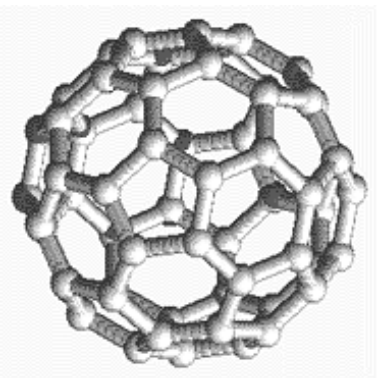


სერგო დადუნაშვილი

ნანოტექნოლოგიების ფუნდამენტი



თბილისი
2002

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სერგო დადუნაშვილი

ნანოტექნოლოგიების ფუნდამენტი

ლაბტკიკეპულია სტუ-ს
სამეცნიერო-ტექნიკური
საბჭოს მიერ

თბილისი
2002

**სერგო დადუნაშვილი
ნანოტექნოლოგიების შესავალი. - თბილისი, “ტექნიკური
უნივერსიტეტი”, 2002. - 105 გვ.**

განხილულია ნანოტექნოლოგიების პრინციპები და მეთოდები, რომლებიც გამოიყენება სხვადასხვა ახალი მასალების და ნაკეთობების შექმნის დროს.

წიგნი დანიშნულია საგნის პირველადი გაცნობისათვის და ამის გამყოფი ძირითადი ყურადღება გამახვილებულია ინფორმაციის ხელმისაწვდომ და თვალსაჩინო მიწოდებაზე.

წიგნში გათვალისწინებულია ისიც, რომ ფართო მკითხველისათვის არ იქნებოდა გამართლებული ბევრი საკითხის ისე გაშუქება, რომელიც მოთხოვს ფორმულების, გარდაქმნების და გათვლების მოყვანას. ამიტომ ისინი მინიმუმადეა დაყვანილი.

ასეთმა მიდგომამ საშუალება მისცა ავტორს მკითხველურებაში გაეშუქებინა ახალი პრობლემებიცა ინფორმაციის, ელექტრონიკის, ბიოტექნოლოგიების, მასალათმცოდნეობის და რობოტოტექნიკის დარგებში.

ნაშრომს გააჩნია ერთი სპეციფიკური თვისება: თითქმის ყველა მისი პარაგრაფი ერთდროულად დასრულებულია და ამასთან ერთად დაკავშირებული მთელი წიგნის შინაარსთან.

წიგნი დანიშნულია სტუდენტებისათვის და ასპირანტებისათვის. ამასთან ერთად სასარგებლო იქნება ფართო პროფილის სპეციალისტებისათვის.

რეცენზენტები:

ვლადიმერ ჭავჭავანიძე - ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის აკადემიკოსი.

რაფიელ ჩიქოვანი - ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი.

ISBN 99928-901-5-0

©“Technical University”, 2002

შესავალი.....5.

1. რა არის ნანოტექნოლოგია?..... 8.

1.1. წარმოქმნის ისტორია.....8.

1.2. ნანოელემენტები..... 9.

1.2.1. ნანოკლასტერები.....9.

1.2.2. ნანომილაკები.....13.

1.3. ასემბლერი (რეპლიკატორი).....15.

2. ნანოწარმოების ხერხები.....18.

2.1. გვირაბისებრი მიკროსკოპი.....18.

2.2. ატომურ-ძალური მიკროსკოპი.....31.

2.3. ნანოსტენდი.....39.

3. ნანოტექნოლოგიები საინფორმაციო

სისტემებში.....44.

3.1. არსებული ტექნოლოგიების შეზღუდვები.....44.

3.2. ნანოელექტრონიკა.....46.

3.2.1. პოტენციალური ორმო.....48.

3.2.2. გვირაბისებრი გადსვლა.....51.

3.2.3. ერთელექტრონიანი გვირაბისებრი გადსვლა.....53.

3.3. კვანტური წერტილები.....59.

3.3.1. ელექტრონების რეზონანსური გვირაბებავლა.....61.

4. ნანობიოტექნოლოგია.....	65.
4.1. ბიოობიექტების სინთეზი და აკრება.....	66.
4.2. ბიოლოგიური მაკროგრაშირებელი.....	68.
4.3. ბიომინერალისაცია.....	69.
5. მოლექულარული ნანოტექნოლოგია.....	73.
5.1. ერთუჯრედიანი ორგანიზმი.....	73.
5.2. მოლექულარული ავტომატები.....	80.
6. მასალათმცოდნეობა და ნანოტექნოლოგიები..	93.
7. ნანოტექნოლოგიის პერსპექტივები.....	100.
დასკვნები.....	104.
დანართი 1. ცხრილი.....	108.
დანართი 2. ტერმინები	109.
ბიბლიოგრაფია.....	111.

შესავალი

დღეისათვის მხელი წარმოსადგენია საწარმოო ძალებისა და საწარმოო ურთიერთობების განვითარება ნანოტექნოლოგიების ათვისების, მრავალფუნქციური “ინტელექტუალური მასალების“ და შესაბამისი პროცესებისა თუ მოწყობილობების გამოყენების გარეშე.

ქვეყნები, რომლებიც თანამედროვე პირობებში ფაქტობრიად განსაზღვრავენ სამეცნიერო-ტექნიკურ პროგრესს, ნანოტექნოლოგიების მიმართ იყენებენ ტერმინს “კრიტიკული ტექნოლოგიები“, რითაც შესაბამის კვლევებს და დამუშავებებს პრიორიტეტულ, ეროვნულ სტატუსს ანიჭებენ .

საწარმოო ინდუსტრია გაღადის რესურსების ჰერმანენტული მოხმარების ტექნოლოგიებიდან ინტელექტუალურად გაჯერებულ ტექნოლოგიებზე. ეს გადასვლა გულისხმობს აქცენტის გადატანას ნაკეთობების რაოდენობიდან, მათ ხარისხზე, ერთჯერადი პროდუქტების მასიური წარმოებიდან მრავალჯერადი გამოყენების ნაკეთობების დამზადებაზე, რომლებიც მიეწოდებიან პირველი მოთხოვნისთანავე.

ასეთ პირობებში გამომჟღავნებული ერთდროული გადასვლა მდგრად განვითარებასა და “ინტელექტუალურ“ საზოგადოებრივ ურთიერთობებზე, მოითხოვს ახალი პარადიგმების ჩამოყალიბებას “ინტელექტუალური წარმოების“ გაგებისათვის და ახალ კონცეფციებს “პროდუქტ-მომსახურების“ მოთხოვნების აღწერისათვის.

საქმე იმაშია, რომ ახალ “პროდუქტ-მომსახურებებს” აქვთ გაფართოებადი ფუნქციური შესაძლებლობები, მეტიც, ბევრ შემთხვევაში ისინი წარმოადგენენ არა “შეხებად” ნაწარმს, არამედ “არაშეხებად” პროდუქტებს, პროცესებს და მომსახურებებს.

ეს ცვლილებები დაკავშირებულია რადიკალურ ძვრებთან ინდუსტრიულ სტრუქტურებში, რომლებიც გამოიხატება ინოვაციური საწარმოების წინა პლანზე წამოწევაში. ასეთ საწარმოებს აქვთ ახალი “მაღალი” ტექნოლოგიების დაუფლების და დაკავშირების უნარი. იგი გამოიხატება საინჟინრო ხელოვნების, ნანოტექნოლოგიების, მასალათ-მკვლევების, საინფორმაციო ტექნოლოგიების, ბიოტექნოლოგიის და ეკოლოგიის დაახლოებაში.

ამგვარად, ასეთი საწარმოები შეიცავენ გარემოს მიმართ უფრო “შეგობრულ” პოლიტიკებს.

ინდუსტრიული განვითარების წინა პლანზე ყოფნა იწვევს აგრეთვე ფართო სინერგიას ტექნოლოგიებსა და ორგანიზაციული საქმიანობას შორის, რომლის შინაარსი მილიანად დამოკიდებული ხდება ახალ ჩვევებზე. ინდუსტრიული სტრუქტურის ასეთი ევოლუცია განსაზღვრავს ღრმა თანამშრომლობას, ტრადიციული სამეცნიერო დისციპლინათშორისი ზღვრების მოუხედავად.

ნანოტექნოლოგიები და ნანომასალები განმსაზღვრელ როლს ასრულებენ ახალი საწარმოო სტრუქტურების განვითარებაში. მათი ფუნქციაა სიახლეების გამტარება, რითაც სტიმულაციას უკეთებენ წარმოებას.

კლასიკური პრინციპების ინტეგრაცია ნანოდონზე განსაზღვრავს სხვადასხვა ფუნქციური დანამშნულების მინიატურული სისტემების შექმნას, როგორცაა: მიკროსენსორები და აქტიუატორები, მიკრომექანიზმები და მიკროძრავები, გენერატორები და ტურბინები; მიკროანალიზურ ხელსაწყოები; ქიმიურ მიკროეაქტორები; მიკროინსტრუმენტები და ზემინიატურულ რობოტები.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ნანოტექნოლოგიები მიეკუთვნება მცირედანახარჯებთან ტექნოლოგიებს, რომლებშიც ნედლეული იხარჯება მინიმალურად, მიღებული ნაკეთობების ექსპლუატაცია კი გრძელდება ბევრად უფრო დიდი პერიოდით, ჩვეულებრივ ნაკეთობებთან შედარებით.

ეს ახალი მოვლენა მოითხოვს კვლევითი აქტივობის აქცენტის შეცვლას როგორც აკადემიურ, ისე უმაღლეს სასწავლო დაწესებულებებში. ხანგრძლივ შედეგებს იძლევა სტრატეგიული გამოკვლევები, რომელთა შედეგად მიიღება ისეთი სიახლეები, რომლებიც არა მარტო ზრდიან, არამედ უზრუნველყოფენ ნახტომს ეკონომიკაში.

წინამდებარე წიგნის მიზანია, გააცნოს მოქმედ და მომავალ საეციალისტებს ნანოტექნოლოგიების ზოგადი პრობლემატიკა და განვითარების მიმართულებები, რაც დაეხმარება მათ საქმიანობაში, პრიორიტეტების სწორ შერჩევაში, საერთაშორისო თანამშრომლობის რეალიზაციაში.

წიგნში განხილული თემების შესაბამისი ძირითადი ლიტერატურის ნუსხა მოცემულია ბიბლიოგრაფიაში, რომელიც შეიცავს 41 დასახელებას.

1. რა არის ნანოტექნოლოგია?

ნანოტექნოლოგია ისეთი ტექნოლოგიაა, სადაც ხდება იმ ობიექტებით ოპერირება, რომელთა სიდიდის რიგი ნანომეტრების ფარგლებშია. ეს იმდენად მცირე სიდიდეებია, რომ შეესაბამება ატომების ზომებს და 100-ჯერ უფრო ნაკლებია, ვიდრე ხილული სინათლის ტალღის სიგრძე. ამის გამო „მიკროდან“ „ნანოზე“ გადასვლა არის არა რაოდენობრივი, არამედ თვისობრივი გადასვლა, რის შედეგადაც კეთდება ნახტომი ნივთიერებით მანიპულირებიდან ცალკეული ატომებით მანიპულირებამდე.

1.1. წარმოქმნის ისტორია.

ნანოტექნოლოგია გასსაზღვრავს მასალების და სტრუქტურების წარმოებას 100 ნმ-მდე მასშტაბებში. ეს, დღეისათვის, ყველაზე პრესაქტუოული ტექნიკის დარგი აერთიანებს ორი ცნობილი მეცნიერის იდეებს: რიჩარდ ფეინმანის, რომელიც ჯერ კიდევ 1959 წელს აღნიშნავდა, რომ ადამიანი ისწავლის ცალკეული ატომებით ისე მანიპულირებას, როგორც ჭანჭიკებითა და ქანჩებით, და – ჯონ ფონ ნეიბანის, რომელიც მე-20 საუკუნის ორმოციან წლებში ამუშავებდა თვითაღმწარმოებული მანქანების თეორიას. ასეთ მანქანას შეიძლება ჰქონდეს უნარი, ცალკეული დეტალებისაგან ააწყოს საკუთარი ასლი და შემდგომი დახვეწის შემდეგ, არსებული ნედლეულიდან შექმნას საჭირო დეტალები.

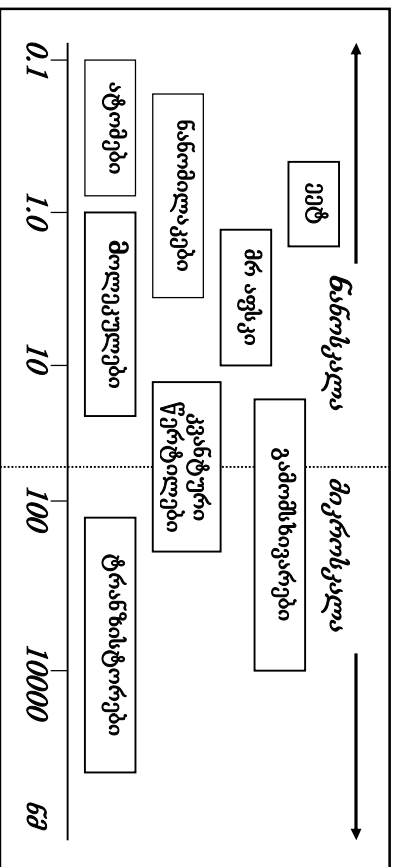
ცალკეული ატომებით მანიპულირება შესაძლებელი გახდა 1981 წლიდან, როცა შვეიცარიელმა მეცნიერებმა გ.ბინინგმა და გ.რორერმა შექმნეს ელექტრონულ-გვირაბისებრი მიკროსკოპი (შემდგომ მათი ნაბუშევარი აღინიშნა ნობელის პრემიით). 1986 წელს შეიქმნა ატომურ-ძალური მიკროსკოპი, რომელიც მუშაობს ატომებს შორის ურთიერთქმედების ძალების გამოყენებით. შედეგად გაჩნდა როგორც გამტარ, ისე ნებისმიერ სხვა ნივთიერებასთან მანიპულირების შესაძლებლობა ატომურ დონეზე.

1.2. ნანოელემენტები.

1-ელ ნახაზზე ნაჩვენებია, რომ ნივთიერების ნანომასშტაბურ დონეზე შედწევაში, რომელზეც ფუნქციონირებს ატომები და მოლეკულები, გამოიწვია პრინციპულად ახალი მოწყობილობების შექმნა. ეს არის: ნანოსტრუქტურები დამამახსოვრებელი მოწყობილობები-სათვის, ერთელექტრონიანი ტრანზისტორები (ეეტ), მაგნიტურ-რეზისტული აფსკები (მრა), კვანტური წერტილები და სხვადასხვა სახის გამომხსივარები. განსაკუთრებულ ინტერესს იპყრობენ ისეთი ეგზოტიკური ობიექტები, როგორცაა ნანოკლასტერები და ნანომილაკები.

1.2.1. ნანოკლასტერები.

გამოკვლევების ნანოგანზომილებიანი დიაპაზონი ხსნის ნივთიერებების ახალ თვისებათა სამყაროს. ჩვეულებრივი, ხისტ სხეულებთან შედარებით იცვლება კრისტალური



ნახ. 1. ფუნქციონალური მოწყობილობების სკალა

გისოსის პარამეტრები და ატომური დინამიკა, სითბური და ელექტროული თვისებები, იცვლება მაგნიტური თვისებები. რიგი ლითონებისათვის შეინიშნება ნახტომისებრი მაგნიტური-ფაზური გადასვლები და ჩნდება სუპერპარამაგნეტიზმის მოვლენები. ყველა აღნიშნული ეფექტი ატარებს განზომილებად ხასიათს და ძალზე არის დამოკიდებული ნანოკლასტერის ზედაპირის მდგომარეობაზე, კლასტერებს შორის დამოკიდებულებასა და კლასტერსა და საწყისი მატრიცას შორის დამოკიდებულებაზე. ნანოკლასტერების და ნანოსტრუქტურების სინთეზის მეთოდები განსაზღვრულ როლს ასრულებენ მათი თვისებების ჩამოყალიბებაში.

დამოკიდებულებები კლასტერთა შორის და კლასტერსა და მატრიცას შორის გვაძლევენ არა მარტო იზოლირებული კლასტერის თვისებების ცვლილების, არამედ მადალორგანიზებული კრისტალური ან ზემოლექულური სტრუქტურების შექმნის საშუალებას, რომლებშიც კლასტერები ატომების როლს ასრულებენ.

გამოკვლევები ნანოკლასტერების და ნანოსისტემების აგების არეში საშუალებას გვაძლევს გადავიდეთ ერთელექტრონიანი მოწყობილობების და ნაწილექტრონიკის, ახალი ელექტრონული და მაგნიტური ნანომასალების, კლასტერული კატალიზატორების და ნანოაფსკების გამოყენებაზე.

ეს გამოკვლევები შემდეგი მიმართულებისაა:

- ფულერენების და ფულერენმსგავსი სტრუქტურების სინთეზი, რომელთა გამოყენებით წყდება მაღალტემპერატურული ზეგამტარობის პრობლემა.

- კლასტერული ატომური დინამიკის მოდელირება, რომლის შედეგადაც დადგინდა, რომ კლასტერი დნება უფრო დაბალ ტემპერატურაზე, ვიდრე მაკროსკოპული სხეული. ამასთან, კლასტერის გაყინვის წერტილი არ შეესაბამება მისი დნობის წერტილს, განვიღო მუალედში კი კლასტერს აქვს ანომალური მყარ-თხევადი მდგომარეობა. ეს თვისებები გამოიყენება ნანოსესორების შექმნის დროს.

- ნანოკლასტერული რეაქციების განსაზღვრა. პირველ რიგში, იგულისხმება ფოტოქიმიური რეაქციები კლასტერების მონაწილეობით. აღმოჩენილია ფოტოსტიმულირებით ფრაქტალური სტრუქტურების შექმნის ეფექტი.

- ნახევარგამტარული კლასტერების შექმნა, მათი ელექტროგამტარული და ოპტიკური თვისებების გამოკვლევა, სინათლის გამოსხივების და შთანთქმის სიხშირეების ძვრების განსაზღვრა. გადაწყობადი ნანოლაზერების და შუქდიოდების შექმნა გამოსხივებული ტალღის სიგრძის რეგულირებით. ნახევარგამტარული ნანოელემენტებისათვის ძირითად ფაქტორად, რომელიც განსაზღვრავს მათ თვისებებს, გვევლინება ელექტროული პარამეტრების კვანტურ ზომებზე დამოკიდებულება.

- კლასტერების მაგნიტური თვისებების განსაზღვრა. გიგანტური მაგნიტური წინააღმდეგობის ეფექტის გამოყენება, როდესაც ელექტროული წინააღმდეგობა დამოკიდებულია მოდებულ მაგნიტურ ველზე, აგრეთვე,

ისეთი ეფექტების გამოყენება, როგორცაა მაგნიტური ფაზური გადასვლები კლასტერებში, სუპერარამაგნიტიზმი და სუპერფერომაგნიტიზმი.

- მაღალორგანიზებული ფენების ფორმირება, ნანომეტრული აფსკების და ზეგისოსების ფორმირება. განსაზღვრული შედგენილობის ფენების თანმიმდევრული ზედღების შესაძლებლობა.

გამოკვლევები ნანოკლასტერების არეში შეიცავენ პლაზმურ-ქიმიური რეაქციების შესწავლას, ფულერენების, ნანომილაკების, დაფისებრი ნახშირბადის სინთეზს, აგრეთვე, მათი თვისებების და ფოტოქიმიურ რეაქციებში მათი მონაწილეობის გამოკვლევას.

ფულერენების თვისებების გამოკვლევასა, რომლებიც წარმოადგენენ მოლექტურ კლასტერებს, ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი პრობლემაა მათი წარმოქმნის კინეტიკის და შესაბამისი კანონზომიერებების აღმოჩენა, როდესაც პლაზმის ქაოსიდან ჩნდება ნახშირბადის მაღალტემპერატურული სტრუქტურები. დადგენილია, რომ შეკრული ნანოსტრუქტურების შექმნის პროცესი თვითორგანიზებადია.

1.2.2. ნანომილაკები.

ელექტრონული მიკროსკოპიის სპეციალისტმა სუმო იამამი (Sumio Iijima) აღმოაჩინა სფეროსკირი მოლექტულები, რომლებსაც დაარქვა ფულერენები. ამ აღმოჩენისათვის მას ნობელის პრემია მიენიჭა.

ნანომილაკები ფულერენების ანალოგიური არიან, მაგრამ მათ აქვთ ცილინდრული ფორმა, მათი დიამეტრი შეადგენს ნანომეტრს, სიგრძე კი აღწევს 100 მკმ-ს. ამგვარად, სიგრძე 100000-ჯერ მეტია სიგანეზე. აღნიშნული ობიექტები ძალზე გამძლეა, ფოლადზე მეტადაც კი. ამასთან, ძალიან მსუბუქი და დრეკადია. ბევრი მეცნიერი ნახშირბადის ნანომილაკებს ამ თვისებათა გამო კომერციული გამოყენებისათვის ძალიან პერსპექტიულად მიიჩნევს.

კომპიუტერების შექმნის თვალსაზრისით ყველაზე საინტერესო ნანომილაკებში არის მათი ელექტრო- და თბოგამტარობა. ისინი საუცხოო ელექტროგამტარებია, ამასთან, ნებისმიერ სხვა ცნობილ ნივთიერებაზე უკეთესად ატარებენ სითბოს. ეს გვაძლევს საფუძველს დავაკავნათ, რომ ნახშირბადის ნანომილაკები კომპიუტერის გაბარიტების მოლკეულურ დონემდე შემცირების საშუალებას მოგვცემენ იმ პრობლემების გადაწყვეტის გარეშე, რომლებიც ჩვეულებრივ ნივთიერებებს ექმნებათ ასეთი ზომების დროს. უპირველესად, აქ იგულისხმება ის, რომ ლითონის გამტარებში მიკროსკოპულად მცირე სისქის დროს ეფექტურობას კარგავენ, კაუზადის გათბობა კი ხელს უშლის მის გამოყენებას ზემინიატურულ ელექტროულ მიკროსქემებში.

რამდენად ძალე გაჩნდება რეალური გამოთვლელი მოწყობილობები ნახშირბადის ნანომილაკების ბაზაზე? ჯორჯიის შტატის ტექნოლოგიის ინსტიტუტის (GIT) პროფესორებმა – ზ. უონგმა (Z. L. Wang) და ვ. ჰირმა (Walter de Heer) გამოაქვეყნეს შედეგები ბალისტიკური

გამტარობის გამოკვლევების შესახებ. მათ აღმოაჩინეს ბალისტიკური გამტარობის მოვლენა, როდესაც ელექტრონები სითბოს გამოყოფის გარეშე გაივლიან ნანომილაკს, რომლის ზომა 5 მკმ-მდეა. განსაკუთრებით აღსანიშნავია, რომ ეს შედეგები მიღებულია ოთახის ტემპერატურის პირობებში, როდესაც ცნობილი ზეგამტარებიც კი მთითხოვენ გაცივებას ნულს ქვემოთ ასობით გრადუსით. ამ მოვლენის გამოყენებით კომპიუტერის გამოთვლითი სიმძლავრე შეიძლება მილიონჯერ გაიზარდოს.

საჭიროა აღინიშნოს, რომ ნახშირბადის ატომები კაუზადის ატომებზე ბევრად უფრო მცირეა. დღევანდელ კომპიუტერულ ტექნოლოგიებში იყენებენ კაუზადს. მეორეს მხრივ კი, სიცოცხლის ცნობილი ფორმების საფუძველში დევს ნახშირბადი. ამგვარად, ბუნებამ იცოდა, რასაც აკეთებდა.

1.3. ატომბლური (რენტლიკატორი).

თავიდან ხდებოდა ახალი ტექნოლოგიის შესაძლებლობების დემონსტრაცია ცალკეული ატომებისაგან შემქმნელი ფირმის დასახელებების აკრეფით, დღეისათვის კი აწარმოებენ ნანოტრანზისტორებსა და ელექტრონულ გადაამრთველებს, რომლებიც შედგებიან რამდენიმე ატომისაგან. უახლოეს მომავალში შეიქმნება პირველი თვითაღმწარმოებელი მოლკეულური ნანომანქანები, სადაც ნიმუშად გამოყენებული იქნება დეზოქსირიბონუკლეინის მჟავა (დნმ), რომელსაც შეეძლება საკუთარი ასლის დაბზა-

დება ხსნარში არსებული უფრო მარტივი მოლეკულეებისაგან. შემდეგ გაწმდება ნაწილობრივად, რომელშიც თვითაღწარმოების გარდა შესწევთ უნარი გარე მმართველი სივრცის მიხედვით აკრიბონ ის, რასაც დაუკვეთავს ადამიანი. ასეთ მანქანებს უკვე აქვთ სახელი - ატომბლერი (რეპლიკატორი), რაც ნიშნავს ამკრებს. პირველი ასეთი მოწყობილობის დამზადებას დასჭირდება ასობით მილიონი დოლარი, რომელსაც დახარჯავენ რამდენიმე სახელმწიფო და ფირმა, მაგრამ მეორე ეგზემპლარი იქნება უკვე უფასო, ვინაიდან მას აკრებს პირველი.

