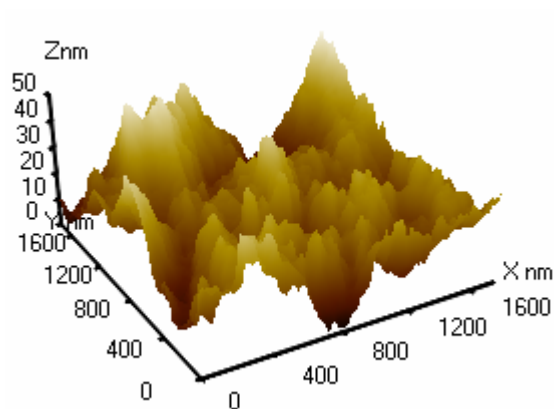


M.Ə.Ramazanov, A.Q.Həsənov

**NANOTEKNOLOGİYADAN
LABORATORİYA
İŞLƏRİ**

Ali məktəblər üçün dərs vəsaiti



Bakı – 2008

M.Ə.Ramazanov, A.Q.Həsənov

***Bakı Dövlət Universitetinin yaradılmasının
90 illik yubileyinə həsr olunur.***

NANOTEKNOLOGİYADAN LABORATORİYA İŞLƏRİ

Ali məktəblər üçün dərs vəsaiti

Fizika, kimya, biologiya fakültələrinin bakalavr və magistr pillələrində təhsil alan tələbələr üçün dərs vəsaiti

Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyinin 22 fevral 2008-ci il tarixli 246 sayılı əmri ilə təsdiq edilmişdir.

Bakı – 2009

ELMİ REDAKTORLAR: dos., f.-r.e.n. K.M.Daşdəmirov
f.-r.e.n. F.H.Paşayev

RƏYÇİLƏR: prof., f.-r.e.d. V.M.Salmanov
prof., f.-r.e.d. B.Ş.Barxalov

M.Ə.Ramazanov, A.Q.Həsənov. Nanotexnologiyadan laboratoriya işləri. “Bakı Universiteti” nəşriyyatı, 2009, -224 s.

Dərs vəsaitindən ali məktəblərin fizika, kimya və biologiya fakültələrinin bakalavr və magistr pillələrində təhsil alan tələbələr, aspirantlar və nanotexnologiya sahəsi ilə məşğul olan elmi işçilər istifadə edə bilərlər.

$$H \frac{1708000000 - 04}{M - 658(07) - 004} - 004 - 2009$$

© “*Bakı Universiteti*” nəşriyyatı, 2009

ÖN SÖZ

Dünya elminin əsas istiqamətlərindən biri sayılan nanotexnologiyanın inkişafı qarşıya universal bilikli ixtisaslı kadrların hazırlanmasını bir vacib problem kimi önə çəkir. Məlumdur ki, nanotexnologiya 0,1-100 nm ölçülü hissəciklərdə və quruluşlarda baş verən fiziki, kimyəvi və bioloji hadisələrin yaratdığı təsirləri öyrənir. Bu elmi-texniki istiqamətin əsasını yeni nanoquruluşlu materialların alınması, tədqiqi və tətbiqi təşkil edir. Belə kiçikölçülü tədqiqat aləmi fizika üçün tamamilə yeni sahədir. İndiyə kimi tədqiqatlar mikrometr, yəni metrin milyonda biri səviyyəsində aparılırdı və çağdaş mikroelektronika bu araşdırmaların nəticələrinə əsaslanır. Min dəfə kiçik ölçülər səviyyəsinə enmə fizikləri yeni problemlərlə üz-üzə qoyur.

Nanotexnologiyanın həll etdiyi problemlər fundamental və texnoloji problemlərin həlli ilə əlaqədar olduğu üçün elmi və mühəndis biliklərin sintezini tələb edir.

Məlumdur ki, tədqiq olunan obyektlərin ölçüləri kiçildikcə onların fiziki və kimyəvi xassələri kəskin dəyişir. Fiziki və kimyəvi xassələrin nanoölçülü sistemlərdə kəskin olaraq dəyişməsi bu cür materialların texnikanın müxtəlif sahələrində tətbiqinə imkan yaradır.

Unikal xassələrə malik nanoquruluşların formalaşması yeni metodların və vasitələrin istifadəsi tələblərini qarşıya qoyur. Alınan quruluşun nanoölçülü olmasını müəyyən etmək üçün ilk növbədə elektron və atom-qüvvə mikroskoplarından istifadə edilməsi vacib məsələdir. Təhsilin bakalavr və magistr pilləsində təhsil alan tələbələr tərəfindən nanoölçülü quruluşların ölçülərinin öyrənilməsi, onlarda nanoölçülü sistemlər haqqında təsəvvürün formalaşmasına və nanomaterialların tədqiqi istiqamətində ilkin laborator vərdişlərin yaranmasına kömək edər. Skanedici atom-qüvvə və tunel mikroskopu vasitəsilə nanoquruluşların öyrənilməsinin tədrisini təşkil etmək mühüm əhəmiyyətə malikdir. Kitabda təqdim olunmuş laboratoriya işləri

Rusiyanın NT MDT kompaniyası tərəfindən istehsal olunmuş SZMU-L5 markalı skanedici atom-qüvvə və tunel mikroskopu vasitəsilə nanoölçülü quruluşların öyrənilməsi üçün nəzərdə tutulmuşdur. Eyni zamanda suyun mikroflorasının öyrənilməsi ilə əlaqədar laboratoriya işi daxil edilmişdir.

Nanotexnologiyadan laboratoriya işləri dərns vəsaiti ana dilində yazılmış ilk kitab olduğu üçün qüsurların olacağına şübhə etmədiyimiz üçün bizə irad və təkliflərini bildirənlərə öz minnətdarlığımızı bildiririk.

Müəlliflər

Laboratoriya işi № 1

Skanedici zond mikroskopu(SZM) vasitəsilə nümunə səthinin topoqrafiyasının alınması. Təcrübənin nəticələrinin işlənməsi

1.1. İşin məqsədi	7
1.2. İşin məzmunu	8
1.3. Metodik göstərişlər	36
1.4. Tapşırıq	36
1.5. Yoxlama sualları.....	36

Bərk cisimlərin səthlərinin tədqiqi müasir fizikanın vacib məsələlərindən biridir. Buna zərurət bir tərəfdən yarımkeçirici cihazların submikron səviyyədə müasir texnologiya ilə hazırlanmasına keçidlə bağlı əmələ gəlmişdir. Çipin həcmi yox, səthi onun vasitəsilə məntiqi funksiyaların yerinə yetirilməsi və digər elementlərlə qarşılıqlı təsir zamanı əsas rol oynayır.

Səth və səthdə baş verən hadisələr fundamental fizika baxımından maraqlıdır. Belə ki, atom strukturu, qəfəs təbəqələrinin yerləşməsi və xüsusiyyətləri səthə yaxın yerdə, həcmdə yerləşməsindən tamamilə fərqlənir.

Səthin tədqiqinin ənənəvi üsulları, yəni rentgen və ya ion difraksiyası zəif sürətli ionların difraksiyası, elektron spektroskopiyası atomların nümunənin səthi üzrə yerləşməsinin təqribi (ortalanmış) təsvirini verməyə imkan verir, ancaq bu atom strukturunu adi göz vasitəsilə görməyə imkan vermir. Bütün bu metodlar yalnız vakuum şəraitində işləyir, nanometr ölçüdə detalları ayırd etməyə imkan verir, ancaq bu zaman yüksək enerjili zərrəciklər seli nümunəni zədələyə bilər. Bundan əlavə, bu üsullar səthdəki kəllə-kötürlər haqqında bilavasitə məlumat almağa imkan vermir.

Bu problemləri qismən skanedici tunel mikroskopu (STM) vasitəsilə həll etmək mümkün olmuşdur. 1980-ci illərin əvvəllərində atom ölçüləri dəqiqliyi ilə silisiumun səthinin şəklinin təcrübədə alınması dünyaya məlum oldu.

Sonralar atom-qüvvə mikroskopunun (AQM) kəşfi praktik olaraq qeyri-məhdud yeni imkanların yaranmasına imkan verdi. AQM-in köməyi ilə nəinki keçirici materialların səthinin relyefini, eyni zamanda dielektrik materialların səthlərinin relyefinin öyrənilməsi mümkündür. Həmin vaxtdan skanedici zond mikroskopunun (SZM) tətbiq imkanları xeyli genişləndi.

Hal-hazırda SZM çoxşaxəli fənlərin öyrənilməsində, fundamental elmi tədqiqatlarda, həmçinin yüksək texnologiyalı tədqiqatlarda istifadə olunur. Bununla əlaqədar olaraq yüksəkixtisaslı mütəxəssislərə tələb daima artır. Bu tələbin ödənilməsi ilə

əlaqədar «**NT-MDT**» kompaniyası (Zelenoqrad ş., Rusiya Federasiyası) tərəfindən hazırlanmış və ixtisaslaşmış təhsil-elm laboratoriyasının Skanedici zond mikroskopu - **NanoEducator** yaradılmışdır.

SZM **NanoEducator**, xüsusilə tələbələrin laboratoriya işlərini yerinə yetirmələri üçün hazırlanmışdır. Cihazlar tələbə auditoriyası üçün nəzərdə tutulmuşdur: kompüter vasitəsilə idarə olunur, sadə və münasib interfeysə malik olub, animasiya imkanı, mərhələli öyrənmə üsulu, mürəkkəb olmayan parametrlərə və baha olmayan xərclərə malikdir.

Bu laboratoriya işində skanedici zond mikroskopunun əsaslarına baxılacaq, **NanoEducator** cihazının konstruksiyası və iş prinsipi öyrəniləcək, həmçinin müəllimin nəzarəti altında SZM vasitəsilə bərk cismin səthinin şəklinin alınması, təcrübənin nəticələrinin işlənməsi və təqdimatı öyrəniləcəkdir.

1.1. İşin məqsədi

1. Skanedici zond mikroskopunun iş prinsipinin öyrənilməsi.
2. **NanoEducator** cihazının konstruksiyası və iş prinsiplərinin öyrənilməsi.
3. SZM vasitəsilə birinci şəklın alınması.
4. Təcrübənin nəticələrinin işlənməsi və təqdimatı, iş vərdişlərinin yaranması.

Ləvazimat: Skanedici zond mikroskopu (Model SZMU-L5), zond, NanoEducator proqramı və kompüter.

Tədqiqat üçün nümunə: **TGZM** nümunə testi və ya müəllimin seçdiyi hər hansı bir nümunə ola bilər.

Müəllimin nəzarəti altında nümunə səthinin skan edilməsi yerinə yetirilir, təcrübənin nəticələrini hər bir tələbə fərdi qaydada işləməlidir. İşin təcrübə hissəsi bir dərs zamanı yerinə yetirilir və bu dörd saat davam edir. İşə başlamazdan qabaq, daha münasib xarakterli amplitud-tezlik xarakteristikası olan

zond (bir simmetrik maksimumu olan) seçmək zəruridir ki, tədqiq olunan nümunənin şəklini almaq mümkün olsun.

1.2. İşin məzmunu

Skanedici zond mikroskopunun əsasları (SZM-in iş prinsipi, SZM-in əsas komponentləri və onların təyinatı).

NanoEducator SZM-in konstruksiyası ilə tanışlıq (ümumi konstruksiyası, tunel cərəyanı və qarşılıqlı təsir qüvvəsinin universal çeviricisi, SZM-də skan etmə, zondun nümunəyə yaxınlaşma mexanizmi (əks əlaqəyə giriş, **Scanner Protration** və **Probe Oscillation Amplitude** parametrləri)). **NanoEducator** skanedici cihazın, zond çeviricisinin iş prinsipləri və konstruksiyaları animasiya klipləri vasitəsilə aydınlaşdırılır.

NanoEducator cihazının idarəetmə proqramı ilə tanışlıq (verilənlərin alınması və işlədilməsi rejimləri, skanedici qüvvə mikroskopu (SQM) və skanedici tunel mikroskoplarla (STM) iş).

SQM rejimində birinci SZM şəklinin alınması, nümunənin qoyulması, zondun (zond çeviricisinin) yerinə qoyulması, nümunəyə nəzərən zondun mövqeyinin təyini (skan edilən yerin seçilməsi, əvvəlcədən zondun nümunəyə yaxınlaşdırılması), sürətli yaxınlaşma, rezonansı axtarmaq və işçi tezliyinin təyini, əks əlaqəyə giriş.

Skanedicinin parametrlərinin seçilməsi (skanedicinin ölçülərinin seçilmə kriteriyası, xətlər üzərində nöqtələrin sayı və skanedici xətlərin sayı, skanedicinin sürəti, əks əlaqə dövrəsinin parametrləri (**Feed Back Loop Gain**), SZM-lə şəklın alınması. Alınmış şəklın işlədilməsi və təhlili. Şəklindəki skanedici arte-faktların kənarlaşdırılması. Alınmış şəklın qrafik təqdimatı üsulları.

SZM üsulu haqqında işə görə hesabat ümumi məlumatlardan ibarət olmalıdır. Tələbədə təcrübədə eksperimentin nəticələrinin işlənməsi və təhlili əsasında aldığı vərdişlər özünü göstərməlidir.

Skanedici zond mikroskopunun əsasları

Bərk cisimlərin səthlərinin öyrənilməsinin əsaslı tədqiqi üçün çoxlu sayda müxtəlif üsullar mövcuddur. Mikroskoplar hələ XV əsrdən şəkillərin böyüdülməsi üçün istifadə olunur. Həmin vaxtlarda həşəratları öyrənmək üçün sadə böyüdücü şüşələr hazırlanmışdı. XVII əsrin sonunda Antonio van Levenhuk optik mikroskop hazırlamış və bu hüceyrələrin mövcudluğunu, xəstəlik törədici mikroblar və bakteriyaların varlığını aşkar etməyə imkan vermişdir. Artıq XX əsrdə elektron və ion dəstələri vasitəsilə işləyən mikroskoplar hazırlanmışdır.

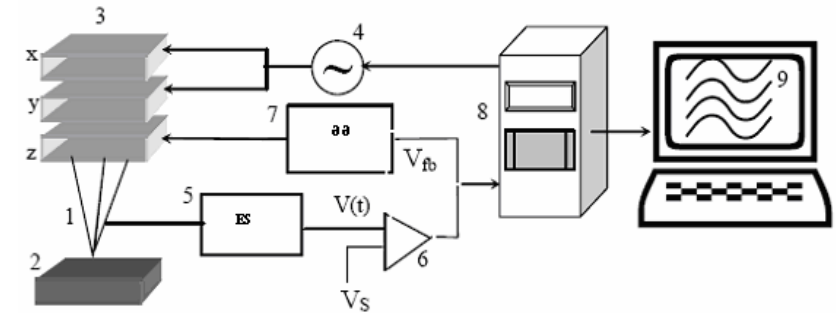
Bütün sadalanan mikroskopiya üsullarında belə prinsip tətbiq olunur: tədqiq olunan obyektin hissəciklər seli vasitəsilə işıqlandırılması və onun növbəti çevirmələri. Skanedici zond mikroskoplarında başqa prinsip istifadə olunur-hissəciklərlə zondlama əvəzinə mexaniki zond-iyinə istifadə olunur [5]. Belə demək olar ki, əgər optik və elektron mikroskoplarında nümunəyə baxılırsa, SZM-də isə nümunə səthini toxunmaqla öyrənirlər.

SZM üsulunda tətbiq olunan başqa əsas prinsip skanedici prinsipdir, yəni tədqiq olunan obyekt haqqındakı alınmış məlumat diskret xarakterlidir (nöqtədən-nöqtəyə, xətdən-xəttə kimi). Zond yerini dəyişərək hər bir nöqtədə səth haqqında məlumatı skan edərək oxuyur.

Skanedici zond mikroskopunun ümumi konstruksiyası

SZM aşağıdakı əsas hissələrdən ibarətdir (şəkil 1-1): 1-zond; 2-nümunə; 3-tədqiq olunan nümunənin səthi üzərində zondun yerini dəyişmək üçün x, y, z piezoelektrik mühərrik; 4-zondun üfüqi müstəvidə skanetməni təmin edən x və y piezoqurğuya gərginlik verən generator; 5-zondla nümunə arasında qarşılıqlı təsirin lokal qiymətini təyin edən elektron sensor; 6-sensor dövrəsindəki $V(t)$ cari siqnalı başlanğıcda verilən V_S -lə müqayisə edən və $V(t)$ -nin kənəraçıxmaları zamanı korrektədən V_{fb} siqnallarını yaradan komparator; 7- z oxu üzrə

zondun vəziyyətini idarə edən əks əlaqə elektron dövrəsi; 8-skanetmə prosesini idarə edən kompüter; 9-skan edilmiş şəkil.



Şəkil 1-1. Skanedici zond mikroskopunun ümumi sxemi.
1- zond; 2 - nümunə; 3 - piezoelektrik mühərriklər x, y, z;
4 - x, y piezokeramikaya cərəyan verən generator;
5 - elektron sensor; 6 - komparator; 7 - əks əlaqə elektron dövrəsi; 8 - kompüter; 9 - z(x, y) şəkilin alınması.

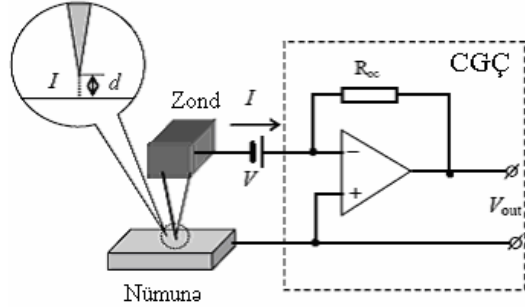
Sensorların növləri

Skanedici zond mikroskopunun iş prinsipi zond tədqiq olunan nümunə səthinə $\sim \lambda$ məsafəyə qədər yaxınlaşarkən onlar arasında yaranan lokal qarşılıqlı təsirin aşkarlanmasına əsaslanır (burada λ - zond-nümunə qarşılıqlı təsirin sönmə uzunluğu). Zond-nümunə qarşılıqlı təsirin təbiətindən asılı olaraq: müxtəlif skanedici tunel mikroskopu (STM tunel cərəyanını aşkar edir), skanedici qüvvə mikroskopu (SQM qarşılıqlı təsir qüvvəsini aşkar edir), yaxın sahə skanedici optik mikroskopu (YSOM elektromaqnit şüalanmasını aşkar edir) və i.a. kimi növləri vardır. Skanedici qüvvə mikroskopu qarşılıqlı təsirin xarakterindən asılı olaraq öz növbəsində atom-qüvvə mikroskopu (AQM), maqnit qüvvə mikroskopu (MQM), elektron qüvvə mikroskopu (EQM) və başqa növlərə bölünür.

Girişdə qeyd olunduğu kimi zond mikroskopiyasının iki əsas STM və AQM metodları vardır.

Tunel sensorundakı tunel cərəyanını ölçmək üçün zond və nümunə dövrəsinə qoşulmuş cərəyan-gərginlik çeviricisindən

(CGÇ) istifadə olunur. Skanedici zond qoşulmanın iki halı mümkündür: yerə birləşdirilmiş zonda nəzərən gərginliyin dəyişməsi nümunəyə verilir və ya yerə birləşdirilmiş nümunəyə nəzərən gərginliyin dəyişməsi zonda verilir.



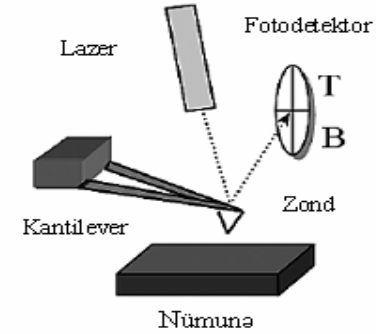
Şəkil 1-2. Tunel sensorun sxemi.

Ənənəvi qarşılıqlı təsir çeviricisi olaraq silisiumdan hazırlanmış konsol və ya kantilever (ingilis dilində cantilever-consol) (şəkil 1-3) istifadə olunur. Kantileverin sonunda nümunə və zond arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsinin nəticəsi kimi meydana çıxan, kantileverin əyilməsinin qiymətini qeyd edən optik sxem yerləşmişdir.

Qüvvə mikroskopiyasının yerinə yetirilməsinin kontakt, kontaktsız və qismən kontakt (yarım kontakt) üsulları mövcuddur. Kontakt üsulundan istifadə edilməsi zamanı zond nümunə səthinə toxunur. Kontakt qüvvənin təsiri nəticəsində kantilever əyilir və ondan əks olunan lazer şüaları kvadratik fotodetektorun mərkəzinə nəzərən sürüşür. Beləliklə, kantileverin əyilməsi meyli fotodetektorun yuxarı və aşağı yarım hissəsinin işıqlanmasının nisbi dəyişməsinə nəzərən təyin olunur.

Kontaktsız üsulun istifadə olunması zamanı zond nümunənin səthində kənarında olur və bu zaman cəzətmə qüvvələrinin təsir oblastında yerləşir. Cəzətmə qüvvələri və onların qradiyenti kontakt itələmə qüvvələrinin təsirindən zəifdir. Buna görə də qarşılıqlı cəzətmə qüvvəsinin aşkarlanması üçün modul-

yasiya üsulu istifadə olunur. Bunun üçün pyezovibra-torun köməyi ilə şaquli istiqamətdə kantileverin müəyyən rezonans tezlikdə rəqsi baş verir. Nümunənin səthindən uzaqda kantileverin rəqs amplitudunun qiyməti maksimal olsun. Cəzətmə qüvvəsinin qradiyentinin təsiri nəticəsində zond səthə yaxınlaşarkən kantileverin rəqsinin rezonans tezliyi dəyişir, bu zaman onun rəqs amplitudu azalır. Bu amplituda fotodetektorun yuxarı və aşağı yarım hissəsinin işıqlanmasının dəyişməsinə nəzərən optik sxemin köməyi ilə qeyd olunur.



Şəkil 1-3. Qüvvə sensorun sxemi.

Yarımkontakt üsulunda, həmçinin qarşılıqlı təsir qüvvəsinin ölçmək üçün modulyasiya metodu tətbiq olunur. Yarımkontakt rejimində zond qismən nümunənin səthinə toxunur, bu zaman zond həm cəzətmə oblastında, həm də itələmə oblastında növbə ilə olur.

Qarşılıqlı təsir qüvvəsinin aşkarlamaq üçün daha sadə üsullar da mövcuddur. Bu zaman yaranan qarşılıqlı təsir qüvvəsinin birbaşa elektrik siqnalına çevrilməsi baş verir. Belə üsullardan biri pyzeoeffektədən istifadə etməkdir, bu zaman qarşılıqlı təsir nəticəsində pyezomaterialın əyilməsi, elektrik siqnalının yaranmasına səbəb olur.

Pyezoelektrik mühərrik. Skanedicilər

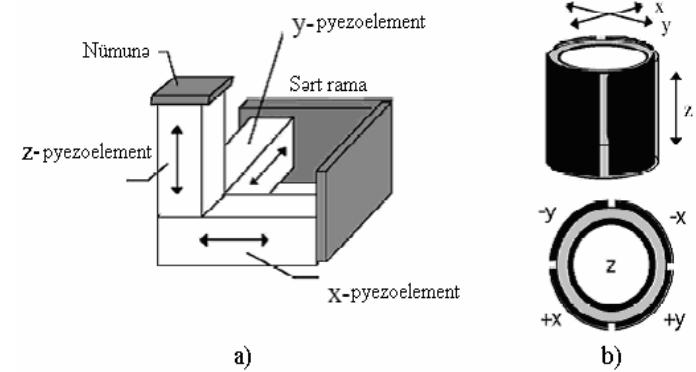
SZM-də çox kiçik məsafələrdə iynənin yerdəyişməsinə nəzarət etmək üçün piezoelektrik mühərrikdən istifadə olunur. Bu piezoelektrik mühərrik hərəkət etməyən tədqiq olunan nümunəyə nəzərən zondun yerdəyişməsinə və ya zonda nəzərən nümunənin yerdəyişməsinə təmin edir, nəticədə zond mexaniki skan edir.

Müasir SZM-də tətbiq olunan əksər piezoelektrik mühərriklərin işi, əks piezoeffektdən istifadə olunmasına əsaslanır ki, bu elektrik sahəsinin təsiri nəticəsində piezomaterialın ölçülərinin dəyişməsi ilə bağlıdır. SZM-də tətbiq olunan əksər piezokeramik materialın tərkibi müxtəlif əlavələr daxil olan $Pb(ZrTi)O_3$ (qurğuşun sirkonat-titanat)-dir [6].

Bir ucu bərkidilmiş pyezolövhnin uzanması $\Delta l = \frac{U}{h} d_{31}$ ifadəsi ilə təyin olunur. Burada, l - lövhənin uzunluğu, h - lövhənin qalınlığı, U -pyezolövhnin uclarında bərkidilmiş elektrodlara tətbiq olunan elektrik gərginliyi, d_{31} -materialın pyezomoduludur.

Hal-hazırda pyezokeramik mühərriklər müxtəlif növ və formalarda istehsal olunur. Hər birinin 0,1-dən 300nm/V intervalında özünün unikal pyezomodulu olur. Belə ki, 0,1nm/V genişlənmə əmsalına malik keramikaya 100mV gərginlik tətbiq olunarkən 0,1 Å qədər yerdəyişmə almağa imkan verir. Bu da atom ölçüsündə ayırd etməyə imkan verir. Böyük diapazonda skanetmə almaq üçün pyezomodulun qiyməti böyük olan pyezokeramikalardan istifadə olunur.

Həm nümunənin müstəvi səthi üzrə x , y həm də şaquli istiqamətdə z zondun yerdəyişməsinə təmin edən pyezokeramik konstruksiyalar skanedicilər adlanır. Bir neçə növ skanetmə cihazları mövcuddur. Ən çox yayılmış “üçayaqlı” və “boru” şəkilli skanedici cihazlardır (şəkil 1-4).



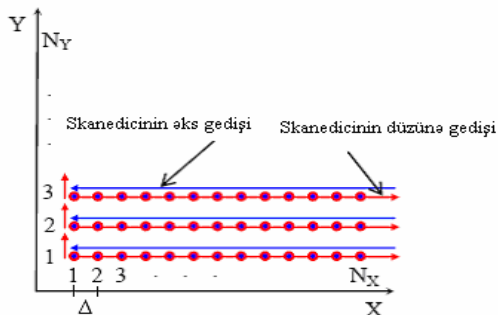
Şəkil 1-4. Skanetmə cihazlarının əsas konstruksiyaları: a) üçayaqlı; b) boru şəkilli.

Üçayaqlı skanedicinin üç koordinat üzrə hərəkətinin ortoqonal strukturda yerdəyişməsinə üç asılı olmayan pyezokeramikalar təmin edir.

Boru şəkilli skanedicinin işi bilavasitə piezoelektrik boruların x , y müstəvisində (lateral) əyilməsi, z oxu boyunca isə uzanması və ya qısalması hesabına mümkün olur. Piezoelektrik boruların x və y istiqamətlərində yerdəyişməsinin idarə olunması üçün boruların səthi üzərində seqment şəklində dörd elektrod yerləşdirilir (şəkil 1-4b). x istiqamətində pyezoborunun əyilməsi üçün, $+x$ istiqamətində keramikaya verilmiş gərginlik nəticəsində onun bir tərəfinin uzanması lazımdır. Eyni prinsip y istiqamətində hərəkətin əmələ gəlməsi üçün istifadə olunur. x və y istiqamətlərində yerdəyişmə, verilən gərginliklə və boru-nun uzunluğunun kvadratı ilə mütənasibdir. z istiqamətində hərəkət borunun mərkəzində yerləşmiş elektroda verilən gərginlik nəticəsində baş verir. Bütün bunlar borunun uzunluğu və tətbiq olunan gərginliklə mütənasib olaraq bütün boruların uzanmasına gətirib çıxarır.

SZM-lə səthin skan edilməsi prosesi televizorun elektronşüa borusunda ekran üzrə elektron şüasının hərəkətinə oxşayır. Zond əvvəlcə xətt (sətirlər) boyunca düzünə və həmin xətt

boyunca əks istiqamətdə (sətrin əksinə) hərəkət edərək, sonra növbəti sətrə (kadr hissəsinə) keçir. Generator tərəfindən verilən (adətən, ədədi-analoq çeviricisi) mişarvarı gərginliyin təsiri nəticəsində skanedicinin köməyilə kiçik addımlarla zondun hərəkəti baş verir. Zondun düzünə hərəkəti zamanı tədqiq olunan səthin relyefi haqqında məlumat qeydə alınır.



Şəkil 1-5. Skanetmə prosesinin sxematik şəkli.

Skanetmədən əvvəl seçilən əsas parametrlər bunlardır:

- Skanetmənin ölçüsü;
- Skanetmənin addımı Δ -nı təyin edən, N_x və N_y xətləri üzrə nöqtələrin sayı;
- Skanetmənin sürəti.

Tədqiq olunan obyekt haqqında tədqiqatçının ilkin məlumatları əsasında skanetmənin parametrləri seçilir (səthin xarakteristik xüsusiyyətlərinin ölçülərini nəzərə almaqla).

Skanetmənin ölçülərini seçərkən nümunənin səthi haqqında tam məlumat əldə etmək zəruridir, yəni nümunə səthinin xarakteristik xüsusiyyətləri haqqında geniş məlumat olmalıdır. Məsələn, periodu 3 mkm olan difraksiya qəfəsini skan etmək üçün, heç olmasa bir neçə period haqqında təsəvvür olmalıdır, yəni skanetmənin ölçüsü 10-15 mkm olmalıdır. Əgər tədqiq olunan obyektin xarakteristik xüsusiyyətlərinin səth üzrə yer-ləşməsi bircinsli deyilsə, onda kifayət qədər dəqiq qiymətlən-dirmək

üçün, nümunə səthi üzərində bir-birindən kənarında olan bir neçə nöqtələrdə skanetməni aparmaq zəruridir. Əgər tədqiq olunan obyekt haqqında məlumat yoxdursa, əvvəlcə səth haqqında ümumi xarakterli məlumat almaq üçün, səth üzərində elə sahəni seçmək lazımdır ki, skanetmə nəticəsində obyekt haqqında müəyyən təsəvvürlər yaranmış olsun. Təkrar skan edərkən skanetmənin ölçülərinin seçilməsi ümumi xarakterli skanetmə zamanı alınmış verilənlər əsasında aparılmalıdır.

Skanetmə zamanı nöqtələrin sayı (N_x , N_y) elə seçilir ki, skan etmə Δ addımı (nöqtələr arasında məsafə olub səth haqqında məlumatın oxunması həyata keçirilir) xarakteristik xüsusiyyətlərindən kiçik olsun, əks halda isə nöqtələr arası skanetmə zamanı məlumatın bir hissəsi itmiş olar. Digər tərəfdən əlavə nöqtələrin seçilməsi skanetmə vaxtının artmasına səbəb olar.

Məlumatın oxunması zamanı zondun nöqtələr arasında hərəkət etmə sürəti skanetmənin sürətini təyin edir. Əlavə yük-sək sürətin olması əks əlaqə sisteminin zondun səthdən uzaqlaşdırılmasına imkanı olmaz, bu isə şaquli ölçülərin səhv oxunmasına, həmçinin zondun və nümunə səthinin zədələnməsinə səbəb olar. Skanetmənin kiçik sürətlə aparılması isə skanetmə vaxtının artmasına səbəb olardı.

Əks əlaqə sistemi

Skanetmə prosesi zamanı zond nümunə səthinin müxtəlif fiziki xassələrə malik müxtəlif hissələri üzərində ola bilər, bunun nəticəsində zond və nümunə arasında qarşılıqlı təsir kəmiyyətinin qiyməti və xarakteri dəyişmiş olacaqdır. Bundan əlavə, nümunə səthi hamar deyilsə, onda skanetmə zamanı zond və nümunə arasındakı z məsafəsi dəyişmiş olacaq və buna uyğun olaraq lokal qarşılıqlı təsir kəmiyyətlərinin qiymətləri də dəyişmiş olacaqdır.

Əks əlaqə sisteminin köməyilə skanetmə prosesi zamanı lokal qarşılıqlı təsir kəmiyyətlərinin qiymətləri sabit saxlanılır (qüvvə və ya tunel cərəyanı). Zond nümunə səthinə yaxınlaş-

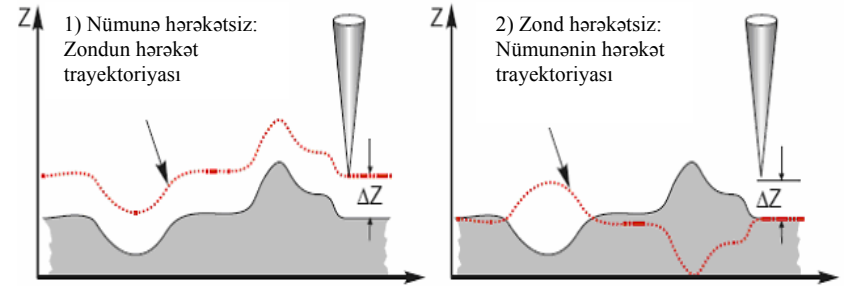
dıqca sensorun siqnalı artır. Komparator sensorun cari siqnalını dayaq gərginliklə- V_s müqayisə edərək, korrektə edən- V_{fb} siqnal yaradaraq pyezogətirmə qurğusunun idarə olunması zamanı istifadə edilərək zondun nümunə səthindən uzaqlaşdırır. Bu zaman z pyezogətirmə kanalından nümunə səthinin topoqrafiya şəklini almaq üçün siqnal götürülür. Şəkil 1-6-da zond və nümunə arasında qarşılıqlı təsir kəmiyyətlərini sabit saxlamaqla zondun nümunəyə nəzərən (əyri 2) və nümunənin zonda nəzərən (əyri 1) hərəkət trayektoriyası göstərilmişdir. Əgər zond çuxur və ya hər hansı səth hissəsində olarkən qarşılıqlı təsir zəifdirsə onda nümunə yuxarıya qaldırılır, əks halda nümunə aşağı salınır. Əks əlaqə sisteminə müraciət $V_{fb}=V_{if}-V_s$ siqnalı yararkən əks əlaqə dövrəsində K sabiti ilə (**NanoEducator** cihazında – **Feed Back Loop Gain**) və ya bir neçə sabitlə xarakterizə olunur. K -nın konkret qiyməti SZM-in xüsusi konstruksiyasından (skanedicinin konstruksiyası və xarakteri, elektron quruluşundan asılıdır), SZM-in iş rejimindən (skanet-mənin ölçüləri və sürətini və i.a.), həmçinin tədqiq olunan səthin xüsusiyyətlərindən (kələ-kötürlüüyün səviyyəsindən, topoqrafiyasının məşab xüsusiyyətindən, materialın bərkliyindən və i.a.) asılıdır.

Ümumiyyətlə, K -nın qiyməti nə qədər böyükdürsə, əks əlaqə dövrəsi nümunə səthinin skanedilməsi zamanı alınan nəticələrin kifayət qədər daha dəqiq alınmasına imkan verir. Bəzən K -nın qiyməti hər hansı kritik qiyməti aşarsa əks əlaqə sistemi öz-özünü həyəcanlandırmağa meyl edərək, bu zaman skanedilmiş xətlərdə səs-küylər müşahidə olunur.

SZM verilənlərin formatı, təcrübənin nəticələrinin işlənməsi üsulları və təqdimi

Skanedici zond mikroskopu vasitəsilə alınmış məlumatlar SZM kadri şəklində ikiölçülü Z_{ij} tam ədədlər massivi kimi saxlanılır. Hər bir ij cütünə skanedilmiş sahə çərçivəsi daxilində nümunə səthinin bir nöqtəsi uyğundur. Səth nöqtələrinin

koordinatlarını hesablamaq üçün nöqtələr arası məsafənin qiymətini uyğun indeksə vurmaq lazımdır. SZM kadrları **200x200** və ya **300x300** elementləri olan kvadrat matrislər kimi təsvir olunurlar.



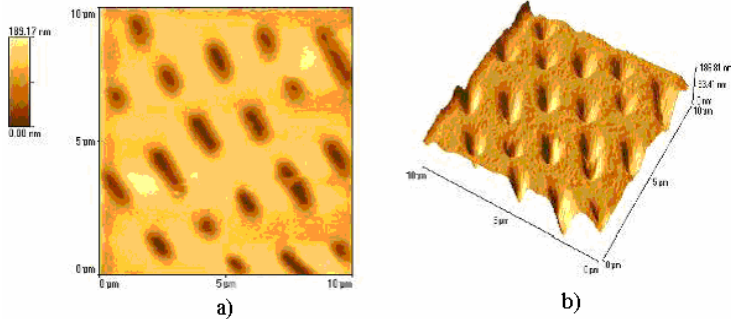
Şəkil 1-6. Əks əlaqə sisteminə lokal qarşılıqlı təsiri sabit qalmaqla zondun və nümunənin hərəkət trayektoriyaları.

SZM kadrların gözlə görünən kompüter qrafikası vasitələri ilə aparılır, əsasən ikiölçülü işıqlı (2D) və üçölçülü (3D) təsvirləri şəklindədir. 2D gözlə görünən relyefin $Z=F(x,y)$ səthinin hər nöqtəsinə səthin nöqtəsinin hündürlüyünə uyğun olaraq təyin olunmuş rəngin tonu qarşı qoyulur. Səth üzərində fəzada yerləşmiş hər hansı nöqtənin səthin nöqtəvi mənbələrlə şərti işıqlanma modelləşdirmə əsasında 3D təsvirlərinin rəng-lənməsi üsulundan istifadə edilir (şəkil 1-7a). Bu zaman relyefin ayrıca kiçik xüsusiyyətlərini qeyd etmək mümkündür.

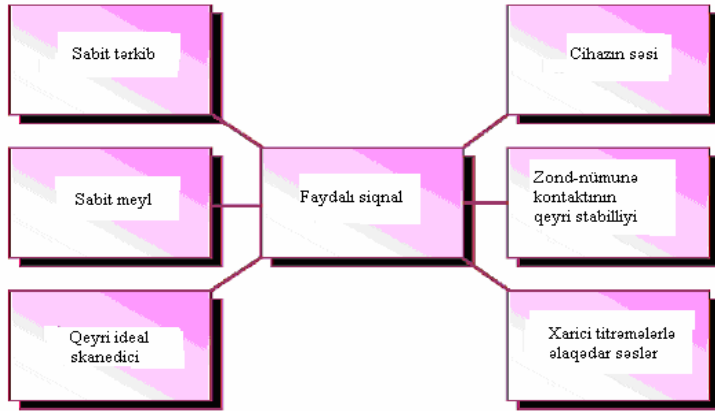
SZM şəkillərində əhəmiyyətli məlumatlarla bərabər, həmçinin çoxlu əlavə məlumatlar da olur ki, bunlar nümunə səthinin morfoloqiyası və xüsusiyyətləri haqqında yanlış məlumatlardır.

Şəkil 1-8 də səthin SZM şəkillərində sxematik olaraq mümkün təhrif olunmalar verilmişdir.

SZM şəkillərinə həmişə sabit tərkib daxildir ki, bu səthin relyefi haqqında heç bir əhəmiyyətli məlumatı göstərmir. Bu z oxu üzrə skanedicinin dinamik diapazonda yerdəyişmələri zamanı nümunənin gətirilmə dəqiqliyini təsvir edir. Sabit tərkib SZM kadrlardan proqram yolu ilə silinir.



Şəkil 1-7. SZM təsvirlərinin qrafik üsulları: a) 2D; b) 3D yandan işıqlanma.

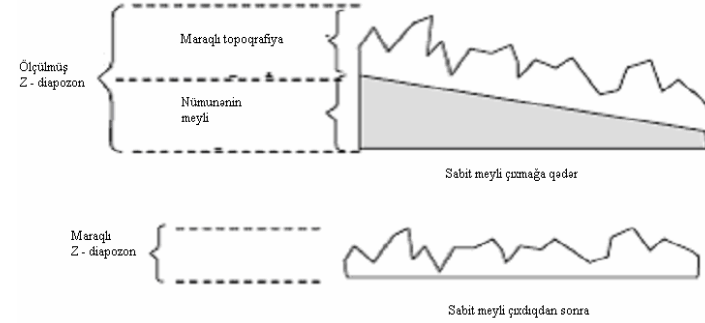


Şəkil 1-8. SZM şəkillərində mümkün təhrif olunmalar.

Skanedici zond mikroskopu vasitəsilə səthin alınmış şəklində bir qayda olaraq ümumi meyl olur. Bu bir neçə səbəblərlə əlaqədardır.

Birincisi, nümunə zonda nəzərən dəqiq qoyulmur və buna görə meyl əmələ gəlir. İkincisi, bu temperatur dreyfi ilə əlaqədardır. Bu isə nümunəyə nəzərən zondun yerdəyişmə-sinə səbəb olur; Üçüncüsü, bu pyezoskanedicinin yerdəyişmə-sinin qeyri-xətilliyi ilə əlaqədardır. Şəkildə meyliyə SZM kadrında böyük ölçüdə zəruri sahə ayrılır ki, nəticədə şəkildə kiçik de-

talların görünməsi mümkün olmur. Belə çatışmazlığı aradan qaldırmaq üçün daimi meyli çıxmaqla əməliyyatı yerinə yetirilir (şəkil 1-9).



Şəkil 1-9. SZM şəkillərində daimi meylin kənarlaşdırılması.

Pyezoskanedicinin xassələri ideal olmadığına görə SZM şəkillərində spesifik təhriflər olur. Xüsusi halda skanedicinin səth müstəvisi üzrə hərəkəti zondun səth (z oxu üzrə) üzərində vəziyyətinə təsir edir, SZM şəkilləri real relyef və hər hansı ikinci (çox halda daha yüksək) tərtibli səthin superpozisiyalarından ibarət olur. Bu qüsurları kənarlaşdırmaq üçün ən kiçik kvadratlar üsulu vasitəsilə verilmiş səthdən minimal fərqlənən apraksimasiyadan ikinci tərtib səth tapılır və sonra bu səth, ilkin SZM şəkillərindən çıxılır.

Aparatların küyü skanetmə vaxtı zond-nümunə kontaktının stabil olmaması, xarici akustik səslər və titrəmələr SZM şəkillərində faydalı məlumatlarla bərabər, küy xarakterli yanlış məlumatlar da daxil olur. Xüsusi halda SZM şəkillərindən küyü müxtəlif filtrlər tətbiq etməklə proqram vasitələrinin köməyi ilə silmək olar.

NanoEducator skanedici zond mikroskopunun konstruksiyası [4]

Şəkil 1-10-da NanoEducatorun ölçən başlığının xarici görünüşü verilmiş və işləyərkən cihazın əsas elementləri göstərilmişdir. Şəkil 1-11-də ölçən başlığın konstruksiyası verilmişdir:

1-bünövrəsi üzərində skanedici yerləşdirilib; 7-altlıq; 6- zond; 2-əsasında addımlı mühərrik olan gətirmə mexanizmi; 4-qarşılıqlı təsir çeviricisinə bərkidilmiş 6-zond; 3 əl burğu (vinti) vasitəsilə nümunəyə gətirmə; 8-burğusunun köməyiylə nümunə üzərində tədqiqat üçün qabaqcadan yerin seçilməsi. Şəkil 1-12-də cihazın funksional sxemi verilmişdir. **Nano-Eductor** ölçən başlıqdan, elektron blokdan, birləşdirici kablərdən, idarəedici kompüterdən ibarətdir. Kompüterlə əlaqəsi olan videokamera ayrıca qurğu kimi göstərilmişdir. Qarşılıqlı təsir çeviricisindən signal alınan kimi əvvəlcə çevrildikdən sonra gücləndiricidən SZM kontrollerə daxil olur. Elektron blokdan daxil olan idarəedici signal ölçən başlığa daxil olur. Kontroller əlaqəsi ilə kompüterlə elektron blokun idarə olunması həyata keçirilir.

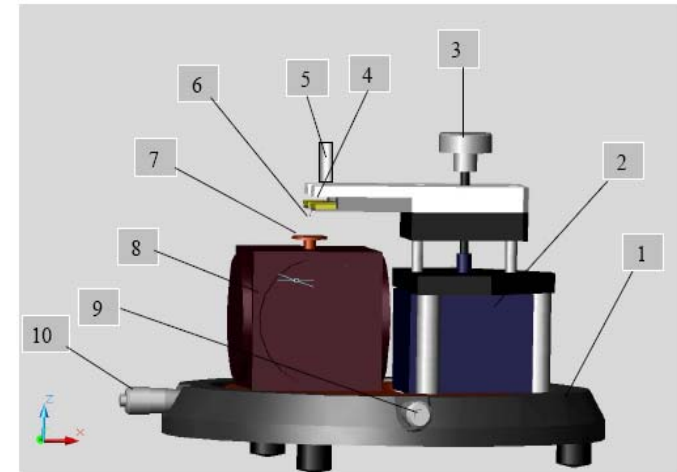
Tunel cərəyanı və qarşılıqlı təsir qüvvəsinin universal çeviricisi

NanoEductor cihazında tunel cərəyanı və qarşılıqlı təsir modulyasiya qüvvəsinin universal çeviricisi tətbiq olunur. Çevirici uzunluğu $l=7$ mm, diametri $d=1,2$ mm və divarının qalınlığı $h=0,25$ mm olan bir tərəfi möhkəm bağlanmış pyezokeramik boru şəklində hazırlanmışdır. Borunun daxili səthində keçirici elektrod yerləşir. Borunun xarici səthinə izolə edilmiş iki yarım silindrik elektrod yerləşdirilmişdir. Borunun sərbəst ucuna diametri 100 mkm olan volfram naqıl bərkidilmişdir (şəkil 1-13).

