუძველზე (ლუმინესცენციის გაძლიერება ნანონაწილაკებით და ლუმინესცენციური საღებარებით დამატებულ თხევადკრისტალურ ნანოკომპოზიტებში და ქაღალდის საფუძველზე დამზადებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე) შესაძლებელია დამზადდეს მაღალი ეფექტურობის მქონე ამრეკლავი ქოლესტერული თხევადკრისტალური ამრეკლავი დისკლები, რომლებიც იმუშავებენ, როგორც გარე განათების (მზე, ნათურა სინათლის სხვადასხვა წყაროები), ისე მცირე სიმძლავრის მქონე შიდა განათების წყაროების გამოყენებით.

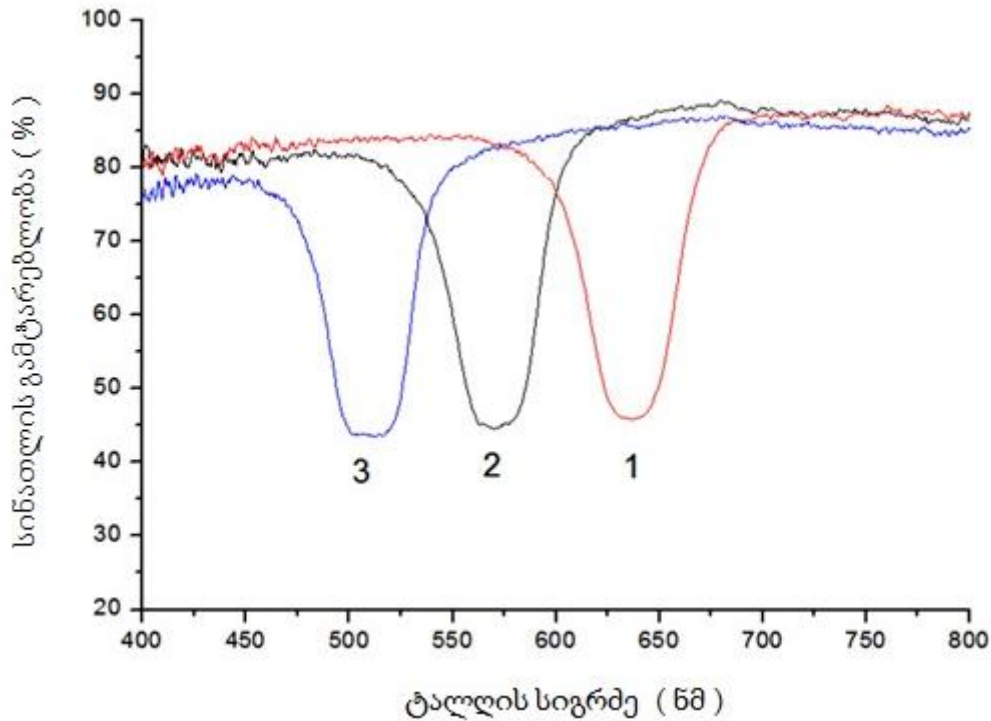
4.6 ტემპერატურის განაწილების ვიზუალიზაცია ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებულ ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში



სურათი 67. ლაზერის სხივის გაუსიანის განაწილების ვიზუალიზაცია ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადი კრისტალის საშუალებით

ზემოთ აღწერილი მეთოდით დამზადებული თერმოქრომული ნარევი შევიყვანეთ ოპტიკურ უჯრედში და მოვახდინეთ ლაზერის სხივით დასხივება. სინათლით ინდუცირებული ოპტიკურ-თერმული ეფექტი, როდესაც ლაზერული გამოსხივების ტალღის სიგრძე ემთხვევა ოქროს ნანონაწილაკების პლაზმონური ელექტრონების შთანთქმის სიხშირეს, ხდება ოქროს ნანონაწილაკების გაცხელება. სითბოს გადაცემა წარმოებს ქოლესტერულ თხევად კრისტალზე, რომელიც იცვლის ფერს. სურათზე ნაჩვენებია ლაზერის სხივის გაუსიანის განაწილება, რომლის ვიზუალიზაცია ხდება ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადი კრისტალის საშუალებით.

