

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

სოფიო მიქაბერიძე

გრაფენით და მისი წარმოებულებით განმტკიცებული პოლიმერული
ნანოკომპოზიტების სინთეზი და კვლევა

სადოქტორო პროგრამა - ქიმია

შიფრი - 0531

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2024 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტსა და სოხუმის
ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტში.

ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტი
ქიმიის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელები: პროფ.მამუკა მაისურაძე _____
ქიმიის დოქტ.ნათია ჯალაღონია _____

რეცენზენტები: _____

დაცვა შედგება 2024 წლის ” ---- ” -----, ----- საათზე საქართველოს
ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის
ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე
კორპუსი ----- აუდიტორია-----
მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში, ხოლო
ავტორეფერატისა – ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი -----

ნაშრომის საერთო დახასიათება

ნაშრომის აქტუალურობა. ახალი ათასწლეულის დასაწყისიდან "3D" კონცეფცია მყარად შემოვიდა ჩვენს ყოველდღიურ ცხოვრებაში. სამგანზომილებიანი ბეჭდვის ტექნოლოგიები გვამღევს ახალ შესაძლებლობებს შემოქმედებაში, მეცნიერებაში, ტექნოლოგიასა და ყოველ-დღიურ ცხოვრებაში. 3D პრინტერი, ანუ სამგანზომილებიანი საბეჭდი დანადგარი უნიკალური თანამედროვე ხელსაწყოა, რომლის მეშვეობით უმცირესი, ნანოზომის დეტალებიდან დაწყებული, მაკრო და უზარმაზარი მოცულობის საგნების დაბეჭდვაცაა შესაძლებელი. 3D ბეჭდვის ტექნოლოგიაში თავდაპირველად კომპიუტერში იქმნება ობიექტის კონსტრუქციის ციფრული მოდელი, რომელიც დაკავშირებულია პრინტერთან და შესაბამისი ბრძანების მიცემის შედეგად იწყებს ფენა-ფენა პროდუქტის შექმნას. 3D ბეჭდვის უპირატესობები ჩვეულებრივთან შედარებით არის მაღალი სიჩქარე, სიმარტივე და შედარებით დაბალი ღირებულება. 3D პრინტერი აქტიურად გამოყენება სხვადასხვა ინდუსტრიაში: სამშენებლო ინდუსტრია, მედიცინა (მაგ., სხვადასხვა ორგანოების, ახალი თაობის პროთეზების დასამზადებლად), ავეჯის წარმოება (მაგ., სარესტავრაციო ნიმუშების მოდელირება და ზუსტი ანალოგის შექმნა), სათამაშო წარმოება (მაგ., სხვადასხვა ფიგურა და სამაგიდო თამაშები, წარწერები და ორნამენტები), კვების ინდუსტრია (მაგ., ურთულესი ფორმის შოკოლადების წარმოება), ტანსაცმლის და ფეხსაცმლის წარმოება (მაგ., ახალი, უჩვეულო მოდელების შექმნა) და სხვ.

გრაფენი ეს არის ერთი ატომის სისქის sp^2 ნახშირბადის კრისტალი. მისი ორგანზომილებიანი სტრუქტურა ანიჭებს მას მრავალ უნიკალურ თვისებას, როგორცაა მაღალი იუნგის მოდული ($\sim 1 \text{ TPa}$), დიდი აქტიური ზედაპირის ფართობი (მაქსიმალური თეორიული მნიშვნელობა $\sim 2630 \text{ მ}^2/\text{გ}$), შესანიშნავი თბოგამტარობა ($\sim 3000\text{--}5000 \text{ ვ/მკ}$) და შესანიშნავი ელექტრული გამტარობა (აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის მონოფენებისთვის $\sim 102 \text{ სიმენს/მ}$). გრაფენის ფურცლები წარმატებით არის გამოყენებული შემავსებლად პოლიმერში, რათა გამოკვლეული იქნეს რა გავლენას ახდენს პოლიმერის მექანიკურ სიმტკიცეზე, ცეცხლგამძლეობაზე, ელექტროგამტარობაზე და სხვა თვისებებზე. თუმცა

გრაფენი/პოლიმერული კომპოზიტების წინაშე დგება მთავარი პრობლემა ფაზური გაყოფა გრაფენის ფურცლებსა და პოლიმერს შორის სინთეზის პროცესში. სწორედ ფაზური გაყოფის და გრაფენის აგრეგაციის პრობლემის თავიდან აცილების მიზნით ჩვენს მიერ გამოყენებული იქნა გრაფენთან ერთად, გრაფენის ოქსიდი და აღდგენილი გრაფენის ოქსიდი. პოლიმერულ მატრიცად არჩეული იქნა პოლიდიმეთილსილოქსანი.

სადოქტორო ნაშრომში აღწერილია ნახშირბადის ნანოსტრუქტურების გამოყენებით პოლიმერული ნანოკომპოზიტების სინთეზი და კვლევა. პოლიმერულ მატრიცად გამოყენებული იქნა პოლიდიმეთილსილოქსანი, რომელსაც სხვადასხვა (მას.) კონცენტრაციით ემატებოდა გრაფენი, გრაფენის ოქსიდი და აღდგენილი გრაფენის ოქსიდი. ძირითადად გამოყენებული იქნა ხსნარების შერევის და ნალღობების შერევის მეთოდები. მიღებული მასალების სტრუქტურულ-მორფოლოგიური კვლევა განხორციელდა ულტრაიისფერი და ინფრაწითელი სპექტრული მეთოდებით, რამან სპექტროსკოპიით, რენდგენით, ელექტრონული მიკროსკოპიით. ასევე შესწავლილი იქნა გრაფენი/პოლიმერული კომპოზიტის თერმული, მექანიკური და ელექტრული თვისებები.

ნაშრომის მიზანი. სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის მიზანს წარმოადგენს 3D ბეჭდვაში გამოსაყენებლად ვარგისი ნახშირბადის ნანოსტრუქტურებით განმტკიცებული პოლიმერული ნანოკომპოზიტების სინთეზი და მიღებული მასალების თვისებების შესწავლა.

კვლევის ამოცანები. აღნიშნული ნაშრომიდან საჭირო იყო შემდეგი ამოცანების გადაწყვეტა:

- ✓ გრაფენის, გრაფენის ოქსიდის და აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის სინთეზი სხვადასხვა მეთოდებით.
- ✓ გრაფენის სტრუქტურის შემცველი პოლიდიმეთილსილოქსანის ფუძეზე ნანოკომპოზიტების მომზადება ხსნარების შერევის მეთოდით.
- ✓ გრაფენის სტრუქტურის შემცველი პოლიდიმეთილსილოქსანის ფუძეზე ნანოკომპოზიტების მომზადება ნალღობების შერევის მეთოდით.
- ✓ ჰომოგენიზაციის პრობლემების გადაწყვეტა.
- ✓ სინთეზირებული მასალების სტრუქტურულ-მორფოლოგიური კვლევა ულტრაიისფერი და ინფრაწითელი სპექტრული მეთოდებით, რამან

სპექტროსკოპიით, რენდგენით, ელექტრონული მიკროსკოპით. ასევე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების შესწავლა დინამიური მექანიკური და თერმოგრაფიკული ანალიზატორით, ასევე ელექტროფიზიკური მახასიათებლების დადგენა.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტს წარმოადგენს პოლიმერული ნანოკომპოზიტების მომზადება, სადაც მატრიცად გამოყენებულია პოლიდიმეთილსილოქსანი, ხოლო შემავსებლად ნახშირბადის სხვადასხვა ნანოსტრუქტურები (გრაფენი, გრაფენის ოქსიდი, აღდგენილი გრაფენის ოქსიდი).

მეცნიერული სიახლე:

- ✓ მაღალი ხარისხის გრაფენის სტრუქტურების სინთეზი, რისთვისაც მნიშვნელოვანია ექსპერიმენტის დიდი სიფრთხილიდ ჩატარება და ოპტიმალური პირობების შერჩევა. შესაბამისად დამუშავებული იქნა ჰამმერსის და ჰამმერსის მოდიფიცირებული მეთოდით გრაფენის ოქსიდის სინთეზი
- ✓ გრაფენის ოქსიდის აღდგენა ანუ ჯანგაბდმემცველი ფუნქციური ჯგუფების მოცილება განხორციელდა როგორც ქიმიური რეაგენტებით, ასევე მიკრიტალური და ულტრაბერითი დამუშავებით.
- ✓ გრაფენის ოქსიდის გრანულაციის მიზნით, შერჩეული იქნა ორგანული გამხსნელი (ქლოროფორმი), რომელშიც სრულად დისპერგირდა. ამის შემდეგ ერთდროული გაფრქვევა-გაშრობის მეთოდით მიღებული იქნა გრაფენის ოქსიდის გოლფირებული სტრუქტურები.
- ✓ ხსნარების შერევის მეთოდით მომზადებული იქნა გრაფენის სტრუქტურის შემცველი პოლიდიმეთილსილოქსანი ნანოკომპოზიტები
- ✓ ნალღობების შერევის მეთოდით მომზადებული იქნა გრაფენის სტრუქტურის შემცველი პოლიდიმეთილსილოქსანი ნანოკომპოზიტები

მიღებული მასალების შესწავლა განხორციელდა რენდგენით, ულტრაიისფერი, ინფრაწითელი და რამან სპექტროსკოპიით, ელექტრონული მიკროსკოპიით, დინამიურ მექანიკური და თერმოგრაფიკული მეთოდით. ასევე განისაზღვრა ელექტროფიზიკური მახასიათებლები.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 105 გვერდს და შედგება: რეზიუმეს, 51 სურათების ნუსხის, 5 ცხრილების ნუსხის, 16

სქემების ნუსხის, გამოყენებული აბრევიატურის, შესავლის, სამი თავის, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურის სიისაგან.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენიებული იქნა საერთაშორისო კონფერენციაზე - „Synthesis of Polymer Nanocomposites Reinforced with Graphene Oxide”, საერთაშორისო კონფერენცია „Polymers 2024“, 6-8 მარტი. ესპანეთი, სევილია.