შემდეგ განვითარება წარმოგვიდგება ორი მიმართულებით, მილიონობით ატომბლერი იაფი ნედლეულის მოლეკულეებისა და ატომებისაგან აკრებს ნებისმიერ მაკროსკოპულ ობიექტს, რომელსაც მას შეუკვეთავენ (შესაძლებელი იქნება ზოგიერთი დეტალი დამზადდეს ნაწილობრივ ატომბლერ-საგან, რომლებიც ჩაშენდება ალმასის გისოსში, რითაც ასეთი დეტალები აღმოჩნდებიან პრაქტიკულად უცვლელი).

ნანოტექნოლოგიების განვითარება გაგრძელდება მაკროსამყაროშიც. ატომბლერები აკრებენ ნაწილებს, რომლებიც ზომით იქნება მიკრონის მეტადი. მათი შეყვანა ადამიანის ორგანიზმში შესაძლებელი იქნება შპრიცის საშუალებით. შემდეგ ეს „აბები“ იმობრავებენ სისხლძარღვებში და გაანადგურებენ ქოლესტერინის წარმონაქმნებს, გამოასწორებენ გაღაცრებს, რომლებიც ჩნდება მოლეკულურებში ასაკთან ერთად. სხვა სახის ნაწილობრივი მიაღწევენ ორგანიზმის ნებისმიერ კუთხეს, აღმოაჩენენ და გაანადგურებენ მიკრობებს და კიბოს უჯრედებს.

გაწმდება ნებისმიერი მოლეკულის და შენაერთის მასობრივი წარმოების შესაძლებლობა, მათ შორის ისეთისაც, რომლებიც ძნელად მოიპოვება ბუნებაში. ამასთან ერთად, შესაძლებელი გახდება აიკრიბოს ისეთი მოლეკულები, რომლებიც სპეციალურადაა დაპროექტებული ამა თუ იმ მიზნებისათვის და ბუნებაში არ არსებობებენ. მაგალითად, ახალი წამლები.

ნანოტექნოლოგიების განვითარება გულისხმობს სამ მიმართულებას:

- ელექტრონული სქემების დამზადება (მათ შორის, მოცულობითიც) ატომური ელემენტებით, რომელთა ზომა შეეფარდება ატომების და მოლეკულების ზომებს.

- ნაწილობრივების დამზადება და დამზადება, სადაც იგულისხმება მოლეკულის ზომის მექანიზმები და რობოტები.

- ატომებით და მოლეკულებით უშუალო მანიპულაცია და მათგან ხელლოვნური ნივთიერებების და სისტემების აკრება.

სამივე შემთხვევაში გამოიყენება დიდად ლოკალური, ცალკეული ატომების სიზუსტემდე, დაბალენერგეტიკული ტექნოლოგიური პროცესები.

ასეთი პროცესების გამოყენებით ხორციელდება ნაწილობის ელემენტების ფორმირება. ამის გარდა, სრულდება ცალკეული ატომების გადაადგილება წინასწარ მოცემულ წერტილებში, არასასურველი ატომების მოცილება. საჭირო შემთხვევაში შესაძლებელია ქიმიური პროცესების ლოკალური სტიმულაცია.

2. ნანოწარმოების ხერხები

ნანოწარმოების ერთ-ერთი ძირითადი ინსტრუმენტია ელექტრონულ-გვირაბისებრი და ატომურ-ძალური მიკროსკოპები. ამ მოწყობილობების განხილვის დროს ხაზი უნდა გავუსვათ იმას, რომ ამ შემთხვევაში მიკროსკოპის ტექნიკურმა ევოლუციამ გააარა გზა უმცირესი ობიექტების „გარჩევის“ ფუნქციიდან ისეთ ინსტრუმენტამდე, რომელიც გვაძლევს ამ ობიექტების ზედაპირსა და სტრუქტურაზე ზემოქმედების საშუალებას, რის გამოც ნივთიერების ატომი წარმოგვიდგა ისეთ რეალურ ობიექტად, რომელიც არა მარტო გამოიკვლევა, არამედ შეიძლება გადაადგილდეს სასურველ ადგილას გამოკვლევების საჭიროების მიხედვით. ამის მიღწევა კი ხდება მიკროსკოპის სპეციალური კონსტრუქციით, რომელიც მომდევნო თავში აღიწერება.

2.1. გვირაბისებრი მიკროსკოპი.

თანამედროვე კომპიუტერების ელემენტური ბაზა დღეისათვის წარმოადგენს ზედიდ ინტეგრალურ მიკროსკოპებს, რომლებშიც ტრანზისტორების რაოდენობა აღწევს ასიათასიდან მილიონამდე. ბუნებრივია, რომ მიკროსკოპის ასეთი ცალკეული ელემენტების ზომები ძალიან მცირეა და იმყოფება 2000-200 ნმ ფარგლებში.

ინტეგრალური სქემების დამზადების დროს ერთ-ერთი ძირითადი ტექნოლოგიური ოპერაციაა ფოტოლითოგრაფია, როდესაც სინათლე შუქმგრძობ ფენაზე ქმნის სასურველ გამოსახულებას. სანამ გამოსახულების დეტალების ზომა შედარებით დიდი იყო, სინათლე ადვილად

სძლევდა ამ ამოცანას, ხოლო როდესაც ინტეგრალური სქემის ელემენტების ზომები მიუახლოვდა სინათლის ტალღის სიგრძეს (760-400 ნმ), სიტუაცია მკვეთრად შეიცვალა. ასეთი ფაქიზი სამუშაოსათვის სინათლე ფრიად უხეში ინსტრუმენტი აღმოჩნდა. საჭირო გახდა სინათლის ტალღის სიგრძის შემცირება. ამისათვის დაიწყო ულტრაიისფერი, შემდეგ რენტგენის სხივების გამოყენება, ბოლოს კი გადავიდნენ ელექტრონების უწვრილეს ნაკადებზე.

მაგრამ სინათლის ტალღის სიგრძის შემცირებისათვის სამაგიეროს გადახდა მოხდა ფუძეზე ვარდნილი ნაწილაკების - ფოტონების და ელექტრონების ენერჯის ზრდით, შედეგად აღნიშნულმა ნაწილაკებმა დაიწყეს ფოტომგრძობიარე მასალის თხელი ფენის გარდკევა და სასარგებლო სამუშაოსთან ერთად, რომელიც იყო ინტეგრალური სქემის ტოპოლოგიის დატანა, თვით ნახევარგამტარულ კრისტალში (ფუძეში) დეფექტების წარმოშობის მიზეზად იქცნენ. ამგვარად, მიკროელექტრონიკის განვითარება ინტეგრალური მიკროსკოპების დამზადების დროს მივიდა თავის ზღვართან და ამასთან დაკავშირებით გაჩნდა ნახევარგამტარული მასალების დამუშავების ახალი გზების და ტექნოლოგიების ძიების ამოცანა. პრობლემის გადაწყვეტა მოხდა ე.წ. გვირაბისებრი ეფექტის გამოყენებით. ეს ეფექტი დაკავშირებულია ელექტრონის მოძრაობასთან, რომელსაც ერთდროულად აქვს ტალღური და კორპუსკულური თვისებები.

მაგალითად, თუ ავიღებთ კონდენსატორის ორ ფირფიტას, რომლებიც დაცილებულია იდეალური დიელექტრიკით (მაგ., ვაკუუმით) და მივაწოდებთ ფირფიტებზე პოტენციალთა სხვაობას, მაშინ წინააღმდეგობის (R) ფორმულასთან შესაბამისად უდრის

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

სადაც ρ არის კუთრი წინააღმდეგობა; l – მანძილი ფირფიტებს შორის; S – ფირფიტის ფართობი.

მივიღებთ, რომ ფირფიტებს შორის ღრეჩო l სიღრმის მიუხედავად კონდენსატორში დენი არ გაივლის. ეს გამოწვეულია იმით, რომ R წინააღმდეგობა დიდია, რადგანაც თეორიულად ვაკუუმის კუთრი წინააღმდეგობა უსასრულოა. მაგრამ ექსპერიმენტები ამტკიცებენ, რომ საკმარისად მცირე ღრეჩოს დროს ელექტრონი ავლენს თავის ტალღურ თვისებებს და ღრეჩო პრაქტიკულად ხდება მისთვის “გამჭვირვალე”. სწორედ ამ ეფექტზე დაყრდნობილია გვირაბისებრი მიკროსკოპის მუშაობა, რომელიც წარმოადგენს ახალი ტექნოლოგიის ძირითად ინსტრუმენტს.

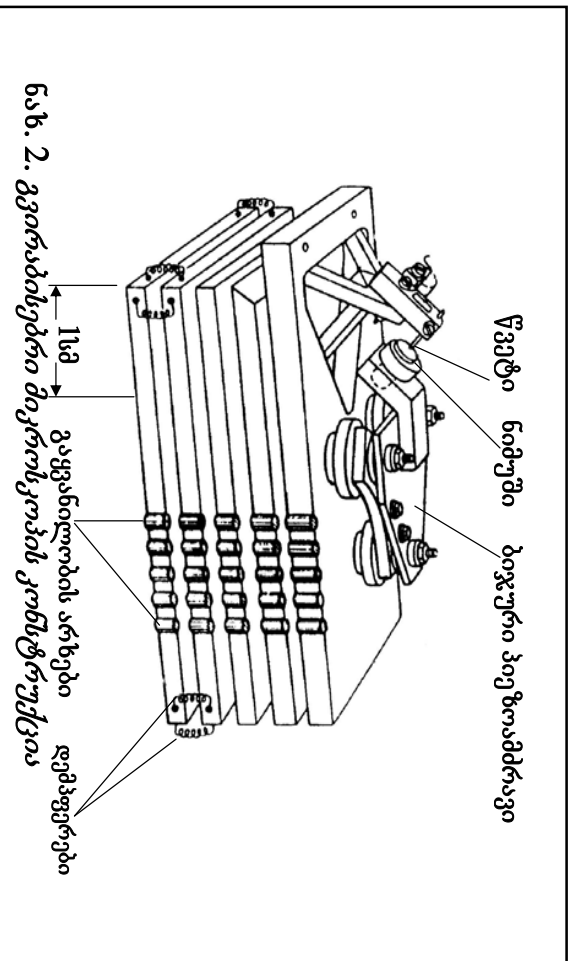
ეს მიკროსკოპი შეიქმნა 1982 წელს, და მისმა შექმნელებმა 1986 წელს მიიღეს ნობელის პრემია. ახალ მიკროსკოპს აქვს გარჩევის უნიკალური შესაძლებლობები, რომელიც შეადგენს უმცირესი ატომის ზომის ნაწილს. მისი გამოყენებით შეიძლება “დავინახოთ” ნივთიერების ცალკეული ატომების განაწილება და, რაც მთავარია, მისი

გამოყენება არ იწვევს გამოსაკვლევი მასალის ცვლილებებსა და დამახინჯებებს.

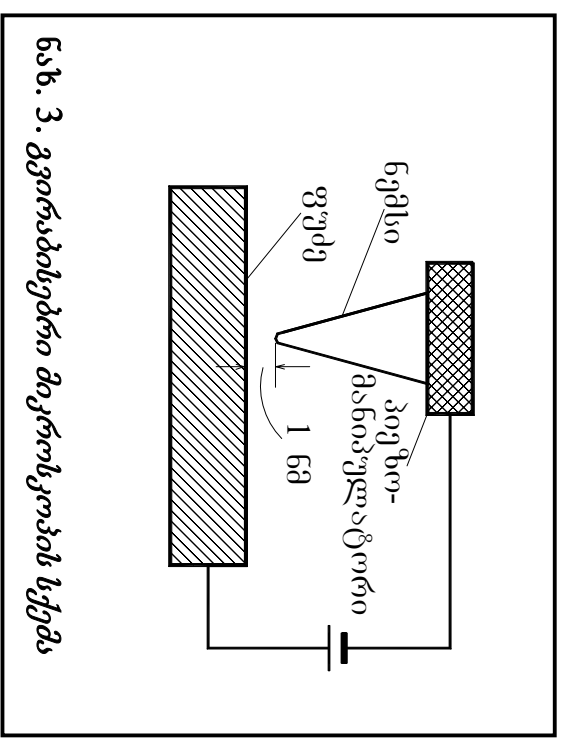
ეს უნიკალური თვისება დაკავშირებულია იმასთან, რომ მიკროსკოპში მუშა ინსტრუმენტია არა ელექტრონების ნაკადი, არამედ დიდი რაობა ელექტრონული ველი. ამგვარად, გამოიყენება ელექტრონების არა კორპუსკულური თვისებები, არამედ ტალღური.

გვირაბისებრი მიკროსკოპში ველი ღრეჩოს სიძვირის გამო იმდენად დიდია, რომ შეუძლია უშუალოდ მოახდინოს ზემოქმედება გამოსაკვლევი ნივთიერების ზედაპირზე. ამ დროს დენი ღრეჩოში ძალიან მცირეა და უწნდება ახალი ფუნქცია – უზრუნველყოს უკუკავშირი ტექნოლოგიურ პროცესში. საქმე ის არის, რომ აღნიშნულ პროცესში საჭიროა ღრეჩო მოვაქციოთ განსაზღვრულ ხისტოფარგლებში. წინააღმდეგ შემთხვევაში გვირაბისებრი ეფექტი შეიძლება გაქრეს. ღრეჩოში არსებული მცირე ელექტრონი დენი, რომელიც მისად რეაგირებს ღრეჩოს სიღრმის ცვლილებაზე, არის „სენსორი“, რომელიც გვაძლევს საშუალებას, საჭირო კორექტივები შევიტანოთ ტექნოლოგიური პროცესის შენარჩუნებაში.

გვირაბისებრი მიკროსკოპის მუშაობის პრინციპი. ნახევარგამტარული ან ლითონის ფუძის თავზე მოთავსებულია უწვრილესი ეოლფრამის ნემსი. 10 გ ძაბვა ქმნის პოტენციალთა სხვაობას ნემსსა და ფუძეს შორის. ვინაიდან ღრეჩო ძალიან მცირეა (1 ნმ-მდე), ვიღებთ ველს, რომლის დაბაბულობა აღწევს 10^8 ვ/სმ²-ს (ნახ.2).

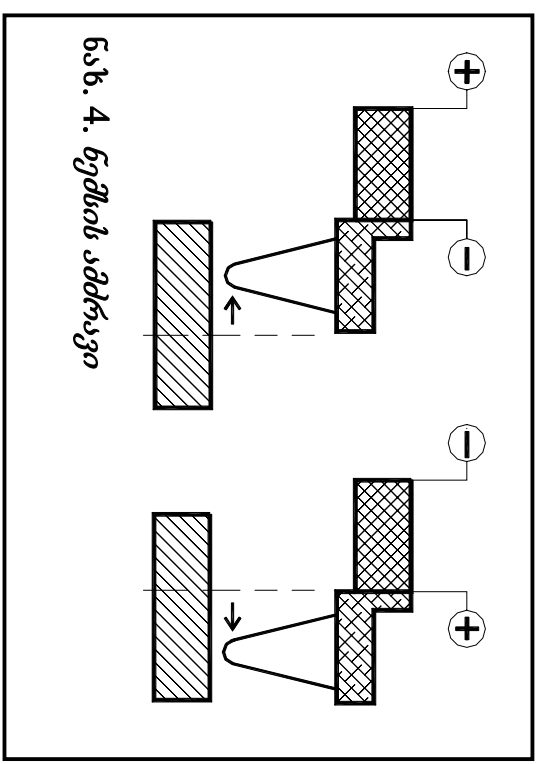


ნახ. 2. გვირახისებრი მიკროსკოპის კონსტრუქცია



ნახ. 3. გვირახისებრი მიკროსკოპის სქემა

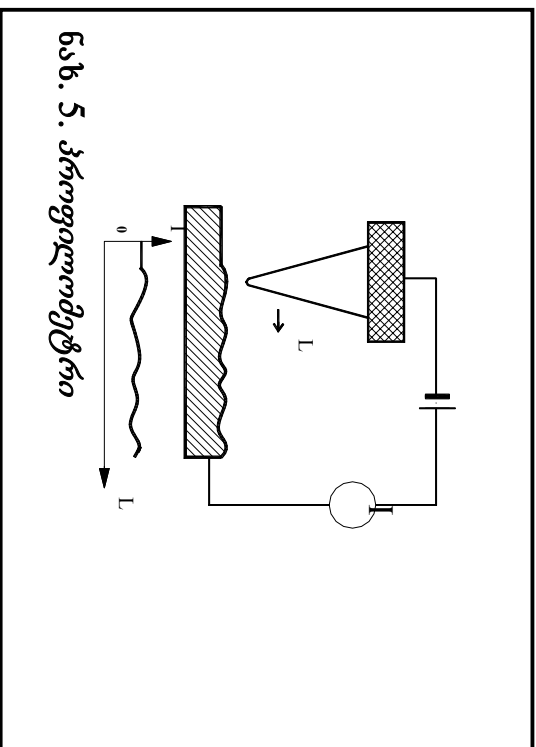
ნემსის გადასადგობლად ნებისმიერი მექანიკური ამბრაუი ძალიან უხეშია. ამის გამო ნემსი მაგრდება პიეზომანიპულატორზე (ნახ. 3).



ნახ. 4. ნემსის ამბრაუი

მანიპულატორი არის კერამიკული პიესომომილი, რომელშიც მის ელექტროდებზე ძაბვის მიწოდების დროს იცვლის ზომას და ფორმას. ეს კი ნემსს აძლევს საძირკვე მიმართულებით გადაადგილების საშუალებას. პიესომანიპულატორის მგრძობიერება იმდენად დიდია, რომ 1 ჰძაბვის ზემოქმედების დროს ნემსი გადაადგილება 3 ნმ-ზე. ძაბვის პოლარობის შეცვლის დროს, ამბრაფი უცვლის ნემსს გადაადგილების მიმართულებას (ნახ. 4).

თუ ძაბვა და გვირახისებრი დენი (I) იქნება მუდმივი, მაშინ გამოსაკვლევი ობიექტის ზედაპირის ნემსით სკანირების დროს შეიძლება მივიღოთ ზუსტი ინფორმაცია მისი ტოპოგრაფიის შესახებ (ნახ. 5). ამგვარად, აღნიშნულ შემთხვევაში გვირახისებრი მიკროსკოპი ასრულებს პრაფილომეტრის ფუნქციას.

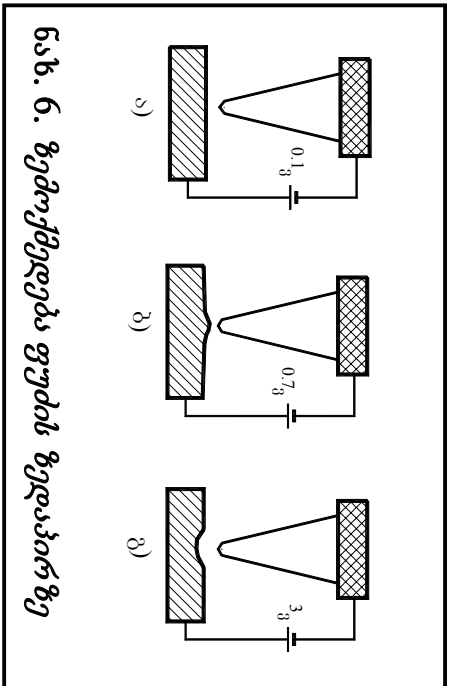


ნახ. 5. პრაფილომეტრი

ამ თვისების გამოყენებით, თუ ფირფიტის ზედაპირზე გარკვეული კანონზომიერებით განლაგებულია ბორცვები და ღრმულები, მაშინ გვირახისებრმა მიკროსკოპმა შეიძლება გადაიყვანოს მიღებული ინფორმაცია ელექტრულ სიგნალებად, რომლების დამუშავება იქნება შესაძლებელი კომპიუტერის საშუალებით. ამ შემთხვევაში გვირახისებრი მიკროსკოპი წარმოგვიდგება როგორც წამკითხველი მოწყობილობა.

იგივე გვირახისებრი მიკროსკოპი ადვილად წყვეტს ფირფიტის ზედაპირზე ბორცვების და ღრმულების დატანის პრობლემას. ამგვარად, წყდება უკუამოცანა - ელექტრული სიგნალების გარდაქმნა ზედაპირის რელიეფში.

ეს პროცესი ემყარება იმ ფაქტს, რომ ელექტრული ველი გავლენას ახდენს დიფუზიის სიჩქარეზე.



ნახ. 6. ზემოქმედება ვოლტის ზედაპირზე

თუ ნემსი მოთავსებულია ფირფიტის ზედაპირთან, არსებულ ლოკალურ ველში ჩნდება ძალები, რომლებიც მოქმედებენ ზედაპირის ატომებზე და თავს უყრიან მათ ნემსის წვერთან. ზომიერი ველის დროს ნემსით სკანირება იწვევს ზედაპირულ დიფუზიას, რომელსაც მოჰყვება დამბულების „შეკსება“ და შედეგად ფუძის ზედაპირის რელიეფის დაგლუვება (ნახ. 6. ა).

თუ გავზრდით ველის დაბაბულობას, მივიღებთ უკუეფექტს, სწორი ზედაპირის ნაკვლად ფუძეზე ჩნდება მიკრობორცვები. ეს ნიშნავს, რომ ძალებმა, რომლებიც მოქმედებენ ნახევარგამტარულ მასალაზე, მის ზედაპირულ ფენაში წარმოქმნეს ისეთი მექანიკური დაბაბულობა, რომელიც აღემატება ნივთიერების დენადობის ზღვარს და ნემსის ქვეშ ფუძე ამოიბურცება (ნახ. 6. ბ). თუ კომპიუტერი ნემსზე მიაწვდის გარკვეული სიდიდის და ხანგრძლივობის იმპულსებს, მაშინ შესაბამისი ინფორმაცია ჩაიწერება ბორცვების ჯაჭვის სახით. როგორც აღვნიშნეთ, ასეთი ჩანაწერის წაკითხვა შესაძლებელია გვირაბისებრი პრიოფილომეტრის საშუალებით.

თუ კიდევ გავზრდით ველის დაბაბულობას, ნემსის ქვეშ ბორცვის ნაკვლად გაჩნდება ღრმული. ეს ნიშნავს, რომ ურთიერთქმედების ძალები იმდენად გაიზარდა, რომ ატომები ამოიგლიჯნენ ფუძიდან და მოხდა მათი „შეწოვა“ ვოლფრამის ნემსში (ნახ. 6. გ).

ღრმულების და ბორცვების ზომა შეესაბამება ნემსის წვერის დიამეტრს და თავსდება 10-20 ნმ-ის დიაპაზონში. ამ

შემთხვევაში ვიღებთ ძალიან მაღალ ჩაწერის სიმჭიდროვეს - დაახლოებით 10 მილიარდ ბიტს 1 კვ.მ-ზე.

ნემსის ზემოქმედების ადგილებში ორიენტირება შეცვლილი ატომები ქმნიან პლატოს, რომელიც შემდეგ აღარ განიცდის დიფუზიას. ამგვარად, ახალი ტექნოლოგიით მიღებულ მეხიერებას პრაქტიკულად არ ეშუქრება „სკლეროზი“.

ჩვენ განვიხილეთ ნანოტექნოლოგიის ერთ-ერთი პირველი მაგალითი. ინტეგრალური ნანოტექნოლოგიისათვის დამახასიათებელია ელემენტების ინტეგრაციის ულტრაიდიდი ხარისხი, პიკოსეკუნდური სწრაფქმედება (1 მს უდრის 10^{-12} ს), აგრეთვე საიმედოობა, რომელიც უზრუნველყოფილია მრავალჯერადი დუბლირებითა და თვითშემოწმებით.

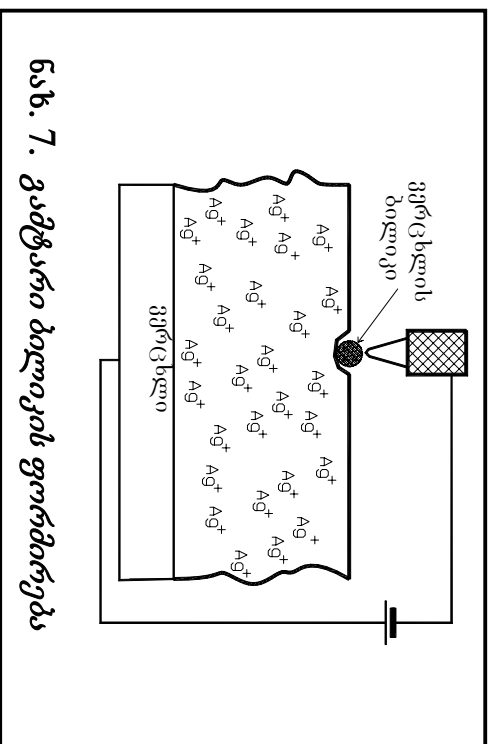
ნანოტექნოლოგიები საშუალებას გვაძლევს შევასრულოთ თვისობრივად ახალი ტიპის ოპერაციები:

მაგალითი I. გვირაბისებრი მიკროსკოპის ნემსი შეიძლება გამოვიყენოთ ბიოლოგიური მოლეკულების გადსატანად. მოლეკულა მიზიდება ვოლფრამის ნემსთან და მოწყდება გამოსაკვლევო ნივთიერებიდან, როდესაც ნემსზე მიწოდებული პოტენციალი შეადგენს 0,8 ვ-ს. როდესაც ეს ძაბვა შემცირდება 0,3 ვ-მდე, ბიოლოგიური მოლეკულა ისევ დაილექება ნივთიერებაზე. ასე ხორციელდება მოლეკულის „ქირურგიული“ გადაწერვა წინასწარ მოცემული პრიორიტეტის მიხედვით.