4.7 ოპტიკურ-თერმული გარდაქმნების შედეგად ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადი კრისტალის სელექტიური ამრეკლაობის პიკების წანაცვლება



სურათი 68. სელექტიური ამრეკლაობის პიკი

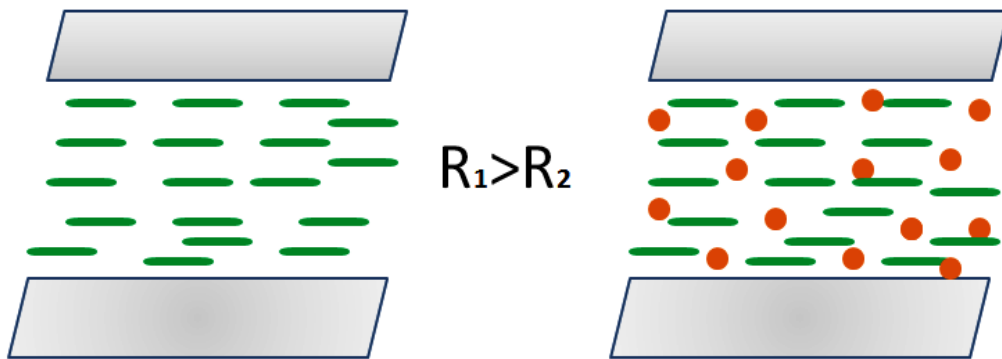
სპექტროფოტომეტრის საშუალებით გავაანალიზეთ ნიმუშის ფერების სპექტრები. სელექტიური პიკების ტემპერატურების მიხედვით დაკალიბრებით შესაძლებელი გახდა არა მარტო ტემპერატურების განაწილების ვიზუალიზაცია, არამედ უშუალოდ ტემპერატურების განაწილების დაგრაფირება.

მოცემულ სურათზე სელექტიური ამრეკლაობის პიკი ნომრით 1, შეესაბამება ყველაზე დაბალ ტემპერატურას (წითელი ფერი), ნომერი 2 უფრო მაღალ ტემპერატურას (მწვანე ფერი), ხოლო ყველაზე მაღალ ტემპერატურას გვიჩვენებს ნომერი 3-ით აღნიშნული სელექტიური პიკი (ლურჯი ფერი).

4.8 თხევადკრისტალური ნახევარგამტარები

ცნობილია რომ, თხევადი კრისტალები და მათ შორის ქოლესტერული თხევადი კრისტალები კარგი დიელექტრიკები არიან, რომელთა კუთრი წინაღობა $\rho = 10^{10}-10^{14}$ ომი/სმ³

შეუძლიათ ნანონაწილაკებს თხევადი კრისტალები გარდაქმნან ნახევარგამტარებად?



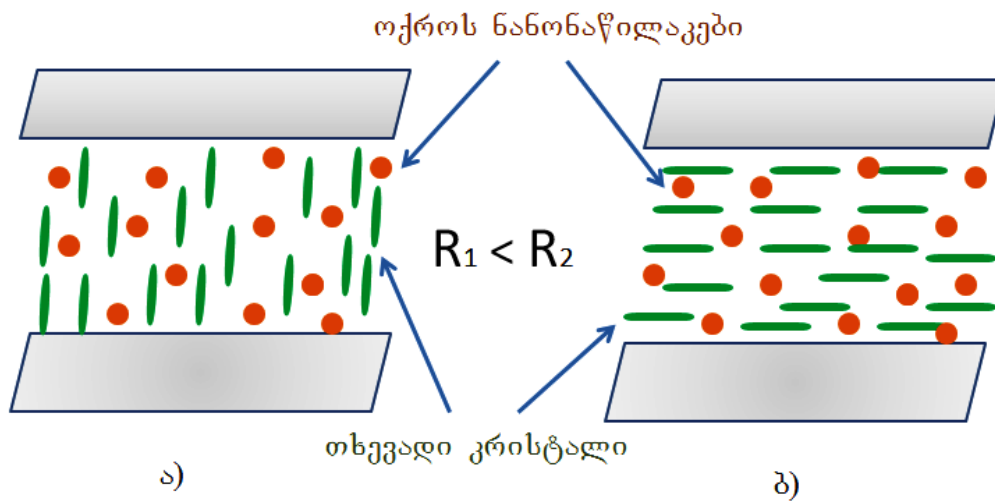
თხევადკრისტალური მინარევი ნანონაწილაკების გარეშე

ნანონაწილაკებით დოპირებული თხევადკრისტალური მინარევი

სურათი 69. თხევადი კრისტალების ელექტრული გამტარებლობის მართვა

როგორც ექსპერიმენტებიდან დავადგინეთ შეუძლიათ. თუ ოპტიკურ უჯრედს, რომელშიც შეყვანილი გვაქვს ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ნარევი, მოვდებთ ელექტრულ დენს აღმოვაჩინოთ, რომ ოქროს ნანონაწილაკების ჩამატებით კუთრი წინაღობა შემცირდა და ქოლესტერულმა თხევადმა კრისტალმა ნახევარგამტარული თვისებები შეიძინა, რაც ნიშნავს იმას რომ ოქროს ნანონაწილაკების საშუალებით შესაძლებელია თხევადი კრისტალების ელექტრული გამტარებლობის მართვა (სურ. 69)

