

სუბმიკსაქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ზაქარია ტალიაშვილი

არატრადიციული ენერგეტიკული ხელსაწყოების საბაზო
ნახევარგამტარული ნანოსტრუქტურების ტექნოლოგიის დამუშავება და
თვისებების კვლევა.

სადოქტორო პროგრამა „საინჟინრო ფიზიკა“

შიფრი 0719

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი, 0175

2022 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი დავით ჯიშიაშვილი;

თანახელმძღვანელი: პროფესორი ავთანდილ თავხელიძე.

რეცენზენტები: პროფესორი ლევან ჩხარტიშვილი

აკადემიური დოქტორი რევაზ მელქაძე

დაცვა შედგება 2022 წლის "-----" -----, ----- საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და
საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს სხდომაზე,
კორპუსი -----, აუდიტორია -----

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

თემის აქტუალურობა. მსოფლიოში განვითარებულმა წლევანდელმა სამომარმა მოქმედებებმა სრულიად აშკარად დაგვანახა რომ იმ ქვეყნების კეთილდღეობას, რომელთაც წიაღისეული საწვავი არ გააჩნიათ, უმთავრესად განაპირობებს მათი ენერგოდამოუკიდებლობა. პრობლემის გადაჭრის ერთ-ერთ მთავარ გზას სწორედ არატრადიციული ენერგეტიკის, კერძოდ კი მზის ენერგეტიკის სწრაფი და ეფექტური განვითარება წარმოადგენს. ზენიტში მყოფ მზეს, კარგ ამინდში ჩვენს განედზე თითქმის 1 კვტ/მ² ეკოლოგიურად სუფთა ენერგია მოაქვს საათში. მზის გამოსხივების ელექტრულ ენერგიად გარდამქმნელი ხელსაწყოები (მზის პანელები) მუდმივად უმჯობესდება, რაზეც მიუთითებს ფასის ყოველწლიური შემცირება (დღეს 1კვტ-ის ფასი 0.16-0.25 დოლარია). ასეთი ხელსაწყოების გაუმჯობესება მოითხოვს, მარგი ქმედების კოეფიციენტის, რადიაციული დანაკარგების, დროში სტაბილურობის და სხვა არასასურველი ეფექტების მინიმიზაციას.

შოკლი-ქუეიზერის მიერ ჯერ კიდევ 1961 წელს გათვლილი სილიციუმის ერთ p-n გადასასვლელიანი მზის ელემენტის მაქსიმალური თეორიული ეფექტურობა 30%-ს შეადგენს და ამ სიდიდეს დღემდე ვერ მიუახლოვდა კომერციული მზის პანელების პარამეტრები, რომელთა მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მქკ) საშუალოდ 20%-ს შეადგენს. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ჯერაც არსებობს კარგი პერსპექტივები, რათა ახალი ტექნოლოგიური, საინჟინრო თუ მასალათმცოდნეობითი მიდგომებით მოვახდინოთ მზის გამოსხივების ელექტრულ ენერგიად გარდამქმნელი ხელსაწყოების სრულყოფა და მათი მქკ-ს შემდგომი გაზრდა. სწორედ ასეთი ახალი საინჟინრო-ტექნოლოგიური მეთოდებია შემუშავებული და შესწავლილი წარმოდგენილ ნაშრომში. აღსანიშნავია, რომ კომერციული მზის პანელების გარანტიით დაცული მუშაობის ხანგრძლივობა დღეს 25 წლით განისაზღვრება. აქედან გამომდინარე, პანელის მქკ-ს თუნდაც 0.1 %-ით გაზრდა გრძელვადიან პერსპექტივაში უკვე საკმაოდ დიდ ენერგეტიკულ მოგებას იძლევა.

სილიციუმის მზის გარდამქმნელების საწარმოო რაოდენობით დამზადების საქმეში უკვე კარგადაა დამკვიდრებული ე.წ. საბაზო ტექნოლოგიები, ანუ იმ სტანდარტულ ტექნოლოგიათა თანამიმდევრობა და მონაცვლეობა, რომელთა მეშვეობითაც ხდება საბოლოო პროდუქტის მიღება. ასეთ საბაზო ტექნოლოგიებს მიეკუთვნება მაგალითად დაჟანგვა, ფოტოლითოგრაფია, დიფუზია, საკონტაქტო ბილიკების დაფენა, დაჭრა და სხვ. ეს ოპერაციები წარმოადგენენ მიკროელექტრონიკაში კარგად აპრობირებულ და დახვეწილ თანამედროვე ტექნოლოგიურ მეთოდებს. საბაზო ტექნოლოგიის მოდიფიცირებამ და მასში ზედაპირის მიკროსტრუქტურირების მეთოდის შეტანამ საშუალება მისცა მზის პანელების უმსხვილეს მწარმოებელ ფირმა „Suntech“-ს 22%-დე გაეზარდა მქვ, რამაც ის ლიდერად აქცია ბაზარზე. რაც შეეხება ახალი და კიდევ უფრო პროგრესული ნანოტექნოლოგიური მიდგომების საბაზო ტექნოლოგიებში გამოყენებას – ეს საკითხი ჯერ კიდევ განვითარების საწყის ეტაპზეა, თუმცა უდავოა, რომ მათი მეშვეობით შესაძლებელია მზის პანელების პარამეტრების მნიშვნელოვანი შემდგომი გაუმჯობესება.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე ცხადი ხდება, რომ წარმოდგენილი ნაშრომის თემატიკა საკმაოდ აქტუალურია და პასუხობს იმ თანამედროვე გამოწვევებს, რომლებიც არსებობს როგორც არატრადიციული, კერძოდ მზის ენერგეტიკის ათვისებისა და გამოყენების მიმართულებით, ისე ახალი ნანოტექნოლოგიური მეთოდების შემუშავების საქმეში.

მეცნიერული სიახლე.

წარმოდგენილი ნაშრომის ერთ-ერთ სიახლეს შეადგენს მზის გარდამქმნელების დამზადების საბაზო ტექნოლოგიაში ნანოტექნოლოგიური მიდგომების ფართო გამოყენება და ნანოსტრუქტურირების ახალი ტექნოლოგიური მეთოდების შემუშავება, იქნება ეს ნახევარგამტარის ზედაპირზე ნანომეტრების ზომის პერიოდული და არაპერიოდული, აგრეთვე ხაზოვანი, ბადისებრი და წერტილოვანი ტოპოლოგიური სურათის შექმნა.

კიდევ ერთ სიახლეს შეადგენს ზედაპირის ნანოსტრუქტურირების და მისი ელექტრული, მაგნიტური და ოპტიკური პარამეტრების მოდიფიცირების მიზნით, ერთსხვიანი ულტრაისფერი ლაზერული ინტერფერენციული ლითოგრაფიის პროცესის შემუშავება.

კრისტალური Si-ს საფუძველზე ახალი მეთოდით, კერძოდ ზედაპირის წინასწარი ნანოსტრუქტურირებით, დამზადდა ეფექტური მზის გამოსხივების ელექტრულ ენერგიად გარდამქმნელი, რომლის პარამეტრები აღემატება იგივე ტექნოლოგიით, მაგრამ ნანოსტრუქტურირების გარეშე დამზადებული გარდამქმნელის მახასიათებლებს.

სიახლეს წარმოადგენს აგრეთვე ის, რომ გიგანტური მაგნიტოწინააღმდეგობის მაღალი მნიშვნელობა, რომელიც ადრე დაიმზირებოდა მხოლოდ გარკვეული შედგენილობის მოცულობით მასალებში ან კონკრეტულ ნაწილობრივ მასალებში, ჩვენს მიერ მიღწეული იქნა Si-ს ზედაპირზე, მისი ნანოსტრუქტურირების გზით.

სამუშაოს მიზანს შეადგენდა:

კრისტალური სილიციუმის და დიელექტრიკზე დაფენილი სილიციუმის (Silicon-on-Insulator, SOI) ნახევარგამტარული ფირფიტების ზედაპირების ნანოსტრუქტურირების ისეთი ტექნოლოგიების შემუშავება, რომელიც ინტეგრირებული იქნება მზის გარდამქმნელის დამზადების საბაზო ტექნოლოგიაში. აქცენტი გაკეთდა ულტრაისფერი ლაზერული ინტერფერენციისა და ვერცხლის ნანონაწილაკებით სტიმულირებული ქიმიური ამოჭმის (Ag-MacEtch) მეთოდების შემუშავებასა და მათ პრაქტიკულ გამოყენებაზე;

ნანოსტრუქტურირების მეთოდის გამოყენებით, გაუმჯობესებული პარამეტრების მქონე ზედაპირების და არამეტალურგიული ე.წ. ფიზიკური p-n გადასასვლელების მიღება და კვლევა (ე.წ. G-ლეგირების ტექნოლოგიის შემუშავება);

მიღებული ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირებისა და მათ საფუძველზე დამზადებული მზის გარდამქმნელების ფიზიკური

(ელექტრული, მაგნიტური და ოპტიკური) პარამეტრებისა და მახასიათებლების კვლევა. აგრეთვე, ნანოსტრუქტურირების ტექნოლოგიითა და ამ ტექნოლოგიის გარეშე დამზადებული მზის ელემენტების მახასიათებლების შესწავლა და მათი ურთიერთშედარება. ზედაპირის ნანოსტრუქტურირებით გამოწვეული პოზიტიური ეფექტების გამოვლენა და მათი პრაქტიკული გამოყენების შესაძლებლობების შეფასება.