ნაშრომის მოკლე შინაარსი

შესავალი. ნაჩვენებია ნაშრომის აქტუალობა, მიზანი, ძირითადი ამოცანები, მეცნიერული სიახლე და მოკლედაა გადმოცემული სამუშაოს არსი.

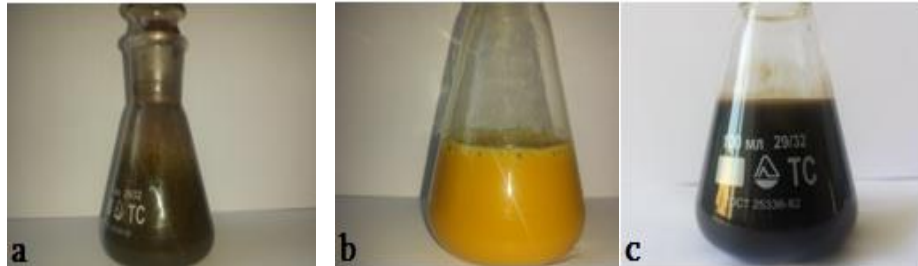
ნაწილი 1. ლიტერატურის მიმოხილვა. განხილული და გაანალიზებულია არსებული შრომები და ლიტერატურული წყაროები, რომლებიც ეხება 3D ბეჭდვის მეთოდების მიმოხილვას, ნახშირბადის ნანოსტრუქტურების სინთეზის მეთოდებს, პოლიმერული ნანოკომპოზიტების მომზადების მეთოდებს.

ნაწილი 2. ექსპერიმენტული ნაწილი. განხილულია მასალათა კვლევის ოპტიკურ-სპექტრული მეთოდები, თერმული, მექანიკური და ელექტროფიზიკური მახასიათებლები განსაზღვრა.

ნაწილი 3 . შედეგები და განსჯა. ჩვენი სამუშაოს მიზანს წარმოადგენდა გრაფენის ოქსიდის მიღება დღეისათვის ყველაზე გავრცელებული - ჰამერსის მეთოდით, რომელიც შემოთავაზებულია ლიტერატურაში. აქვე აღვნიშნავთ, რომ სხვადასხვა მეთოდით მიღებულ გრაფენის ოქსიდებს გააჩნიათ განსხვავებული C:O თანაფარდობა და სტრუქტურა.

მოდულირებული ჰამერსის მეთოდი: გრაფენის ოქსიდის სინთეზი (სურათი 1) განხორციელდა სინთეზური გრაფიტიდან ჰამერსის მოდიფიცირებული მეთოდით. სამყელა კოლბაში, რომელიც მოთავსებული იყო ყინულიან აბაზანაში, ჩავყარეთ 3გ გააქტივებული გრაფიტი, დავამატეთ 120 მლ კონც. გოგირდმჟავა (98%) და შემდეგ მცირე ულუფებად 15 გ $KMnO_4$ ისე, რომ ნარევის ტემპერატურა არ ასცდა $20^{\circ}C$. კალიუმის პერმანგანატის სრულად დამატების შემდეგ საერეაქციო ნარევი გავაცხელეთ $35^{\circ}C$ -მდე და მოვურიეთ 3 სთ-ის განმავლობაში. ამის შემდეგ დავუმატეთ 250 მლ დიტს. წყალი, კვლავ მოვურიეთ ~ 2

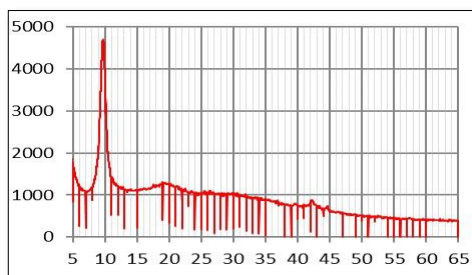
სთ, დავამატეთ 500 მლ დისტ. წყალი და 20 მლ H_2O_2 . წყალბადის ზეჟანგის დამატებით ნარევი გადადის მოყვითალო ოქროსფერში, ხოლო გაფილტვრის და ცენტრიფუგაში გარეცხვის შემდეგ ვღებულობთ გრაფენის ოქსიდის ყავისფერ 6%-იან სუსპენზიას.



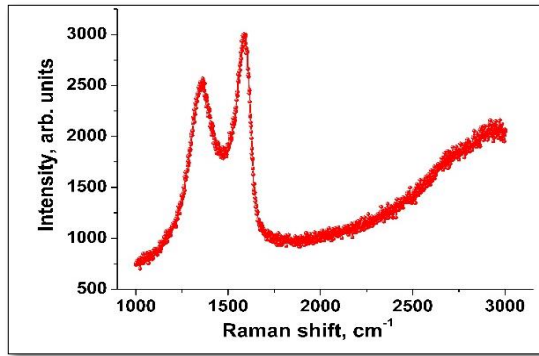
სურათი 1. სარეაქციო ნარევი: სინთეზური გრაფიტი- $NaNO_3$ - $KMnO_4$ - H_2SO_4 (a); გრაფიტის ოქსიდის სუსპენზია (b); გრაფიტის ოქსიდის სონიფიკაციით მიღებული გრაფენის ოქსიდის გელი (c)

სუსპენზია გავფილტრეთ ნეილონის ფილტრზე და გავაშრეთ ვაკუუმში. გაშრობა წარმოებს დაბალ ($50-70^{\circ}C$) ტემპერატურაზე. განხორციელდა მიღებული გრაფენის ოქსიდის მორფოლოგიურ-სტრუქტურული.

გრაფენის ოქსიდის სინთეზის ინტერკალაციის მეთოდი: სინთეზისათვის აღებულ 6 გ გრაფიტს(წინასწარ გააქტივებული ან პიროლიზური), ემატება 50 მლ კონც. გოგირდმჟავა და წყლის აბაზანაზე, ($t=27-35^{\circ}C$) მექანიკური მორევის პირობებში ხდება კალიუმის პერმანგანატის დამატება მცირე ულუფებით 1 სთ-ის განმავლობაში. წყლის აბაზანაში ტემპერატურის $70^{\circ}C$ -მდე აწევის შემდეგ, 30 წთ-ის მანძილზე ემატება 100მლ დისტ. წყალი და კიდევ 100მლ მომრევიდან გადმოდგმიდან 30 წთ-ის მერე. მიღებულ ნარევი 20 მლ წყალბადის ზეჟანგის დამატებით გადადის მოყვითალო ოქროსფერში, ხოლო გაფილტვრის და ცენტრიფუგაში გარეცხვის შემდეგ ვღებულობთ GO-ს ყავისფერ 6%-იან სუსპენზიას. გაშრობა წარმოებს დაბალ ($50-70^{\circ}C$) ტემპერატურაზე.

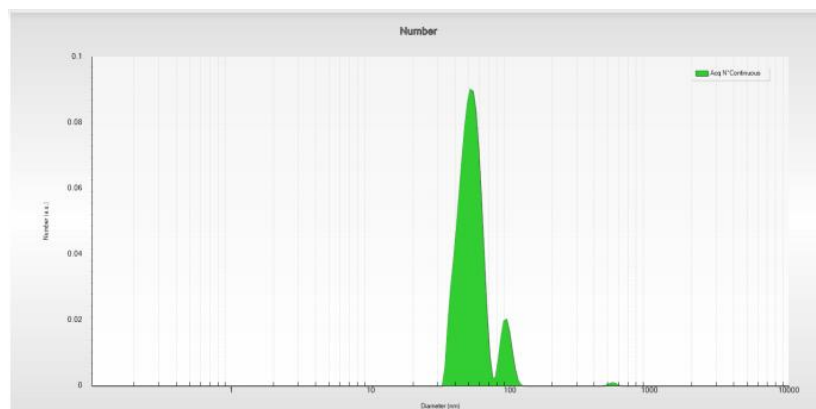


სურათი 2. გრაფენის ოქსიდის რენტგენოგრამა



სურათი 3. გრაფენის ოქსიდის რამანის სპექტრი

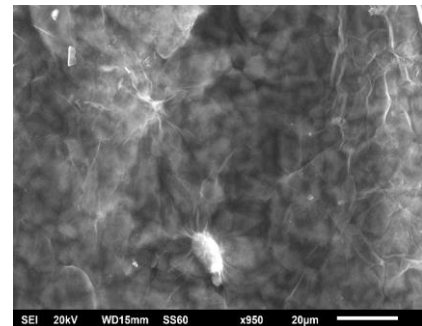
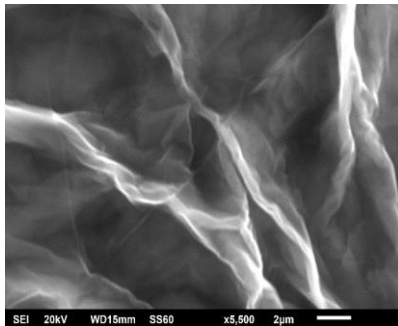
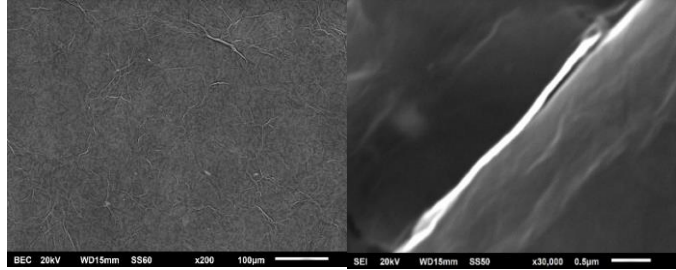
რამან სპექტრზე (სურათი 3) ნათლად შეინიშნება გრაფენის ოქსიდის G- და D-კავშირები 1595 cm^{-1} და 1347 cm^{-1} შთანთქმის ზოლში. რენდგენოსტრუქტურული ანალიზი ეს არის ტექნიკა, რომელიც გამოიყენება კრისტალური მასალების დასახასიათებლად. ამ მეთოდით შესაძლებელია კრისტალის ან მარცვლის ორიენტაციის ან ზომის დადგენა. სურათ 37-ზე შეინიშნება პიკი 10° , რაც ახასიათებს გრაფენის ოქსიდს. ასევე სინთეზირებული გრაფენის ოქსიდის ნაწილაკების ზომა 10-250 ნმ-ს ფარგლებშია, რომელიც განსაზღვრული იქნა როგორც ლაზერული ნანომზომის (სურათი 4) ასევე შერერის ფორმულის გამოყენებით. შერერის ფორმულას იყენებენ როდესაც ნაწილაკების ზომები არ აღემატება 150-200 ნმ-ს.