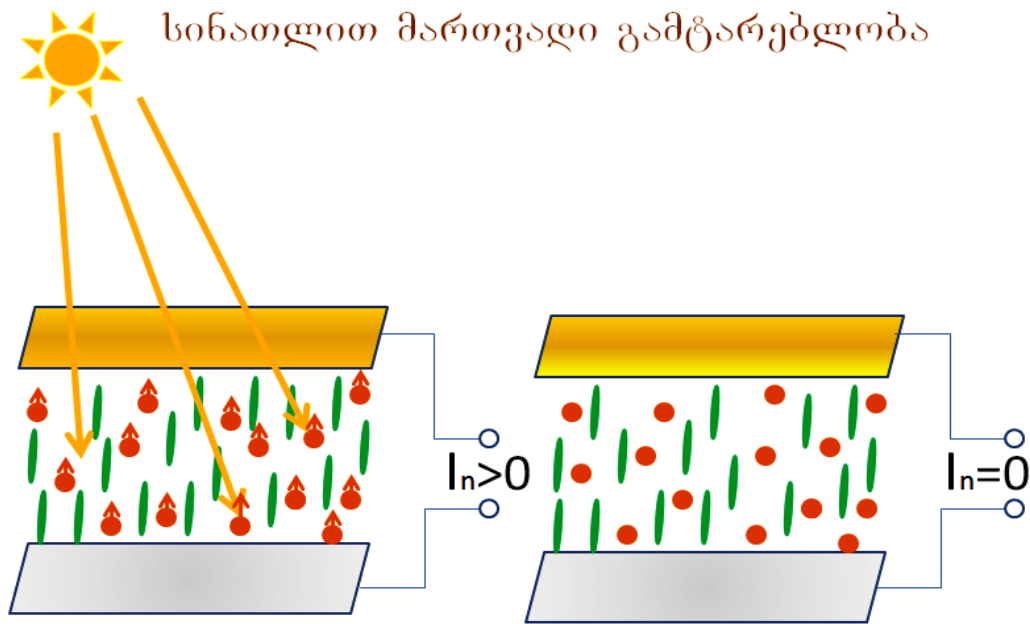
4.9 მოლეკულების ორიენტაციაზე დამოკიდებული გამტარებლობა



სურათი 70 ა) ჰომეოტროპული ორიენტაცია და ბ) პლანარული ორიენტაცია

მოცემულ ნანოკომპოზიტებში შესწავლილი იქნა, თხევადკრისტალური მატრიცის მოლეკულების სივრცული ორიენტაციების დამოკიდებულება ოპტიკურ უჯრედში დენის გამტარებლობის სიდიდეზე. აღმოჩნდა რომ, როდესაც მოლეკულებს აქვთ ჰომეოტროპული (ზედაპირებისადმი ვერტიკალური) ორიენტაცია დენის სიდიდე იზრდება, ხოლო როდესაც მოლეკულებს აქვთ პლანარული ორიენტაცია (მოლეკულები პარალელურია ზედაპირების მიმართ), დენის სიდიდე კლებულობს. ამრიგად ოპტიკურ უჯრედში მოლეკულების სივრცული ორიენტაციების ცვლილებით შეიძლება დენის სიმძლავრის კონტროლი.

4.10 სინათლით მართვადი გამტარებლობა



სურათი 71. თხევადკრისტალური ჰიბრიდული უჯრედი

ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებულ თხევად კრისტალურ ნანოკომპოზიტზე სინათლის ზემოქმედების შესასწავლად მომზადდა ჰიბრიდული ოპტიკური უჯრედი. ოპტიკური უჯრედის ერთი ერთი ზედაპირი დაფენილი იყო თხელი გამჭირვალე ოქროს ფენით, ხოლო მეორე ზედაპირი ასევე თხელი და გამჭირვალე ვერცხლის ფენით. ფენების სისქე 150–200 ნანომეტრს შეადგენდა. მინებს შორის კაპილარული ძალების საშუალებით შეყვანილი იქნა ნანოკომპოზიტი. ოპტიკური უჯრედის ზედა და ქვედა მინებს შორის ჩართული იყო ამპერმეტრი, რომელიც დენის ძალას ზომავდა. ოპტიკურ უჯრედში მზის სხივების ზემოქმედებით აღიძრა დენი, რომელიც დაფიქსირდა ამპერმეტრის საშუალებით. ხოლო როდესაც უჯრედს სინათლე არ ეცემოდა, ამპერმეტრის ჩვენება ნულის ტოლი იყო. ამრიგად, ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული თხევადკრისტალური სტრუქტურა შეიძლება განხილული იქნას როგორც ახალი სახეობის მზის ელემენტი.