კვლევის ობიექტები და მეთოდები.

ნაშრომში ჩატარებული კვლევებისთვის გამოყენებული იყო შემდეგი აღიარებული კომპანიების ნახევარგამტარული ფუძეშრები (SOI და კრისტალური Si-ს ფირფიტები): Soitec, Ultrasil, University Wafer. კრისტალური Si-ს შემთხვევაში გამოყენებული იყო n- და p- ტიპის ფირფიტები. SOI ფირფიტები წარმოადგენდნენ ბორით ლეგირებულ p- ტიპის ნიმუშებს Si-ს ფენის განსხვავებული ხვედრითი წინაღობითა (5000–1 ომიხმ) და სისქით ($5 \cdot 10^2$ – $3 \cdot 10^3$ ნმ).

ფირფიტების ზედაპირის ხაოიანობისა და SOI ნიმუშების სამუშაო ფენის სისქის შესამცირებლად ვიყენებდით დაჟანგვისა და ქიმიური ამოჭმის მეთოდებს. ე.წ. მშრალი დაჟანგვა ხდებოდა შესაბამისად 1270 და 1320 K ტემპერატურაზე “Zhengzhou Kejia Furnace Co. Ltd” კომპანიის PID კონტროლერით აღჭურვილ KJ-T1200 ლუმელში. ამავე დანადგარზე ბოროსილიკატური და ფოსფოროსილიკატური მინებიდან ვახდენდით ბორისა და ფოსფორის დიფუზიას ნიმუშებში.

სილიციუმის ზედაპირის სხვადასხვა სახით ნანოსტრუქტურირებისთვის ავაწყეთ ლაზერული ინტერფერენციული ლითოგრაფიის დანადგარი 375 ნმ ტალღის სიგრძის მქონე DL375-010-SO ულტრაიისფერი ლაზერის საფუძველზე. ინტერფერენციული ლითოგრაფიის პროცესში ფოტორეზისტის სახით ვიყენებდით როგორც ნეგატიურ ma-N 2401, ისე პოზიტიურ AZ5214E ფოტორეზისტებს. ფოტორეზისტის გამჟღავნების პროცესი ხორციელდებოდა შესაბამის ხსნარებში.

არაპერიოდულად ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირების შესაქმნელად ძირითადად ვიყენებდით MacEtch ტექნოლოგიის ერთ-ერთ ნაირსახეობას, ვერცხლის ნანონაწილაკებით ინიცირებულ ქიმიური ამოჭმის ტექნოლოგიას (Ag-MacEtch).

ბადისებრი და წერტილოვანი გამოსახულების მისაღებად ფოტორეზისტიან ფირფიტას ვასხივებდით ორჯერ ურთიერთპერპენდიკულარული მიმართულებით, რის შემდეგ ტარდებოდა ფოტორეზისტის სტანდარტული გამჟღავნების ოპერაცია.

ნიმუშის n^+ და p^+ უბანზე კონტაქტების მისაღებად ვიყენებდით შესაბამისად მაგნეტრონული გაფრქვევით მიღებულ Ti/Ag - ისა და თერმული აორთქლებით დაფენილ Al-ის ფირებს.

ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირების ელექტრული, მაგნიტური და თერმული პარამეტრების გასაზომად შემუშავდა სპეციალური ზომებისა და კონფიგურაციის მქონე საკონტაქტო არეების შექმნის ტექნოლოგია, რომლის დეტალები ნაშრომის ძირითადი ტექსტის მესამე თავშია აღწერილი.

ფირფიტების სამუშაო ზედაპირების ექსპრეს-კონტროლისთვის (მიკრონების რიგის ხაოიანობის შესაფასებლად) ვიყენებდით ამერიკული ფირმის “LKA-Tencor Corporation” Alfa Step-200 პროფილომეტრს, ხოლო ნანომეტრების რიგის ხაოიანობის ანალიზი ხორციელდებოდა ატომურ ძალური (Bruker Dimension Icon) და რასტრული (Tescan, Vega-3 XMU, LaB₆ – ის კათოდი) მიკროსკოპებით.

წინააღმდეგობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებას ვზომავდით ფირმა „QuantumDesign“ ფიზიკური პარამეტრების გამზომ სისტემაზე როგორც ნანოზოლების გასწვრივ ($R=$), ისე მათ პერპენდიკულარულად ($R+$). ანალიზი ჩატარდა 4-300 K ტემპერატურულ დიაპაზონში. მაგნიტოწინააღმდეგობა შევისწავლეთ ფირმა Oxford Instruments-ის 9 Tesla ინდუქციის მქონე მაგნიტით აღჭურვილ კრიოგენულ სისტემაში. მაგნიტის კვება ხდებოდა IPS120-10 Oxford კვების წყაროთი. გაზომვებისას ჯერ ვაფიქსირებდით 4, 10

და 60 K ტემპერატურაზე ვოლტ-ამპერულ მახასიათებლებს მუდმივი დენის მეთოდით, შემდეგ ოთხზონდიანი მეთოდით ვზომავდით ხვედრით წინალობას (ρ), ჰოლის კოეფიციენტს (R_H) და მაგნიტოწინალობას (R_m). დაბალტემპერატურული მაგნიტოტრანსპორტული ექსპერიმენტებისთვის ვიყენებდით ცვლადი დენის მეთოდს - Stanford Research SR830 DSP - ის ორფაზა სინქრონულ გამამძლიერებელს.

ნანოზოლოვანი ზედაპირების ოპტიკური თვისებების, აგრეთვე ჩვენს მიერ დამზადებული მზის ელემენტების კვანტურ ეფექტურობისა და სპექტრალური გამომახილის შესასწავლად, გამოყენებული იყო ფირმა ReRa Solutions-ის მზის ელემენტის პარამეტრების გამზომი დანადგარი.

ნიმუშების ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები გადავიღეთ გიგაომის რიგის შესავალი წინალობის მქონე Keysight 34410 მულტიმეტრისა და დენის წყარო E3640-ის მეშვეობით. ექსპერიმენტების მართვისა და მონაცემების მიღება-დამუშავებისთვის ვიყენებდით LabVIEW -ს თვითნაკეთ დრაივერს. გაზომვებს ვატარებდით როგორც ორ, ისე ვან დერ პაუს ოთხზონდიანი მეთოდით ნანოზოლების გასწვრივ ($R=$) და მათ პერპენდიკულარულად ($R+$).

მუხტის მატარებლების ტიპს ვამოწმებდით თერმოელექტრული და ჰოლის გაზომვებით. თერმოელექტრული გაზომვებისას Ti/Ag - ის ერთ-ერთ კონტაქტს ვაცხელებდით თერმოზონდის საშუალებით, ხოლო გენერირებული ძაბვის პოლარობას ვაფიქსირებდით გიგაომის რიგის შესავალი წინალობის მქონე მულტიმეტრით.

კვლევის ძირითადი შედეგები და შედეგების გამოყენების სფერო.

1. შემუშავებულია ერთსხივიანი ულტრაიისფერი ლაზერული ინტერფერენციული ლითოგრაფიის და მისი გამოყენებით პერიოდული (წერტილოვანი, ზოლოვანი და ბადისებრი) ნანოსტრუქტურების მიღების ტექნოლოგიები. Si-ს ზედაპირზე ნანოსტრუქტურირების შედეგად პარამეტრების ცვლა

შესაძლებელია შემდეგ დიაპაზონში: თანაბარი ნანოსტრუქტურირების მაქსიმალური ფართობი 4 მმ²; სიღრმე 20-50 ნმ; პერიოდი 0,3-5,0 მკმ.