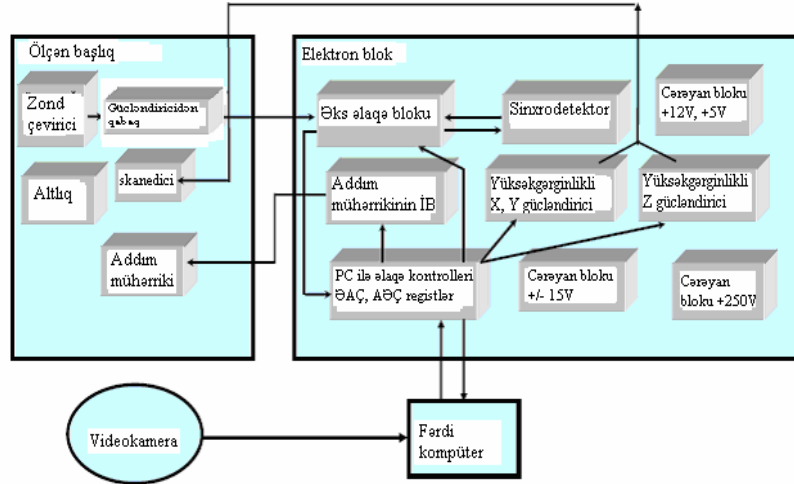
Zond kimi istifadə olunan volfram naqilin sərbəst ucu elektrokimyəvi üsulla itilənir (əyrilik radiusu 0,2 - 0,05 mkm olur). Borunun daxili elektrodu ilə zond elektrik kontaktına malikdir. Tunel cərəyanını ölçərkən pyezoboru sərt passiv konsol rolunu oynayır. Yerlə birləşdirilmiş zonda nəzərən nümunəyə elektrik gərginliyi tətbiq olunur (şəkil 1-14). Şəkildəki təsvir olunan çevirici U_T - elektrik gərginliyini əmələ gətirir, bu tunel cərəyanının yaranmasına səbəb olur və elektron blokda bu cərəyanla mütənasib olan U -gərginliyini verir.



Şəkil 1-10. SZM NanoEducatorun ölçən başlığının xarici görünüşü: 1 - əsası; 2 - altlıq; 3 - qarşılıqlı təsir çeviricisi; 4 - çeviricini nizamlayan burğu; 5 - əl ilə gətirmə burğusu; 6-nümunələrlə birlikdə skanedicinin yerləşmə burğusu; 7 - kamera ilə birlikdə qapaq.



Şəkil 1-11. NanoEductorun konstruksiyası: 1-əsası; 2 - gətirmə mexanizmi; 3 - əl ilə gətirmə burğusu; 4-qarşılıqlı təsir çeviricisi; 5-çeviricini nizamlayan burğu; 6 - zond; 7 - altlıq; 8 - skanedici; 9, 10-nümunə ilə birlikdə skanedicinin yerini dəyişdirən burğu.

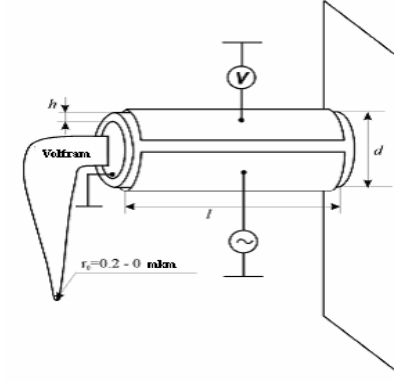


Şəkil 1-12. NanoEducator cihazının funksional sxemi.

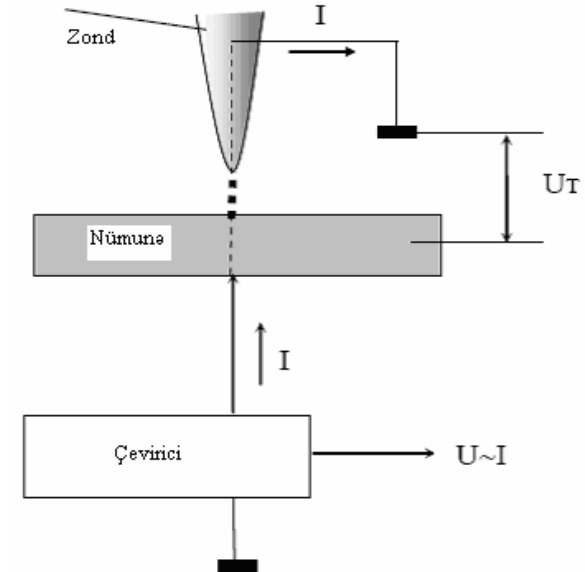
Qarşılıqlı təsir qüvvəsi çeviricisi kimi pyezoelektrik borunun bir hissəsi pyezovibrator, o biri tərəfi mexaniki rəqsin çeviricisi kimi istifadə olunur. Pyezovibratora qüvvə çeviricisinin rezonans tezliyinə bərabər tezlikli dəyişən elektrik gərginliyi verilir. Rəqs amplitudu zond-nümunə məsafəsinin böyük qiymətlərində maksimal olur. Şəkil 1-16-dan görüldüyü kimi rəqs prosesində zond tarazlıq vəziyyətindən A_0 kəmiyyəti qədər meyl edir. Bu onun məcburi mexaniki rəqs amplituduna bərabərdir (mkr tərtibində). Bu zaman pyzeoelementin ikinci hissəsində (rəqs çeviricisi) zondun yerdəyişməsinə mütənəsb olan dəyişən elektrik cərəyanı yaranır və deməli, cihaz tərəfindən bu cərəyan qeydə alınır.

Rəqs zamanı zond nümunə səthinə yaxınlaşdıqda zond nümunəyə toxunmağa başlayır. Bu çeviricinin rəqslərinin amplitud-tezlik xarakteristikasının (ATX) səthdən uzaqda olarkən ölçülmüş ATX ilə müqayisəsinə görə sola tərəf yerinin dəyişməsinə gətirər. Belə ki, pyezoborunun məcburi rəqslərinin

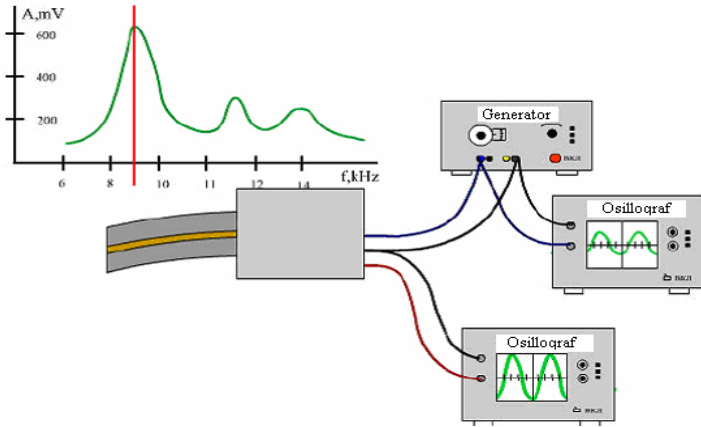
tezliyi sabit saxlanılır və sərbəst vəziyyətdəki ω_0 tezliyinə bərabər olur, zond səthə yaxınlaşarkən onun rəqs amplitudu azalır və A -ya bərabər olur. Bu amplitud pyezoborunun ikinci yarım-hissəsində qeydə alınır.



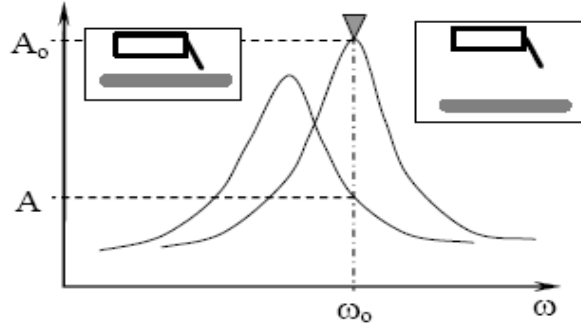
Şəkil 1-13. NanoEducator cihazının universal çeviricisinin Konstruksiyası.



Şəkil 1-14. Tunel cərəyanının qeydiyyatı prinsipi.



Şəkil 1-15. Qarşılıqlı təsir qüvvə çeviricisi kimi işlədilən pyezoelektrik borunun iş prinsipi.



Şəkil 1-16. Qüvvə çeviricisinin nümunə səthinə yaxınlaşarkən rəqs tezliyinin dəyişməsi.

Skanedici NanoEducator cihazında istifadə olunan mikro-dəyişmələri təşkil etmək üsulları pyezolövhəyə yapışdırılmış səthə metal membranın bütün perimetri boyunca sıxılmasına əsaslanmışdır (şəkil 1-17a). İdarəedici gərginliyin təsiri altında pyezolövhənin ölçülərinin dəyişməsi membranın əyilməsinə səbəb olur. Kubun üç perpendikulyar tərəfləri üzrə membranlar yerləşdirilir və onların mərkəzlərini metal istiqamətləndiricilə birləşdirərək 3 koordinatlı skanedici almaq olar (şəkil 1-17b).

2 kubun üzrlərinə birləşdirilmiş hər bir 1 pyzeoelementi ona birləşdirilmiş 3 itələyicisini tətbiq olunan elektrik gərginliyin hesabına x, y və z istiqamətlərdə hərəkət etdirə bilər. Şəkildən görünür ki, hər üç itələyici bir nöqtədə birləşibdir. Bəzi təqribiliyi nəzərə alaraq ki, bu nöqtə üç x, y və z koordinatları üzrə yerini dəyişir. Bu nöqtəyə altıq-6 və 5-dayağı bərkidilmişdir. Beləliklə, üç asılı olmayan gərginlik mənbəyinin təsiri nəticəsində nümunə hər üç koordinat üzrə yerini dəyişir. **NanoEducator** da nümunənin maksimal yerdəyişməsi 50-70 mkm-dir. Bu skanetmənin maksimal sahəsini təyin edir.

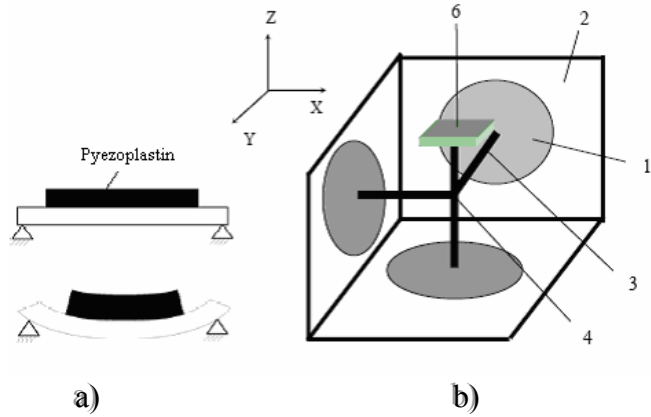
Zondun nümunəyə avtomatik yaxınlaşma mexanizmi (əks əlaqənin yaranması)

Skanedicinin z oxu üzrə yerdəyişmə diapazonu 10 mkm təşkil edir, buna görə də skanetmədən əvvəl zond nümunəyə bu məsafəyə qədər yaxınlaşdırmaq lazımdır. Bunun üçün gətirmə mexanizmi var, bu şəkil 1-18 də verilmişdir. 1 addım mühərrikinə elektrik impulsu verərkən 3 çevirici burğunu fırladaraq və 3 plankasını 4 zond ilə birlikdə 6 skanedicisi ilə birləşdirilmiş nümunəyə yaxınlaşdırılır və ya uzaqlaşdırılır. Bir addımının uzunluğu təqribən 2 mkm-dir.

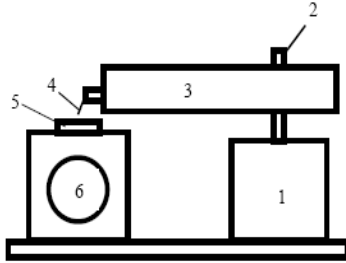
Yaxınlaşma mexanizminin addımı zond və nümunə arasındakı məsafədən xeyli böyük olduğundan skanetmə prosesi vaxtı zond deformasiyaya məruz qalması deyə onun yaxınlaşması addım mühərrikinin işləməsi ilə eyni zamanda həyata keçirilir və aşağıdakı alqoritm üzrə skanedici z oxu üzrə yerini dəyişir.

Əks əlaqə sistemi sönür və skanedici qalxır, yəni nümunə aşağıdakı son vəziyyətə düşür:

1. Zondun gətirilmə mexanizmi bir addım edir və dayanır;
2. Əks əlaqə sistemi işə düşür və skanedici yavaşca nümunəni yuxarıya qaldırır, bu zaman zond-nümunə qarşılıqlı təsirin yaranması analiz edilir;
3. Əgər qarşılıqlı təsir yaranmırsa proses 1 punktunda yenidən təkrar olunur.



Şəkil 1-17. NanoEducator skanedici cihazının hərəkət prinsipi (a) və konstruksiyası (b).



Şəkil 1-18. Nümunə səthinə zondun gətirilmə mexanizminin sxemi.

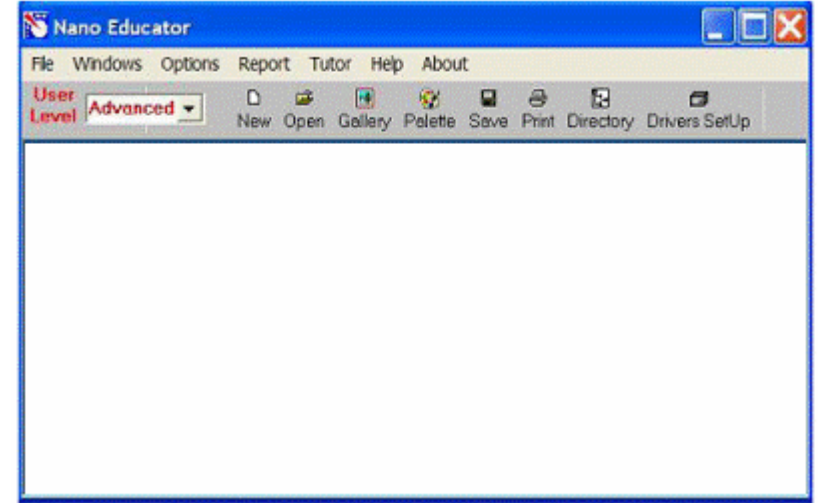
Əgər skanedici yuxarı hərəkət edərkən sıfırdan fərqli siqnal yaranarsa əks əlaqə sistemi skanedicinin yuxarıya hərəkətini saxlayır və bu səviyyədə qarşılıqlı təsirin qiymətini qeydə alır. Zondun nümunəyə yaxınlaşması dayandıqda və skanetmə prosesi baş verdikdə qarşılıqlı təsir qüvvəsinin qiyməti **NanoEducator** qurğusunda **Amplitude Suppression**(ampli-tudun azalması) parametri ilə xarakterizə olunur:

$$A=A_0 (1 - \text{Amplitude Suppression}).$$

SZM təcrübəsinin aparılması [4]


NanoEducator proqramını çağırdıqdan sonra kompüterin ekranında baş pəncərə təsvir olunacaq (şəkil 1-19). **File** men-


yusundan istifadə edərək **Open** və ya **New** və yaxud alətlər panelində uyğun düymələri seçməklə işə başlamaq olar. **File** ⇒ **New** komandasını seçilməsi SZM də ölçmələrə keçməyi göstərir. **File** ⇒ **Open** komandasının seçmək isə əvvəllər alınmış şəkillərə baxılması və işlədilməsi başa düşülür. Proqram ölçmələrlə yanaşı, həmçinin verilənlərə baxılmasını və həm də işlədilməsinə imkan verir.




Şəkil 1-19. NanoEducator proqramının baş pəncərəsi.

File ⇒ **New** komandasının icra olunmasından sonra ekranda dialoq pəncərəsi yaranmış olur, işçi qovluğun seçilməsi və ya yaradılması imkanı yaranır və cari ölçmələrin nəticələri qovluğa yazılacağı nəzərdə tutulur. Ölçmə prosesini apararkən bütün alınmış verilənlər ardıcıl olaraq razılaşmaya görə **ScanData+i.spm** adlı fayla yazılacaq, burada i-indeksi proqram işə düşərkən sıfır qiymətini alır və hər bir yeni ölçmələr üçün qiyməti artmış olur. **ScanData+i.spm** faylları işçi qovluqda yerləşdirilir. Hər yeni ölçmələrə başlamazdan əvvəl qərarlaşdırılır. Ölçmələr aparılan vaxtı başqa işçi qovluğun seçilməsi

imkanı mövcuddur. Bunun üçün proqramın baş pəncərəsinin alətlər panelində yerləşən  düyməsini sıxmaq lazımdır.

Skantmə pəncərəsində **Save Experiment** düyməsini sıxmaqla cari ölçmələrin nəticələrini saxlamaq olar, yaranan dialoq pəncərəsində qovluğu seçmək və faylın adını göstərmək lazımdır, bu zaman **ScanData+i.spm** faylı ölçmələr aparılan proses vaxtı müvəqqəti fayl olub sizin göstərdiyiniz fayl adına dəyişəcək. Ölçmələrə başlamazdan əvvəl fayl seçdiyiniz işçi qovluqda saxlanılacaq. Əgər ölçmələrin nəticələrini saxlanılmazsa onda yenidən proqramı işlədərəkən **ScanData+i.spm** müvəqqəti fayla yazılmış nəticələr ardıcıl olaraq yenidən yazılacaq (əgər işçi qovluq dəyişməyibdirsə) proqramı bağla-yarkən və yenidən işlədərəkən işçi qovluqda ölçmələrin nəticələri olan müvəqqəti faylların mövcudluğu haqqında xəbərdaredici məlumat verilir. **ScanData** standart adını dəyişmək olar. Bunu işçi qovluğun seçilməsi pəncərəsində etmək olar. İşçi qovluğun seçilməsi pəncərəsi proqramın baş pəncərəsinin alətlər panelində yerləşən  düyməsini sıxmaqla həyata keçirilir. **SPM File Explorer** pəncərəsində ölçmələrin nəticəsini saxlamaq olar. Lazımi faylları növbə ilə seçərək seçilmiş qovluqda onları saxlamaq lazımdır.

NanoEducator cihazı ilə alınmış nəticələri **ASCII** formatına çevirmək olar. Bunu **NT MDT** istifadə olunan **Nova** və başqa proqramlarla da etmək olar. Skanedilmiş şəkillər, həmçinin onların kəsikləri olan verilənləri **ASCII** formatına çevirmək olar. Verilənləri **ASCII** formatına çevirmək üçün proqramın baş pəncərəsindəki alətlər panelində yerləşmiş **Export** düyməsini  sıxmalı və ya **File** menyusunun **Export** → **ASCII** rejimini seçmək lazımdır.

Dialoq pəncərəsini bağladıqdan sonra ekranda cihazın idarə olunması paneli görünür (şəkil 1-20). Cihazın idarə olunması

panelinin sol hissəsində SZM-in konfigurasiyasını seçmək üçün düymələr yerləşir:

SFM - skanedici qüvvə mikroskopu (SQM);

STM - skanedici tunel mikroskopu (STM).



Şəkil 1-20. Cihazın idarəetmə paneli.

SQM ölçmələrinə hazırlıq aşağıdakı əməliyyatların yerinə yetirilməsindən ibarətdir:

Nümunənin yerinə qoyulması

Nümunəni qoymazdan əvvəl zond çeviricisini elə çıxarmalı ki, zond zədələnməsin.

Nümunənin bərkidilməsinin iki üsuluna baxılır:

- maqnit stolda (bu halda nümunə metal üzərinə bərkidilməlidir);
- ikitərəfli yapışqanlı lent vasitəsi ilə metal üzərində nümunə yerləşdirilməlidir.

İkitərəfli lentdə olan nümunəni qoymaq üçün dirəkdən saxlayıcıyı burmaqla açmaq (skanedicini zədələməmək üçün), sonra isə dayağa qədər onu yavaşca bağlamaq lazımdır. Maqnit bərkidilmə halında, nümunənin dəyişməsi altlığı açmadan və ya bağlamadan həyata keçirilir:

Zond çeviricisinin yerinə qoyulması

Zond çeviricisinin yerinə qoyulması həmişə nümunənin altlığa qoyulmasından sonra yerinə yetirilməlidir. Çeviricini 1 əl ilə götürmə burğusu ilə saat əqrəbinin istiqamətində fırlatmaqla yuxarı vəziyyətə gətirilir (şəkil 1-21). Ölçü başlığı-nın qapağındakı 2 zond çeviricisinin burğusunu boşaldıb, zond sax-

layıcının yuvasına qoymalı və qeydedici vinti saat əqrəbi istiqamətində yüngülcə bərkitmək lazımdır (şəkil 1-21).



Şəkil 1-21. Zond çeviricinin yerinə qoyulması.

Skametmənin yerinin seçilməsi

Nümunə üzərində tədqiqat olunan yerin seçilməsi üçün, cihazın aşağı hissəsində yerləşmiş iki koordinatlı stoldakı yerdəyişmə burğularından istifadə olunur.

Əvvəlcədən zondun nümunəyə yaxınlaşması

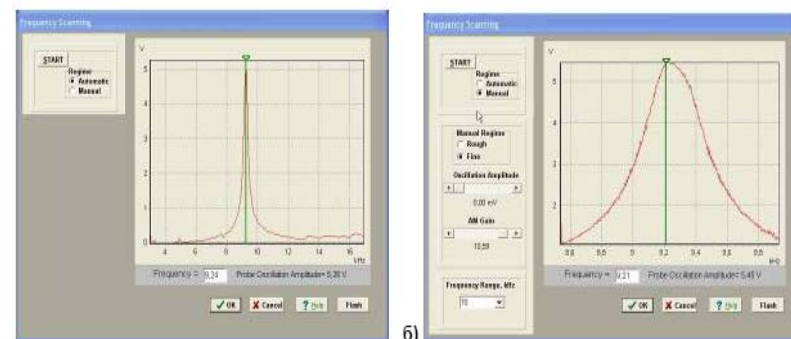
Hər bir ölçmə üçün zondun qabaqcadan yaxınlaşması əməliyyatı zəruri deyil. Onun zəruriliyi nümunə və zond arasındakı məsafənin qiymətindən asılı olaraq yerinə yetirilir. Əgər zondun ucu ilə nümunə səthi arasındakı məsafə 0,5-1mm-dən böyükdürsə, onda zondun nümunə səthinə yaxınlaşması əməliyyatının aparılması məqsədə uyğundur. Zondla nümunə arasındakı məsafə böyük olarsa zondun nümunəyə avtomatik yaxınlaşması prosesinə çox vaxt tələb olunacaqdır.

Zondu aşağıya salmaq üçün əllə gətirmə burğusundan istifadə edilir. Bu zaman zond və nümunə səthi arasındakı məsafəyə vizual olaraq lupa vasitəsilə nəzarət etmək lazımdır.

Rezonans əyrisinin qurulması və işçi tezliyin daxil edilməsi

Hər bir təcrübəni aparmazdan əvvəl bu əməliyyatın yerinə yetirilməsi zəruridir və bunu etmədən gələcək ölçmələrin mərhələlərinə keçid bağlıdır. Bundan başqa ölçmə prosesi zamanı elə vəziyyət yaranır ki, bu əməliyyatın təkrar yerinə yetirilməsi tələb olunur (məsələn, kontakt itərkən).

Rezonans axtarışı **ADJUST**⇒**RESONANCE** əmri ilə yerinə yetirilir. Bu əməliyyatın yerinə yetirilməsi, generator tərəfindən verilən məcburi rəqslərin tezlikləri dəyişərkən, zondun rəqs amplitudunun ölçülməsi üçün nəzərdə tutulur. Bunun üçün **Run** düyməsini sıxmalı.



Şəkil 1-22. Rezonansın axtarışı rejimi pəncərəsi və işçi tezliyin təyini: a) -avtomatik rejim; b) -əl rejimi.

Avtomatik rejimində zondun rəqs amplitudunun müşahidə olunan maksimal qiymətinə bərabər generatorun tezliyi avtomatik təyin olunur. Verilmiş tezlik diapazonunda zondun rəqs amplitudunun dəyişməsinə göstərən qrafikdə rezonans pikinin formasını müşahidə etməyə imkan verir (şəkil 1-22 a). Əgər rezonans piki aydın ifadə olunmayıbsa və ya rezonans tezliyində amplitud kiçikdirsə (1V aşağı), onda ölçmələri aparmaq üçün parametrləri dəyişmək zəruridir və rezonans tezliyi təkrar təyin etmək lazımdır.

Bunun üçün **Manual** rejimi istifadə olunur. Bu rejimi seçərkən **Frequency Scaning** pəncərəsində əlavə panel yaranır (şəkil 1-22 b) və aşağıdakı parametrləri korrekt etməyə imkan verir:

- **Generator** tərəfindən verilən rəqs amplitudı (**Oscillation Amplitude**). Bu kəmiyyətin qiymətinin minimal verilməsi təklif olunur (sıfıra kimi də olar) və 50 mv böyük olmasın.

- Amplitudü gücləndirən əmsal (**AM Gain**). Zondun rəqs amplitudunun kifayət qədər böyük olmayan qiymətlərində (<1V) bu əmsalın qiymətinin artırılması məsləhətdir (təklif olunur).

Rezonansın axtarışına başlamaq üçün **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır.

Manual rejimi mausun köməyiylə seçilmiş tezliyi qrafikdə yaşıl kursurun yerini dəyişməyə imkan verir, həmçinin seçilmiş tezliyin kiçik qiymətlərinin diapazonunda rəqslərin amplitudunun dəyişmə xarakteri nəzərə alınır (bunun üçün **Manual Regime Fine** vəziyyətini seçərək və **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır).

Qarşılıqlı təsirin alınması

Qarşılıqlı təsirin alınması avtomatik gətirmə mexanizminin köməyiylə zond və nümunə yaxınlaşmasının idarəetmə prosedurası ilə yerinə yetirilir. Cihazın idarəetmə panelindəki



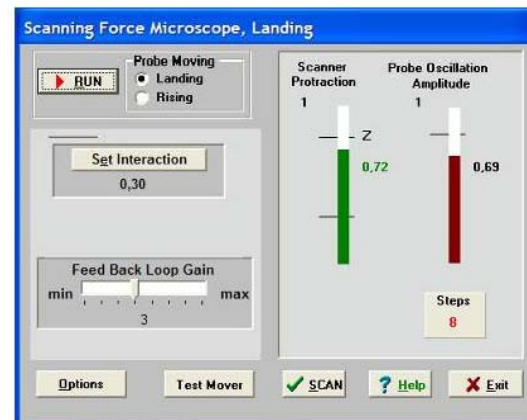
düyməsini sıxmaqla bu proseduranı çağırmaq olar.

SQM-lə işləyərkən rezonans tezliyin axtarışı və qurulması əməliyyatından sonra bu düyməyə imkan yaranır. **Scanning Force Microscopy, Landing** (şəkil 1-23) pəncərəsində zondun yaxınlaşmasını idarəedən elementlər yerləşir, həmçinin proseduranın yerinə yetirilmə gedişini analiz etməyə imkan verən indikasiya parametrləri vardır.

Landing pəncərəsi istifadəçiyə aşağıdakı kəmiyyətləri müşahidə etməyə imkan verir:

- Z oxu üzrə skanedicinin maksimal mümkün uzaqlaşması (yuxarıya qalxması) (**Scanner Protraction**) vahid qəbul olunmuşdur. Skanedicinin qalxmasının cari vəziyyəti uyğun sol indikatorun dolması səviyyəsinin rəngi ilə xarakterizə olunur: yaşıl rəng-işçi zona, göy-iş zonasından kənar, qırmızı – skanedici nümunə səthinə xeyli yaxınına gəlib və bu zondun deformasiyasına (zədələnməsinə) gətirib çıxarar. Sonuncu halda proqram xəbərdar edici səs verir.

- Qarşılıqlı təsir qüvvəsinin olmamasına uyğun olaraq zondun rəqs amplitudunun (**Probe Oscillation Amplitude**) vahid qəbul edilir. Zondun rəqs amplitudunun qiyməti sağ indikatora çəhrayı rənglə dolması səviyyəsilə göstərilir. **Probe Oscillation Amplitude** indikatorundakı üfüqi nişan skanedi-cinin vəziyyətinin analiz edilməsi və onun avtomatik işçi vəziyyətinə çıxmasını göstərir.



Şəkil 1-23. Qarşılıqlı təsirin alınması rejiminin pəncərəsi.

-Verilmiş istiqamətdə (**Probe Moving**) gedilmiş (**Steps**) addımların sayıdır: **Landing** - yaxınlaşma, **Rising** - uzaqlaşma.

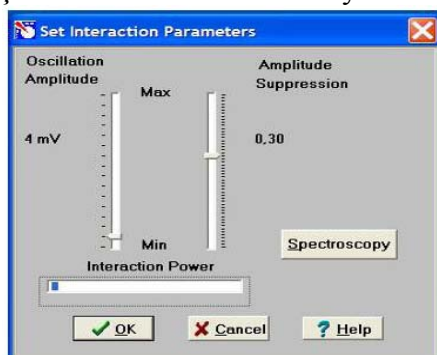
Zondun aşağı salınması prosesinə başlamazdan əvvəl zəruridir:

1. **Probe Moving** elementində **Landing** (yaxınlaşma) imkanının seçilməsinə əmin olmalı.
2. Yaxınlaşma parametrlərinin düzgün verilməsini yoxlamaq:
 - Əks əlaqə dövrəsində **Feed Back Loop Gain** - gücləndirmə əmsalı 3 qiymətinə bərabər götürülür.
- **Set Interaction** düyməsini sıxaraq və **Set Interaction** pəncərəsində **Amplitude Suppression** (şəkil 1-24) parametrlərinin qiyməti 0,3-ə bərabər olmasını yoxlamaq.
3. **Run** düyməsini sıxmaq.

Steps indikatoru keçilmiş addımları hesablamağa başlayır. Qarşılıqlı təsirin əmələ gəlməsindən sonra ekranda **Landing**

done məlumatı yaranır.

Zondu əks əlaqədən çıxarmaq və zond-nümunə arasındakı məsafənin artırılması üçün zondun uzaqlaşması rejimindən istifadə olunur (**Probe Moving: Rising**). Uzaqlaşma əməliyyatının yerinə yetirilməsi üçün **Probe Moving: Rising** hərəkət istiqamətini seçmək zəruridir və **RUN** düyməsini sıxmalı.



Şəkil 1-24. Zond və nümunə qarşılıqlı təsirinə kəmiyyətlərinin verilməsi pəncərəsi.

Skanelmə

Yaxınlaşma (**Landing**) prosesinin yerinə yetirilməsindən sonra və qarşılıqlı təsirin əmələ gəlməsindən sonra skanelmə mümkün olur (cihazın idarə olunması pəncərəsində **SCAN** düyməsi). Bu düyməni sıxaraq (şəkil 1-25 də skanelmə pəncərəsinin şəklə verilmişdir) istifadəçi bilavasitə ölçmələrin aparılmasına və ölçmələrin nəticələrinin alınmasına başlayır.

Skanelmə rejimində skanelmənin parametrlərinin daxil edilməsi zəruridir: Bu parametrlər **Scanning** pəncərəsinin yuxarı sağ hissəsində qruplaşdırılıbdır.

Proqramı birinci dəfə işlədərkən bu kəmiyyətlərin qiymətləri razılaşmaya görə qəbul olunur:

Skanelmə sahəsi **Scan Area** (Xnm*Ynm): 5000*5000;

Oxlar üzrə ölçmə

nöqtələrin sayı

X,Y: NX = 100, NY = 100;

Skanelmənin sürəti

Velocity = 1000 nm/s;

Skanelmənin yolu

Path skanelmənin istiqamətini müəyyənləşdirir.

Proqram sürətli skanelmənin ox istiqamətini seçməyə imkan verir (X və Y).

Proqramla iş başlayan zaman **Path = X+** qəbul olunur.

Skanelmə parametrlərini verdikdən sonra, daxil edilmiş parametrlərin qəbul olunması üçün **Apply** düyməsini və skanelməyə başlamaq üçün **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır.

Cari ölçmələrin nəticələrinin saxlanması üçün skanelmə pəncərəsində **Save Experiment** düyməsini sıxmaq lazımdır və bu zaman görünən dialoq pəncərəsində qovluğu seçməli və faylın adını göstərməli.

1.3. Metodik göstərişlər

NanoEducator skanedici zond mikroskopunda işləməyə başlamazdan əvvəl cihazın istifadəçilərə rəhbərlik sənədini öyrənmək zəruridir.

1.4. Tapşırıq

1. Təcrübədə **NanoEducator** cihazının ümumi konstruksiyasını öyrənmək.
2. **NanoEducator** cihazını idarə edən proqramla tanışlıq.
3. Müəllimin nəzarəti altında SZM - lə birinci şəklə alınması.
4. Alınmış şəklə araşdırılması.

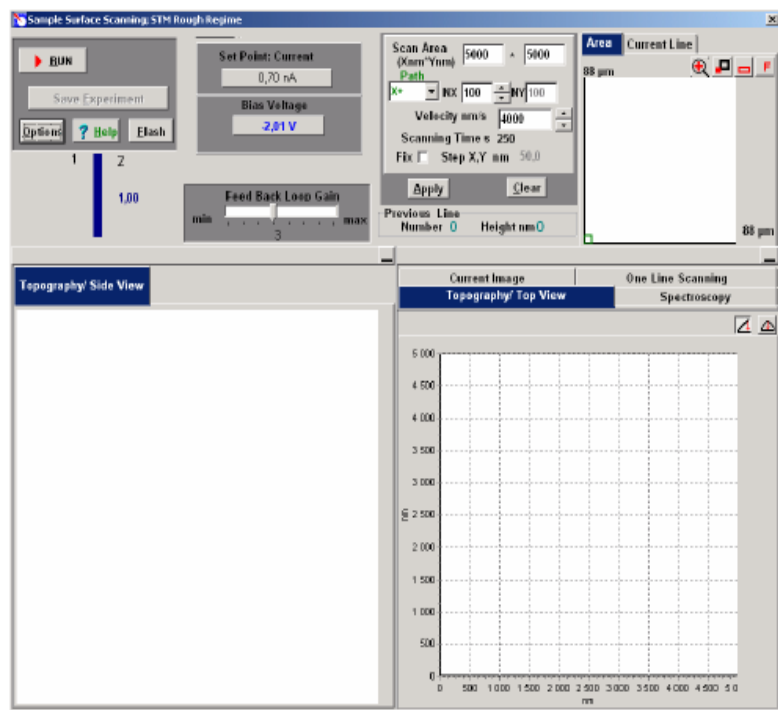
1.5. Yoxlama sualları

1. SZM - in əsas hissələrinin adları və onların təyinatı.
2. Sensorların növləri və onların iş prinsipləri.
3. Pyezoelektrik effekti və pyezoelektrik mühərrikinin iş prinsipini izah edin.

Skanedici zond mikroskopu (SZM) vasitəsilə nümunə səthinin topoqrafiyasının alınması. Təcrübənin nəticələrinin işlənməsi

Müxtəlif skanedicilərin konstruksiyasını təsvir edin.

4. **NanoEducator** cihazının ümumi konstruksiyasını təsvir edin.
5. **NanoEducator** cihazının tunel cərəyanı və qarşılıqlı təsir qüvvəsinin zond çeviricinin konstruksiyasını və iş prinsipini izah edin.



Şəkil 1-25. AQM skanetmə və nəticələrinin təsviri prosesinin idarə olunması pəncərəsi.

6. **NanoEducator** cihazında zondun yaxınlaşması mexanizmini təsvir edin. Zondun nümunə ilə qarşılıqlı təsir qüvvəsini təyin edən parametrləri aydınlaşdırın.
7. Skanetmə prinsipini və əks əlaqə sisteminin işini aydınlaşdırın. Skanetmənin parametrlərinin seçilməsi kriteriyası haqqında danışın.

Laboratoriya işi № 2

Skanedici tunel mikroskopu vasitəsilə bərk cisim səthinin tədqiqi

2.1. İşin məqsədi	39
2.2. İşin məzmunu	39
2.3. Metodik göstərişlər	52
2.4. Tapşırıq	52
2.5. Yoxlama sualları.....	57

2.1. İşin məqsədi

1. Skanedici tunel mikroskopu və spektroskopiyanın əsaslarının öyrənilməsi.
2. **NanoEducator** cihazında tunel cərəyan çeviricisinin iş prinsipinin öyrənilməsi və onun əsas parametrlərinin ölçülməsi.
3. Sabit tunel cərəyanı rejimində tədqiq olunan nümunənin səthinin topoqrafiyasının alınması.

Ləvazimat: Skanedici zond mikroskopu (Model SZMU-L5), zond, **NanoEducator** proqramı və kompüter.

Tədqiqat üçün nümunə: CD ROM diskinin səthi.

Tunel cərəyanı çeviricisinin əsas parametrlərinin ölçülməsi, STM şəkillərin alınması və təcrübənin nəticələrinin işlənməsi hər bir tələbə tərəfindən fərdi qaydada yerinə yetirilir. İşin praktik hissəsi bir dərstdə yerinə yetirilir və 4 saat davam edir.

İşə başlamazdan əvvəl tunel cərəyan çeviricisinin əsas parametrlərini ölçmək, hər tələbə üçün zond seçmək və cihazların birində tədqiq olunan nümunənin səthinin şəklini almaq lazımdır.

2.2. İşin məzmunu

Tunel cərəyan çeviricisinin əsas parametrlərinin təyini (tunel cərəyanını gərginliyə çevirmə əmsalı, ölçülən cərəyanın maksimal və minimal qiymətləri). Spektroskopiya (tunel cərəyanının tətbiq olunan gərginlikdən asılılığı).

Sabit tunel cərəyanı rejimində tədqiq olunan nümunənin səthinin topoqrafiyasının alınması.

Skanedici tunel mikroskopiyasının və spektroskopiyanın əsasları

Skanedici tunel mikroskopu (STM) ilk skanedici zond mikroskopudur. Bu STM 1981-ci ildə Sürix şəhərində yerləşən IBM firmasının elmi-tədqiqat laboratoriyasında Herd Binq və Henrix Rorer tərəfindən yaradılıb. Bu işə görə beş il keçdikdən sonra onlara fizika sahəsində Nobel mükafatı verilmişdir [4].

STM birinci vasitədir ki, silisiumun səthinin şəklini atom ölçüləri dəqiqliyində almağa imkan verdi.

STM əsasında kvant-mexaniki tunel effekti hadisəsi durur. Yəni zərrəciyin tam enerjisinin potensial çuxurun hündürlüyündən az olmasına baxmayaraq, onun potensial çəpəri aşması qabiliyyəti ilə izah olunur. Tunel effekti hissəciyin dalğa xassəsi ilə bağlıdır. Tunel effekti hadisəsini metalda sərbəst elektronların energetik vəziyyətləri modelinin köməyi ilə izah etmək olar. Bu model çərçivəsində keçirici naqıl daxilində elektron qazı sərbəst hesab olunur, elektronların enerjisi $E = \frac{p^2}{2m}$ mü-

nasibəti ilə təyin olunur (burada p -elektronun impulsu, m -onun kütləsidir). Metalda mütləq sıfır temperaturda elektronun malik olduğu maksimal enerjini, Fermi (E_F) səviyyəsi adlandırırlar. Metalın bütün həcmi keçirici elektronlar üçün potensial çuxur hesab olunur.

Tunel cərəyanına əsas əlavələri E_F - səviyyələrinin yaxın səviyyələrdə yerləşən ən böyük enerjili elektronlar verə bilər. Metalın səthinə yaxın, yəni metal - vakuum sərhədində keçirici elektronlar, potensial çuxurun səthinə yaxın yerdə olurlar, bu sərhəd elektronlar üçün potensial çuxur rolu oynayır, potensial çuxurun hündürlüyü ϕ -çıxış işi ilə təyin olunur.

Klassik təsəvvürlərə görə elektronun tam enerjisi (E) və potensial çəpərin (U) hündürlüyündən kiçik olan elektronun həmin çəpərdən keçə bilməsi elektronun xəyali $p = \sqrt{2m(E-U)}$ impulsunun əmələ gəlməsini göstərir. Kvant-mexaniki təsəvvürlərə görə elektronun fəzada vəziyyəti Şredinger tənliyinin həlli olan dalğa funksiyası ilə təyin olunur: $\psi(z) \sim \exp\left(\frac{ipz}{h}\right)$

burada z -metal səthinə normal istiqamətdə koordinat, h - Plank sabitidir. Onda elektronun xəyali impulsu metalın səthinə perpendikulyar istiqamətdə elektronun eksponensial sönən

aşağıdakı dalğa funksiyasını təyin edər:

$$\psi(z) \sim \exp\left(-\frac{pz}{h}\right) \quad (1)$$

Kvaziklassik yaxınlaşmada potensial çəpərin şəffaflığı ona düşən hissəciklərin keçmə ehtimalı ilə təyin olunur. Potensial çəpərdən hissəciklərin keçmə ehtimalı keçən hissəciklərin sayının bura düşən ümumi hissəciklərin sayına olan nisbətidir. Mürəkkəb formalı divarlar üçün bu kəmiyyət aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{h} \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{2m(V(z) - E)} dz\right).$$

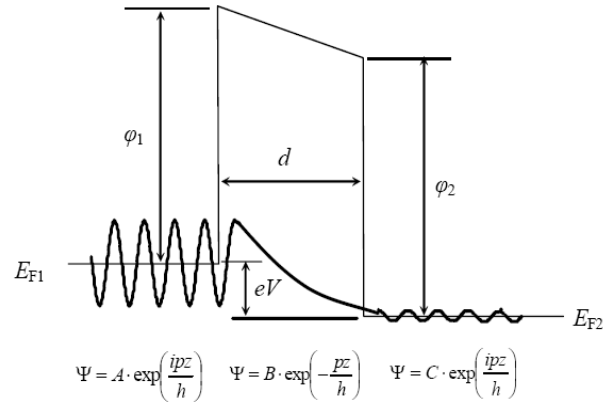
İki metal elə məsafəyə qədər yaxınlaşdırılır ki, bu məsafə potensial çəpərin enindən kiçik olmuş olsun və potensial çəpəri keçmiş elektronların (1) düsturu ilə təyin dalğa funksiyaları sönən olsun. Onda bu məsafədə metal-vakuum-metal tunel kontaktı yaranır (Şəkil 2-1).

Belə sistemdə xarici gərginliyin V -sürüşmə gərginliyi adlanan iki metal arasında olması tunel cərəyanının yaranmasına səbəb olur.

Əgər sürüşmə gərginliyi böyük deyilsə ($eV \ll \phi$), onda I_T tunel cərəyanının qiyməti sistemə tətbiq olunan gərginliklə mütənasibdir:

$$I_T = A V e^{-b\sqrt{\phi}d} \quad (2)$$

burada d - iki metal arasındakı məsafə, A və b sabitlərdir. Bu münasibətdən alınan əsas nəticə tunel cərəyanının qiymətinin tunel çəpərin d enindən eksponensial xarakterli asılılığının olmasındadır. (2) asılılığının köməyi ilə tunel çəpərin eninin $1 A$ artması tunel cərəyanının qiymətinin bir tərtib qədər azalmasına səbəb olur.

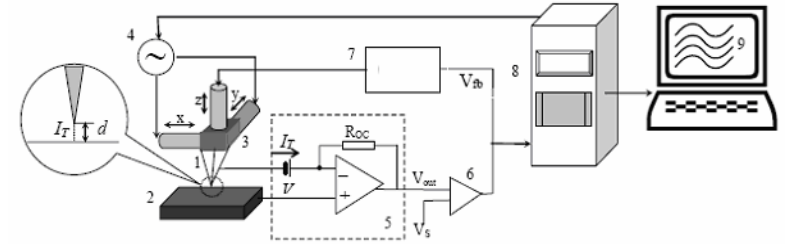


Şəkil 2-1. İki naqillli tunel kontaktında zona diaqramı və effektiv kütlə yaxınlaşmasında elektronların metalda və potensial çəpərdə sönən dalğa funksiyası.

STM-də keçirici zond və nümunə arasında xarici gərginliyin olmasına görə elektronların tunnəlməsindən istifadə olunur; keçirici zond və nümunə səthi arasındakı məsafə tunel keçidinin eni adlanır.