IV თავის დასკვნა

ოქროს ნანონაწილაკებით დამატებული ფოტონური თხევადი კრისტალების გამოყენების არეალი დიდია. აშკარაა რომ, აღნიშნული ნანოკომპოზიტები ახალ შესაძლებლობებს იძლევა რათა მოახდეს ახალი სახეობის ჰიბრიდების სინთეზირება, რომლებშიც სინერგეტიკულად იქნება გაერთიანებული ფოტონური თხევადი კრისტალებისა და ნანონაწილაკების უნიკალური თერმული, ელექტრო, ოპტიკური და ფოტოოპტიკური თვისებები.

ჩატარებული კვლევებისა და მიღებული შედეგების ურთიერთ გაზიარება დაინტერესებული პარტნიორებთან, დაგვეხმარება მრავალი დარგის სამეცნიერო მიმართულების განვითარებაში და მიღებული პროდუქტის დანერგვის საქმეში. კერძოდ, ვვარაუდობთ, რომ მიღებული შედეგების გამოყენება პერსპექტიული იქნება შემდეგ მიმართულებებში:

- მედიცინა – ტემპერატურის განაწილების ვიზუალიზაცია სიმსივნეების ჩამოყალიბების ადრეულ სტადიაზე დიაგნოზირებისთვის
- სიმსივნური უჯრედების თერმო–ოპტიკური დაშლის მოდელირება
- ახალი თაობის მზის ელემენტები და ენერჯის დაგროვების სისტემები.
- ბიოლოგიური და ქიმიური ნაერთების დეტექტორები.
- მეტალური ნანონაწილაკებით კონტროლირებადი ელექტროგამტარებლობა (ნახევარგამტარული თხევადი კრისტალები)
- ახალი თაობის ამრეკლავი დისკლები.
- უარყოფითი გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე სტრუქტურები
- ტალღამტარები, ახალი თაობის 3D–იანი ფოტონური კრისტალები .

საბოლოო შედეგები

- 40 ნმ ზომის ვერცხლის ნანონაწილაკებისა და თერმოქრომული ლუმინესცენციური საღებარის (ნილოსის წითელი) დამატებით მიღებულია პოლიმერულ ნანოკომპოზიტებში, 99.98% { 90% EtOH + 10% PVP } + 0.02% Nile red, სინათლის შთანთქმისა და ლუმინესცენციის ზოლების ტემპერატურულად მართვადი, თანაბარი და უწყვეტი გადაწყობა ოპტიკური სპექტრის ფართო უბნებში (300 ნმ–დან 700 ნმ –მდე) [111].
- მოვახდინეთ ვერცხლის ნანონაწილაკებისა და თერმოქრომული ლუმინესცენციური საღებარების დამატებით მიღებულ პოლიმერულ ნანოკომპოზიტებში, არაწრფივი სინათლით (ლაზერული) მართვადი გარდატეხის მაჩვენებლის სივრცულ – დროითი მოდულაცია.
- ვაჩვენეთ, რომ 5 ნმ ზომის მქონე ოქროს ნანონაწილაკებითა და ლუმინესცენციური საღებარით (ნილოსის წითელი), დამატებულ ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში 76w%BL-036 + 26w%MLC-6247 + 4w% Au ადგილი აქვს სინათლის ~ 2 - ჯერად გაძლიერებას.
- ქოლესტერული თხევადი კრისტალის ქაღალდზე დაფენის შედეგად მიღებული იქნა ახალი სახეობის ქაღალდის საფუძველზე დამზადებული ქოლესტერული თხევადკრისტალური ინტერფერენციული სარკე, რომელიც გამოირჩევა ექსპლოატაციის ხანგრძლივი დროით (10 წელი), არის დრეკადი, იაფი, მაღალი გარჩევადობის. მოცემული სარკეების გამოყენებით შესაძლებელია დამზადდეს დიდი ზომის მქონე ამრეკლავი დისპლეები, რომლებიც გამოიყენებენ გარე განათების წყაროებს (მზე, ნათურა, და ა.შ).
- ქოლესტერულ თხევად კრისტალებში მიღებული იქნა ოქროს ნანონაწილაკებით მოდიფიცირებული სელექტიური ამრეკლაობის პიკების წანაცვლება 525 ნმ–დან 750 ნმ–მდე, რომლებიც დამოკიდებულია ოქროს ნანონაწილაკების კონცენტრაციებზე (0% –დან 19.4%– მდე).