2. ნანოსტრუქტურირების ტექნოლოგია თავსებადია მზის ელემენტების დამზადების საბაზო ტექნოლოგიასთან და ადვილად ინტეგრირდება მასში;
3. დამუშავებულია ვერცხლის ნანონაწილაკებით სტიმულირებული (Ag-MacEtch) და აირადი ქიმიური ამოჭმის გამოყენებით, Si-ის ფირფიტების ზედაპირის არაპერიოდული ნანოსტრუქტურირების ტექნოლოგია. ამ მეთოდით მიღებულია ერთეული ნანომეტრების და მიკრონების ზომის არაპერიოდული ნანოსტრუქტურები, ასევე ათეული მიკრონის სიგრძის ძაფები;
4. პერიოდული და არაპერიოდული ნანოსტრუქტურირების მეთოდების გამოყენებით დამუშავებულია კომპლექსური ნანოსტრუქტურირების ტექნოლოგია. მისი გამოყენებით მოვახდინეთ წერტილოვანი, მესრული და ბადისებრი პერიოდული სტრუქტურის ზოლებისა და უჯრედების შიდა უბნების არაპერიოდული სტრუქტურირება;
5. p ტიპის SOI და Si-ის ფირფიტის ზედაპირის 30 ნმ სიღრმისა და 0,3 მკმ პერიოდის მქონე ნანოსტრუქტურების შექმნით ხორციელდება გამტარებლობის ტიპის ცვლილება. ნანოზოლოვან უბანში ზოლების პერპენდიკულარულად ხვედრითი წინაღობის 1 რიგით, ხოლო პარალელურად 2-3 რიგით შემცირება;
6. SOI ფირფიტებზე დამზადებულ ნანოზოლოვან სტრუქტურებში, კრიოგაზომვებისას დაფიქსირებულია გიგანტური უარყოფითი მაგნიტოწინაღობა;
7. 400-1000ნმ ტალღის სიგრძის დიაპაზონში, ნანოსტრუქტურირებული სამუშაო ზედაპირის მქონე მზის ელემენტების სამუშაო ზედაპირის კვანტური ეფექტურობა და

სპექტრალური გამოძახილი 2-ჯერ მეტია არასტრუქტურირებული ზედაპირის მქონე მზის ელემენტების სამუშაო ზედაპირთან შედარებით;

ჩვენს მიერ მიღებული შედეგები პრაქტიკულად შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას:

1. ნანოსტრუქტურირების გზით ჰეტეროსტრუქტურული მზის ელემენტების ზედაპირის ლევირებისთვის (ე.წ. G ლევირების მეთოდი);
2. მუხტის მატარებელთა ტრანსპორტირების ეფექტურობის გაზრდისათვის, რის მიზნისაც წარმოადგენს ნანოსტრუქტურირების შედეგად წინაღობის შემცირების ეფექტი;
3. შემუშავებული პერიოდული, არაპერიოდული და კომპლექსური ნანოსტრუქტურირების ტექნოლოგიის გამოყენებით შესაძლებელია დამზადდეს ნანომატრიცები და ნანომავთულები, აგრეთვე შემცირდეს ზედაპირების ხაოიანობა;
4. ნანოსტრუქტურირების მეთოდი ზრდის მზის ელემენტების სამუშაო ზედაპირის კვანტურ ეფექტურობასა და სპექტრალურ გამოძახილს, და შესაბამისად ამაღლებს მზის ელემენტების ეფექტურობას.

დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა.

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, ოთხი თავის, დასკვნის, ციტირებული ლიტერატურისა და ნაშრომის თემატიკით გამოქვეყნებული სამუშაოთა სიისგან. დისერტაცია შეიცავს 130 გვერდს, 119 დასახელების ბიბლიოგრაფიას, 66 ნახაზსა და 9 ცხრილს.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები.

შესავალი

შესავალში განხილულია სადისერტაციო ნაშრომის აქტუალობა, კერძოდ კი მზის ელემენტების განვითარების თანამედროვე პერსპექტივები, აქ არსებული პრობლემები და მათი გავლენა თანამედროვე ენერგეტიკული პრობლემების გადაჭრის საქმეში. მოკლედაა განხილული ის პოზიტიური სიახლეები, რომლებიც მოაქვს ნანოტექნოლოგიის გამოყენებას არატრადიციული ენერგეტიკის ხელსაწყოების ეფექტურობის ამაღლებისა და განვითარების მიმართულებით.

მეორე თავი - ლიტერატურული მიმოხილვა შედგება შვიდი ქვეთავისგან, მასში წარმოდგენილია:

ამ თავში უპირველესად განხილულია მასალის ზედაპირზე სუბმიკრონული პერიოდის მქონე ნანოზოლოგანი სისტემების ფუნქციონირების თეორიული საფუძვლები. აღნიშნულია რომ ნანოზოლოგების არსებობის შედეგად მცირდება კვანტურ მდგომარეობათა სიმკვრივე. ამის შედეგად მდგომარეობათა ინტეგრალური სიმკვრივე ზონაში შესაძლებელია 4,1-ჯერ შემცირდეს, რაც მნიშვნელოვნად ცვლის ნიმუშის ნანოზოლოგიური ფენის თვისებებს. ეს ეფექტი განსაკუთრებით საგრძნობია, როცა ნანოზოლოგების ზომები დე ბროილის ტალღის რიგისა ხდება. აღნიშნული ეფექტი იწვევს ნანოსტრუქტურირებული ფენის გამტარებლობის ცვლილებას, რასაც G ლევირებასაც უწოდებენ.

ძირითადი აქცენტი ლიტერატურულ მიმოხილვაში გაკეთებულია იმ მონაცემებზე, რომლებიც არსებობს Si-ს ზედაპირზე შექმნილ ნანოზოლოგან სისტემებზე, და რომლებიც წარმოადგენს 1D ნანომაფებისგან შექმნილ პერიოდულ 2D სიბრტყეს. მათი პერიოდი გაცილებით მეტია მესრის პარამეტრზე. როგორც თეორიულმა ანალიზმა აჩვენა, ზედაპირზე ნანოზოლოგების არსებობის შედეგად კვანტურ მდგომარეობათა სიმკვრივე მცირდება როგორც სავალენტო ისე გამტარებლობის ზონაში და ეფექტი

განსაკუთრებით საგრძნობია 8-10 ნმ რიგის ნანოწარმონაქმნების არსებობისას, რაც Si-ში დე ბროილის ტალღის სიგრძეს ეთანადება. ამას ადასტურებს ფაქტების მთელი რიგი: მეტალებსა და ნახევარგამტარებში ნანოწარმონაქმნების არსებობისას გამოსვლის მუშაობის (W_F) შემცირება; p ტიპის Si-ის ხვედრითი წინაღობის შემცირება; გამტარებლობის ტიპის ცვლილება და სხვ.

ამავე თავშია განხილული ზედაპირული ნანოსტრუქტურირების ნაირსახეობები: პერიოდული, არაპერიოდული და კომპლექსური ნანოსტრუქტურირება, რომელთა განვითარება განაპირობა ამ მეთოდებით მიღებული სტრუქტურების განსხვავებულმა ფიზიკო-ქიმიურმა თვისებებმა. მოყვანილია ლაზერული ინტენფერენციული ლითოგრაფიის მეთოდის საფუძვლები და პერიოდული ნანოსტრუქტურების მიღების მეთოდიკა.

გარდა აღნიშნულისა, მიმოხილულია არაპერიოდული ნანოსტრუქტურირების მეთოდი სადაც აქცენტი გაკეთებულია მეტალის ნანონაწილაკებით სტიმულირებულ ქიმიურ ამოჭმაზე. განხილულია კომპლექსური ნანოსტრუქტურირების არსი, მოცემულია ამ მეთოდების პრაქტიკული გამოყენების მაგალითები და პერსპექტივები. ყურადღება გამახვილებულია იმ ტექნოლოგიურ პრობლემებზე, რომლებიც წარმოიქმნება ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირების დამზადებისას.

ერთ-ერთი ქვეთავი ეთმობა მზის ელემენტების აწმყოსა და მომავალს, სადაც განხილულია დღესდღეობით მზის ელემენტების წარმოებაში არსებული პრობლემები, გამოწვევები, მათი გადაჭრის ის სავარაუდო გზები, სადაც ნანოსტრუქტურირების გამოყენებაა შესაძლებელი, აგრეთვე მზის ელემენტების განვითარების პერსპექტივები. თავის ბოლოს დასკვნების სახითაა მოყვანილი ის საკითხები, რომელთა გადაწყვეტა საშუალებას მოგვცემს მიკრო და ნანოტექნოლოგიების ერთიანობით გადაწყდეს სხვადასხვა ნანოხელსაწყობის დასამზადებლად საბაზო ტექნოლოგიის შექმნისა და მათ პრაქტიკული გამოყენების საკითხები.

მესამე თავი ეძღვნება კვლევის ობიექტებს და მეთოდოლოგიას. ის შედგება ათი ქვეთავისგან, რომელთა შინაარსი ქვემოთ მოკლედაა წარმოდგენილი.

პირველში ქვეთავში დეტალურადაა აღწერილი გამოყენებული ფირფიტების სპეციფიკაცია. მოცემულია ნანოსტრუქტურირებისთვის გამოყენებული SOI და მოცულობითი Si - ის ფირფიტების გამტარებლობის, ტიპი, ხვედრითი წინაღობა, მალეგირებელი ელემენტი, მატარებელთა კონცენტრაცია და სხვ.

მომდევნო თავებში განხილულია ნანოსტრუქტურირებისათვის ნიმუშების მომზადების მეთოდიკა. Si - ის ფირფიტის დიფუზიისა და დაჟანგვის პროცესების ჩასატარებლად გამოყენებული დიფუზიური ლუმელის პრინციპული სქემა და ამ პროცესების ჩატარების ტექნოლოგიური პარამეტრები.