მაგალითი II. ხშირად საჭიროა ფუძის ზედაპირზე შეიქმნას უბნები, რომელთა გამტარობა რამდენიმეჯერ

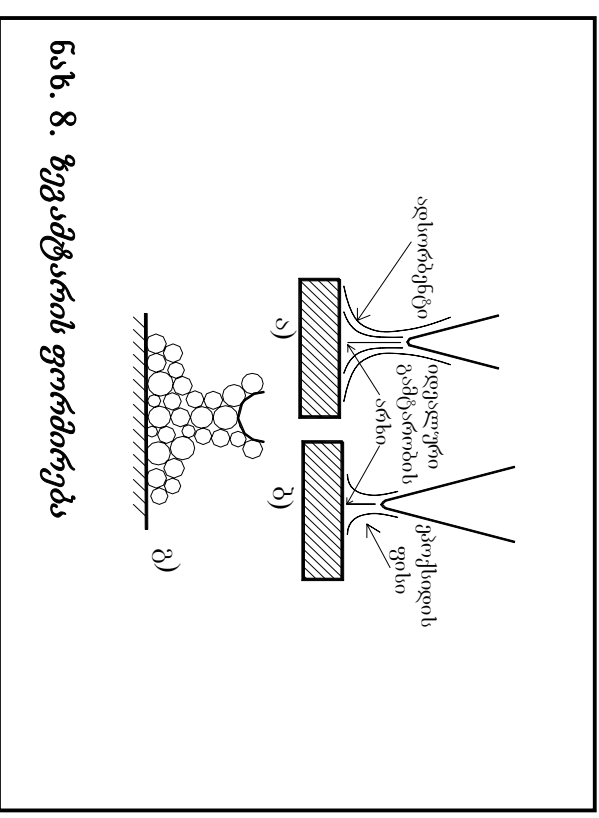
მაღალია ფუძის საკუთარ გამტარობაზე, კერძოდ, ეს საჭიროა, როცა ხდება ინტეგრალური სქემის ცალკეული კვანძების შეერთება ერთ წრედში. ამ ოპერაციას ადვილად ასრულებს გვირაბისებრი მიკროსკოპი.

წარმოვიდგინოთ, რომ ფუძე შედგება მცირე გამტარობის მასალისაგან (მაგ., იონური გამტარი ვერცხლის დადებითი იონებით). მაშინ, თუ ნემსზე მივაწვედით უარყოფით პოტენციალს, ის მიიზიდავს ზედაპირზე მყოფ იონებს. ეს იონები შეივსებენ ელექტრონებით და გარდაიქმნებიან ლითონად, რის შედეგადაც ნემსის მოძრაობის კვალდაკვალ ვაჩნდება სუფთა ვერცხლის ბილიკი. ამგვარად, მზადდება მიკროგამტარები ინტეგრალური სქემებისათვის (ნახ. 7).



ნახ. 7. გამტარი ბილიკის ფორმირება

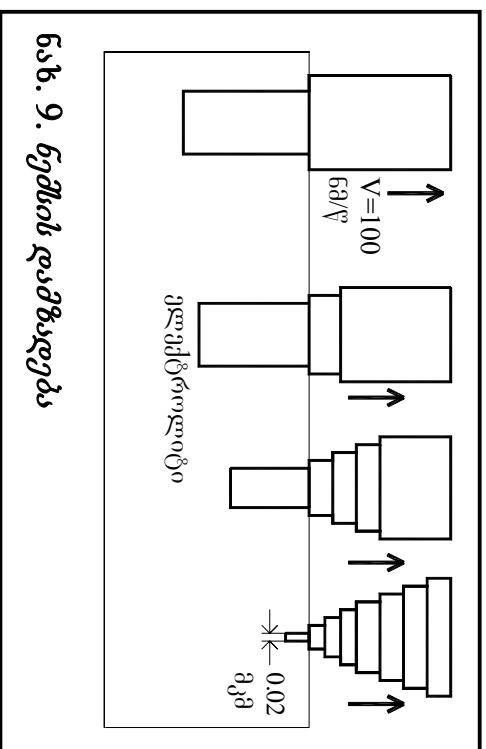
მაგალითი III. როგორც ცნობილია, იდეალურად ჩამოწკრივებულ მოლეკულურ სტრუქტურას ელექტრული დენი გაივლის დანაკარგების გარეშე. მაგრამ ნივთიერების მოლეკულების მოწესრიგება საკმაოდ რთული ამოცანაა და ბევრად უფრო რთულია ამ მდგომარეობის შენარჩუნება ქაოსის შემქმნელი სითბური მოძრაობის ფონზე. აღმოჩნდა, რომ ძალიდან ელექტრულ ველში ნემსა და ფუძეს შორის მოლეკულები თვითონ ლაგდებიან მწკრივში ძალოვანი ხაზების გასწვრივ, მაგრამ ეფექტი ქრება ძაბვის მოხსნისთანავე.



ნახ. 8. ზევამტარის ფორმირება

განენილი მოწესრიგებული სტრუქტურების ფიქსაცი- ისათვის ვოლფრამის ნემსის თავზე მოათავსებენ ეპოქსიდის ფისის წვეთს (ნახ. 8.ა). ამ დროს დიექტრიკის ცენტრში ჩნდება ცილინდრი იდეალური გამტარობის მოლექულებისაგან. ეპოქსიდი აფიქსირებს ამ თვისებას სამუდამოდ. ასე მიღებულმა მიკროგამტარმა შეიძლება დადნობის გარეშე გაუძლოს მილიონ ამპერი 1 კვ. სმ-ზე დენის სიმკვრივეს (ნახ. 8.ბ. ვ.).

გვირაბისებრი მიკროსკოპის ნემსის დამზადება სრულდება რამდენიმე ეტაპად და ნაჩვენებია მე-9 ნახაზზე. ვოლფრამის ნამზადის თავი ჩამკვეთულია აბაზანაში ელექტროლიტით. მოცემული სიჩქარით (V) და ბიჯურად ხდება ნამზადის გატანა ელექტროლიტიდან. ელექტროლიტთან ურთიერთქმედების შედეგად, ნამზადის დიამეტრი მცირდება. პროცესი გრძელდება მანამ, სანამ არ მივიღებთ ნემსის სასურველ დიამეტრს.



2.2. ატომურ-ძალური მიკროსკოპი.

ტერმინი - “მიკროსკოპი” შეიძლება მიუთითებდეს იმაზე, რომ ხელსაწყოს ძირითადი ფუნქცია უმცირესი საგნების “დანახვაა”. მაგრამ ლაბტიკური მიკროსკოპისაგან განსხვავებით რასტრულ-გვირაბისებრი მიკროსკოპს შეუძლია აგრეთვე მოახდინოს ზემოქმედება “დანახულ” ზედაპირზე. ამ შემთხვევაში გვირაბისებრი დენი მიკროსკოპის ნემსსა და ფუძეს შორის თამაშობს ისეთივე როლს, როგორც კარგად ფოკუსირებული ელექტრონების კონა, რომელსაც იყენებენ გამოსახულების მიღებისათვის ელექტრონულ მიკროსკოპში.

მაგრამ არსებობს ისეთი ამოცანა, რომელიც არ შეიძლება შესრულდეს როგორც ელექტრონული, ასევე გვირაბისებრი მიკროსკოპით. ეს არის ცალკეული ელექტრონების, ატომების და ნივთიერების უმცირესი უბნების ურთი- ერთქმედების ძალთა გაზომვა. ეს ამოცანა გადაწყვეტილი იყო ატომურ-ძალური მიკროსკოპის შექმნით.

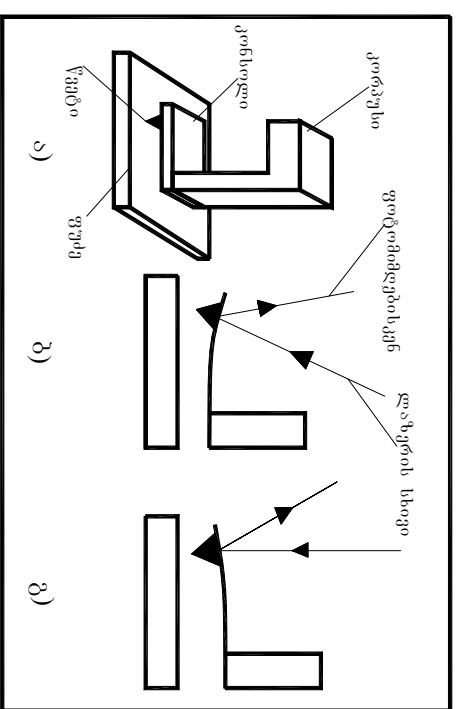
ვიდრე განვიხილავთ ატომურ-ძალური მიკროსკოპის მუშაობის პრინციპს, გავიხსენოთ რომ გვირაბისებრი მიკროსკოპის მუშაობის პრინციპში ჩადებულა პირობა, რომ ნემსსა და ზედაპირს შორის უნდა გადიოდეს გვირაბისებრი დენი, აქედან გამომდინარე, გამოსაკვლევე ზედაპირსა და ნემსს უნდა ჰქონდეს გამტარობის უნარი. ამის გამო გვირაბისებრი მიკროსკოპის საშუალებით არ შეიძლება დიექტრიკული ნივთიერებების გამოკვლევა. გარდა ამისა, აღნიშნული მიკროსკოპი არამგრძობიანრეა მაგნიტური ველის მიმართ, რის გამოც მისი გამოყენება

შეუძლებელია ფერომაგნიტური მასალების დომენური სტრუქტურების გამოკვლევების დროს. კერძოდ, გვირაბი-სებრი მიკროსკოპის საშუალებით ვერ დავინახავთ ინფორმაციის ჩანაწერს კომპიუტერის მაგნიტურ დისკზე.

აღნიშნული საკითხი შეიძლება გადაწყდეს იმ შემთხვევაში, თუ გვირაბისებრ მიკროსკოპს გავხდით მგრძობიარეს მაგნიტური და ელექტროსტატიკური ველის მიმართ. ამის რეალიზაცია კი მოხერხდა ატომურ-ძალურ მიკროსკოპში, რომლის პრინციპული სქემა ნაჩვენებია მე-10 ნახაზზე. აღნიშნულ დანადგარში გვირაბისებრი მიკროსკოპისაგან განსხვავებით, ნემსი მაგრდება არა ხისტად, არამედ მინიატურულ კონსოლზე, რომელიც ბრტყელი ზამბარაა (ნახ. 10, ა). ამგვარი ატომური ძალების სენსორი მზადდება კაუხადიდან ლითონგრაფიის მეთოდით.

თუ აღნიშნულ სენსორს მივაჭერთ გამოსაკვლევ ზედაპირს, კონსოლი გაიღუნება (ნახ. 10, ბ). ეს გაღუნვა გაიზომება სინათლის სხივის გადახრით, რომელიც დაესახივება ზამბარის ზურგზე. ამისათვის კონსოლის თავზე უმობრაოდა დამაგრებული სინათლის წყარო - ლაზერი, რომლის სხივი ზამბარის ზურგიდან არეკვლის შემდეგ რეგისტრირდება ფოტომომენტებით.

მიკროსკოპი შეიძლება მუშაობდეს ორ რეჟიმში: პირველი, როდესაც ნემსს უშუალო კონტაქტი აქვს გამოსაკვლევ ზედაპირთან; მეორე რეჟიმი უკონტაქტო ურთიერთქმედებაა, როდესაც ნემსი დაცვილებულია ზედაპირიდან რამდენიმე ათეული ნანომეტრით.

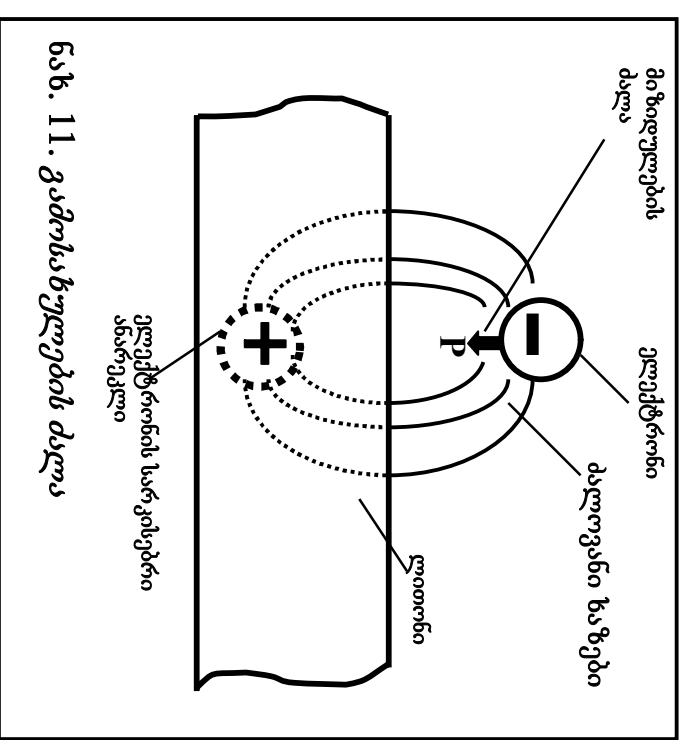


ნახ. 10. ატომურ-ძალური მიკროსკოპი

მეორე შემთხვევაში თავს იჩენს მიზიდულობის ძალები და კონსოლი გაიდუნება ფუძის მიმართულებით (ნახ. 10, გ).

ატომურ-ძალური მიკროსკოპის მუშაობაში გასარკვევად განვიხილოთ მუხტის ურთიერთქმედება ლითონის ზედაპირთან. მე-11 ნახაზზე ნაჩვენებია მუხტი (ელექტრონი) მისი ელექტროსტატიკური ველის ძალოვან ხაზებთან ერთად.

ლითონის ზედაპირს ნებისმიერ წერტილში აქვს ერთი და იგივე პოტენციალი, რადგან პოტენციალთა სხვაობის შემთხვევაში შესაბამის წერტილებს შორის გაჩნდებოდა ელექტრული დენი. ეს მოსაზრება გვეკარნახობს, რომ მუხტიდან ლითონის ზედაპირზე ძალოვანი ხაზები მიემართება პერპენდიკულარულად. აღნიშნული სურათის სარკისებრი ანარეკლი ლითონის ზედაპირის მიმართ წარმოგვიდგება ისე, როგორც დადებითი მუხტის ანარეკლის დროს. რეალურ ელექტრონსა და დადებით გამოსასხელებას შორის იმოქმედებენ ზუსტად ისეთივე კულონის ძალები, როგორც რეალურ მუხტებს შორის. ამ ძალებს უწოდებენ „გამოსასხელების ძალებს“ - **P**. ასეთ მოდელს იყენებენ ანალიზის დროს. სინამდვილეში მუხტის დადებითი ანარეკლი არ არსებობს და ლითონის ზედაპირთან მყოფი ელექტრონი განიზიდავს ზედაპირზე მყოფ ელექტრონებს, რის შედეგადაც ნივთიერების ზედაპირზე რჩება განაწილებული დადებითი მუხტი, რომელთანაც ურთიერთქმედებს აღნიშნული ელექტრონი.



მაგალითად, თუ ნემსი დამზადებულია ლითონისაგან, ან აქვს ლითონის დაფარვა, სწორედ ასეთი ნემსი თამაშობს ლითონის ზედაპირის როლს და მის ქვეშ მყოფი გამოსაკვლევი ნივთიერების ელექტრონი ურთიერთქმედებს ნემსში თავის გამოსასხელებასთან. რაც დიდაა ურთიერთქმედების ძალა, მით მეტად გაიდუნება კონსოლ-ზამბარა, რაც დაფიქსირდება არეკლილი სხივით.

კონსოლ-ზამბარის სიხისტეს პოულობენ მისი საკუთარი სიხშირით. რაც უფრო ხისტია ზამბარა, მით უფრო დიდაა

მისი საკუთარი სიხშირე. კონსოლ-ზამბარიდან არეკლილი ლაზერის სხივის რხევების სიხშირე გაიზომება ძალიან მაღალი სიზუსტით და ამის საფუძველზე ასეთივე მაღალი სიზუსტით განისაზღვრება დამოკიდებულება მანძილსა და ძალას შორის. კონსოლის რეზონანსული რხევების აგზნებისათვის გამოიყენება სპეციალური პიეზოგარ-დამქმნელი ან კონსოლზე ხდება სინქრონული ზემოქმედება მეორე ლაზერის სხივით. ატომურ-ძალური მიკროსკოპის ასეთი კონსტრუქცია უზრუნველყოფს საკმარის მგრძობელობას ცალკეული ელექტრონების დეტექტირებისათვის.

ატომურ-ძალური მიკროსკოპის ასეთი თვისებები განსაზღვრავენ მისი გამოყენების ფართო სპექტრს. მაგალითად, იგი გამოიყენება სენსიტიული ქსოვილი აფსკების გამოკვლევებისათვის, რომლებიც წარმოადგენენ უნიკალურ ნივთიერებას, ერთდროულად თხევადი თვისებებით და ანიზოტროპიით - დამახასიათებელი კრისტალებისათვის. აღნიშნული მიკროსკოპის გამოყენებით აფსკებში დადგენილი იქნა მოლეკულების განლაგების ცვლილება ტემპერატურასთან დამოკიდებულებაში.

ატომურ-ძალური მიკროსკოპის გამოყენებით შეიძლება გაიზომოს ხახუნის ძალები ატომურ დონეზე. აგრეთვე გამოკვლეულ იქნას სამგანზომილებიანი მიკროსტრუქტურები, მაგალითად, ინტეგრალური სქემების აგებულება.

ვინაიდან ატომურ-ძალურსა და რასტრულ-გვირაბისებრ მიკროსკოპს შორის ბევრი საერთოა, შეიქმნა კონსტრუქციები, რომლებშიც შეთავსებულია მათი ფუნქცი-

ები, რის შედეგადაც შესაძლებელი გახდა სკანირების ორი რეჟიმის შესრულება - 1) მუდმივი მანძილის შენარჩუნებით ნემსსა და ფუძეს შორის და 2) მუდმივი გვირაბისებრი დენის შენარჩუნებით. კერძოდ, ასეთი აპარატურის გამოყენებით შეიძლება მივიღოთ ურთიერთქმედებების კონტაქტურ ძალთა სურათი ატომური გარჩევით, ამავდროულად, ზედაპირული გამტარობის განაწილების სურათიც.

იაპონურმა ფირმამ “Digital Instruments” დაამუშავა “ნანოსკოპი”, რომელშიც გაერთიანებულია რასტრული და ატომურ-ძალური მიკროსკოპის ფუნქციები. რის შედეგად აღნიშნული მოწყობილობის გამოყენებით შესაძლებელია ნანოდიპაზონში განვსაზღვროთ გამოსაკვლევი ობიექტის ზომები სამივე მიმართულებით, გავზომოთ ზედაპირის ხორკლიანობა, შევასრულოთ სპექტროსკოპია. ნანოსკოპში შეიძლება ვცვალოთ გადიდება ფართო დიაპაზონში, რის გამოც მხედველობის არეში შეიძლება მოვათავსოთ რამდენიმე ათეული ატომი და იმავე დროულად გადიდების სულ სხვა დონეზე დავინახოთ ობიექტის ზედაპირის მთელი რელიეფი.

საინტერესო დანადგარია ატომურ-ძალური და მაგნიტური მიკროსკოპის კომბინაცია, რომლის გამოყენებით შესაძლებელია დიელექტრიკული და მაგნიტური მასალების გამოკვლევა.

გაზომვების დიაპაზონის გაზრდისათვის შესაძლებელია ამ ჰიბრიდის შეთავსება რასტრულ-ელექტრონულ მიკროსკოპთან. ასეთი კომბინაციისას ვიღებთ ზედაპირის ორ

სურათს, პირველი ასახავს კონტაქტურ ძალებს, მეორე კი – ლოკალურ გამტარობას.

ატომურ-ძალური მიკროსკოპისათვის, რასტრულ-გვირაბისებრი მიკროსკოპისაგან განსხვავებით, მნიშვნელობა არა აქვს, გამოსაკვლევე ზედაპირის უბანი დიელექტრიკია თუ არა. ამ მიკროსკოპის საშუალებით შეიძლება განვასორციელოთ სამგანზომილებიანი პროფილების კონტროლი და მივიღოთ ობიექტური ინფორმაცია შექმნილი სტრუქტურის თვისებების შესახებ.

განხილული უნივერსალური ინსტრუმენტის საშუალებით ურთიერთქმედებების ძალების გაზომვა ნანომეტრულ დიაპაზონში და ცალკეულ ატომებს შორისაც კი, ქმნის სრულიად ახალ საშუალებებს ნივთიერებათა ზედაპირის ფიზიკაში. შესაძლებელია მივიღოთ ინფორმაცია ადსორბირებული ელემენტების მოლეკულების განაწილების შესახებ, დავაკვირდეთ კრისტალების ზრდის კინეტიკას, მივიღოთ უზუსტესი მონაცემები ზახუნის ძალებსა და ნივთიერების ცვეთის შესახებ.

როგორც აღვნიშნეთ, ატომურ-ძალური მიკროსკოპში შესაძლებელია როგორც დიელექტრიკის, ასევე გამტარის ზედაპირის გამოკვლევა. ამის გამო იხსნებაბიოლოგიური მოლეკულების გამოკვლევისა ახალი გზები. მისი საშუალებით შესაძლებელია დავაკვირდეთ ცალკეულ უჯრედებს და მეტაბოლიზმისათვის აუცილებელ მოლეკულებს. განხილული დანადგარების საშუალებით მიღებულია ცოცხალ ობიექტებში სიცოცხლის პროცესების

მიმდინარეობის გამოკვლევის უნიკალური საშუალება სრულიად ახალ – ატომურ დონეზე.

აქვე აღვნიშნოთ, რომ დღეისათვის შექმნილია ისეთი დანადგარები, რომლებშიც გამოსაკვლევე ნივთიერების ატომი გახდა რეალური ობიექტი, რომელსაც არა მარტო გამოიკვლევენ, არამედ გადაადგილებენ საჭიროებისამებრ კონკრეტულ ადგილზე. ამ დანადგარებს იყენებენ ექსპერიმენტულ ფიზიკაში და გენურ ინჟინერიაში.

2.3. ნაზოსტენდი.

სტენდი შეიცავს 4 ნემსიან მასკანირებელ გვირაბისებრ მიკროსკოპს, მასკანირებელ ელექტრონულ მიკროსკოპს, მასკანირებელ ოქვიმიკროსკოპსა და ნაწილაკის გაქროლვის დროის დეტექტორს. აპარატურის ასეთმა შეთავსებამ შექმნა ინდივიდუალური ნანოსტრუქტურების ანალიზის, მანიპულირების, აგზნების მართვის და გამოსახულების მიღების უნიკალური შესაძლებლობა.

ამ მოწყობილობების საშუალებით შესაძლებელია ცალკეული ნანოკომპონენტების და მათი შეუღლებების სტრუქტურული ანალიზი და მოლეკულური იდენტიფიკაცია.

არსებობს აღნიშნული სტენდის გამოყენების ფართო სპექტრი:

1. ნანოელექტრონული მოწყობილობების აკრება და მათი ელექტრონი მახასიათებლების გაზომვა;

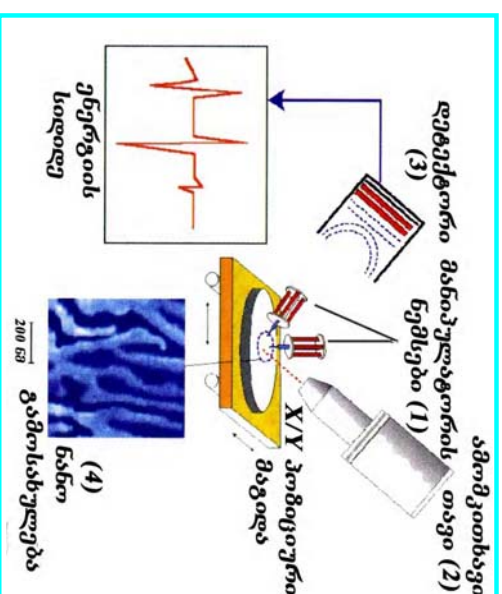
2. ნახშირბადის ნაწიმილაკების გამოკვლევა ტემპერატურის და დაჭიმულობის სენსორების შექმნის მიზნით;

3. ცალკეული ატომების და მოლეკულების სტრუქტურების შექმნის პროცესებზე გავლენის გამოკვლევა.

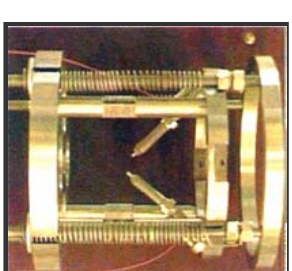
მე-12 ნახაზზე ნაჩვენებია 4-ნემსიანი ნაწილტვნი კომპლექტში. ნახაზზე ჩანს მასკანირებული გვირაბისტრი მიკროს-კოპის ნემსები (1), მასკანირებული ელექტრონული მიკროს-კოპის თავი (2) და მამუხარუჭებელი ველის მიკროპროცესორული ანალიზატორი (3), რომელიც გამოიყენება მეორადი ელექტრონების ენერჯის ანალიზის და გაქროლვის დროის განსაზღვრაზე დაყრდნობილი მას-სპექტროსკოპი-ისათვის.

ნაწილტვნი რეალიზებული ტექნოლოგიის მაგალითი.