სურათი 4. ნანონაწილაკების ზომების განსაზღვრა ლაზერული ნანომზომით

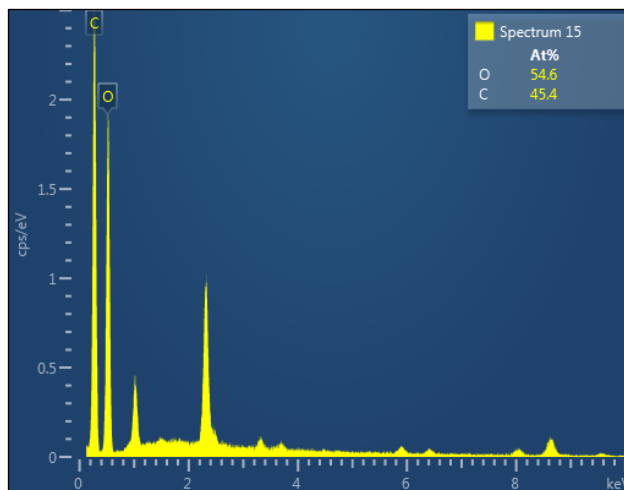
გრაფენის ოქსიდის მორფოლოგია, ფენების სისქე და ზომა შევისწავლეთ ელექტრონული მიკროსკოპის საშუალებით. სურათ 40-ზე შეინიშნება მცირე ფენიანი, ზოგ ადგილებში ნაოჭიანი გრაფენის ოქსიდის დასტები. სხვადასხვა დროს

გამოქვეყნებული სტატიების მიხედვით, დაქუცმაცებული გრაფენის ოქსიდის ფურცლების ღია ზედაპირები ხელს უწყობს ეფექტურ ადსორბციას [89-90]. გრაფენის ოქსიდის ნაოჭიანი და ფენიანი სტრუქტურები წარმოიქმნება ჟანგბადის შემცველ ფუნქციურ ჯგუფებს შორის ურთიერთქმედების გამო.



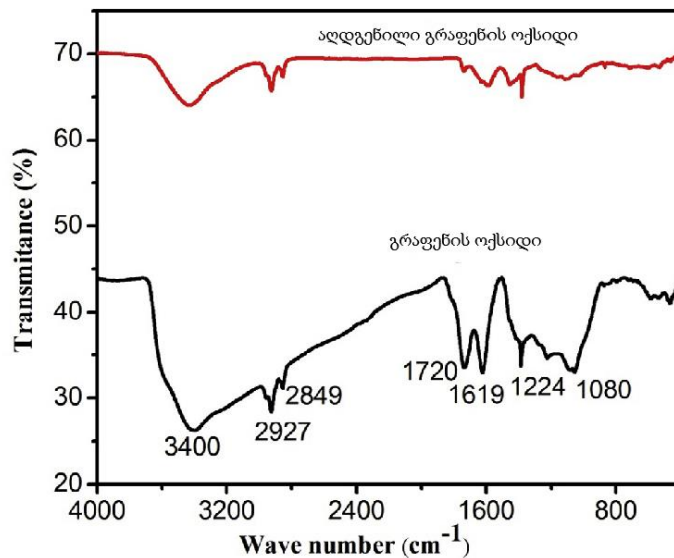
სურათი 5. გრაფენის ოქსიდის მიკროგრაფიული სურათი

ელემენტის შემადგენლობა, როგორც შეფასებულია EDS-ის მიერ და ასევე წარმოდგენილია სურათ 6-ზე მან გამოავლინა ნახშირბადის (45.4%) და ჟანგბადის (54.6%) არსებობა, რაც მიუთითებს წარმოქმნილი მასალის მაღალ ხარისხზე.



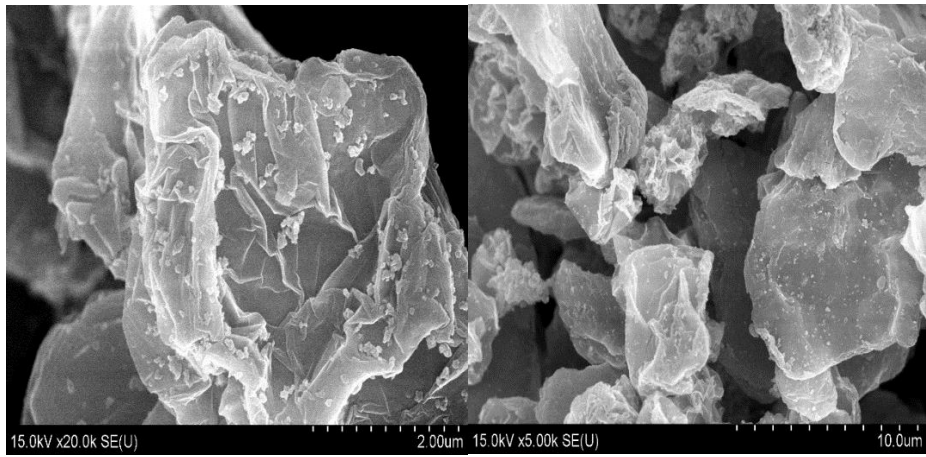
სურათი 6. გრაფენის ოქსიდის EDS

ასევე გრაფენის ოქსიდის ზედაპირზე არსებული ფუნქციური ჯგუფები გამოკვლეული იყო FTIR ანალიზით (სურათი 7). 1224 cm^{-1} -ზე და 1619 cm^{-1} -ზე მიღებული დამახასიათებელი პიკები მიუთითებენ C=C და C-O ბმის გაჭიმვაზე შესაბამისად. უფრო მეტიც, 2927 cm^{-1} და 3400 cm^{-1} დაფიქსირებული პიკები მიუთითებენ C-H ბმის ალკილის გაჭიმვაზე და C=C კავშირის შესაბამისად ახლად მომზადებულ GO-ში [94-95].



სურათი 7. გრაფენის ოქსიდის და აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის FTIR

გრაფენის ოქსიდის გრანულაცია. ფხვილოვანი კომპოზიტების გრანულაციისთვის ჩვენს მიერ გამოყენებულ იქნა გრანულატორი (SD-1000). გრანულაცია ჩატარდა შემდეგნაირად: საწყის ეტაპზე 1ლ წყალში იხსნება 30 გ პოლივინილის სპირტი 80 °C მუდმივი მორევის პირობებში. ამ ხსნარში შეაქვთ 300გ ფხვილოვანი კომპოზიტი და 3გ დისპერსანტი - მოდიფიცირებული პოლიაკრილის მჟავა (Sokalan-CP 10S). მიღებულ სუსპენზიას ურევენ მაგნიტურ სარეველაზე და პერისტალტიკური ტუმბოთი მიაწვდიან გრანულაციის ზონას სიჩქარით 10-20 მლ/წთ. გრანულაციის ზონის ტემპერატურა რეგულირდება 40-150 °C-მდე. სუსპენზიის გაფრქვევა ხდება 3 ატმ-მდე შეკუმშული ჰაერით. მიღებული გრანულეები გროვდება მიმღებში და საჭიროების შემთხვევაში დამატებით აშრობენ საშრობ კარადაში. გრაფენის ოქსიდის გრანულეების მორფოლოგია შესწავლილი იქნა ელექტრონული მიკროსკოპის საშუალებით. სურათ შეინიშნება აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის გოლფირებული სტრუქტურები (სურათი 8).



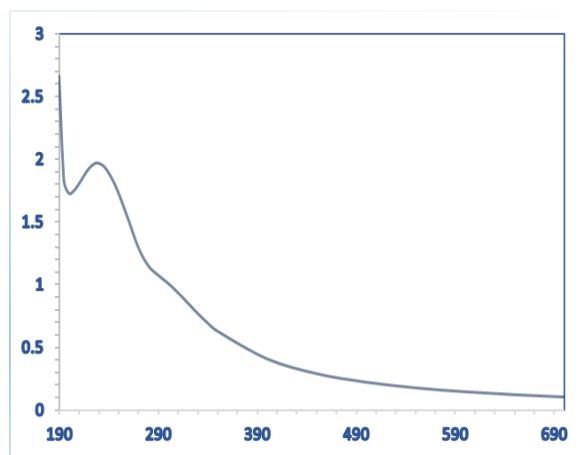
სურათი 8. აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის მიკროგრაფიული სურათი

აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის სინთეზი. გრაფენის ოქსიდის (სურათი 9a) აღდგენას ვახდენდით შემდეგნაირად ასკორბინის მჟავით. გრაფენის ოქსიდის მდგრად სუსპენზიას მოცულობით 200მლ (გრაფენის ოქსიდი - 0,1 მგ/მლ), ნელნელა ვამატებდით ასკორბინისმჟავას - 0.5 მგ/მლ, ნატრიუმის ტუტე - 0.4 მგ/მლ. შემდეგ სუსპენზიას ვამუშავებდით ულტრაბგერით აბაზანით (40 kHz, 600w), ნახევარი საათის მანძილზე, ვაყოვნებდით 80°C-ზე 24სთ-ით და ისევ ვამუშავებდით ულტრაბგერით 1 საათის განმავლობაში. ამ ექსპერიმენტის ჩასატარებლად გამოყენებული იქნა TF-1000N ულტრაბგერითი ჰომოგენიზატორი (სურათი 9b).