STM-də zond kimi ucu elektrokimyəvi üsulla itilənmiş metal iynə istifadə olunur. Zondun ucunun əyrilik radiusu və onun mexaniki sərtliyi STM-in fəza imkanının (bir neçə anqstrom ola bilər) sərhədini təyin edir. Əgər düzünə və eninə istiqamətlərdə zondun iynəsinin mexaniki sərtliyi kifayət qədər kiçikdirsə, iynənin mexaniki, istilik və kvant fluktuasiyaları - STM imkanlarını xeyli zəiflətməmiş olar. Zond üçün material kimi adətən yüksək möhkəmliyi və kimyəvi davamlığı olan metal: volfram və ya platin istifadə olunur.

Zond və nümunə arasında gərginlik tətbiq olunur. Zondun ucu ilə nümunə arasında məsafə 10 \AA yaxın olduqda gərginliyin işarəsindən asılı olaraq nümunədən ayrılan elektronlar iynəyə və ya əksinə tunel edirlər. Nəticədə yaranmış tunel cərəyanı zond və nümunə aralıq məsafəsindən eksponensial asılı olaraq dəyişir və tunel sensorunda ölçülür (şəkil 2-2).

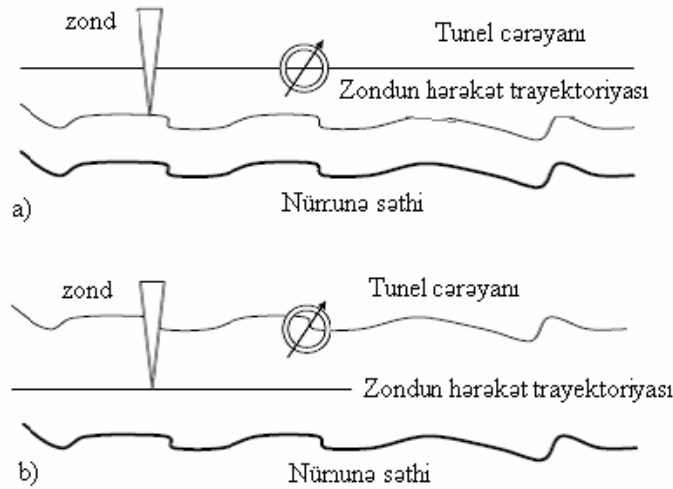


Şəkil 2-2. Skanedici tunel mikroskopun sxemi. 1-zond; 2-nümunə; 3-x,y və z pyezoelektrik mühərriklər; 4-x,y generatoru; 5-tunel sensoru; 6-komparator; 7-əks əlaqəli elektron dövrəsi; 8-kompüter; 9- z(x, y)-in şəkli/

Sabit cərəyan rejimində zond və nümunə arasındakı tunel cərəyanının qiymətini, əks əlaqə sisteminin köməyi ilə zond nümunəyə yaxınlaşması və uzaqlaşması hesabına sabit saxlanılır. Səthin topoqrafiyasının şəklini almaq üçün siqnalı z-pyезogətirmə kanalından götürülür. Kifayət qədər kiçik ölçülü müstəvi səthlərin (atom-hamar səthlərin) tədqiqində istifadə olunan alternativ qeydiyyat üsulu böyük vaxt ərzində əks əlaqə sistemi skanetmə zamanı zondun ucu ilə nümunə səthi arasındakı məsafənin orta qiymətini sabit saxlayır (şəkil 2-3b) və tunel cərəyanının sürətli dəyişməsi qeyd olunur (“cərəyanın xəyalı”). Bu üsul sistemin sürətli qeyd etməsindən maksimal istifadə olunmasına imkan verir və “real vaxt” ərzində şəkli almaq olar.

Tunel spektroskopiyası

Bərk cisim fizikasında elektronun hallarının spektroskopiyası üçün tunel effektindən geniş istifadə olunur. Bu üsulun əsasında tunel cərəyanının tunel kontaktını yaradan materiallarda Fermi səviyyəsindən (E_F) hesablanan 0-dan eV qədər enerjili halların sayından asılılığı durur (V-tunel aralığındakı gərginlikdir). Skanedici tunel mikroskopu səthin istənilən nöqtəsində zond-nümunə tunnel kontaktının **VAX** xarakteristikasını almağa imkan verir və nümunənin lokal elektrik xassəsini tədqiq etmək olar (yüksək fəza ayırd etməyə malik olmaqla tunel spektroskopiya ilə).



Şəkil 2-3. Sabit cərəyan rejimi (a) və sabit hündürlük rejimi (b).

Nümunə səthinin hər hansı r_0 nöqtəsində elektronların kvazikəsilməz spektr yaxınlaşmasında tunel cərəyanının ifadəsi aşağıdakı kimi təyin olunur [4]:

$$(r_0, V) \sim \int_0^{eV} dE_{\rho_T}(E) \rho_S(r_0, E) D(r_0, E) \quad (3)$$

burada $D(r_0, E)$ -çəpərin şəffaflığı; $\rho_T(E)$ -zondla əlaqəli halların sıxlığı; $\rho_S(r_0, E)$ - r_0 nöqtəsində nümunənin hallarının sıxlığı. Beləliklə, tunel cərəyanı zond və nümunə hallarının sıxlıklarının spektri kimi təsvir olunur. Spekrtdə nümunənin halı əsas rol oynayır. Aşağı temperaturlarda sadə düzbucaqlı çəpərdə Fermi səviyyəsi yaxınlığında zondun hallar sıxlığı sabit qalarsa (3) düsturundan cərəyanın ifadəsini

$$I(r_0, E) \sim \int_0^{eV} \rho_S(r_0, E) dE$$

şəklində yazmaq olar.

Bu halda tunel cərəyanının gərginlikdən asılılığı nümunənin

energetik spektrində hal sıxlığına əsasən təyin olunur. Təcrübədə $\rho_S(r_0, E)$ kəmiyyəti tunel cərəyanının gərginliyə

görə törəməsi kimi qiymətləndirilir: $\rho_S(eV) \sim \frac{\partial I}{\partial V}$.

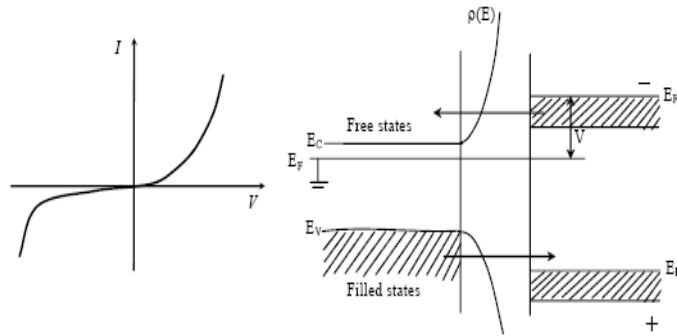
İynənin materialının hal sıxlığının xüsusiyyətləri keçiricilikdə də özünü göstərir. Bəzi hallarda, məsələn, yarımkeçirici-volfram cütü üçün spektrində ən maraqlı xüsusiyyət, yarımkeçiricinin həcm və ya səthin hallarının $\sim E_F = 1 - 2eV$ enerjisində yaxın qiymətləri intervalında yerləşir, burada volframın hal sıxlığı vəziyyəti xüsusi əhəmiyyət kəsb etmir.

Yarımkeçirici nümunələrdə elektronların energetik spektri mürəkkəb struktura malikdirlər. Yarımkeçirici materialların spektrində qadağan zonaların və aşqar səviyyələrin olması metal-yarımkeçirici tunel kontaktının VAX xarakteristikasını qeyri-xətli edir (şəkil 2-4a). Tunel cərəyanına səthin vəziyyətləri və həmçinin səthdə adsorbsiya olunmuş başqa atomlarla əlaqəli enerji səviyyələri mühüm əlavələr edir. Buna görə də yarımkeçirici materialların lokal tunel spektrlərinin tədqiqi yüksək vakuum şəraitində aparılmalıdır.

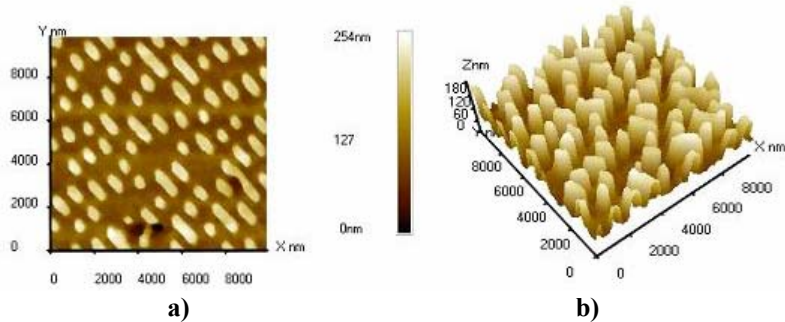
Tunel spektrləri keçiricilik zonasının sərhədinin vəziyyətini və Fermi səviyyəsinə nəzərən valent zonasını təyin etməyə, həmçinin yarımkeçiricilərin qadağan zonaları daxilində aşqar spektral piklərini təyin etməyə imkan verir.

Səthin STM-də alınmış şəkilləri tunel kontaktın tətbiq olunan gərginliyin qiyməti və istiqamətindən asılıdır. Bu elektronların iynədən nümunənin sərbəst hallarına (**Free states**) və ya nümunənin dolmuş hallarından (**Filled states**) iynəyə (şəkil 2-4b) tunelləşməsi xüsusiyyətləri ilə əlaqədardır.

Tunel kontaktında tətbiq olunan gərginliyin müxtəlif qiymətlərində CD ROM diskinin səthinin STM şəkilləri şəkil 2-5 də göstərilmişdir.



Şəkil 2-4. a) Metal-yarımkəçirici tunel kontaktın VAX-nin sxematik şəkli; b) elektronların tunelləşməsinin istiqamətinin təsiri.



Şəkil 2-5. Nümunədə səthin 2D və 3D STM şəkilləri: a) 2D; b) 3D.

V-modulyasiya

V-modulyasiya üsulunda sabit gərginlik V_0 həm də tunel kontaktında kiçik dəyişən V_{\sim} gərginlik tətbiq olunur. Bu zaman tunel cərəyanının dəyişən hissəsi üçün

$$I_{\sim} = \frac{dI}{dV} \sim \rho(x, y, E_f, +eV_{\sim}) \text{ olar.}$$

Bu zaman əks əlaqə sabit siqnalda saxlanılır, tunel cərəyanının dəyişən hissəsi spektroskopik şəklın alınması zamanı istifadə olunur. Beləliklə, topoqrafiyanın ölçülməsi (alınması) ilə lokal hal sıxlığının topoqrafiyasının alınması eyni zamanda

mümkündür.

Z-modulyasiya

Səthin STM şəkillərini sabit tunel cərəyan rejimində alarkən, çıxış işinin variasiyası, ümumiyyətlə, şəkildə təhriflərə gətirib çıxarar. Doğrusu bu təhriflər çox kiçikdir və V gərginliyin qiymətləri $2 \div 5eV$ intervalında dəyişərkən bir neçə anqstrem tərtibində olar, bunları $\varphi(x, y)$ asılılığında nəzərə almaq və eyni bir təcrübədə ölçmək lazımdır. Bunun üçün iynənin ucu ilə nümunə arasındakı məsafəni δ kiçik kəmiyyətinə modulyasiya edərək

$$I_{\sim} = I_T \frac{\delta}{2} \frac{dI_T}{dz} = I_T \frac{\delta}{h} \sqrt{2m\varphi} \text{ kimi təyin olunan tunel}$$

cərəyanın dəyişən komponentini ölçmək lazımdır.

Beləliklə, nəinki topoqrafiyanı ölçmək mümkündür, həm də nümunə səthinin çıxış işlərinin qiymətləri ilə fərqlənən müxtəlif tərkibə bölüb ölçmələr aparmaq olar.

STM şəkillərinin keyfiyyətinə təsir edən faktorlar

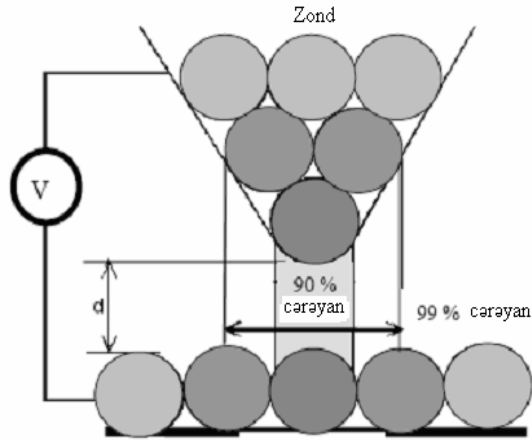
Skanedici zond mikroskopu səthin bütün X, Y və Z istiqamətlərində böyüdülmüş şəklını almağa imkan verir, həm də hər bir ox istiqamətində maksimal ayırdetmə qabiliyyəti ayrı-ayrı faktorlarla təyin olunur.

Z oxu üzrə ayırdetmə, birincisi sensorun həssaslığı və ikincisi zondun nümunə səthinə nəzərən rəqs amplitudu ilə məhdudlaşdırılır. Mikroskopun konstruksiyası elə olmalıdır ki, belə titrəmələrin amplitudunun anqstrem səviyyəsində kiçilməsini təmin etsin.

Nümunə səthinin normalı istiqamətində STM-in ayırdetməsi atom ölçülü-hamar səthlər üçün əlverişli hallarda 0,01 anqstremə çatır. Tunel cərəyanının $I(z)$ kəskin asılı olması, aparatın elektron səsi, tunel cərəyanının nisbi səsi və başqa buna oxşar təsirlər nəticələrə zəif təsir edirlər. Bəzən çirklı səth üçün Z koordinatı üzrə səs ciddi artmış olur və mikrometrin hissələrinə çatmış olur.

X-Y müstəvisində maksimal ayırdetmə ən əvvəl zondun

dəqiq skanetməsi ilə təyin olunur. Zondun ucunun həndəsi ölçülərinin quruluşu xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. İdeal hamar müstəvi (atom-müstəvi) səthlərin skanedilməsi ayırdetmə iynənin ucundakı atomun diametri ilə məhdudlaşdırılır (sonuncu atomun effekti, şəkil 2-6). Beləliklə, yüksək ayırdetməni qiymətləndirmək üçün hesab etmək olar ki, tunnəşdirmə (90%-ə qədər cərəyan) eyni bir atomda baş verməsini qəbul etmək olar. Zondun makroskopik həndəsi ölçüləri atom tərtibində ayırdetmə üçün həlledici deyildir.



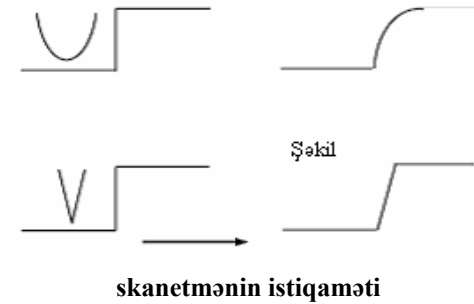
Şəkil 2-6. İynə ucunun nümunə ilə qarşılıqlı təsirinə sxematik şəkli.

Böyük həndəsi detallarının müqayisəli araşdırılması zamanı şəklın keyfiyyətə alınması zondun iynəsinin ucunun itiliyi ilə müəyyən olunur. Aşağıdakı parametrlər kritik ola bilər: İynənin ucunun radiusu r və baxış münasibəti $A_r = L/W$ (zondun hündürlüyünün zondun oturacağına diametrinə olan nisbəti şəkil 2-7).

NanoEducator skanedici zond mikroskopun tunel cərəyan çeviricisinin konstruksiyası

NanoEducator cihazında tunel cərəyanının və qarşılıqlı təsir qüvvəsinin universal çeviricisi istifadə olunur. Çevirici -

uzunluğu $l=7$ mm, diametri $d=1,2$ mm və divarının qalınlığı $h=0,25$ mm olan bir tərəfi möhkəm bərkidilmiş pyezokeramik boru şəklində hazırlanmışdır. Borunun sərbəst ucuna diametri 100 mkm olan volfram naqıl bərkidilmişdir. Naqılın sərbəst ucu zond kimi istifadə olunur, zondun ucunun diametri 0,2-0,05 mkm olub və elektrokimyəvi üsulla itilənmişdir. Borunun daxili divarlarında gövdəsi ilə birlikdə yerə birləşdirilmiş keçirici elektrod yerləşir. Zond borunun daxili elektrodları ilə elektrik kontaktına malikdir. Tunel cərəyanını ölçərkən pyezo-boru sərt passiv konsol rolunu oynayır. Yerə birləşdirilmiş zonda nəzərən nümunəyə dəyişən elektrik gərginliyi tətbiq olunur (şəkil 2-8). Şəkildə təsvir olunan çevirici U_T -elektrik gərginliyini yaradaraq bu tunel cərəyanının yaranmasına səbəb olur və elektron bloka bu cərəyana mütənasib olan U - gərginliyi verir.



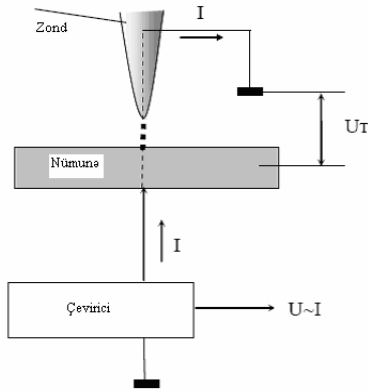
Şəkil 2-7. Baxış münasibətinin və iynə ucunun əyrilik radiusunun sonlu qiymətlərinin nəticəsində səth profilinin şəklinin təhrif olunması.

İki $U1$ və $U2$ əməliyyat gücləndiricisi əsasında yığılan cərəyan-gərginlik çeviricisi elektrik sxemdə (şəkil 2-9) göstərilmişdir. Çeviricinin iş prosesində $R1$ rezistorunda yerləşən mənfi əks əlaqəyə görə ƏAÇ (ədədi analoq çeviricisi) tərəfindən verilən dayaq gərginlik hesabına 1 nöqtəsindəki potensial 2 nöqtəsindəki potensiala bərabər saxlanılır (bax şəkil 2-9). Tunel cərəyanı $U1$ potensialının hesabına yaranır. Cərəyanın keçməsi

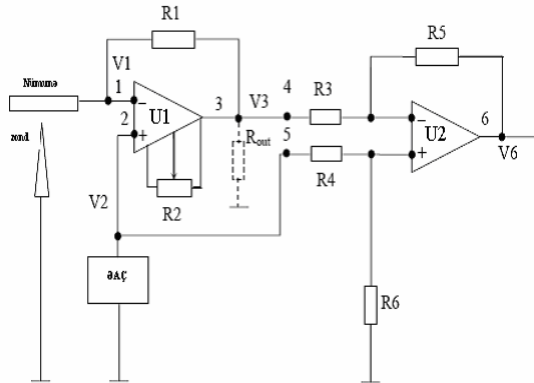
yolu belədir: nümunə-iyənənin ucu - «yer»-Rout-R₁, burada Rout -U₁ əməliyyat gücləndiricisinin çıxış müqavimətidir. Sxemdən aydındır ki,

$$V_3 - V_1 = R_1 I$$

Yəni əmələ gələn tunel cərəyanının qiyməti gərginliklərin V₃ - V₁ fərqi ilə mütənasibdir.



Şəkil 2-8. Tunel cərəyanının qeydiyyatı prinsipi.



Şəkil 2-9. NanoEducator cihazının cərəyan - gərginlik çeviricisinin elektrik sxemi.

U₂ əməliyyat gücləndiricisində diferensialların müqavimətləri gücləndiricidə yerləşir və o, rezistor eyni olduqda R₃ = R₄ = R₅ = R₆ və V₆ = V₃ - V₂ = V₃ - V₁ = R₁ I gərginliyini əmələ gətirir.

Beləliklə, cərəyanın gərginliyə çevrilmə əmsalını

$$K = \frac{V_6}{I} = R_1$$

düsturu vasitəsilə hesablamaq olar.

R₂ tənzimləyici rezistoru U₁ gücləndiricisinin çıxışında sıfır signalını almaq üçün istifadə olunur və ya yerin potensialına nəzərən 3 nöqtəsində dəyişdirilməsi zəruridir. İdeal halda tunel cərəyanı olmadıqda (zond və nümunə arasında məsafə çox böyükdür). 3 nöqtəsindəki potensial yerə birləşdirilmiş zonda nəzərən nümunədəki sürüşmə gərginliyinə bərabərdir. Bu gərginlik dəyişməsinə kompüterlə idarə olunan ƏAÇ verir. Real halda isə ölçülən dövrdə tunel cərəyanı (10⁻¹⁰-10⁻¹¹ A) qiymətlərinə bərabər cərəyanın itməsi mümkündür. Bu ona gətirib çıxarır ki, tunel cərəyanı olmadıqda belə 3 nöqtəsindəki potensial ƏAÇ verilən potensialdan R₁I (burada I- itən cərəyan) qiyməti qədər fərqlənəcəkdir. 2 nöqtəsində ölçülən sxemin çıxışında itən cərəyanla mütənasib olan potensial yaranmış olar. Tunel cərəyanının hesablanmasına itən cərəyanın təsirini aradan qaldırmaq üçün R₂ tənzimləyici müqavimətindən istifadə olunur. Bunun köməyiylə 3 nöqtəsində potensial elə dəyişir ki, zond və nümunə arasında böyük məsafə aralığında 3 nöqtəsindəki potensial 2 nöqtəsindəki potensiala bərabər və çıxışda U₆ gərginliyi sıfıra bərabər olur.

Beləliklə, cərəyan-gərginlik çeviricisinin K-çevirmə əmsalı

$$K = \frac{V_6}{I} \quad (4)$$

düsturu ilə təyin olunur.

Ölçülən cərəyanın minimum qiymətinə prinsipial məhdudiyət elektronun yükünün diskretliyi ilə əlaqədar olan

$I^2 = 2eIA f$ fluktasiyalar və istilik küyləri ilə bağlı olan
 $I^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_1}$ “Naykvist” fluktasiyalar ilə əlaqədardır.

burada e - elektronun yükü, T -temperatur, k - Bolsman sabiti, Δf - ölçülən cərəyanın tezlik zolağıdır.

Təcrübədə cərəyan küyünün səviyyəsi, əsasən mexaniki və akustik küylərin təsirindən zond və nümunə arasındakı məsafənin təsadüfi dəyişmələri ilə müəyyən olunur.

NanoEducator skanedici zond mikroskopunda işləməyə başlamazdan əvvəl cihazın istifadəçilərə rəhbərlik və həmçinin **Oscilloscope** proqramının istifadəçilərə rəhbərlik dərslərini öyrənmək zəruridir.

Cihaz 220V gərginlikdə işləyir. **NanoEducator** skanedici zond mikroskopunun istismarı 220V qədər gərginlik tələb edən elektrik qurğularının TİG və TTG-ə uyğun aparılır.

2.3. Metodik göstərişlər

NanoEducator skanedici zond mikroskopunda işləməyə başlamazdan əvvəl cihazın istifadəçilərə rəhbərlik sənədini öyrənmək zəruridir.

2.4. Tapşırıq

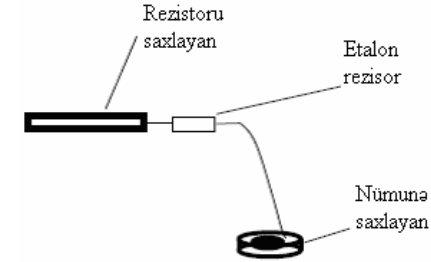
1. Cərəyan-gərginlik çeviricisinin (CGÇ) K-çevirici əmsalının ölçülməsi

1) **NanoEducator** cihazının (şəkil 2-10) ölçü başlığının yuvasındakı qarşılıqlı təsir çeviricisinin əvəzinə etalon rezistoru saxlayıcıya yerləşdirməli. Yüksək müqavimətli etalon rezistordan keçən cərəyan tunel cərəyanını imitasiya edir. Etalon rezistor pyezoboru əvəzinə qarşılıqlı təsir çeviricisi altlığına bərkidilir. Rezistorun ucu yerlə birləş-dirilir, ikinci tərəfi sürüşmə gərginliyinə qoşmaq üçün nəzərdə tutulub və buna görə onu altlığa birləşdirmək zəruridir.

2) Qabaqcadan korpus üzərində göstərilmiş nominal rezistora baxmaq və ya meqometrin köməyi ilə etalon rezistorun

müqavimətini ölçmək. Rezistorun ayaqlarını elə əymək lazımdır ki, altlığın aralığına pinset vasitəsilə yerləşdirmək mümkün olsun.

3) Rezistoru qoyarkən diqqətli olmaq lazımdır. Çünki altlığa əlavə təzyiç skanedicinin sıradan çıxmasına səbəb ola bilər.



Şəkil 2-10. Etalon rezistorun qoşulma sxemi/

4) **NanoEducator** proqramının idarəetmə panelində **T** düyməsini sıxaraq tunel mikroskopu rejimini işə salmaq.

5) **Landing** menyusuna daxil olmaq üçün cihazın panelindəki



düyməsini sıxmalı. **Bias voltage** gərginliyin $V \sim 100mv$ qiymətini daxil etməli. Keçən cərəyanın qiymətini $I=V/R$ düsturu ilə hesablamalı (burada R-etalon rezistorun müqavimətidir), **Landing** pəncərəsində (**Tunnel current**) tunel cərəyanının qiymət göstəricisindəki rezistordan keçən tunel cərəyanının real qiymətinə baxmaq olar. Onların müxtəlifliyi halında mümkün səbəblərini izah etməyə çalışın.



6) Cihazın panelində **osc** düyməsini sıxaraq virtual osilloqrafi işlətmək və ya **NanoEducator** olan qovluqdan **oscilloscope.exe** faylını işlətməklə osilloqrafın hər hansı bir kanalından **ADC-Current-mV** siqnalı dəqiqləşdirməli.

7) CGÇ-nin çıxışında gərginliyin qiymətini virtual osilloqrafa görə təyin etməli. (4) düsturunun köməyi ilə çevirici əmsalı hesablamalı.

2. Maksimal ölçülən cərəyanın təyini

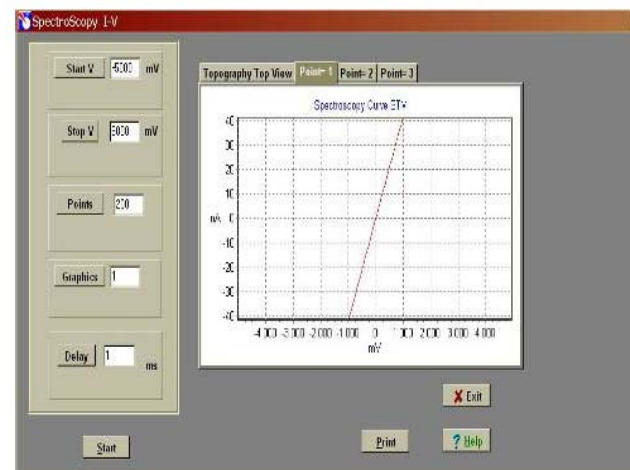
- 1) Bu məqsədlə Volt-Amper xarakteristikasını almaq lazımdır (Rezistordan keçən cərəyanın tətbiq olunan gərginlikdən asılılığını təyin etmək)—**Spectroscopy I(v)**. Bu proseduraya keçmək üçün **Landing** pəncərəsində **Cancel** düyməsini sıxaraq və **Scanning** menyusuna daxil olub cihazın pa-



nelində düyməsini sıxmaq (proqram zond - nümünə qarşılıqlı təsirinin olmadığı haqqında qabaqcadan məlumat verir, yəni yaxınlaşma baş verməyib) lazımdır. Qabaqcadan 5 xətdən az olmayaraq skanetməni aparmaq, skanetmə sona çatdırdıqdan sonra alınmış formanı bağlamaq (bu işdə lazım deyil) lazımdır.

- 2) **Spectroscopy** prosedurasına keçib **Scanning** pəncərəsində yuxarı sahədə uyğun düyməni seçməklə **Scanning** pəncərəsində sağ yuxarı hissəsinə kursoru qoyub mausu sıxmaq, nöqtələri proqrama göstərib Volt-Amper xarakteristikasını almalı. İki nöqtə seçin.
- 3) **RUN** düyməsini sıxmalı. Bu zaman **Spectroscopy** rejiminin idarəedici pəncərəsi açılacaqdır. Volt-Amper xarakteristikasını almaq üçün gərginliyin başlanğıc və son qiymətlərini daxil etmək: **Start V Final V** (-5000 mv, 5000 mv) bir qrafikdə ölçmə nöqtələrin sayını - **Points** (məsələn, 200) və **Graphycs** (məsələn, 5) bir fəza nöqtəsində qrafiklərin sayı, ölçmələrdə nöqtələrarası **Delay**(1ms) dayanmaların olduğu kimi saxlamalı.
- 4) Spektroskopiya idarəetmə pəncərəsindəki **RUN** düyməsini sıxmalı. Gərginliyin hər bir 10mV qiymətindən bir olmaqla 200 nöqtədə etalon rezistorundan keçən tunel cərəyanının ölçülməsi baş verir. Proqram I(V) asılılığının qrafikini qurur. Alınan qrafik birbaşa Om qanununu təsvir edir. Hər iki nöqtədə ölçülmüş qiymətlər qrafiklərdə üst-üstə düşür. Bunlardan birini saxlayaraq hesabatda verməli.

- 5) Düzgün nizamlanmış aparatla və elektrik itkisinin olmadığına görə qrafik koordinat başlanğıcından keçəcəkdir. Bu gərginlik olmadıqda rezistordan keçən cərəyanın sıfıra bərabər olduğunu göstərir.
- 6) Alınmış qrafikdə məhdud ölçmə sxemi qalıbsa orada üfüqi sahələr olacaqdır. Qrafikə görə cihaz tərəfindən ölçülən maksimal cərəyanı təyin edin.



3. Cihazda ölçülən minimal cərəyanı təyin edin.

- 1) Altlıqdan etalon rezistoru ayırın. Ölçən başlıqda etalon rezistoru saxlayıcı ilə birlikdə çıxarın. Ölçən başlığın qapağını bağlamaq lazımdır ki, elektrik təsirlər olmasın. Bu zaman CGÇ itən cərəyanı ölçəcəkdir.
- 2) Ossilloqrafın kanallarından birində **ADC-Current** signalını verməli. Şaquli istiqamətdə ossilloqrafın məstəbını artırmaqla səs izlərinin yaranmasına nail olmalı. Səs izlərinin alınması pəncərəsini hesabatda təsvir etmək üçün saxlamalı.
- 3) **ADC-Current** güclü səs izləri signalının Amplitud miqyasında ölçülən cərəyanın minimal qiymətinin təyini. Ölçülən

cərəyanın minimal qiyməti aparatın səsinin qiyməti ilə təyin edilir.

4. Sabit tunel cərəyanı rejimində səthin topoqrafiyasının alınması.

- 1) Tədqiq olunan nümunəni altlıqda yerləşdirmək.
- 2) **NanoEducator** cihazın ölçən başlığın yuvasına zond çeviricini yerləşdirmək.
- 3) Cihazın **NanoEducator** idarəetmə proqramını işə salmaq. SQM Skanedici qüvvə mikroskopu rejimini seçmək. Açıq şəraitdə işləyərkən qarşılıqlı təsirin alınması üçün **NanoEducator** cihazında qarşılıqlı təsir qüvvə rejimini seçmək yaxşı olardı. Bu ehtiyatlılıq əlaqə zamanı zonda zədələnməmək üçün zəruridir, yəni STM - də tədqiq olunan nümunə havada qismən turşulaşır.
- 4) Zond çeviricinin amplitud-tezlik xarakteristikasını təyin etməli və işçi tezliyini daxil etməli.
- 5) Zondun nümunə ilə yaxınlaşmasını 1mm məsafəyə əllə işləyən gətirmə burğunun köməyiylə yerinə yetirməli.
- 6) SQM rejimində qarşılıqlı təsirin alınmasını yerinə yetirməli.
- 7) **Landing** pəncərəsinin bağlamalı. Tunel mikroskopu rejiminə **NanoEducator** proqramının idarəetmə panelində **T** sıxmaqla keçmək.
- 8) **Landing** düyməsini sıxın. Tunel mikroskopu rejimində qarşılıqlı təsirin alınmasını aşağıdakı parametrlər əsasında həyata keçirməli (əgər bir rejimdən digər rejimə keçərkən qarşılıqlı təsir itibəsə)

Set point	0,5 nA;
Integrator delay (Options menyusunda)	1000 ms;
Feed Back Loop Gain	3;
Bias Voltage	0,2 V.

- 9) Skanetmə pəncərəsini açmalı. Nümunə haqqında qabaqcadan verilmiş məlumatlar əsasında skanetmənin zəruri parametrlərini verməli. Sabit tunel cərəyan rejimində səthin topoqrafiyasını ölçməyə başlamalı.

- 10) Əgər alınmış şəkildə skanetmənin təhrifi varsa (tunel kontaktın qeyri-dayanaqlığı hesabına əks əlaqədən kənarlaşma əmələ gəlir, qonşu xətlər skanetmədə təkrar olunmur) skanedicini saxlayın və kontaktın alınması üçün aşağıdakı parametrlərin qiymətlərini dəyişməklə kontaktı stabilləşdirməyə çalışın.

Feed Back loop Gain	1 - 3
Set-Point	0,2 – 1 nA;
Bias Valtage	0,2 – 1 V.

Əgər Z qiyməti **Scanner Protraction** indikatorunda azalmağa başlayırsa, onda **Feed Back Loop Gain** və ya **Set Point** parametrlərindən birinin qiymətlərini artırmaqla Z-in qiymətini bərpa etməli.

Sabit tunel cərəyanı rejimində səthin topoqrafiyasının ölçmələrini həyata keçirin. Alınmış nəticələri saxlayın.

- 11) Təcrübəni qurtardıqdan sonra skanetmə pəncərəsini bağlayın və zonda nümunədən uzaqlaşdırın.

2.5. Yoxlama sualları

1. STM-in əsas komponentlərinin adları və onların təyinatı.
2. Tunel sensor qurğusunu və iş rejimini aydınlaşdırın. İşləyərkən əsas parametrləri təsvir edin.
3. Sabit cərəyan və sabit hündürlük rejimləri nədir? V- və Z-modulyasiyası nədir? Nə üçün onlar tətbiq olunur?
4. Tunel spektroskopiya. Silisium səthinin şəklinə elektronların tunelləşməsinin istiqamətinin təsirinə aydınlaşdırın.
5. STM-də şəklın keyfiyyətli alınması üçün faktorların adlarını deyın. STM zondlara nə kimi tələblər qoyulur?

Laboratoriya işi № 3

Bərk cisimlərin səthinin kontaktsiz rejimdə atom-qüvvə mikroskopu üsulu ilə tədqiqi

3.1. İşin məqsədi	59
3.2. İşin məzmunu	59
3.3. Metodik göstərişlər	74
3.4. Tapşırıq	74
3.5. Yoxlama sualları	77

3.1. İşin məqsədi

Skanedici atom-qüvvə mikroskopunun (AQM) əsaslarının öyrənilməsi və kontaktsiz rejimdə AQM-in iş prinsipi. **NanoEducator** cihazının qarşılıqlı təsir qüvvəsi çeviricisinin parametrlərinin və SZM təcrübəsinin parametrlərinin təyini.

Tədqiq olunan səthin topoqrafiyasının və faza təzadının alınması. Qarşılıqlı təsir qüvvəsinin parametrlərinin ölçülməsi, AQM-də şəkillərin alınması və təcrübədə alınmış verilənlərin işlənməsi hər bir tələbə tərəfindən fərdi yerinə yetirilir. İşin təcrübi hissəsi bir dərsdə yerinə yetirilir və 4 saat davam edir.

Ləvazimat: Skanedici zond mikroskopu (Model SZMU-L5), zond, NanoEducator proqramı və kompüter.

Tədqiqat üçün nümunə: qoruyucu təbəqəsi götürülmüş kompakt disk fragmenti və ya müəllimin seçdiyi hər hansı başqa bir nümunə.

İşə başlamazdan əvvəl hər tələbə üçün zond seçmək zəruridir. Qarşılıqlı təsir çeviricisinin parametrlərini ölçmək, zondun rəqs amplitudunun zond-nümunə məsafəsindən asılılığının ölçülməsi və cihazların birində tədqiq olunan nümunənin səthinin şəklini almaq.

3.2. İşin məzmunu

Qarşılıqlı təsir qüvvə çeviricisinin əsas parametrlərinin (zondun rezonans tezliyinin, zond çeviricisinin keyfiyyətlik əmsalının) təyini.

Spektroskopiyanın yerinə yetirilməsi (qarşılıqlı təsir qüvvəsinin zond-nümunə məsafəsindən asılılığının ölçülməsi (zondun rəqs amplitudunun)).

Tədqiq olunan nümunə səthinin topoqrafiyasının və faza təzadının alınması.

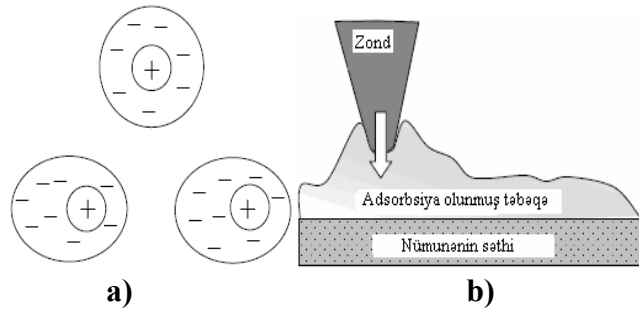
Skanedici atom-qüvvə mikroskopunun əsasları

Skanedici tunel mikroskopunun əsas çatışmazlığı yalnız keçirici nümunələrin tədqiqidir. 1986-cı ildə Herd Binningq, Kel-

vin Kueyt və Kristofer Gerb tərəfindən atom-qüvvə mikroskopunun (AQM) yaradılması ilə bu çatışmazlıq aradan qaldırıldı [9].

AQM-in iş prinsipi maddələrin atomları arasında qarşılıqlı təsir qüvvələrinə əsaslanır. Analoji qüvvələr ixtiyari yaxınlaşan cisimlər arasında da baş verir. Atom-qüvvə mikroskopunda belə cisimlər olaraq tədqiq edilən səth və bu səth üzərində sürüşən iti uclu zond hesab olunur.

Zond nümunə səthinə yaxınlaşarkən o əvvəlcə cəzb olunur. Bu ən çox uzaqdan təsir qüvvələri – Van-der-Vaals qüvvələrinin hesabına baş verir [10]. Van-der-Vaals qüvvələri neytral izotrop atomun elektrik sahəsinin təsiri nəticəsində polyarlaşması hesabına yaranır. İki neytral atom bir-birindən yaxın məsafədə olanda bir-birinə kiçik elektrik dipol momenti induksiya edirlər. Yəni qonşu atomların elektron örtüyündə elektronların hərəkəti radikal dəyişikliklərə məruz qalmır, yalnız zəif həyəcanlanma baş verir (şəkil 3-1a). Belə ki, əks işarəli yüklər bir-birinə yaxınlaşarkən cəzb etmə, uzaqdakı eyni işarəli yüklərin itələməsindən güclü olur və nəticədə atomların bir-birinə cəzb olunması baş verir.



a) Van-der-Vaals qüvvələri hesabına iki atomun cəzb olunması.
b) Kapilyar qüvvələrinin hesabına səthə zondun cəzb olunması.

Əgər nümunənin səthində adsorbsiya layı varsa, onda kapilyar qüvvələrin hesabına zond səthə toxunarkən cəzb etmə qüv-

vəsi yaranır. Cəzb etmə qüvvələri eyni zamanda elektrosta-tik qüvvələrin hesabına yarana bilər.

Məsafənin daha da kiçilməsi, itələmə qüvvələrinin yaranmasına səbəb olur. Zond və nümunə arasında məsafə atomlar arası məsafənin orta qiymətindən kiçik olduqda, yaxın atomların elektron örtüklərinin bir-birini örtməsi baş verir. Nəticədə birinci atomun elektronu ikincinin vəziyyətini tutmağa çalışır. Pauli prinsipinə görə elektronlar daha yüksək enerji səviyyələrinə tutulmalıdırlar. Qarşılıqlı təsir edən atomların enerjilərinin artması, onlar arasında itələmə qüvvələrinin yaranmasına səbəb olur. Atomların daha da yaxınlaşması nüvələrarası Kulon itələmə qüvvəsinin əsas rol oynamasına səbəb olur. Ümumi halda, atomlararası F qarşılıqlı təsir qüvvəsinin onlar arasında ki R məsafəsindən asılılığı

$$F(R) = -\frac{a}{R^m} + \frac{b}{R^n} \quad (1)$$

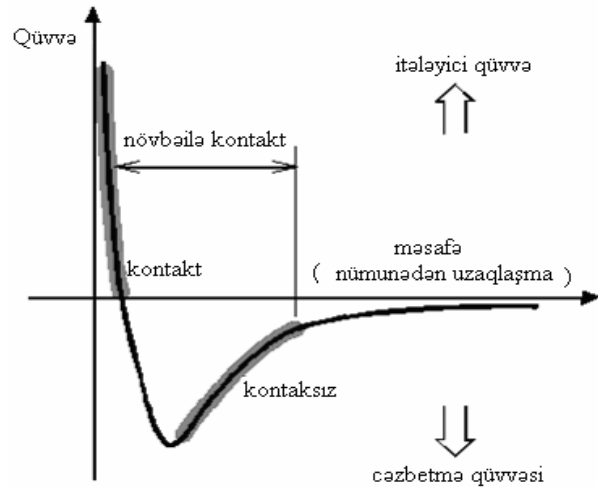
kimidir.

Burada a, b sabitləri və m və n - qüvvət göstəriciləri atomların və kimyəvi rabitələrin növündən asılıdır. Van-der-Vaals cazibə qüvvələri üçün $m=7$, Kulon qüvvələri üçün $n \approx 2$. $F(R)$ kəmiyyətinin məsafədən asılılığı şəkil 3-2-də göstərilmişdir.

Zondla nümunə arasında qüvvənin işarəsindən asılı olaraq, atom-qüvvə mikroskopu ilə skanetmənin aparılmasının müxtəlif kontakt, kontaktsiz və toxunan kontakt-yarımkontakt üsulları vardır. Kontakt üsulunun istifadə olunması zondun səthə toxunmasını və itələmə qüvvələrinin təsir oblastında olmasını nəzərdə tutur. Kontaktsiz üsul zamanı zond səthdən aralı olur və uzaqdan təsir cəzb etmə qüvvələrinin oblastında yerləşir. Yarımkontakt rejimdə zond səthə qismən toxunur, növbə ilə həm cəzb etmə oblastında, həm də itələmə oblastında olur.

Yuxarıda qeyd olunmuş ölçmə üsullarının həm üstün, həm də çatışmayan cəhətləri vardır. Kontakt üsulu qarşılıqlı təsir qüvvəsinin aşkarlanması nöqtəyi-nəzərdən ən münasib ölçmədir, yəni kontakt olan oblastda itələmə qüvvəsinin qiyməti

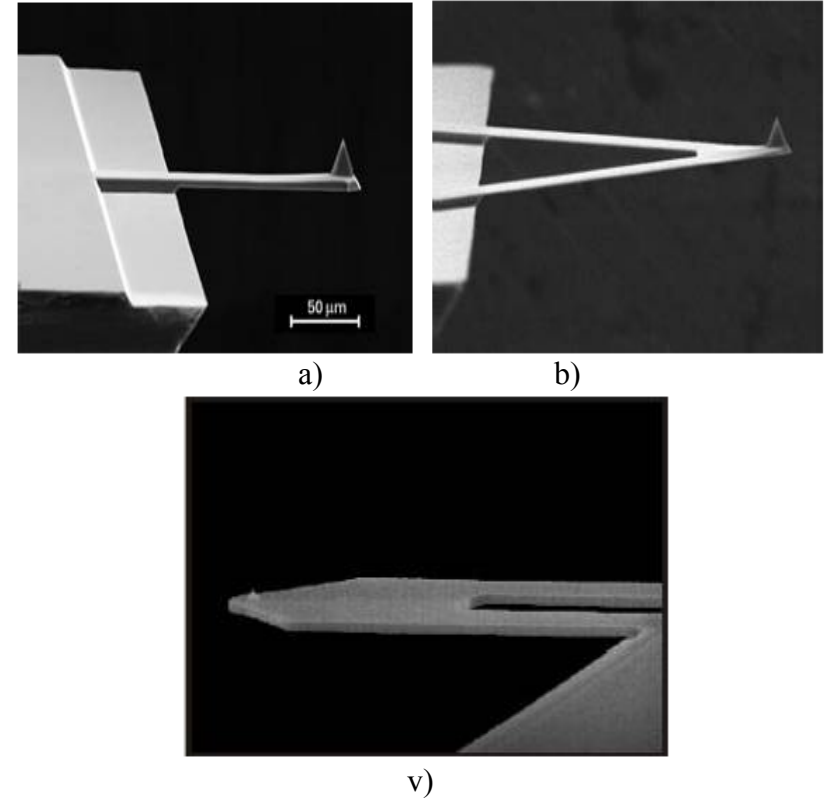
cəzətmə qüvvəsinin qiymətindən xeyli böyükdür. Bəzən onun istifadə olunması zamanı nümunə səthinin strukturunun pozulması təhlükəsi mümkündür və ya zondun tez yararsız hala düşməsinə və sınmasına səbəb olar. Kontaktsiz üsulda ölçmələr zamanı nümunənin korlanması aradan çıxır, ancaq ölçmə siqnalları çox azdır. Buna görə atom-qüvvə mikroskopunda səthin müxtəlif xüsusiyyətlərinin vizualizasiyası zamanı qarşılıqlı təsirin aşkarlanması üçün ən çox yarım-kontakt üsulundan istifadə edirlər. Bu zaman zondun səthə qısa müddətli kontakt təsiri minimal olduğuna görə etibarlı aşkarlanır. Yarımkontakt metodunun əlavə üstünlüyü tədqiq olunan səthin qarşılıqlı təsir qüvvəsinin sürüşmə tərkibinin olmadığına görə, alınmış şəkildəki təhriflərin olmasını azaldır.