აღწერილია პერიოდულად ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირების დასამზადებლად შექმნილი ულტრაიისფერი ლაზერული ინტერფერენციული ლითოგრაფიის დანადგარი, აგრეთვე ფოტორეზისტების მახასიათებლები. დეტალურადაა განხილული ზოლოვანი, ბადისებრი და წერტილოვანი გამოსახულების მისაღებად გამოყენებული ლაზერული ინტერფერენციული ლითოგრაფიის ტექნოლოგიური პროცესი, Si-ის სამუშაო ზედაპირზე ფოტორეზისტით მიღებული გამოსახულების გადასატანად გამოყენებული რეაქტიულ იონურ ამოჭმის პრინციპი და მოცემულია ამ პროცესების ჩატარების ტექნოლოგიური პარამეტრები.

მომდევნო თავში წარმოდგენილია არაპერიოდულად ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირების მისაღებად გამოყენებული ვერცხლის ნანონაწილაკებით ინიცირებული ქიმიური (Ag-MacEtch) და HF + I - ის სპირტიან წყალხსნარში აირადი ამოჭმის ტექნოლოგია, მოცემულია ამ პროცესების ჩატარების ტექნოლოგიური პარამეტრები, აღწერილია

კომპლექსურად ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირების დასამზადებლად გამოყენებული ტექნოლოგიურ პროცესთა მიმდევრობა.

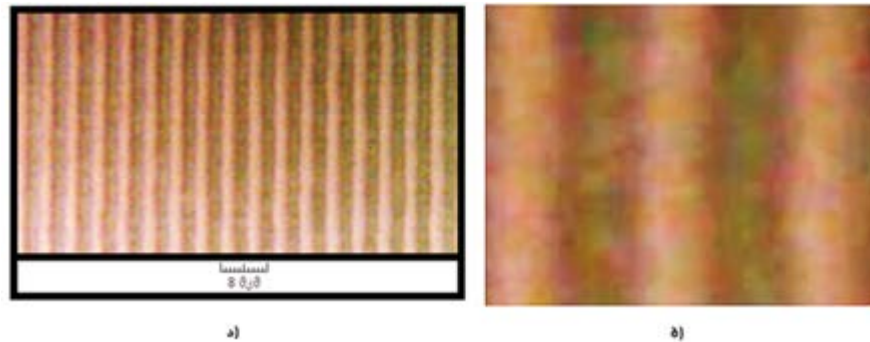
ნიმუშების მეტალიზაციისა და ზედაპირზე კონტაქტების მისაღებად გამოყენებული იყო მუდმივი დენზე მაგნეტრონული გაფრქვევისა და თერმული აორთქლების ვაკუუმური დანადგარები, რომელთა მუშაობის პრინციპი და პროცესთა თანამიმდევრობა დეტალურადაა განხილული.

ნანოზოლოვანი ზედაპირის მქონე მზის ელემენტის დამზადების ტექნოლოგია, ასეთი ზედაპირების ელექტრული, ტემპერატურული და მაგნიტური თვისებების კვლევის მეთოდები აღწერილია მეშვიდე-მეცხრე ქვეთავებში. აქვეა განხილული მაგნიტოტრანსპორტული გაზომვებისთვის დამზადებული გამზომი უჯრედის სქემა და ნანოზოლოვანი ფირების მაგნიტური თვისებების კვლევის მეთოდიკა.

ბოლო, მეათე თავში მოყვანილია გაზომვებისთვის განკუთვნილი დანადგარები და მეთოდოლოგიები. აქ აღწერილია ფირფიტების სამუშაო ზედაპირების ექსპრეს-კონტროლისთვის გამოყენებული ამერიკული ფირმის “LKA-Tencor Corporation” Alfa Step-200 პროფილომეტრის მუშაობის პრინციპი, აღწერილია ზედაპირული ფირების მორფოლოგიის და ზომების შესაფასებლად გამოყენებული ატომურ-ძალური მიკროსკოპი (Bruker Dimension Icon) და რასტრული მიკროსკოპი “Tescan, Vega-3 XMU”, წინააღმდეგობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებას დასაფიქსირებლად გამოყენებული „Quantum Design“ ფირმის ფიზიკური პარამეტრების გამზომი სისტემა (PPMS), ჩვენს მიერ დამზადებული მზის ელემენტის კვანთურ ეფექტურობისა და სპექტრალური გამომახილის გასაზომად გამოყენებული ReRa Solutions ფირმის დანადგარის მუშაობის პრინციპული სქემა და მახასიათებლები.

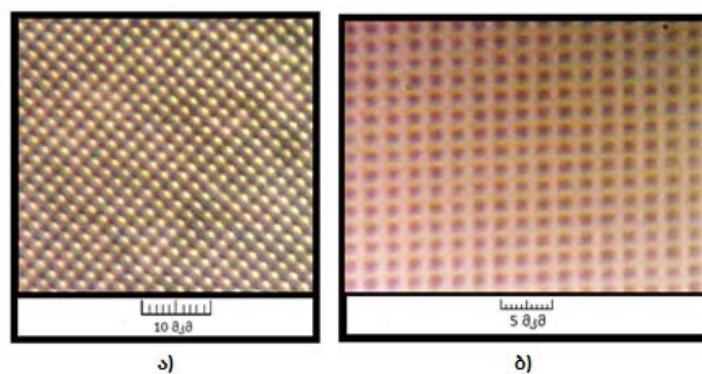
მეოთხე თავში წარმოდგენილია ჩატარებული კვლევები, მიღებული შედეგები და მათი განსჯა.

ფოტორეზისტის ქვეშ Si-ს ზედაპირის რეაქტიული იონური ამოჭმისა შემდეგ მიღებული 5 მკმ პერიოდიანი ზოლოვანი სტრუქტურის ოპტიკური ციფრული მიკროსკოპით გადაღებული გამოსახულება მოყვანილია ნახ. 1-ზე. იგივე მიკროსკოპით არის გადაღებული 2 მკმ-დე პერიოდის მქონე ნანოწერტილოვანი ზედაპირი (ნახ.2 ა) და ნანობადე (ნახ.2 ბ), რომლის შიდა უბნების ხაზოვანი ზომები დაახლოებით 0,7-0,8 მკმ-ა.



ნახ.1 ციფრული მიკროსკოპით გადაღებული: ა) 5 მკმ პერიოდიანი ნანოზოლოვანი სტრუქტურა; ბ) ნანოზოლოვანი სტრუქტურის გადიდებული მონაკვეთი.

როგორც ნახაზებიდან ჩანს, ზოლებისა და წერტილების პერიოდულობა კარგადაა შენარჩუნებული ნიმუშის ზედაპირზე და ზომების აშკარა განსხვავებებს ადგილი არა აქვს.

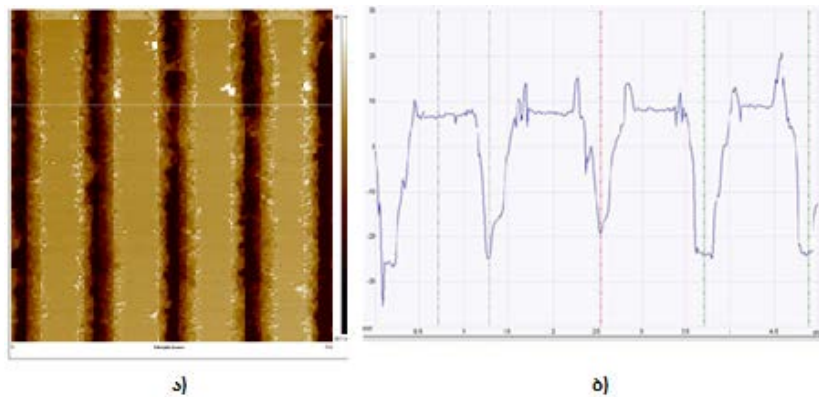


ნახ.2. ციფრული მიკროსკოპით გადაღებული დაახლოებით 2 მკმ პერიოდიანი ნანოწერტილოვანი ზედაპირი (ა) და იგივე პერიოდის მქონე ნანობადე (ბ).

დამუშავებული ტექნოლოგია ადვილად გადავიტანეთ უფრო მცირე, 1 მკმ-ს რიგის პერიოდის მქონე ზედაპირების დასამზადებლად, რომელთა

პერიოდის ზომების კონტროლმაც უკვე ატომურ-ძალური და რასტრული მიკროსკოპის გამოყენება მოითხოვდა.