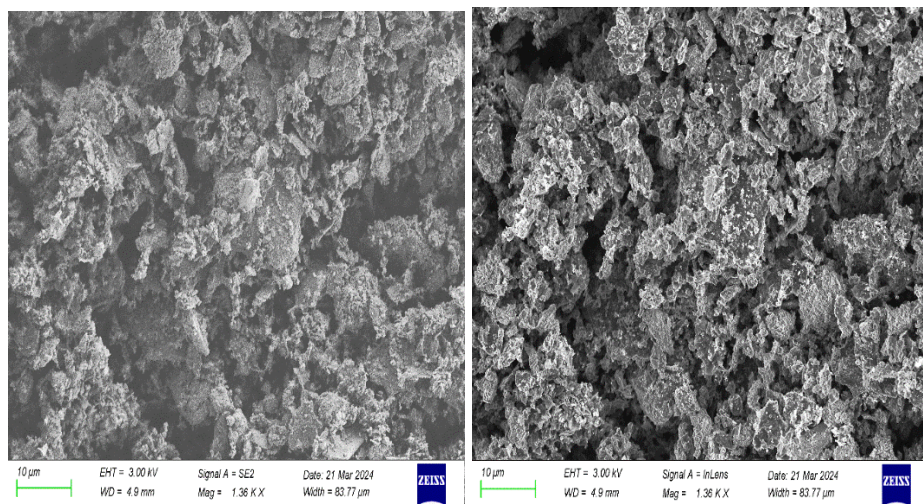


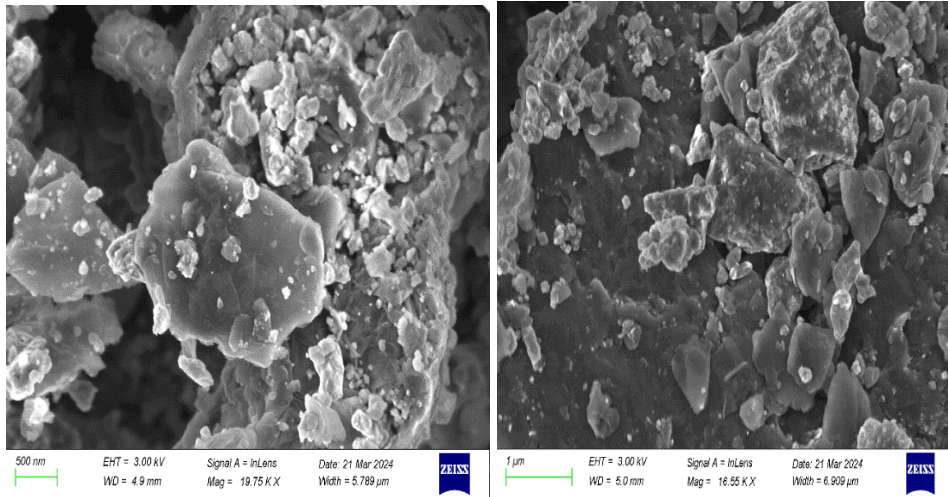
სურათი 9. გრაფენის ოქსიდის სუსპენზია (a) და მისი დამუშავება ულტრაბგერით ჰომოგენიზატორში (b)

მიღებული აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის შესწავლილი იქნა ულტრაიისფერი და ელექტრონული მიკროსკოპული მეთოდით. ულტრაიისფერ სპექტრზე (სურათი 10), შეინიშნება მთავარი პიკი 230 ნმ-ზე და მცირე პიკი დაახლოებით 300 ნმ-ზე, რაც დამახასიათებელია C=C ბმების $\pi-\pi^*$ - გადანაცვლებისთვის და C=O ბმების $n-\pi^*$ გადანაცვლებისთვის აღდგენილი გრაფენის ოქსიდში. აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის მორფოლოგიისა და სტრუქტურის კვლევისთვის გამოყენებული იქნა ელექტრონული მიკროსკოპი. კვლევამ აჩვენა, რომ აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის ფენები დაახლოებით $\approx 20-40$ ნმ -ის ტოლია.



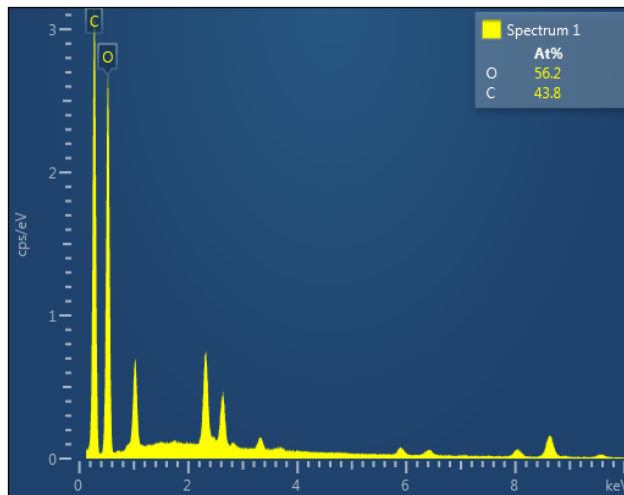
სურათი 10. აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის ულტრაიისფერი სპექტრი





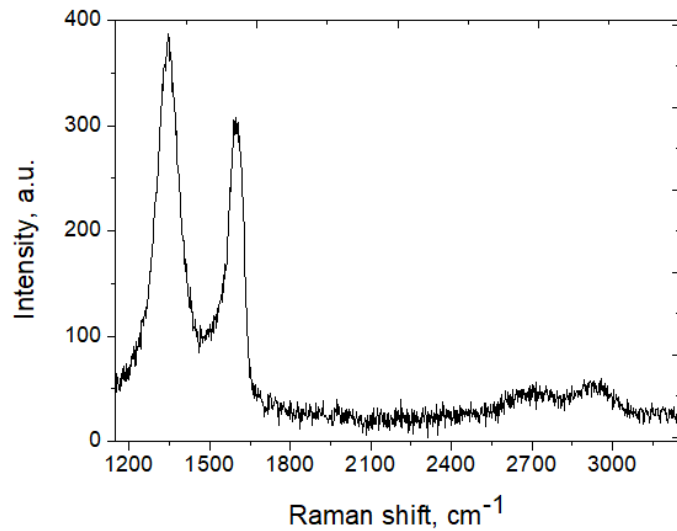
სურათი 11. ალდგენილი გრაფენის ოქსიდის მიკროგრაფიული სურათი

ელემენტის შემადგენლობა, როგორც შეფასებულია EDS-ის მიერ და ასევე წარმოდგენილია სურათ 12-ზე. მან გამოავლინა ნახშირბადის (43.8%) და ჟანგბადის (56.2%) არსებობა, რაც მიუთითებს წარმოქმნილი მასალის მაღალ ხარისხზე.

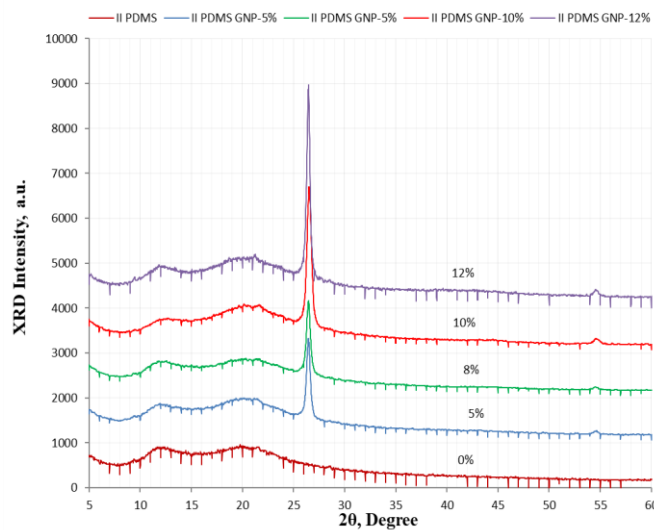


სურათი 12. ალდგენილი გრაფენის ოქსიდის EDS

რამან სპექტრზე (სურათი 13) ნათლად შეინიშნება გრაფენის ოქსიდის G- და D- კავშირები 1350 cm^{-1} და 1640 cm^{-1} შთანთქმის ზოლში. როგორც ვაკვირდებით G-ბმის პიკი მაღალია და D-ბმის პიკზე, რაც ადასტურებს ალდგენილი გრაფენის სტრუქტურას.



სურათი 13. აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის რამანი



სურათი 14. გრაფენის სტრუქტურების შემცველი PDMS ნანოკომპოზიტების XRD

შესწვალელი იქნა გრაფენის სტრუქტურების შემცველი PDMS ნანოკომპოზიტების რენდგენოსტრუქტურული ანალიზი.

გრაფენის სტრუქტურების შემცველი პოლიმერული კომპოზიტების სინთეზი

პოლიმერულ მატრიცად გამოყენებული იქნა პოლიდიმეთილსილოქსანი (GENIOPLAST(R) PELLET S -Siloxane gum content 65 %), რადგან იგი ავლენს უამრავ არაჩვეულებრივ თვისებას, მათ შორისაა შედარებით დაბალი ფასი, სირბილე, გამჭვირვალობა, გამორჩეული ფიზიკური თვისებები, ქიმიური სტაბილურობისა და გაზგამტარიანობის ჩათვლით. გარდა ამისა, PDMS-ს აქვს შესანიშნავი

ბიოთავსებადობა და უკვე დამტკიცებულია აშშ-ს სურსათისა და წამლების ადმინისტრაციის (FDA) მიერ სამედიცინო პროდუქტებში გამოსაყენებლად. თუმცა PDMS-ს შედარებით სუსტი მექანიკური თვისებების გამო ძალზედ აუცილებელია სხვადასხვა შემავსებლების დამატება. გრაფენის, რომელიც არის ერთი ატომის სისქის 2 განზომილებიანი სტრუქტურა, შეიძლება სრულიად შეცვალოს PDMS-ს ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები.