Şəkil 3-2. Atomlararası qarşılıqlı təsir qüvvəsinin $F(R)$ -atomlar arası R məsafəsindən asılılığı.

Ənənəvi qüvvə qarşılıqlı təsir çeviricisi olaraq elastiki konsol və ya kantilever istifadə olunur. Çeviricilər silisium lövhəsindən fotolitoqrafiya və itələmə üsulları ilə hazırlanır. Elastiki konsol V və ya I-yə oxşar formalı (şəkil 3-3 a və şəkil 3-3b) əsasən SiO_2 və ya Si_3N_4 qarışıq nazik təbəqələrindən

hazırlanır. Kantileverin bir sonu silisium əsaslı tutacağa möhkəm bərkidilir. Konsolun digər sonunda isə iti uclu xüsusi zond yerləşir. Müasir AQM zondların tipindən və hazırlanma texnologiyasından asılı olaraq, zondun iynəsinin ucunun əyrilik radiusu $1 \div 50$ nm təşkil edir.



Şəkil 3-3. Elektron - mikroskopundakı alınmış şəkillər : a) V - şəkili kantilever; b) I - şəkili kantilever; v) kontakt pyezolever.

AQM-in kontakt iş rejimi

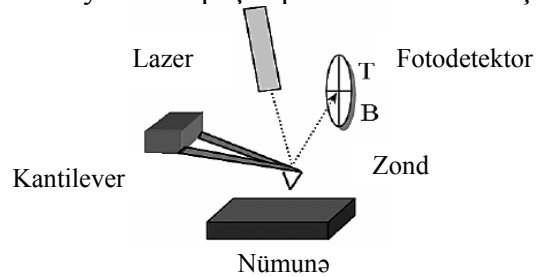
Bu iş rejimində zond və nümunə arasındakı qarşılıqlı təsir, itələmə qüvvələrinin təsir oblastında baş verir. Adətən, kontakt rejimində Si_3N_4 -dən hazırlanmış piramidalı nazik təbəqəli zond

kantilever işlədilir (şəkil 3-3). Kantileverlərin sərtlik əmsalı $k = 0,03 \div 1N/m$ qiymətlərini alır.

Səth tərəfindən zonda təsir edən F qüvvəsi kantileverin əyilməsinə səbəb olur. Bu münasibət Hük qanunu ilə təyin olunur:

$$F = -kx \quad (2)$$

Əyilmənin qiyməti optik sistemin köməyiylə qeyd olunur. Optik sistem yarımkeçirici lazerdən və dördseksiyalı kvadratik fotodioddan ibarətdir. AQM optik sistemi elə nizamlanır ki, lazerin şüalanması kantileverin sonunda fokuslanmış olsun, əks olunan şüa isə fotodetektorun mərkəzinə düşmüş olsun. Beləliklə, kantileverin meyl etməsi fotodetektorun aşağı və yuxarı yarım hissəsinin işıqlanmasındakı dəyişmələrə nəzərən təyin olunur. Belə optik çeviricidə qarşılıqlı təsir hazırda müasir zond mikroskoplarında yaranan qarşılıqlı təsirin əsasını təşkil edir.

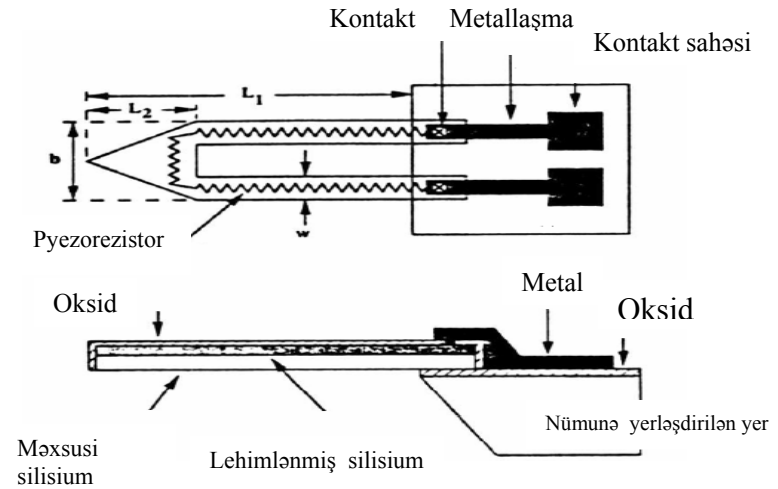


Şəkil 3-4. Qüvvə sensorunun sxemi.

Zond-nümunə arasındakı qarşılıqlı təsirin qeydiyyatı üçün istifadə olunan standart optik zondlarla yanaşı, pyezorezistor kantileverlərin (pyezoleverlər) (şəkil 3-3) tətbiq olunması mövcuddur [11].

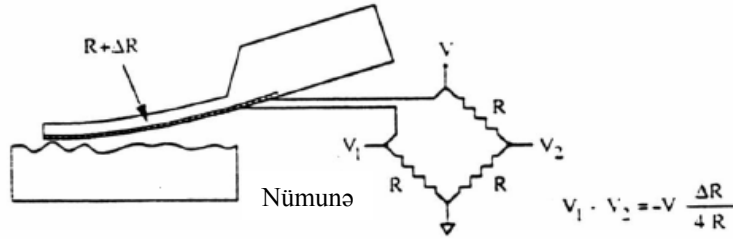
Pyezoleverlərin istifadəsi pyezorezistiv effektdən istifadə olunmasına əsaslanır. Bu mexaniki gərginliyi tətbiq edərkən həcm elektrik müqavimətinin dəyişməsinə əsaslanır. Silisium ənənəvi kantileverlərin istehsal edilməsi üçün istifadə olunur və o güclü pyezorezistiv effektdə malikdir. Pyezoleverin iş prinsipi sadə olub, kantileverin əyilməsi qanunu güclü mexaniki

gərginliyin baş verməsinə əsaslanır. Bu da rezistiv təbəqədə elektrik müqavimətinin dəyişməsinə gətirib çıxarır. Pyezorezistiv material kimi kantileverin səthində amorf silisium oblastında ion implantasiyası formalaşmasından istifadə olunur. Pyezorezistiv kantileverin konstruksiyası şəkil 3-5 də göstərilmişdir. Kantileverin forması elektrik cərəyanının kantileverin ən böyük mexaniki deformasiyaya məruz qalması tamam (divarların) kənarları üzrə keçməsinə səbəb olur. Kantilever nazik dioksid silisium ilə nümunə qoyulan yerdən izolyasiya edilir. Rezistor elementinin təbəqəsi elə çox nazik olmalıdır ki, kantileverin ən çox əyilməsi oblastında cərəyanın keçməsinə təmin etmiş olsun.



Şəkil 3-5. Pyezorezistiv kantileverin (pyezoleverin) konstruksiyası.

Şəkil 3-6-da pyezorezistiv elementli AQM sensorunun sxemi göstərilmişdir. Pyezoleverin iki kontaktı Uintson körpüsünün sxemində birləşir ki, bu da birbaşa elektrik müqavimətinin dəyişməsinə görə kantileverin əyilməsini ölçməyə imkan verir.

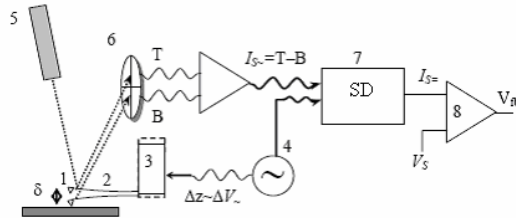


Şəkil 3-6. AQM pyezoleverli sensorun sxemi.

Pyezoleverin əsas üstünlüyü qurğunun nizamlanmasının sadəliyindədir. Əgər optik çeviricinin nizamlanması kantileverin sonuna lazer şüalarının dəqiq yönəlməsini və fotodetektorun balanslaşmasını tələb edirsə, yəni qeyd olunan fokuslaşdırma pyezoleverlərin istifadə olunması zamanı, pyezoleverin qoyulmasından dərhal sonra cihazın işə başlaması mümkündür.

AQM-in kontaktsız iş rejimi

Bu iş rejimində zond cəzətmə qüvvələrin təsir oblastında olmaqla, nümunə səthindən kifayət qədər uzaqda yerləşir. Adətən kontakt rejimində sərt I şəkilli silindrik zond kantilever istifadə olunur (şəkil 3-3b). Kantileverlərin sərtlik əmsalı $k = 10 \div 100 \text{ N/m}$ bərabərdir.



Şəkil 3-7. Skanedici atom-qüvvə mikroskopunun sxemi (kontaktsız iş rejimi): 1-zond; 2-kantilever; 3-pyezovibrator; 4-dəyişən cərəyan generatoru; 5-yarımkəçirici lazer; 6-kvadrat fotodetektor; 7-sinxron detektor; 8-kamparator.

Cəzətmə qüvvələri və onların qradienti itələmə kontakt qüvvələrindən zəifdir, buna görə də bu qüvvələrin aşkarlanması üçün adətən modulyasiya üsulundan istifadə olunur. Bunun

üçün zond-kantileverə birləşdirilmiş pyezovibratora dəyişən gərginlik tətbiq olunur (şəkil 3-7) və bunun nəticəsində onun həndəsi ölçüləri dəyişir. Dəyişən gərginliyin tezliyi kantileverin məxsusi rəqs tezliyinə bərabər seçilir. Bunun nəticəsində kantilever səth üzərində ω_c rezonans tezliyi ilə rəqs edir:

$$\omega_c \sim \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

burada m – zond - kantilever sisteminin kütləsidir.

Zondun rəqs amplitudunun kiçik qiymətlərində zondun hərəkət tənliyi aşağıdakı kimidir:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 (z - z_0) = \Delta z \cdot \omega_0^2 \cos(\omega t) \quad (4)$$

burada ω -pyezoqurğunun məcburi rəqs tezliyi, Z_0 -rəqsin amplitudunun sıfıra bərabər qiymətindəki zond-nümunə məsafəsi, $z(t)$ -t anında zond-nümunə məsafəsi, ΔZ - məcburi rəqslərin amplitudu (kantileverin sonuna pyezovibrator bərki-dilmişdir) həyəcanlanma amplitudu, Q -adsız kəmiyyətdir. O keyfiyyətlik əmsalı olub, rəqs sistemindən və xarici mühitin şərtlərindən asılıdır (hava, maye və ya vakuum). Q - kəmiyyəti rəqslərin xarakterik τ sönmə vaxtı ilə aşağıdakı kimi əlaqədərdir:

$$2Q = \omega_0 \cdot \tau \quad (5)$$

Məcburi rəqslər iki müxtəlif keçid prosesi və stasionar tip rəqslərdən əmələ gəlir. Keçid prosesi (4) tənliyinin $\Delta Z = 0$ olanda ümumi həllidir. Bu müəyyən vaxt ərzində sönür və heç bir maraq kəsb etmir. Stasionar rəqs- ω rəqs tezliyi və $\Delta Z \neq 0$ həyəcanlanma amplitudu olan harmonik rəqslərdir.

Zondun stasionar rəqslərinin amplitudu

$$\delta = \Delta z \sqrt{\frac{Q^2 \omega_0^4}{\omega_0^2 \omega^2 + Q^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \quad (6)$$

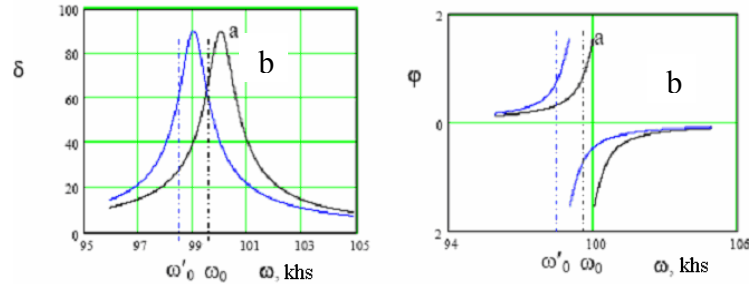
düsturu ilə hesablanır.

Kantileverin sərbəst ucunun bərkidilmiş uca nəzərən rəqslərinin sürüşmə fazası

$$tg \varphi = \frac{1}{Q} \cdot \frac{\omega \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (7)$$

ifadəsi ilə təyin olunur.

Zondun nümunə səthinə yaxınlaşması zond-nümunə arasında qarşılıqlı təsir qüvvələrinin yaranmasına səbəb olur. Bu da zondun kütləsinin artmasına ekvivalent olur. Bu da kantileverin rəqslərinin amplitud-tezlik(ATX) və faza-tezlik xarakteristikalarının (FTX) dəyişməsinə gətirib çıxarır. Səthdən uzaqda ölçmələr ilə müqayisədə kantileverin rəqslərinin sola sürüşməsi baş verir (Şəkil 3-8).



Şəkil 3-8. Zondun rəqsinin δ amplitudu və φ fazasının səthdən uzaqda (a) və səth yaxınlığında (b) ω -dan asılılığı.

Kantileverin rezonans tezliyi qüvvənin qradienti dəyişərkən $\frac{\partial F}{\partial z}$ (zond səthə yaxınlaşarkən) dəyişir. Bu kantileverin sərbəst uzanması ilə müqayisəsinə nəzərən, səthdən uzaqda baş verir və uyğun olaraq

$$\omega_0' = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial F}{\partial z}} \quad (8)$$

kimi ifadə olunur.

Kantileverin məcburi rəqslərinin tezliyi sabit saxlanılır və

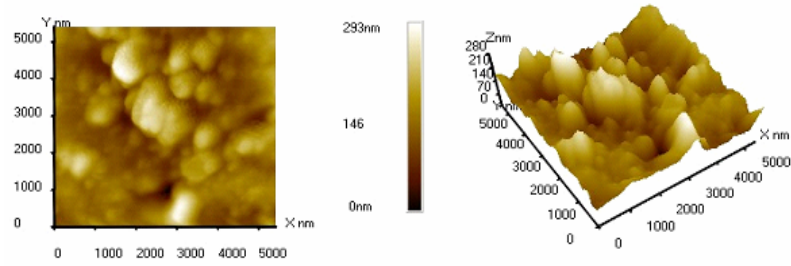
sərbəst halda ω_0 -a bərabər qəbul olunur. Onda zond səthə yaxınlaşarkən kantileverin sərbəst ucunun rəqs amplitudu azalır. Bu rəqs amplitudu optik sistemin köməyiylə qeyd olunur. Fotodetektorun yuxarı və aşağı yarım hissəsinin işıqlanmasının dəyişməsinə nəzərən təyin oluna bilər. Sonra sinxron detektorun köməyiylə sabit siqnal seçilir. Bu cərəyan generatordan alınan sinxron siqnala uyğundur.

Komparator sensor dövrəsindəki cari siqnalı ilkin verilmiş V_s ilə müqayisə edir (zondun nümunə səthindən hansı məsafədə saxlanılmasını xarakterizə edən qüvvələrin səviyyəsi) və meylini nəzərə almaqla korrektəedici V_{fb} siqnalın əmələ gətirir.

Əks əlaqə sistemi ilə zondun səthə yaxınlaşması və uzaqlaşması hesabına zond-nümunə arası qarşılıqlı təsir sabit saxlanılır, idarəedici Z üzrə pyezogətirmə ilə zond və nümunə arasındakı qarşılıqlı təsir qüvvəsini sabit saxlayır (sabit qüvvə rejimində, zondun rəqsinin amplitudu nəticə olaraq). Şəkilin hər bir (x, y) nöqtəsində Z hündürlükdəki siqnal pyezogətirmə kanalından götürülür. Kontaktsiz rejimdə zond və nümunə arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsi çox kiçik olduğuna görə zond nümunə ilə fiziki kontaktda olmur. Bu rejim yüksək dəqiqliklə yumşaq və çox yapışqanlı nümunələrin skan edilməsi üçün daha münasibdir.

Faza təzadı

Əgər səthin müəyyən hissələri müxtəlif xüsusiyyətlərə malikdirsə, onda alınmış şəkil əlavə təzadlara malik olacaqdır. Bu müəyyən hissələrdə materialın növündən asılı olduğuna görə əmələ gəlir. Bu hal zondun rəqs fazasının dəyişməsində özünü göstərir. Eyni zamanda rəqs amplitudunun dəyişməsi səthin topoqrafiyasını təsvir edir. Əks əlaqədə zondun vəziyyətinin amplitud aşkarlanması səthin topoqrafiyasının alınması ilə eyni zamanda mümkündür. Onda amplitud və faza şəkillərinin müqayisəsi əsasında nümunənin tərkibi haqqında məlumat əldə etmək olar (faza təzadı şəkil 3-9).

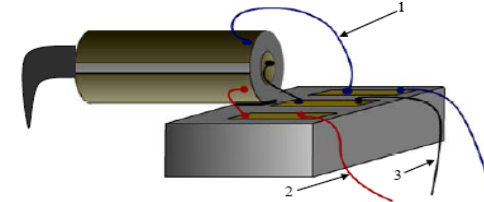


Şəkil 3-9. Polimer nanokompozit sisteminin səthinin 2D (solda) və 3D (sağda) şəkilləri.

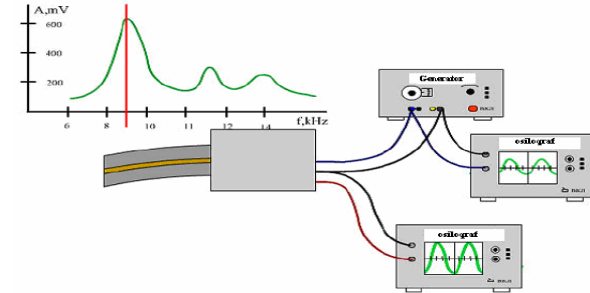
NanoEducator skanedici zond mikroskopunun qarşılıqlı təsir qüvvəsi çeviricisinin konstruksiyası və iş prinsipi

NanoEducator cihazında tunel cərəyanı və qarşılıqlı təsir modulyasiya qüvvəsinin universal çeviricisi tətbiq olunur. Çevirici uzunluğu $l=7$ mm, diametri $d=1,2$ mm və divarın qalınlığı $h=0,25$ mm olan bir tərəfi möhkəm bağlanmış pyezokeramik boru şəklində hazırlanmışdır. Borunun daxili səthində keçirici elektrod yerləşir. Borunun xarici səthinə izlə edilmiş iki yarım silindrik elektrod yerləşdirilir. Borunun sərbəst ucuna diametri 100 mkm olan volfram naqıl bərkidilmişdir (şəkil 3-10). Zond kimi istifadə olunan volfram naqilin sərbəst ucu elektrokimyəvi üsulla itilənir və əyrilik radiusu 0,2-0,05 mkm-dir. Zond yerə bərkidilmiş cihazın korpusunda yerləşən borunun daxili elektrodu ilə elektrik kontaktına malikdir.

Pyezoelektrik borunun bir hissəsi pyezovibrator kimi, başqa bir tərəfi isə rəqslərin mexaniki çeviricisi kimi istifadə olunur. Pyezovibratora qüvvə çeviricisinin rezonans tezliyinə bərabər tezliklə dəyişən elektrik gərginliyi verilir (şəkil 3-11). Pyezoelementin ikinci hissəsi zondun rəqs prosesində yerdə-yişməsinə mütənəsb olan dəyişən elektrik cərəyanı yaradır. Bunu cihaz qeydə alır.



Şəkil 3-10. NanoEducator cihazında qarşılıqlı təsir qüvvəsi çeviricisinin konstruksiyası: (1) göy naqıl-generator; (2) qırmızı naqıl - çevirici; (3) qara naqıl-ümumi.



Şəkil 3-11. Qarşılıqlı təsir qüvvə çeviricisi kimi işləyən pyezoelektrik borunun iş prinsipi.

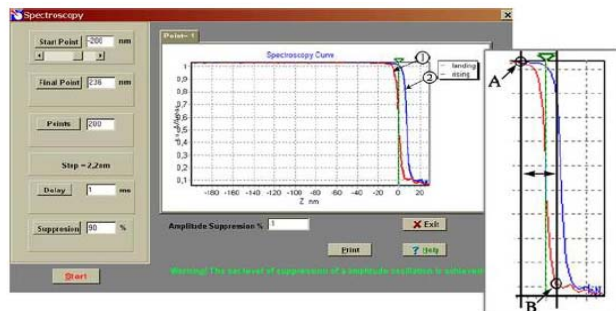
Spektroskopiyanın yerinə yetirilməsi.

Spektroskopiya (Spectroscopy) rejimi zondun rəqs amplitudunun (**Oscillation Amplitude**), zond və nümunə arasındakı məsafədən asılılığını almağa imkan verir.

Spektroskopiya verilmiş ölçmələr üçün zondun rəqs amplitudunun söndürən kəmiyyətin optimal qiymətini seçməyə və qarşılıqlı təsir olmadıqda zondun rəqslərinin amplitudunu qiymətləndirməyə imkan verir.

Spektroskopiya(Spectroscopy) rejimi aşağıdakı parametrlərə nəzarət etməyə və onları dəyişməyə imkan verir (şəkil 3-12).

a) Zondun başlanğıc vəziyyəti nm-lə (**Start Point**) ölçülür. Bu kəmiyyət mənfi olmalıdır, yəni yerinə yetirilən proqrama uyğun olaraq zond ölçmələrə başlamazdan əvvəl nümunədən **Start Point** məsafəsində olmalıdır.



Şəkil 3-12. Spektroskopik rejimin pəncərəsi:

- 1 - zond nümunəyə yaxınlaşarkən alınan əyri;
- 2 - zond nümunədən uzaqlaşarkən alınan əyri.

- b) Zondun son vəziyyəti nm-lə (**Final Point**) ölçülür. Bu kəmiyyət zondun son vəziyyətini müəyyən edir. Əgər zondun rəqs amplitudunun kənarlaşması zamanı verilmiş maksimal qiymətdə (70%) son vəziyyət tez alarsa, onda zond dayanar. Zondun rəqs amplitudunun kənarlaşmasının maksimal qiymətini dəyişmək üçün **Ctrl V** düymələrini sıxmaq və **Suppression** parametrini dəyişmək olar.
- v) Zondun rəqs amplitudunun ölçmələrini aparmaq üçün nöqtələrin sayı (**Points**)
- q) Zondun hərəkəti zamanı addımlar arası dayanmalar(ms) (**Delay**).

Nümunənin verilmiş (X, Y) nöqtəsində Spektroskopiya əyri-
rilərinin qrafiklərinin ölçmələri alqoritmi aşağıdakı kimi aparılır:

1. İzləmə sistemi dayandırılır.
2. Zond nümunədən **Start Point** parametri ilə təyin olunan məsafəyə qədər uzaqlaşdırılır.
3. Z oxu üzrə skanediyyə verilən gərginlik hesabına zond nümunəyə **Step** addımı ilə yaxınlaşır. Zond **Point** parametri ilə verilən sayda addımlar atır və hər bir addımda zondun nisbi rəqs amplituduna nəzərən ölçmələr aparılır (**Oscillation Amplitude**).
4. Sonra zondun əks istiqamətdə hərəkəti zamanı(zond

nümunədən uzaqlaşarkən) həmin nöqtələrdə nisbi rəqs amplitudunun ölçmələri aparılır.

Ölçmələrin nəticələri iki əyridən ibarət qrafikdə (şəkil 3-12) verilmişdir:

- zond nümunəyə yaxınlaşarkən.
- zond nümunədən uzaqlaşarkən.

Qrafikdə absis oxu üzrə Z istiqamətində zondun yerdəyişməsi kəmiyyəti qeyd olunmuşdur. Absisin sıfır qiyməti zondun başlanğıc vəziyyətinə uyğundur (əks əlaqədə zond və nümunə arasındakı məsafə). Bu vəziyyət yaşıl rənglə şaquli kursorla qeyd olunmuşdur.

Spectroscopy pəncərəsində qrafikdə absis oxu boyunca mənfi qiymətlər zondun nümunədən uzaqlaşarkən, müsbət qiymətlər isə zond nümunəyə yaxınlaşarkən zond-nümunə məsafəsinin dəyişməsinə uyğundur.

A nöqtəsi zond-nümunə məsafəsinin yaxınlaşmasının nəticəsi kimi zond və nümunə qarşılıqlı təsirinin yaranmasına uyğundur. Bu nöqtədən başlayaraq yaxınlaşmanın davam etməsi zondun rəqs amplitudunun azalaraq rəqslərin tamamilə sönməsinə uyğun gəlir (B nöqtəsi). Əyrinin B nöqtəsindən sağdakı hissəsi pyezoçeviricinin rəqslərinə uyğundur. Bu zaman zond nümunə səthi ilə tam mexaniki kontaktda olur. B nöqtəsinin vəziyyəti əyrinin meylini təyin edir.

Absis oxu üzərində A nöqtəsindən B nöqtəsinə kimi məsafənin proyeksiyası zond və nümunə arasındakı aralığı göstərir. Absis oxu üzərində əyrinin bütün maili hissəsinin proyeksiyası zond və nümunə arasında qarşılıqlı təsir olmadıqda rəqslərin qiymətini göstərir (nm-lə).

Verilmiş anda zondun yerləşdiyi nöqtədə **Spectroscopy** rejiminin yerinə yetirilməsi **Set Interaction** pəncərəsində **Spectroscopy** düyməsini sıxaraq həyata keçirilir.

Nümunə səthində müxtəlif nöqtələrdə spektroskopiyanın nəticələrini almaq üçün aşağıdakıları yerinə yetirmək zəruridir:

1. Səthin topoqrafiyasının alınması rejimində skanetmənin

yerinə yetirilməsi.

2. **Scanning** pəncərəsinin sağında aşağı hissədə **Spectroscopy** bölməsini seçmək.
3. Nümunə səthinin topoqrafiya şəklində spektroskopiyanın tələb olunan nöqtələrini siçanın sol düyməsinin köməyi ilə qeyd etməli, əksinə etmək üçün **Clear** düyməsini sıxmaq lazımdır.
4. **Scanning** pəncərəsinin **RUN** düyməsini sıxmaq. Bu zaman **Spectroscopy** pəncərəsi yaranmış olur.
5. Spektroskopiyanın parametrlərini vermək (**Start Point, Final Point, Points, Delay**).
6. **Spectroscopy** pəncərəsinin **RUN** düyməsini sıxmaq.
Qeyd olunmuş nöqtələrdə spektroskopik ölçmələrin aparılmasından asılı olaraq ayrıca səhifələrdə qrafikləri yaranacaqdır.

3.3. Metodik göstərişlər

NanoEducator skanedici zond mikroskopunda işləməyə başlamazdan əvvəl cihazın istifadəçilərə rəhbərlik sənədini öyrənmək zəruridir.

3.4. Tapşırıq

1. Qarşılıqlı təsir qüvvəsi çeviricisinin mexaniki rezonans tezliyinin təyini.
 - 1.1. Tədqiq olunan nümunəni altlıqda yerləşdirmək.
 - 1.2. Zond çeviricisini **NanoEducator** cihazının ölçmə başlığının yuvasında yerləşdirmək. Yavaşca vinti burmaq.
 - 1.3. **NanoEducator** cihazının idarəetmə proqramını işə salmaq. Skanedici qüvvə mikroskopu (SQM) rejimini seçmək.
 - 1.4. Alətlər panelindəki **Adjust** düyməsini sıxmaq, sonra **Resonance** düyməsini sıxmaq. **Manual** rejiminə keçmək. **RUN** düyməsini sıxaraq, tezlikdən (zond çeviricisinin amplitud-tezlik xarakteristikası) asılı olaraq, zondun rəqs amplitudunun asılılıq qrafikini almaq olar. Dəqiqləşdirmək lazımdır ki, marker (şaqli yaşıl xətt) qrafikin maksimal pi-

kində yerləşir. Tezliyin qiyməti bu zaman **Frequency** pəncərəsində yerləşmiş olar. Buna uyğun rəqsin amplitudu **Probe Oscillation Amplitude** hissəsində göstərilir. Zondun amplitudunun (**Oscillation Amplitude**) qiymətlərinin nizamlaraq amplitudu gücləndirən əmsalı (**AM Gain**) elə seçməli ki, qrafikdə bir simmetrik maksimumun müşahidə olunması dəqiq görünmüş olsun. **Generator** tərəfindən verilən gərginliyin amplitudun qiymətini minimal (sıfıra qədər də azalmış ola bilər) olması məqsədəuyğundur və 50 mV-dan böyük zondun cavab rəqslərinin amplitudunun kifayət olmayan qiymətlərində ($< 1V$) **AM Gain** əmsalını artırmaq məqsədəuyğundur.

Əgər qrafikdə bir neçə piklər varsa, çevirici vintin səviyyəsini sıxmaqla əlavə piklərin amplitudunu azaltmağa çalışmalıdır. Alınmış amplitud-tezlik xarakteristikasını saxlamaq lazımdır.

- 1.5. Pyezorezonans tezliyini nizamlamalı. Bunun üçün **Manual Regime** hissəsindəki **Fine** vəziyyətini seçərək **RUN** düyməsini sıxaraq rezonans tezliyi qiymətini dəqiqləşdirmək. Alınmış amplitud-tezlik xarakteristikasını saxlamaq.
2. Pyezorezonans çeviricisi olan rəqs sisteminin keyfiyyətliliyinin təyini.
 - 2.1. **Fine** rejimindəki ölçmələrin amplitud-tezlik xarakteristikasından **Frequency** hissəsində f_{rez} və **Probe Oscillation Amplitude** A_{max} -rezonans pikinin maksimal qiymətlərini təyin etməli.
 - 2.2. Siçan vasitəsilə yaşıl kursoru elə vəziyyətə gətirməli ki, bu zaman **Probe Oscillation Amplitude** qrafikin maksimal pikindən sağ və sol tərəfdəki rezonans amplitudunun maksimal qiymətinin yarısına bərabər olsun $A_{max} / 2$ (Qrafikin aşağısında tezliyin və amplitudun cari qiymətləri verilmiş olur). Tezliyin ölçülmüş düymələrini sağda (f_1) və solda (f_2) kimi yazmalı.

2.3. Hündürlüyün yarısında pikin enini

$$f_1 - f_2 \text{ və } Q = f_{rez} / (f_1 - f_2)$$

keyfiyyətlilik kəmiyyətini hesablamaq lazımdır.

3. Zond-nümunə məsafəsindən asılı olaraq (zondun rəqs amplitudu) qarşılıqlı təsir qüvvəsinin təyini.

3.1. Zond çeviricisinin işçi tezliyini rezonans vəziyyətə gətirmək.

3.2. Qarşılıqlı təsirin alınmasını

Amplitude Suppresion=0,3

Feed Back Loop Gain = 3 qiymətlərində həyata keçirmək.

3.3. **Scanner Protraction** indikatorundakı Z qiymətlərini yadda saxlamaq.

Qarşılıqlı təsiri daha etibarlı qeyd etmək üçün onun qiyməti adətən skanetmə prosesində olduğundan böyük götürülür. İşçi qiymətlərə keçmək üçün **Amplitude Suppresion** qiymətini təqribən 0,2-0,1 kimi azaltmaq lazımdır. Bu zaman skanedici nümunəni zondan uzaqlaşdırır, ancaq Z indikatorunda bu dəyişiklik kiçik olduğuna görə hiss olunmur. Əgər qarşılıqlı təsirin qiyməti çox kiçik seçilibsə (0,01) skanedici aşağı düşməyə başlayar (Z kəmiyyəti azalır). Qarşılıqlı təsirin səviyyəsinin işçi qiymətinin düzgün təyin etmək üçün **Amplitude Suppresionu** Z əvvəlki qiymətini almayana qədər artırmaq lazımdır.

3.4. Spektroskopiya rejimini nümunə səthi üzərində zondun yerləşdiyi cari nöqtədə yerinə yetirməli. Parametrləri elə seçməlidir ki, əyridə nümunə səthi tərəfindən qarşılıqlı təsir qüvvəsinin yaranması anından başlayaraq zondun amplitudunun dəyişmələrinin əyilmə hissəsi yaxşı görünsün.

3.5. Sərbəst vəziyyətdə zondun rəqs amplitudunun (səthdən uzaqda) və qarşılıqlı təsirin alınması zamanı zond-nümunə məsafəsini qiymətləndirməli. Düzünə və əksinə skanedicinin hərəkətinin qrafikinə görə histerezis nəzərə alınmaqla zondun rəqslərinin orta qiymətini tapın.

3.6. Verilmiş ölçmədə zondun rəqs amplitudunun uzaqlaşma

kəmiyyətini (**Amplitude Suppresion**) optimal seçməli. Yaşıl kursuru üfüqi sahəyə yaxın əyrinin əyilmə hissəsində yerləşdirmək məqsədəuyğundur, burada qarşılıqlı təsir zəif olub, Z oxu üzrə ayırdetmənin yuxarı olmasının nəticəsi kimi əyrinin dikliyi böyük olur.

4. Tədqiq olunan nümunə səthinin topoqrafiyasının və faza təzadının alınması.

4.1. Spektroskopiya rejimi pəncərəsindən çıxmaq. Skanetmə pəncərəsini açmaq. Tədqiq olunan nümunə haqqında qabaqcadan verilmiş məlumatlar əsasında skanetmənin zəruri parametrlərini vermək.

4.2. Skanetmənin faza təzadının parametrləri ilə eyni zamanda aparılması üçün skanetməyə başlamazdan əvvəl **Scannig** pəncərəsinin sağ aşağı hissəsindəki uyğun zəruri imkanı (**Phase shift**) seçmək zəruridir.

4.3. Tədqiq olunan nümunənin səthinin topoqrafiyasını və faza təzadının ölçmələrini həyata keçirin.

4.4. Təcrübəni qurtardıqdan sonra skanetmə pəncərəsini bağlayıb nümunədən zonda uzaqlaşdırmanı həyata keçirin.

3.5. Yoxlama sualları

1. Zond-nümunə məsafəsinə görə qarşılıqlı təsir qüvvəsinin asılılığını təsvir edin.
2. AQM-in əsas iş rejimlərini və onların təyinatını deyın.
3. AQM-in kontakt rejimində qüvvələrin detektə(aşkarlanmasının) alınmasının əsas üsullarını izah edin.
4. AQM-in kontaktsiz iş prinsipini izah edin.
5. AQM kontaktsiz iş rejimində işləyərkən nəyə görə faza təzad seçmələri rejimi istifadə olunur?
6. **NanoEducator** cihazının kontaktsiz qüvvə sensoru qurğusu və iş prinsipini izah edin.
7. **NanoEducator** cihazında spektroskopiyanın yerinə yetirilməsi rejimini izah edin.

Laboratoriya işi № 4

Skanedici zond mikroskopiyasında təhriflər

4.1. İşin məqsədi	79
4.2. İşin məzmunu	79
4.3. Metodik göstərişlər.....	109
4.4. Tapşırıq	109
4.5. Yoxlama sualları	114

İstənilən ölçmələr zamanı nümunənin səthinin alınan şəklinin (xəyalının) onun həqiqi səthindən fərqlənməsi təhriflər adlanır.

4.1. İşin məqsədi

1. Skanedici zond mikroskopunda təhriflərin mənbəyinin öyrənilməsi.
2. Pyezoelektrik keramikalarının və SZM skanedicisinin əsas xarakteristikasının tədqiqi.
3. Zondun formalarının və SZM-in ayırdetmə qabiliyyətinin təyini.

İş iki hissədən ibarət olub iki dərs müddətində yerinə yetirilir (4 saat). İşin birinci hissəsi TGX1 test nümunəsinə görə skanedicinin əsas xarakteristikalarının tədqiq olunmasından ibarətdir. İşin ikinci hissəsi isə TGT1 test nümunəsinin şəklinə görə zondun formalarının təyini, zondun elektrokimyəvi üsulla itilənməsi (yəni yeni zondların hazırlanması) və zond formalarının təkrar təyindən ibarətdir.

Ləvazimat: Skanedici zond mikroskopu (Model SZMU-L5), zond, NanoEducator proqramı və kompüter.

Tədqiqat üçün nümunə: TGX1 və TGT1 test nümunələri.

4.2. İşin məzmunu

Pyezokeramikanın və skanedicinin əsas xarakteristikalarının öyrənilməsi (rezonans tezlik, yerdəyişmə diapozonu, qeyri-xəttilik, histerezis, skanedicinin sürüşməsi, temperatur dreyfi (kənara çıxma)). TGX1 test nümunəsinə görə skanedicinin əsas xarakteristikasının tədqiqi.

Zondun həndəsi ölçülərinin müxtəlif səthlərin xüsusiyyətlərinin skanedilməsi zamanı SZM ayırdetməsinə təsiri. TGT1 test qəfəsinə görə zondun formalarının təyini, zondun elektrokimyəvi üsulla itilənməsi və SZM-də şəkillərin təkrar alınması.

Skanedici zond mikroskopunda təhriflər

Bərk cisimlərin mikroskopik tədqiqi, həmçinin skanedici

zond mikroskopiya üsullarının məqsədi səthin böyüdülmüş şəkilini almaqdır. İdeal mikroskop səthin həqiqi şəklini almağa imkan verir. İstənilən ölçmələr zamanı alınan şəkillərin nümunənin həqiqi səthindən fərqlənməsi təhriflər adlanır.

Bütün analitik tədqiqat üsullarında təhriflər olur. Tarixən texniki alətlərin və tədqiqat üsullarının inkişafı təhriflərin daha aydın olmasına; qurğuların konstruksiyalarında və materiallarında dəyişikliklər və alınmış nəticələrin təhlilində təhriflərin minimal olmasına və daha aydın başa düşülməsinə imkan vermişdir.

Skanedici zond mikroskoplarının işi də təhriflərsiz mümkün deyildir. Əgər bunlar aydın deyilsə, onda tədqiqatçı SZM vasitəsi ilə alınmış nəticələri düzgün təhlil edə bilmir. Bu çoxlu arzuolunmaz nəticələrə gətirib çıxarır, məsələn cihazın işini düzgün qiymətləndirməməyə və təcrübənin nəticələrinin səhv istifadə olunmasına səbəb olur. Əgər təhriflər yaxşı öyrənilsə və onların yaranma səbəbləri aydınlaşsa, SZM-in nəticələri düzgün təhlil olunur və alınmış məlumatlardan inamla istifadə olunur.

SZM-də təhriflərin olmasının çoxlu mənbələri mövcuddur. Təqdim olunan laboratoriya işinin məqsədi SZM şəkillərində təhriflərin mənbəyini və alınmış nəticələrin düzgün təhlilini öyrənməkdir.

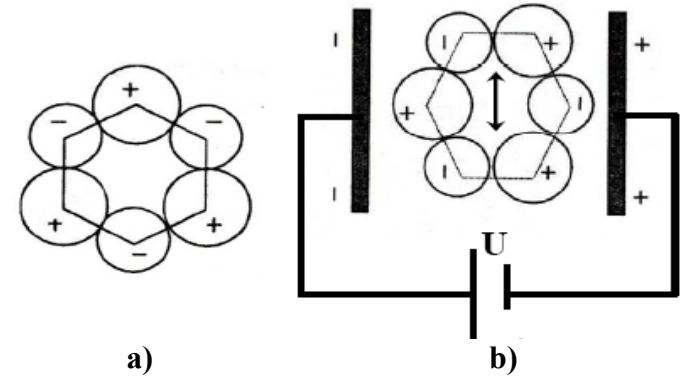
SZM-in təhriflərə səbəb olan əsas komponentləri:

1. Pyezoelektrik keramika

SZM-də kiçik məsafələrdə iynənin yerdəyişməsinin idarə olunması üçün pyezoelektrik mühərriklərdən istifadə olunur. Bunların vəzifəsi tədqiq olunan və hərəkət etməyən nümunəyə nəzərən zondun və ya hərəkət etməyən zonda nəzərən nümunənin yerinin dəyişməsi zamanı zondun dəqiq mexaniki skanetməsinə təmin etməkdir.

Müasir SZM-də istifadə olunan əksər pyezoelektrik mühərriklərin işi elektrik sahəsinin təsiri nəticəsində pyezomaterialın ölçülərinin dəyişməsi, yəni əks pyezoeffektdən istifadə olunmasına əsaslanır. Pyezoeffektin mexanizmini SiO_2 kvars

strukturuna bənzəyən sadə modeldə izləmək olar. SiO_2 qəfəsində silisiumun müsbət ionları oksigenin mənfi ionları ilə növbə ilə əvəzləmə. Deformasiya olunmayan (elementar qəfəsdə) yerlərdə müsbət və mənfi yüklərin mərkəzləri üst-üstə düşür (şəkil 4-1a). Əgər kvars kristalın əks üzlərində yerləşmiş metal elektrodla (şəkil 4-1b göstəriləndiyi kimi) xarici elektrik gərginliyi tətbiq edilərsə, onda ionlar yerlərini dəyişər və bu kristallik qəfəsin deformasiyası ilə nəticələnər.



Şəkil 4-1. Kvarsın quruluş sxemi (a) və əks pyezoelektrik effektin yaranması (b).

SZM-də pyezomaterial kimi kvars kristallik material əvəzinə, pyezomodulu böyük olan pyezokeramika istifadə olunur. Pyezokeramika 0,5-50 mkm ölçülü seqnoelektrik monokristal dənələr yığımindən ibarətdir.

SZM-də istifadə olunan əksər pyezokeramikalar [12, 13] $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ tərkibli (qurğuşun sirkonat-titanat) müxtəlif əlavələr olan materiallardır. Əlavələr kimi *Nb*, *Su*, *Bi*, *La* əlavə (5%-dən az olan) qatışıqlardan və *Ba*, *La* kimi modifikasiya edən aşqarlar (5%-dən çox olan) istifadə olunur. Standart keramikanın alınma üsulu kimi atmosfer təzyiqində verilmiş tərkibli tozların birləşməsi üsulundan istifadə olunur. Həmçinin 200 kq/sm^2 təzyiq altında isti presləmə üsulu da mövcuddur. Bu üsulla sıxlığı 99,9 %-dan böyük və nəzəri alınması mümkün

olan kristallik quruluşlu nümunələrin xüsusi keyfiyyətlərinə malik keramika almaq mümkündür.

Polyar olmayan keramikada dənələr və onların domenlərinin polyar oxları xaotik düzülür ki, bu da keramikanın elektrik, pyezoelektrik və başqa xarakteristikalarının kvaziizotrop olmasına səbəb olur. Tələb olunan xassələri, məsələn əks pyezoeffekti almaq üçün, xarici elektrik sahəsinin köməyiylə materialın bütün həcm üzrə polyar oxlarını bircins istiqamətləndirmək zəruridir. Polyarlaşma adlanan bu proses materialın Tc Kuri temperaturundan yüksək temperatura kimi qızdırılmasına və xarici elektrik sahəsinin təsiri altında otaq temperaturuna qədər soyudulmasına əsaslanır. Xarici elektrik sahəsinin kənarlaşdırdıqdan sonra domenlərin dipol momentləri bir istiqamətə yönəlir, yəni materialda qalıq polyarlaşma yaranır. Pyezokeramikanı istifadə edərkən onu Kuri temperaturundan yüksək temperaturda qızdırmaq olmaz, bu temperaturda pyezokeramika depolyarlaşır və pyezoeffekt müşahidə olunmur.

Bir tərəfi bərkidilmiş pyezolövhənin (şəkil 4-2) uzanması

$$\Delta l = l \frac{U}{h} d_{31} \quad (1)$$

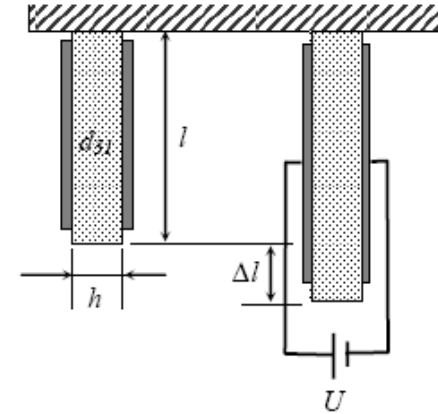
ifadəsi ilə təyin olunur.