ექსპერიმენტის სპეციფიკური მიზნებიდან გამომდინარე, ნემსები დანადგარში შეიძლება იყოს ლითონის ან იგი წარმოადგენდეს ნახშირბადის ნაწიმილაკებს. ნემსების დახრა იცვლება დამოუკიდებლად სამივე მიმართულებით გარჩევის სუბნანომეტრული უნარით. ამასთან, ყოველმა ნემსმა შეიძლება შეასრულოს პირველი ელექტროდის როლი. მე-13 ნახაზზე ნაჩვენებია ნემსის მართვისათვის გამოყენებული მანიპულატორი, რომელსაც შეუძლია იმუშაოს სამგანზომილებიან სივრცეში.



ნახ. 12. ნაწილტვნი



ნახ. 13. მანიპულატორი

მანიპული ნემსებს შორის შეიძლება ვცვალოთ 10 ნმ-დან რამდენიმე მმ-მდე. ნემსების პოტენციალების დაყენება ხდება დამოუკიდებლად ობიექტის მიმართ და ყოველ ნემსს შეუძლია დაიჭიროს მუდმივი დენი.

ექსპერიმენტში, რომელიც ილუსტრებულია მე-13 ნახაზზე, ობიექტის ელექტრონების ქიმიური პოტენციალი მიღებულია m_0 -ად. იმ შემთხვევაში, როცა ნემსების პოტენციალები შეიფარგლებიან როგორც $m_1 > m_2$, ჩნდება გამკაული გამტარობა პირველი ნემსიდან მეორისაკენ და მიიღება გვირაბისებრი დენი, რომელიც არაპირდაპირად ასახავს ნივთიერებაში ქიმიური პოტენციალის ცვლილებას.

განვიხილოთ ატომების იდენტიფიკაციის პროცედურა სტენდის გამოყენებით. ამ დროს ნემსის საშუალებით გასაანალიზებელი ობიექტის ზედაპირიდან ამოიგლიჯება ცალკეული ნაწილაკები.

ატომის ან მოლეკულის იდენტიფიკაცია ასე წარმოგვიდგება: პირველ ეტაპზე დანადგარის ნემსზე მიეწოდება მცირე ძაბვის იმპულსი. ამ დროს ნემსი განლაგებულია ობიექტის გასაანალიზებელი არის თავზე, შედეგად ამ არიდან ამოიგლიჯება ატომი და ხვდება ნემსზე, შემდეგ ნემსის ორიენტაცია იცვლება და მიემართება დეტექტორზე, ამის შემდეგ ნემსზე მიეწოდება მაღალი ძაბვის იმპულსი, რის გამოც ატომი ინტენსიურად ასხივებს კელს, რომელიც ხვდება დეტექტორში. დეტექტორი მუშაობს როგორც გაქროლვის დროის ანალიზატორი ატომის იდენტიფიკაციისათვის.

აქვე აღვნიშნოთ, რომ ამ სტენდის გამოყენებით შესაძლებელია ნაწიმილაკების ტესტირება. აღმოჩნდა რომ ნაწიმილაკის ელექტროული მახასიათებლები დამოკიდებულია მისი დეფორმაციის მაგნიტუდაზე.

ფირმა “Kleindex“ (გერმანია) აწარმოებს აღწერლ პრინციპებზე აგებულ სამრეწველო დანადგარებს, რომლებიც დანიშნულია ნაწილქროლოგების რეალიზაციისათვის სხვა და სხვა სახის ობიექტებთან მუშაობის დროს.

3. ნანოტექნოლოგიები საინფორმაციაო სისტემებში

3.1. არსებულ ტექნოლოგიათა შეზღუდვები

მიკროელექტრონიკის თანამედროვე ტექნოლოგია ეყრდნობა ოპტიკურ-პროექციულ ლითონგრაფიას, რომლის შესაძლებლობებიც შეზღუდულია ქვემოდან 0,1 მკმ-ის დონეზე. პროექციული ბეჭდვის ტექნოლოგია ნანომეტრულ დიაპაზონში (0,1 მკმ-ზე ნაკლები), რომელშიც გამოყენებულია ელექტრონული და იონური კონები, აგრეთვე, რენტგენული სინქრონიზებული სხივთკონები, ვერ აკმაყოფილებს ტოპოლოგიური ნახაზის აღბეჭდვის მოთხოვნებს. კერძოდ, შეუძლებელია მასობრივი წარმოების პირობებში 20×20 - მმ² ინტეგრალური სქემის ფართობზე, დაწყებული 0,001 მკმ-იდან 0,1 მკმ-მდე, 0,001 მკმ ზომის მქონე კომპონენტების აღბეჭდვა. ამგვარად, მიკროელექტრონიკის განვითარების პირველი მუხრუჭი არის ლითონგრაფიის ტექნოლოგია.

ფუნქციური მიმართულებით მიკროელექტრონიკის განვითარებაში მოსალოდნელია ტრანზისტორის მუშაობის უნარის შენარჩუნება მისი საკეტის 0,05 მკმ სიგრძემდე. შემდეგ, 1450 ნმ-მდე ზომების ინტერვალში იმუშავებს კლასიკური ნანოტრანზისტორი, რომლის თვისებებში უმუხლოდ გამოიყვანდება კვანტური მოვლენები. 0,141 ნმ-მდე დიაპაზონში წინა პლანზე გამოდიან კვანტური

წერტილები, რომელთა ფუნქციონირება განისაზღვრება კვანტური მექანიკის კანონებით.

როგორც აღვნიშნეთ, ნახევარგამტარებზე მინარეგების დალექვის (ეპიტაქსია) მეთოდები ლითონგრაფიული შაბლონების დახმარებით, პრაქტიკულად მიუახლოვდა თავის ზღვარს არა მარტო ზომების მხრივ, არამედ ტოპოლოგიურადაც. საქმე ისაა, რომ ფოტოლითონგრაფიის დღევანდელი ტექნოლოგიები გეპბლემენ მხოლოდ პლანარული სტრუქტურების დამზადების საშუალებას, როდესაც ყველა ელემენტი და გამტარი განლაგებულია ერთ სიბრტყეზე, რაც ქმნის მნიშვნელოვან შეზღუდვას გამოყენებულ სქემატექნიკისათვის. ასეთი ტექნოლოგიით არ შეიძლება განხორციელდეს პროგრესული სქემატექნიკური გადაწყვეტილებები. კერძოდ, აღნიშნული ტექნოლოგიით არ შეიძლება დამზადდეს ნეირონული სქემები, რომელთაც დიდი პერსპექტივა აქვთ.

სქემატექნიკურ დონეზე ძირითად მამუხრუჭებელ როლს ასრულებენ **RC**-პაუზები ინტეგრალური სქემის შემადგენელ წერტილებში. ამ პრობლემის გადაწყვეტა შესაძლებელია ინტეგრალური სქემის ისეთ არქიტექტურაზე გადასვლისას, რომელშიც საერთოდ არ არის „გრძელი“ შეერთებები.

ნანოტექნოლოგიის გამოყენებით მოხდება გადასვლა არსებული პლანარული სტრუქტურებიდან მოცულობით მიკროსქემებზე, რომელთა აქტიური ელემენტების ზომები

შეცვირდება მილეკულების ზომებამდე. შედეგად კომპიოტერის მუშა სიხშირე მაღალწევს ტერაჰერცულ სიხშირეს. გავრცელებას პოვებენ ისეთი სქემური გადაწყვეტები, რომლებშიც გამოიყენება ნეიონის მსგავსი ელემენტები, გაჩნდება სწრაფმოქმედი ხანგრძლივი მესიერება ცილების მსგავს პოლიმერებსზე, რომელთა ინფორმაციული ტევადობა გაიზომება ტერაბიტებით. საბოლოოდ შესაძლებელი გახდება ადამიანის და კომპიუტერის ინტელექტის “პირიდიზაცია”.

ატომების დონეზე მასალების და ნაკეთობების ნანოტექნოლოგიური კონტროლი უკვე ფართოდ გამოიყენება მრეწველობის ზოგიერთ სფეროში. რეალური მაგალითი ციფრული ვიდეოდისკები, რომელთა წარმოება შეუძლებელი იქნებოდა მატრიცების ნანოტექნოლოგიური კონტროლის გარეშე.

ასეთ ფონზე აქტიურად ვითარდება ნანოტექნოლოგიური მეთოდები, რომლებიც გვაძლევენ ისეთი აქტიური ელემენტების (ტრანზისტორები, დიოდები) შექმნის საშუალებას, რომელთა ზომა უახლოვდება მილეკულის ზომას და შესაძლებელი იქნება მათგან მრავალფენიანი, სამგანზომილებიანი სქემების ფორმირება. მიკროელექტრონიკა გახდა პირველი დარგი, რომელშიც განხორციელდა „ატომური აკრება“ სამრეწველო მასშტაბით.

3.2. ნანოელექტრონიკა

ბოლო დროს დამუშავებული ნანოელემენტები, როგორც საინფორმაციო სისტემების ძირითადი ელემენტები, თავის მინიატურულობით, სწრაფქმედებით და მოხმარებული სიმძლავრით სერიოზული კონკურენტებია ტრადიციული ნახევარგამტარული ტრანზისტორებისა და მათზე აგებული ინტეგრალური მიკროსქემებისათვის.

დღეს ტექნოლოგია მიუახლოვდა თეორიულ ზღვარს, დამატახსოვროს და გადასცეს ერთი ბიტი ინფორმაცია ერთი ელექტრონის საშუალებით, რომლის ლოკალიზაცია სივრცეში შეიძლება მოხდეს ერთი ატომით, ეს კი ნიშნავს ცალკეული ტრანზისტორის ზომის შემცირებას 10 ნმ-მდე და მუშა სიხშირის გაზრდას 10^{12} ჰც-მდე.

მე-14-ე ნახ-ზე (გვ. 60) ნაჩვენებია მონაცემთა შენახვის მოდელი ორი სხვადასხვა ატომისაგან მიმდევრული სტრუქტურის შექმნის გზით ალმასის ფუძეზე. ასეთი ტექნოლოგიების დროს შესაძლებელია მივიღოთ ჩაწერის სიმჭიდროვე 10^{15} ბიტი/სმ². წამკითხავ მოწყობილობად ნაპოვნია ზონდური მოლეკულა, რომელსაც შეუძლია გაარჩიოს აღნიშნული ორი ატომი. მისი რეაქცია გამოიხატება ორიენტაციის ცვლილებით.

ნანომაშტაბებში გადასვლის დროს წინ იწევს განსახილველი ობიექტების კვანტური თვისებები. როგორც აღინიშნა, კვანტური მექანიკის პოზიციებიდან ელექტრონის მოძრაობა შეიძლება წარმოდგენილი იყოს ტალდით და აღიწეროს

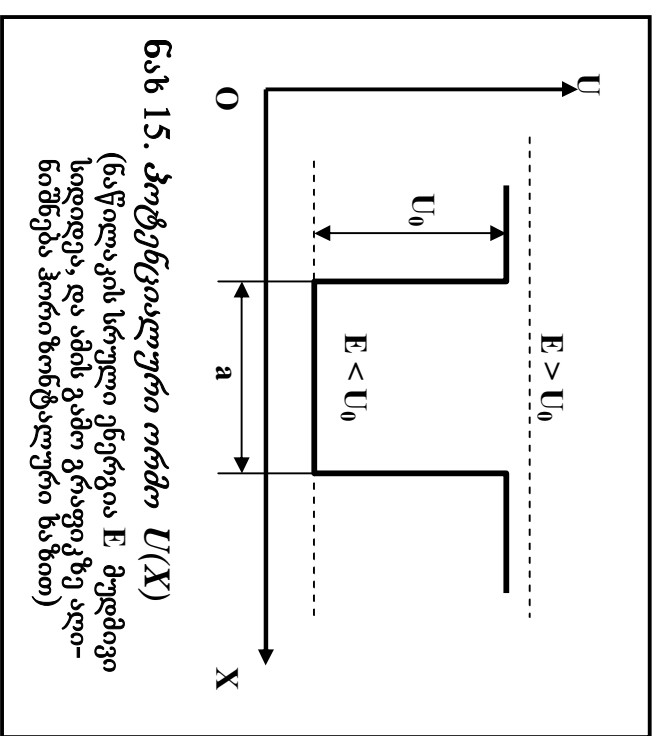
შესაბამისი ტალღური ფუნქციით. ამ ტალღის გაკრცელება ნაწილაკების მყარ სხეულებში განისაზღვრება კვანტური შეზღუდვებით, ინტერფერენციით და პოტენციურ ბარიერში გვირაბისებრი გადასვლის შესაძლებლობებით.

3.2.1. პოტენციალური ორბი.

პოტენციალური ორბი წარმოადგენს სივრცის შეზღუდულ არეს, რომელიც განისაზღვრება ნაწილაკების ურთიერთქმედების ფიზიკური ბუნებით. ამ არეში ნაწილაკის პოტენციალური ენერგია ნაკლებია, ვიდრე მის გარეეთ. ტერმინი “პოტენციალური ორბი” წარმოიშვა იმ გრაფიკის ფორმისაგან, რომელიც ასახავს ბალთა ველში ნაწილაკის პოტენციალური ენერგიის (U) დამოკიდებულებას მის მდგომარეობაზე სივრცეში. ერთგანზომილებიანი მოძრაობის შემთხვევაში აღნიშნული დამოკიდებულება განისაზღვრება X კოორდინატით (ნახ. 15).

მე-15 ნახ-ზე ნაჩვენებია გამოსახულება $U(X)$ ფორმა ჩნდება მიზიდულების ბალთა ველში. პოტენციალური ორბის მახასიათებლებს წარმოადგენენ სივანე a (მანძილი რომელზეც ვლინდება პოტენციალური ბალთა მოქმედება) და სიღრმე U_0 (რომელიც უდრის ორბის “კიდებზე” და “ფსკერზე” მყოფი ნაწილაკის პოტენციალთა ენერგიის სხვაობას. ენერგიის სიდიდეს “ფსკერზე” ღებულობენ როგორც მინიმუმს).

პოტენციალური ორბის ძირითადი თვისებაა ნაწილაკის შეკავების უნარი, რომლის მთლიანი ენერგია E ნაკლებია U_0 -ზე. ასეთი ნაწილაკი პოტენციალური ორბის შიგნით იმყოფება ბმულ მდგომარეობაში.



კლასიკური მექანიკის მიხედვით ნაწილაკი $E < U_0$ ენერგიით ვერ გამოვარდება პოტენციალური ორბიდან და მუდმივად იმობრავებს სივრცის შეზღუდულ არეში პოტენციალური ორბის შიგნით. ნაწილაკის მდგომარეობა

ორმის “ფსკერზე” შეესაბამება მდგრად წონასწორობას ნაწილაკის ნულლოვანი კინეტიკური ენერგიით. თუ $E > U_0$, ნაწილაკი გადალახავს მიზიდულების ძალების მოქმედებას და თავისუფლად ტოკებს ორმის.

კლასიკურისგან განსხვავებით, კვანტურ მექანიკაში პოტენციალურ ორმოში ბმულ მდგომარეობაში მყოფი ნაწილაკის ენერგია შეიძლება მიიღოს მხოლოდ განსაზღვრული დისკრეტული მნიშვნელობები, რაც ნიშნავს, რომ არსებობს მხოლოდ ენერგიის დისკრეტული დონეები. მაგრამ ასეთი იერარქიული აგებულება შესაძლებელია მხოლოდ სისტემებისათვის, რომლებსაც აქვს მიკროსკოპული ზომები და მასები.

რიგის მიხედვით, დონეებს შორის მანძილი ΔE -ს სიდიდე m მასის ნაწილაკისათვის, a სივანის მქონე “ღრმა” ორმოში განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\Delta E \sim \frac{\hbar^2}{ma^2}$$

ენერგიის უმცირესი (ძირითადი) დონე იმყოფება პოტენციალური ორმის “ფსკერთან”.

მცირე სიღრმის პოტენციალურ ორმოში

$$U_0 \leq \frac{\hbar^2}{ma^2}$$

და ნაწილაკს ბმული მდგომარეობა შეიძლება არ ჰქონდეს.

ამის გარდა, კვანტური მექანიკის შესაბამისად, ნაწილაკმა, რომელიც იმყოფება პოტენციალურ ორმოში სასრული სისქის “კედლებით”, შეიძლება პოტენციალური ორმო გვირაბისებრი ეფექტის შედეგად დატოვოს იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც მისი ენერგია U_0 –ზე ნაკლებია. პოტენციალური ორმის ფორმა და მისი ზომები განისაზღვრება ურთიერთმოქმედი ნაწილაკების ფიზიკური ბუნებით. მაგალითად, მნიშვნელოვანი შემთხვევაა კულონისებური პოტენციალური ორმო, რომელიც ადწერს ბირთვის მიერ ატომის ელექტრონის მიზიდულობას.

3.2.2. გვირაბისებრი ეფექტი

გვირაბისებრი ეფექტი არის მიკრონაწილაკის მიერ პოტენციალური ბარიერის გადალახვა, იმ შემთხვევაში, როდესაც მისი სრული ენერგია (რომელიც გადალახვის პროცესში რჩება უცვლელი) ნაკლებია ბარიერის სიმაღლეზე.

გვირაბისებრი ეფექტი კვანტური ბუნების მკაფიო გამოვლინებაა, რომელიც წარმოუდგენელია კლასიკურ მექანიკაში.

გვირაბისებრი ეფექტის ინტერპრეტაცია სრულდება განუსაზღვრელობის თანაფარდობის საფუძველზე.

კლასიკური ნაწილაკი არ შეიძლება შევიდეს U_0 სიმაღლის პოტენციალურ ბარიერში და იქ იმყოფებოდეს,

თუ მისი ენერგია $E < U_0$, რადგან ნაწილაკის კინეტიკური ენერგია

$$\frac{p^2}{2m} = E - U_0$$

ხდება ამ შემთხვევაში უარყოფითი, და მისი იმპულსი p - წარმოსახვითი სიდიდე (m - ნაწილაკის მასა).

აღმოჩნდა, რომ ეს პირობა მიკრონაწილაკებისათვის არ არის ამსოლუტური ზღვარიტება.

განუსაზღვრელობის თანაფარდობის შედეგად ბარიერის შიგნით სივრცის არეში ნაწილაკის ფიქსაცია განუსაზღვრელად ქმნის მის იმპულსს. ამის გამო არსებობს ნულსიგან განსხვავებული ალბათობა, მიკრონაწილაკი გამოვავლინოთ კლასიკური მექანიკის თვალსაზრისით აკრძალულ არეში. შესაბამისდ, ჩნდება განსაზღვრული ალბათობა ნაწილაკის მიერ პოტენციალური ბარიერის გავლისა, რასაც პასუხობს გვირაბისებრი ეფექტი.

ეს ალბათობა მით უფრო მეტია, რაც ნაკლებია ნაწილაკის მასა, რაც უფრო ვიწროა პოტენციალური ბარიერი და რაც უფრო ნაკლები ენერგია აკლია ნაწილაკს ბარიერის სიმაღლის მიღწევამდე (რაც ნაკლებია სხვაობა $U_0 - E$). ნაწილაკის მიერ ბარიერის გავლის ალბათობა არის ძირითადი ფაქტორი, რომელიც განსაზღვრავს გვირაბისებრი ეფექტის ფიზიკურ მახასიათებლებს.

ერთგანზომილებიანი პოტენციალური ბარიერის დროს ასეთ მახასიათებლად გვეკლინება ბარიერის გამჭვირვალობის კოეფიციენტი, რომელიც უდრის მის გავლით გასული ნაწილაკების ნაკადის ფარდობას ბარიერზე მიწოდებულ საერთო ნაკადთან.

სამგანზომილებიანი ბარიერის შემთხვევაში, რომელიც შემოსაზღვრავს სივრცის შეკრულ არეს დაწეული პოტენციალური ენერგიით (პოტენციალურ ორმოს), გვირაბისებრი ეფექტის მახასიათებელია ამ არიდან ნაწილაკის გავლის W ალბათობა დროის ერთეულში. $W - 1$ სიდიდე უდრის პოტენციალური ორმოს შიგნით ნაწილაკის რხევების სიხშირის ნამრავლს ბარიერის გავლით გასვლის ალბათობაზე.

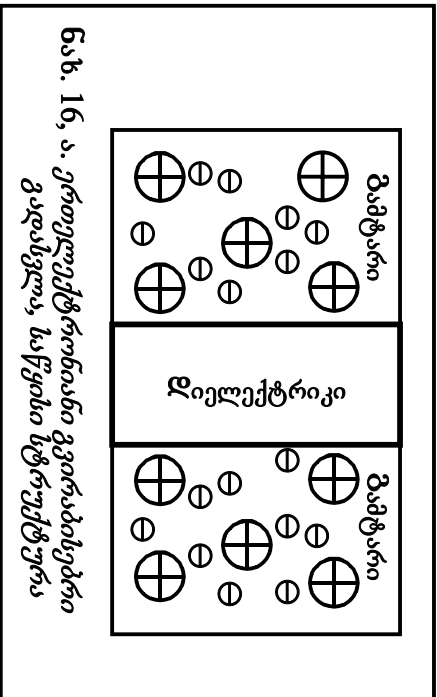
პოტენციალურ ორმოსში მყოფი ნაწილაკების გარეთ “გაუონვის” შესაძლებლობა იწვევს იმას, რომ ნაწილაკების შესაბამისი ენერგეტიკული დონეები იღებენ სასრულ სივანეს, რომლის რიგი შეესაბამება $\leftarrow W - 1$, ნაწილაკების ეს მდგომარეობები კი ხდება კვაზისტაციონარული.

3.2.3. ერთეულქტრონიანი გვირაბისებრი გადსვლა.

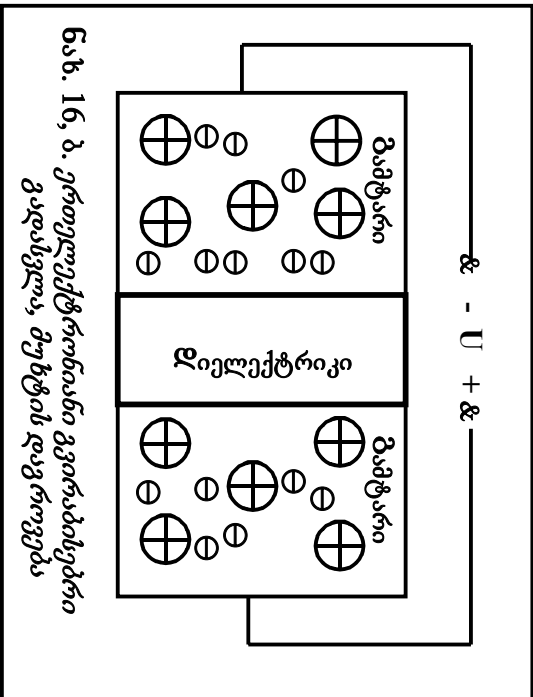
კვანტური შეზღუდვის სპეციფიკური გამოვლინებაა ერთეულქტრონიანი გვირაბისებრი გადსვლა კულონისებრი ბლოკადის პირობებში.

განვიხილოთ მაგალითი: სტრუქტურა - ლითონი-დielekტიკი-ლითონში ელექტრონის გადასვლის ეფექტი.

დასაწყისში საზღვარი ლითონისა და დიელექტრიკის შორის ელექტრულად ნეიტრალურია (ნახ. 16, ა). ლითონის არეკბთან პოტენციალის მოდების შედეგე ამ საზღვარზე და- იწყება მუხტის შეგროვება (ნახ. 16, ბ).



ნახ. 16, ა. ერთელექტრონიანი გვირაბისებრი გადასვლა, საწყისი სტრუქტურა

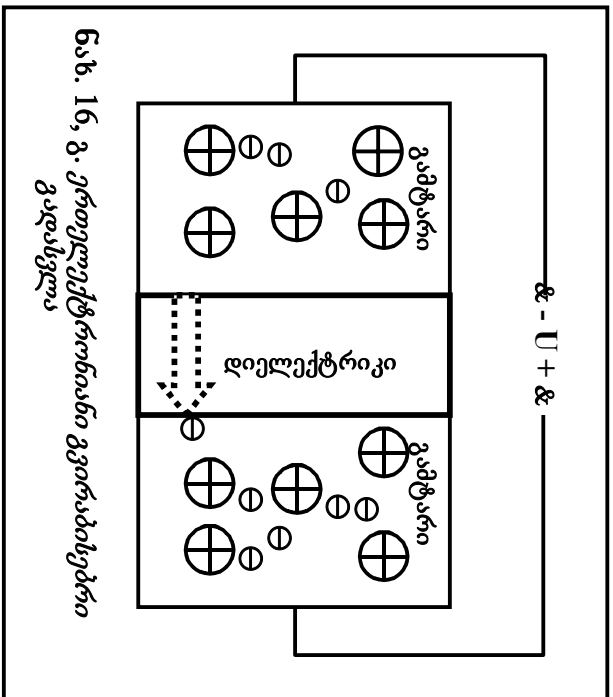


ნახ. 16, ბ. ერთელექტრონიანი გვირაბისებრი გადასვლა, მუხტის დაგროვება

ეს გაგრძელება იქამდე, ვიდრე მუხტის სიდიდე არ გახდება საგმარისი ერთი ელექტრონის მოწყვეტისა და დიელექტრიკში შემდგომი გვირაბისებრი გადასვლისათვის (ნახ. 16, გ).

გვირაბისებრი გადასვლის შემდეგ სისტემა უბრუნდება საწყის მდგომარეობას. მოდებული გარე ძაბვის შენარჩუნების პირობებში ყველაფერი მეორდება. ამგვარად, ასეთ სტრუქტურაში მუხტის გადატანა ხდება ულუფებად, რომელიც ერთი ელექტრონის მუხტის ტოლია.