ცხრილი 1. გრაფენის სტრუქტურების ფიზიკური თვისებები

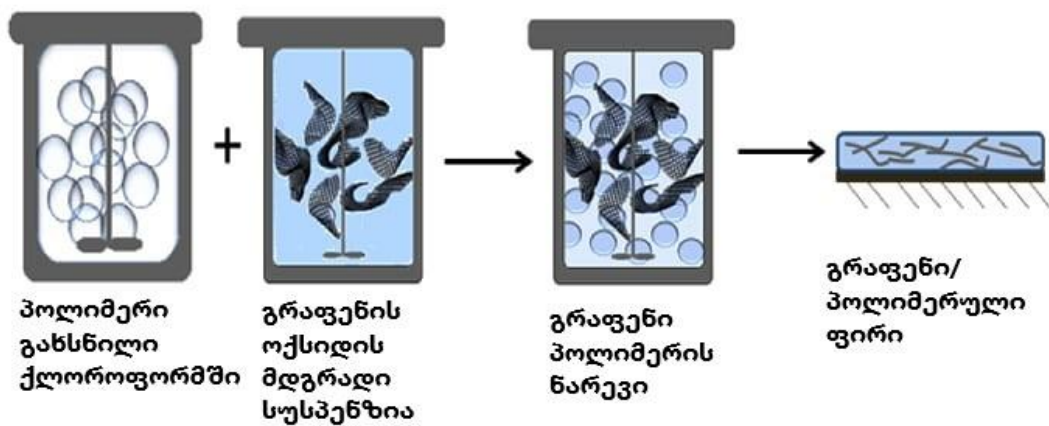
თვისებები	გრაფენი	გრაფენის ოქსიდი	აღდგენილი გრაფენის ოქსიდი
ელექტრონების მოძრაობა ოთახის ტემპერატურაზე	$\approx 200\ 000 - 250\ 000$ $\text{სმ}^2\text{-}^{12}\text{S}^{-1}$	0.1-10 $\text{სმ}^2\text{-}^{12}\text{S}^{-1}$	2 – 200 $\text{სმ}^2\text{-}^{12}\text{S}^{-1}$
აქტიური ზედაპირის ფართობი	2630 $\text{მ}^2\text{გ}^{-1}$	736.6 $\text{მ}^2\text{გ}^{-1}$	466 – 758 $\text{მ}^2\text{გ}^{-1}$
თერმული გამტარობა	≈ 5000 $\text{ვტ მ}^{-1}\text{K}^{-1}$	0.5 – 18 $\text{ვტ მ}^{-1}\text{K}^{-1}$	1390 – 2275 $\text{ვტ მ}^{-1}\text{K}^{-1}$
ელექტრული გამტარობა	$\approx 6 \times 10^8$ სიმ. მ^{-1}	$\approx 5.7 \times 10^{-6}$ სიმ. მ^{-1}	$10^2 - 10^5$ სიმ. მ^{-1}

მომზადების სხვადასხვა მეთოდი გამოიყენება გრაფენის სტრუქტურებით გამაგრებული პოლიმერული ნანოკომპოზიტების სინთეზისთვის. კერძოდ, დნობით შერევას, ხსნარების შერევა და in situ პოლიმერიზაცია. გარდა ამ სამი ტრადიციული პოლიმერული კომპოზიტის მომზადების მეთოდისა, ასევე გამოიყენება მრავალი სხვა მეთოდი მასალის დამზადებისთვის. ჩვენს მიერ ძირითადად გამოყენებული იყო დნობით შერევის და ხსნარების შერევის მეთოდები.

გრაფენი/PDMS ნანოკომპოზიტის სინთეზი

ავიღეთ 9,5გ პოლიდიმეთილსილოქსანის გრანულები, (GENIOPLAST(R) PELLET S siloxane gum content 65%) მოვათავსეთ ქიმიურ ჭიქაში, დავასხით

ქლოროფორმი და მოვურიეთ მაგნიტურ მომრევეში სრულ გახსნამდე. დავამატეთ 0,5გ გრაფენის სტრუქტურები და მიღებული მასა კარგად მორევის შემდეგ ჩამოვასხით თხელ ფენად შემდგომი კვლევებისთვის. გამშრალი დავაქუცმაცეთ ექსტრუდირებისთვის. აქვე აღვიშნავთ, გრაფენის სტრუქტურების ზომები უნდა იყოს საკმარისად მცირე ზომის, რათა კარგად გადანაწილდეს პოლიმერულ სივრცეში, ამასთან ერთად დიდი ზომისაც, ისე რომ ადგილი არ ჰქონდეს ფაზების განცალკევებას. ხოლო ერთგვაროვანი სტრუქტურის მისაღებად მნიშვნელოვანია ვიფიქროთ: შესაძლო ურთიერთქმედების შესახებ პოლიმერული სფეროებსა და შემავსებელს შორის, ასევე შემავსებლის ნაწილაკების ზომებსა და ფორმაზე.



სქემა 1. გრაფენი/პოლიმერული ნანოკომპოზიტის მომზადების მეთოდი

ჰომოგენიზაციის თვალსაზრისით საუკეთესო შედეგები მიიღება მაშინ, როდესაც გრაფენის სტრუქტურების კონცენტრაცია არის საკმარისად მაღალი, რომ მიაღწიოს გაჯერების ზღვარს. ამ დროს შესაძლებელია შევამჩნიოთ სხვადასხვა ურთიერთქმედება პოლიმერსა და გრაფენის სტრუქტურებს შორის, მათ შორის ძლიერი კონტრასტის გამო.

გრაფენი/პოლიმერული ნანოკომპოზიტებისათვის მნიშვნელოვანია, რომ მივაღწიოთ სისტემის საუკეთესო ელექტრულ და მექანიკური თვისებებს შემავსებლის რაოდენობის მინიმუმამდე დაყვანით. კომპოზიტების კომერციალიზაციისთვის ეს შეიძლება სასარგებლო იყოს მრეწველობასთან შესაძლო ურთიერთკავშირისთვის.

პოლიმერული ძაფები შემავსებლის სხვადასხვა კონცენტრაციებით მიღებული იქნა 140°C-ზე ამერიკული წარმოების Filabot-ის ექსტრუდერში



სურათი 15. პოლიმერული ძაფების საწარმოებელი ექსტრუდერი

გრაფენით განმტკიცებულ 3D ბეჭდვის პოლიმერულ ძაფებს აქვთ ძლიერი, გამტარ კომპოზიტების წარმოების პროცესის განვითარების პოტენციალი.

არსებობს ამ ნახშირბადის ნანოსტრუქტურული დანამატების მრავალი გამოყენება 3D პრინტერის ძაფებში, მათ შორის სენსორებში, ელექტრომაგნიტური და რადიოსიხშირული გამოსხივებისაგან დამცავ მოწყობილობებში [70,71].

ნახშირბადის ნანოსტრუქტურებიდან იზრდება გრაფენის პოპულარობა, რადგან მას აქვს მრავალი საინტერესო თვისება, როგორცაა დაბალი წინაღობა, შესანიშნავი ელექტრო და თბოგამტარობა, ოპტიკური გამჭვირვალობა და ელექტრონების მაღალი მობილურობა [72].

მსოფლიოში არსებობს მხოლოდ რამდენიმე კომპანია, რომლებიც აწარმოებენ გრაფენით გაძლიერებულ 3D ბეჭდვის მასალებს, მათ შორისაა Angstrom Materials და Graphene 3D Labs [73,74].

გრაფენის აქტიურად გამოყენება 3D ბეჭდვაში დაიწყო კანადურ კომპანია Grafoid-მა, რის შედეგადაც გამოვიდა პროდუქტი MesoGraf, რომელიც მზადდება ნედლი, დაუმუშავებელი გრაფიტის მადნიდან ერთსაფეხურიანი პროცესით.

აღსანიშნავია, რომ არსებობს გარკვეული შეზღუდვები 3D ბეჭდვის ამჟამინდელ ტექნოლოგიასთან, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც საქმე ეხება ძაფების წარმოებას, სადაც გამოყენებულია სხვადასხვა დანამატები, როგორცაა ლითონთა ფხვნილები, ნახშირბადის ნანოსტრუქტურები და სხვ. პრობლემები

შეიძლება დაკავშირებული იყოს ნაწილაკების ზომასთან და კომპონენტების ტემპერატურულ ცვალებადობასთან პოლიმერული მატრიცის შიგნით. აქედან გამომდინარე, ჯერ კიდევ მიმდინარეობს კვლევები ფუნქციონალური 3D ბეჭდვის მასალების წარმოებაში. მაგალითად, დოქტორ აკვაპის კვლევითი ჯგუფი ფლორიდის სახელმწიფო უნივერსიტეტში, იყენებს გრაფენით და ნახშირბადის ნანომილებით გაძლიერებულ 3D ბეჭდვის მასალების კომბინაციას საბოლოო პროდუქტის თვისებების რეგულირებისთვის. ეს კვლევები ძირითადად ფოკუსირებულია პოლიმერების მოდიფიცირებაზე გრაფენით. მიუხედავად იმისა, რომ გრაფენს მოიხსენიებენ, როგორც შესანიშნავ მასალას, გრაფენისა და პოლიმერების ერთგვაროვანი ნარევიები აუცილებელია უნიკალური თვისებების გამოსაყენებლად. ვეი და სხვ. განაცხადეს, რომ გრაფენის კომპოზიტების მთავარი პრობლემა იყო გრაფენის ფურცლებს შორის ფაზის გამოყოფა. მათ ეს პრობლემა გადაჭრეს გრაფენის ოქსიდის გამოყენებით ნაცვლად გრაფენისა. გრაფენის ოქსიდი შეიცავს ჟანგბადით გაჯერებულ ფუნქციურ ჯგუფებს მის სიბრტყეებზე, რაც

ხელს უწყობს გრაფენის სტრუქტურების დისპერსიას პოლიმერულ ფაზებში გრაფენი/პოლიდიმეთილსილოქსანის ნანოკომპოზიტი დამზადდა შემავსებლის სხვადასხვა კონცენტრაციით (0.5%, 1%, 5%, 10%, 12%, 15%). შესწავლილი იქნა გრაფენის სტრუქტურების შემცველი PDMS ნანოკომპოზიტების რენდგენოსტრუქტურული ანალიზი, სადაც დასტურდება პოლიმერის ამორფული სტრუქტურა, რომელსაც შედგება ოთხი განსხვავებული ელემენტისაგან: სილიციუმი, ნახშირბადი, წყალბადი, ჟანგბადი. (ცხრილი 2).