Burada l - lövhənin uzunluğu, h - lövhənin qalınlığı, U - pyezolövhənin kənarlarında yerləşmiş elektrodlara tətbiq olunan elektrik gərginliyi, d_{31} - materialın pyezomoduludur.

d_{31} -pyezomodulu uzununa istiqamətdə tətbiq olunan gərginliyin yerdəyişməyə çevirilməsini təyin edib, adətən $30-350 \times 10^{-12}$ m/V-

ə bərabər olur. Məsələn, $d_{31}=200$ m/V (2 A/V) qiymətində uzunluğu $l=200$ mm, qalınlığı $h=0,5$ mm olan lövhənin idarəedici gərginliyinin qiyməti U 0-dan 300V-a kimi dəyişməsi nəticəsində 0-2,4 mkm diapazonunda Δl mexaniki deformasiyasını təmin edir. Pyezomodul əmsalının böyük qiymətləri kiçik ölçülü skanedicilər və kiçik idarəedici gərginlik üçün vacibdir.

Pyezomaterialın deformasiyasının maksimal qiyməti skanetmənin maksimal sahəsinə təyin edir, lakin bu elektrik sahəsinin gərginliyinin qiyməti ilə məhdudlaşır, belə ki, bu zaman material elektrikin təsirindən dəşilir. Minimal addım və ya yerdəyişmənin dəqiqliyi idarəedici elektrik gərginliyinin küyləri, mexaniki titrəmələrin və termodreyfin səviyyəsinə əsasən təyin olunur.



Şəkil 4-2. Bir tərəfi bərkidilmiş pyezolövhənin uzanması.

SZM-də istifadə olunan pyezokeramikaların əsas xarakteristikalarından bunları seçmək olar:

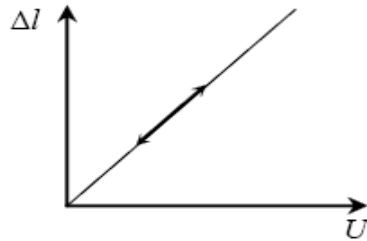
- Sərf edilən gücün az olması və istilik ayrılması
- SZM üçün helium(4,2K) temperaturuna qədər alçaq temperaturalarda d_{31} -pyezomodulunun dəyişməməsi
- Kuri temperaturu $170-350^{\circ}\text{S}$
- Keramikanın istidən genişlənmə əmsalı $\beta=1-10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ -ə bərabər olur. Bu zaman β -nın qiyməti böyük əhəmiyyət kəcb etmir. Keramikanın və konstruksiyada istifadə olunan materialın istidən genişlənmə əmsallarının fərqi çox kiçik olması temperatur dreyfini azaltmağa imkan verir.
- Kiçik ölçüyə, yüksək sərtliyə və bunun nəticəsində yüksək rezonans tezliyinə (10kHz-dən böyük olması məqsədə uyğundur) malik olması. Bu da titrəmələrdən qorunmaq üçün

lazımdır. Yüksək rezonans tezlik, həmçinin skanet-mənin sürətini artırmağa imkan verir, yəni SZM-də nəticələrin alınması vaxtını azaltmaq olar.

- Müxtəlif mühitlərdə və yüksək vakuumda tətbiq olunması. Onlar kimyəvi aktiv deyillər və elektromaqnit sahəsi yaratmırlar.

Tətbiq olunan pyezokeramikaların üstün keyfiyyətlərinə baxmayaraq, onların bir sıra çatışmayan cəhətləri vardır.

İdeal pyezoelektrik keramika (1) ifadəsinə uyğun olaraq tətbiq olunan gərginliyin təsiri nəticəsində şəkil 4-3-də göstəriləyi kimi xətti olaraq deformasiya edir.



Şəkil 4-3. Tətbiq olunan gərginliyin təsiri nəticəsində ideal pyezokeramikanın deformasiyası.

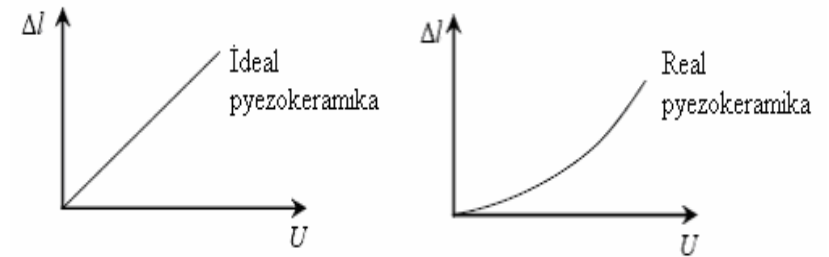
Pyezoelektrik keramika təcrübədə özünü şəkil 4-3-də göstərilmiş xətti modelə uyğun aparmır. Pyezokeramika əsasın-da skanedici ilə işləyərkən bu materialın bir sıra xüsusiyyətlərinə diqqət etmək lazımdır.

a) Qeyri-xəttilik

Real pyezokeramika tətbiq olunan gərginlik nəticəsində qeyri-xətti deformasiya edir (şəkil 4-4). Pyezokeramikanın uzanması tətbiq olunan gərginliyin funksiyasıdır:

$$\Delta l = f(U) \quad (2)$$

Qeyri xəttilik tətbiq olunan gərginliyin artması nəticəsində pyezomodulun 10-20% artması hesabına yaranır.



Şəkil 4-4. Pyezokeramikanın mexaniki deformasiyasının qeyri-xəttiliyi.

Səthin atomlararası məsafə tərtibində kiçik hissələrinin şəkillərinin alınması zamanı bu çatışmazlıq əhəmiyyət kəsb etmir. Birincisi, diapazon dəyişməsi kiçik olduğuna görə qeyri-ideal hərəkət yaranmır; ikincisi, əksər mühüm həndəsi parametrlər, məsələn rabitə uzunluğu başqa üsullarla əvvəlcədən ölçülmüş nəticələrdən məlum olur.

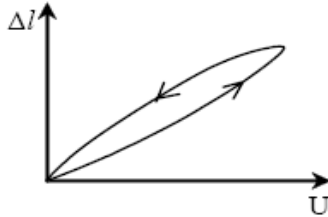
Bəzən daha böyük obyektlərin, məsələn mikrotexnoloji üsullarının köməyiylə hazırlanmış strukturlarda şəkillərin alınması zamanı qeyri-xəttilik kifayət qədər böyük təhriflər yarada bilər. Pyezokeramikanın qeyri-xəttiliyi skanedicidə eyni ölçülü obyektlərin başlanğıcda və sonda alınmış şəkillərinin müxtəlif ölçülərə malik olmasına səbəb olur.

b) Histerezis

Bu tip qeyri-xəttilik elektrik gərginliyinin istiqamətinin dəyişməsindən asılı olaraq uzanmanın birqiymətli olmamasına görə (şəkil 4-5) yaranır. Bundan əlavə histerezisə görə pyezokeramika elektrik gərginliyini düz istiqamətdə və ya əks istiqamətdə eyni cür dəyişməsindən sonra öz başlanğıc uzunluğunu almaya da bilər.

Histerezisin qiyməti adətən 10% təşkil edir və bu pyezokeramik materialın tərkibindən və strukturundan asılıdır. Histerezis SZM-də skanedicinin düzünə və əksinə yerdəyişmələri zamanı skanetmə sahəsində sürüşmələrə səbəb olur. Buna görə nümunə səthinin SZM-də alınmış şəkillərindəki histerezislə

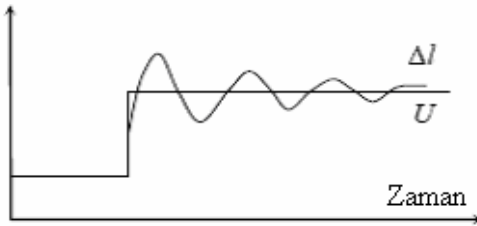
əlaqəli təhriflərin aradan qaldırılması üçün ölçmələri skanedicinin yalnız düzünə və ya yalnız əksinə gedişi zamanı aparmaq lazımdır.



Şəkil 4-5. Pyezokeramikanın histerezisi.

c) Sürüşmə

Pyezokeramikanın sürüşməsi yavaş dreyflə aparılmış əvvəlki yerdəyişmələrin istiqamətində və ya gərginliyin sürətlə dəyişməsindən sonra mexaniki dəyişmələrdə gecikmələr zamanı əmələ gəlir. Pilləvarı gərginliyin tətbiqindən sonra pyezokeramikanın (cingintili) yerdəyişməsi şəkil 4-6-dakı kimi davam edir.



Şəkil 4-6. Pyezokeramikanın sürüşməsi və cingiltisi.

Pyezokeramikanın sürüşməsi skanetmənin böyük sahələrdə və böyük sürətlə aparılması zamanı başlanğıc sahədə təhriflərin yaranması ilə özünü göstərir. Yeni pyezomateriala tətbiq olunan gərginlik kifayət qədər sürətlə dəyişən zaman özünü bürüzə verir. Həmçinin təkrar skanetmə SZM şəkillərində xüsusi sürüşmələrə gətirib çıxardır. Sürüşmə təsiri, skanedicinin sürətini azaltdıqdan və skanedicini “ilkin işə hazırlama”-dan sonra

azalmış olur. Təcrübə zamanı SZM şəkillərində sürüşmə ilə bağlı təhriflər yaranarsa, skanedicini müəyyən vaxt dayandıraraq prosesi yenidən təkrar etməli. Bu tətbiqlərdən sonra SZM şəkillərindəki təhriflər məsələn, şaquli xətlərin əmələ gəlməsi ilə əyilmə təkrar kadrlarda azalmış olacaqdır. Aydındır ki, sürüşmə tələb olan başlanğıc nöqtədə skanetməni başlamaq üçün skanedicini dərhal yerdəyişməsi zamanı meydana çıxır. Buna görə də skanedicinin idarə olunması alqoritmlərində dərhal idarəedici gərginliyin kəskin sıçrayışlı addımla dəyişməsi aradan götürülmüşdür və sürüşmənin nəzərə alınması üçün dayanma anı daxil edilmişdir.

ç) Temperatur dreyfi

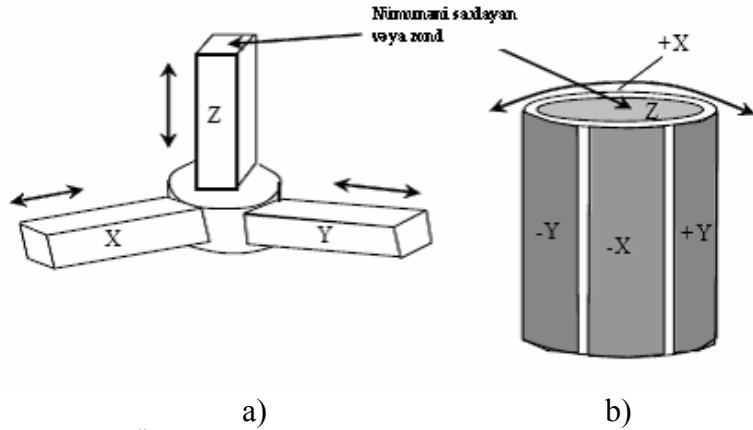
Laboratoriyada temperaturun təsadüfə dəyişməsi həmişə mövcuddur və elementlərin konstruksiyalarının uzunluqlarının dəyişməsinə, zond və nümunə yerdəyişməsinə nəzərən dəyişmələrinin yaranmasına səbəb olur. Məsələn, $\Delta T = 1^\circ S$ temperatur dəyişməsi uzunluğu $l=20\text{mm}$, temperaturun xətti genişlənmə əmsalı $\beta = 2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ olan pyezoboru uzunluğunu

$\Delta l = \beta l \Delta T = 40 \text{ \AA}$ qədər dəyişmiş olur.

Z koordinatı üzrə hamar temperatur dreyfi, skanetmə prosesində nümunənin SZM şəkillərində müstəvi meylinə səbəb olur. X və Y koordinatları üzrə xətti ölçülərin dəyişməsi zond və nümunə müstəvisində yerdəyişmələrə gətirib çıxırır və bunun da nəticəsində şəkillərin ölçüləri dəyişir. Bütünlüklə bu təhriflər keramikanın sürüşməsi ilə bağlı oxşar təhriflərdir.

2. SZM skanedicilər

Həm x, y - nümunənin müstəvi səthi üzrə, həm də z - şaquli istiqamətdə zondun yerdəyişməsini təmin edən pyezokeramik konstruksiyalar skanedicilər adlanır. Bir neçə növ skanetmə cihazları mövcuddur. Ən çox yayılmış “üç ayaqlı” və “boru” şəkilli skanedicilərdir (şəkil 4-7).



Şəkil 4-7. Üç ayaqlı skanedici (a) Z istiqamətində skanetmə zamanı çevrənin qövsü üzrə hərəkət edir. Boru şəkilli skanedici (b) mürəkkəb hiperbolik funksiyanı təsvir edir. Bu effektlər SZM şəkillərində əyilmə təhriflərə gətirir.

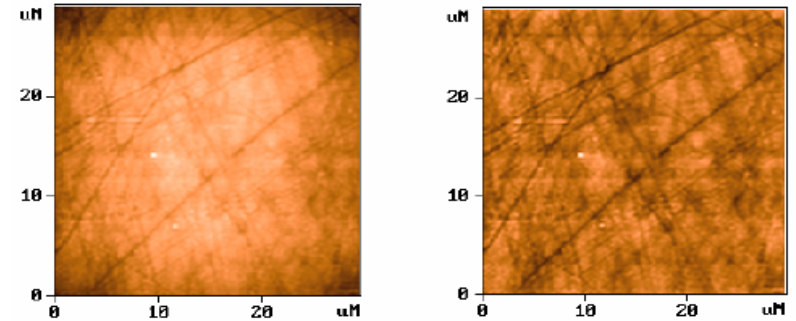
Üç ayaqlı skanedicinin üç koordinat oxu üzrə hərəkətini ortoqonal strukturda yerləşmiş, üç asılı olmayan pyezokeramikalar yerinə yetirir.

Skandetmə vaxtı X və Y pyezokeramikaya gərginlik verilir, skanedici Z pyezokeramikasının sonunda bərkidilmiş zond nümunə müstəvisindən məcburi çıxarır. Beləliklə, Z-pyezokeramikasına verilən gərginlik zond nümunə ilə əks əlaqədə saxlamağa imkan yaradır. Bu zaman nümunənin səthi tamamilə hamar olarsa belə şəkildə bükülmüş formanın alınmasına səbəb olur (şəkil 4-8).

Üçayaqlı skanedicidə Z-pyezokeramika və buna uyğun olaraq onun sonunda bərkidilmiş zond skandetmə zamanı çevrənin qövsü üzrə hərəkət edir (2 tərtibli müstəvi). Bu qövs üçbucağın faktiki ölçüləri ilə təyin olunur və skandetmənin sürətinin dəyişməsi onu dəyişdirmir. Bu təhriflər 2-ci tərtib levelinq vasitəsi ilə şəkildən (şəkil 4-8) asanlıqla kənarlaşdırıla bilər.

Boru şəkilli skanedicilər lotarial müstəvidə içi boş pyezoelektrik borunun əyilməsi və uzanması və ya borunun sıxılması

nəticəsində işləyir. X və Y oxları istiqamətində borunun yerdəyişməsinin idarə olunması üçün istifadə olunan elektrodlar borunun səthi üzrə dörd segment şəklində yerləşdirilmişdir (şəkil 4-7b). Borunun X dən +X istiqamətində əyilməsi və onun hər hansı bir tərəfinin uzanması üçün pyezokeramikaya gərginlik verilir. Eyni ilə Y oxu istiqamətində hərəkət alınması üçün bu prinsip istifadə olunur. Z oxu istiqamətində hərəkət alınması üçün borunun mərkəzində yerləşən elektroda gərginlik verilir.



Şəkil 4-8. SZM şəklindən iki tərtibli sahənin çıxılması.

Z oxu istiqamətində borunun sıxılması və ya uzanması diapazonu borunun uzunluğu ilə mütənasib olub, eyni zamanda X və Y oxları istiqamətlərində əyilmə uzunluğunun kvadratı ilə mütənasibdir. Nəticədə əgər nümunə boruya perpendikulyar qoyulmayıbsa böyük sahələrin skandilməsi zamanı böyük detalları ölçmək üçün skanedicinin Z oxu istiqamətində yerdəyişməsi kifayət etməyə bilər.

Boru şəkilli skanedici üç ayaqlıya nəzərən daha yüksək tərtibdə əyilmə təhrifləri edir. Histerezisin qiyməti skanedicinin sürəti və diapazonunun artması ilə artmış olur. Əyilmənin forması və qiyməti skandetmənin sürəti və ölçülərindən asılı olaraq dəyişir. Boru şəkilli skandetmədən alınan şəkildə əyilməni düzəltmək, daha böyük düzəlişlərin tərtibindən istifadə olunması başqa təhrifləri azaldır.

a) Skanedicilərin xarakteristikalarının xəttləşməsi üsulları

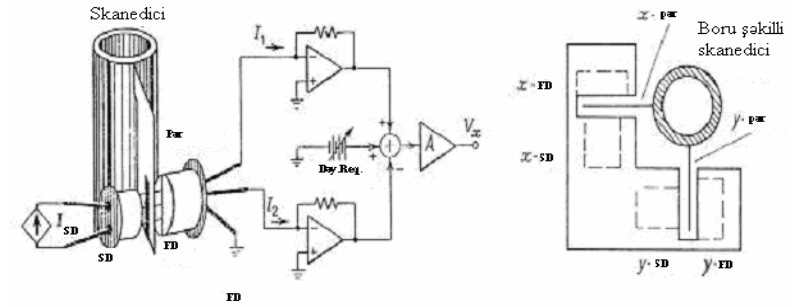
Skanedicilərdə zond mikroskoplarında pyezokeramikanın qeyri-xəttiliyinin və başqa xüsusiyyətlərinin düzəlişləri üçün bir neçə üsullar mövcuddur.

Bu problemin həlli üçün ən əhəmiyyətli yaxınlaşmalardan biri bundan ibarətdir ki, düzünə ölçmələrdə skanedicinin ani vəziyyəti və qeyri xəttiliyinin düzəlişi real vaxtda əks əlaqə dövrəsində həyata keçirilir. Yerdəyişmə çeviricisi kimi həcm və ya tenzor çeviricisi, fotodetektor və ya optik interferometrlər istifadə oluna bilər.

Optik düzəliş üsulunda [14] (şəkil 4-9) pyezoelektrik boru şəkilli skanedicidə iki qarşılıqlı perpendikulyar pər yerləşir. Hər birində yığıcam aralıq və ya yarıq vardır. Hər bir pərdən müxtəlif tərəflərdə işıq diodları və diferensial fotodetektorlar yerləşdirilmişdir. Işıq diodu geniş işıq dəstələri ilə yarığı işıqlandırır. Skanedicilərin yerini dəyişərkən yarıq fotodetektora nəzərən yerini dəyişir və onun səthi üzrə ensiz işıq sahəsinin yerdəyişməsi baş verir. İki fotodetektor bölməsində müstəvi işığın yaratmış olduğu fotocərəyanlar fərqi gücləndiricidə skanedicinin dəyişməsinə mütənasib olan çıxış gərginliyinə çevrilir. X və Y oxları istiqamətində skanedicinin dəyişməsi ayrıca sxemlə ölçülür.

Həcm çeviricilərindən [15] istifadə edərkən kondensatorun iki lövhəsi skanedicidə yaxın fiksə olunmuş məsafədə yerləşdirilir. Skanedicilərin hərəkət edərkən kontakt sahəsinin və skanedicinin yerdəyişməsinə görə lövhələr arasındakı həcm dəyişməsi təyin olunur.

Tenzor çeviricilərindən istifadə edərkən [16] onun deformasiyası nəticəsində (tenzorezistiv çevirici effekt) naqilin elektrik müqaviməti ölçülür. Skanedicidə X, Z və Y pyezokeramikalarında yerləşmiş tenzor rezistorlarının müqavimətləri skanedicinin yerdəyişməsinə mütənasib dəyişir.



Şəkil 4-9. Bir kanal çeviricinin dəyişməsinin (solda) və iki koordinatlı detektorun həndəsi ölçülərinin (sağda) sxemi: İD-ışıq diodu, FD-fotodetektor.

İkinci daha sadə üsul pyezokeramikanı həyəcandırmaq qeyri-xətti gərginliyin istifadə olunmasından ibarətdir. Bunun nəticəsində skanedicinin yerdəyişməsi xəttiliyə yaxın olur. Bunun üçün SZM qabaqcadan nizamlanır, yəni yerdəyişmənin tətbiq olunan gərginlikdən asılılığı (2) funksiyası tapılmış olur. Skanedicini nizamlamaq üçün qabaqcadan ölçüləri məlum olan periodik strukturlu (test-obyekt) nümunədən istifadə edilir.

b) Skanedicilərin rezonans tezlikləri

SZM skanedicisinin mühüm xarakteristikalarından biri onun rezonans tezliyidir. Müasir mikroskopların konstruksiyalarında skanedicilərin maksimal görünüş sahəsini almaq üçün onun rezonans tezliyini qarşılıqlı güzəşt əsasında razılaşdırmaq lazımdır.

Sərt konstruksiyalı və rezonans tezliyin qiyməti böyük olan skanedicilərin, xarici titrəmələrin təsirindən yaxşı qoruyur və tezliyin kifayət qədər geniş sahəsində siqnalı kifayət qədər dəqiqliklə izləməyə imkan verir. Bu skanedicinin sürətini yüksək etməyə imkan verir. Beləliklə, informasiyanı almaq üçün vaxtı azaltmaq olar. Verilmiş oblasda skanetmə vaxtının azalması bir tərəfdən əlverişlidir, digər tərəfdən bu, prinsipial əhəmiyyətə malik olub temperatur dreyfinin azalmasına gətirib çıxarır.

Pyezoboru formasındakı skanedicinin məxsusi rezonans tezliyini qiymətləndirək. Bunun üçün bir tərəfi möhkəm bərkidilmiş çubuğun X, Z müstəvisində eninə rəqslərinin əsas harmonik tezliyinin ifadəsindən istifadə edək

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \frac{(1,875)^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EI_Y}{m}} \quad (3)$$

burada $I_Y(z)$ - z oxuna nəzərən uzununa ətalət momentidir, ℓ - uzunluq, m-kütlə, $E = c^2 \rho$ -Yung modulu, c-pyezomaterialda səsin sürəti, ρ -pyezokeramikanın sıxlığıdır.

Uzunluğu - ℓ , radiusu-R və divarının qalınlığı-h olan içi boş silindir üçün ətalət momenti $I_Y(R) = \frac{\pi R^4}{2} \left[1 - \left(\frac{R-h}{R} \right)^4 \right]$ kimidir.

$\ell = 30$ mm, $h = 1$ mm, $R = 6$ mm, $c = 3,3 \cdot 10^3$ m/san, $\rho = 7$ q/sm² qiymətləri üçün $\omega = 12,3$ Khs alırıq.

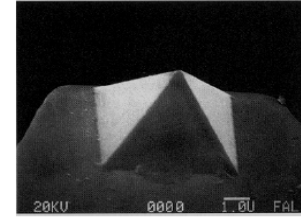
(3) düsturundan görünür ki, skanedicinin uzunluğunun artırılması ilə skanedicinin yerdəyişmə diapazonun artması rezonans tezliyinin kvadratik azalmasına gətirib çıxarır. Aydınır ki, skanediciyə bərkidilməsi nümunənin kütləsi skanedicinin kütləsi ilə müqayisədə çox kiçikdir, əks halda bu rezonans tezliyinin azalması zamanı müşahidə olunacaq.

Skanedicinin rezonans tezliyini həmçinin, təcrübədə də ölçmək olar. Buna görə də mürəkkəb konfigurasiyalı skanedicilər halında, riyazi hesablamaların kifayət qədər mürəkkəb məsələ kimi özünü göstərdiyinə görə də təcrübədən alınmış nəticələr, skanedicinin verilənləri kimi istifadə edilir.

SZM zondları

Həndəsi ölçüləri ilə fərqlənən SZM-in çoxlu müxtəlif formaları mövcuddur. Təcrübədə uyğun zondun işlədilməsi nümunə səthinin maraqlı xüsusiyyətlərini nəzərə almaqla təsviri üçün zəruridir.

AQM zondların formalarından biri kvadrat əsaslı olub tərəflərinin uzunluğu təqribən 5mm olan silisium nitriddən hazırlanmış zondlardır (şəkil 4-10). Zondla birlikdə kantileverlərin itilənməsi çuxurunda Si (100) altlıqda yerləşdirməklə-litoqrafiya və itiləmə ilə davam etdirilərək Si_3N_4 -nin tozlanması ilə alınır. Tərəflərin nisbəti (hündürlüyün oturacağı) itiləmə çuxurunun həndəsi ölçüləri ilə təyin olunur və təqribən 1:1 kimidir və ucunun radiusu 20-50 nm-dir.

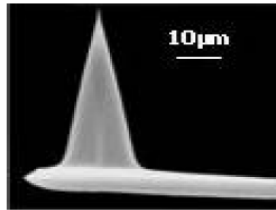


Şəkil 4-10. İşıq şüalandıran elektron mikroskopunda piramida formalı AQM zondun şəkli.

Konusvarı AQM zondlarının silisiumdan hazırlamaq (şəkil 4-11) üçün kifayət qədər mürəkkəb texnoloji proses tətbiq edilir. Bu prosesə fotolitoqrafiya, ion implantasiya, kimyəvi və plazma itilənməsi daxildir.

Mümkün hazırlanma texnologiyalarından birinin əsas mərhələləri şəkil 4-12 verilmişdir [6]. Zond çeviricilərinin hazırlanması zamanı (kantileverin ucunda yerləşən zond) plastik kristal oriyentasiyalı silisiumdan istifadə olunur (Si 110). Lövhənin səthində nazik fotorezistor təbəqə yerləşdirilir (şəkil 4-12, 2-ci mərhələ). Bundan sonra fotorezistor fotoşablon vasitəsilə ekspansiya edilir və fotorezistorun bir hissəsi kimyəvi itiləmə vasitəsi ilə kənarlaşdırılır. Sonra Bor ionlarının implantasiyası aparılır, fotorezistorla qoruyucusu olmayan silisium sahəsində ionlar 10 mkm dərinliyə daxil olurlar (3-cü mərhələ). Bundan sonra fotorezistor xüsusi kimyəvi yolla yuyulur, termik bişirmə həyata keçirilir, nəticədə Bor atomları silisium kristallik qəfəsdə yerləşdirilmiş olur. Silisium Bor qarışığı bir təbəqə əmələ

gətirir, yuyulma prosesini selektiv kimyəvi hazırlanma üçün dayandırılır. Lövhənin əks tərəfində fotolitoqrafiya yenidən aparılır, nəticədə dəqiq Bor implantasiya edilmiş oblastın üzərində fotorezistor təbəqəsi formalaşır. Bundan sonra lövhə Si_3N_4 (mərhlə 4) nazik təbəqə ilə örtülür. Fotorezistorun selektiv kimyəvi prosesi aparılır, həll olunma prosesində fotorezistor şişir və bilavasitə onun üzərində yerləşən Si_3N_4 nazik təbəqəsini kəsir (mərhlə 5). Silisium lövhəsi görünən bir tərəfdən o bir tərəfə selektiv kimyəvi yuyucunun köməyi ilə yuyulur. Bu silisium ilə qarşılıqlı təsirdə olub, silisium qatışıqı və Si_3N_4 (mərhlə 6) təbəqəsi ilə qarşılıqlı təsirdə olmur. Bundan sonra Si_3N_4 yuyulur, əks tərəfində lehirlənmiş qarışıq sahədə lövhəni fotolitoqrafiya üsulu ilə fotorezistdən təpə forma yaradılır (7, 8 mərhlə). Bundan sonra silisiumun kimyəvi yuyulması nəticəsində fotorezist təpələri altında kremniya sütunları alınır (9 mərhlə). Plazma itilənməsi vasitəsilə silisium sütunlarından iynə alınır (10, 11 mərhlə).



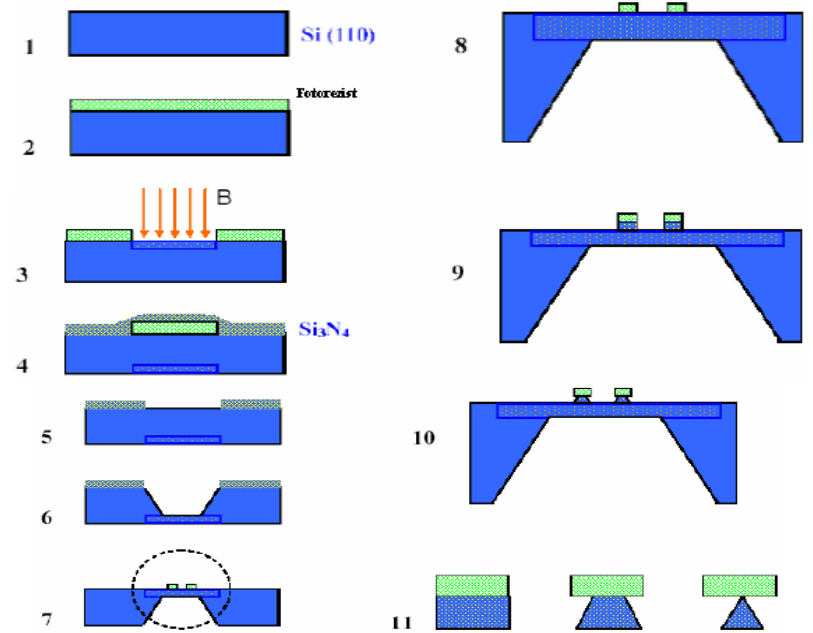
Şəkil 4-11. Işıq şüalandıran elektron mikroskopunda konusvari AQM zond.

Plazma itilənməsi nəticəsində oturacağıın radiusu 3-6 mkm, hündürlüyü 10-30 mkm olan konus formalı zond alınır (tərəflərin nisbəti 3 - 5 : 1), zondun ucunun radiusu 10-20 nm dir.

Bir silisium lövhəsində texnoloji əməliyyatın nəticəsində zond çeviricilərinin bütöv yığılı hazırlanmış olur. Elektrik ölçmələrin aparılması üçün zondun səthinə müxtəlif keçirici materiallardan olan örtüklər çəkilir (Au, Pt, W, Kr, Mo, Ti, W_2C və başqa). AQM maqnit zondlarının səthinə ferromaqnit Co, Fe, CoCr, FeCr, CoPt və başqa materiallardan nazik təbəqə

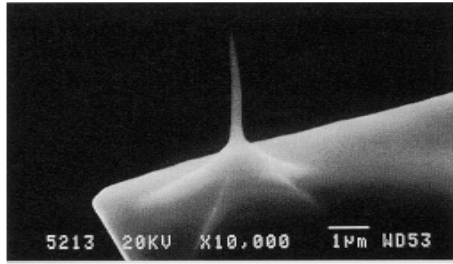
ilə örtük çəkilir.

Xüsusi ensiz dərinlik və ya yarıq üçün ölçmələr aparmaq üçün visker (Whisker type) və ya supertipli xüsusi şəkilli zondlar istifadə olunur. Bu zondlar çox nazik uca malik olur və tərəflərinin nisbəti çox böyükdür. Bu da daha ensiz dərinliklərə daxil olmağa imkan verir. Məlumdur ki, standart zondlar çox dərinlikdə dibi və şaquli kənar divarları ölçməyə imkan vermir. Bu cür zondların ölçüləri belədir: uzunluğu 1,5-2mkm tərəflərin nisbəti 10 : 1 dən böyük və ucunun radiusu 10nm-dir.



Şəkil 4-12. Silisium AQM zondlarının hazırlanmasının əsas mərhələləri.

STM üçün zondlar nazik volfram naqildən hazırlanır. Tərəflərinin nisbəti böyük olan, daha iti uclu zondların hazırlanması üçün bu naqillər elektrokimyəvi itiləmə prosesindən istifadə olunmaqla hazırlanır. Tərəflərin nisbəti adətən 5:1 ucunun radiusu 10nm tərtibində olur.



Şəkil 4-13. İşıq şüalandıran elektron mikroskopunda AQM uzun nazik super zond.

Atom ölçüləri tərtibində şəkillərin alınması üçün müstəvi səthin kiçik hissəsində skan edilir. Buna görə zondun ümumi hündəsi forması bunun tətbiqi üçün kritik deyildir. İstifadə olunan STM zondların hazırlanması metodikası adı kəsici qayçıının köməyi ilə naqilin kəsilməsidir. Kəsilmə 45^0 bucaq altında aralığa daxil edilməsi ilə eyni zamanda aparılır. Kəsilmə zamanı kəsilmə yerdə, dartılma qüvvələrin təsiri nəticəsində naqilin plastik deformasiyası baş verir. Nəticədə kəsilmə yerində uc hissədə hamar olmayan çoxlu çıxıntılar və s. formalar yaranmış olur. Bu STM zondun işçi elementi olaraq tunelləşmə prosesində istifadə olunacaqdır (şəkil 4-14).

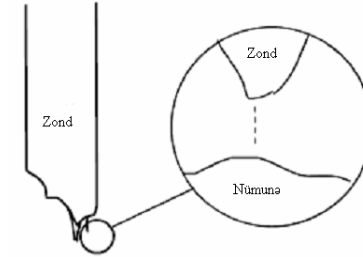
SZM şəkillərində zondla əlaqəli təhriflərin yaranması la-büddür. Zond və nümunə səthi arasında qarşılıqlı təsir şəkil 4-15-də göstərilmişdir.

Bəzən zondun hündəsi formasının bilinməsi alınmış şəkillərin interpretasiyası zamanı belə təsiri azaltmağa imkan verir, həmçinin tədqiq olunan nümunənin xüsusiyyətlərinin aşkarlanması üçün ən münasib zond işlədilir.

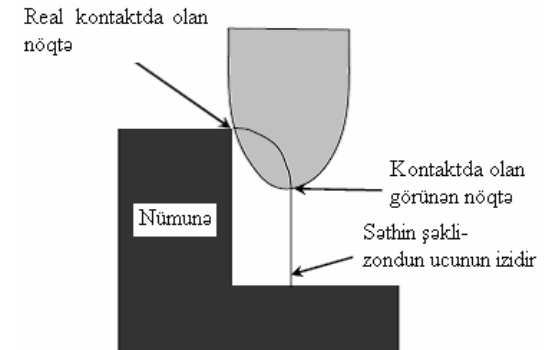
b) Pilləli/çuxur tipli xüsusiyyətlərin təhrifləri

Təsvirlərin alınması zamanı zondun kəskin hündəsi xüsusiyyətlərinin olması çox vacibdir. Böyük radiuslu zond o zaman səthin xüsusiyyətləri ilə qarşılıqlı təsire başlayır ki, zondun mərkəzi oxu səthin xüsusiyyətlərinə çatmış olsun. Bunun şəkil 4-16 təsvir olunmuş pillələrin şəkilləri üzərində görmək olar.

Zond səthin xüsusiyyətləri ilə qarşılıqlı təsire başladıqdan sonra, kənarları iti olmayan dairəvi forma çəkir.

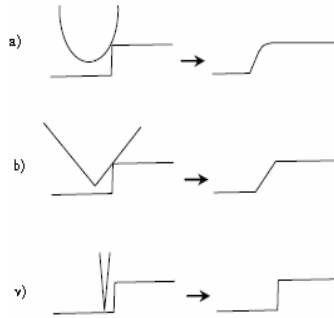


Şəkil 4-14. Mexaniki kəsilmə naqilin sonunda mikroskopik formalar STM atom səviyyəsində şəkillərinin alınması üçün effektivdir. Nümunə səthinə yaxın yerlərdəki elektronlar tunelləşmədə iştirak edirlər.



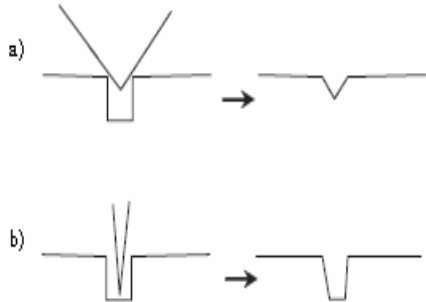
Şəkil 4-15. SZM zondunun nümunə ilə kontaktda olan nöqtələri zondun hündəsi formasından və nümunə səthinin hündəsi xüsusiyyətlərinin təsvirindən asılı olur.

Əgər piramida formalı zond istifadə olunursa, zondun bucağına bərabər pillə alınacaq. Beləliklə, belə xüsusiyyətlərin təsvirləri üçün zondun tərəflərinin nisbəti kritik olmalıdır. Tərəflərin nisbəti böyük olan zond ən kiçik təhriflər edəcəkdir.



Şəkil 4-16. Pillələrin təsvirləri zamanı zondun həndəsi forması kritik olmalıdır. Dairəvi formalı zondların yaratdıqları təsvirlər dairəvi forma kimi alınır (a). Tərəflərin nisbəti kiçik olan zond meyilli pillə yaradır (b). Nümunə səthinin daha aydın şəkillərin alınması üçün tərəflərin nisbəti böyük olan zondlar tələb olunur (v).

Nümunə səthindəki çuxurlar kimi dərinliklərindəki xüsusiyyətlərin təsvirlərin aşkarlanması zamanı, bu daha vacib tələbdir. Tərəflərin nisbəti kiçik olan zondlar bu xüsusiyyətləri tam təsvir edə bilməyəcəkdir, bu şəkil 4-17-də göstərilmişdir.

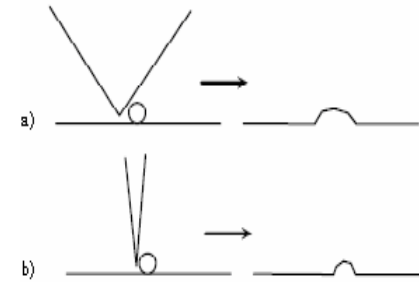


Şəkil 4-17. Tərəflərin nisbəti kiçik olan zondlar çuxurların dibinə çata bilmir (a). Bu xüsusiyyət yalnız uzun və nazik zondlar vasitəsi ilə təsvir oluna bilər (b).

b) Qabarıq tipli xüsusiyyətlərin təhrifləri

Müstəvi səthlərin kiçik qabarıq təsvirləri zamanı (məsələn kvant nöqtələr) iti uclu zondların şəkillərin eninə alınmasına

ciddi təsir edir. Şəkil 4-18 göstəriləyi kimi böyük radiuslu zondun mərkəzi oxu səthə toxunduqdan sonra belə xüsusiyyətlərlə qarşılıqlı təsir əmələ gəlməyə başlayır. Alınmış şəkillər real nümunə səthindən fərqli olaraq kifayət qədər enli alınacaqdır. Bu zaman hündürlüyün ölçülməsi zondun həndəsi formasından asılı olmayaraq düz olacaq. Bu tip dərin və ya kəskin xüsusiyyətləri olan nümunələr üçün şəkillərinin alınmasında istifadə olunan zondlar iti uclu olmalıdır, uzun olması isə vacib deyil.



Şəkil 4-18. Səth üzərindəki çox kiçik detalların şəkillərinin çəkilməsi zamanı real nümunədən fərqli küt zondlar daha enli təsvirlərin alınmasına gətirib çıxarır (a). İti uclu zondlardan istifadə etdikdə şəkillərin eni ilə real detalların eni daha uyğun gəlir (b). Hər iki halda hündürlüyün xüsusiyyətləri dəqiq alınır.

v) Zondun çirklənməsi

Əgər SZM zondun ucu çirklənibdirsə, alınmış şəkillər təhrif olacaqdır. Bəzi hallarda çirklənmə skanetməni yaxşılaşdıra bilər. Məsələn, STM vasitəsi ilə atom səviyyəsində ayırd-ətmə ilə qrafitin təsvirləri zamanı zond səthdən qrafiti seçə bilər. Bu halda elektronların tunelləşməsi qrafitin atomları (karbon) ilə zond arasında və nümunə səthində baş verir.

q) Zondun korlanması

Bəzən bərk nümunələrin şəkillərinin alınması prosesində və ya zondla ehtiyatlı davranmadıqda zondun ucu iki hissəyə

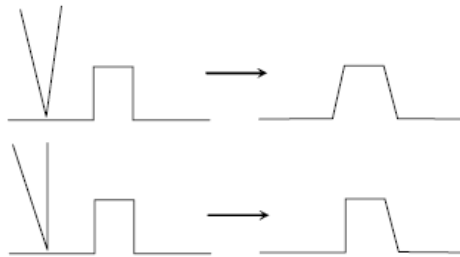
ayrıla bilər (Şəkil 4-19). Belə zondla nümunə səthinin şəkli çəkilən zaman, hər bir səth xüsusiyyətinin təsvirinin iki dəfə alınması müşahidə olunur.



Şəkil 4-19. Zondun ucunun iki yerə ayrılması ilə nümunə səthində xüsusiyyətlərin təsvirləri iki dəfə alınır, yeni şəkillərin alınmasında zondun hər iki ucu növbələşərək iştirak edir.

d) Zond və nümunə arasındakı bucaq

Əgər zond nümunə səthində 90^0 -dən fərqli bucaq altında yerləşərsə, alınmış şəkillərdə təhriflər olacaqdır. Hər tərəfi eyni bucağa malik xüsusiyyətlərin təsvirləri zamanı, bir tərəfi o biri tərəfdən daha fərqli görünəcəkdir.



Şəkil 4-20. Zond və nümunə arasında bucağa görə şəkildə əmələ gələn təhriflər.

e) SZM-də səthin şəkillərinə görə səthin formasının bərpası üsulları

Bütün hallarda zondun işçi hissəsinin ölçülərinin xarakte-

rindən asılı olaraq qeyri hamar səthlərin skan edilməsi zamanı SZM şəkillərində təhriflər müşahidə olunur. Faktiki olaraq SZM-də şəkillərin alınması tədqiq olunan nümunə səthi və zond təsirinin formalaşmasıdır.

Xüsusi halda bu problemin həlli üçün konkret zond [17, 18] formalarını nəzərə almaqla SZM şəkillərinin bərpa olunması, SZM nəticələrinin kompüter vasitəsi ilə işlənməsinə əsaslanan müasir üsullardan istifadə edilir. Səthin bərpa olunmasının ən effektiv üsulu, ədədi dekonvolyasiya üsulu olub, test quruluşlarının (səthin relyefi yaxşı məlum olan) skan edilməsi zamanı nəticədə alınan zond formalarının istifadə olunmasına əsaslanır.

Zondların işçi hissələrinin nizamlanması və formalarının təyin olunması üçün səthin relyefinin parametrlərinin məlum xüsusi testlərdən istifadə olunur. Ən çox yayılmış test strukturlarının növləri və atom-qüvvə mikroskopu vasitəsilə alınmış şəkillərin xarakteristikaları şəkil 4-21 və 4-22-də göstərilmişdir. İti uclu nizamlayıcı qəfəs növləri (AQM-da çevrilmiş massiv) zondun ucunu yaxşı təsvir etməyə imkan verir, eyni zamanda düzbucaqlı qəfəs səthin kənarından formasını bərpa etməyə kömək edir. Qəfəslərin skanedilməsi ilə verilənlərinin nəticələrini birləşdirərək zondların işçi hissələrinin formasını tamamilə bərpa etmək olar.

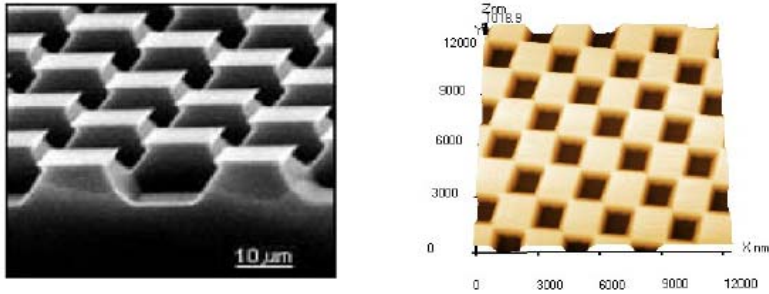
j) NanoEducator cihazı üçün zondların hazırlanması qurğusu

NanoEducator skanedici zond mikroskopunda AQM və STM üçün volfram naqilindən hazırlanmış bir ucu itilənmiş universal zondlar istifadə edilir.

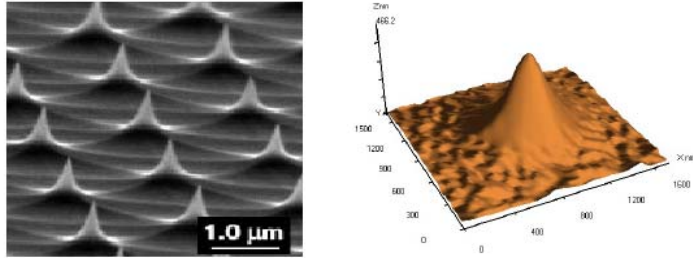
Elektrokimyəvi itilənmə üsulu ilə SZM zondlarının yenilərinin və ucu küt olanlarının bərpası üçün istifadə olunan iynələrin hazırlanması qurğusu (İHQ) şəkil 4-23-də göstərilmişdir.