ერთ-ერთი პირველი ნანოელექტრონული ელემენტი დამუშავდა რეზონანსულ-გვირაბისებრი გადასვლის პრინ- ციპზე. ეს ელემენტი არის ორბარბიერიანი დიოდი



ნახ. 16, გ. ერთელექტრონიანი გვირაბისებრი გადასვლა

კვანტურ ორმოებზე, რომლებშიც ორმოების პოტენციალი და შესაბამისი რეზონანსული პირობები კონტროლირდება მესამე ელექტროდით.

გვირაბისებრი ტრანზისტორი შედგება მიმდევრობით ჩართული ორი გვირაბისებრი გადასვლელისაგან (ნახ. 17).

ინდივიდუალური ელექტრონების გვირაბისებრი გადასვლები კონტროლირდება კულონისებრი ბლოკადით, რომელიც იმართება ტრანზისტორის აქტიურ არეში მოდებულ პოტენციალით, კონკრეტულად ორ დიექტი-ტრიკულ ფუნქსიონის.

განვიხილოთ ტრანზისტორის ძირითადი დამახასიათებელი თვისებები და მათი ტრანსფორმაცია მისი ზომების ცვლილების დროს. ტრანზისტორის ზომების 0,1 მკმ-ზე ნაკლებ სიდიდემდე შემცირებისას, იწყებს გამოჩენას როგორც მუხტისებური, ისე განზომილებადი კვანტური ეფექტები. ამ დროს ტრანზისტორი კარგავს თავის ტრადიციულ თვისებებს და მის ფუნქციონირებაში თავს იჩენს მკაფიოდ გამოხატული გვირაბისებრ-რეზონანსული თვისებები. ამის შედეგად შესაბამის ელემენტებში ძლიერად გამოხატულია არაწრფივი და დინამიკური თვისებები, რის გამოც მათზე აგებული ინფორმაციის დამუშავების სისტემებისათვის არ გამოდგება დაპროექტების ტრადიციული ხერხები.

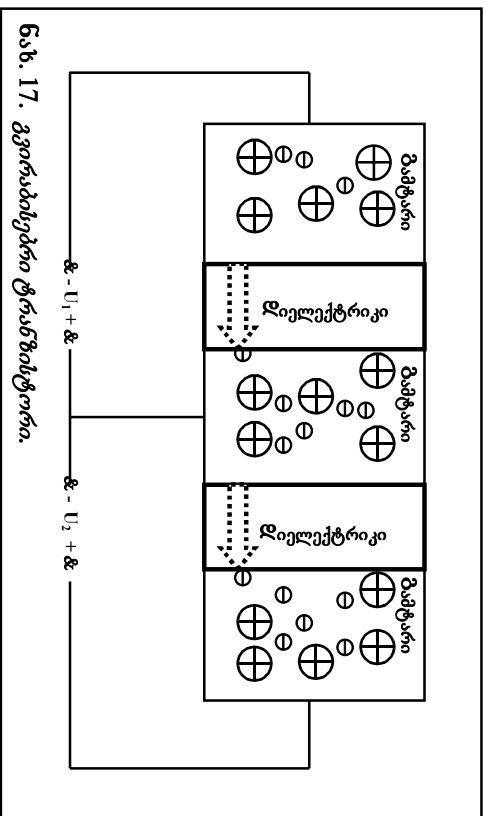
ნანოელექტრონიკის დინამიური ელემენტისა ერთ-ერთი ასეთი ორიგინალური თვისება არის ის, რომ მათში ხდება შესასვლელის და გამოსასვლელის დროში განცალკევება.

ამით ისინი რადიკალურად განსხვავდებიან ტრადიციული ტრანზისტორებისაგან, რომლებშიც შესასვლელი და გამოსასვლელი განცალკევდება სივრცეში.

დროში განცალკევება აიხსნება იმით, რომ სიმშვიდის მდგომარეობაში დინამიკური ნანოელემენტი მდნობარე არის გარე ზემოქმედებების მიმართ. როდესაც ეს ზემოქმედებები მაღალხერხეულ ზღვრულ სიდიდეს, ხდება ელემენტის აგზნება, და ის იჩენს არამგრძობილობას გარე ზემოქმედებების მიმართ დროის გარკვეულ პერიოდში. ასეთ ნანოელემენტს როგორც დინამიკურ სისტემას, საკუთარ ფაზურ სივრცეში აქვს ზღვრული ციკლი, რომელიც გაივლის ერთ ან რამდენიმე განსაკუთრებული წერტილის მიდამოებში. ამის გათვალისწინება ხდება სქემების აგების დროს.

ზემოთ ჩამოთვლილი თავისებურებების გათვალისწინებით აიგება ელემენტური ბაზა ინფორმაციის დამუშავების სისტემებისათვის, რომლებიც თავიანთი ფუნქციონირებით უახლოვდება ნერვულ ბოჭკოებს.

თუ წარმოვიდგენთ ერთ ბიტს, როგორც ერთი ელექტრონის არსებობას ან არარსებობას, მაშინ მექანიკის სქემა 100 გიგაბიტის ტევადობით განლაგდება კრისტალზე, რომლის ფართობია 6 სმ². 1993 წელს დამუშავდა ციფრული გადამრთველების ახალი ოჯახი ატომურ და მოლეკულურ ზონარებზე. შეიქმნა ლოგიკური ელემენტები “და- არა” და “ან-არა”. ასეთი სტრუქტურების ზომა 10 ნმ-მდეა და მუშა სიხშირე 10¹² ჰერცს აღწევს.



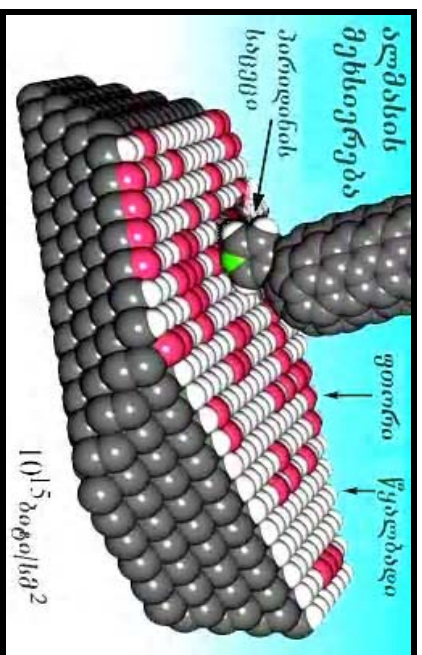
58

3.3. კვანტური წერტილები

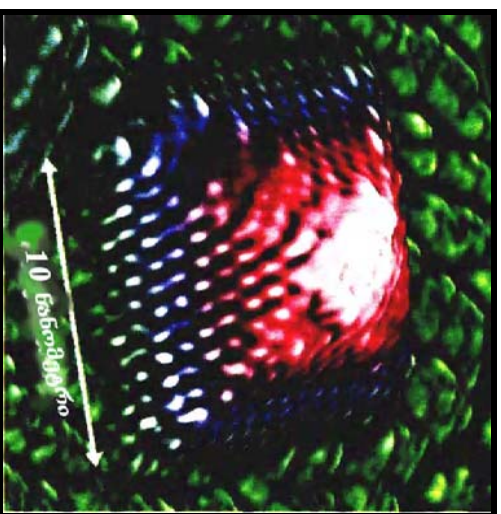
კვანტური წერტილები ნანომეტრის ზომის „ყუთებია“, რომლებსაც შეუძლიათ შეინახონ ან გამოასხივონ ელექტრონები. ფიზიკურად „ყუთები“ არის გოგანტური ზომის მოლეკულები, რომლებიც შედგება ჩვეულებრივი არაორგანული ნახევარგამტარული ნივთიერებების 10^3 - 10^5 ატომებისგან. კვანტური წერტილები გვამძლევენ კლასიკური კვანტური სტრუქტურების გამოკვლევის სამუალებას ლაბორატორიულ პირობებში ნულოვანი განზომილების ზღვარზე (არაგითარი პერიოდულობა). აღმოჩენილია, ამ წერტილების ანომალური ქცევა, რომლის გამოყენებით შეიძლება შეიქმნას სხვადასხვა მოწყობილობები, კერძოდ: მაღალეკონიმიური კვანტური ლაზერი, გამომსხივებელი დიოდი, მზის ბატარეების უჯრედები, ერთელექტრონიანი ტრანზისტორები.

მე-18-ე ნახ-ზე ნაჩვენებია კვანტური წერტილი, რომელიც მიღებულია **A** მასალის მართვადი გამაგრებით **B** მასალის სუბსტრატზე. აღსანიშნავია, რომ **A**-ს „კუბული“ პირამიდის ფორმისაა. ამ წერტილის გამოკვლევის დროს აღმოჩენილ იქნა კულონური ბლოკადის ეფექტი, როდესაც წერტილის ელექტრონებით ჩატვირთვა იწვევს მათ კულონურ განზიდვას არსებული ელექტრონებით.

კვანტური წერტილების მიღების კიდევ ერთი საშუალება დაკავშირებულია კვანტური ორბიტების ზომათა ფლუქ-



ნახ. 14. ნანომესიერება



ნახ. 18. კვანტური წერტილი

ტუაციათან. ფლუქტუაცია არღვევს პერიოდულობას ორივე განზომილებაში და ამით იწვევს წერტილის წარმოქმნას. განზომილებიანი კვანტური წერტილები ძირითადი ტექნოლოგიური ელემენტია ნანოელექტრონიკაში.

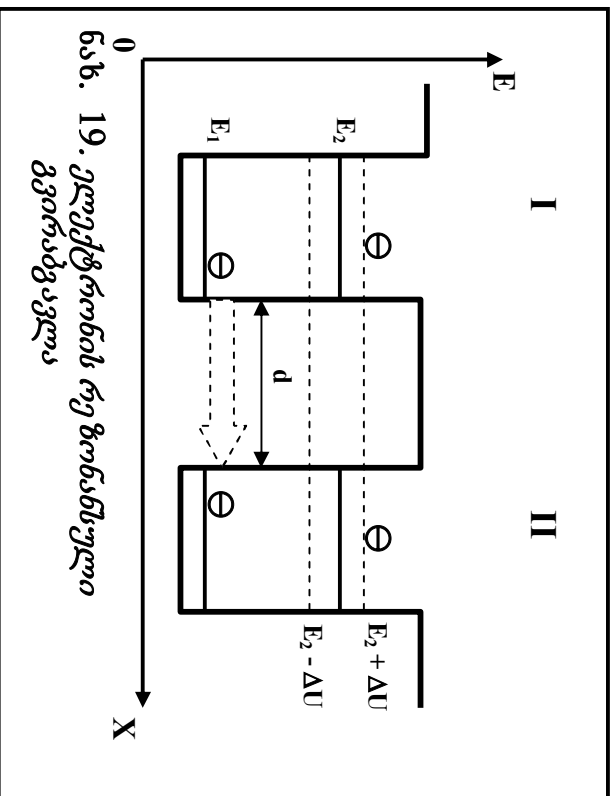
3.3.1. ელექტრონების რეზონანსური გვირაბეკვა

როგორც აღინიშნა, ნანოელექტრონული მოწყობილობების ფუნქციონირების პრინციპები დაფუძნებულია კვანტურ ეფექტებზე. კერძოდ, მნიშვნელოვან ინტერესს იწვევს ნანოსტრუქტურების ურთიერთქმედება ელექტრომანოსტურ ველთან. ეს ურთიერთქმედება განსაკუთრებით თვალსაჩინოდ ამჟღავნებს ელექტრონების ტალღურ თვისებებს და განსაზღვრავს რიგ ანომალურ მოვლენას.

მაგალითად, დადგენილი სიმძლავრის და სიხშირის ლაზერული გამოსხივების მოქმედება ორიორმიან ნანოსტრუქტურაზე იწვევს ელექტრონის ლოკალიზაციას ერთ-ერთ ორმოში. შესაძლებელია უკუეფექტიც: ელექტრომაგნიტური იმპულსის ზემოქმედების შედეგად ელექტრონის რეზონანსული გვირაბეკვა ორ დაცილებულ კვანტურ ორმოს შორის, რომლებიც შეიძლება წარმოადგენდეს კვანტურ წერტილებს.

განვიხილოთ ორი იდენტური კვანტური ორმო, ისეთი, რომ იზოლირებულად მყოფ თითოეულ მათგანს გამტარობის ზონაში აქვს ორი განზომილება-კვანტური დონე E_1 და E_2 ენერგიით.

ეს დონეები ერთ კვანტურ ორმოში აღწერენ, შესაბამისად, ელექტრონის ძირითად და აგზნებულ მდგომარეობებს. თუ d მანძილი კვანტურ ორმოებს შორის შედარებით დიდია, მაშინ, პირველი კვანტური ორმოს ქვედა დონეზე



ნახ. 19. ელექტრონის რეზონანსული გვირაბგაყვლა

მოთავსებული ელექტრონი დარჩება იქვე ხანგრძლივი დროის განმავლობაში, რადგანაც ელექტრონის უშუალო გვირაბგაყვლის ალბათობა ორ კვანტურ ორმოს შორის ექსპონენციალურად მცირდება d -ს ზრდასთან ერთად.

ჩავთვალოთ რომ E_2 -ს სიდიდე ახლოს არის ორი კვანტური ორმოს გამყოფი პოტენციალური ბარიერის ზღვართან. მაშინ აგზნებული დონის “გადაგვიარების“ აცილება მიგვიყვანს ორი ახლომდებარე დონის გაჩენამდე, რომ-

ელთა ენერგიაა, შესაბამისად $E_2 - \Delta U$ და $E_2 + \Delta U$. ამ ახალ დონეებს შესაბამისად ტალღური ფუნქციები, რომლებიც ნულისაგან განსხვავდებიან ორივე კვანტურ ორმოში. ანუ, კვანტური მექანიკის პრინციპების შესაბამისად, ელექტრონი, რომელიც იმყოფება ერთ-ერთ ასეთ დონეზე, ერთდროულად იმყოფება ორივე კვანტურ ორმოში.

აქედან გამომდინარე, თუ მოკათავებთ ელექტრონს ერთ-ერთი კვანტური ორმოს ქვედა დონეზე და შემდეგ მოგახდენთ გავლენას მთელ სისტემაზე (ორივე კვანტურ ორმოზე) ელექტრომაგნიტური ველით, რომლის სიხშირე პრაპორციულია $\zeta_2 E_2 - \Delta U - E_1$ ან $\zeta_2 E_2 + \Delta U - E_1$, მაშინ ადგილი ექნება ელექტრონის რეზონანსულ გადასვლას ქვედა დონიდან ერთ-ერთ ზედა დონეზე.

როგორც აღვნიშნეთ, ელექტრონი ზედა დონეზე აღმოჩენისთანავე “გაითხუანება“ ორივე კვანტურ ორმოში. თუ გაავარებლებთ ზემოქმედებას სისტემაზე იმავე სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველით, შესაძლებელი გახდება ამ ელექტრონის დაშვება ზედა დონიდან ქვედაზე. მაგრამ უკვე მთორე კვანტურ ორმოში.

შესაძლებელია ისე შევარჩიოთ ელექტრომაგნიტური იმპულსის სიხშირე, ინტენსიურობა და ხანგრძლივობა, რომ ელექტრონი გადავიდეს პირველი კვანტური ორმოს ქვედა დონიდან მთორე კვანტური ორმოს ქვედა დონეზე ერთი ტოლი ალბათობით. ველის მოხსნის შემდეგ, ელექტრონი დარჩება ლოკალიზებული მთორე კვანტურ ორმოში.

განხილული ეფექტი შეიძლება გამოვიყენოთ ლოგიკურ ელემენტი “არა“-ს კონსტრუირებისათვის, რომელიც შესაძლებელს უარყოფის ფუნქციას კვანტურ კომპიუტერში. აგრეთვე, შესაძლებელია ბისტაბილური უჯრედის რეალიზაცია.

ამგვარად, ნანოელექტრონიკის საფუძველია კვანტური წერტილები და ერთელექტრონიანი ტრანზისტორები. აღნიშნული ელემენტები ეყრდნობა ერთელექტრონიან ტრანსპორტირებას ნანოდონეზე გვირაბისებრი ეფექტის დროს.

აქვე უნდა აღინიშნოს კიდევ ერთი ახალი თვისება, რომელიც ჩნდება ნანოელექტრონიკაში. თუ ტრადიციულ მიკროელექტრონიკაში კომპონენტები თამაშობდნენ პასიურ როლს, ნანოელემენტებს შეიძლება გააჩნდეს სენსორების ფუნქცია.

ნანოტექნოლოგიის ერთ-ერთი ძირითადი უპირატესობაა შრე-და-შრე აწყობის პროცესის რეალიზაცია. ამ პროცესის დროს სრულდება სამგანზომილებიანი ნანოელექტრონული სქემების აწყობა. ასეთ პირობებში შესაძლებელია კომპონენტთა შორისი შეერთებების ოპტიმიზაცია და მინიმუმამდე დაყვანა. ამასთან, ასეთ პირობებში შესაძლებელია თითოეული ელემენტის სქემის მაქსიმალური რაოდენობის ელემენტებთან შეერთება.

4. ნანობიოტექნოლოგია

დღეისათვის დაბეჯითებით შეიძლება ითქვას, რომ ბიოტექნოლოგია არის საინფორმაციო ტექნოლოგიის ნაწილი. სპეციფიკა მხოლოდ ისაა, რომ ბიოლოგიურ ობიექტებში ინფორმაცია ცილების მოლეკულებშია „ჩაკეტილი“.

თუ თანამედროვე მიკროელექტრონიკის ელემენტურ ბაზას ახასიათებს $10^{-14} \div 10^{-12}$ ჯ/ბიტ ენერგეტიკული დანახარავები, ცოცხალ ორგანიზმებში არსებობს „ბიოლოგიური კომპიუტერები“, რომლებიც უზრუნველყოფენ $5 \div 7$ თანრიგით მეტ ეფექტურობას. ასეთი მაღალი მაჩვენებლების მიღწევისათვის არსებობს მხოლოდ ორი შესაძლებლობა: სიგნალების ენერჯის შემცირება, რომელიც შესაძლებელია განხორციელდეს სითბური ხმაურის დონემდე და გამოთვლებისათვის დახარჯული ენერჯის ხელმეორედ გამოყენება. ბოლო შემთხვევაში გამოთვლებს აქვს რევერსიული, ე.ი. თერმოდინამიკულად შექცევადი ხასიათი.

ამის გარდა, ბიოლოგიურ მოლეკულებს და სისტემებს აქვთ ისეთი ატრიბუტები და მახასიათებლები, რომლებიც განაპირობებენ მათ განსაკუთრებულ ადეკვატურობას ნანოტექნოლოგიურ გამოყენებებში.

4.1. ბიობიექტების სინთეზი და აკრება.

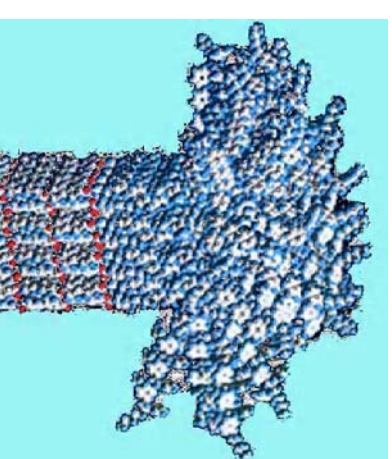
უპირველესად, უნდა აღინიშნოს, რომ ბუნებამ შექმნა ცოცხალი სისტემების „სამშენებლო ბლოკების“ შეზღუდული რაოდენობა. ამ ბლოკებიდან აკრებილი არსებული ბიობიექტების სტრუქტურები განისაზღვრება შესაბამისი დნმ-ით. თეორიულად ნაჩვენებია, რომ ამ ბლოკებიდან შეიძლება აიკრიბოს შესაძლებელი სტრუქტურების შეუზღუდავი რაოდენობა. ნანობიოტექნოლოგია საშუალებას გვაძლევს ამ ბლოკების გამოყენებით შეიქმნას ნივთიერებები, რომლებიც არ არსებობს ბუნებაში.

ბიოლოგიური მოლეკულების მართვადობა და იერარქიული აკრების შესაძლებლობა, აგრეთვე, თვითაკრების უნარი მათ აქცევს იდეალურ ობიექტებად ნანოტექნოლოგიებში გამოყენებისათვის. ბიოლოგიური მონომოლეკულებიდან პოლიმერული მოლეკულების თვითაწყობის პროცესი შეიძლება განვიხილოთ როგორც ნიმუში ნანოტექნოლოგიებისათვის. ბიომოლეკულების იერარქიული თვითაწყობა ის საკვანძო ატრიბუტია, რომელიც განსაზღვრავს მათ გამოყენებას ნანოტექნოლოგიებში. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ თვითაწყობა შეიძლება შესრულდეს სამგანზომილებიან სივრცეში.

მე-20 ნახ-ზე ნაჩვენებია ნანოტექნოლოგიის საშუალებით დამზადებული მემბრანის მაგალითი, როგორც წინასწარ მოცემული ტოპოლოგიით სტრუქტურის სინთეზი.



ნახ. 20. თვითაწყობა - ბიოლოგიური მემბრანის ფრაგმენტი



ნახ. 21. კლასტერის თვითაწყობა: „ცოცხი“

მე-21-ე ნახ-ზე ნაჩვენებია ნანოტექნოლოგიით მიღებული სტრუქტურა განსაკუთრებული სიმტკიცის მახასიათებლებით.

4.2. ბიოლოგიური მკვრივობის მახასიათებელი.

როგორც უკვე აღინიშნა, ნანოტექნოლოგიის საფუძველია პოლიმერული ანტიბიოტი-რეპლიკატორი, რომელიც ახორციელებს აქრებს პოლიმერული მარტივით. ყველაზე ადეკვატური მაგალითია ცოცხალი უჯრედი, რომელიც ქმნის სხვადასხვა პოლიმერულ, მათ შორის, თავის ასლსაც დნმ-ს მართვის ქვეშე.

დნმ-ს მოლეკულა არის ბიოპოლიმერი, რომლის ელემენტარული რგოლი არის ნუკლეიდური წყვილი. ასეთი რგოლების რაოდენობა ადამიანის დნმ-ში 3310⁹-ია. საწყისი ნუკლეიდური ალფაბეტი შედგება მხოლოდ ოთხი ასოსგან. დნმ-ს მოლეკულის ფრაგმენტი ნაჩვენებია მე-22-ე ნახ-ზე.

ადამიანის გენომის გამოფერა გულისხმობს ნუკლეიდური წყვილების თანმიმდევრობის განსაზღვრას დნმ-ს მოლეკულაში, შემდეგი ეტაპია ყველა ცილის პირველადი და სივრცობრივი სტრუქტურის გამოფერა. პირველადი სტრუქტურის ანალიზთან დაკავშირებული პრობლემები, უპირველესად, ეხება მაკოდირებული არეების (ინფორმაციული უბნების - გენების) გარჩევას. ამ უბნების -

ეკზონების იდენტიფიცირება ხდება არაინფორმაციული უბნების - ინტრონების ფონზე.

როდესაც ადამიანის დნმ-ს მოლეკულის პირველადი სტრუქტურის გამოფერა ახლოსაა დასრულებასთან, მისი სივრცობრივი სტრუქტურის გამოკვლევა მხოლოდ იწყება.

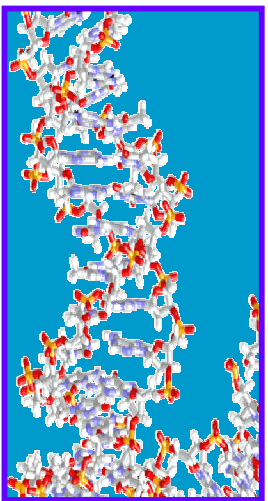
უნდა მოხდეს გადასვლა ყოველი კონკრეტული გენის მნიშვნელობის გაგებიდან პოლიმერის მთელი კონტექსტის გაგებაში. ამ ამოცანების გადაწყვეტა შესაძლებელია მხოლოდ გენეტიკური ტექსტების კომპიუტერული ანალიზით. უნდა აღინიშნოს, რომ ეს შესაძლებელია მხოლოდ სუპერკომპიუტერების გამოყენებით. მე-23-ე ნახ-ზე ნაჩვენებია დნმ-ის მოლეკულის სივრცობრივი სტრუქტურა.

ცილების პირველადი და სივრცობრივი სტრუქტურის ცოდნა განსაზღვრულ როლს ასრულებს მათი ფუნქციონირების გაგებაში. კერძოდ, ამ სივრცობრივი სტრუქტურის ცოდნა უდევს საფუძვლად წამლების შექმნის თანამედროვე ტექნოლოგიას.

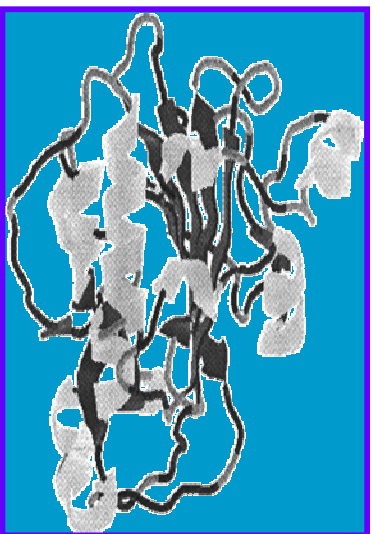
4.3. ბიომინერალური მახასიათებელი.