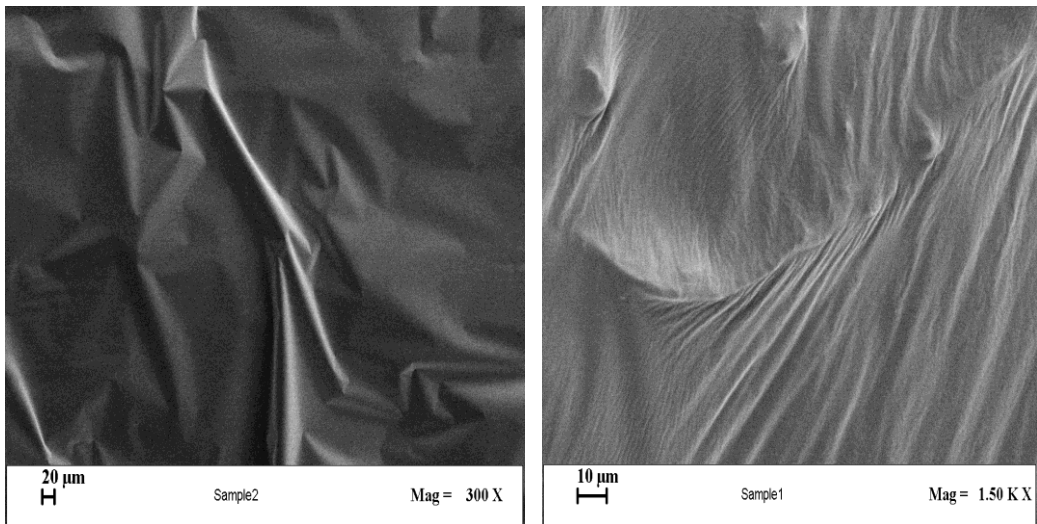


სურათი 16. გამზადებული პოლიმერული ძაფები

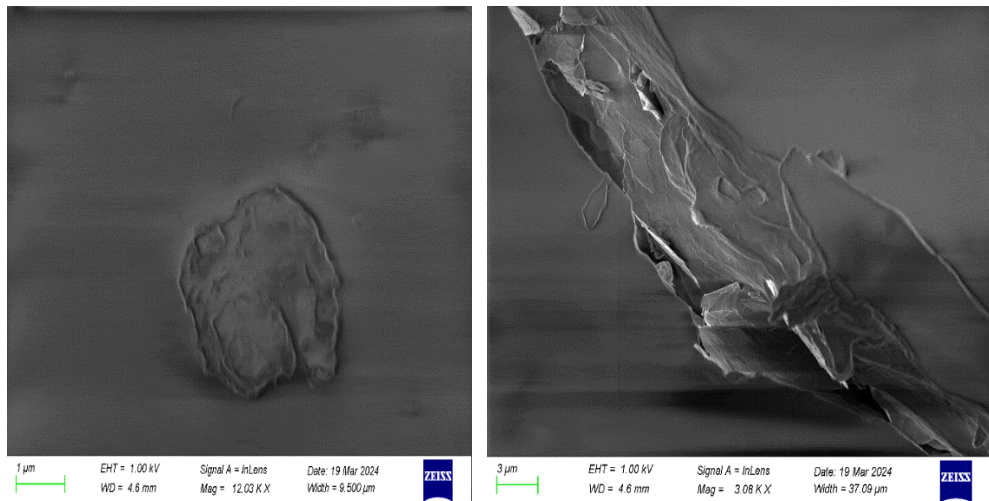
ცხრილი 2. პოლიმერული ნანოკომპოზიტების თერმული თვისებები

№	პოლიმერული ნანოკომპოზიტები	შემავსებელი გრაფენის სტრუქტურა %	წონის დაკარგვა %	შემადგენელი კომპონენტის წონა, %/°C
1	PDMS	0.5	99.69	521.74
2	PDMS	1	99.18	522.65
3	PDMS	5	99.06	517.18
4	PDMS	10	99.26	511.22
5	PDMS	12	99.72	530.35
6	PDMS	15	99.67	533.94

ასევე განხორციელდა მასალის მორფოლოგიის კვლევა ელექტრონული მიკროსკოპით. მიკროგრაფიულ სურათზე (სურათი 16,17) შეინიშნება გრაფენის ნანონაწილაკების აგლომირებული მორფოლოგია. იქედან გამომდინარე, რომ პოლიდიმეთილსილოქსანი არის ელასტიური პოლიმერი სუსტი მექანიკური თვისებებით, გადავწყვიტეთ დაგვემატებინა უფრო მტკიცე პოლიმერი - აკრილონიტრილბუტადიენ სტიროლი (ABS). სამკომპონენტიანი პოლიმერული ნანოკომპოზიტების მომზადების მიზნით აკრილონიტრილბუტადიენ სტიროლი და პოლიდიმეთილსილოქსანი გავხსენით ქლოროფორმში, კარგად გადავურიეთ მაგნიტურ მომრევეზე და დავამატეთ გრაფენის სტრუქტურები სხვადასხვა კონცენტრაციით.



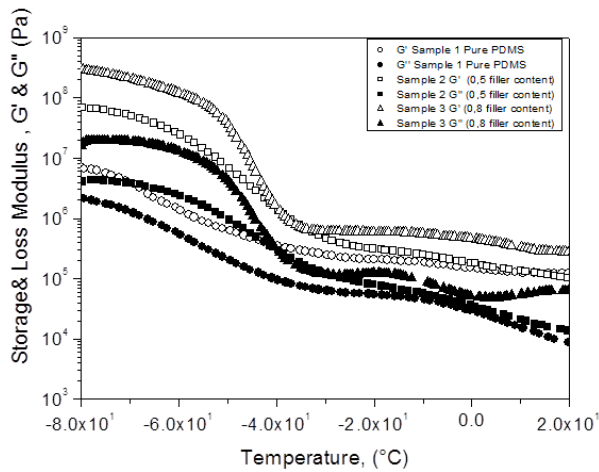
სურათი 17. სუფთა PDMS და გრაფენი/PDMS ნანოკომპოზიტის მიკროგრაფიული სურათი



სურათი 18. გრაფენი/პოლიდიმეთილსილოქსანის ნანოკომპოზიტის მიკროგრაფიული სურათი

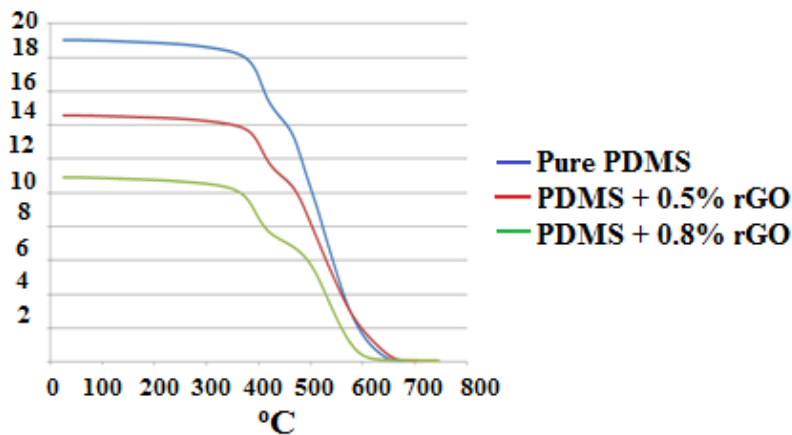
2 სთ-იანი მორევის შემდეგ დავამატეთ გრაფენის სტრუქტურები და გავაგრძელეთ მორევა კიდევ 1 სთ, შემდეგ გავაცხელეთ გამხსნელის აორთქლების მიზნით, როდესაც გამხსნელი მთლიანად მოშორდა მიღებული მასა გავაშრეთ თხელ ფირფიტებად, რათა შეგვესწავლა ელექტრული თვისებები ოთახის ტემპერატურაზე.

სუფთა PDMS-სა და აღდგენილი გრაფენის ოქსიდის 0.5 და 0.8 მას.% შემცველობით დამზადებული ნანოკომპოზიტის ფირები შესწავლილი იქნა მექანიკური თვისებები დინამიურ მექანიკური ანალიზატორით (სურათი 18), რომელმაც გვიჩვენა, რომ შემავსებლის კონცენტრაციის გაზრდით იზრდება რელაქსაციის დრო.



სურათი 19. დინამიური მექანიკური ანალიზი

აღდგენილი გრაფენის ოქსიდი/PDMS ნანოკომპოზიტების თერმული სტაბილურობა თერმოგრაფიმეტრული (სურათი 19) ანალიზატორით.