İHQ-də metal həlqə qələvi məhlula salınır və həlqədə qələvi məhluldan pərdə əmələ gəlir. Volfram naqilin ucu bu həlqəyə daxil edilir və bura elektrik cərəyanı tətbiq edilir. Bu zaman naqilin elektrokimyəvi itilənməsi prosesi baş verir və metal

atomları məhlula keçir.



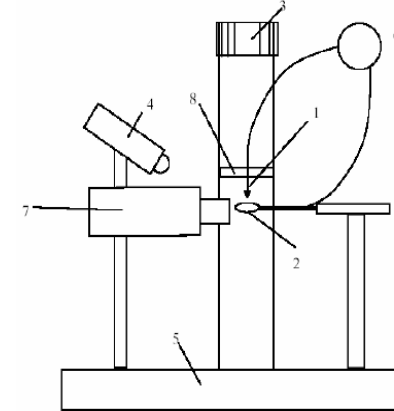
Şəkil 4-21. TGX1 düzbucaqlı nizamlanmış (dərəcələnmə) qəfəsin elektron mikroskopunda (solda) və AQM NanoEducator cihazında (sağda) alınmış şəkilləri.



Şəkil 4-22. TGX1 nizamlanmış (dərəcələnmə) qəfəsinin iti uclu massiv şəklində elektron mikroskopunda (solda) və AQM NanoEducator cihazında (sağda) alınmış şəkilləri.

Şəkil 4-23-də göstərilmiş İHQ aşağıdakı kimi işləyir: Saxlayıcıya (8) bərkidilmiş volfram naqıl parçası (1) vint (3) vasitəsilə ilə yuxarıya və aşağıya yeri dəyişdirilir. Vinti fırlatmaqla naqıl lazımı səviyyədə həlqəyə (2) salınır. Həlqə naqıl nixrom naqılindən hazırlanır və itilənmə prosesində iştirak etmir. Əvvəlcədən həlqə (2) 5%-li KON və ya NaOH məhlula salınaraq həlqədə (2) köpük yaranmış olur. Bundan sonra V hərfi ilə işarə olunmuş dəyişən və ya sabit elektrik cərəyan mənbəyi işə salınır. Volfram naqılın itilənməsi prosesi baş verir və iti uclu iynə hazırlanır. İtilənmə prosesini operator optik mikroskopda (7) müşahidə edir. İşıqlanma işıqlandırıcıda (4)

olan işıq diodları tərəfindən təmin edilir. Bütün konstruksiyaların elementləri dayağa bərkidilmiş vəziyyətdə olur. İynənin (1) itilənməsindən sonra saxlayıcı (8) ilə birlikdə yuxarı qaldırılır və çıxarılır. İynənin hazırlanmasının texniki xarakteristikası cədvəl 4-1-də verilmişdir.



Şəkil 4-23. SZM üçün iynələrin hazırlanması qurğunun konstruksiyası.

Cədvəl 4-1. İHQ-in texniki xarakteristikası

S/N	ADI	Ölçüləri
1	İynənin ucunun əyrilik radiusu	0,2 mkm
2	İynələrin hazırlanma materialları: volfram naqıl	diametri 0,1 mm
3	Şaquli istiqamətdə yerdəyişmə diapazonu	25 mm
4	Gərginlik mənbəyi	6-9 V / 0,5 A dəyişən cərəyan
5	Optik mikroskopun böyütməsi	x20
6	İynələrin hazırlanmasına tələb olunan vaxt	2 dəqiqə

z) Kütləşmiş zondların bərpası üsulu

Əgər zond kütləşibsə onu aşağıdakı alqoritmə uyğun olaraq itilənmək lazımdır:

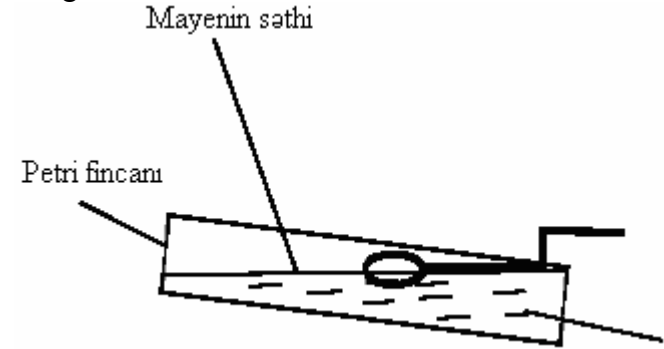
1. İHQ komplektə daxil olan adapterə qoşmalı, adapteri isə 220V elektrik şəbəkəsinə qoşmalı.
2. İtiləmənin sönmüş rejimdə olmasını dəqiqləşdirilməli (qırmızı lampa yanmır).
3. Həlqəni (2) saxlayıcıdan (8) İHQ tərəf döndərilir.
4. Zond çeviricini saxlayıcıya 8 qoymaq.
5. Zond çeviricisi qoyulmuş saxlayıcıni elə vəziyyətə gətirilməlidir ki, zond (1) şaquli vəziyyətdə olsun.
6. Zond çeviricisi qoyulmuş saxlayıcı 8 vintlə (3) yuxarı elə vəziyyətə gətirilir ki, zondun sonu (1) həlqədən (2) yuxarıda olsun.
7. Həlqə elə döndərilir ki, o zondun (1) altında yerləşsin.
8. Optik mikroskopun vəziyyəti elə nizamlanır ki, həlqə (2) mikroskopun fokusunda görünsün (şəkil 4-24).



Şəkil 4-24. Optik mikroskopda alınmış İHQ həlqə və zondun ucu.

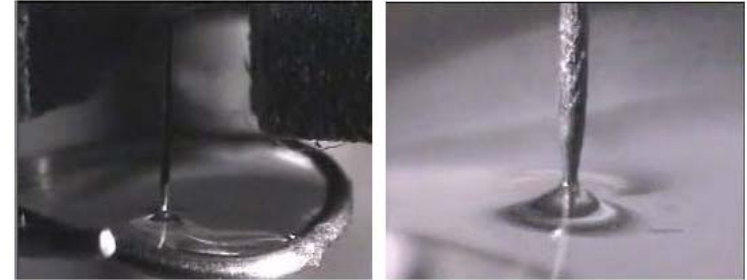
9. Həlqə (2) əvvəlki vəziyyətə gətirilir və şəkil 4-25-də göstəriləyi kimi Petri fincanındakı 5%-li KON məhluluna salınır. Bunun üçün məhlul mayesinin səthini həlqəyə toxundurmalı və fincanı aşağı salmalı. Həlqədə məhlul damcısı

əmələ gələcəkdir.



Şəkil 4-25. Həlqədə qələvi məhlul damcısının əmələ gəlməsi.

10. Yenidən həlqəni döndərərək zondun (1) altında yerləşdirərək zond iynəsini aşağıya endirməli (şəkil 4-26). Bunun üçün vintini (3) o vaxta qədər fırlatmalı ki, iynənin ucu qələvi məhlulun səthinə toxunsun. Optik mikroskopda iynə ilə qabarma müşahidə olunacaqdır (şəkil 4-26).



Şəkil 4-26. İynənin ucu maye səthinə toxunarkən yaranmış qabarma.

11. Əmələ gələn qabarmanı saxlamaq şərti ilə iynəni ehtiyatla elə qaldırmalı ki, ucu əsas mayenin səthindən yuxarıda olsun (və bu zaman qabarma qalsın). Bu onun üçün zəruridir ki, itiləmə prosesində hazırlanan zondun ucu qabarmaya toxunmuş olsun.
12. İynələrin itilənmə prosesi. Bu zaman lampa işıqlanacaq və

maye “qaynamağa” başlayacaq (şəkil 4-27). Qabarmaya toxunan iynənin ucunu itilədikdən sonra, qələvi məhlulun səthi zondla elektrik kontaktını itirir və “qaynama” prosesi sona yetir (şəkil 4-27).



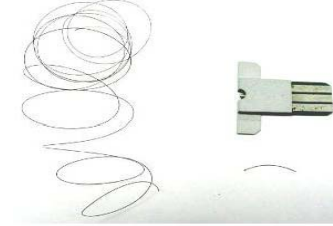
Şəkil 4-27. Qələvi məhlulun səthi ilə zond (solda) arasında elektrik cərəyanı keçən zamanı “qaynama” prosesi. Zond iynəsinin hazırlanmasından sonra “qaynama” prosesinin sönməsi momenti (sağda).

13. İHQ söndürməli.
14. Zond yerləşdirilmiş saxlayıcı(8) vintlə(3) yuxarıya qaldırılmalı.
15. Saxlayıcıdan zonu çıxarmalı.
16. Zondun iynəsinə su ilə yuyaraq və onu qurutmalı.
17. SZM də işləmək qaydalarına uyğun olaraq zonu saxlayıcı hissəyə qoyub rezonans pikinin olmasını yoxlamalı. Əgər pik kifayət qədər amplituda malik deyilsə, zonu təkrarən qurutmalı, yəni nəmliyin qalması piezoelektrik elektrodları elektrik şuntlamaya səbəb olur.
18. Əgər iynələrin hazırlanması aparılmırsa, onda qələvi məhlul olan həlqəni çıxarıb su ilə yuyun.
19. İHQ elektrik şəbəkəsindən ayırmalı.

I) Yeni zondun hazırlanması üsulu

1. Yeni zondun hazırlanması üçün universal qarşılıqlı təsir çeviricisi götürülür. Köhnə iynəni pyezoborudan pinset vasitəsilə fırladaraq çıxarılır. Əgər lazımdırsa pyezoborunun so-

- nunu təmizləmək.
2. Volfram naqıl dolaqdan uzunluğu 10-15mm hissə kəsmə-li (şəkil 4-28).



Şəkil 4-28. Yeni zondun hazırlanmasına hazırlıq.

3. Pinsetlə iynənin sonunu şəkil 4-29 göstərilədiyi kimi pyezoboruya daxil etməli. Hazırlanmış iynənin əyilmiş sonunun ölçüsü pyezoborunun diametrindən çox az böyük olmalıdır.



Şəkil 4-29. Yeni zond üçün hazırlanmış iynənin əyilmiş hissəsi.

4. Pyezoboruya iynənin əyilmiş sonunu ehtiyatla qoymalı (şəkil 4-30). O pyezoboruda volfram naqılın elastikliyinə görə möhkəm yerləşəcəkdir.



Şəkil 4-30. Pyezoboruya qoyulmuş iynə.

5. Göndərilən komplektə daxil olan adapterə İHQ qoşmalı, adapteri 220V elektrik şəbəkəsinə qoşmalı.
6. İtilmə rejiminin sönməsini dəqiqləşdirmək (qırmızı işıq yandırmaq).
7. Həlqəni (2) saxlayıcıdan (8) İHQ-yə döndərmək (şəkil 4-23).

8. Yeni zond hazırlamaq üçün çeviricini iynə ilə birlikdə saxlayıcıya (8) qoymalı.
9. Saxlayıcıyı çevirici ilə birlikdə elə vəziyyətə gətirmək lazımdır ki, iynə (1) şaquli vəziyyətdə olsun.
10. Saxlayıcıyı çevirici ilə birlikdə vinti (3) yuxarıya qaldıraraq elə vəziyyətə gətirilir ki, iynənin sonu (1) həlqədən (2) yuxarıda olsun.
11. Həlqəni (2) elə döndərin ki, o iynənin altında olsun.
12. Optik mikroskopun vəziyyəti dəqiqləşdirilərək elə vəziyyətə gətirilir ki, həlqə (2) mikroskopunun fokusunda olsun (şəkil 4-24).
13. Həlqəni (2) döndərərək əvvəlki vəziyyətə gətirməli və içərisində 5%-li KON məhlul olan Petri fincanına salaraq köpüyü almalı (şəkil 4-25). Bunun üçün məhlulun səthini həlqəyə toxundurmaq və fincanı aşağı salmaq lazımdır. Bu zaman həlqədə məhlulun köpüyü yaranacaqdır.
14. Yenidən həlqəni naqilin (1) altına gətirmək və naqili damcı köpüyünə endirmək. Bu zaman iynə qələvi məhlulə tamamilə daxil olmalıdır.
15. Köpük və zond çeviricisi arasında təqribən 2-3 mm məsafə saxlamaq. Yeni hazırlanacaq iynənin uzunluğu 5-7 mm olacaqdır.
16. İtilmə prosesinə başlamaq. Bu zaman lampa işıqlanacaq və maye məhlul “qaynamağa” başlayacaq (şəkil 4-27).
17. Optik mikroskopda itiləmə prosesini müşahidə edərək periodik olaraq itiləmə bağlayıcısını yandıraraq söndürməli. Bu zaman volfram naqilin köpük daxilində itilənməsini müşahidə olunur.

İtilənmənin ölçüsünə görə, itilənən hissə nazikləşir, naqil kəsilərək aşağı hissəsi dayağa düşür və avtomatik olaraq elektrik dövrəsi və iynənin hazırlanması (itilənməsi) prosesi dayandırılır.

DIQQƏT! İynənin hazırlanmasını diqqətlə izləyin və aşağı hissənin 1 kəsilib düşdükdən sonra cərəyanı dərhal söndürün.

18. Zond qoyulmuş saxlayıcıyı 8 vintlə 3 yuxarıya qaldırmaq.
19. Saxlayıcıdan zonu çıxarmaq.
20. Zondun ucunu su ilə yumaq və qurutmaq.
21. Zonu saxlayıcı hissəyə qoyub SZM-lə iş qaydalarına əsasən rezonans pikin yaranmasını yoxlamalı. Əgər pik kifayət qədər amplituda malik deyilsə, zonu təkrar qurutmalı. Zondda qalmış nəmlik pyezoelementin elektrodlarını elektrik şuntlaya bilər.
22. İtilmə aparılması lazım deyilsə, məhlullu həlqəni çıxarıb və onu su ilə yumalı.
23. İHQ-ni elektrik şəbəkəsindən ayırmaq.

4.3. Metodik göstərişlər

NanoEducator skanedici zond mikroskopunda işləməyə başlamazdan əvvəl cihazın istifadəçilərə rəhbərlik sənədini öyrənmək zəruridir.

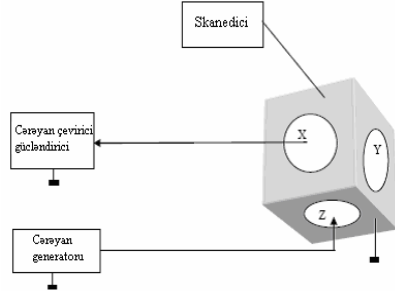
4.4. Tapşırıq

I hissə

1. Skanedicinin rezonans tezliyinin ölçülməsi.

- 1.1. **NanoEducator** proqramını bağlayın və elektron bloku söndürün.
- 1.2. Əgər zond yuvadadırsa, zond çeviricini ölçən başlığı yuvasından çıxarmalı. Altlıqda nümunə varsa onu çıxarmalı.
- 1.3. İdarəetmə blokundan ölçən başlığa verilən skanedicinin idarə olunması gərginlik kabeli başlıqdan ayırmaq.
- 1.4. Onun yerinə ölçən başlığa xüsusi birləşdirici kabeli birləşdirin. Birləşdirici kabelin ikinci sonunu qarşılıqlı təsir çeviricinin yuvasına birləşdirməli. Bu kabel generatordan verilən gərginliklə skanedicinin amplitud-tezlik xarakteristikasını (ATX) təyin etmək üçün istifadə edilir. Eyni ilə bu zondun ATX-sini ölçmək üçün istifadə olunur. Skanedicinin ATX-nin ölçmə sxemi şəkil 4-31-də göstərilmişdir. Skanedicinin Z pyezoelementinə generatordan gərginlik verilir. Mexaniki

rəqslər skanedicinin X pyzeolementi oxu istiqamətində elektrik yüklərinin yaranmasına səbəb olur. Bu signal gücləndirilir və ölçmə sxeminə daxil olur.



Şəkil 4-31. Skanedicinin amplitud-tezlik xarakteristikasının ölçmə sxemi.

- 1.5. Elektron blokunu elektrik şəbəkəsinə birləşdirməli və cihazı idarə edən **NanoEducator** proqramını işə salmalı. Skanedici qüvvə mikroskopu (SQM) rejimini seçməli.
- 1.6. Alətlər panelindəki **Adjust** düyməsini, sonra isə **Resonance** düyməsini sıxmaq. Daha sonra **Manual** rejiminə daxil olub **RUN** düyməsini sıxmalı. Nəticədə qarşılıqlı təsir qüvvəsinin çeviricisində olduğu kimi, skanedicidə yaranan rəqslərin amplitud-tezlik xarakteristikası ölçüləcəkdir.
- 1.7. Skanediciyə uyğun alınmış ATX-ə görə rezonans piki təyin edilir. Generatorun həyəcanlanma gərginliyinin qiymətini dəyişməklə, rezonans pikinin hündürlüyü dəyişmək olur. Əgər bu baş vermirsə, başqa tezlik intervalında skanedicinin rəqsinin rezonansına uyğun pikin axtarışına cəhd edin. Razılaşmaya görə rəqs amplitudunun dəyişməsi 3-dən 17 Khs (**Frequency range** 10 vəziyyətinə keçirmək) tezlik intervalında baş verir. **Frequency range** 2 və 50 qiymətlərində rəqs amplitudunun tezlikdən asılı qrafikinə qurulması. Skanedicinin rəqslərinin rezonans pikinin alınmış ATX nəticələrini saxlamalı.

- 1.8. Yük olan skanedicinin rezonans tezliyinin ölçülməsini təkrar edin. Kütlənin artması nəticəsində skanedicinin rəqs sisteminin rezonans piki başqa tezlik intervalına yerini dəyişəcək, bu zaman maksimumun forması dəyişməyəcək. Skanedicinin rəqslərinin rezonans pikinin olduğu tezlik intervalındakı ATX nəticələrini saxlayın. Alınmış nəticələri müqayisə edin.
- 1.9. **NanoEducator** proqramını bağlamaq və **Elektron bloku** söndürmək.
- 1.10. Qarşılıqlı təsir zond çeviricisini yuvasından və ölçmə başlıqdan kabeli ayırın. Onun yerinə elektron blokdan skanediciyə verilən cərəyan kabelini birləşdirin.
2. TGX1 test qəfəsinə görə skanedicinin qeyri-xətilliyinin təyini
 - 2.1. TGX1 test qəfəsi nümunəsini altlığa qoymaq.
 - 2.2. Zond çeviricisini ölçən başlığın yuvasına qoymaq.
 - 2.3. **NanoEducator** cihazın idarəedici proqramını işlətmək. Skanedici qüvvə mikroskopu (SQM) iş rejimini seçməli.
 - 2.4. Zond çeviricisinin amplitud-tezlik xarakteristikasının təyini və iş rejiminin qurulması.
 - 2.5. Əl ilə vintin köməyiylə zondun nümunəyə 1 mm məsafəyə qədər yaxınlaşmasını həyata keçirməli.
 - 2.6. Qarşılıqlı təsirin alınmasını aşağıdakı qiymətlərdə aparmalı
 - **Amplitude Suppression** = 0,3;
 - **Feed Back Loop Gain** = 3.
 - 2.7. Skanetmə pəncərəsini açmaq. Tədqiq olunan nümunə haqqında əvvəlcədən verilmiş məlumatlar əsasında skanetmənin zəruri parameterlərini daxil etməli.
 - 2.8. Nümunə səthinin SZM şəkillərinin alınması. Alınmış nəticələrin saxlanması.
 - 2.9. Topoqrafiya ölçmələrini təkrar etməli. Bunun üçün seçilmiş sahəni başqa mümkün (**Area**) sahə ilə əvəz edərək skanetməni təkrar etməli. Başqa oblasta keçərkən və ya skanetmə oblastının ölçülərini dəyişərkən skanedici pye-

- zokeramikanın sürüşməsi ilə əlaqəli şəkildə xarakteristik əyilmə müşahidə olunacaqdır. Bu zaman 2 dəqiqə gözləmək lazımdır ki, skanetmənin nəticələrində təhriflər minimal olsun. Bundan sora skanetməni yenidən başlamalı. Alınmış şəkilləri saxlamalı.
- 2.10. Alınmış şəkillərin nizamlanması dəqiqliyini x, y və z oxlarına görə skanetmənin dəqiqliyini, period və hündür-lük elementlərinin test qəfəsinin nominal qiymətlərinə görə qiymətləndirilməli.
- 2.11. Alınmış şəkillər üçün skanedicinin qeyri-xətliliyini təyini etməli. Bu X və Y oxları üzrə xətlərdə birinci və sonuncu periodda ölçmələrə görə difraksiya qəfəsinin periodunun faizlə meyl etməsi əsaslanır.
- 2.12. Alınmış şəkillərdə qəfəsin bucaqlarının meyletməsinin kvadratlarının 90° -yə nəzərən qiymətləndirməli.
3. Termodyefin tədqiqi
- 3.1. Əks əlaqədən çıxmadan 1mkm^2 böyük olmayan sahə üçün üfüqi hissədə SZM şəkillərin çəkilməsi.
- 3.2. Alınmış şəkili saxlamalı və alınma vaxtını qeyd etməli. Şəkil üzərində xarakteristik məxsusiyyətləri qeyd etmək lazımdır ki, yerdəyişməyə əsasən təkrar skanetmədə termodyefi təyin etmək mümkün olsun.
- 3.3. Skanetmənin parametrlərini dəyişməyərək skanetməni bir neçə dəqiqə təkrar etməli, alınmış şəkilləri saxlamalı və vaxtı qeyd etməli.
- 3.4. Təkrar skanetmədə qeyd olunmuş xarakteristik xüsusiyyətləri tapın. Müxtəlif vaxt aralığında alınmış nəticələrdə nümunədə eyni yerin koordinatlarını müqayisə edərək X və Y oxları üzrə zond və nümunə qarşılıqlı termodyefin sürətini təyin edin (nm/s).
- 3.5. Təcrübə aparılan vaxt ərzində temperatur dəyişməsi zamanı termodyefin mümkün qiymətini qiymətləndirin. Hesablanmış nəticələri eksperimental nəticələrlə müqayisə edin.

II Hissə

4. TGT1 test qəfəsinə görə zond formasının təyini.
- 4.1. Altılıqda tədqiq olunan -TGT1 test qəfəsi nümunəsini yerləşdirin.
- 4.2. **NanoEducator** cihazının ölçən başlığının yuvasına zond çeviricisini yerləşdirin. Yavaşca sıxan vintlə bərkidin.
- 4.3. **NanoEducator** cihazının idarəedicisi proqramını işə salın. Skanedici qüvvə mikroskopunun (SQM) iş rejimini seçin.
- 4.4. Zond çeviricisinin rezonansa uyğunluğunu yoxlayın. **Generator** tərəfindən verilən amplitudun qiymətini minimal götürməli (0 qədər ola bilər) və **50mV**-dan böyük olmamaq şərti ilə verilməsi məsləhət olunur. Zondun rəqslərinin cavab amplitudunun kiçik qiymətlərində (**<1V**) **AM Gain** əmsalını böyütmək məsləhətdir. Əgər qrafik üzərində bir neçə piklər varsa, əlavə piklərin amplitudlarını azaltmağa çalışın. Bunun üçün vint ilə çeviricinin sıxılma dərəcəsini seçmək.
- 4.5. Əl ilə gətirmə vintinin köməyi ilə zondun nümunə səthinə təqribən 1mm məsafəyə qədər yaxınlaşdırılmasını həyata keçirməli.
- 4.6. **Landing** menyusuna daxil olun. **Options** pəncərəsində **Integrator Delay** (izləmə sistemini qoşarkən skanedicinin qalxması üçün tələb olun vaxt) 1000 ms qədər böyütməli ki, yaxınlaşmanı ehtiyatlı aparmaq mümkün olsun. **Amplitud Suppression** qiymətini təqribən 0,2 götürün. Bu ehtiyatlılıq iynənin ucunda və ya əymədə qarşılıqlı təsirin alınması üçün edilir və bu zaman izləyən sistemin işi dayanıqlı olmaya da bilər.
- 4.7. **Run** düyməsini sıxıb yaxınlaşmanı aparın. Qarşılıqlı təsir alınandan sonar (**OK** düyməsi əmələ gəldikdə) qarşılıqlı təsirin qiymətini 0,1-ə qədər azaltmaq. Dəqiqləşdirmək lazımdır ki, Z azalmır.
- 4.8. Skanetmə pəncərəsini açın menyuya daxil olub **Scan** düyməsini sıxmalı. Skanetmənin zəruri parametrlərini

verin. TGT1 test nümunəsi üçün skanetmənin sürətini 1000 nm/s-dən böyük olmaqla verilməsi məsləhət görülür. Skanetmənin addımını isə zondun iynəsinin ucunun əyrilik radiusunun gözlənilən qiymətlərindən kiçik olması məqsəduyğundur (<100nm).

- 4.9. Nümunə səthinin topografiyasını almalı. Alınmış SZM şəkillərini saxlamalı.
- 4.10. Zondun nümunə səthindən uzaqlaşmasını əvvəlcə avtomatik **Rising** rejimində, sonra isə əl ilə təhlükəsiz məsafəyə gətirməli.
- 4.11. **NanoEductor** cihazının ölçmə başlığının yuvasından zond çeviricisini çıxarmalı.
5. Zondun elektrokimyəvi hazırlanması
Yuxarıda verilmiş üsula uyğun olaraq zondun elektrokimyəvi itilənməsi və ya yenisinin elektrokimyəvi hazırlanmasını həyata keçirin.
6. Zondun formalarının TGT1 test qəfəsinə görə təkrar təyini
- 6.1. İtiləmədən və ya yeni zond hazırladıqdan sonra TGT1 test qəfəsinə görə formaların təkrar təyini şəkil 4-27 kimi həyata keçirin.
- 6.2. Bir qrafikdə zondun (itiləmədən əvvəl və sonra) xətlərin profilini qurun. Alınmış nəticələri müqayisə edin.
- 6.3. Zondla 10, 100 və 300 nm pilləli hündürlükləri skanedərək onun ayırdetməsini zondun kontaktının real və zahiri görünən pilləli nöqtələri arasındakı məsafəyə görə qiymətləndirin (şəkil 4-15). Bu məsafə pilləli hündürlükdə zondun diametrinə mütənasibdir.

4.5. Yoxlama sualları

1. Düz və əks pyezoeffekt nədir? Kvars misalında pyezoelektrik effekt anlayışını və pyezoelektrik mühərrikinin iş prinsipini aydınlaşdırın.
2. Pyezokeramika tərəfindən mümkün olan artefaktları aydınlaşdırın: qeyri-xəttilik, histeresiz, sürüşmə, temperatur

dreyfi. Bunları hansı üsullarla azaltmaq olar?

3. Hansı növ skanedicilər tanıyırsınız? SZM şəkillərində skanedicilərin əmələ gətirdiyi təhriflərin adlarını deyin.
4. SZM-də istifadə olunan zondların əsas növləri və onların hazırlanması üsullarını sadalayın.
5. İdeal SZM zondunu təsvir edin. Səthlərin müxtəlif xüsusiyyətlərinin təsvirləri zamanı zondlar nə kimi təhriflər əmələ gətirir?
6. **NanoEducator** cihazı üçün SZM zondlarının hazırlanması qurğularını təsvir edin. Elektrokimyəvi itiləmə üsulu haqqında danışın.

Laboratoriya işi № 5

Skanedici zond litoqrafiyası

5.1. İşin məqsədi	117
5.2. İşin məzmunu	117
5.3. Metodik göstərişlər	130
5.4. Tapşırıq	130
5.5. Yoxlama sualları	134

5.1. İşin məqsədi

1. Zond nanotexnologiyasının fiziki əsaslarının öyrənilməsi.
2. Skanedici zond mikroskopunun köməyi ilə müxtəlif litoqrafiyaların yerinə yetirilməsinin öyrənilməsi.
3. Dinamik qüvvə litoqrafiyasının yerinə yetirilməsinin təcrübi vərdişlərinin alınması.

Ləvazimat: Skanedici zond mikroskopu(Model SZMU-L5), zond, NanoEducator proqramı və kompüter.

Tədqiqat üçün nümunə: Qoruyucu təbəqəsi çıxarılmış məlumat yazısı olmayan kompakt disk fragmenti.

İş iki hissədən ibarət olub və hər bir tələbə tərəfindən fərdi yerinə yetirilir. İşin zəruri təcrübə hissəsi bir dərsdə yerinə yetirilir və 4 saat davam edir.

İşə başlamazdan qabaq hər tələbə üçün zond seçmək zəruridir və cihazların birində test şəkili üçün litoqrafiyanı yerinə yetirmək lazımdır.

5.2. İşin məzmunu

Zond nanotexnologiyasının fiziki əsasları. Skanedici zond litoqrafiyasının növlərinin öyrənilməsi. Dinamik qüvvə litoqrafiya rejimində litoqrafiyanın optimal şərtlərinin seçilməsi və polimer səthə test şəklinin (**samples\litho\nanoworld**) yazılması (köçürülməsi).

Müəlliflik şəkili üçün litoqrafiyanın yerinə yetirilməsi (tələbənin arzusunu nəzərə almaqla).

Giriş

Hal-hazırda dünyada elm tutumlu sənaye sahələrinin konkuriyent qabiliyyətliliyini təyin edən, elm və texnikanın bir sıra “kritik” istiqamətləri formalaşmışdır. Mikroelektronika və mikroelektronologiya, yəni yüksək minatürlü elektron cihazlar və onların mikro səviyyədə reallaşması üsulları, XX əsrin ikinci yarısından başlayaraq elmi-texniki tərəqqinin inkişafı təminində əsas rol oynadı.

Mikrosxem elementlərinin xətti ölçülərinin kiçilməsi məsələsi mikroelektronikada əsas problemlərdən biridir. Hal-hazırda bu sahədə texnologiyanın inkişaf səviyyəsi submikron ölçülərə çatıb və artıq nano səviyyəyə keçmişdir. Elementlərin işləmə fizikası dəyişmişdir. Hazırda bu tamamilə kvant mexanikasına əsaslanır [19].

İnteqral nanoelektron kvant sxemlərinin yaradılması nanotexnologiyanın son məqsədidir [20]. Beləliklə, nanotexnologiyanı bərk cisimlərin səthində nanometr ölçülü funksional elementlərin yaradılması üsulları, tətbiqləri, eyni zamanda ayrıca molekul və atomlardan yaradılması, onların vizual görünüşü və nəzarətin olması imkanları kimi təyin etmək olar.

Yarımkəçirici təbəqənin səthində örtüklərin yaradılmasının ənənəvi tətbiqi üsulu daha yüksək ayırdetməyə malik müxtəlif mikrolitoqrafiyanın tətbiq olunması, həmçinin rentgen-elektron və ya ion litoqrafiyaları, nanometr eninə ölçüləri olan elementləri yaratmağa imkan verir. Bəzən ayrıca bir molekul və atomlara əsaslanan elementlərin yaradılması ənənəvi yollarla mümkün olmur.

1981-ci ildə Q.Bininq və X.Rorer skanedici tunel mikroskopunu (STM) kəşf etdilər, bu hər şeydən əvvəl keçirici materialların tədqiq olunmasını-onu zədələmədən 0,01nm ölçüyə qədər yeni ayırdetmə üsul idi. Yeni yüksək imkanlar atom-qüvvə mikroskopunun (AQM) yaradılması kəşfi ilə mümkün oldu ki, bu da nəinki keçiricilər, həmçinin dielektrik materialların relyefini öyrənməyə imkan verdi.

Skanedici zond mikroskopunun (SZM) yaradıcıları təklif etdilər ki, SZM nümunə səthinin modifikasiyası üçün alət kimi istifadə oluna bilər. Həqiqətən, zondun nümunənin səthi ilə lokal kontakt hissəsində kifayət qədər böyük qüvvələr, elektrik sahəsinin intensivliyi və elektrik cərəyanının sıxlığı yarana bilər. Ayrıca və birlikdə bu faktlar nümunə səthinin lokal modifikasiyasına səbəb olar. Yəni zond və nümunə arasındakı qarşılıqlı təsirin səviyyəsini dəyişməklə tədqiq olunan nümunə səthi

sıfır və ya minimal səviyyədə zədələməklə SZM-in ölçmə iş rejimindən litoqrafiya rejiminə, nanometr səviyyədə fəza ölçülü ayırdetmə ilə qabaqcadan verilmiş strukturu nümunənin səthində yaratmağa imkan verir. Beləliklə? yeni istiqamət-zond nanotexnologiyası kəşf olundu.

Bu vaxta kimi zond nanotexnologiyasının köməyiylə diskret nanoelektronika qurğuları yaradılmışdır. Bu qurğular ayrıca funksional elementlər şəklində olub (MOM diodu, bir elektronlu tranzistor) [21] yüksək sıxlıqlı məlumat yazan yad-daş qurğularıdır. Bu zaman bütünlüklə molekulyar elektronika ideyası həyata keçə bilər [23] və ayrıca molekulların istifadə olunması və modifikasiyası mümkündür.

Zond nanotexnologiyasının fiziki əsasları [23, 24]

Skanedici tunel mikroskopunda zond və nümunə arasında məsafə 0,5 nm, elektrodla tətbiq olunan gərginlik 5V atom-daxili elektrik sahə intensivliyi ilə müqayisə olunan 10^8 V/sm-ə yaxın elektrik sahəsi yaranır. Belə sahələrin lokal xarakterli olması, zondun iti uclu, tətbiq olunan gərginliyin aşağı olması, elektrodla arası aralıqda molekulların və atomların ionlaşmasını yarada bilməz. Belə sahələrdə cərəyanın sıxlığının elektron emissiyasının qiyməti 10^8 A/sm² -ə qədər mümkündür, bunu Fauler-Nordheim düsturlarına görə qiymətləndirmək olar:

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp \left(-6,836 \cdot 10^7 \frac{\Theta \Phi^{\frac{3}{2}}}{E} \right),$$

$$\theta = 0,935 - 10,79 \cdot 10^{-8} \frac{E}{\phi^2}$$

burada E-elektrik sahəsinin intensivliyi (V/sm), ϕ -elektrik sahəsinə tətbiq olan gərginlik hesabına (V) elektronların, elektroddan çıxış işidir. İynə şəkilli elektroddan çıxan yüksək sıxlıqlı elektronlar dəstəsi, altlığın qızmasına səbəb ola bilər. İzotrop nümunə altlıqlar üçün dəstələr oxundan səth boyunca r radiusu üzrə lokal temperatur artmasını

$$\delta T(r) = \frac{UI}{4\pi kl} \left(2 \frac{l}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{l}} \right) - e^{-\frac{r}{l}} \right),$$

düsturu ilə qiymətləndirmək olar. Burada U -elektrodlara tətbiq olunan gərginlik, l - tunel cərəyanı, k - altlığın istilik keçirmə əmsalı, l -altlıqda elektronların qeyri-elastiki səpilməsinin uzunluğudur.

Elektrostatik sahə həmçinin elektrodların səthinə normal istiqamətdə mexaniki gərginlik yaradır: $\sigma = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2$, burada ε - elektrodlararası mühitin dielektrik nüfuzluluğu, ε_0 - vaku-umda dielektrik keçiriciliyidir.

Bu sahə metal elektrodların səthlərində lokal elastiki və plastik deformasiyalarının yaranması üçün kifayət edir. Məsələn, havada $E > E_0$ (E_0 - elektrostatik deformasiyanın yuxarı həddi olan elektrik sahəsi), burada $E = 2,1 \cdot 10^3 \tau^{1/2}$ V/sm (τ - plastik deformasiya zamanı müşahidə olunan mexaniki gərginlik, Па) nümunə metal altlığın lokal plastik deformasiyasının formasının şiş şəklində olmasıdır. Bu zaman daha sərt iynə formalı elektrod ola bilsin dəyişməz qalsın.

Elektrodlar arası aralıqda güclü elektrik sahəsinin köməyi ilə mühitdə molekulların polyarlaşması və onların düzümü mümkündür. Molekulların və qatışıqların dipol - dipol qarşılıqlı təsiri hesabına elektrodların adsorbsiyasından və ya elektrod- lar arası aralıqda yerləşən maye dielektrik fazada elektrod keçirici molekulyar körpüçüklər əmələ gəlməsi mümkündür.

STM və AQM zondların köməyi ilə altlığa birbaşa mexaniki təsir mümkündür. Onda lokal cizgilər və ya zondun boş hərəkəti altlığın plastik deformasiyasının yuxarı həddinin qiymətindən aşması, mexaniki deformasiyasının baş verməsinin qarşısı alınmazdır.

Beləliklə, nanotexnologiya proseslərini təyin edən əsas faktlar bunlardır: molekul daxili və atom daxili sahələr müqayisə

olunan lokal elektrik sahəsi; böyük cərəyan sıxlığı və bunun elektrodinamik təsiri; keçən cərəyan tərəfindən yaradılan yüksək sıxlıqlı lokal istilik seli; lokal mexaniki deformasiyalar.

Skanedici zond litoqrafiyanın növləri

SZM zondun səthlə lokal qarşılıqlı təsirinin növlərinə uyğun olaraq zond litoqrafiyanın aşağıdakı növləri vardır:

- STM litoqrafiya;
- AQM anod-oksüd litoqrafiya;
- AQM qüvvə litoqrafiya;
- Başqa spesifik növləri (elektrostatik yük litoqrafiyası, yaxın sahə optik mikroskopun köməyi ilə litoqrafiya və i.a.).

STM litoqrafiya

Çoxlu müxtəlif növlü STM litoqrafiyalar mövcuddur. STM-in köməyi ilə səthin modifikasiyasının ən sadə üsulu STM-in səthlə bilavasitə kontaktı zamanı STM zondun səthə təsirindən ibarətdir. Bu səthdə çuxurların əmələ gəlməsinə səbəb olur, bu zaman zondun özü də zədələyə bilər.

Nümunə səthinə təsir üsulu nümunəyə yüksək sıxlıqlı cərəyan impulsu və ya yüksək gərginlikli elektrik sahəsinin verilməsindən ibarətdir. STM zondun nümunə səthinə təsiri nəticəsində nümunə əriyə və ya buxarlana (şəkil 5-1) bilər. STM zonu nümunə səthi üzrə materialın hissəciklərinin yerini dəyişdirə və ya onu oradan çıxara bilər, çoxlu sayda molekullar və həmçinin atomlarla manipulyasiya edə bilər (şəkil 5-2).

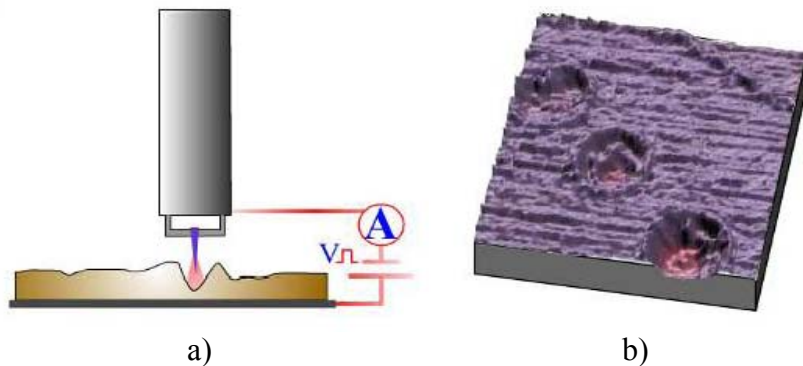
Lokal anod oksidləşmə

Bu növ litoqrafiyada nümunənin nəinki relyefi, həm də səthin lokal elektrofiziki xassələri dəyişir. Məsələn, AQM keçirici zonduna verilən gərginlik nümunə səthində elektrokimyəvi prosesin başlanmasına səbəb olur, metallik təbəqə zondun təsirindən oksidləşir. Bu üsul havada istifadə olunur, bu zaman zond və nümunə materialının səthi nazik adsorbsiya təbəqə ilə örtülmüş olur. Nümunə səthinə zond kifayət qədər yaxınlaşdıqda, bu nazik adsorbsiya təbəqəyə zond toxunur və kapillyar effektin təsirindən iynənin ucu ilə nümunə arasında su səddi

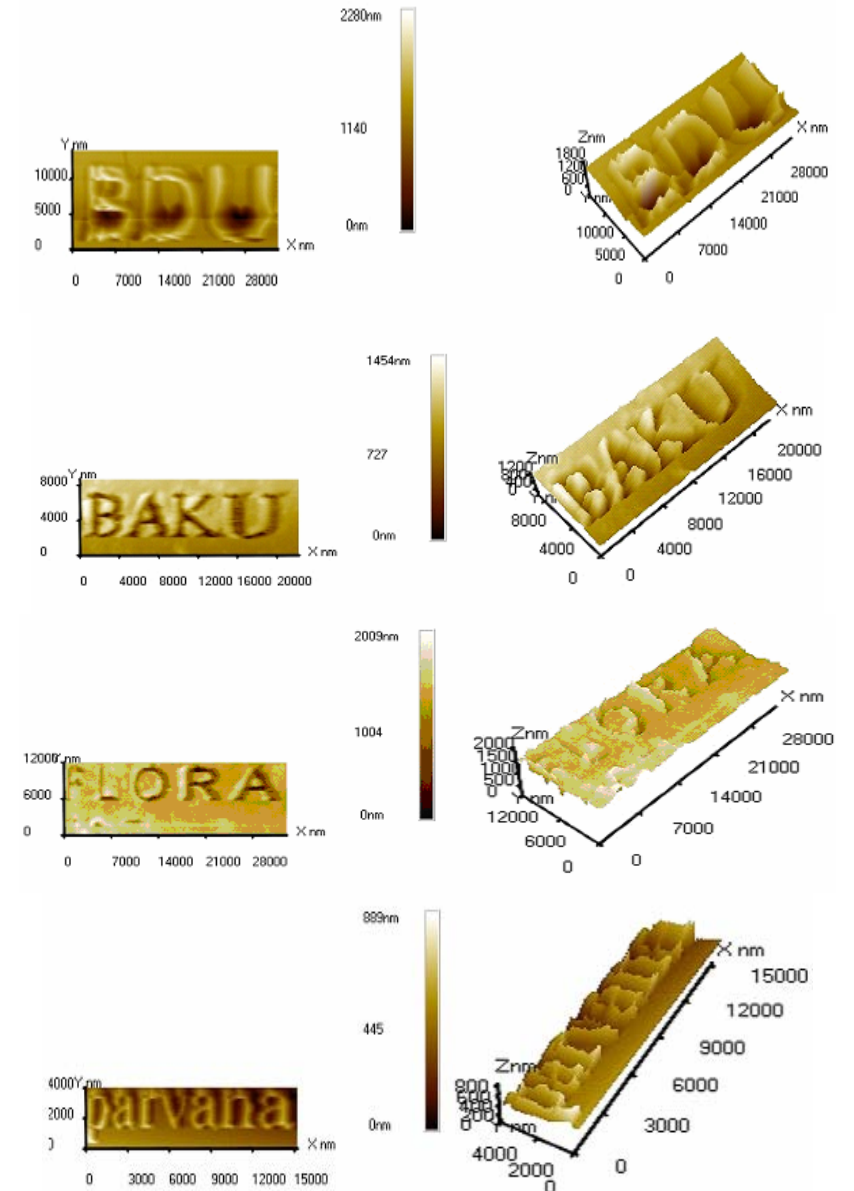
(aralığı) yaranır. Beləliklə, verilən gərginlik su mühitində zond və nümunə səthi arasında elektrokimyəvi reaksiyanın baş verməsinə səbəb olur. Əgər səth müsbət yükə malikdirsə, iynə mənfi yüklüdirsə onda bunlar uyğun olaraq anod və katod kimi elektrokimyəvi qarşılıqlı təsirdə olacaq və bilavasitə iynənin təsiri nəticəsində oksidləşmə təbəqəsi artmış olacaqdır (şəkil 5-3).

Qeyd etmək zəruridir ki, yarım hündürlükdə ölçülmüş oksidləşmiş nanohissəciklərin diametri 8-10 nm təşkil edir. Yazmaq elementi kimi belə nanohissəciklərin istifadə olunması məlumatın effektiv yazı sıxlığı 1T bayt/düyüm² təşkil edir.

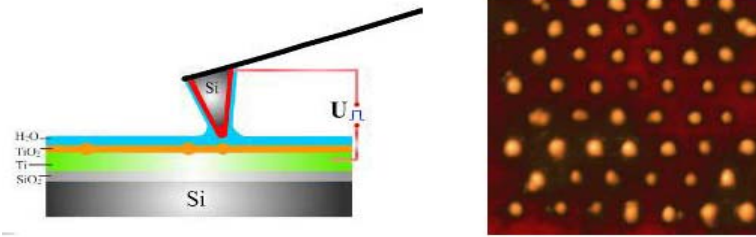
Səthin nanomodifikasiya zamanı nöqtələrin səthdə formalaşması ilə məhdudlaşmır. Uyğun proqram təminatını istifadə edərək zondun verilmiş vektorlar üzrə yerdəyişməsinə və daha mürəkkəb obyektlərin xətlərinin nümunə səthində formasını almaq olar.