ბიომოლეკულის და არაორგანული ნივთიერების კომბინაციამ შეიძლება მოგვცეს ახალი თვისებების ბიოკომპოზიტი. ორგანული სუბსტანცია (ჩვეულებრივ, პროტეინი, პეპტიდი ან ლიპიდი) კომბინირდება არაორგანულ ფაზასთან, შედეგად ვიღებთ კომპოზიციურ მასალას. არაორგანული ფაზის სტრუქტურა და ფორიანობა შეიძლება იმართებოდეს ორგანული საფუძველით.

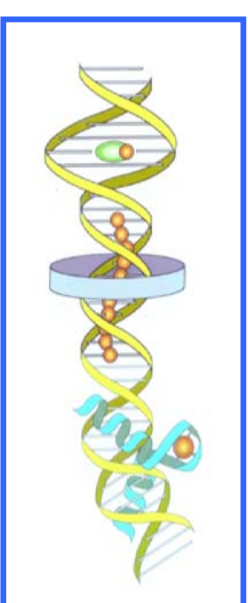
ასე მიღებული მასალების გამოყენება შეიძლება კატალიზატორებად და აბსორბენტებად. კერძოდ, ისინი გამოიყენება ბიოქიმიურ და ფარმაცევტულ მრეწველობაში. ახლახან მიღებული ორგანულ-არაორგანული კომპოზიციის საინტერესო მაგალითია ახალი მასალა, რომელსაც იყენებენ კვების პროდუქტების შეფუთვისათვის. ასე შეფუთული პროდუქტები პრაქტიკულად არ ფუჭდება.



ნახ. 22. დნმ-ის მოლეკულის ფრაგმენტები



ნახ. 23. დნმ-ის მოლეკულის სივრცობრივი სტრუქტურა (გორგალი)



ნახ. 24. ბიოკომპოზიტი

მე-24-ე ნახ-ზე ნაჩვენებია დნმ-ს პოლიმერის და ლითონის გადაბმების ორიგინალური კომბინაცია, რომლის შედეგაა მოლეკულური გამტარი, რომელმაც ფართო გამოყენება პოვა ბიოელექტრონიკაში.

ბიომინერალიზაციის პრინციპების გამოყენების საფუძველზე შეიძლება ჰეტეროსისტემების, კომპონენტების მოცემული მონაცვლებით ფორმირება, რომელსაც ექნება მათი სტრუქტურული ორგანიზებული მასალი ხარისხი.

აღნიშნული პრინციპების საფუძველზე ახალი ტექნოლოგიების დამუშავებისათვის განისაზღვრება როგორც სპეციფიკურად ორგანიზებული ორგანული ნაწილების ფორმირების პროცესის, ისე მათზე არაორგანული ნაწილაწილაკების გაჩენის და ორიენტირებული ზრდის პროცესების კანონზომიერებები. კერძოდ, შექმნილია ულტრაათხელი ნაწილები და დამუშავებულია ფენოვანი ჰეტეროსისტემების მიღება ლეგიონებული აფსკების საფუძველზე არაორგანული ნაწილაწილაკების მოწესრიგებული განაწილებით ფენათაშორისო სივრცეში.

ინტეგრალური სქემატექნიკის მიზნებისათვის გამოყენებული იყო ორი გამსხვავებული მეთოდი: ტყვიის სულფიდი-

სა და კადმიუმის ნახევარგამტარული ნაონაწილაკების ზრდისა წყლის ხსნარებში ქიმიური რეაქციების გამოყენებით. აღმოჩნდა, რომ ლენგმიურ-ბლოქდელტის და ბიომინერალიზაციის მეთოდების კომბინაციას აქვს მთელი რიგი უპირატესობები ორგანული ფუძეების მართვადი სტრუქტურით შექმნისათვის, რაც საშუალებას იძლევა დამზადდეს მრავალფენიანი ჰეტერო-სტრუქტურები კონტროლირებადი არქიტექტურით.

დღეისათვის დამუშავებული ტექნოლოგიები იბლევინა კომპოზიციური მასალის მიზანმიმართული ფორმირების საშუალებას მათში მოცემული ზომის, ორიენტაციის და განაწილების სიმკვრივის ნაონაწილაკების ჩამოყენებით, მაღალმოწესიერებული ჰეტეროსტრუქტურების შექმნისათვის.

ადნომწულ ტექნოლოგიებში ცალკეული ნაწილქნოლოგიური მაფორმირებელი მანიპულაციების სიჩქარე აღწევს ნაწილაკების დიაპაზონს. ამასთან ერთად, შექმნილია მრავალზონდიანი მოწყობილობები, რომლებშიც ერთდროულად მუშაობს რამდენიმე ზონდი, რაც თავის მხრივ ზრდის ტექნოლოგიის მწარმოებლურობას. ცალკეული ნაწილაკების და ატომების იდენტიფიკაციის უნარი, მათი გარჩევის და იზოლაციის შესაძლებლობა, ფაქტიურად ხსნის ახალი, მოცემული მახასიათებლებით, ბუნებაში არარსებული მასალების შექმნის ფართო დიაპაზონს. ზოგად შემთხვევაში, ნაწილქნოლოგიის გამოყენებით შესაძლებელია კონტროლი ნივთიერების აგებულებაზე.

5. მოლეკულური ნაწილქნოლოგია

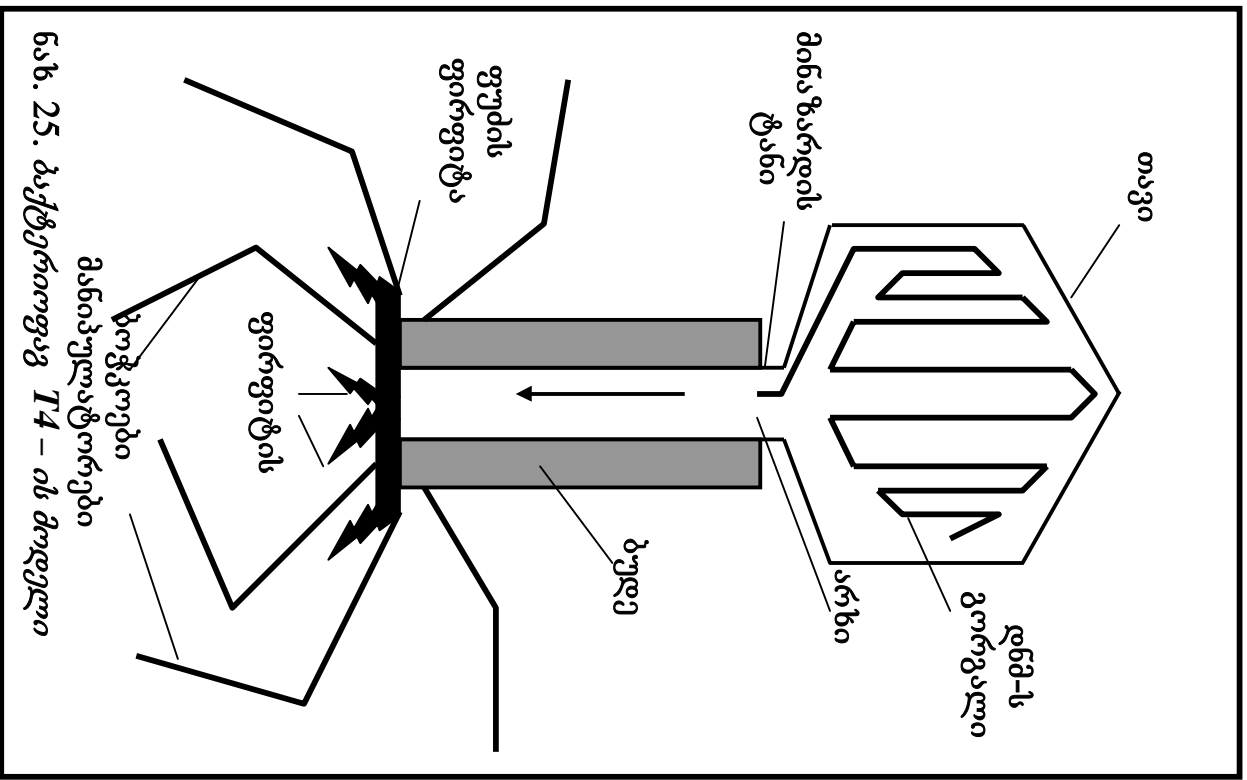
ბიომოლეკულების ისეთი უნარი, როგორცაა სინათლის ქიმიურ ენერგიად გარდაქმნა, ან ქიმიური ენერგიის გარდაქმნა მექანიკურში, კერძოდ, გადაადგილებაში, აგრეთვე, მათი უნარი განახორციელონ ორიენტირება და სატრანსპორტო ოპერაციები, აქცენენ მათ ნაწილქნოზმების შექმნის ნიმუშად.

5.1. ერთუჯრედიანი ორგანიზმი

განვიხილოთ ერთუჯრედიანი ორგანიზმის - ბაქტერიოფაგის (ნახ. 25) სასიცოცხლო ციკლი. გამრავლებისათვის ბაქტერიოფაგი იყენებს იმ ნივთიერებებს, რომლებიც ბაქტერიის ორგანიზმშია. ამ სასიცოცხლო მოთხოვნების გამო ის ასრულებს ბაქტერიების გამანადგურებლის როლს.

ბაქტერიოფაგს იერში მიაქვს ბაქტერიაზე, შემდეგ მიამაგრება მას, გაუჩხვლევტ გარსს და ბაქტერიის შიგნით უშვებს საკუთარ გენეტიკურ მასალას. ამგვარად, ბაქტერიოფაგი ამ შემთხვევაში მოქმედებს როგორც შვრიცი. მაგრამ ეს ბუნებრივი კონსტრუქცია ბევრად აჭარბებს ინფინიტის მიერ შექმნილ შვრიცს.

ბაქტერიოფაგი თავისი ბოჯკო-მანიპულატორებით დამოუკიდებლად მაგრდება ბაქტერიაზე და ფიქსირდება მახვილი კბილებით, რომლებიც იმყოფება ფუძის



ნახ. 25. ბაქტერიოფაგ T4 - ის მოდელი

ფირფიტაზე. ეს ბაზალური ფირფიტა უზრუნველყოფს ბაქტერიოფაგის ბაქტერიასთან მჭიდრო მიმხრობას.

ბაქტერიოფაგის შიგთავსის ჩაწნევა ბაქტერიის სხეულში ცილოვანი ბოჭკო-მანიპულატორების საშუალებით ხორციელდება, რომლებიც კუნთის ბოჭკოების მსგავსია. ზამბარასავით შემოკლებების დროს ისინი აიძულებენ ბაქტერიოფაგის თავში მყოფი დნმ-ს მოლექულას, დატოვოს ბაქტერიოფაგის სხეული მინაზარდის ტანის არხის გავლით. მიუხედავად იმისა, რომ დნმ-ს სიგრძე აღწევს 70 მიკრომს, ანუ 70000 ნანომეტრს, ის დახვეულია გორგალივით და შეფუთულია ბაქტერიოფაგის თავში. თავის დიამეტრი უდრის 40 ნანომეტრს, ბაქტერიოფაგის საერთო სიგრძე - 100 ნანომეტრს.

ბაქტერიაზე ზემოქმედების არსი ასეთია: ბაქტერიის უჯრედის შიგნით მოხვედრის შემდეგ, ბაქტერიოფაგის დნმ ახშობს ბაქტერიის დნმ-ს. ამის შედეგად იწყება ბაქტერიის ორგანიზმის დაშლა და მიღებული “ნატეხებისაგან” ბაქტერიოფაგის დნმ-ში მყოფი პროგრამის მიხედვით მიმდინარეობს მისი შთამომავლობის აკრეფა. ბაქტერიის შიგნით, ბაქტერიოფაგის გამრავლების ციკლი გრძელდება 30-40 წუთი.

ზოგადად ბაქტერიოფაგის დნმ ისე აპროგრამებს ბაქტერიის ნივთიერების ცვლას, რომ ბაქტერიაში იწყება ბაქტერიოფაგის შემადგენელი ნაწილების ფორმირება. ამგვარად, დაშლილი ბაქტერია გარდაიქმნება ფაბრიკად, რომელიც აწარმოებს ბაქტერიოფაგებს.

ბაქტერიის შიგნით გაჩენილი ბაქტერიოფაგები გამოყოფენ ენზიმებს, რომლებიც შლიან ყოფილი ბაქტერიის კედლებს და თავისუფლდებიან. წარმოშობილი ბაქტერიოფაგების საერთო რაოდენობა მერყეობს 100-დან 200-მდე.

ბუნებრივად იზადება კითხვა: რა ზემოქმედების შედეგად იღებს ბაქტერიოფაგის გადაადგილება მიმართულ ხასიათს? ზოგად შემთხვევაში, მეტივეტივებულ მდგომარეობაში მყოფი მიკრობიექტის გადაადგილებას, აქვს შემთხვევითი ხეტიალის ხასიათი. თანაბარი ტივტივიის და თავისუფალი გარბენის მცირე ინტერვალები იცვლება ყირაზე გადასვლით (ტამბლინგებით).

მიკრობიექტის სტოქსტიკური ძვრადობის გარდაქმნა მიმართულ მოძრაობაში, ანუ მოძრაობის შემთხვევითი ტრაექტორიის ვექტორიზაცია შესაძლებელია გარემოს პარამეტრების ცვლილების გზით.

გარემოზე ზემოქმედება შესაძლებელია ველით, რის შედეგადაც მოხდება მოუწესრიგებელი მიკრობიექტების მოძრაობების სეპარაცია.

გარემოს პარამეტრების შეცვლა შეიძლება მოხდეს აგრეთვე მიკრობიექტების ფორმის ცვლილების დროსაც, ვინაიდან ეს ცვლილება გავლენას ახდენს გარემოს სიბლანტეზე და, შესაბამისად, საკუთარი მოძრაობის დინამიკაზე.

ბაქტერიოფაგის, ანუ ბაქტერიული ვირუსის გადაადგილების დროს არსებობს ორი ფაქტორი, რომელიც განსაზღვრავს მის მიმართულ მოძრაობას.

პირველი ფაქტორია ველის ცვლილება, რომელსაც განსაზღვრავს კონცენტრაციული პოტენციალი. მორე ფაქტორს ქმნის თვით ვირუსი, ვინაიდან მას ეცვლება გეომეტრია და, შესაბამისად, აქვს კონფორმაციული მდგომარეობების ნაკრები.

განვიხილოთ მაგალითი ბაქტერიულ ვირუსის მიმართული მოძრაობის ბაქტერიისაკენ.

ბაქტერია პერიოდულად ამოყრის გარემოში საკუთარი მეტაბოლიზმის პროდუქტებს. მათი კონცენტრაცია იცვლება სივრცეში ბოლცმანის განაწილების თანახმად.

გარემოში მყოფი მეტაბოლიტები მოქმედებენ ვირუსის ბოკკო-მანიაპულატორებზე (ფობრილებზე). კომპლექს ფობრილა-მეტაბოლიტის შექმნის ან დამლის ალბათობა დამოკიდებულია სივრცეში ვირუსის მოძრაობის მიმართულებაზე.

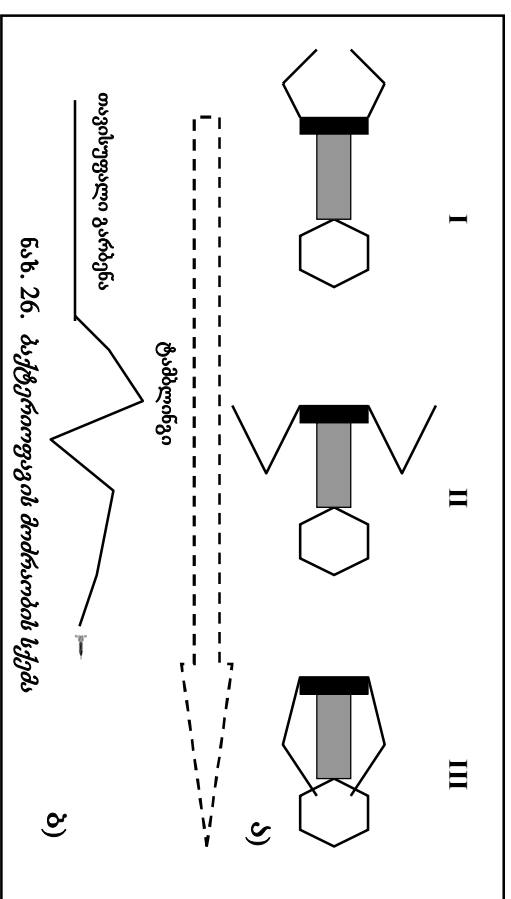
მე-26-ე ნახ-ზე ნაჩვენებია ცვლადი გეომეტრიის ბაქტერიოფაგი T4. მისი კიდური ბოკკო-მანიაპულატორები იშლებიან ტემპერატურის ზრდასთან და მეტაბოლიტის მიერთებისთან ერთად, რის შედეგადაც იცვლება მისი ჰიდროდინამიკური პროფილი (ნახ 26, ა), პოზიციები I, II, III და, შესაბამისად, იცვლება სტოქსის ჰიდროდინამიკური პროფილი.

ამის შედეგად ბაქტერიოფაგის სტოქასტიკური მოძრაობა გარდაიქმნება სტოქასტიკურ-მიმართულში (ნახ. 26, ბ), რომელიც იმართება ბაქტერიიდან ამოყრილი მეტაბოლიტის კონცენტრაციული გრადიენტით. ბაქტერიასთან მიახლოებისასმებრ, ხდება მეტაბოლიტის გრადიენტის გაზრდა და ტრემბლინგების რაოდენობა თავისუფალი გარბენის ერთეულზე მცირდება, რაც აჩქარებს ბაქტერიისა კენ მოძრაობას.

ამგვარად, მეტაბოლიტის სივრცობრივი გრადიენტი (კონცენტრაციული ველი), მართავს ვირუსის ძვრადობას. თუ ადგილი აქვს ველის ასიმეტრიას, ჩნდება “შუკველი” კომპონენტი, რადგანაც ამ შემთხვევაში წინსვლის და უკუსვლის მოძრაობების ალბათობა არათანაბარია, რაც უზრუნველყოფს ვირუსის მიმართულ მოძრაობას ბაქტერიისაკენ.

ზოგად შემთხვევაში, მიკრობიექტის ძვრადობა, რომელსაც აქვს კონფორმაციული მდგომარეობების ნაკრები, იმართება მის აქტიურ ცენტრებზე სორბენტების (იონების ან კატიონების) დასმით, რის შედეგად იწყება მისი ჰიდროდინამიკური რადიუსის შეცვლის, ანუ სივრცობრივი კონფიგურაციის შეცვლის ინიციაცია .

მე-26, ა ნახ-ზე I, II, III პოზიციები შექსაბამება ბოჭკო-მანაპულატორების სხვადასხვა მდგომარეობას ბაქტერიო-ფაგის ტანის მიმართ, მეტაბოლიტების მიერთების შედეგ.



5.2. მოლექულოური ავტომატები

ძნელი არ არის ისეთი სურათის წარმოდგენა, როდესაც ამწყობი საამქროს კონვეიერზე კომპიუტერთი მართვადი რობოტები მექანიკური მანიპულატორების საშუალებით აწყობენ ნამზადებიდან სხვადასხვა სახის მანქანებს. მაგრამ, ბევრად უფრო რთული წარმოსადგენია, როდესაც კონვეიერი, რობოტი, კომპიუტერი და თვით ნაკეთობა თავისი ზომით არ აღემატება ვირუსს.

ნაკეთობის ყველა დეტალი შედგება ინდივიდუალური მოლექულის ან მოლექულების კომპლექსისაგან. აღწერილი სურათი დღეისათვის კონკრეტული სამეცნიერო-ტექნიკური ამოცანაა, რომლის ამოხსნა ხორციელდება მოლექულოური ნანოტექნოლოგიის საშუალებით.

მოლექულოური ნანოტექნოლოგია ახორციელებს მოლექულოური მანქანების და მოლექულოური ავტომატების დიზაინს, მოდელირებას და წარმოებას. თავისი პოტენციალური შესაძლებლობებით მოლექულოური ნანოტექნოლოგია ბევრად უფრო მაღალტექნოლოგიურ დონეზეა, ვიდრე დღემდე არსებული ტექნოლოგიები. უპირველესად ეს განპირობებულია იმით, რომ მისი გამოყენებით შესაძლებელია ნაწარმის სპეციფიციურება ერთი ატომის სიზუსტით.

ნებისმიერი ახალი ტექნოლოგია, უპირველეს ყოვლისა უნდა იყოს ეკონომიკურად მომგებიანი. მოლექულოური მანქანების დეტალების წარმოება კი, ორგანული სინთეზის

ტრადიციული მეთოდებით, მოითხოვს ძალიან დიდ კაპიტალდაზარდებებს.

ამის გამო, ერთ-ერთი ძირითადი მოთხოვნა მოლექულოური მანქანების მიმართ არის მათი თვითაღწარმოების უნარი. ამ შემთხვევაში, ის პირველივე მანქანის აწყობის შემდეგ დაიწყებს საკუთარი ასლების წარმოებას, შემდეგ კი შექმნის გამსხვავებულ მოლექულოურ მანქანებს. შედეგად შეიქმნება მიკრომანქანების და ავტომატების სამყარო, რომელიც იარსებებს საკუთარი ავტონომიური ცხოვრებით და ჩვენი სამყაროდან მოითხოვს მხოლოდ ნედლეულს, ენერჯიას და საერთო მართვას.

ფაქტობრივად ცილების გარეშე იქნება (თუმცა ნახშირბადის გამოყენებით) სიცოცხლის ფორმა, რომელიც იქნება საჯებოთ გასაგები და კონტროლირებადი ადამიანის მიერ.

ამგვარად, მოლექულოური ნანოტექნოლოგიაში სამუშაოების ძირითადი სტრატეგიული მიმართულება მოლექულოური ასემბლერის, ე.ი. ისეთი მოლექულოური ავტომატის შექმნა, რომელსაც შესწევს სხვა მოლექულოური მანქანების და ავტომატების აწყობის უნარი.

დღეისათვის, ყველაზე დასაბუთებულია ასემბლერის პროექტი, რომელიც დამუშავებულია ფირმა “Xerox Corporation”-ში. პროექტში შემოთავაზებულია მოლექულოური ნანოტექნოლოგიის განვითარების ორი მიდგომა: დიამონდილოური და ფულერენოიდიული.

შემოთავაზებული ასემბლერის მუშაობა დაფუძნებულია ორმაგი სამფეხის (double tripod) გამოყენებაზე, რომელიც წარმოადგენს მოლექულურ მაპოზიციონირებელ მოწყობილობას ექვსის ტოლი თავისუფლების ხარისხით. ეს არის რობოტი-მანიპულატორის თავისებური მოლექულური ანალოგი.

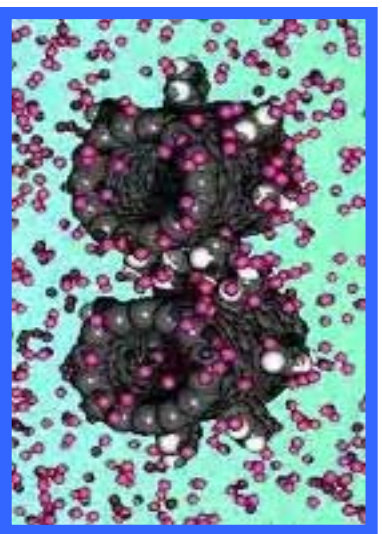
აღწერილი ასემბლერი დაცურაჟს სითხეში, რომელშიც გახსნილია მოლექულური ნამზადები (ნახ. 27), ნაკეთობის დეტალების დასამზადებლად. ეს არის წრფივი ან ბრტყელი მოლექულები, რომლებსაც აქვთ უნარი, მექანიკური დაძაბულობის ქვეშ შექმნან რეაქციის უნარისმქონე ნაწილაკები, ისეთები როგორცაა თავისუფალი რადიკალები და კარბენები, რომლებმაც, თავის მხრივ, შემდეგ შეიძლება პოლიმერიზაციის მექანიკურ-სინთეზურ რეაქციაში მიიღონ მონაწილეობა, მოლექულურ მანქანების დეტალების მასალების შექმნისათვის.

ძირითად მასალად, რომლისგანაც შეიქმნება მოლექულური მანქანები, გამოიყენება დიამონდიდი (diamondoids) – პოლიმერული ორგანული მოლექულები, რომლებშიც ჩონჩხის ნახშირბადის ატომები დაკავშირებულია ერთმანეთთან ზუსტად ისე, როგორც ალმასის კრისტალური გისოსის ფრაგმენტში. ამას ეყრდნობა დიამონდიდიური მოდგომის დასაბუთება მოლექულური ნანოტექნოლოგიაში.

“ალმასის” კონსტრუქციების გამოყენება მოლექულური მექანიზმების მასალად, მიღებულ ნაკეთობას ანიჭებს უნიკალურ თვისებებს: მაღალ სიმტკიცეს, სიმსუბუქეს, ქიმიურ ინერტულობას, თერმოსტაბილურობას, აგრეთვე რიგ სხვა თვისებებს, რომლებიც ღირშესანიშნავია ელექტრონიკაში გამოყენების კუთხით.