სურათი 20. აღდგენილი გრაფენის ოქსიდი/PDMS ნანოკომპოზიტების TGA

გრაფენის სტრუქტურების შემცველი პოლიმერული კომპოზიტების ელექტრო-მაგნიტური თვისებები

გრაფენი/პოლიმერული ზოგადად გამტარ პოლიმერულ კომპოზიტებში გამტარი ქსელის ფორმირება შეიძლება განისაზღვროს და პროგნოზირდეს სხვადასხვა გეომეტრიული, თერმოდინამიკური და სტატისტიკური მოდელებით. გრაფენი/პოლიმერული ნანოკომპოზიტების ფირებისათვის შესწავლილი იქნა ელექტრული თვისებები ე.წ „ჰოლის ეფექტით“. გაზომვები ტარდებოდა ოთახის

ტემპერატურაზე. კვლევამ აჩვენა, რომ გრაფენის სტრუქტურის კონცენტრაციის გაზრდით იზრდება მისი ელექტრული თვისებებიც (ცხრილი 3).

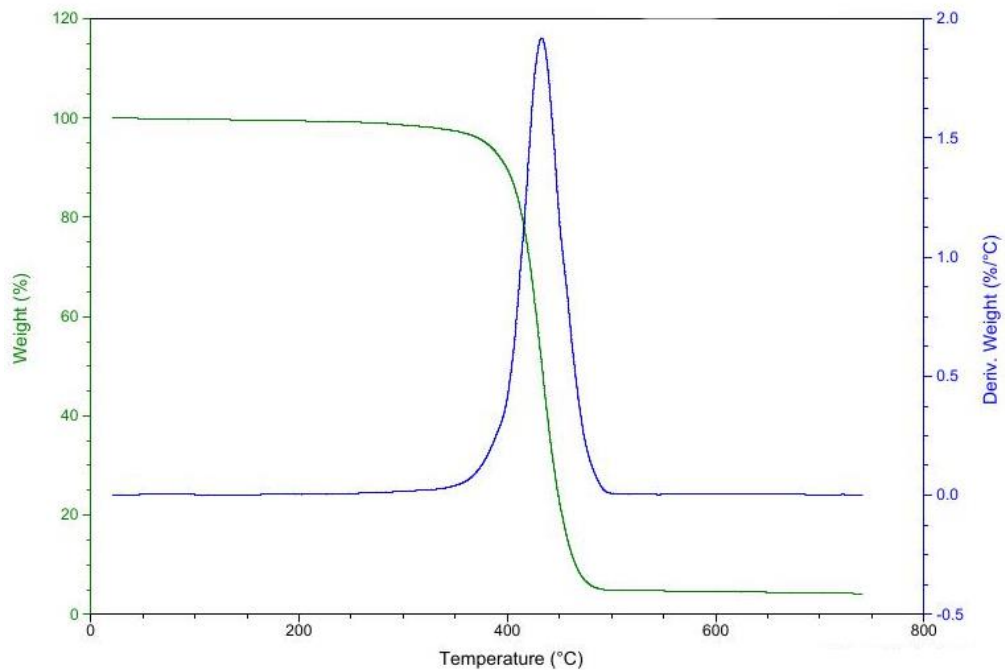
იქედან გამომდინარე, რომ პოლიდიმეთილსილოქსანი არის ელასტიური პოლიმერი სუსტი მექანიკური თვისებებით, გადავწყვიტეთ დაგვემატებინა უფრო მტკიცე პოლიმერი - აკრილონიტრილბუტადიენ სტიროლი (ABS). სამკომპონენტო პოლიმერული ნანოკომპოზიტების მომზადების მიზნით აკრილონიტრილბუტადიენ სტიროლი და პოლიდიმეთილსილოქსანი გავხსენით ქლოროფორმში, კარგად გადავურიეთ მაგნიტურ მომრევეზე და დავამატეთ გრაფენის სტრუქტურები სხვადასხვა კონცენტრაციით.

2 სთ-იანი მორევის შემდეგ დავამატეთ გრაფენის სტრუქტურები და გავაგრძელეთ მორევა კიდევ 1 სთ, შემდეგ გავაცხელეთ გამხსნელის აორთქლების მიზნით, როდესაც გამხსნელი მთლიანად მოშორდა მიღებული მასა გავაშრეთ თხელ ფირფიტებად, რათა შეგვესწავლა ელექტრული თვისებები ოთახის ტემპერატურაზე.

ცხრილი 3. გრაფენი/PDMS ნანოკომპოზიტების ელექტრული თვისებები

№	დასახელება	მუხტის მატარებლის კონცენტრაცია სმ^{-3}	ძვრადობა $M \text{ სმ}^2 \cdot \text{წმ}^{-1} \cdot \text{ვ}^{-1}$	კუთრი ელ წინაღობა ρ ომი, სმ	გამტარებლობა σ ომი $^{-1} \cdot \text{სმ}^{-1}$	სისქე მკმ
1	პოლიდიმეთილსილოქსანი (PDMS)	5.6×10^8	1.5×10^{-1}	1.05 $\times 10^{11}$	9.4×10^{-12}	600
2	გრაფენის ოქსიდი	3.11×10^{11}	2.2×10^2	9.1×10^4	1.09×10^{-5}	200
3	(I) PDMS გრაფენი 0.5%	8.6×10^8	4.5×10^2	1.6×10^8	6.25×10^{-9}	800
4	(I) PDMS გრაფენი 1%	1.3×10^9	1.64×10^2	2.89 $\times 10^7$	3.46×10^{-8}	800
5	(I) PDMS გრაფენი 5%	1.9×10^9	2.6×10^2	1.2×10^7	8.4×10^{-8}	740
6	(I) PDMS გრაფენი 10%	1.5×10^9	1.2×10^2	3.3×10^7	3.01×10^{-8}	640
7	(I) PDMS გრაფენი 12%	2.1×10^9	2.8×10^2	1.1×10^7	9×10^{-8}	500

შესწავლილია აკრილონიტრილბუტადიენ სტიროლი/პოლიდიმეთილსილოქსანის პოლიმერული ნანოკომპოზიტების თერმული სტაბილურობა:



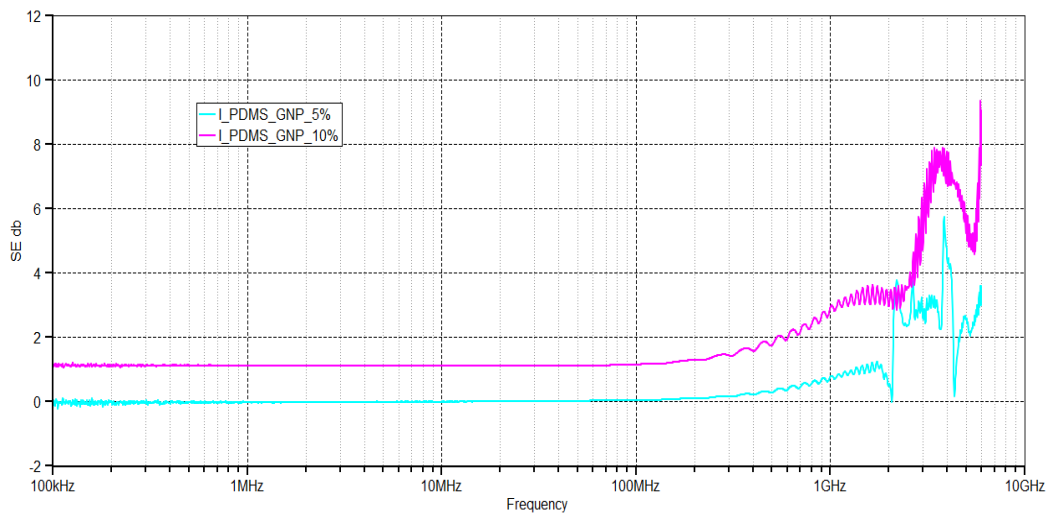
სურათი 21. აკრილონიტრილბუტადიენ სტიროლი/პოლიდიმეთილსილოქსანის პოლიმერული ნანოკომპოზიტების TGA

ფართოდ არის შესწავლილი გამტარი პოლიმერები გრაფიტით, გრაფენით და მისი წარმოებულებით, ნახშირბადის ნანომილებით, მეტალებით ან მეტალთა ოქსიდებით, მათი ჩვეულებრივი ელექტრული და მექანიკური თვისებებიდან გამომდინარე. ზოგადად ნანომასალის და პოლიმერის კომბინაცია არის შესანიშნავი, რადგან ავლენენ მორფოლოგიის მოდიფიკაციის ხარჯზე ახალ ელექტრულ თვისებებს, ან ორ კომპონენტს შორის ელექტრული ურთიერთკავშირის გამო.

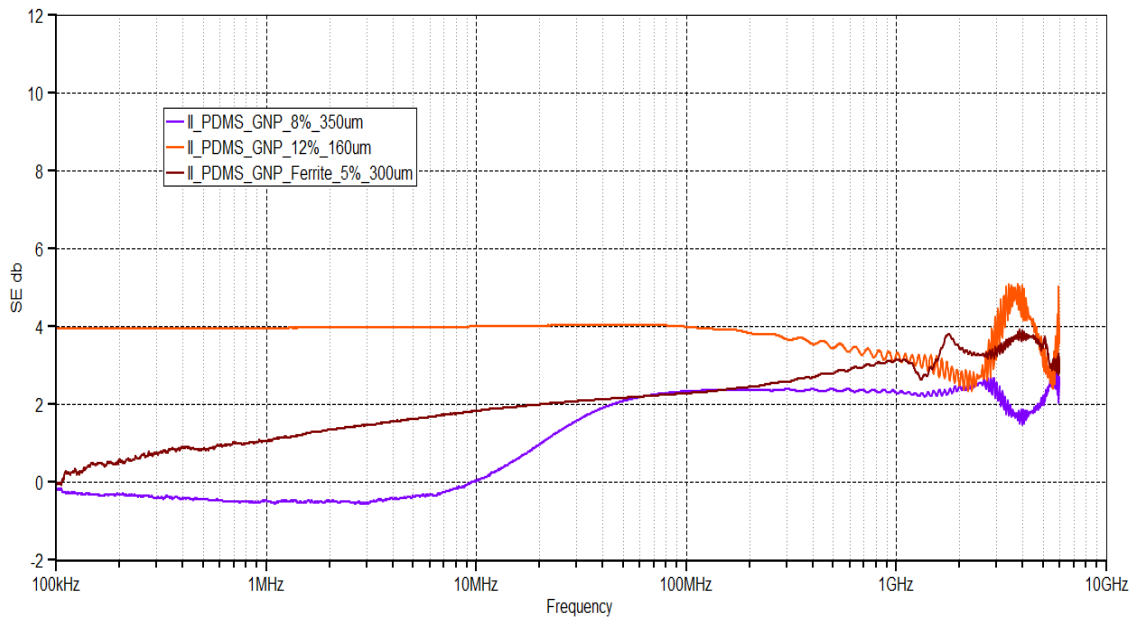
შესაბამისად ,გრაფენი/პოლიმერული ნიმუშებისათვის გაზომილი იქნა S11 პარამეტრები, სტანდარტული ASTM D4935 (Standard test methods for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials) მეთოდით. გაზომვები ტარდებოდა 10 კჰ-დან 6 გჰ-მდე დაიაპაზონში (სურათი 20, 21).