Şəkil 5-1. SZM litoqrafiyaya misal. Üç monotəbəqəli Lenqmür-Blodjet (b) keçirici təbəqənin STM şəkilləri (skanetmənin ölçüsü 256x256nm² olan). Lokal gərginliyin üç impulsu tətbiqindən sonra bir monotəbəqədə kraterə oxşar dərin defektlərin görünüşü.



Şəkil 5-2. STM 2D (solda) və 3D (sağda) litoqrafiya şəkilləri.



a)
Şəkil 5-3. AQM keçirici zondun köməyiylə anod oksidləşməsinin lokal prosesinin sxemi. Silisium (Si) səthində titanın çox nazik təbəqəsinin verilmiş nöqtələrdə oksidləşməsi şəkli (skanetmə ölçüsü 200x200 nm² olan).

Qüvvə litoqrafiya

SZM zond vasiyyəsi ilə bilavasitə nümunə səthinə qüvvə ilə təsir etməyə imkan verir. Bunu iki üsulla-statistik təsirlə (nanocızıq çəkməklə və ya həkkətmə) və dinamik təsirlə (nanozərb etmə) aparmaq olar.

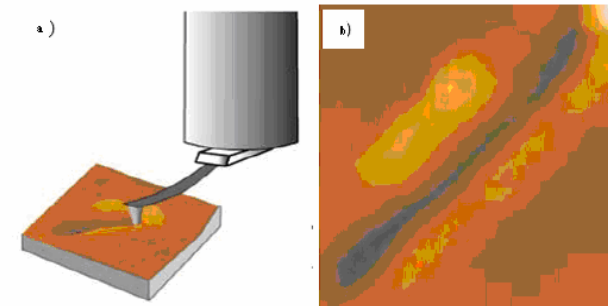
Həkkətmə prosesi yaxşı məlum olan vasitə olub nümunə səthində şəkillərin əmələ gəlməsi vasitəsidir. Skanedici zond mikroskopu üsulundan istifadə etməklə bu prosesin nanometr ayırdetmədə nanohəkkətmə ilə reallaşmasına imkan verir. Nanohəkkətməni həyata keçirərkən qüvvə mikroskopu zond üsulu ilə, zond nümunə səthini kifayət qədər güclə sıxaraq hərəkət edir, nümunə səthində (onda yerləşmiş təbəqə rezistində) dərin şəkil (cızıntılar) yaranır. Belə üsul yaratma prinsipindən istifadə olunur: zondun ucunun forması ilə təyin olunan xüsusi xarakterli kəsikli çuxurlar səthdə yaranaraq material altlıqdan çıxarılır.

Aydındır ki, qüvvə litoqrafiyanın aparılması üçün zondun materialının möhkəmliyi nümunənin materialının möhkəmliyindən yuxarı olması zəruridir. Bu zaman kantileverin yapışması və nümunə qoyulunun materialının hissəciklərinin zonda

yapışması baş verməməlidir. Nümunənin kələ-kötürlüüyü adətən 1-10 nm-dən böyük olmamalıdır. Həmçinin nümunə səthi təmiz olması zəruridir. Qüvvə litoqrafiyasının həyata keçirilməsi üçün polikarbonat və polietilen polimer materiallar daha münasibdir.

Belə nanolitoqrafiya texnologiyası kifayət qədər sadə və ucuz olmaqla bərabər, bir sıra müəyyən çatışmamazlıqları vardır. Zondun statistik təsiri ilə nano çuxurların yaranması zamanı kantileverin təsadüfi torsion əyilməsi hesabına şəkildə qeyri-bircinsliyinə gətirib çıxarır. Bundan əlavə bərk cismin səthi ilə işləyərkən bu üsul zondun tez xarab olmasına gətirib çıxarır.

Dinamik qüvvə litoqrafiyasının (nanozərb etmə) istifadə olunması zamanı səthin modifikasiyası nümunə səthi üzərində zondun rəqs etməsi hesabına dərinliyin yaranmasıdır (şəkil 5-6). Belə nano litoqrafiya üsulu torsion təhriflərdən sərbəst olub, alınmış şəkli nümunə səthinə və rezistə təsir etmədən vüvualizasiya etməyə imkan verir. Səthin qısa müddətli iynələnməsi zondun tez bir zamanda zədələnməsinin qarşısını alır.

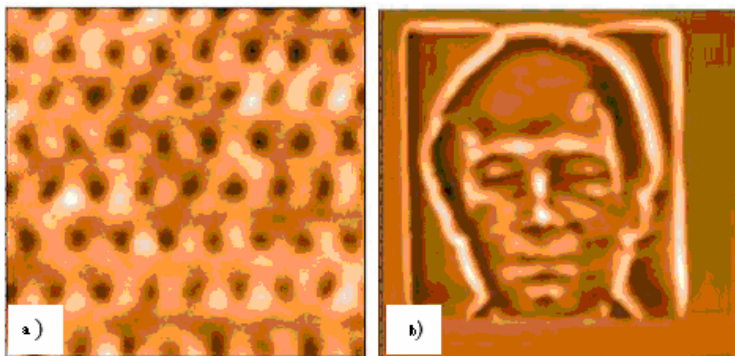


a)
Şəkil 5-4. Statistik qüvvə litoqrafiyası prosesinin sxematik şəkil (a) Alüminiumun səthinə cızıqlamaqla köçürülmüş şəkil (b) (skanetmənin ölçüsü 1,6x1,6 mkm² olan).

Dinamik litoqrafiyanı vektor və ya cızıqlamaqla skanetmənin istifadə olunması ilə aparıla bilər. Vektor litoqrafiya qabaq-

cadan verilmiş şəkil üzrə həyata keçirilir. Bunun üstünlüyü nisbətən böyük sürətlə aparılması, bu zaman litoqrafiya prosesində təsir etmə qüvvəsinin nizamlanmasına imkan vermir. Cızılmaq litoqrafiyası zəif sürətlə aparılır, şəklın formalaşan bütün müstəvisi üzrə skanetmə zond vasitəsilə aparılır, buna baxmayaraq skanetməni səthə zondla müxtəlif təsir etmə qüvvəsinin köməyi ilə (şəkil şablonundan asılı olaraq) həyata keçirmək olar.

Cızılmaqla litoqrafiyasında nanozərbətmədən istifadə olunması zamanı yaxşı nəticələrin alınması, qabaqcadan qrafik-şablon şəklının hazırlanması əsas rol oynayır. Şəkildə ağ rəng nümunəyə təsirin olmadığı, qara rəng-təsir edən qüvvənin maksimal olduğunu göstərir. Şəkli hazırlayarkən ən əsas vacib detallar bunlardır: şəkilin formasını qara-ağ götürmək, qara rəng hissəsini kifayət qədər yaxşı rəngləmək, bu zaman elə etmək lazımdır ki, kiçik ağ sahələr növbələşməsi olmasın, fon və digər lazımsız detallar ağ rənglə rənglənsin. Bəzi hallarda şəklın kontrastlığının artırılması daha faydalıdır.



Şəkil 5-5. Vektor dinamik qüvvə litoqrafiyası (a) (skanetmə ölçüsü $220 \times 220 \text{ nm}^2$) rəqulyar dərinə massiv şəkildə və cızılmaqla litoqrafiyası (skanetmə ölçüsü $2,5 \times 2,6 \text{ mkm}^2$ olan).

NanoEducator cihazında cızıqlamaqla dinamik qüvvə litoqrafiyasının yerinə yetirilməsi

Litoqrafiyaya başlamazdan əvvəl litoqrafiyası olunacaq şəkil üçün nümunə səthinin skan edilməsi zəruridir. Litoqrafiyanın müvəffəqiyyətlə aparılması üçün nümunə səthinin kifayət qədər hamar və səth üzərində qüsurlar və çirklər olmaması zəruridir. Buna görə də birinci olaraq litoqrafiyası olunacaq şəkil sahəsindən böyük nümunə səthi seçilərək skanetməni yerinə yetirməli. Bu əlverişli səthin seçilməsini tez tapmağa imkan verir. İşçi sahənin skan olunacaq səth sahəsinin orta hissəsində seçilməsi məqsədə uyğun hesab edilir.

Bundan sonra litoqrafiya aparılması üçün işçi sahənin skan edilməsinə başlanılır. Şəkil şablonun tərəflərinin münasibətinə uyğun sahənin seçilməsi məqsədəuyğun hesab olunur, bunun üçün şəkil şablonda pikselin miqdarına uyğun olaraq X, Y istiqamətlərində skanetmə nöqtələrinin sayını vermək lazımdır.

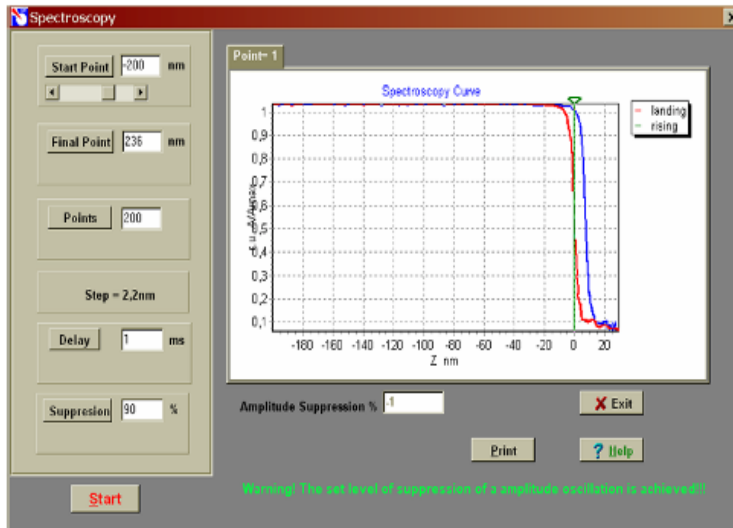
Cızıqlamaqla litoqrafiya prosesi kifayət qədər çox vaxt aparır, skanedicinin kənara çıxmaları hesabına seçilmiş səthin sahəsindən kənara yerdəyişməsi ola bilər. Bu zaman şablona əsasən formalaşan səth relyefi güclü təhrif olunmuş ola bilər. Bunun üçün işçi səthin bir neçə dəfə skan edilməsi vacibdir ki, təhriflərin olmadığına əmin olduqdan sonra litoqrafiya prosesini aparılsın.

NanoEducator cihazında nümunə səthində şəklın zərb ilə alınması təyin olunmuş sahənin cızılmaqla skan edilmə aparılır və bu zaman şablon-şəklə uyğun işıqlıq piksellərindən asılı olaraq verilmiş nöqtələrdə qüvvə ilə nümunəyə təsir edilir.

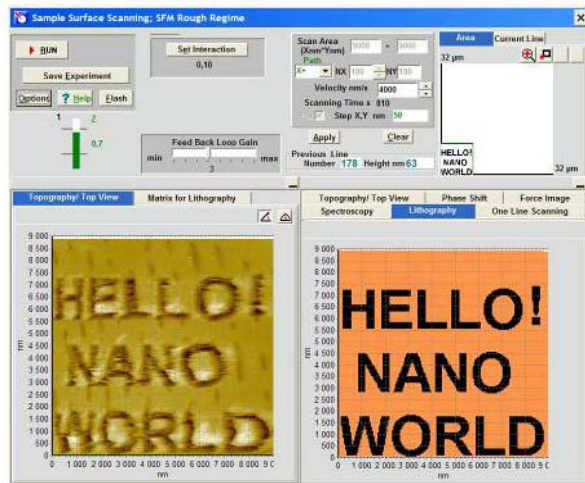
Təsirin maksimal dərinliyinin təyin olunması üçün spekroskopiya prosedurasını yerinə yetirmək və zond-nümunə arasındakı aralıq məsafəyə və asılılıq ayrısına (şəkil 5-6) əsasən zondun rəqs amplitudunu qiymətləndirmək olar.

Scanning pəncərəsinin aşağı sağ hissəsində Lithography imkanını seçərək litoqrafiya prosedurasını yerinə yetirmək

olar. Bu zaman **Scanning** pəncərəsinin sol aşağı sahəsində litoqrafiyanın idarəedici elementləri yaranacaqdır (şəkil 5-7).



Şəkil 5-6. Kontakt nöqtədə zond və nümunə arasında məsafəni qiymətləndirmək üçün spektroskopiya ayrısı.



Şəkil 5-7. Litoqrafiya prosedurasının pəncərəsi.

Litoqrafiya prosedurası aşağıdakı addımlarla yerinə yetirilir:

1. Nümunə səthinə yazılışı şəkil-şablonu daxil edin. Şəkili qabaqcadan ***.bmp** qrafik formasında hazırlamalı və saxlamalı. Şəklil seçilməsi və daxil olunması **Load Image** düyməsini sıxmaqla edilir.
2. Nümunəyə zondun maksimal dərinliyə təsirinin qiymətini **Action nm** vasitəsi ilə təyin edərək daxil edin. Bu kəmiyyətin qiymətini səthin hamarlılığı nəzərə alınmaqla, zond və nümunə arasındakı məsafənin qiymətləndirilmiş nəticəsindən 10-50% böyük olmaq şərti ilə təyin edərək daxil edin.
3. Təsiretmə vaxtının qiymətini **Action Time mks** vasitəsilə təyin edərək daxil edin. Razılaşmağa görə ilkin olaraq 22 mks götürmək olar.
4. Nümunə səthinin nöqtələri arasındakı məsafənin qiymətini (litoqrafiyanın addımını) **Step X, Y nm** vasitəsilə təyin edərək daxil etməli. Razılaşmaya görə bu parametr səthin relyefinin əvvəlki ölçmələrindəki skanetmə addımına bərabər götürülür. Litoqrafiya addımının dəyişməsi **Step X, Y nm** litoqrafiya şəklinin alınması zamanı səth sahəsinin dəyişməsində özünü göstərir.
5. **Projection** düyməsini sıxaraq şəkil-şablonun skanedilmiş səth sahəsində çəkilməsi və səthə təsiretmə matrisinin formalaşması baş verir. Bundan sonra istifadəçi litoqrafiya yerinə yetiriləsi sahənin vəziyyətini dəyişə bilər. Bunu skanetmə sahəsinin tam sərhədləri daxilində çərçivəni dəyişməklə etmək olar. Ancaq bunları etmək məsləhət görülmür. Əgər yeni skanetmə sahəsi verilmiş əvvəlki sahə ilə üst-üstə düşürsə, onda **Apply** düyməsi qırmızı rənglə rənglənmiş olacaq və buna görə də verilmiş parametrlərin təsdiq (qəbul) olunması üçün onu sıxmaq lazımdır.
6. **Scanning** pəncərəsində **RUN** düyməsini sıxmalı. Bundan sonra litoqrafiya prosesi başlayır, **Scanning** pəncərəsinin aşağı sağ sahəsində səthin əks olunması, litoqrafiyanın yerinə

yetirilməsini göstərəcəkdir. Şəkil-şablondakı qara rəngə uyğun nöqtələrdə **Action** təsir etmənin maksimal mümkün dərinlik qiymətinə bərabər amplitudla nümunə səthini zond döyəcəyir və bu zaman xarakteristik səs eşidiləcəkdir.

Scanning pəncərəsinin sol hissəsində skanedicinin əks gedişində ölçmələrin nəticəsi kimi səthin şekli alınacaq. Beləliklə, istifadəçi litoqrafiya apararkən səthə təsir etmənin nəticələrini dinamik nəzarət etmək imkanına malikdir.

Litoqrafiyanın yerinə yetirilməsi prosesində nümunəyə maksimal dərinliyə təsir etməni (**Action**) 2 və ya 4 dəfə artırmaq olar.

Litoqrafiya prosedurasını yerinə yetirdikdən sonra aparılmış təsirlərin nəticələrini yoxlamaq lazımdır. Litoqrafiya aparılmış və ya böyük sahə səth hissəsinin skanedilməsini yerinə yetirmək lazımdır.

NanoEducator cihazında litoqrafiyanı yerinə yetirmək üçün ucunun əyrilik radiusu 100nm dən böyük olmayan zondla, skanetmənin sürəti 2000nm/s, **Action** təsir etmənin qiyməti 100-dən 1000nm-ə qədər, litoqrafiya nöqtələri arasındakı addımlar ~100nm olmaq şərti ilə aparılması məqsədəuyğundur.

5.3. Metodik göstərişlər

NanoEducator skanedici zond mikroskopunda işləməyə başlamazdan əvvəl cihazın istifadəçilərə rəhbərlik sənədini öyrənmək zəruridir.

5.4. Tapşırıq

I Hissə

1. Litoqrafiyanın yerinə yetirilməsi üçün nümunə səthi üzərində səth hissəsini seçin.
 - 1.1. Tədqiq olunan nümunəni altlıqda yerləşdirin.
 - 1.2. **NanoEducator** cihazında ölçən başlığın yuvasına zond çeviricini yerləşdirin.

- 1.3. **NanoEducator** cihazının idarəetmə proqramını işə salın. Skanedici qüvvə mikroskopu (SQM) rejimini seçin.
- 1.4. Zond çeviricisinin amplitud-tezlik xarakteristikasını təyin edin və işçi tezliyi daxil edin.
- 1.5. Zondun nümunəyə (yaxınlaşmasını) əl və vint vasitəsilə 1mm məsafəyə qədər yaxınlaşdırın.
- 1.6. Qarşılıqlı təsirin alınmasını
-Amplitud Suppression = 0,3:
-Feed Back Loop Gain = 3.
qiymətlərində yerinə yetirin.
- 1.7. Skanetmə pəncərəsini açın. Litoqrafiyanı yerinə yetirmək üçün şəkil-şablon (**nanoworld.bmp**) verilənlərinə əsasən skanetmənin lazımi parametrlərini daxil etməli. Skanetmə sahəsinin işçi ölçülərini 10x10 mkm², skanetmə nöqtələrinin sayının şəkildə piksellərin sayına bərabər verilməsi məqsədəuyğundur.



Şəkil 5-9. Dinamik qüvvə litoqrafiyanı yerinə yetirmək üçün şablon - şəkil. nanoworld.bmp faylındakı ölçüsü 180x180 piksel olan şəkil.

- 1.8. Nümunə səthinin işçi hissəsinin SZM şeklini almalı. Alınmış nəticələri saxlamalı.
- 1.9. Zondun yerləşdiyi cari nöqtədə spektroskopiyanı yerinə yetirin. Zond və nümunə arasındakı məsafəni qiymətləndirin.
- 2.0. Test şəklinin litoqrafiyasını yerinə yetirin. Səthin seçilmiş işçi hissəsində **nanoworld.bmp** şekli üçün litoqrafiya prosesini yerinə yetirin. Səthə zondun maksimal təsir dərinliyini, səthin hamarlığının qiymətlərindən böyük qiyməti **Action** nm-lə təyin

edərək daxil edin (kompakt diskin səthində çıxırların dərinliyi) və zond-nümunə arasında qiymətləndirilmiş məsafədən 10-50% böyük olmasını nəzərə almalı.

3.0 Litoqrafiyanın yerinə yetirilməsinin nəticəsi kimi səth hissəsinin topoqrafiyasının şəklinin alınması.

3.1 Litoqrafiya prosesi qurtardıqdan sonra **Scanning** pəncərəsinin sağ aşağı hissəsində **Topography** imkanını seçməli.

3.2 Skanetmənin parametrlərini dəyişmədən və skanetmə sahəsini dəyişmədən litoqrafiya aparılmış səth hissəsi üçün topoqrafiya ölçülərini aparın. Skanetmənin kənara çıxmaları nəticəsində litoqrafiya şəklinin qismən dəyişməsi halında skanetmə sahəsini artırmalı. Nəticədə aparılmış litoqrafiya işçi hissəni tamamilə əhatə etmiş olsun.

3.3 Nümunə səthinin işçi hissəsinin SZM şəklinin (şəkil 5-10) alınması. Alınmış nəticələrin saxlanması.

3.4 Litoqrafiya şəklinin keyfiyyətini qiymətləndirin. Şəkil 5-10 dan görünür ki, təzyiqlə dərinlik kifayət deyil. Bu şəkil 5-10b-də aydın görünür. Bu bəzi sahələrdə materialın səthində təzyiqlə müşahidə olunur. Yəni təsir etmənin dərinliyi azacıq çox olmuşdur.

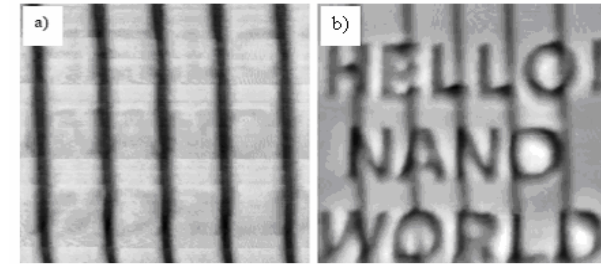
3.5 Zondun nümunəyə maksimum dərinliyə təsirinin parametrlərinin dəyişməsinə nəzərə almaqla litoqrafiya prosesinin təkrar olunması zəruri olarsa bunu etməli (**Action**).

II Hissə

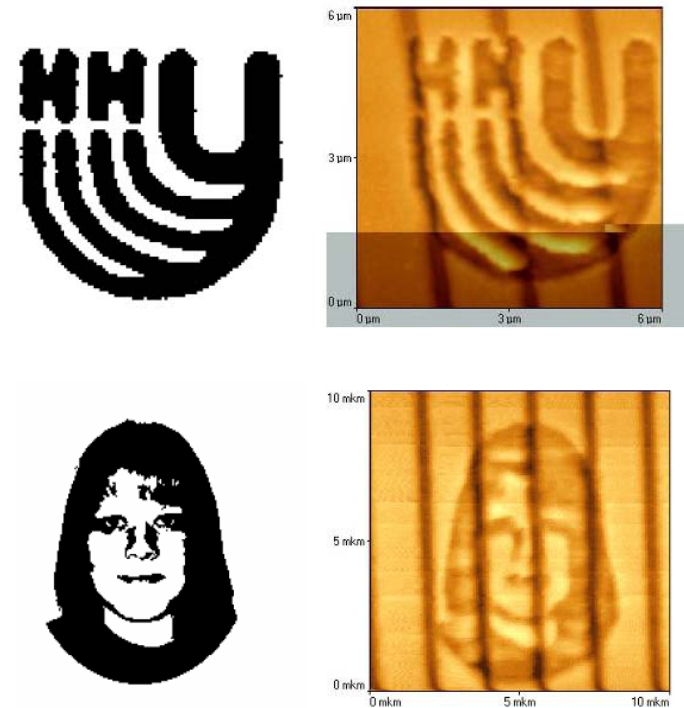
4. Müəlliflik şəklinin litoqrafiyası

4.1. Litoqrafiya üçün aşağıdakı xarakteristikaları olan şəkil hazırlayın: *.bmp formasında saxlanmış qara-ağ şəkil (iki rəngli 200x200 piksel, 50-100 piksel/düyüm mümkünlüyü) Şəkil 5-10-da litoqrafiyanın yerinə yetirilməsi şəkil-şablonlar üçün AQM səthi hissəsinin topoqrafiyasının şəkillərinin mümkün variantları göstərilmişdir.

4.2. I hissədə edilmiş zəruri əməlləri yerinə yetirin. I hissədə işçi parametrləri optimal seçərək müəlliflik şəkillərinin litoqrafiyasının yerinə yetirilməsi çalışmasını edin.



Şəkil 5-10. Səth hissəsinə SZM vasitəsi ilə 300nm (a) dərinliyə və 1000nm (b) olanda litoqrafiyanın aparılması şəkl (skanetmənin ölçüləri 10x10 mkm²).



Şəkil 5-11. NanoEducator cihazında səth hissəsinin litoqrafiyasının mümkün şablon (solda) və topoqrafiya variantları (sağda).

5.6. Yoxlama sualları

1. Skanedicci zond mikroskopu informasiyanın oxunması və yazılması üçün bir alətdir. Zond nanotexnologiyasının fiziki əsasları haqqında danışın.
2. Skanedicci zond litoqrafiyası nədir? Onun əsas növləri haqqında danışın.
3. **NanoEducator** cihazında dinamik qüvvə litoqrafiyasının xüsusiyyətləri haqqında danışın.
4. Dinamik qüvvə litoqrafiyasının aparılması üçün nümunələrin seçilməsi kriteriyalarını deyin.

Laboratoriya işi № 6

SZM şəkillərinin işlənməsi və kəmiyyətə təhlili

6.1. İşin məqsədi	136
6.2. İşin məzmunu	136
6.3. Tapşırıq	140
6.4. Metodik göstərişlər	141
6.5. Yoxlama sualları	143

6.1. İşin məqsədi

SZM şəkillərinin işlənməsi və kəmiyyətə təhlili sahəsində təcrübi vərdişlərin əldə olunması.

Ləvazimat: Skanedici zond mikroskopu (Model SZMU-L5), zond, NanoEducator proqramı və kompüter.

Tədqiqat üçün nümunə: Periodik quruluşlu nümunələr

6.2. İşin məzmunu

SZM şəkillərinin keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması

Metodikanın spesifikliyinə əsasən SZM şəkillərə adətən küylərlə əlaqədar məlumatlar daxildir. Bu nümunəyə nəzərən zondun titrəməsi, akustik təsirlər cihazın elektrik küyləri ilə əlaqəli olub zəif siqnalları ölçərkən həmişə yaranır. Şəkildəki təhriflər nümunəyə nəzərən zondun istilik dreyfinə görə də əmələ gəlir. Bununla əlaqədar SZM şəkillərinin yüksək keyfiyyətdə alınması və onların kəmiyyətə təhlilinin aparılması üçün bu şəkillərin xüsusi ədədi üsulların köməyi ilə işlənməsini və təkmilləşdirilməsini tələb edir.

SZM şəkillərinin filtrlənməsinin əsas üsulları bunlardır: Hamarlama

Sadə halda şəklin hamarlanması hər bir nöqtədə kəmiyyətin qiymətinin, bu nöqtənin yaxın ətrafında kəmiyyətin orta qiyməti ilə əvəz etmək yolu ilə yerinə yetirilir.

Median filtrləmə

Median filtrləmə zamanı şəklin hər bir nöqtəsi üçün, bu nöqtənin müəyyən ətrafına görə variasiya sırası qurulur, yəni bu ətrafin elementləri artan sıra ilə yerləşdirilir və bu nöqtədə qiymət variasiya sırasındakı mərkəzi səviyyədə yerləşən elementin qiyməti ilə əvəz olunur. Median filtrasiyası impuls maneələri olan şəkillərin istifadəsi və ya təkmilləşdirilməsi zamanı xüsusi ilə effektivdir.

Şəkildə üfüqi sahənin silinməsi şəklin hər bir nöqtəsində elementlərin orta qiymətlərinin bərabərləşdirilməsi yolu ilə aparılır. Üfüqi sahələrin şəkildə alınması SZM şəkillərində

xarakterik təhriflərdəndir. Bu onunla əlaqədardır ki, SZM təcrübələrində şəkil adətən xətt boyunca skanedilməsi yolu ilə alınır, bir xətdəki qonşu nöqtələrin ölçmələr arası vaxtı skanetmənin perpendikulyar istiqamətdə qonşu nöqtələrin ölçmələr arası vaxtıdan kifayət qədər kiçikdir.

Şəkildən meylin silinməsi sahənin sıxılması yolu ilə aparılır. Şəkilin meyli nümunənin müstəviyə nəzərən meyllik vəziyyətinin nəticəsinə görə ola bilər, bu skan edərək zondun yerdəyişməsi zamanı, həmçinin istilik dreyfinin təsiri nəticəsində yarana bilər.

Səthin ikinci tərtibinin çıxılması səthin nazik təbəqəsinin tədqiqi zamanı istifadə olunur. Buna görə də SZM şəkillərində kobud relyef adətən informasiya xarakterli olmadığına görə və onu kənarlaşdırmaq zəruridir.

SZM şəkillərinin kəmiyyətə təhlili

Şəkilin histoqramının qurulması

Şəkilin analizi üsullarından biri şəkil nöqtələrinin qiymətlərinin histoqramının qurulmasıdır. Histoqramı qurarkən üfqi oxda şəkilin nöqtələrindəki bütün qiymətlər diapazonu yerləşir, bu diapazonun bütün qiymətləri üçün uyğun qiymətlər çoxluğu şaquli ox üzrə yerləşdirilir.

Səthin hamarlılığının təyini parametrləri

SZM şəkillərinin kəmiyyətə xarakteristikası üçün şəkilin hamarlılıq parametridən həmişə istifadə edilir:

Orta hamarlılıq parametri

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l) - \mu|, \quad (1)$$

kimi təyin olur.

burada μ şəkilin orta hündürlüyüdür: $\mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l)$

orta kvadratik hamarlılıq isə

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l) - \mu]^2} \quad (2)$$

kimi təyin olunur.

Hamarlılığın düzgün təyini üçün şəkilin qeyri-hamarlığını qabaqcadan silmək zəruridir. Bunun üçün sahəni çıxmaq və ya ikinci tərtib səthi silmək lazımdır.

Şəkilin Furje spektrinin qurulması

Şəkilin fəza tezliklərinin kompleks eksponentdən ibarət Furje-spektri onun ortanormal bazisdə tezlik təsviridir. Belə fəzada şəkilin təsviri kiçik detallar, elementlərin xassələrindəki periodik təkrarlığı və s. ilə əlaqədar struktur xüsusiyyətlərinin müşahidə olunmasına imkan verir. Fəza tezliklərinin ölçüsü, şəkil üzərində məsafənin ölçülməsinin tərs qiyməti ilə təyin olunur.

Şəkilin kompleks eksponensial funksiyalar bazisində ayrılışı Furje çevirməsi cütü ilə verilir (sonsuz sahədə verilmiş $a(x,y)$ kəsilməz intensivlik funksiyası halına baxılır).

$$F(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a(x, y) \exp[-i2\pi((f_x x + f_y y))] dx dy \quad (3)$$

düzünə çevirmə,

$$a(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(f_x, f_y) \exp[i2\pi((f_x x + f_y y))] dx dy \quad (4)$$

əksinə çevirmədir.

Burada x, y -şəkil müstəvisində koordinatları, f_x, f_y -fəza tezlikləridir.

Sonsuz kəsilməz siqnalların tezliklə əlaqədar ifadə olunması anlayışı təcrübədə istifadə olunan məhdud aralıqlı və diskret siqnallar halına şamil oluna bilər.

Eni N və hündürlüyü M olan düzbucaqlı şəklə baxaq. Belə şəkilin Furje çevrilməsi

$$F(u, v) = \int_{-M/2}^{M/2} \int_{-N/2}^{N/2} a(x, y) \exp[-i2\pi((ux + vy))] dx dy \quad (5)$$

şəklindədir.

Siqnal fəzasında ($|x| > N/2$ və $|y| > M/2$, qiymətlərində $f(x, y) = 0$) əgər bütün müstəvi üzrə məhdud Furje çevirməsi

periodik ifadə olunarsa və diskretdirsə, onda $(k/N, l/M)$ $-\infty < k, l < \infty$ tezliklərdə harmonikanın miqdarı yalnız hesabı saydadır.

Şəkilin diskret fəzasında qeyri məhdud spektri periodik funksiyadır. Əgər Ox və Oy oxları üzrə nöqtələr arası məsafə uyğun olaraq Δx və Δy olarsa, onda Furiye çevirmələrinin təkrarlanma periodları uyğun olaraq $1/\Delta x$ və $1/\Delta y$ olacaqdır. Əgər hesablama başlanğıcını Furiye obrazının təkrarlanan periodlu matrisinin orta nöqtəsində yerləşdirsək, maksimal fəza tezliyi $\pm \frac{1}{2\Delta x}$ və $\pm \frac{1}{2\Delta y}$ olacaqdır. Verilmiş siqnalın diskretləş-

mə addımında alınmış maksimal tezliyə Nykvist tezliyi adlanır. Alınmış periodik Furiye çevirmələrində təkrarlanan spektrləri atmaq olar və hesab etmək olar ki, diskret siqnal spektr tezliyində görə məhduddur.

Beləliklə, yuxarıda verilmiş mühakimələri ümumiləşdirərək belə qərara gəlmək olar ki, şəkilin Furiye çevirməsi diskret fəzada məhduddursa, onda o həmçinin tezliyə görə diskret və məhduddur. Maksimal fəza tezlikləri şəkilin diskretlik addımı ilə təyin olunur.

Tezliyə görə şəkilin diskret spektrinin məhdudduğunun göstərilməsinə sadə misalda baxmaq olar. OX oxu üzrə əgər ağ və qara nöqtələri növbələşdirərək şəkildə ən kiçik təkrarlanma periodu almaq olar. Bu period $2\Delta x$ -ə bərabər olacaq, buna uyğun fəza tezliyi $1/(2\Delta x)$ -ə bərabərdir.

Verilmiş $f_{k,l}$, $k = 0, \dots, M-1$, $l = 0, \dots, n-1$ nöqtələrdə şəkilin diskret Furiye çevirməsi (DFÇ)

$$F_{m,n} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} f_{k,l} \exp \left[-i2\pi \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N} \right) \right], \quad (6)$$

düsturu ilə təyin edilir.

Şəkilin Furiye-obrazının qrafik təsviri üçün (6) düsturuna görə alınmış kompleks çevirmələr kəmiyyətinin matrislər modulu qurulur. Şəkilin həqiqi çevirmələr matrisi-mərkəzi

simmetrik matris adlanır. Tezliyə görə hesabat onun mərkəzinə görə aparılır. Şaquli oxda tezlik müstəvisində mərkəzdən eyni bir f_0 məsafəsində iki nöqtədən ibarət olan şəkilin Furiye-obrazı üfüqi sinusoidal zolaqdan təşkil olunmuşdur. Bu zaman şəkildə təkrarlanma sahəsinin periodu T olub $T = \frac{1}{f_0}$

bərabərdir.

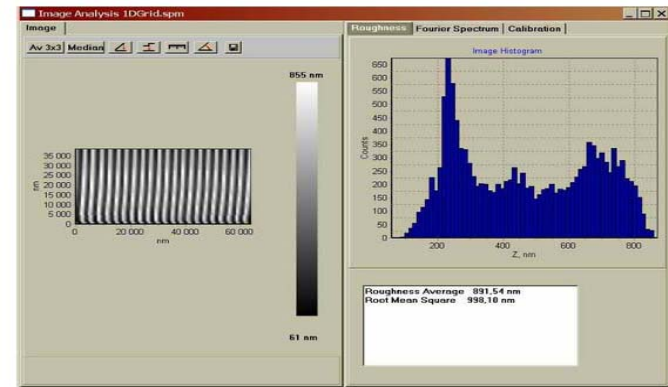
6.3. Tapşırıq

İş iki variantda aparıla bilər:

- Əvvəlki alınmış şəkillərin təhlili
- Ölçmələrin aparılması və yeni şəkilin alınması, işlədilməsi və bu şəkilin təhlili

İşdə zəruridir:

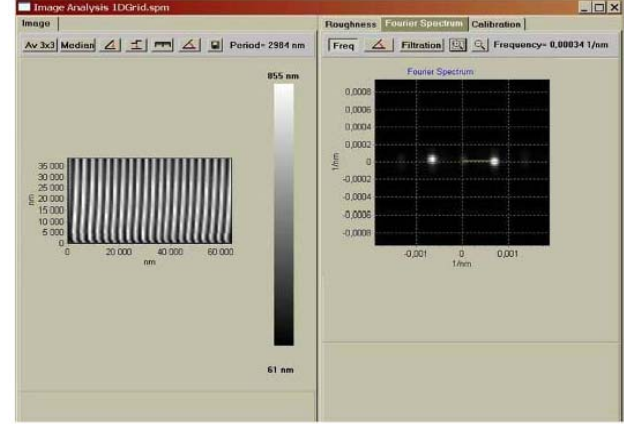
- Şəkilin filtrlənməsinin yerinə yetirilməsi
- Filtrlənmədən qabaq və sonra şəkilin kələ - kötürlüyünün parametrlərinin ölçülməsi və müqayisəsi.
- Şəkilin Furiye-spektrini qurmaq və spektrin əsas fəza tezliyinin qiymətlərini ölçmək. Şəkilin bu tezliklərə uyğun təkrarlanma periodlarının elementləri ilə, həmin intervallarla şəkildə alınmış ölçmələrlə müqayisə etmək.




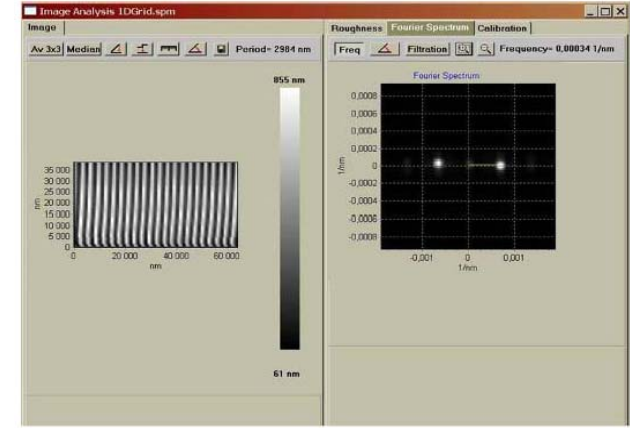
Şəkil 6-1. Şəkillərin analizi pəncərəsi. Şəkil səthinin xüsusiyyətinin analizinin yerinə yetirilməsi.

6.4. Metodik göstərişlər

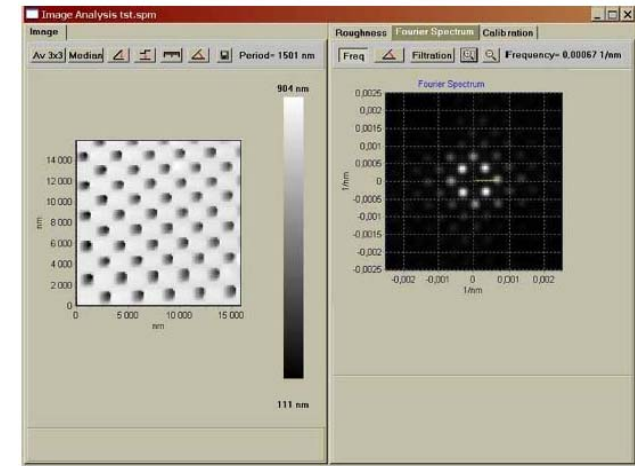
A variantının yerinə yetirilməsi halında laboratoriya işi üçün zəruridir:

- İstifadəçilərə göstərişlərə uyğun olaraq SZM təcrübələrinin aparılması üçün ilkin hazırlıq işlərinin yerinə yetirilməsi
- İstifadəçilərə rəhbərlik sənədində göstərilmiş üsulların biri ilə nümunənin skan edilməsini yerinə yetirmək.
- Alınmış şəkli seçilmiş qovluqda saxlamalı.
- İstifadə olunma və verilənlərin analizinə aid olan növbəti işin mərhələləri A və B variantları üçün üst-üstə düşür.
- Bunların yerinə yetirilməsi üçün zəruridir:
- İstifadəçilərə köməkdə “əvvəllər alınmış fayllarla iş bölməsi” ilə tanış olmalı.
- **NanoEducator** proqramının köməyi ilə verilənlərə baxılması və işlədilməsinə keçməli.
- İş aparılan faylı açmalı və şəklin yoxlama kəsiyini təyin etməli.
- Proqramda mümkün olan metodların birinin köməyi ilə təhriflərin əmələ gəlmə xarakterini verməli, verilənlərin işlənməsi və filtrasiyasını aparmalı.
- faylın işlənməsindən sonra yoxlama kəsiyinin aparılması və verilmiş şəklin kəsiyi ilə müqayisə etməli.
- İstifadə olunan aktiv pəncərədə şəklin **Image analysis** (şəkil 6.1.) pəncərəsini açmaq. Şəklin histqramını öyrənmək və təsvir etmək. Orta və orta kvadratik hamarlıq qiymətlərini qeyd etmək.
- **Furier Spectrum** (şəkil 6-2, şəkil 6-3) imkanını seçmək. Spekrin xarakterinə görə şəkildə periodik strukturların olmasını yəqin etmək. Əgər varsa onda əsas xarakterli tezliyin qiymətini ölçməli (tezliyin ölçülməsinə **Freq** sıxmaqla keçmək olar). Mışın sol düyməsinin köməyi ilə şəkildə Furiye-obrazının şəklini göstərmək. İlk şəkil üzərində yerləşən  alət vasitəsilə ölçülmüş periodik şəkilləri Furiye-obrazın köməyi ilə alınmış nəticələrlə müqayisə etməli. Furiye-

obrazının şəklinə görə istiqamətlər arası bucaqların qiymətinin təyin edilməsi ( aləti ilə) və tədqiq olunan nümunə şəkillərinin uyğun kəsikləri arası bucağının qiymətləri ilə müqayisə etməli.



Şəkil 6-2. Şəkilin təhlili pəncərəsi. Bir ölçülü periodik strukturlu şəklin Furiye-spekrinin analizinin yerinə yetirilməsi.



Şəkil 6-3. Furiye-spekrinin köməyi ilə iki ölçülü periodik strukturlu şəklin analizinin yerinə yetirilməsi.

6.5. Yoxlama sualları

1. SZM şəkilləri üçün hansı növ təhriflər xarakterikdir və hansı səbəblərə görə bunlar əmələ gəlir?
2. SZM şəkillərinin hansı əsas filtrlənmə üsulları vardır?
3. Şəkillərin kəmiyyət xarakteristikalarının təyininin bəzi üsullarının adlarını deyin.
4. Hansı şəkillər üçün tezlik təsvirlərindən istifadə olunur?
5. Şəkil haqqında hansı məlumatı onun Furye obrazına görə almaq olar?

Laboratoriya işi № 7

Skanedici zond mikroskopunun bioloji obyektlərin tədqiqinə tətbiqi

7.1. İşin məqsədi	145
7.2. İşin məzmunu.....	146
7.3. Metodik göstərişlər	181
7.4. Tapşırıq	181
7.5. Yoxlama sualları	183

7.1. İşin məqsədi

Bioloji strukturların morfoloji parametrlərinin tədqiqi bioloqlar üçün əsas məsələlərdən biridir. Bəzi strukturların ölçüləri və forması onların fizioloji xüsusiyyətini təyin edir. Morfoloji verilənlərlə funksional xarakteristikaları uyğunlaşdıraraq insan və ya heyvan orqanizmlərində fizioloji balansın saxlanması, canlı hüceyrələrin iştirakı haqqında ətraflı məlumat əldə etmək olar.

Əvvəllər bioloqlar və həkimlər dərmanların yalnız optik və elektron mikroskoplarda öyrənilməsi imkanına malik idilər. Bu tədqiqatlar qeydə alınmış, rənglənmiş və tozlanma yolu ilə nazik metal örtüklə örtülmüş hüceyrələrin morfolojiyasının hər hansı şəklini verirdi. Müxtəlif təsirlər altında canlı obyektlərin morfolojiyasını və onun dəyişməsinə tədqiq etmək mümkün deyildi. Ancaq bu çox cəlbədicidir.

Skanedici zond mikroskopu hüceyrələrin, bakteriyaların, bioloji molekulların tədqiqinə yeni imkanlar açdı. Həqiqətə maksimal yaxın (canlı) şəraitdə hüceyrələrin, bakteriyaların, bioloji molekulların, DNK-nın tədqiq olunmasına imkan yarandı. SZM xüsusi tənzimləmə və rəngləyicilərsiz havada və ya maye mühitdə bioloji obyektləri tədqiq etməyə imkan verdi.

Hal hazırda SZM çoxşaxəli fənlərin öyrənilməsində, fundamental elmi tədqiqatlarda və həmçinin yüksək texnoloji tətbiqi işlərin tədqiqatlarında istifadə olunur. Bununla əlaqədar olaraq yüksək ixtisaslı mütəxəssislərə tələb daima artır.

Bu laboratoriya işində skanedici zond mikroskopu haqqında, onun əsaslarını, **SZM NanoEducator** mikroskopunun konstruksiyası və iş prinsipləri, tədqiqat üçün bioloji preparatların hazırlanması, turş-süd bakteriyaları kompleksinin birinci SZM şəkillərini almağı, ölçmələrin nəticələrinin işlənməsi və təqdimatının əsasları öyrəniləcəkdir.

Ləvazimat: Skanedici zond mikroskopu (Model SZMU-L5), zond, NanoEducator proqramı və kompüter.

Tədqiq üçün nümunə: turş-süd bakteriyaları ilə örtülmüş şüşə

səthi.

Laboratoriya işi bir neçə mərhələdə yerinə yetirilir:

1. Nümunənin hazırlanması hər bir tələbə tərəfindən fərdi qaydada yerinə yetirilir.
2. Müəllimin nəzarəti altında cihazların birində birinci şəklın alınması yerinə yetirilir, sonra hər tələbə özünün nümunəsini sərbəst tədqiq edir.
3. Təcrübənin nəticələrinin işlənilməsi hər tələbə tərəfindən fərdi qaydada aparılır.

İşə başlamazdan əvvəl amplitud-tezlik xarakteristikasından ən yaxşı (bir simmetrik maksimum) olan zond seçməli, tədqiq olunan nümunənin səthinin şəklını almali.