ამგვარად, პირველი თაობის მოლექულური ავტომატი წარმოგვიდგება როგორც სითხეში მცურავი მიკროკაპსულა დიამონდიდიური კედლებით, რომლებშიც ჩამოყვანილია მახარისხებელი როტორები, რომელთა საშუალებითაც ხდება სითხიდან ავტომატის მუშაობისათვის აუცილებელი მოლექულების დაჭერა და მათი გადაადგილება კაპსულის შიგნით. თავის მხრივ, კაპსულა შექსებულია ინერტული აირით (ნეონით ან ჰელიუმით).

კაფსულის შიგნით მოლექულის წაბაცება ხდება ორმაგი სამფეხის “ხელთ”. შემდეგ ხდება მისი პოზიციონირება ერთი ატომის ზომის სიზუსტით “ამკრები” ხაზის საჭირო ადგილას და დამაგრება შესაბამის ატომთან. ასე იწყობა მოლექულური მანქანების დეტალები “კონვეიერზე”. მაპოზიციონირებელი მოწყობილობის თავისუფლების ხარისხის ყოველი მიმართულების მართვა ხორციელდება დამოუკიდებლად, ამისათვის დანიშნული სპეციალური ხრუტუნებით (ნახ. 28). ამ ხრუტუნების ამოქმედება ხდება ინერტული აირით, ფისტონების საშუალებით.



**ნახ. 27. ნანომექანიზმი სითხეში
მოლექულური ნაშაღებით**



**ნახ. 28. მაკოზიციონირებელი
მოწყობილობის ბრუტუნა**

ყოველი ფისტონი წარმოადგენს ნახშირბადის ნანომილაქს, რომლის ატომები ერთმანეთთან დაკავშირებულია გრაფიტის მსგავსად. ფისტონი შეიძლება ჩაიკეტოს ქიმიური ნივთიერება ფულერენის S_{60} სფერული მოლექულებით (ნახ. 29).

პირველი თაობის მოლექულური ასემბლერი არ შეიცავს შინაგან მოლექულური კომპიუტერს. მისთვის აუცილებელი ბრძანებები მოდის გარე მაკროსკოპული კომპიუტერიდან აკუსტიკური ტალღების საშუალებით. აღნიშნული ტალღები ასემბლერის შიგნით გარდაიქმნება ინერტული აირის წნევაში. როგორც აღვნიშნეთ, ამ წნევით იმართება მაკოზიციონირებელი მოწყობილობის ბრუ-ტუნები.

მეორე თაობის ასემბლერებისათვის მიმდინარეობს მოლექულური კომპიუტერის დამუშავება. აღმოჩნდა, რომ მოლექულური ავტომატებში მექანიკური გამოთვლელი მოწყობილობები გამოიყენება უფრო ეფექტურად, ვიდრე ელექტრონული.

ზოგად შემთხვევაში, ასემბლერი არის რთული კონსტრუქცია. მისი სრული მოლექულური მოდელი ითვლის რამდენიმე მილიონ ატომს, რაც გამოირიცხავს მის სინთეზირებას ორგანული ქიმიის ტრადიციული მეთოდებით.

დღეისათვის მოლექულური ავტომატების დამზადების რეალური მექანიზმია “კონფერენცტული” მიდგომა, რომლის დროსაც ჯერ სინთეზირდება მარტივი დეტალები, რომლებიც შემდეგ გამოიყენება უფრო რთული დეტალების

დასამზახად. ეს პროცესი გრძელდება იმ სტადიამდე, სანამ მოლექულურ ავტომატს არ გაუჩნდება თვითაწყოების უნარი.

ამ პროცესის ოპტიმიზაციისათვის, მოლექულურ ნანოტექნოლოგიაში მირითადი კვლევა მიმდინარეობს მოლექულური ავტომატების აღწერილი ფუნქციონირების თეორიულ დასაბუთებაზე კომპიუტერული მოდელირების მეთოდების გამოყენებით.

ყველაზე აქტიურად მოლექულურ ნანოტექნოლოგიაში იყენებენ შემდეგ მეთოდებს: მოლექულური კინემატიკის და მოლექულარული დინამიკის მეთოდებს, აგრეთვე მონტე-კარლოს მეთოდს. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მოდელირების დროს საქმე გვაქვს როგორც ობიექტებთან, რომლებიც ემორჩილებიან კლასიკურ მექანიკას, ისე ობიექტებთან, რომლებიც ემორჩილებიან კვანტურ მექანიკას. ასეთ სიტუაციაში ამ ორი მიმართულების შეთავსების მიზნით და შეცდომების გამორიცხვისათვის, იყენებენ ბარნ-ოპენჰაიმერის მიახლოებას. ამ მეთოდიკაში შემოდებულია ძალივანი ველი, რომელსაც შეესაბამება მოლექულის პოტენციალური ენერჯის, ატომის ბირთვის კოორდინატაზე დამოკიდებული, ფუნქცია.

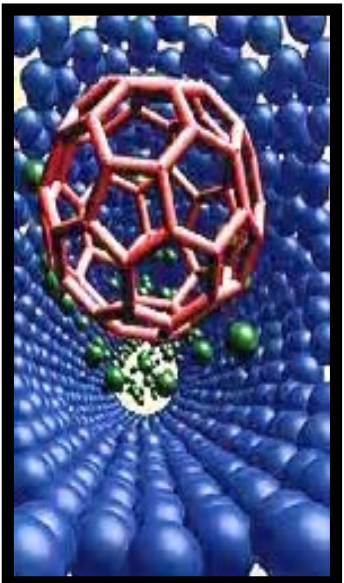
მოლექულური კინემატიკის მეთოდებით ხდება ენერგეტიკულად ოპტიმალური მოლექულების სივრცობრივი აგებულების შესწავლა. ამ შემთხვევაში ეძებენ პოტენციალური ენერჯის ფუნქციის ლოკალურ მინიმუმს.

მოლექულური დინამიკის მეთოდების გამოყენების დროს გამოთვლება მოლექულის ბალოვან ველში ატომის მოძრაობის ტრაექტორია კლასიკური განტოლებების ინტეგრაციის გზით.

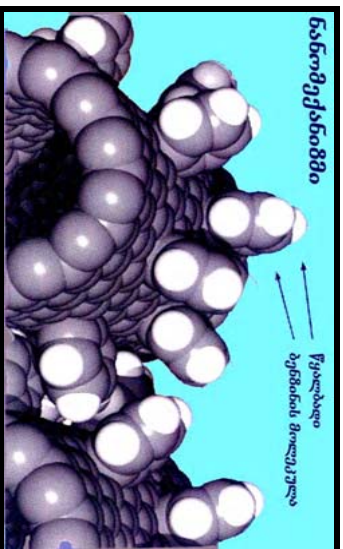
მონტე-კარლოს მეთოდის გამოყენებით განიხილება ატომების ენერგეტიკულად ოპტიმალური მდგომარეობების მოლიანი სტატიისტიკური ერთობლიობა მოლექულაში. ეს საშუალებას გვაძლევს, განვსაზღვროთ ენერგეტიკულად ყველაზე მომგებიანი მოლექულის სივრცობრივი აგებულება და შევაფასოთ შესაბამისი თერმოდინამიკური მახასიათებლები.

მოლექულური დინამიკის მეთოდების გამოყენებით განისაზღვრა მუშაობა, მოლექულური კბილანების და მოლექულური საკისრების ოპტიმალური ზომები და პარამეტრები (ნახ. 30). ასევე განისაზღვრა ინერტული აირის მოძრაობის პირობები ნახშირბადის ნანომილაკებში, პისტონებსა და მოლექულურ ტუბოებში.

მოლექულური კინემატიკის მეთოდების გამოყენების შედეგად განისაზღვრა იმ პარამეტრების ოპტიმალური მნიშვნელობები, რომლებიც აღწერენ ცალკეული დეტალების მოლექულურ აგებულებას. მაგალითად, სხვადასხვა სახის ნახშირბადის ნანომილაკების და ხრუტუნების მუშაობის პრინციპები ხსნარიდან საჭირო მოლექულების ამოდებისათვის.



ნახ. 29. ფულერენი ნანომილაკში



ნახ. 30. ნანომექანიზმის კონსტრუქცია

მონტე-კარლოს მეთოდის გამოყენებით შესრულებულია მოლეკულური აგებობების შემადგენელი ნაწილების თვითაწყოების პროცესის მოდელირება.

მეორე ტიპის მიდგომა მოლეკულურ მოდელირებაში არის კვანტურ-ქიმიური გამოთვლები ჰარტრი-ფოკის მიახლოების ფარგლებში, რომელიც ცნობილია მოლეკულურ ორბიტალების მეთოდის სახელით. ასეთი გამოთვლები ტარდება იმ ქიმიური რეაქციების მიმდინარეობის მოდელირებისათვის, რომლების შედგენადაც ხდება მოლეკულური მოწყობილობების შემადგენელი ნაწილების სინთეზი.

მესამე გამოთვლითი მიდგომა, რომელსაც აქტიურად იყენებენ მოლეკულურ ნანოტექნოლოგიაში, არის მოლეკულარული მანქანების დეტალების ვიზუალიზაცია ვირტუალური რეალობის მოდელირების ენა VRML-ის გამოყენებით. ვირტუალური რეალობის ტექნოლოგია არის მოლეკულური აგებობების და მათი აგებულების ეფექტური მეთოდი, ვინაიდან შესაბამისი ობიექტების დანახვა ჩვეულებრივ შუქზე შეუძლებელია. ეს გამოწვეულია იმით, რომ მოლეკულური მანქანების სამყაროში არის სრული სიბნელე, რადგანაც იქ მყოფი ობიექტების ზომა ბევრად ნაკლებია ხილული სინათლის ტალღის სიგრძეზე.

მოლეკულურ ნანოტექნოლოგიაში გამოთვლითი მიდგომების აქტიური დანერგვა იწვევს სპეციალური პროგრამული უზრუნველყოფის განვითარებას. შეიქმნა სპეციალური კომპილატორები - პროგრამები, რომლებსაც მოლეკულური მანქანების დეტალების აღწერა გადაყავთ

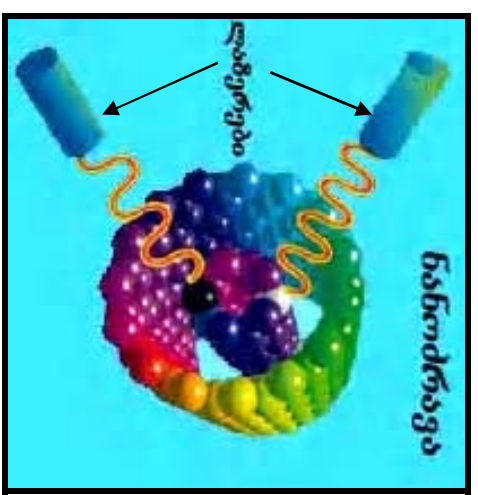
მაღალი დონის ენიდან ატომურ-მოლეკულურ ენაზე, რომელიც დამუშავებულია მოლეკულურ მოდელების პროგრამებისათვის გამოთვლით ქიმიაში.

ადნიშნული კომპილატორების გამოყენება საშუალებას იძლევა სწრაფად ავაგოთ დეტალების მოლეკულური მოდელები, რომლებიც შემდგომ გამოყენებული იქნება მოლეკულური მექანიზმების მოდელების პროგრამებში. ეს პროგრამები ასრულებენ დეტალების მიზნობრივი თვისებების შეფასებას, რომელიც საშუალებას გვაძლევს პრაქტიკურების ვარიანტების გზით დავამუშაოთ ისეთი მოლეკულური კვანძები, რომლებსაც აქვთ ოპტიმალური მახასიათებლები.

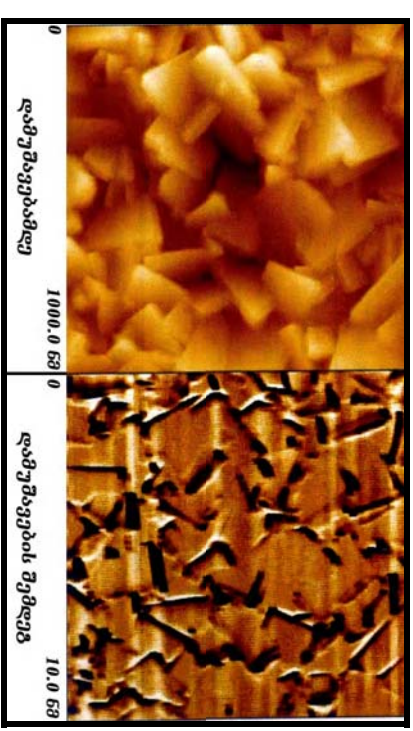
ამის გარდა, შექნილია სპეციალიზებული გამოყენებითი პროგრამები მოლეკულური ნანოტექნოლოგიისათვის, რომლებიც ტრადიციული მანქანათმშენებლობის CAD – სისტემების ანალოგიურია.

ამ პროგრამების მუშაობა შესაძლებელია პარალელურ სუპერკომპიუტერებზე და პრაქტიკულად სრულდება ისეთ ლაბორატორიებში, როგორიცაა NASA, Ames Research Center და Material Simulation Center.

არსებული ტექნოლოგიების შესაძლებლობები უკვე საკმარისია, რომ რამდენიმე მოლეკულიდან დამონტაჟდეს მართივი მექანიზმები, რომლებიც გარე მმართველი სივსალების (აკუსტიკური, ელექტრომაგნიტური ან სხვა) მიხედვით



ნახ. 31. ნანობოტა



ნახ. 32. ნანოაფსკი

მანიაკულირებას გაუქმებენ სხვა მილექულებს და შექმნიან თვითმსგავს მოწყობილობებს ან უფრო რთულ მექანიზმებს.

31-ე ნახ-ზე ნაჩვენებია ნანობრაგა, რომლის აგზნება ხორციელდება ლაზერის სხივით. ასეთი ძრავა შეიძლება იყოს გამოყენებული ნანომოწყობილობებში ალტერნატიული ელექტრული ველის გენერატორად.

6. მასალათმცოდნეობა და ნანოტექნოლოგიები

ნანოტექნოლოგიები ახალი მიდგომაა მასალათმცოდნეობაში და, ზოგადად, საინჟინრო ხელოვნებაში. მუშავდება ტექნოლოგიური მეთოდები, რომლებიც ნანომასშტაბის ადეკვატურია და მიმართულია ახალი მასალების და კომპონენტების შექმნისკენ. ამ შემთხვევაში მიზანი არის ახალი ფუნქციური და კონსტრუქციული მასალების დამუშავება ახალი გაუმჯობესებული თვისებებით, მათი ნანოსტრუქტურის მართვის გზით. ამ მიმართულებით ყველაზე პერსპექტიული აღმოჩნდა ნანოსტრუქტურული შენადნობები, კომპოზიტური ნივთიერებები და პოლიმერული მასალები.

მიღებული შედეგების გამოყენება შესაძლებელია ქიმიამი, ენერგეტიკაში, ოპტიკაში, ეკოლოგიაში და ჯანმრთელობის დაცვის სფეროში. აქ ყველაზე მკაფიოდ ვლინდება ნანოტექნოლოგიების პოტენციალი და ხდება მათი სწრაფი რეალისაცია მასალებსა და მოწყობილობებში ინდუსტრიალურ ფარგლებში.

ინტელექტუალური მუშაობის დიდი ძალისხმევით შექმნილი ახალი მასალები, “ცოდნის შემცველი“ მასალებია. ისინი უზრუნველყოფენ ახალ ფუნქციურ შესაძლებლობებს და გამოყენების ფართო არეალს. ისინი წარმოადგენენ სიახლეების გამტარებს ტექნოლოგიებში, მოწყობილობებში და სისტემებში. მათ სარგებლიანობა მოაქვთ ისეთი საწარმოო სექტორების განვითარებასა და

მათი პროდუქციის კონკურენტუნარიანობის ამაღლებაში, როგორცაა ტრანსპორტი, ენერგეტიკა, მედიცინა, ფარმაკოლოგია, ელექტრონიკა და მშენებლობა.

ამ მიმართულებით ფუნდამენტური ცოდნის განვითარება გულისხმობს, რომ ექსპერიმენტული, თეორიული და მოდელირების ინსტრუმენტული საშუალებების გამოყენებით შევსწავლოთ კომპლექსური ფიზიკურ-ქიმიური და ბიოლოგიური მოვლენები, რომლებიც აღნიშნული დარგების რელევანტურია.

მიღებული შედეგების რეალიზაცია პირველ რიგში ხდება კომპლექსური თვითამწყობი სტრუქტურების სინთეზის დროს განსაზღვრული ფიზიკური, ქიმიური და ბიოლოგიური მახასიათებლების გამოყენებით.

ახალი მასალების შექმნის დროს საინჟინრო მხარდაჭერა იმაში გამოიხატება, რომ ხდება “ინტელექტუალური პროდუქციის“ და “ინტელექტუალური გამოყენების“ დაკავშირება იმ მიზნით, რომ დაიძლიოს თანამედროვე მრეწველობის სუსტი ადგილები. ამ მიმართულებით კვლევების კონცენტრირება ხდება თვითაწყოების თვისებების მქონე მასალების შექმნაზე, “გაწმენდის“ ტექნოლოგიებზე ზედაპირთა ინჟინერიის გამოყენებით. ძირითადი ყურადღება ეთმობა ოპტიმალური მასალების შექმნის ასპექტს, მათ დამუშავებას და გამოცდის ინსტრუმენტულ საშუალებებს. ყოველივე ეს ემსახურება ზემოლექსული და მაკროლექსული ინჟინერიის განვითარებას, რომელშიც

სინთეზის და ექსპლუატაციის დროს გამოიყენება ახალი კომპლექსური მოლექსულები და კომპოზიტები.

ზედაპირთა ინჟინერია დღეისათვის საკვანძო ტექნოლოგიაა, რომელიც უზრუნველყოფს მრეწველობის საბაზო დარგების განვითარებას. ამ ტექნოლოგიას აქვს მაღალი ეკონომიკური ეფექტიანობა, ვინაიდან სწორედ ნაკეთობის ზედაპირი განსაზღვრავს მის მომხმარებელურ თვისებებს. აღნიშნული ტექნოლოგია განვითარდა მიკროელექტრონიკის ტექნოლოგიის ბაზაზე და მიეკუთვნება ნანოტექნოლოგიებს, რადგან მათში ხდება ნივთიერების ზედაპირთან ურთიერთქმედება ატომურ დონეზე. ამ შემთხვევაში საშუალება ჩნდება განზომილუბადი სინთეზური მასალების შექმნისა, რომლებშიც გვაქვს კვანტურგანზომილებადი ეფექტები.

მრეწველობის დარგების მიხედვით სასაქონლო პროდუქციის ერთი კილოგრამის ღირებულება ასეთია:

1. მანქანათმშენებლობა -10440\$
2. ქიმიური მრეწველობა -10450\$
3. მიკროელექტრონიკა -20043000\$
4. რაკეტთმშენებლობა -7000\$
5. ზედაპირთა ინჟინერია -10000430000\$.

ზედაპირთა ინჟინერია ისეთი დარგია, რომელშიც მკვეთრად მცირდება ნაკეთობისათვის საჭირო ნედლეულის ფასი და საერძობლად იზრდება ტექნოლოგიის ღირე-

ბულებს. ამგვარად, ამ ტექნოლოგიას ახასიათებს მაქსიმალური რესურსდაზოგვა.

ზედაპირთა ინჟინერია ემსახურება მრეწველობის ყველა წამყვან დარგს და უზრუნველყოფს ამ დარგების ნაკეთობების ახალ თვისებებს, რომლებიც გავლენას ახდენენ ნივთიერ, ენერგეტიკულ და ეკოლოგიურ ბალანსზე გარემოში.

ადინამწული ეფექტები დაკავშირებულია იმასთან, რომ ზედაპირთა ინჟინერია საშუალებას გვაძლევს შევქმნათ მასალათა ახალი კლასი, რომელთა თვისებები პრინციპულად განსხვავდება არსებული მასალების თვისებებისაგან, ან აჭარბებენ მათ მახასიათებლებს რამდენიმე თანრიგით.

მაგალითად, სითბოამრეკლავ დაფარვაში ძირითად როლს ასრულებს ვერცხლის 100 ანგსტრემიანი ფენა, რომელიც არეკლავს ინფრაწითელი დიაპაზონის სხივებს და ატარებს სპექტრის ხილულ ნაწილს. მონოლითური ვერცხლის მასალებს ასეთი თვისებები არ გააჩნია.

პოლიმერების საფუძველზე შექმნილი პრინციპულად ახალი ობიექტები, მაგალითად, ტრეკული მემბრანები, ფულერენები და ა.შ., საშუალებას გვაძლევენ შესაბამისი პრინციპების გამოყენებით მოვახდინოთ ზემტკიცე პლასტიკური, ცვეთაგამძლე და კოროზიაგამძლე ისეთი მასალების ფორმირება, რომელთა თვისებები საგრძნობლად განსხვავდებიან ტრადიციული მასური მასალებისაგან.

პერსპექტივაში შესაძლებელია, რომ თვით ზედაპირი წარმოგვიდგეს როგორც დამოუკიდებელი ფრაქტალური ობიექტი (ნახ. 32). ასეთი ობიექტების შესწავლისათვის ყალიბდება ახალი სამეცნიერო-ტექნიკური მიმართულება, რომლის კვლევის სფეროში შედის უნიკალური თვისებების მქონე მოცულობითი, ორგანოზომილებიანი, წილადგანზომილებიანი და ერთგანზომილებიანი სტრუქტურები.

უნდა აღინიშნოს, რომ ასეთი სტრუქტურები ბუნებაშიც არსებობს. მაგალითად: ალმასი სამგანზომილებიანია, გრაფიტი - ორგანოზომილებიანი, კარბინი ერთგანზომილებიანი. სამივე მასალას აქვს ერთი და იგივე ქიმიური შემდგენილობა და მათი მკვეთრი განსხვავება თვისებებში განისაზღვრება მხოლოდ სტრუქტურით. ფრაქტალურ მასალებს შეიძლება მივაკუთნოთ “ბულები” და კომპოზიციური მასალები.

აღსანიშნავია, რომ ზედაპირთა ინჟინერიის ტექნოლოგია ნაკეთობების თვისებების შეცვლის საშუალებებს იძლევა მისი დამზადების ბოლო სტადიაზე. ამასთან დაკავშირებით აღნიშნული ტექნოლოგიის გამოყენება საგრძნობ გავლენას მოახდენს ისეთ არსებულ დარგებზე როგორცაა: მიკროელექტრონიკა, განახლებადი ენერგეტიკა, მშრალი გალვანიკა, სენსორული ტექნიკა, მანქანათმშენებლობა, საკაბელო მრეწველობა, ბიოტექნოლოგია და მედიცინა.

მედიცინაში ზედაპირთა ინჟინერიის გამოყენება უზრუნველყოფს ახალ ფართო შესაძლებლობებს. მაგალითად, ჩვეულებრივი ნახშირბადის მასალები

(გრაფიტი, პირონაჩშირბადაი), რომლებიც ფართოდ გამოიყენება სამედიცინო პრაქტიკაში, იონურ-პლაზმური ტექნიკის და ტექნოლოგიის გამოყენების დროს იღებენ აფსკური ნაჩშირბადის სახეს.

ამ ახალ მასალებს აქვს შემდეგი თვისებები და მახასიათებლები:

- ისინი წარმოადგენენ დიფუზურ ბარიერს ნებისმიერი ბიოლოგიური გარემოსათვის, ვინაიდან ნაჩშირბადის იონებს აქვს მინიმალური ზომა;

- ამჟღავნებენ მაღალ ადჰეზიას ფუძის მასალის მიმართ;

- უზრუნველყოფენ ფუძის მასალის (ლითონები, შენად-ნობები) სიმტკიცეს აგრესიული ბიოლოგიური გარემოს მიმართ;

- ზედაპირზე დატანის შედეგად, უზრუნველყოფენ სხვადასხვა მასალის ბიოშეთავსებადობას;

- იძლევიან საშუალებას რამდენიმეჯერ გამოვცვალოთ ნაკეთობის ზედაპირი, ნაკეთობის ფუძის შენარჩუნებით. ამგვარად, ერთჯერადი ნაკეთობის აფსკის დატანით და მოცილებით ხდება ფაქტიურად მრავალჯერადი გამოყენება;

- იონურ-პლაზმური ტექნოლოგიის მეთოდები უზრუნველყოფენ მასალების მოცემულ სამედიცინო-ბიოლოგიურ მახასიათებლებს: ადჰეზიურობას უჯრედების და მიკროორგანიზმების მიმართ, ჰემოშეთავსებადობის თვისებებს, ბაქტერიოციდურობას, ნივთიერებების სელექციური გაყოფის საშუალებას და სხვა. ეს ხდება

მასალის ზედაპირის თვისებების (მუხტი, რელიეფი და შემაღლებლობა) ცვლილებით.

- აქვთ თხევადი და აიროვანი ნივთიერებების გაყოფის და გაწმენდის უნარი.

აგრეთვე იქმნება მასალები ხელოვნური ორგანოები-სათვის: ხელოვნური კანის, ხელოვნური ფილტვის, ხელოვნური ღვიძლის და მათი კომპონენტებისათვის - დიალიზ-დიფუზიური მემბრანები, დამწვრობის საწინააღმდეგო ასაკრავები და სხვა.

ამგვარად, ზედაპირთა ინჟინერია, სტრუქტურული, ფრაქტალური და ენტროპიული მიდგომების გამოყენებით ნანოტექნოლოგიის უმნიშვნელოვანესი დარგია, რომელიც იძლევა ახალი მასალების, მათ შორის, ფენოვანი მასალების, მიღების საშუალებას, სრულიად ახალი მახასიათებლებით.