ცხრილი 4. გრაფენი/PDMS/ABS ნანოკომპოზიტების ელექტრული თვისებები

№	დასახელება	მუხტის მატარებლების კონცენტრაცია სმ ⁻³	ძვრადობა M სმ ² .წმ ⁻¹ ვ ⁻¹	კუთრი ელ წინაღობა ρ ომი, სმ	გამტარებლობა σ ომი ⁻¹ , ~ სმ ⁻¹	სისქე მკმ
1	ABS PDMS გრაფენი 5%	3.2 X 10 ¹⁰	4.2 X 10 ²	4.6 X 10 ⁶	2.18 X 10 ⁻⁷	300
2	ABS PDMS გრაფენი 8%	2.6 X 10 ¹⁵	9.07 X 10 ⁰	2.67 X 10 ²	3.7 X 10 ⁻³	380
3	ABS PDMS გრაფენი 10%	8.6X 10 ¹⁶	1.06 X 10 ⁰ ანუ 1.06	6.8 X 10 ¹ ანუ 6.8	1.4 X 10 ⁻²	500
4	ABS PDMS გრაფენი 12%	5.1 X 10 ¹⁷	4.55 X 10 ⁻¹	2.68 X 10 ¹ ანუ 2.68	3.77 X 10 ⁻²	160
5	ABS PDMS გრაფენი 15%	1.1 X 10 ¹⁶	5.4 X 10 ¹	1.05 X 10 ¹	9.5 X 10 ⁻²	900



სურათი 22. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შთანთქმის ხარისხი გრაფენი/პოლიდიმეთილსილოქსანი კომპოზიტისათვის



სურათი 23. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შთანთქმის ხარისხი გრაფენი/ფერიტი/პოლიდიმეთილსილოქსანი კომპოზიტისათვის

ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა გვიჩვენა, რომ პოლიმერულ კომპოზიტებში, სადაც შემავსებელი გრაფენის ოქსიდის სტრუქტურა 10% შეადგენს ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შთანთქმას ალწევს 90%-ს 10 კჰ-დან 6 გჰ-მდე დიაპაზონში.

დასკვნა

1. დამუშავებული იქნა ჰამმერსის და ჰამმერსის მოდიფიცირებული მეთოდით გრაფენისა და გრაფენის ოქსიდის სინთეზის მეთოდები და დადგენილი იქნა სინთეზის ოპტიმალური პარამეტრები.
2. დადგენილი იქნა, რომ ჰამმერსის მოდიფიცირებული მეთოდით მიღებული გრაფენის ოქსიდში C : O თანაფარდობა 2.1-2.9 ზღვრებშია, ხოლო გრაფენის ოქსიდის ფენები >15-ზე.
3. შესწავლილი იქნა მიღებული მასალები სტრუქტურა და მორფოლოგია რენდგენით, ულტრაიისფერი, ინფრაწითელი და რამან სპექტროსკოპული მეთოდებით, სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპით.
4. გრაფენის ოქსიდის აღდგენა ანუ ჯანგაბდმემცველი ფუნქციური ჯგუფების მოცილება განხორციელდა როგორც ქიმიური რეაგენტებით (ასკორბინის მჟავა, ჰიდრაზინის მონოჰიდტარი), ასევე მიკროტალღური და ულტრაბგერითი დამუშავებით.
5. გრაფენის ოქსიდისათვის შერჩეული იქნა ორგანული გამხსნელი (ქლოროფორმი CCl₄), რომელშიც ის სრულად დისპერგირდა.
6. სინთეზირებული იქნა გრაფენის ოქსიდის გოლფირებული სტრუქტურები ერთდროული გაფრქვევა-გაშრობის მეთოდით, დადგენილი იქნა ზომები და $\approx 20 - 40$ მიკრონის ფარგლებშია.
7. „ხსნარების შერევის“ მეთოდით მომზადებული იქნა გრაფენის სტრუქტურის შემცველი (0.5%, 1%, 5%, 10%, 12%, 15% მას.) პოლიდიმეთილსილოქსანის ფუძეზე პოლიმერული ნანოკომპოზიტები.
8. შესწავლილი იქნა „ხსნარების შერევის“ მეთოდით მომზადებული გრაფენი/პოლიდიმეთილსილოქსანის ნანოკომპოზიტების სტრუქტურა და მორფოლოგია რენდგენით, ულტრაიისფერი, ინფრაწითელი და რამან სპექტროსკოპული მეთოდებით, სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპით.
9. „ნალღობების შერევის“ მეთოდით მომზადებული იქნა გრაფენის სტრუქტურის შემცველი (0.5%, 1%, 5%, 10%, 12%, 15% მას.) პოლიდიმეთილსილოქსანის ფუძეზე პოლიმერული ნანოკომპოზიტები.

10. შესწავლილი იქნა „ნაღობების შერევის“ მეთოდით მომზადებული გრაფენი/პოლიდიმეთილსილოქსანის კომპოზიტების სტრუქტურა და მორფოლოგია რენდგენით, ულტრაიისფერი, ინფრაწითელი და რამან სპექტროსკოპული მეთოდებით, სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპით.
11. შესწავლილი იქნა ოპტიმალური შედგენილობის გრაფენი/პოლიდიმეთილ-სილოქსანის ნანოკომპოზიტის თერმული მდგრადობა, ფიზიკურ-მექანიკური და ელექტროფიზიკური მახასიათებლები.

Abstract

Since the beginning of the new millennium, the concept of "3D" has firmly entered our daily life. 3D printing technologies open up new possibilities for us in creativity, science, technology and everyday life. A 3D printer, or three-dimensional printing machine, is a unique modern tool with which the smallest ones, starting from parts with nanoparticles, can print macro and objects of a huge volume. In 3D printing technology, a digital model of the structure of an object is initially created in a computer, which interacts with a printer and, as a result of an appropriate command, begins to form a layer-by-layer product. The advantages of 3D printing over conventional printing are high speed, simplicity and relatively low cost. A 3D printer is actively used in various industries: construction, medicine (for example, for the manufacture of various organs, new generation prostheses), furniture manufacturing (for example, furniture), Reconstruction of modeling models and creating accurate analogies), toy manufacturing (for example, Various figurines and board games, inscriptions and decorations), the food industry (for example, the food industry), the production of complex shaped candies), the production of clothes and shoes (for example, carbohydrates), the creation of new, unusual models), etc.

Graphene It is a single atom thick sp² carbon crystal. Its two-dimensional structure gives it many unique properties, such as high Young's modulus (~1 TPa), large active surface area (maximum theoretical value ~2630 m²/g), excellent thermal conductivity (~3000–5000 V/μ), and excellent electrical conductivity (for regenerated graphene oxide monolayers ~102 siemens/m). Graphene sheets have been successfully used as fillers in polymers to investigate how they affect the polymer's mechanical strength, fire resistance, electrical conductivity, and other properties. However, the main problem faced by graphene/polymer composites is phase separation between graphene sheets and polymer during the synthesis process. In order to avoid the problem of phase separation and graphene aggregation, we used graphene oxide and regenerated graphene oxide together with graphene. Polydimethylsiloxane was chosen as the polymer matrix.

The doctoral thesis describes the synthesis and research of polymer nanocomposites using carbon nanostructures. Polydimethylsiloxane was used as a polymer matrix, to which graphene, graphene oxide and reduced graphene oxide were added in different (mass) concentrations. The methods of mixing solutions and mixing solutions were mainly used. The structural and morphological research of the obtained materials was carried out by ultraviolet and infrared spectral methods, Raman spectroscopy, X-ray, electron microscopy. The electrical properties of the graphene/polymer composite were also studied.

ინფორმაცია ნაშრომის აპრობაციის შესახებ

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში:

1. სოფიო მიქაბერიძე, „გრაფენის ოქსიდით განმტკიცებული პოლიმერული ნანოკომპოზიტების სინთეზი“, Georgian Scientists/ ქართველი მეცნიერები ტ.6 N1 2024 გვ.257-261
2. სოფიო მიქაბერიძე, ნათია ჯალაღონია, მამუკა მაისურაძე, „3D ბეჭდვის მეთოდების მიმოხილვა“, Georgian Scientists/ ქართველი მეცნიერები ტ.6 N.2 2024 გვ. 323-327
3. Sopia Mikaberidze, “Synthesis of Polymer Nanocomposites Reinforced with Graphene Oxide“, the journal: Applied Nanoscience 2024
4. Natia Jalagonia, Tinatin Kuchukhidze, Nino Darakhvelidze, Tamar Archuadze, Ia Kurashvili, Sopia Mikaberidze, Leila Kalatozishvili, „Study of Electrical Properties of RGO/PDMS Nanocomposites“, the journal: Advanced Topics In Polymer Chemistry And Materials Science.