ნახ.3 ა- ზე მოყვანილია 5 x 5 მკმ ფართობზე, ატომურ ძალური მიკროსკოპით გადაღებული 1,2 მკმ პერიოდისა და 30 ნმ სიღრმის ნანოზოლოგანი სტრუქტურა და მის განივკვეთზე გადაღებული სიღრმეების პროფილი

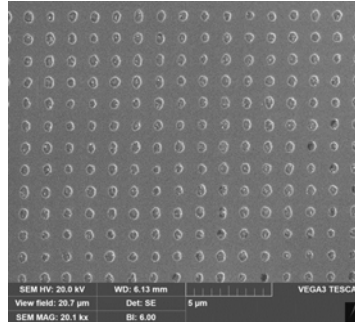


ნახ.3. 5 მკმ x 5 მკმ ფართობზე ატომურ-ძალური მიკროსკოპით მიღებული 1,2 მკმ პერიოდის და 30 ნმ სიღრმის ნანოზოლოგანი სტრუქტურის ზედახედი (ა); ჭრილზე გადაღებული სიღრმეების პროფილი (ბ).

ნახ.3 ბ-ზე მწვანე და წითელი ვერტიკალური ხაზები აღნიშნავენ ზოლებს შორის ღრმულების შესაბამის ადგილებს. ერთმანეთისგან მათი საკმაოდ თანაბარი დაშორება აშკარად მიუთითებს, რომ შემუშავებული ერთსხივიანი ულტრაიისფერი ლაზერული ინტერფერენციული ლითოგრაფიის მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია დამზადდეს საკმაოდ პრეციზიული ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირები. რაც შეეხება თვითონ ღრმულის კიდევს, ისინი საკმაოდ რელიეფურები არიან, რის მიზეზსაც წარმოადგენს ლითოგრაფიის, ქიმიური ამოჭმის და ზედაპირის გასუფთავების ოპერაციების ჩატარება არა ქარხნულ ზესუთა გარემოში (სადაც ლამინარული დინებები გამოიყენება და 1 მ³ აირში 7–12 ცალი 0.3 მიკრონზე ნაკლები ზომის ნაწილაკია), არამედ ლაბორატორიულ, შედარებით „არასუფთა“ გარემოში.

ნახ.4-ზე ნაჩვენებია რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპით გადაღებული 2,26 მკმ პერიოდის მქონე ნანოწერტილოვანი სტრუქტურა.

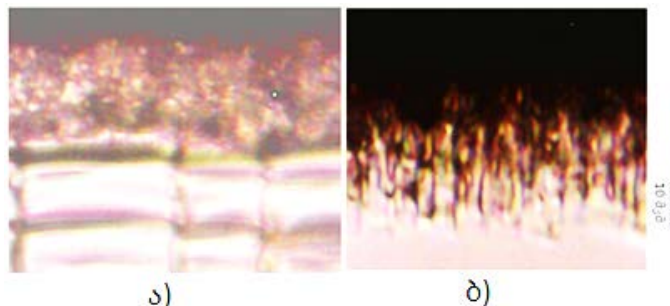
ნახ.3 –ის მსგავსად, ამ სურათზეც აშკარად ჩანს როგორც პერიოდულობის კარგი შენარჩუნება წერტილიდან წერტილზე გადასვლისას, ისე ფორმების კარგი აღწარმოებადობა.



ნახ.4. Si-ის ზედაპირზე მიღებული 2,26 მკმ - იანი პერიოდის ნანოწერტილოვანი სტრუქტურა. ზედაპირი გადაღებულია რასტრული მიკროსკოპით. კათოდი –LaB₆.

არაპერიოდულად ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირების მისაღებად ძირითადად ვიყენებით MacEtch ტექნოლოგიის ერთ-ერთ ნაირსახეობას, ვერცხლის ნანონაწილაკებით ინიცირებულ ქიმიური ამოჭმის ტექნოლოგიას (Ag-MacEtch), რომლის დროსაც: 1)AgNO₃+HF ხსნარში Si-ზე ეფინება ვერცხლის ნანონაწილაკები; 2)HF+H₂O₂ ხსნარში ხდება Si-ამოჭმა მხოლოდ ვერცხლის ნანონაწილაკების ქვეშ, ბოლო ეტაპზე ვაცილებით Ag-ს.

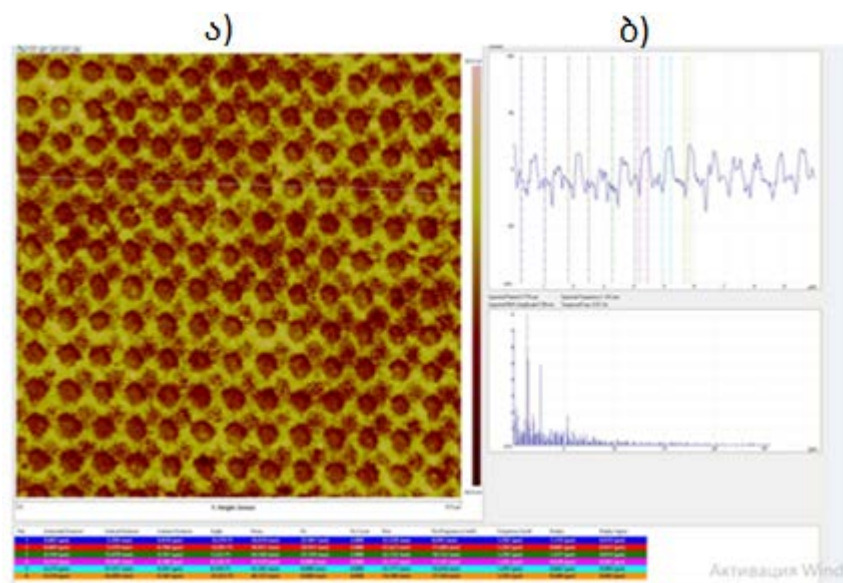
ნახ.5ა – ზე მოყვანილია 1-2 წთ-მდე ნანოსტრუქტურირებისას მიღებული ფოროვანი Si.



ნახ. 5. ოპტიკური მიკროსკოპით გადაღებული Ag-ის ნანონაწილაკებით ამოჭმული ფოროვანი Si-ს ტეხის სურათი (ა) და ღრმა ამოჭმით მიღებული Si-ს არაპერიოდულად გაზრდილი ნანომავთულები(ბ).

ნანოსტრუქტურირების პროცესის გაგრძელებისას (10-12 წთ) Si-ს ზედაპირზე წარმოიქმნება ვერტიკალური მავთულები. ნახ.5 ბ–ზე ნაჩვენებია აღნიშნული მეთოდით წარმოქმნილი არაპერიოდულად განლაგებული Si-ს მავთულების გვერდხედი. მათი დიამეტრი მერყეობს 1.0–1.2 მკმ–ს დიაპაზონში, ხოლო სიგრძე 10 მკმ–ს ფარგლებში.

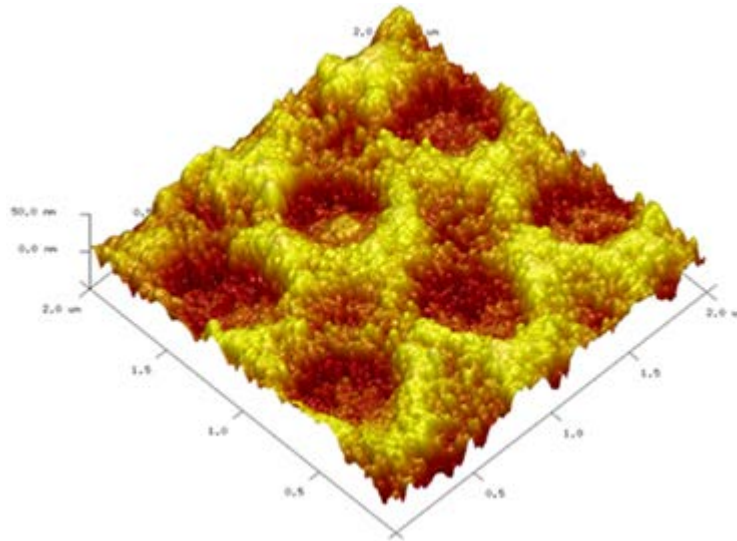
გარდა ამისა, სამუშაოს შესრულებისას დავამზადეთ კომპლექსურად ნანოსტრუქტურირებული Si-ის ზედაპირები (ნახ.6). მზის ელემენტებში გამოყენებისას კომპლექსურად ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირის უპირატესობა მდგომარეობს იმაში, რომ წერტილოვანი უბნები უზრუნველყოფენ როგორც ხილული, ისე მაღალენერგეტიკული (ულტარიისფერი უბნის) ფოტონების ეფექტურ შთანთქმას, ხოლო მათ შორის არსებული პერიოდული ბადის ბილიკები განაპირობებენ ფოტონებით წარმოქმნილი დენის მატარებლების უდანაკარგო გადატანას კონტაქტებამდე.



ნახ.6. 10x10 მკმ ფართზე კომპლექსური ნანოსტრუქტურირებით მიღებული დაახლოებით 0,5-0,7 მკმ პერიოდის და 50 ნმ სიღრმის მქონე ნანოწერტილოვანი უბნის ზედახედი(ა) და პროფილი (ბ).