7. ნანოტექნოლოგიის პერსპექტივები

ნანოტექნოლოგია არის მნიშვნელოვანი ეკოლუკური ცვლილებების საფუძველი ბუნებაში და საზოგადოებაში.

ჯერჯერობით ძირითადი ყურადღება მიპყრობილია ნანობიოტექნოლოგიის პოტენციალზე ფარმაცევტულ მრეწველობაში, მაგრამ თვისობრივად ახალი ეფექტი ჩნდება დნმ-ს მანიპულაციის შედეგად. საბოლოოდ სამყარო მიიღებს კვების პროდუქტებს, საწვავს, სხვადასხვა მასალებს, ფარმაცევტულ პროდუქტებს გენეტიკურად შეცვლილი ორგანიზმებისაგან.

ორგანიზმში გარედან შეიშთანილი ბიოლოგიური ინფორმაციის ეფექტური მართვა, გენების აღმოჩენა, რომლებიც განსაზღვრავენ ორგანიზმის ახალ სასარგებლო თვისებებს, საბოლოოდ მიგვიყვანს ისეთი ოპერაციული სისტემის შექმნამდე, რომელიც გამოიმუშავებს ამ გარე ინფორმაციას ორგანიზმში ნებისმიერი პროცესის სასურველი მიმართულებით მართვისათვის.

განვიხილოთ ნანოტექნოლოგიების პერსპექტივები დარგების მიხედვით.

მედიცინა და გერონტოლოგია. მოლექულური ექიმ-ობობების შექმნა, რომლებიც „იცხოვრებენ“ ადამიანის ორგანიზმში და ააცილებენ მას ყველანაირ წარმოქმნილ დაზიანებას, გენეტიკურის ჩათვლით, ნანოტექნოლოგიის ერთ-ერთი შედეგია.

ორგანიზმში მოლექულური ობობების ჩანერგვა დაიცავს უჯრედებს დაბერებისაგან და ადამიანის ორგანიზმის ქსოვილებს „გააჯანსაღებს“.

მრავალი ავადმყოფობა და სიკვდილიც დაპროგრამებულია ადამიანის შიამობავლობით აპარატში და არ არის გამორიცხული, რომ ნანობიოტექნოლოგიის გამოყენებით შესაძლებელი გახდეს ამ პროგრამების შეცვლა.

შესაძლებელი გახდება ორგანიზმის საკუთარი უჯრედებიდან სათადარიგო ფუნქციური ორგანოების გაზრდა.

მრეწველობა და სოფლის მეურნეობა. მრეწველობის ტრადიციული მეთოდები შეიცვლება მოლექულური ობობების საშუალებით მოხმარების სავნების აკრებით უშუალოდ ატომებიდან და მოლექულებიდან. შეიქმნება პერსონალური სინთეზატორები და მაკოპირებელი მოწყობილობები, რომლებიც საშუალებას მოგვცემენ დავამზადოთ ნებისმიერი საგანი.

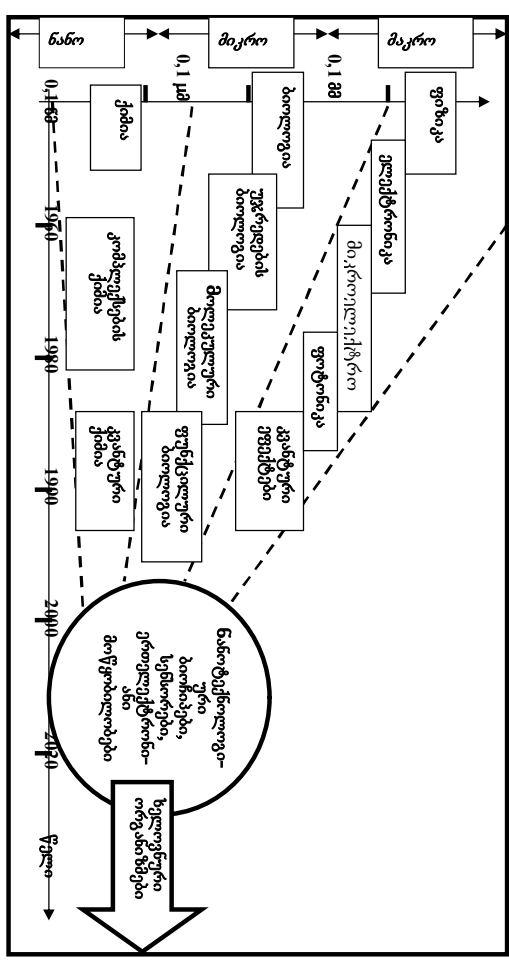
მოხდება „ბუნებრივი მანქანების“ (მცენარეების და ცხოველების) შეცვლა კვების პროდუქტების დამზადებისათვის. მოლექულურ ობობებს შეუძლიათ განახორციელონ იგივე ბიოქიმიური პროცესები, რომლებიც მიმდინარეობენ ცოცხალ ორგანიზმებში, მაგრამ უფრო მოკლე და ეფექტური გზით, მაგალითად: ჯაჭვს - „ნახშირბადის აირი, მინერალური ნივთიერებები ნადაგიდან - ბალახი - ძროხა - რძე“, შეიძლება მოვაცილოთ შუა რეოლები და მივიღოთ რძე პირდაპირ ჰაერიდან და წყლიდან, ვინაიდან მათში არის ამისათვის ყველა საჭირო ატომი.

ბიოლოგია და ეკოლოგია. შესაძლებელი გახდება ცოცხალ ორგანიზმში შედგენილი ატომების დონეზე, შედგენად შეიძლება მოხდეს გამჭრალი ბიოლოგიური სახეობების აღდგენა და ახალი ტიპის ცოცხალი არსებების შექმნა.

შესაძლებელი გახდება გარემოზე ადამიანის უარყოფითი გავლენის აცილება. ეკოსფეროში მოთავსდება მოლეკულური რობოტები - სანიტრები, რომლებიც ადამიანის „საქმიანობის“ ნარჩენებს გარდაქმნიან საწყის ნედლეულად. ამას გარდა, მრეწველობა და სოფლის მეურნეობა მთლიანად გადავა უნარჩენო ნანოტექნოლოგიურ მეთოდებზე.

სოციალური შედეგები. ეკონომიკა, როგორც დარგი და მეცნიერება დეფიციტსა და მისი დაძლევის მეთოდებზე გაქრება. დეფიციტი არ იარსებებს, ვინაიდან ნებისმიერ სახლში იქნება სინთეზატორი, რომლის საშუალებითაც წყლიდან და ჰაერიდან შეიძლება მივიღოთ კომპიუტერი, პიჯაკი ან სადილი.

ნანოტექნოლოგიების განვითარების შედეგად, ადამიანი ეუფლება კონსტროლს როგორც “არაცოცხალ” ისე “ცოცხალი” მატერიის აგებულებაზე. ამის გამო ნანოტექნოლოგიები წარმოადგენენ მნიშვნელოვანი ევოლუციური ცვლილებებისა საფუძველს. ფაქტიურად, ნანოტექნოლოგიებში ხორციელდება ისეთი მეცნიერებების შერწყმა, როგორცაა ფიზიკა, ქიმია და ბიოლოგია. 33-ე ნახაზზე ნაჩვენებია აღნიშნული დაახლოების პროცესის მიმდინარეობა მე-20 საუკუნეში და მისი მოსალოდნელი შედეგი - ხელოვნური ორგანიზმის შექმნა.



ნახაზი 3.3. მეცნიერებების საბიუჯეტო ნაორტექნოლოგიები

დასკვნები

განვითარებულმა ქვეყნებმა დაიკავეს წინა პოზიციები ნაორტექნოლოგიების სამეცნიერო საფუძვლების დამუშავებაში. დღეისათვის უახლოესი ამოცანაა მათთვის არის მიღებული შედეგების ტრანსლირება მრეწველობაში, რეალური უპირატესობების მიღებისათვის კონკურენტულ ბრძოლაში. ეს მიზანი რეალიზდება ორი მიმართულებით. ერთ შემთხვევაში წინ წაიწევა საპროექტო სამუშაოები, რომლებიც დაკავშირებულია ახალი საწარმოების გახსნასთან, რომლებშიც რეალიზდება ნაორტექნოლოგიები. მეორე შემთხვევაში იქმნება ნაორტექნოლოგიების მნიშვნელობის გაგების პირობები არსებულ ინდუსტრიულ სექტორში.

აქტიური სტრატეგია მიმართულია ისეთი ინდუსტრიული კომპანიების მხარდაჭერაზე, რომლებიც მონაწილეობენ კოოპერაციულ გამოკვლევებში. პირველ როგში, მხარს უჭერენ ისეთ საწარმოებს, რომლებიც ურთიერთქმედებენ კონსორციუმებში და რომელთა შესრულებულმა სამუშაოებმა, მათი ფართო რეალიზაციისათვის საკმარის “კრიტიკულ” მასას მიაღწია.

ზოგადად, მიმდინარე გამოკვლევები შეიძლება იყოს ხანგრძლივი და რისკის მაღალი ხარისხის მქონე, მაგრამ მთავარია, რომ ისინი ორიენტირებული იქნას ინდუსტრიულ გამოყენებაზე. ასეთი პროექტები შეიცავენ მოვლენის სისტემურ გაგებას, გამოსაკვლევი პროცესების იდენტიფიკაციას და კვლევის ინსტრუმენტული საშუალებების დამუშავებას. საბოლოო მიზანია უნივერსალური შედეგადი

ცოდნის ბაზის შექმნა, რომელიც ორიენტირებულია ნანოტექნოლოგიებზე. სწორედ ასეთი ბაზის საფუძველზე დამუშავდება ახალი ინსტრუმენტული საშუალებები და მეთოდები სხვადასხვა დარგებისათვის.

ძირითადი ყურადღება ეთმობა სტრუქტურებს, რომლებსაც აქვთ თვითაწყოების უნარი, მოლექულურ და ბიო-მოლექულურ მექანიზმებს და ძრავებს. ამ გამოკვლევების დროს ყველაზე ეფექტურია დისციპლინათა შორის მიდგომა, რომლის დროსაც ზდება არაორგანული, ორგანული, ბიოლოგიური პროცესების და მასალების გამოკვლევის დროს მიღებული შედეგების ინტეგრაცია.

მაგალითად, ნანობიოტექნოლოგიის ერთერთი მიზანია, შესრულდეს ბიოლოგიური და არაბიოლოგიური ნანობიექტების ინტეგრაცია, რის შედეგად ჩნდება მედიცინის და ეკოლოგიის განვითარების ახალი პერსპექტივები. ამ სფეროებში შეიძლება აღინიშნოს სამუშაოები: “ჩიპ-ლაბორატორიის“ შექმნა, სუბსტრატზე უჯრედების ზრდის მართვა, არაცოცხალ და ბიოლოგიურ ობიექტებს შორის ინტერფეისების შექმნა. აქვე აღსანიშნავია ახალი ფარმაცოლოგიური საშუალებების შექმნა, ბიოლოგიური მოლექულებით და კომპლექსებით მანიპულირება, ბიოლოგიური ობიექტების ელექტრონული თვისებების გამოვლენა, მიკროამოფრქვევის ტექნიკა და ბიოლოგიურ ობიექტებთან ნანოსისტემების და ნანოელექტრონიკის ინტეგრაციის სხვა არეები.

უნდა აღინიშნოს სამუშაოები მეტროლოგიური უზრუნველყოფის კუთხით და მომსახურე და გამჭომი ხელსაწყოების განვითარება. შეიქმნა აპარატურის ახალი თაობა, რომლის გარჩევის უნარი უახლოვდება 1 ნმ-ს. და რაც მთავარია, მისი გამოყენება შესაძლებელია ნანომას-შტაბურ სერიულ წარმოებაში.

ინტელექტუალური, მრავალფუნქციური მასალების და ბიომასალების წარმოება და გარდაქმნა ემსახურება მულტიდარგობრივ გამოყენებას თავისი შინაგანი მახასიათებლების და ფუნქციური შესაძლებლობების გამო. მაგალითად, ნანოელექტრონიკაში ასეთ გამოყენებებს ემსახურება ელემენტების ფუძის თვისებების გაფართოება და გადასვლების პარამეტრების სრულყოფა.

ახალი სამრეწველო კონცეფციების რეალიზაცია, რომლებიც ითვალისწინებენ უფრო მაღალ მოქნილობას, ინტეგრირებას, უსაფრთხოებას და ეკოლოგიურობას, დამოკიდებულად უახლეს ორგანიზაციულ და ტექნოლოგიურ მიღწევებზე. მათი გამოყენებით ინდუსტრიული სისტემები უზრუნველყოფენ მთლიან ექსპლუატაციურ ციკლს: “წარმოება - გამოყენება - მოცილება“, რომელიც შეიცავს ბიოთაყვანისმცემობას და ეკოეფექტურობის საკითხებს. ასეთ ციკლში უპირატესობა ენიჭება ახალ ნაკეთობებს, პროცესებს და მომსახურებებს და, ამავდროს, მიმდინარეობს შიგა და გარე დანახარჯების შემცირება.

ახალი ინდუსტრიული სისტემების განვითარება მოითხოვს ახალი ორგანიზაციული მოდელების გამოყენებას და

ცოდნის გამოყენების მართვის სრულყოფას. ამ შემთხვევაში კითხვარდება არა მარტო საინფორმაციო ტექნოლოგიები, არამედ მიდგომა იმ ადამიანებთან, რომლებსაც შეუძლიათ ცოდნის მიღება და გამოყენება.

ამის გათვალისწინებით, წარმოებაში მიხდება ახალ მასალებსა და მათ დამუშავებაზე აგებულ ჰიბრიდული ტექნოლოგიების ინტეგრირება საინფორმაციო და კომუნიკაციურ ტექნოლოგიებთან, მართვის ტექნოლოგიების ჩართვით.

სისტემური ორგანიზაცია აგრეთვე ითვალისწინებს უსაფრთხოების კონტროლს, რომელიც გამოიხატება ინდუსტრიული სისტემების მდგრადობის ამოღებაში, გარემოსთან ურთიერთობების გაზომვად ოპტიმიზაციასა და ადამიანის ჯამრთელობის დაცვაში.

ამგვარად, ინდუსტრიული სისტემების მთლიანი ექსპლუატაციური ციკლი შეიცავს სოციალურ-ეკონომიკურ პრიორიტეტებს. წარმოება და მისი ნაკეთობები ორიენტირდება მომსახურებაზე, რომელიც ხდება უსაფრთხო, სუფთა და რენტაბელური. იზრდება კომპანიების პასუხისმგებლობა საკუთარ ნაწარმზე, რესურსების ხარჯვასა და ნარჩენების მოცილებაზე.

ძლიერი პოზიციების დაკავება ახალი ტექნოლოგიების ფორმირებად ბაზარზე, პირველ რიგში, ნანოტექნოლოგიების ათვისება და გავრცელება იწვევს საზოგადოების საინფორმაციო რესურსების აქტივიზაციას და ცოდნაზე დამყარებული საზოგადოების ჩამოყალიბებას.

დანართი 1
თავსართები და მამრავლებლები ათობითი ჯერადი და წილადი ერთეულების წარმოქმნისათვის.

დასახელება	მამრავლებელი
ექსა-	10 ¹⁸
პეტა-	10 ¹⁵
ტერა-	10 ¹²
გიგა-	10 ⁹
მეგა-	10 ⁶
კილო-	10 ³
ჰექტო-	10 ²
დეკა-	10 ¹
დეცი-	10 ⁻¹
სანტი-	10 ⁻²
მილი-	10 ⁻³
მიკრო-	10 ⁻⁶
ნანო-	10 ⁻⁹
პიკო-	10 ⁻¹²
ფემტო-	10 ⁻¹⁵
ატტო-	10 ⁻¹⁸

ტერმინები

1. Scanning Tunneling Microscope (**STM**);
Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ);
გამწველი გვირაბის მკროსკოპი.
2. Atomic Force Microscope (**AFM**);
Атомно-силовой микроскоп (АТМ);
ატომურ-ბალური მიკროსკოპი.
3. Scanning Electron Microscope (**SEM**);
Растровый электронный микроскоп (РЭМ);
რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპი.
4. Scanning Auger Microscope (**SAM**);
Сканирующий Оже микроскоп (СОМ);
გამწველი ოჟე მიკროსკოპი.
5. Scanning Probe Microscope (**SPM**);
Растровый зондирующий микроскоп (РЗМ);
რასტრული ზსინჯი მიკროსკოპი.
6. Single-Electron Device (**SED**);
Одноэлектронное устройство;
ერთელექტრონიანი მოწყობილობა.
7. Single-Electron Transistor (**SET**);
Одноэлектронный транзистор;
ერთელექტრონული ტრანზისტორი.
8. Quantum Dots (**QD**);
Квантовая точка;
კვანტური წერტილი.
9. Random-Access Memory (**RAM**);
Запоминающее устройство с произвольной
выборкой;
დამამახსოვრებელი მოწყობილობა ნებისმიერი
ამოკრებით.
10. Digital Video Disc (**DVD**);
Цифровой видеодиск;
ციფრული ვიდეოდისკო
11. Retarding Field Analyzer (RFA);
Анализатор тормозящего поля,
მამუხრუჭებელი ველის ანალიზატორი.
12. Microprocessor (MCP);
Микропроцессор,
მიკროპროცესორი
13. Microelectromechanical Systems (MEMS);
Микроэлектромеханические системы,
მიკროელექტრომექანიკური სისტემები.
14. Time of Flight (TOF);
Время пролёта,
ბაქოლვის დრო.
15. Cluster
Кластер
კლასტერი
16. Fractal
Фрактал
ფრაქტალი
17. Nano Gear (NG);
Наномашина,
ნანომანქანა.

ბიბლიოგრაფია

1. Adleman L.M. Molecular computation to solutions of combinatorial problems. – Science 266, 1994. p. 1021-1024.
2. Aizawa M. Molecular interfacing for protein molecular devices and neurodevices. – IEEE Engineering in Medicine and Biology (Feb./March), 1994. p. 94-102.
3. Alivisatos A.P. Perspectives on the physical chemistry of semiconductor nanocrystals. – Journal of Physical Chemistry 1000, 1996. p. 13226-13239.
4. Allara D.L. Nanoscale structures engineered by molecular self-assembly of functionalized monolayers. – In Nanofabrication and biosystems, ed. Hoch et al. 1996.
5. Alves H., Ferreira M., Koster U., Muller B. Materials Science Forum, 1996. 225-227.
6. Andres R.P., Datta S., Janes D.B., Kubiak C.P., Reifenberger R. The design, fabrication and electronic properties of self-assembled molecular nanostructures. – In The handbook of nanostructured materials and nanotechnology, ed. H.S. Nalwa. San Diego: Academic Press.
7. Barker J.R., Roy S., Babiker S., Asenov A. Proceedings of the International Conference on Quantum Devices and Circuits. – Singapore: World Scientific, 1997.
8. Berger R., Gerber C., Lang H.P., Gimzewski J.K. Micromechanics: a toolbox for femtoscale science: “Towards a laboratory on a tip”. – Microelectronic Engineering, 35, 1996.
9. Bimberg D., Ledentsov N., Kirstaedter N., Alferov Zh., Köp'ev P.S., Ustinov V.M. IEEE, Selected Topics in Quantum Electronics 3, 1997. 196-205.
10. Blackman M. An evaluation of the Link Nanotechnology Program and the National Initiative on Nanotechnology. – Cambridge, 1994.
11. Carlsson S.B., Junno T., Xu H., Montelius L., Samelson L. Extended abstracts of the 3rd International Workshop on Quantum Functional Devices. Tokyo: R&D Association for FED, 1997.
12. Carsley J.E., Shaik R., Milligan W.W., Aifantis E.C. In Chemistry and physics of nanostructures and related non-equilibrium materials. – Warrendale, PA: TMS, 1997.
13. Chianelli R.R. Synthesis, fundamental properties and applications of nanocrystals, sheets and fullerenes based on layered transition metal chalcogenides. – In R&D status and trends, ed. Siegel et al. 1998.
14. Дадунაშვილი С.А. Возобновляемые источники энергии на базе наноматериалов. – Georgian Engineering News, No. 3, 2001. p.70-77.
15. Dadunashvili S. Perspectives of creation of solar cells on the basis of materials with fractal structures. – Proceedings of the International Workshop “Renewable Energy Sources”, Tbilisi, 2001, p.26.
16. Dadunashvili S. Actuators for modulation of Brownian mobility of micro-objects. – “АКТУАТОР 2000”, Bremen, 2000. p. 30.
17. დაუნაშვილი ს. საბინტო სიხვედობის მქონე ნანოგეგმვითი სტრუქტურების გონივრუბა. – “მეცნიერება და ტექნოლოგია”, №4-58 1997 გ. 88. 96-103.
18. Deming T.J., Fournier M.J., Mason T.L., Tirrell D.A. Biosynthetic incorporation and chemical modification

- of alkene functionality in genetically engineered polymers. – *J. Macromol. Sci. Pure Appl. Chem. A* 34, 1997. p. 2143-2150.
19. Dresselhaus M.S. Carbon-based nanostructures. - In *R&D status and trends*, ed. R. Siegel et al., 1998.
 20. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Eklund P. *Science of fullerenes and carbon nanotubes*. – San Diego: Academic Press, 1996.
 21. Friedlander S.K. Synthesis of nanostructured materials. - In *R&D status and trends*, ed. R. Siegel et al., 1998.
 22. Goddard W.A. Nanoscale theory and simulation. – In *R&D status and trends*, ed. R. Siegel et al., 1998.
 23. Hadjipanayis C.G. Nanostructured magnetic materials. - In *R&D status and trends*, ed. R. Siegel et al., 1998.
 24. Held R., Heinzel T., Studerus A.P., Ensslin K., Holland M. Semiconductor quantum point contact fabricated by lithography with an atomic force microscope. – *Fhhl Phys. Lett.* 71, 1997. p.2689-2691.
 25. Jena P., Khanna S.N., Rao B.K. In *Science and technology of atomically engineered materials*. – River Edge, NJ: World Scientific, 1996.
 26. Junno T., Carlsson S.B., Xu H., Montelius L., Samuelson L. Fabrication of quantum devices by angstrom-level manipulation of nanoparticles with atomic force microscope. – *Appl. Phys. Lett.* 72, 1998. p.548-550.
 27. Kear B., Skandan G. Nanostructural bulk materials: Synthesis, processing, properties and performance. - In *R&D status and trends*, ed. R. Siegel et al., 1998.
 28. NRC (National Research Council). *Biomolecular self-assembling materials: Scientific and technological frontiers*. – National Academy Press, Washington, DC. 1996.
 29. Olson G.B. Computational design of hierarchically structured materials. – *Science* 277, 1997. p.1237-1242.
 30. Ramanan V.R. Nanocrystalline soft magnetic alloys for applications in electrical and electronic devices. - In *R&D status and trends*, ed. R. Siegel et al., 1998.
 31. Schnur J.M. Lipid tubules: A paradigm for molecularly engineering structures. – *Science* 262,, 1993. 1669-1676.
 32. Seeman N.C. DNA nanotechnology. – In *R&D status and trends*, ed. Siegel et al., 1998.
 33. Seventh Biophysical Discussions. *Molecular motors: Structure, mechanics and energy transduction*. – *Biophys. J.* 68: Supplement S, 1995.
 34. Siegel R.W., Hu E., Roco M.C. *R&D status and trends in nanoparticles, nanostructured materials, and nanodevices in United States*. – Proceedings of the May 8-9, workshop. Baltimore: Loyola College, International Technology Research Institute, 1998.
 35. Sligar S. Molecular and electronic nanostructures. - In *R&D status and trends*, ed. Siegel et al., 1998.
 36. Stupp S., Braun P.V. Molecular manipulation of microstructures: biomaterials, ceramics and semiconductors. – *Science* 277, 1997. p. 1242-1248.
 37. Svoboda K., Block S.M. Biological applications of optical forces. – *Ann. Rev. Biophys. Biomol. Struct.* 23, 1994. 247-285.

38. Weertman J.R., Averbach R.S. In *Nanomaterials: Synthesis, properties and applications.* – Bristol: Institute of Physics Publ, 1996.
39. Wilder K., Soh H.T., Soh T., Atalar A., Quate C.F. Hybrid atomic force/scanning tunneling lithography. – *J. of Vacuum Science&Technol. B.* 15, 1997. p.1811-1817.
40. Wildoer J., Venema L.C., Rinzler A.G., Smalley R.E., Dekker C. Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes. – *Nature* 391, 1998. 59-62.
41. Zhang Z., Roukes M.L., Hammel P.C. Sensitivity and spatial resolution for electron-spin-resonance detection by magnetic resonance force microscopy. – *J. of Appl. Phys.* 80, 1996. p.6931-6938.

სერგო არჩილის-მე ლაღუნაშვილი
ნანოტექნოლოგიების შესავალი

Серго Арчилович Дадунашвили
ВВЕДЕНИЕ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

Sergo Archil Dadunashvili
INTRODUCTION IN NANOTECHNOLOGYS

ზაღაევა წარმოებაში 05.06.2002.. ხელმოწერილია
დასაბეჭდად 15.09.2002 ქალაქის ზომა 60*84. პირობითი
ნაბეჭდი თაბახი. 7,25 სააღრიცხვო-საგამომცემლო თაბახი
4,4. ტირაჟი 100. შეკვეთა . 112..

უასი სახელწიკრული

ამომცემლობა “ტექნიკური უნივერსიტეტი”
თბილისი, მ. კოსტავას 77

სტუ-ს სტამბა, თბილისი, კოსტავას 75