დისერტაციაში წარმოდგენილი ნანოკომპოზიტები შესაძლებელია განხილული იქნას, როგორც ახალი თვისებების მქონე ნივთიერებები, რომლებიც თავის გამოყენებას მოიპოვებს ისეთ მიმართულებებში, როგორცაა:

- თერმოადრესირებადი ლუმინესცენციური დისპლეებისა და თერმო-ოპტიკური პრინტერების დამზადება.
- თერმულად მართვადი ფილტრების და ჰკვიანი ფანჯრების წარმოება.
- გამოსახულების ინფრაწითელი გარდამქმნელები.
- ახალი თაობის მზის ელემენტები და ენერჯის დაგროვების სისტემები.
- გარემოსადმი უსაფრთხო, თერმოქრომული ტანსაცმლის დამზადება.
- მედიცინაში: ბიოლოგიურ ქსოვილებში სითბოს განაწილების ვიზუალიზაცია.
- სიმსივნური უჯრედების თერმოოპტიკური დაშლის მოდელირება.
- მეტალური ნანონაწილაკებით კონტროლირებადი ელექტროგამტარებლობა (ნახევარგამტარული თხევადი კრისტალები).
- ახალი ტაობის ამრეკლავი დისპლეები.
- ტალღამტარები, ახალი თაობის 3D-იანი ფოტონური კრისტალები.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Alivisatos A P 1996 *Science* 271 933–7
2. Ellingson R J, Beard M C, Johnson J C, Yu P, Micic O.I, Nozik A J, Shabaev A and Efros A L 2005 *Nano Lett.* 5 865–71.
3. Ditlbacher, H., Krenn, J. R., Lamprecht, B., Leitner, A., & Aussenegg, F. R. (2000). *Opt. Lett.*, 25, 563–565
4. Berciaud, S., Cognet, L., Tamarat, P., & Lounis, B. (2005). *Nano Lett.*, 5, 515–518.
5. El-Sayed, M. A. (2001). *Accounts Chem. Res.*, 34, 257–264.
6. Markovich G, Collier C P, Henrichs S E, Remacle F, Levine R D and Heath J R 1999 *Acc. Chem. Res.* 32 415–23
7. Lu Y, Liu G L and Lee L P 2005 *Nano Lett.* 5, 5–9
8. Reinhard B M, Siu M, Agarwal H, Alivisatos A P and Liphardt J 2005 *Nano Lett.* 5, 2246–52
9. Wyatt P. McConnell, James P. Novak, Louis C. Brousseau, III, Ryan R. Fuierer, Robert C. Tenent, and Daniel L. Feldheim, *J.Phys.Chem.B* 104 8925-8930(2000)
10. M. Králik and A. Biffis, *J.Mol.Catal.A* 177,113-138(2001)
11. José H. Hodak, Arnim Henglein, and Gregory V. Hartland. *J.Chem.Phys.*114, 2760- 2765(2001)
12. X. J. Xu, P. Y. Chow, and L. M. Gan, *J. Nanoscience Nanotechnol.*,2,61-65 (2002)
13. www.wikipedia.org
14. Kelly, K. L., Coronado, E., Zhao, L. L., & Schatz G. C. (2003). *J. Phys. Chem. B*, 107, 668–677
15. Berciaud S, Cognet L, Tamarat P and Lounis B 2005 *Nano Lett.* 5 515–8
16. El-Sayed M A 2001 *Acc. Chem. Res.* 34 257–64
17. Kelly K L, Coronado E, Zhao L L and Schatz G C 2003 *J. Phys. Chem. B* 107 668–77
18. Jin R C, Cao Y W, Mirkin C A, Kelly K L, Schatz G C and Zheng J G 2001 *Science*, 294,1901–3
19. Mulvaney P 1996 *Langmuir* 12 788–800
20. Kossyrev P A, Yin A, Cloutier S G, Cardimona D A, Huang D, Alsing P M and Xu J M 2005 *Nano Lett.* 5 1978–81