ნახ.7 – ზე გამოსახულია კომპლექსურად ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირის ატომურ-ძალური მიკროსკოპით 2x2 მკმ ფართზე გადაღებული

სურათი. ნაჩვენებია ამ ფართზე სიმაღლეთა განაწილება. როგორც ნახაზიდან ჩანს, წერტილები საშუალოდ 50 ნმ-ზე არიან ჩაღრმავებულნი.



ნახ.7. 2x2 მკმ ფართის მქონე კომპლექსურად ნანოსტრუქტურირებული ზედაპირის ატომურ-ძალური მიკროსკოპით გადაღებული სურათი.

ნანოზოლოგანი ფირების ელექტრული და ტემპერატურული თვისებები. აღნიშნული კვლევების ჩასატარებლად ვიყენებდით SOI ფირფიტებიდან გამოჭრილ ნიმუშებს რომელთა ზედაპირზეც ერთნაირი ტექნოლოგიების გამოყენებით ვქმნიდით როგორც არასტრუქტურირებულ, ისე 0,3 მკმ პერიოდის მქონე ნანოზოლოგან სტრუქტურირებულ უბნებს. შესწავლილი იყო როგორც ელექტრული, ისე ტემპერატურული პარამეტრები 4-300 K დიაპაზონში.

ერთნაირი პარამეტრების მქონე ნიმუშების შესარჩევად ვიყენებდით ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების გაზომვას ოთხ - (R4w) ზონდიანი მეთოდით. მიღებულ შედეგებს ვადარებდით არასტრუქტურირებული უბნების ვოლტ-ამპერულ მახასიათებლებს და ფირფიტების საპასპორტო მონაცემებს.

ნანოსტრუქტურირების შემდეგად ყველა ნიმუშზე ხვედრითი წინაღობა ორი რიგით შემცირდა, ნიმუშების უმეტესობისათვის წინაღობის ანიზოტროპია $R=R_+/R_+$, 0,8 - 1,0 დიაპაზონშია და შესაბამისად ზოლების გასწვრივ წინაღობა ყოველთვის ნაკლებია, ვიდრე მათ

პერპენდიკულარულად, რაც G ლეგირების ეფექტურობაზე მეტყველებს [1; 2].

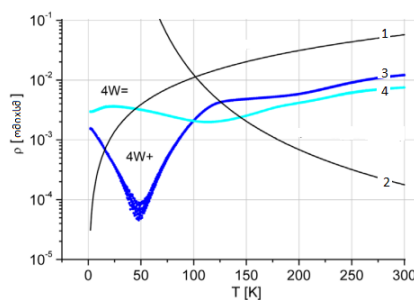
დონორებით და G - ლეგირებით მიღებული SOI - ნიმუშებისთვის ხვედრითი წინაღობის $[\rho_D(T); \rho_G(T)]$ ტემპერატურაზე დამოკიდებულება თეორიულად აღიწერება შემდეგი ფორმულებით:

$$\rho_D(T) \sim T^{-2.25} \exp[(E_C - E_D)/2K_B T] \quad (1)$$

$$\rho_G(T) \sim T^{3/2} \quad (2)$$

(1) და (2) ფორმულები დატანილი ნახ.8 -ზე. აქვეა ნაჩვენები ოთხზონდიანი (4w) მეთოდით, ზოლების გასწვრივ (=) და მათ პერპენდიკულარულად (+) გაზომილი წინაღობის ტემპერატურული დამოკიდებულების ექსპერიმენტალური გრაფიკები.

100 K - ს ზევით, ოთხზონდიანი გაზომვები გარკვეული მიახლოებით აღიწერება $T^{3/2}$ კანონით. ნაკლებ ტემპერატურაზე $\rho_=(T)$ და $\rho_+(T)$ დამოკიდებულების შესაბამისობა $T^{3/2}$ ხარისხობრივ ფუნქციასთან ირღვევა. 4w+ გაზომვისას 50 K-ზე დაიმზირება ღრმა ჩავარდნა, ასეთივე ჩავარდნა დაფიქსირდა სხვა ნიმუშებზეც და მისი ახსნა ქვემოთ იქნება მოყვანილი.

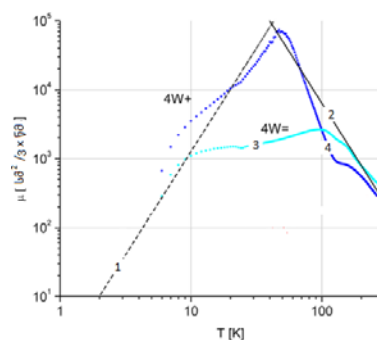


ნახ.8. 1 მრუდი შეესაბამება G ხოლო 2 დონორული ლეგირების თეორიას; მრუდი 3 შეესაბამება ოთხზონდიანი (4w) მეთოდით შეფასებულ ხვედრით წინაღობას ზოლების გასწვრივ (4w=) ხოლო 4 პერპენდიკულარულად (4w+).

ცალკე ექსპერიმენტებში შევისწავლეთ ნიმუშებში ძვრადობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება, რომელიც ნახევარგამტარებში მნიშვნელოვნადაა განპირობებული დენის მატარებლების გაბნევის მექანიზმით. ერთეულ K-ზე, როდესაც ატომები თითქმის უძრავია და ფონონური მექანიზმი არ მუშაობს, გაბნევა იონიზირებულ მინარევებზე

ხდება. ამ დროს ტემპერატურის მომატება იწვევს დენის მატარებლების სიჩქარის ზრდას, ეს ამცირებს იონისა და ელექტრონის ურთიერთქმედების დროს და ურთიერთგავლენას. ამის შედეგად ძვრადობა (μ) იზრდება ტემპერატურის ხარისხობრივი $T^{3/2}$ ფუნქციის პროპორციულად. მაღალ ტემპერატურებზე „ირთვება“ და თანდათან მატულობს ფონონებზე გაბნევის მექანიზმი, რაც იწვევს ძვრადობის შემცირებას $T^{-3/2}$ ფუნქციის პროპორციულად.

ნახ.9 – ზე წყვეტილი (1) და უწყვეტი სწორი (2) ხაზებით ნაჩვენებია მოცემული საპასპორტო პარამეტრების მქონე ნიმუშისთვის გაბნევის ამ ორი მექანიზმის შესაბამისი თეორიული გრაფიკები. ამავე ნახაზზეა ნაჩვენები ჩვენი ნიმუშების ძვრადობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, გაზომილი ოთხზონდიანი მეთოდით ნანოზოლების პერპენდიკულარულად (მრუდი 3; $4w+$) და პარალელურად (მრუდი 4; $4w=$). ნახაზიდან ჩანს, რომ 50 K-ზე ძვრადობა აღწევს მაქსიმუმს როგორც თეორიულ, ისე $4w+$ გაზომვის გრაფიკზე. შესაბამისად რადგან განმარტების თანახმად ხვედრითი წინალობა ძვრადობის უკუპროპორციულია, მისი გაზრდა 50 K -ზე აუცილებლად გამოიწვევს წინალობის შემცირებას და ნახ. 9-ზე დამზერილ „ჩავარდნას“ იგივე ტემპერატურაზე.



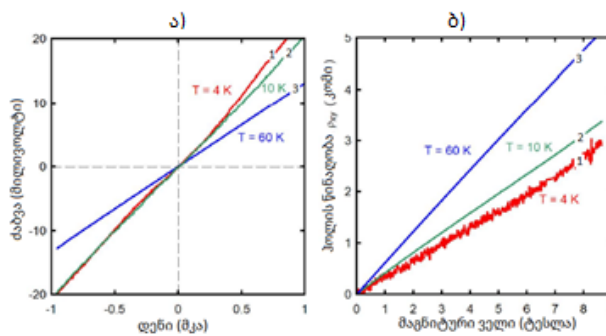
ნახ.9. 1-ერთეულ K-ზე დენის მატარებლების გაბნევის თეორიული მრუდი; 2-ფონონებზე გაბნევის თეორიული მრუდი; 3-ელექტრონების ძვრადობა (μ_{e-}) ნანოზოლების გასწვრივ ($4w=$); 4-ელექტრონების ძვრადობა (μ_{e+}) ნანოზოლების პერპენდიკულარულად ($4w+$). ჰოლის კოეფიციენტის მნიშვნელობაა $r_H= 1,18$.

ამრიგად, მიღებული შედეგების საფუძველზე შეგვიძლია ჩამოვყალიბოთ შემდეგი დასკვნები: გაზომილი ნანოზოლოვანი ნიმუშების

უმეტესობისათვის წინააღმდეგობის ანიზოტროპია R_x/R_y იცვლება 0,8–1,0 დიაპაზონში; წინააღმდეგობა ზოლების პერპენდიკულარულად ერთი რიგით ნაკლებია საწყის ნიმუშთან შედარებით, რაც შესაძლებელია განპირობებული იყოს ზოლების გასწვრივ შექმნილი ნანომავთულების (NW) არსებობით; წინააღმდეგობა ზოლების პარალელურად ორი რიგით ნაკლებია საწყისთან შედარებით, რაც შესაძლებელია აიხსნას კვანტური ინტერფერენციით გამოწვეული არსებული გამტარებლობის გაძლიერებით.

ნანოზოლოგანი ფირების მაგნიტური თვისებები. აღნიშნული კვლევების ჩასატარებლად SOI ფირფიტებიდან გამოჭრილ ნიმუშების ზედაპირზე ერთნაირი ტექნოლოგიების გამოყენებით ვქმნიდით როგორც არასტრუქტურირებულ, ისე 0,2 მკმ პერიოდის მქონე ნანოზოლოგანი სტრუქტურირებულ უბნებს. შესწავლილი იყო როგორც ელექტრული, ისე ტემპერატურული პარამეტრები 4–300 K დიაპაზონში.

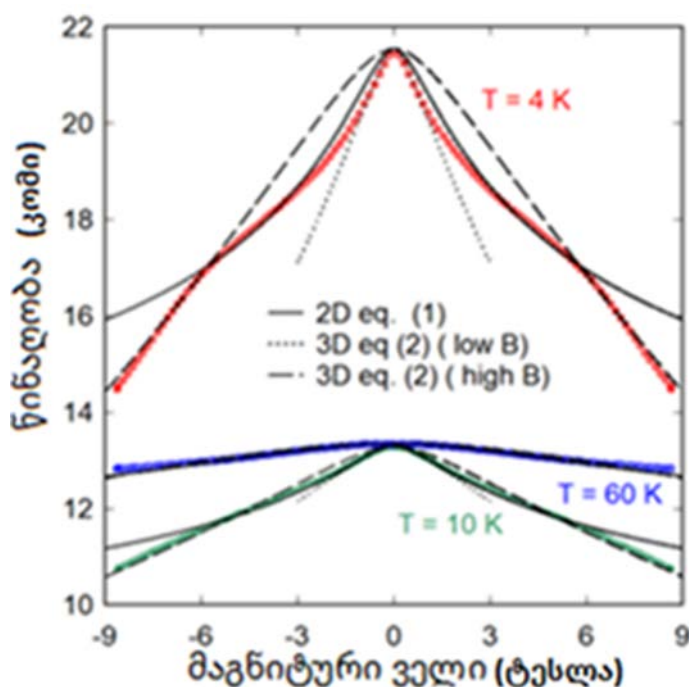
ნახ.10 - ზე ნაჩვენებია ნიმუშების ტიპური ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები და ჰოლის წინააღმდეგობის მაგნიტურ ველზე დამოკიდებულება გადაღებული 4 (მრუდი 1), 10 (მრუდი 2) და 60 K (მრუდი 3) ტემპერატურაზე. როგორც ვხედავთ, ± 1 მკა დენების შუალედში I-V მახასიათებლები წრფივია, და შემდგომი გაზომვებისას დენის მნიშვნელობას ამ დიაპაზონში ვინარჩუნებთ.



ნახ.10. ა) 4, 10 და 60 K ტემპერატურაზე გადაღებული ნანოზოლოგანი ზედაპირის მქონე ნიმუშის: ა) ოთხზონდიანი მეთოდით I-V გაზომვის შედეგები; ბ) ჰოლის წინააღმდეგობის $R_{xy}(B)$ გაზომვის შედეგები.

გაზომვის შედეგების მიხედვით ნანოზოლოგანი ზედაპირი n-ტიპისაა და ჰოლის წინაღობა წრფივია 4, 10 და 60 K ტემპერატურებზე მაგნიტური ველის მთელ დიაპაზონში, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ გვაქვს ერთი ტიპის ძირითადი მატარებლები - ელექტრონები.

ნახ.11 - ზე ნაჩვენებია 4, 10 და 60 K-ზე მაგნიტოწინაღობის გაზომვის შედეგი. აქვე მოყვანილია ჰიკამის - 2D და კავაბატას - 3D თეორიული მოდელების შესაბამისი მრუდები. შავი წერტილოვანი (3D; სუსტი მაგნიტური ველებისას), წყვეტილი (3D; ძლიერი მაგნიტური ველებისას) და უწყვეტი (2D). მაგნიტოწინაღობის ნაზრდი 4 K-ზე 10%-ის რიგისაა, რასაც გიგანტურ მაგნიტოწინაღობის კლასიფიკაცია ენიჭება.



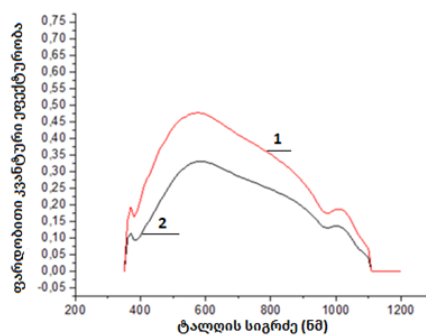
ნახ.11. ნიმუშის მაგნიტოწინაღობა ნანოზოლოგების პერპენდიკულარულად გამავალი დენებისთვის. 1-4 K-ზე; 2- 60 K-ზე; 3- 10 K-ზე.

კვლევის მოცემულ ეტაპზე ჩვენი ნიმუშებისთვის 2D და 3D ვარიანტს შორის ცალსახა არჩევანის გაკეთება შეუძლებელია. ექსპერიმენტალური მონაცემების გადახრა თეორიული მონაცემებიდან შესაძლოა განპირობებული იყოს ჩვენი ნანოზოლოგანი სისტემის მეტი სირთულით თეორიულ მოდელებთან შედარებით.

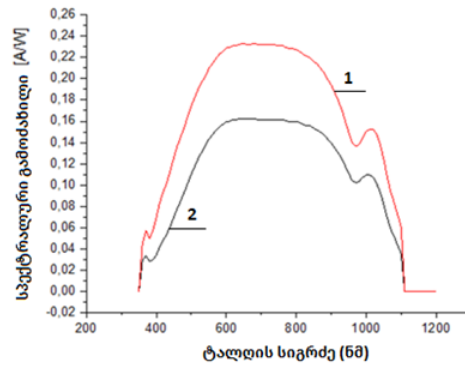
აღვნიშნავთ, რომ გიგანტური მაგნიტოწინალობის ეფექტი დამზერილი იყო სხვა ნანოზომის მასალებშიც, მაგალითად Bi - ის ნანომავრთულებში და კობალტ-ფერიტ-პოლიანილინის ნანოკომპოზიტებში. თითქმის იგივე რიგის მაგნიტოწინალობის მნიშვნელობა მიღწეული იქნა ჩვენს მიერ Si - ის ზედაპირის ნანოსტრუქტურირების საშუალებით, რაც სიახლეს წარმოადგენს. რაც შეეხება მაგნიტოწინალობის მნიშვნელობის თეორიული მოდელის შექმნას და ჩვენს მიერ დამზერილ შეუსაბამობას (განსაკუთრებით მაღალი მაგნიტური ველის ინდუქციის შემთხვევისთვის) ეს საკითხი ჯერაც თეორეტიკოსების აქტიური კვლევის ობიექტებს წარმოადგენენ.

სადისერტაციო ნაშრომის შესრულებისას შევადარეთ p ტიპის Si -ის ნიმუშზე, ერთ ტექნოლოგიურ ციკლში დამზადებული, ნანოსტრუქტურირებული და არასტრუქტურირებული სამუშაო ზედაპირის მქონე მზის ელემენტის კვანტური ეფექტურობა (კვანტური გამოსავალი) და სპექტრალური გამომახილი [5].

ნახ.12 - ზე და ნახ.13 –ზე მოყვანილია ნანოზოლოვანი (მრუდი 1) და არასტრუქტურირებული (მრუდი 2) სამუშაო ზედაპირის მქონე მზის ელემენტების კვანტური ეფექტურობისა და სპექტრალური გამომახილის გრაფიკები.



ნახ.12. ნანოსტრუქტურირებული (1) და არასტრუქტურირებული (2) სამუშაო ზედაპირის მქონე მზის ელემენტის კვანტური ეფექტურობა.



ნახ.13. ნანოსტრუქტურირებული (1) და არასტრუქტურირებული (2) ზედაპირის მქონე მზის ელემენტის სპექტრალური გამომდახილი.

როგორც ნახაზებიდან ჩანს, ნანოსტრუქტურირებული სამუშაო ზედაპირის მქონე მზის ელემენტების კვანტური ეფექტურობა და სპექტრალური გამომდახილი დაახლოებით 2-ჯერ მეტია არასტრუქტურირებული სამუშაო ზედაპირის მქონე მზის ელემენტების კვანტურ ეფექტურობაზე და სპექტრალურ გამომდახილზე. ასეთი შედეგი ნანოსტრუქტურირებული მასალის მზის ელემენტებში გამოყენებისა და დღეს არსებულ მათ საბაზო ტექნოლოგიაში ჩვენს მიერ შემუშავებული მეთოდის ინტეგრირების კარგ პერსპექტივებს სახავს.