21. A. Majdalawieh, M. C. Kanan, O. El-Kadri, S. M. Kanan. *J. Nanosci. & Nanotechnol.*, 2014, 14, 7, 4757-4780.
22. R. Hamdi, G. Petriashvili, M. A. Matranga, M. P. De Santo, N. Ponjavidze, A. Mazzula, R. Barberi. In: 11th Mediterranean Workshop & Topical Meeting "Novel Optical Materials & Applications". 2013, Cetraro, 10-15.
23. G. Petriashvili, A. Chanishvili, N. Ponjavidze, *M. Aronishidze, S. Tavzarashvili, K. Tevdorashvili*. *GEORGIAN ENGINEERING NEWS*. 2013. N1, v 65, 134-142
24. Luigia Pezzi,^a Luciano De Sio,^b Alessandro Veltri,^c Tiziana Placido,^d Giovanna Palermo,^a Roberto Comparelli,^e Maria Lucia Curri,^e Angela Agostiano,^d Nelson Tabiryan^b and Cesare Umeton *Phys.Chem.Chem.Phys.*, 2015, 17, 20281
25. T. Förster, "Zwischenmolekulare energiewanderung und fluoreszenz", *Annalen der Physik*, vol. 437, pp. 55 - 75, 1948.
26. R. E. Dale, J. Eisinger and W. E. Blumberg, "The orientational freedom of molecular probes. The orientation factor in intramolecular energy transfer", *J. Chem. Phys.*, 1959, 31, 1205-1212
27. J. R. Lakowicz, *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, 3rd ed., Baltimore, MD: Springer, 2006.
28. Ozgur B. Akan ,Murat Kuscü "A Nanoscale Communication Channel with Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET)" 1st IEEE International Workshop on Molecular and Nano Scale Communication (MoNaCom)(2011) pp. 425-430
29. <https://en.wikipedia.org/wiki/Nanoparticle>
30. [http://photonicswiki.org/index.php?title=Gold Nanoparticles %E2%80%93 Surface Plasmon Resonance](http://photonicswiki.org/index.php?title=Gold_Nanoparticles_%E2%80%93_Surface_Plasmon_Resonance)
31. Jun Liu, Liqun Zhang, Dapeng Cao and Wenchuan Wang *Physical Chemistry Chemical Physics*(Issue 48, 2009,11, 11365-11384)
32. <https://www.physik.hu-berlin.de/de/nano/.../plasmonics>
33. <https://britishmuseum.tumblr.com/post/120689869617/the-lycurgus-cup>
34. Faraday, M. *Philos. Trans. R. Soc. London* 1857, 147, 145-181.
35. Dulkeith, E.; Niedereichholz, T.; Klar, T. A.; Feldmann, J.; von Plessen, G.; Gittins, D. I.; Mayya, K. S.; Caruso, F. *Physical Review B* 2004, 70, 205424.
36. Hao, E.; Schatz, G. C. *J. Chem. Phys.* 2004, 120, 357-366

37. Zeman, E. J.; Schatz, G. C. *J. Phys. Chem.* 1987, *91*, 634-643.
38. Jain, P. K., El-Sayed, I. H., & El-Sayed, M. A. (2007). *Nano Today*, *2*, 18-29.
39. Jain PK¹, Huang X, El-Sayed IH, El-Sayed MA. *Acc Chem Res.* 2008 Dec;41(12):1578-86. doi: 10.1021/ar7002804.
40. Jain, P. K., Huang, X., El-Sayed, I. H., & El-Sayed, M. A. (2008). *Accounts Chem. Res.*, *41*, 1578-1586.
41. Govorov, A. O., & Richardson, H. H. (2007). *Nano Today*, *2*, 30-38.
42. Govorov, A. O., Zhang, W., Skeini, T., Richardson, H., Lee, J., & Kotov N. A. (2006). *Nanoscale Res. Lett.*, *1*, 84-90.
43. Richardson, H. H., Carlson, M. T., Tandler, P. J., Hernandez, P., & Govorov A. O. (2009). *Nano Lett.*, *9*, 1139-1146.
44. van de Broek, B., Grandjean, D., Trekker, J., Ye, J., Verstreken, K., Maes, G., Borghs, G., Nikitenko, S., Lagae, L., Bartic, C., Temst, K., & van Bael, M. J. (2011). *Small*, *7*, 2498-2506.
45. Baffou, G., Kreuzer, M., Kulzer, F., & Quidant R. (2009). *Opt. Express*, *17*, 3291-3298.
46. Baffou, G., Bon, P., Savatier, J., Polleux, J., Zhu, M., Merlin, M., Rigneault, H., & Monneret, S. (2012). *ACS Nano*, *6*, 2452-2458.
47. Palermo, G., De Sio, L., Placido, T., Comparelli, R., Curri, M. L., Bartolino, R., & Umeton, C. (2015). *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, *614*, 93-99.
48. G. Petriashvili, M. P. De Santo, K. Chubinidze, R. Hamdi, R. Barberi.. *Optics Express*, 2014, *22*, 12, 14705-14711.
49. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%80%D1%8B>
50. <http://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Polymer.html>
51. https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal
52. H. Coles, D. Demus, J. Goodby, G. W. Gray, H. W. Spiess, and V. Vill, "Chiral Nematics: Physical Properties and Applications," in *Handbook of Liquid Crystals Set* (Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008), pp. 335-409.
53. K. Shirota, K. Tachibana, and I. Yamaguchi, "Optical control of the pitch in cholesteric liquid crystals," 372-375 (1999).

54. N. Tamaoki, "Cholesteric Liquid Crystals for Color Information Technology," *Adv. Mater.*13, 1135-1147 (2001).
55. A. Chanishvili, G. Chilaya, G. Petriashvili, and D. Sikharulidze, "Light Induced Effects In Cholesteric Mixtures With A Photosensitive Nematic Host," *Mol. Cryst. and Liq. Cryst.*409, 209-218 (2004).
56. U. A. Hrozhyk, S. V. Serak, N. V. Tabiryan, and T. J. Bunning, "Optical Tuning of the Reflection of Cholesterics Doped with Azobenzene Liquid Crystals," *Adv. Func. Mater.*17, 1735-1742 (2007).
57. E. Montbach, D. J. Davis, A. Khan, T. Schneider, D. Marhefka, O. Pishnyak, T. Ernst, N. Miller, and J. W. Doane, "Novel flexible Reflex displays," 7232-03 (2009).
58. G. M. Zharkova and V. N. Kovrizhina, "Panoramic diagnostics of surface temperatures and heat fluxes in an aerodynamic experiment," *J Eng Phys Thermophy* 83, 1136-1148 (2010).
59. D. J. Yang D-K, " Cholesteric liquid crystal/polymer gel dispersions: reflective displays," *Proc SID Int Symp Dig Tech Papers* 23, 759-762 (1992).
60. D. K. Yang, J. L. West, L. C. Chien, and J. W. Doane, "Control of reflectivity and bistability in display using cholesteric liquid crystals , *J. of App.Phys.*76, 1331-1333 (1994).
61. U. A. Hrozhyk, S. V. Serak, N. V. Tabiryan, T. J. White, and T. J. Bunning, "Optically switchable, rapidly relaxing cholesteric liquid crystal reflectors," *Opt. Express* 18, 9651-9657 (2010).
62. D. J. Dyer, U. P. Schröder, K. P. Chan, and R. J. Twieg, "Polymer-Stabilized Reflective Cholesteric Displays: Effects of Chiral Polymer Networks on Reflectance Properties," *Chem. of Mater.*9, 1665-1669 (1997).
63. G. De Filpo, F. P. Nicoletta, and G. Chidichimo, "Cholesteric Emulsions for Colored Displays," *Adv. Mater.*17, 1150-1152 (2005).
64. https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope
65. <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-7610F.html>
66. www.researchgate.net/publication/281097535_MEASUREMENT_OF_MAGNETIC_HYSTeresis_LOOPS_IN_CONTINUOUS_AND_PATTERNEd_FERROMAGNETIC

67. ა. ბიბილაშვილი “თანამედროვე ნანოტექნოლოგიები” 2013, pp113-114
68. https://en.wikipedia.org/wiki/Confocal_microscopy
69. Schmid,G. Clusters and Colloids: From Theory to Application; VCH; Weinheim, 1994
70. Ditlbacher,H.; Krenn J.R.; Lamprecht B.;Leitner A.; Aussenegg,F.R. Opt.Lett.2000, 25,563.
71. Graetzel, M. Electrochemistry in Colloids and Dispersions; Raymond A. Mackay, John Texter;VCH;Weinheim, 1992.
72. Colloidal Gold: Principles, Methods, and Applications, edited by M.A. Hayat (academic Press, New York, 1989)
73. Tito Trindade, Paul O'Brien, and Nigel L. Pickett, Chem.Mater.13,3843-3858 (2001)
74. G.Petriashvili, N. Ponjavidze. *Taylor & Francis Group, Chemical Engineering of Polymers. 2017წ. Chapter 11* pp.129-138
75. N. Ponjavidze, G. Petriashvili, R. Hamdi, M.A.Matranga, M.P De Santo,A. Mazzulla, R.Barberi. *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 2017.649(1):38-44
76. www.researchgate.net/publication/230912444_Modelling_of_nanoparticles_Approaches_to_morphology_and_evolution
77. Bisoyi, H. K.; Kumar, S. *Chem. Soc. Rev.* 2011, 40, 306–319. doi:10.1039/b901793n
78. Sun S H, Murray C B, Weller D, Folks L and Moser A 2000 *Science* 287 1989
79. Toshima N, Harada M, Yamazaki Y and Asakura K 1992 *J. Phys. Chem.* 96 9927
80. Qingbo Zhang, JimYang Lee¹, Jun Yang, Chris Boothroydand Jixuan Zhang *Nanotechnology* 18 (2007) 245605
81. A. Kumar, J. Prakash, D. S. Mehta, A. M. Biradar, and W. Haase, *Appl. Phys. Lett.* 95(2), 023117 (2009).
82. S.-C. Jeng, C.-W. Kuo, H.-L. Wang, and C.-C. Liao, *Appl. Phys. Lett.* 91(6), 061112 (2007)
83. F. Li, O. Buchnev, C. I. Cheon, A. Glushchenko, V. Reshetnyak, Y. Reznikov, T. J. Sluckin, and J. L. West, “Orientational coupling amplification in ferroelectric