დასკვნები:

1. შემუშავებულია ერთსხვიანი ულტრაიისფერი ლაზერული ინტერფერენციული ლითოგრაფიის და მისი გამოყენებით სუბმიკრონული პერიოდის მქონე (წერტილოვანი, ზოლოვანი და ბადისებრი) ნანოსტრუქტურების მიღების ტექნოლოგიები. Si-ს ზედაპირის ნანოსტრუქტურირების შედეგად თანაბარი ნანოსტრუქტურირების მაქსიმალური ფართობი 4 მმ²; ნანოსტრუქტურირების პარამეტრების ცვლა შესაძლებელია შემდეგ დიაპაზონში: სიღრმე 20-50 ნმ; პერიოდი 0,3-5,0 მკმ.

2. ნანოსტრუქტურირების ტექნოლოგია ადვილად ინტეგრირდება დღეს არსებულ მზის ელემენტების დამზადების საბაზო ტექნოლოგიასთან;

3. შემუშავებულია ვერცხლის ნანონაწილაკებით სტიმულირებული (Ag-MacEtch) და აირადი ქიმიური ამოჭმის გამოყენებით, Si-ის ფირფიტების ზედაპირის არაპერიოდული ნანოსტრუქტურირების ტექნოლოგია,

რომელთა გამოყენებით მიღებულია როგორც ერთეული ნანომეტრების და მიკრონების ზომის არაპერიოდული ნანოსტრუქტურები, ასევე ათეული მიკრონის სიგრძის ძაფები;

4. პერიოდული და არაპერიოდული ნანოსტრუქტურირების მეთოდების გამოყენებით დამუშავებულია კომპლექსური ნანოსტრუქტურირების ტექნოლოგია. მისი გამოყენებით მოვახდინეთ წერტილოვანი, მესრული და ბადისებრი პერიოდული სტრუქტურის ზოლებისა და უჯრედების შიდა უბნების არაპერიოდული სტრუქტურირება;

5. p ტიპის SOI და Si-ის ფირფიტის ზედაპირის 30 ნმ სიღრმისა და 0,3 მკმ პერიოდის მქონე ნანოსტრუქტურებში ხდება გამტარებლობის ტიპის ცვლილება (G-ლეგირება).

6. ნანოზოლოვან უბანში ზოლების პერპენდიკულარულად წინაღობის 1 რიგით, ხოლო პარალელურად 2-3 რიგით მცირდება;

7. SOI ფირფიტებზე დამზადებულ ნანოზოლოვან სტრუქტურებში, კრიოგაზომეზებისას დაფიქსირებულია გიგანტური უარყოფითი მაგნიტოწინაღობა;

8. 400-1000ნმ ტალღის სიგრძის დიაპაზონში, ნანოსტრუქტურირებული სამუშაო ზედაპირის მქონე მზის ელემენტების სამუშაო ზედაპირის კვანტური ეფექტურობა და სპექტრალური გამომახილი 2-ჯერ მეტია არასტრუქტურირებული ზედაპირის მქონე მზის ელემენტების სამუშაო ზედაპირთან შედარებით;

9. მიღებული შედეგების საფუძველზე საქპატენტში წარდგენილ იქნა განაცხადი გამოგონებაზე: ტალიაშვილი ზ., თავხელიძე ა. ნახევარგამტარის სინათლის შთანთქმელი ნანოსტრუქტურული ზედაპირი. გაიარა არსობრივი ექსპერტიზა და მიღებულია დადებითი დოკუმენტური დასკვნა.

ნაშრომის აპრობაცია

სტატიები

1. Tavkhelidze A., Jangidze L., Mebonia M., Piotrowski K., Wieckowski J., Taliashvili Z., Skhiladze G., and Nadaraia L. Geometry-induced quantum effects in periodic nanostructures. *Phys. Status Solidi A*, 2017, 214, p.6;
2. Tavkhelidze A., Grabecki G., Jangidze L., Yahniuk I., Taliashvili Z. and Taliashvili B. Negative magnetoresistance in Si nanograting layers. *Physica Status Solidi A*. 2019,216,11.
3. Samoila C., Ursutiu D., Tavkhelidze A., Jangidze L., Taliashvili Z., Skhiladze G. and Tiorean M. Nanograting layers of Si. *Nanotechnology* 2020, 31, 3, pp-7.
4. ტალიაშვილი ზ. ნახევარგამტარების ზედაპირების პერიოდული, არაპერიოდული და კომპლექსური ნანოსტრუქტურირება. სტუ-ს თემატური სამეცნიერო შრომების კრებული "მართვის ავტომატიზებული სისტემები" ; 2022; 1(33); 2.
5. გამოგონება: ტალიაშვილი ზ., თავხელიძე ა. ნახევარგამტარის სინათლის შთანთქმელი ნანოსტრუქტურული ზედაპირი. საქართველო. No. 3796/1. 2021-07-08. Appl. No.: AP 2021 15678.03-07-2021.

გაიარა არსობრივი ექსპერტიზა, მიღებულია დადებითი დოკუმენტური დასკვნა 2021-10-28.

კონფერენციები

6. Tavkhelidze A., Jangidze L., Taliashvili Z. And Gorji N. E. G-Doping-Based Metal-Semiconductor Junction. *Coatings* 2021, 11, 945. 5.
7. Taliashvili Z., Bibilashvili A., Tavkhelidze A., Lusakowska E., Jangidze L., Sikharulidze S., Skhiladze G., Chubinidze Z. Prospects for using nanograting and nanostructured surfaces in photovoltaics. *Georgian Technical University. 5th International Conference "Nanotechnologies" 2018, 19-22 November, Tbilisi. Georgia. Nano-18. p.174.*

Abstract

The dissertation presents technological methods for obtaining quantum systems on the surface of SOI and Si semiconductor wafers, based on nanometer topology. The issues of their integration into the basic technologies for manufacturing solar cells are discussed. The parameters of the obtained nanostructured surfaces are studied and the prospects for creating the working surface of a solar cell on their basis are estimated.

SOI and Si wafers with different parameters were used for the experiments. To reveal the effects caused by nanostructuring, we prepared two chips with nanostructured and unstructured working surfaces on the sample. During the measurement, the parameters of chips with a nanostructured surface and unstructured working surfaces were compared.

Below is a brief description of the content of the work and its main results.:

- A single-beam ultraviolet laser interference lithography (UV LIL) was assembled. Using the above device, the technology of forming nanostructures with submicron period on the surface of SOI and Si samples has been developed.
- To prepare the samples necessary for studying the electrical, magnetic and optical properties of the nanostrip surface, technological routes were developed and photomasks were made in accordance with a given sequence of processes;
- We have integrated nanostructuring technologies along with other widely used processes in microelectronics into the developed technological routes;
- Samples with a nanostrip working surface were fabricated using these technologies and their electrical, magnetic and optical properties were studied;
- A technology has been developed for non-periodic, periodic and complex nanostructuring of the surface of silicon wafers by ultraviolet laser interference lithography, chemical/electrochemical methods. The morphology of such surfaces was studied using optical, atomic force (AFM), and scanning (SEM) microscopes;
- The electrical, magnetic, and optical properties of samples with nanostrips obtained on the surface of SOI and Si samples are studied.

The main technological achievements of this work are:

- Striped, dotted and mesh nanostructures were fabricated with ultraviolet laser interference lithography method on the surface of SOI and silicon wafers;
- The range of possible variations in the geometrical parameters of the section obtained by periodic nanostructuring of standard SOI and Si wafers on a UV laser interference lithography unit was determined;
- Solid stamps were made using NIL-printing technology for the purpose of obtaining the images of the same size on the surface of the sample and increase the area of nanostructured areas;
- A technology has been developed for formation of nonperiodic nanostructures on the surface of silicon wafers using methods stimulated by metal nanoparticles (MACE) and gas chemical/electrochemical methods. The etching rates of the surface of silicon wafers and the resistance of the photoresist using these methods are determined;
- Using complex nanostructures, we performed non-periodic Nano structuring of the inner regions of the mesh cells obtained by periodic structuring.

By studying the morphology of nanostructured surfaces obtained using optical, atomic force (AFM) and raster (SEM) microscopes, we installed: the dimensions of the dotted, striped, and mesh structures at the edges of the nanostructured site vary. Within strips, the planned width of the strip varies from sample to sample.

Within the stripe area, the ratio between the width of the convex and concave stripes also changes. Initial roughness is superimposed on the surface of periodically and no periodically nanostructured samples.

After studying the electrical, magnetic and optical properties of nano-striped surfaces, we identified:

- The type of conduction of the nanostrip structure changes, the resistance of the strip area obtained on the surface of type p SOI and Si plate decreases both parallel to and perpendicular to the strip, it is anisotropic in nature and is always less along the strip;
- In strip structures, on p-type SOI plates, during low-temperature measurements of the Hall coefficient, giant negative magnetic resistance was found;
- In the 400–1000 nm wavelength range, the quantum efficiency and spectral response of solar cells with a striped surface is higher than that of solar cells with an unstructured surface.

At the end of the dissertation, detailed results of the study and generalized conclusions, references and publications over the past three years are given.