- nematic colloids,” *Phys. Rev. Lett.* 97(14), 147801 (2006)
84. W. Lee, C.-Y. Wang, and Y.-C. Shih, *Appl. Phys. Lett.* 85(4), 513–515 (2004)
85. S.-J. Hwang, S.-C. Jeng, C.-Y. Yang, C.-W. Kuo, and C.-C. Liao, *J. Phys. D Appl. Phys.* 42(2), 025102 (2009).
86. W.-Z. Chen, Y.-T. Tsai, and T.-H. Lin, *Appl. Phys. Lett.* 94(20), 201114 (2009)
87. G. Petriashvili, L. Devadze, Ts. Zurabishvili, N. Sepashvili, N. Ponjavidze, Kokhta Japaridze, Maria P. De Santo, Mario A. Matranga, Ridha Hamdi, Federica Ciuchi, Riccardo Barberi. Paper like cholesteric interferential mirror. *OPTICS EXPRESS*. 2013. Vol. 21, No. 18 p.20821-20830
88. D. J. Yang D-K,” *Proc SID Int Symp Dig Tech Papers* 23, 759–762 (1992).
89. H. Coles, D. Demus, J. Goodby, G. W. Gray, H. W. Spiess, and V. Vill, in *Handbook of Liquid Crystals Set* (Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008), pp. 335–409.
90. D. J. Dyer, U. P. Schröder, K. P. Chan, and R. J. Twieg, *Chem. Mater.* 9(7), 1665–1669 (1997).
91. G. De Filpo, F. P. Nicoletta, and G. Chidichimo, *Adv. Mater.* 17(9), 1150–1152 (2005).
92. T. Yoshioka, T. Ogata, T. Nonaka, M. Moritsugu, S. N. Kim, and S. Kurihara, *Adv. Mater.* 17(10), 1226–1229 (2005).
93. D.-K. Y. Shin-Tson Wu, *Reflective Liquid Crystal Displays* (Wiley, Chichester, 2002)
94. R. Shashidhar, L. Huang, C. E. O’Ferrall, W. J. Fritz, S. W. Smith, R. Hewitt, and J. W. Doane, *Proc. SPIE* 3057, *Cockpit Displays IV: Flat Panel Displays for Defense Applications*, 586-590 (1997).
95. I. Shiyankovskaya, A. Khan, S. Green, G. Magyar, and J. W. Doane, *SID Symposium Digest of Technical Papers* 36, 1556–1559 (2005).
96. E. Montbach, D. J. Davis, A. Khan, T. Schneider, D. Marhefka, O. Pishnyak, T. Ernst, N. Miller, and J. W. Doane, *Proc. SPIE* 7232 *Emerging Liquid Crystal Technologies IV*, 7232203 (2009).
97. A. Mujahid, H. Stathopoulos, P. A. Lieberzeit, and F. L. Dickert, *Sensors (Basel)* 10(5), 4887–4897 (2010).

98. U. A. Hrozhyk, S. V. Serak, N. V. Tabiryan, T. J. White, and T. J. Bunning, *Opt. Mater. Express* 1(5), 943–952 (2011).
99. W. Haas, J. Adams, and J. Wysocki, *Mol. Cryst.* 7(1), 371–379 (1969).
100. E. Sackmann, *J. Am. Chem. Soc.* 93(25), 7088–7090 (1971).
101. H. Rau, *Photochem. Photophys.* 2, 119–141 (1990).
102. N. Tamaoki, *Adv. Mater.* 13(15), 1135–1147 (2001).
103. U. A. Hrozhyk, S. V. Serak, N. V. Tabiryan, and T. J. Bunning, *Adv. Mater.* 19(20), 3244–3247 (2007).
104. S. V. Serak, N. V. Tabiryan, G. Chilaya, A. Chanishvili, and G. Petriashvili, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 488(1), 42–55 (2008).
105. G. Fang, Y. Shi, J. E. MacLennan, D. M. Walba, and N. A. Clark, *Langmuir* 27(17), 10407–10411 (2011).
106. A. Chanishvili, G. Chilaya, G. Petriashvili, R. Barberi, R. Bartolino, and M. P. De Santo, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 434, 353–366 (2005).
107. N. Kawatsuki, H. Takatsuka, and T. Yamamoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40(Part 2, No. 3A), L209–L211 (2001).
108. M. D. Robinson, G. Sharp, and J. Chen, *Polarization engineering for LCD projection* (Wiley, 2005), Vol. 4.
109. K. C. Yoon, H. C. Yoon, K. Y. Kim, H. Cui, J. R. Park, W. Jang, and O. O. Park, *Jpn. J. of App. Phys.* 48062201-062206 (2009).
110. M. Gu, I. I. Smalyukh, and O. D. Lavrentovich, *Appl. Phys. Lett.* 88, 061110 (2006).
111. N. Ponjavidze, G. Petriashvili, M. P. De Santo, R. Hamdi, R. Gary, R. Barberi. Silver and Gold Nanoparticle Doped Polymer and Liquid Crystal Nanocomposites For the Thermo and Photo Optical Applications . *4th International Conference “Nanotechnologies”*. 2016. session 5, O – 164