Laboratoriya işinin hesabatına daxil olmalıdır:

1. Nəzəri hissə (yoxlama suallara cavablar).
2. Təcrübə hissəsinin nəticələri (aparılmış tədqiqatın izahı, alınmış nəticələr və çıxarılmış nəticələr).

7.2. İşin məzmunu

1. Bioloji obyektlərin morfologiyasının tədqiqi üsulları.
2. Skanedici zond mikroskopu:
 - SZM konstruksiyası;
 - SZM növləri: STM, AQM;
 - SZM verilənlərin formatı, SZM verilənlərinin gözlə görünən şəklə salınması.
3. SZM tədqiqatları üçün nümunələrin hazırlanması:
 - bakteriya hüceyrələrinin morfologiyası və sturukturı;
 - SZM tətbiq etməklə morfologiyanın öyrənilməsi üçün pereparatların hazırlanması.
4. SZM **NanoEducator** konstruksiyası və idarəetmə proqramı ilə tanışlıq.
5. SZM şəkillərinin alınması
6. Alınmış şəkillərin işlənməsi və analizi. SZM şəkillərinin kəmiyyət xarakteristikaları.

Bioloji obyektlərin morfologiyasının tədqiq üsulları

Hüceyrələrin xarakterik diametri 10-20 mkm-dən ibarətdir, bakteriyaların diametri 0,5-dən 3-5mkm-ə kimidir ki, bu kəmiyyətlərin ölçüsü adi gözlə görünən kiçik hissəciklərin ölçülərindən 5 dəfə kiçikdir. Buna görə hüceyrələrin birinci dəfə öyrənilməsi yalnız optik mikroskopların yaranmasından sonra mümkün olmuşdur. XVII əsrin sonunda Antonio van Levenhuk ilk dəfə optik mikroskopu yaratdı, buna qədər insanlar xəstəlik yaradan mikrob və bakteriyaların mövcud olmasına şübhə etmirdilər [28].

Optik mikroskopiya

Hüceyrələrin öyrənilməsinin çətinlikləri onların rəngsiz və şəffaf olması ilə əlaqədardır. Buna görə də onların əsas sturukturlarının kəşfi yalnız boyaların təcrübədə daxil edilməsindən sonra mümkün olmuşdur. Boyalar şəklın kifayət qədər kontrastlı olmağına imkan verdi. Optik mikroskopun köməyi ilə bir-birindən 0,2 mkm kənarında yerləşən müxtəlif obyektləri fərqləndirmək olar, yəni optik mikroskopda kiçik obyektləri-bakteriyaları və mitoxondirləri fərqləndirmək olar. Hüceyrələrin daha kiçik elementlərinin şəkilləri təbii işığın dalğa xassəsinin təsiri nəticəsində təhrif olunur. Hüceyrələrin preparatlarının uzun müddətli qorunması üçün, fiksədən vasitələrlə hazırlıq işləri aparmaqla immobilizasiya edib və onların saxlanmasına nail olmaq lazımdır. Bundan əlavə hüceyrələrin fiksəedilməsi onların boyalanmasına imkanı artırır, yəni hüceyrə makromolekulları eninə tikməklə birləşdirilir, bu müəyyən vəziyyətdə onları stabilləşdirir və möhkəmləndirir. Çox hallarda fiksatorlar kimi aldehidlər və spirt götürülür (məsələn, qlutaraldehid və ya formaldehidlər zülalların sərbəst aminqrupları ilə kovalent əlaqənin yaradılmasını formalaşdıraraq qonşu molekulları bitişdirilir). Toxumanı fiksə etdikdən sonra çox nazik mikroatomlar formasında kəsirlər (1-dən 10 mkm qalınlıqlı). Bundan sonra şüşə predmetin səthində yerləşdirilir. Belə üsulla hazırlama zamanı hüceyrələrin və ya mikromole-

kulların strukturlarını zədələmək olar, buna görə sürətli soyutma üsulu daha məqsəddə uyğun hesab olunur. Soyuq kameralarda saxlanılan toxuma mikroatomlar formada kəsirlər. Hüceyrələrin kəsilmiş yerini boyayırlar. Bu məqsədlə əsasən üzvi rəngləyicilərdən (göy malaxit və i.a.) istifadə olunur. Bunların hər biri hüceyrə komponentlərinə müəyyən oxşarlığı ilə xarakterizə olunur, məsələn gematoksilin molekulları mənfi yüklənmiş oxşarlığa malik olur. Bu da hüceyrələrdə DNK-nı aşkar etməyə imkan verir. Əgər hər hansı molekul hüceyrədə az miqdarda təmsil olunursa, onda işıq şüalanması mikroskopiyadan istifadə olunması çox münasibdir.

Flüoressensiya mikroskopiyası

İşıq şüalanması verən boyalar müəyyən dalğa uzunluqlu işıq dalğalarını udur və böyük dalğa uzunluqlu işıq dalğalarını şüalandırır. Əgər belə maddəni rəngləyicinin udduğu işığın dalğa uzunluğuna bərabər işıqla şüalandırmaqla və bundan sonra rəngləyicinin şüalandırdığı işıq şüalarının dalğa uzunluğuna bərabər işıq keçirən filtr istifadə etmək və işıq şüalanması molekulu qaranlıq sahədə işıqlanmaya görə aşkarlamaq olar. İşıq şüalanmasının yüksək intensivliyi belə molekulların xarakteristik xüsusiyyətlərindəndir. İşıq şüalanması zamanı boyaların hüceyrələri rənglənməsi üçün istifadə olunan xüsusi işıq şüalanma mikroskoplarının istifadə olunmasını tələb edir. Belə mikroskop adı optik mikroskopa oxşayır, burada güclü işıqlandırıcıdan yaranan işıq iki filtdən keçərək-biri nümunə qarşısında işıqlandıran hissəciklərin tutulması üçün, digəri o biri nümunədən alınan işığın filtrasiyası üçün istifadə olunur. Birinci filtr elə seçilir ki, onun buraxdığı işıq dalğaları götürülmüş işıq şüalanması rəngləyicini həyəcanlandırmış olsun; bu zaman ikinci filtr düşən işıq şüasının qarşısını alır və işıq şüalanması rəngləyicinin şüalandırdığı dalğanın uzunluğuna bərabər işıq dalğası buraxır.

İşıq şüalanması mikroskopiyası spesifik zülalların və ya digər molekulların aşkarlanması zamanı tez-tez istifadə olunur,

ışıq şüalanması boyadıcılarla kovalent əlaqəyə girdikdən sonra işıq şüalanması yaranır. Bu məqsədlə adətən iki rəngləyici-ışıq şüalanması istifadə olunur. Ağ-mavi işıqla həyəcanlandırdıqdan sonra sarı-yaşıl şüalanmanı və sarı-yaşıl işıqla həyəcanlandırdıqdan sonra qara-qırmızı şüalanmanı yaradan rodamin yaranır. İşıq şüalanması elementin və rodaminin boyanması üçün tətbiq edərək molekulların müxtəlif paylanmasını almaq olar.

Qara sahə mikroskopiyası

Hüceyrə strukturların detallarına baxılmasının ən sadə üsulu müxtəlif hüceyrə komponentlərinin səpdiyi işığı müşahidə etməkdir. Qara sahə mikroskoplarında işıqlandırıcıdan çıxan şüalar kənardan istiqamətlənir və bu zaman yalnız səpilmiş şüalar mikroskopun obyektivinə düşür. Buna uyğun olaraq hüceyrə qara sahədə işıqlanmış obyekt kimi görünür. Qara sahə mikroskopiyasının əsas üstünlüklərindən biri hüceyrələrin bölünmə və miqrasiyası prosesində hərəkətini müşahidə etmək imkanının olmasıdır. Hüceyrələrin hərəkəti çox yavaş olduğuna görə real vaxtda onları müşahidə etmək çox mürəkkəbdir. Bu halda ardıcıl kadrlar üzrə mikro kino çəkilişi və ya video çəkiliş istifadə olunur. Ardıcıl kadrlar bu zaman vaxta görə bölünür. Adi hallarda həmin yazılmış yazıların normal sürətlə şəkillərin aydınlaşdırılması sürətləndirilir.

Son illər videokamera və şəkillərin işlənməsi texnologiyası optik mikroskopların imkanlarını xeyli artırmışdır. Bunların tətbiq olunması insan fiziologiyası xüsusiyyətləri ilə bağlı çətinliklərin aradan qaldırılmasına imkan yaranmışdır. Bunlar aşağıdakılardan ibarətdir:

1. Göz adı şəraitdə zəif işığı qəbul etmir.
2. Göz işıqlıq fonunda işığın intensivliyinin çox böyük olmayan fərqlərdə qeydə almaq qabiliyyətində deyil.

Bu problemlərdən birincisi mikroskopa yüksək həssaslığa malik video kamera birləşdikdən sonra aradan qalxmış olur. Bu imkan verir ki, hüceyrələrin uzun müddət aşağı işıqlanması və parıltılı işığın təsirinə baxmayaraq müşahidə etmək olar.

Şəklin işlənməsi sisteminin olması canlı hüceyrələrdə fluoro-sensiya edici molekulun olmasının öyrənilməsi üçün xüsusi ilə vacibdir. Şəkli videokamera vasitəsilə elektron siqnallar formasında yaradıb, onu müəyyən üsulla ədədi siqnala çevirmək, kompüterə istiqamətləndirmək olar və sonra faydalı məlumatı əldə etmək üçün əlavə olaraq işlənməsi lazımdır.

Kompüter interferensiyası mikroskopiyasının köməyiylə yüksək kontrastın əldə olunması imkan verir ki, çox kiçik obyektləri, məsələn, diametri işığın dalğa uzunluğunun onda bir hissəsindən kiçik (0,025 mkm) olan ayrıca mikroborucuqları müşahidə etmək olsun. Ayrıca mikroborucuqları işıq şüalanması mikroskopiyasının köməyiylə də görmək olar. Hər iki halda şəkli dəyişdirən difraksiya effekti qaçılmazdır. Mikroborucuqların diametri 0,2 mkm qədər böyümüş olur, bu isə hər hansı mikroborucuqların bir neçə mikroborucuqlar dəstəsindən fərqləndirməyə imkan vermir. Bu məsələnin həlli görünən işıq şüasının dalğa uzunluğundan kiçik dalğa uzunluğuna malik olan elektron dəstəsindən istifadə edən və daha böyük ayırd etmə qabiliyyətinə malik olan elektron mikroskopunu zəruri edir.

Elektron mikroskopiya

Dalğa uzunluğu və ayırd etmə qabiliyyəti arasında qarşılıqlı əlaqə elektronlar üçün də saxlanılır. Ancaq elektron mikroskopu üçün ayırd etmənin sərhədi difraksiya sərhədindən əhəmiyyətli dərəcədə aşağıdır. Elektronun sürətinin artması ilə ona uyğun olan dalğanın (de-Broyl dalğası) dalğa uzunluğunun azalmasına səbəb olur. Elektron mikroskopunda 100 KV gərginlikdə elektronların dalğa uzunluğu 0,04 nm bərabər olur. Nəzəriyyəyə görə belə mikroskopun ayırd etməsi imkanı 0,002 nm sərhədi daxilindədir. Ancaq real şəraitdə elektron linzaların ədədi apertur qiymətlərin kiçik olması nəticəsində müasir elektron mikroskoplar ən yaxşı halda 0,1 nm ayırd etmə imkanına malikdir. Nümunənin hazırlanması çətinliyi şüalanmanın

təsiri nəticəsində onun zədələnməsini, normal ayırd etmə imkanını aşağı salır. Bu bioloji obyektlər üçün 2 nm-dir (bu işıq mikroskopun ayırd etməsindən 100 dəfə yuxarı deməkdir).

Elektron mikroskopunda (EM) elektronların mənbəyi közərdilən teldən ibarət katod olub, 2 metrə yaxın silindrik sütunların yuxarısında yerləşir. Elektronların molekullarla havada toqquşarkən səpilməsinin qarşısını almaq üçün sütunda vakuum yaradılır. Katod telin şüalandırdığı elektronlar yaxın anod vasitəsilə sürətləndirilir və kiçik deşikdən daxil olaraq sütunun aşağı hissəsindən keçərək elektron şüasını yaradır. Sütun boyunca müəyyən məsafədə yerləşmiş dairəvi maqnitlər optik mikroskopda işıq şüalarını fokuslaşdırın şüşə linzalara oxşar olaraq elektron şüasını fokuslaşdırır. Bunlar maqnit linzaları adlanır. Elektron dəstəsinin yolunda, hava sütun daxilində nümunə yerləşdirilir. Nümunədən keçən elektronların bir hissəsi verilmiş sıxlığa malik maddə hissəsindən səpilir, elektronların qalan hissəsi fokuslaşdırılır və fotolövhdə və ya fosforlaşdırılmış (optik mikroskopda şəklin formalaşmasına oxşar olaraq) ekranda şəkli formalaşdırır.

Elektron mikroskopunun əsas çatışmazlıqlarından biri bioloji nümunələrin hazırlanmasının xüsusi qaydalarla işlənməsinin zəruriliyidir. Birincisi, onlar əvvəlcə qlutar aldehidlə fiksə olunur, sonra osmi turşusu ilə ikiqat təbəqə və zülallarla əlaqələndirilir və stabilləşdirilir. İkincisi, elektron aşağı daxil olma qabiliyyətinə malikdir, buna görə də çox nazik kəsiklər etmək lazımdır. Bunun üçün nümunə qurudulur və qatran vasitəsi ilə hopdurulur. Üçüncüsü, nümunənin kontrastlığını artırmaq üçün ağır metal, osmi, uran və qurğuşun duzları ilə birlikdə işlənməsini hazırlayırlar.

Səthin üçölçülü şəkilini almaq üçün skanedici elektron mikroskopu (SEM) istifadə olunur, burada nümunə səthindən elektronların səpilməsi və ya şüalanması baş verir. Bu halda nümunə fiksə olunur, qurudulur və ağır metal nazik təbəqə ilə örtülür, sonra yığcam elektronlar dəstəsi ilə skan edilir. Bu

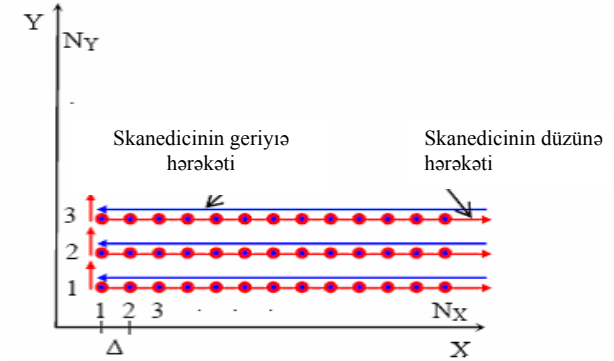
zaman səthin şüalanması zamanı səpələnən elektronların miqdarı qiymətləndirilir. Alınmış qiymət birinci şüaya nəzərən sinxron hərəkət edən və ekranın monitorunda şəklın formalaşmasında istifadə olunan ikinci şüanın intensivliyinə nəzarət etmək üçün istifadə olunur. Bu üsulun ayırdetmə imkanı 10nm-dir və bu hüceyrə daxili orqanellərin öyrənilməsinə tətbiq oluna bilməz. Bütün bu üsulların əsas və mühüm çatışmazlığı nümunələrin hazırlanmasının çox vaxt aparması, mürəkkəb və hazırlanmasının yüksək qiymətli olmasıdır.

Skanedici zond mikroskopiya

Skanedici zond mikroskopunda nümunə səthinin skan edilməsi üçün, elektron şüa və ya optik şüalanma əvəzinə zond iynə istifadə edilir. Obrazla ifadə etsək demək olar ki, optik və ya elektron mikroskoplarda nümunəyə baxılırsa, SZM-də isə nümunə səthi toxunmaqla tədqiq skan edilir. Nəticədə obyektin müxtəlif mühitlərdə, vakuumda, havada və mayədə üç ölçülü şəklını almaq olar. Bioloji tədqiqatlar üçün adaptasiya olunmuş xüsusi konstruksiyalı SZM vasitəsi ilə optik müşahidə etməklə eyni zamanda canlı hüceyrələri maye mühitdə, həmçinin qeyd olunmuş preparatları havada skan etmək olar.

Skanedici zond mikroskopu

Skanedici zond mikroskopunun adında onun iş prinsipi təsvir olunub-nümunə səthinin skan edilməsi, bu zaman zondun səthlə qarşılıqlı təsir dərəcəsiindən asılı olaraq səthin nöqtəvi oxunması baş verir. Skanetmə sahəsini və $N_x \cdot N_y$ nöqtələrin sayını vermək olar. Nöqtələrin sayının çox verilməsi səthin şəklının alınması imkanını yaxşılaşdırır. Oxunan siqnalın nöqtələr arası məsafəsinə skanetmənin addımı deyilir. Skanetmə addımı öyrənilən səthin (şəkil 7-1) detallarından çox kiçik olmalıdır. Skanetmə prosesində zondun yerdəyişməsi düzünə və əks istiqamətdə (skanetmənin sürətli istiqamətində) xətti olaraq həyata keçirilir, yeni xəttə keçid perpendikulyar istiqamətdə (skanetmənin yavaş istiqamətində) həyata keçirilir.



Şəkil 7-1. Skanetmə prosesinin sxematik şəklı (skanedicinin gedışində siqnalın oxunması baş verir).

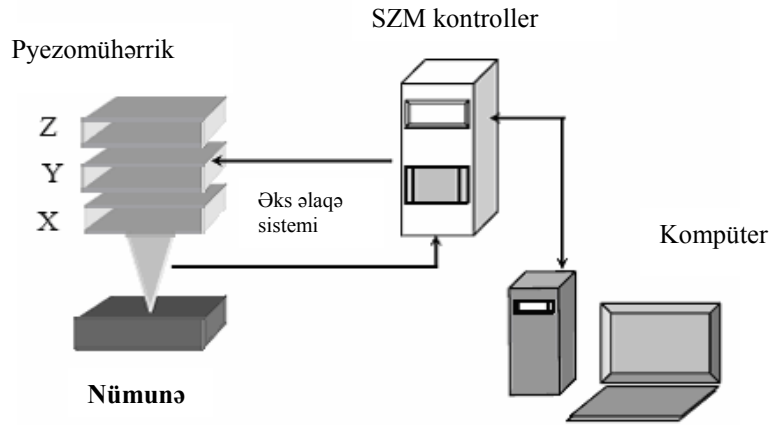
Oxunan siqnalın xarakterindən asılı olaraq skanedici mikroskopların müxtəlif adlı və təyinatlı növləri vardır.

- atom-qüvvə mikroskopu (AQM) zondun atomu ilə nümunənin atomları arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsinin oxunmasına əsaslanır;
- Skanedici tunel mikroskopu (STM) keçirici nümunə və keçirici zond arasında əmələ gələn tunel cərəyanının oxunmasına əsaslanır;
- maqnit-qüvvə mikroskopu (MQM) zond və maqnit səthlə örtülmüş nümunənin maqnit xassələrinin aşkar olunması üçün zond və nümunə arası qarşılıqlı təsir qüvvəsinin oxunmasına əsaslanır;
- elektrostatik qüvvə mikroskopu (EQM) nümunə səthi üzərində elektrik potensialın paylanması şəklını almağa imkan verir. Ucu nazik keçirici təbəqə ilə örtülmüş zond istifadə olunur (qızıl və ya platin olan) və i.a.

SZM konstruksiyası

SZM aşağıdakı komponentlərdən ibarətdir (şəkil 7-2): zond, tədqiq olunan nümunənin səthi üzərində X, Y və Z istiqamətlərində zondun yerdəyişməsi üçün pyezoelektrik gətirmə qur-

ğuları, əks əlaqə dövrəsi, skanetmə prosesinin idarə olunması və şəklın alınması üçün istifadə olunan kompüter.

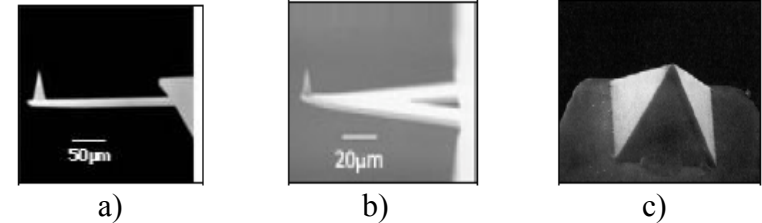


Şəkil 7-2. Skanedicı zond mikroskopu.

Zond çevirici-preparatların skanedilməsini həyata keçirən qüvvə zond mikroskopunun komponentidir. Zond çevirici kantileverdə (yaylı konsol) yerləşməklə düzbucaqlı (I-şəkilli) və ya üçbucaqlı (V-şəkilli) növləri (şəkil 7-3) vardır, adətən konus və ya piramida formalı olub sonunda iti uclu zond yerləşir (şəkil 7-3). Kantileverin digər ucu altlıq ilə əlaqələndirilir (çiplə). Zond çeviriciləri silisium və ya nitrid silisiumdan hazırlanır. Kantileverin əsas xarakteristikası qüvvə sabiti (sərtlük əmsalı) olub qiymətlərini 0,01 N/m-dən 10-20 N/m ala bilər. Bioloji obyektlərin tədqiqi üçün sərtliyi 0,01-0,06 N/m olan “yumşaq” zondlar istifadə olunur.

Pyezoelektrik gətirmə və ya skanedicilər – çox kiçik məsafələrdə zondun səth üzərində və ya nümunənin özünün zonda nəzərən yerdəyişməsinin idarə olunmasıdır. Pyezoelektrik gətirmə qurğusunda pyezokeramik materiallar istifadə olunur, bu materiallar onlara elektrik gərginliyi tətbiq olunduqda öz ölçülərini dəyişmiş olur. Elektrik sahəsinin təsiri altında həndəsi

parametrlərinin dəyişmə prosesinə əks pyzeoeffekt deyilir. Ən çox yayılmış pyezomaterial kimi sirkonat-titan-qurğuşundan istifadə olunur.



Şəkil 7-3. Elektron mikroskopunun köməyilə alınmış AQM zond çeviricilərin primada formalı şəkilləri a-I – oxşar növlü, b-V - oxşar növlü, c - kantileverin ucunda piramida formalı növlü.

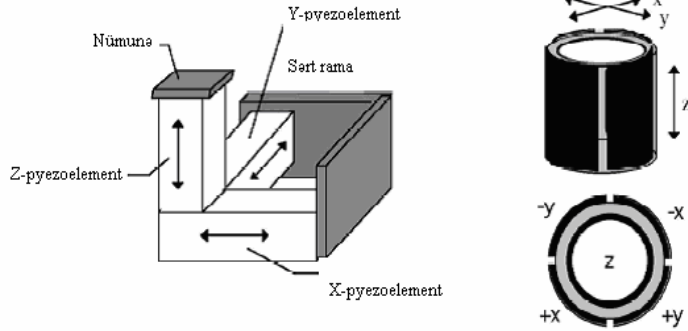
Konstruksiyası pyezokeramikadan olan x, y (nümunənin lateral müstəvisində) və z (şaquli ox üzrə) üç koordinat üzrə yerdəyişməni təmin edən cihaz skanedicı adlanır. Skanedicilərin müxtəlif növləri vardır. Bunlardan ən geniş yayılmışlar üç ayaqlı və boru şəkilli skanedicilərdir.

Üç ayaqlı skanedicidə üç koordinat üzrə yerdəyişməni ortoqonal struktur əmələ gətirən üç asılı olmayan pyezokeramik qələmlər təmin edir.

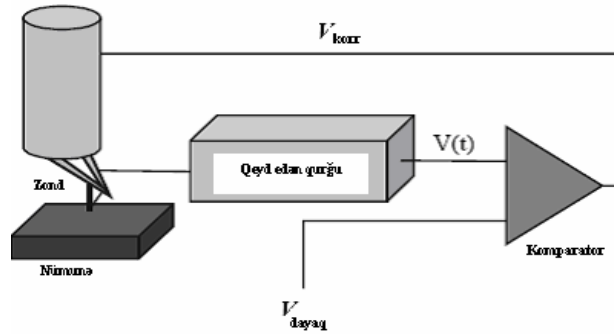
Boru şəkilli skanedicidə boruların idarə olunması uyğun elektrodla verilən gərginliyin hesabına içi boş pyezoelektrik boru - XZ və ZY müstəvilərində əyilir və Z oxu istiqamətində uzanır və ya sıxılır. XY müstəvisində idarə olunması üçün istifadə olunan elektrodla borunun səthində yerləşdirilmişdir, Z dən X-ə və Y-ə yerdəyişmənin idarə olunması üçün elektrodla eyni gərginlik verilir.

Əks əlaqə dövrəsi-SZM idarəetmə elementləri çoxluğu olub bunun köməyilə skan edilərkən zond nümunə səthindən fiksə olunmuş məsafədə saxlanılır (şəkil 7-5), skanetmə zamanı zond müxtəlif relyefli nümunə səthinin müxtəlif hissələrində ola bilər, bu zaman zond və nümunə arasındakı Δz məsafəsi dəyişmiş olacaq. Buna uyğun olaraq zond və nümunə arasındakı

qarşılıqlı təsir kəmiyyətinin qiyməti dəyişmiş olacaqdır.

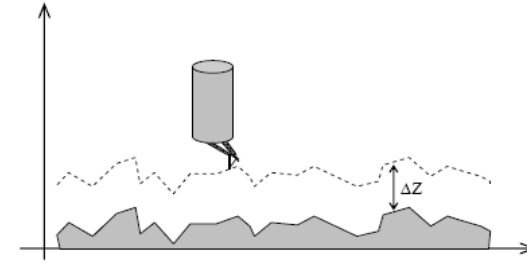


Şəkil 7-4. Skanedicilərin konstruksiyaları: a) üç ayaqlı b) borulu şəkili.



Şəkil 7-5. Skanedicici zond mikroskopunun əks əlaqə sxemi.

Zond səthə yaxınlaşarkən zond-nümunə qarşılıqlı təsir qüvvəsi artmış olur, $V(t)$ qeydetmə qurğusunun siqnalı artmış olur, bu gərginlik vahidləri ilə ifadə olunur. Komparator $V(t)$ siqnalını V_{dayaq} dayaq gərginliklə müqayisə edərək V_{korr} korrekte edilən siqnal skanediciyə verilir və zond nümunədən uzaqlaşdırılır. Dayaq gərginlik qeydetmə qurğusunun siqnalına uyğun olub bu nümunədən verilmiş məsafədə zondun olduğunu göstərir. Skanetmə prosesində zond və nümunə arasındakı bu məsafəni saxlamaqla əks əlaqə sistemi zond və nümunə qarşılıqlı təsir qüvvəsinin verilmiş qiymətdə saxlayır.



Şəkil 7-6. Zond - nümunə qarşılıqlı təsir qüvvəsinin əks əlaqə sistemində sabit saxlanması prosesində zondun hərəkətinin trayektoriyası.

Şəkil 7-6 da zond və nümunə arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsinin sabit qalarkən zondun nümunəyə nəzərən hərəkətinin trayektoriyası göstərilmişdir. Əgər zond çuxur üzərindədirsə skandeciyə verilən gərginlik zonu aşağı salaraq skandecini uzadır.

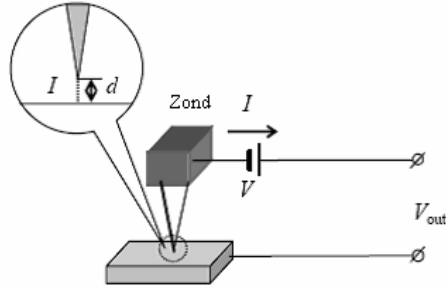
Əks əlaqə dövrəsinin zond-nümunə arasındakı məsafənin dəyişməsinə uyğun sürətli münasibət (zond-nümunə qarşılıqlı təsiri) əks əlaqə dövrəsinin K sabiti ilə təyin olunur. K -nın qiyməti konkret SZM-in konstruksiyasının xüsusiyyətindən (skandecinin konstruksiyası və xarakteristikası), SZM-in iş rejimindən (skanetmə sahəsinin ölçüləri, skanetmənin sürəti və s.), həmçinin tədqiq olunan səthin xüsusiyyətlərindən asılıdır (relyefin xüsusiyyətlərinin məşabı, materialın möhkəmliyi və s.)

SZM müxtəlifliyi

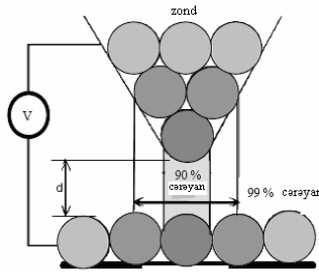
Skandecici tunel mikroskopu. STM-də tunel cərəyanı qeydetmə qurğusu (şəkil 7-7) ilə ölçülür, bu cərəyan metal zondla nümunə arasında yaranır, nümunə səthində potensialdan və səthin relyefindən asılı olaraq dəyişir. Zond ucu itilənmiş iynə olub, ucunun əyrilik radiusu bir neçə nm ola bilər. Zond üçün material kimi adətən yüksək möhkəmliyə və kimyəvi davamlığa malik metal volfram və ya platin istifadə olunur.

Keçirici zond və keçirici nümunə arasında gərginlik tətbiq edilir. Zondun ucu nümunədən 10 \AA məsafədə olarkən gərginliyin işarəsindən asılı olaraq nümunədən elektronlar aralıqdan

keçərək zonda və ya əksinə tunel edirlər (şəkil 7-8).



Şəkil 7-7. Tunel zond çeviricisinin sxemi.



Şəkil 7-8. Zondun ucunun nümunə ilə qarşılıqlı təsirinin sxematik şəkli.

Bu zaman yaranan tunel cərəyanı qeyd edən qurğuda ölçülür. Bu I_T kəmiyyətinin qiyməti tunel kontaktına tətbiq olunan V gərginliyi ilə mütənasib olub iynə ilə nümunə arasındakı d məsafəsindən əkspotensial asılıdır.

Beləliklə, zondun ucu ilə nümunəyə qədər olan d məsafəsinin kiçik dəyişmələrinə I_T tunel cərəyanının eksponensial olaraq böyük dəyişməsinə səbəb olur (fərz olunur ki, V gərginliyi sabit saxlanılır). Tunel zond çeviricisinin həssaslığı kifayət edir ki, hündürlüyün $0,1$ nm-dən kiçik qiymətinin dəyişməsinə qeyd etmək və bərk cismin səthində atomların şəklini almaq olsun.

Atom-qüvvə mikroskopu

Atom-qüvvə qarşılıqlı təsir zond çeviricinin ən çox yayılmışı yaylı kantilever olub, zondun sonunda yerləşmişdir. Nümunə

və zond arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsinin nəticəsində kantileverin əyilməsi baş verir, bu optik sxemin köməyiylə qeyd edilərək ölçülür.

Qüvvə çeviricinin iş prinsipi zondun atomları ilə nümunənin atomları arasında yaranan atom qüvvələrinin istifadə olunma-sına əsaslanır. Zond və nümunə arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsinin dəyişməsi, kantileverin əyilməsi qiyməti də dəyişmiş olacaq və belə dəyişməni optik qeydiyyat sxemində ölçüləcək. Beləliklə, atom-qüvvə çeviricisi yüksək hissetmə qabiliyyətli iti uclu zond olub, ayrıca atomlar arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsini qeyd etməyə imkan verir.

Kiçik əyilmələr olarkən zond və nümunə arasındakı F qüvvəsi ilə kantileverin sonunun x meyl etməsi arasındakı münasibət Hük qanunu ilə təyin olunur: $F=-kx$ burada k kantileverin (sərtlilik əmsalı) qüvvə sabitidir.

Məsələn, əgər k əmsalı 1 N/m tərtibində kantileverdən istifadə olunarsa zond-nümunə qarşılıqlı təsir qüvvəsinin $0,1$ nano-nyuton tərtibində təsiri altında kantileverin meyli $0,1$ nm olar.

Çox kiçik dəyişmələrin ölçülməsi üçün adətən optik yerini dəyişən çevirici istifadə olunur (şəkil 7-9). Optik çevirici yarımkeçirici lazer və dörd seksiyalı fotodioddan təşkil olunmuşdur. Kantilever əyilərkən ondan əks olunan lazer şüası fotodetektorun mərkəzinə nəzərən yerini dəyişmiş olur. Beləliklə, kantileverin əyilməsini yuxarı (T) və aşağı (B) yarım fotodetektorun işıqlanmasının dəyişməsinə nəzərən təyin etmək olar.

Zond və nümunə arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsinin zond-nümunə məsafəsindən asılılığı

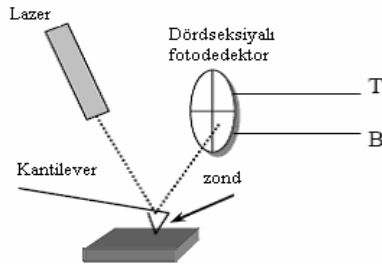
Zond nümunəyə yaxınlaşarkən əvvəlcə cəzətmə qüvvələrinin təsiri olduğuna görə (Van-der Waals qüvvələri) səthə cəzə olunur. Zondun daha da səthə yaxınlaşması zondun sonundakı atomların və nümunə səthindəki atomların elektron örtükləri bir-birini örtməyə, bu isə itələmə qüvvələrinin yaranmasına gətirib çıxarır. Zond və nümunə arasında məsafənin azalması itələnmə qüvvələrinin həlledici rol oynamasına səbəb olur.

Ümumi halda atomlararası qarşılıqlı təsir qüvvəsinin F atomlararası R məsafəsindən asılılığı

$$F(R) = -\frac{a}{R^m} + \frac{b}{R^n}$$

kimidir.

Burada a , b sabitləri qüvvət göstəriciləri olan m və n atomların növündən və kimyəvi rəbitənin tipindən asılıdır. Van-der-Vaals qüvvələr üçün $m = 7$, $n = 3$. $F(R)$ keyfiyyət asılılığı Şəkil 7-10-da göstərilmişdir:



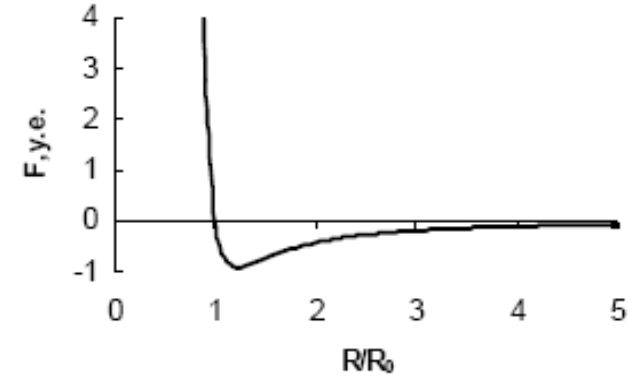
Şəkil 7-9. Qüvvə çeviricisinin sxemi.

SZM verilənlərin formatı, SZM verilənlərin vizualizasiyası

Optik mikroskopda tədqiq edərkən səthin morfolojiyası haqqında verilənlər səth hissəsinin böyüdülmüş şəkilləri kimi təsvir olunur. SZM-in köməyiylə alınmış məlumat iki ölçülü A_{ij} tam ədədlər massivi şəklində saxlanılır. Hər bir ij qiymətinə skanetmə sahəsi daxilində, səthin müəyyən bir nöqtəsi uyğun gəlir. Bu massivin ədədlərinin qrafik şəkildə göstərilməsi-SZM-də skanedilmiş şəkillər adlanır.

Skanedilmiş şəkillər iki ölçülü (2D), həmçinin üç ölçülü (3D) ola bilər. 2D vizualizasiyası zamanı $z=f(x,y)$ səthinin hər bir nöqtəsinə, səthin hündürlük nöqtəsinə uyğun olaraq müəyyən rəng tonu uyğun qarşı qoyulur (şəkil 7-11a). 3D vizualizasiyası zamanı $z=f(x,y)$ səthinin şəkli aksionometrik perspektivdə, piksellər və ya relyefin xətlərinə əsaslanan müəyyən formanın köməyiylə qurulur. 3D şəkillərin rənglənməsinin

ən yaxşı effektiv üsullarından biri səthin işıqlanması şəraitinin səth üzərində fəzanın hər hansı nöqtəsində yerləşmiş nöqtəvi mənbələrlə modelləşməsidir (şəkil 7-11b). Bu zaman relyefin ayrıca kiçik xüsusiyyətlərini qeyd etmək mümkündür.



Şəkil 7-10. Atomlararası qarşılıqlı təsir qüvvəsinin məsafədən asılılığı.

SZM-də tədqiqat üçün nümunələrin hazırlanması

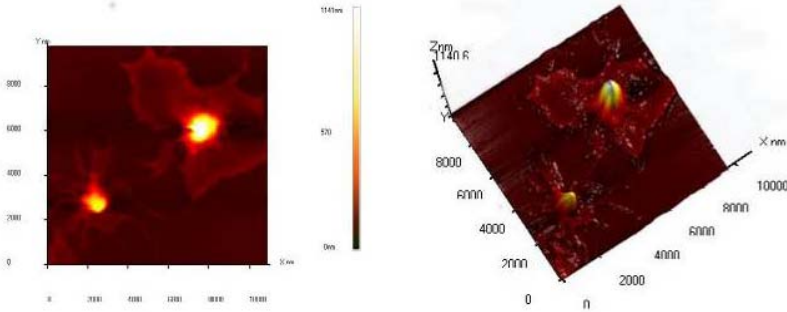
Bakteriya hüceyrələrinin morfolojiyası və strukturu

Bakteriya-bir hüceyrəli mikroorqanizmlərdən olub funksional fəaliyyətlərinin çox formalığını təyin edən müxtəlif formalara və mürəkkəb struktura malikdir. Bakteriya üçün dörd əsas xarakterik formalar vardır: sferik (şara oxşar), silindrik (çubuq şəkilli), əyilmiş və sapa oxşar [29].

Yumru (kokki) bakteriyalar bölünmə müstəvisindən və ayrıca xüsusiyyətlərinin yerləşməsindən asılı olaraq mikrokokkilərə (ayrıca yerləşən kokki), diplokokkilərə (cüt kokkilər), streptokokkilərə (kokkilər zənciri), stafokokkilərə (üzüm salxımı şəklində oxşar), tetrakokkilərə (dörd kokkilərdən təşkil olunmuş) və sarçinlərə (8 və ya 16 yumru bakteriyalar paketi) bölünürlər.

Çubuqşəkilli diplo və ya stepto bakteriyaları bir hüceyrə şəklində mövcuddurlar.

Əyilmiş-vibrion, spiral və spiroxeti. Vibrionlar asanca əyilən çubuqlar şəklində, spiral və spiroxeti-bir neçə spirala hörülmüş və əyilmiş formada olurlar.



Şəkil 7-11. İnsan qanının limfositləri. a) 2D şəkli, b) 3D kənardan işıqlanan şəkli.

Bakteriyaların ölçüləri 0,1-dən 10mkm kimi dəyişir. Bakteriya hüceyrələrinin tərkibinə kapsula, hüceyrə divarı, sitoplazma membranı və sitoplazma daxildir. Sitoplazmaya nukleotidlər, ribosomlar və i.a. daxildir. Bəzi bakteriyalar təşəkili və nazik tükə təchiz olunub. Bir sıra bakteriyalar əlverişli forma əmələ gətirir. Hüceyrələrin ilkin eninə ölçülərinin artması onu miləoxşar formaya salır.

Optik mikroskopda bakteriyaların morfologiyasını öyrənmək üçün bunlardan sağ ikən və ya anil rəngləyici ilə rənglənmiş fiksə olunmuş örtüklər formasında preparatlar hazırlanır. Təşəkili ayaqlı, hüceyrə divarı, nukleotid və müxtəlif sitoplazma birləşmələrinin aşkarlanması üçün xüsusi rənglənmə üsulları mövcuddur.

Bakteriya hüceyrələrinin morfologiyasının SZM-də tədqiqi üçün preparatların rənglənməsi tələb olunmur. SZM bakteriyaların formasını və ölçülərini yüksək dəqiqliklə ayırdetməyə imkan verir. Preparatların dəqiq hazırlanması və kiçik ayrilik radiusa malik zondun istifadə olunması təşəkili ayaqlı bakteriyaların aşkarlanmasını mümkün edir. Eyni zamanda bakteriya

hüceyrə daxili divarının sərtliyinin böyük olması hüceyrə daxili quruluşu əl ilə yoxlamaq olmaz, bunu bəzi heyvan hüceyrələrində etmək mümkündür.

SZM-də morfologiyayı öyrənmək üçün preparatların hazırlanması

SZM-də birinci iş təcrübəsi üçün mürəkkəb hazırlama tələb olunmayan bioloji preparat seçmək məqsədə uyğundur. Tamamilə şor (xəmir turşusu) kələmdən və ya turş-süd məhsullarından olan xəstə turş-süd bakteriyalarının asan əldə olunanları münasibdir.

Havada SZM tədqiqatlarının aparılması üçün tədqiq olunan obyekt saxlayıcının səthində, məsələn qoruyucu şüşədə möhkəm yerləşdirmək tələb olunur. Bundan əlavə suspenziyada bakteriyaların sıxlığı elə olmalıdır ki, hüceyrələr saxlayıcıda oturdularkən bir-birinə yapışmasın və onlar arasındakı məsafə böyük olmasın ki, skanetmə zamanı bir kadrda bir neçə obyekt götürmək olsun. Əgər nümunənin hazırlanması rejimi düzgün seçilibsə, bu şərt yerinə yetiriləcəkdir. Əgər bakteriya olan məhlulun damcısını saxlayıcının üzərinə çəkilibsə onda tamamilə onların ardıcıl olaraq çökdürülməsi və adqeziya baş verəcəkdir. Bu zaman hüceyrələrin məhlulda olan konsentrasiyasını və çökdürmə vaxtını əsas parametrlər kimi hesab etmək olar. Suspenziyada bakteriyaların konsentrasiyası optik standartına görə tutqunluqla təyin edilir.

Bizim halda inkubasiya vaxtı parametrlər kimi əsas rol oynayacaqdır. Şüşə səthində məhlul damcısının çox saxlanması nəticəsində bakteriya hüceyrələrinin sıxlığı daha böyük olacaqdır. Bununla bərabər, əgər maye damcı qurumağa başlayarsa, onda preparat məhlulun komponentləri ilə əhatə olunması hesabına daha çox çirklənmiş olacaqdır. Bakteriya hüceyrələri olan məhlul damcısı şüşə səthində çəkilir. 5-60 dəqiqə (məhlulun tərkibindən asılı olaraq) gözləməli və bundan sonra damcının qurumasını gözləmədən distillə olunmuş su ilə diqqətlə yuyulur (preparat pinsetlə stəkana bir neçə dəfə batırılır).

Preparat qurudulduqdan sonra SZM-də ölçmələr üçün hazırdır.

Misal üçün şor-turş kələmdən turş-süd bakteriyalar hazırlanır. Qoruyucu şüşədə qurumağa başlayan məhlul damcısını 5 dəqiqə, 20 dəqiqə və 1 saat(damcı qurumağa başlayanda) saxlanılır. SZM kadrları şəkil 7-12, Şəkil 7-13 göstərilmişdir.

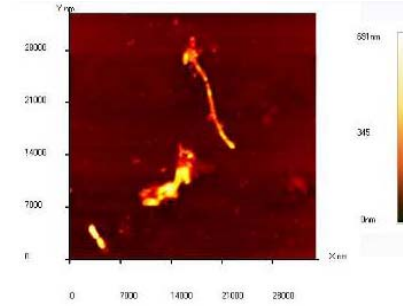
Şəkildən görünür ki, verilmiş məhlul üçün optimal inkubasiya vaxtı 5-10 dəqiqədir. Məhlul damcısının saxlayıcının səthində saxlanma vaxtının uzanması bakteriya hüceyrələrinin yapışmasına (örməsinə) gətirib çıxarır. Məhlulun damcısı qurumağa başlayarkən şüşənin səthinə məhlul komponentlərinin çökməsi müşahidə olunur və bunu sonradan yumaq mümkün deyildir.

Seçilmiş preparatlardan birində turş-süd bakteriyaların necə özünü aparması, verilmiş halda onlar üçün hansı forma xarakterik olması göstərilmişdir (şəkil 7-15).

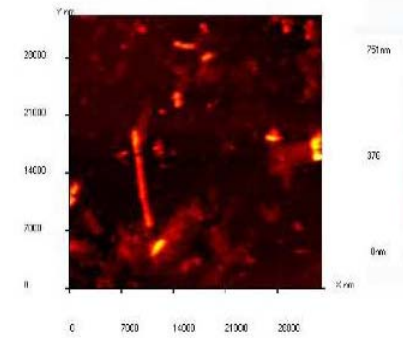
Duzlu məhlul üçün bakteriyaların xarakteristik çubuqvari forması zəncir şəklinə yerləşmişdir.

SZM NanoEducator tədris proqramının alətlərini istifadə edərək bakteriya hüceyrələrinin ölçülərini təyin etmək olar. Onların ölçüləri, məsələn, 0,5X1, 6 mkm-dən 0,8X3,5 mkm kimi təşkil edirlər. Alınmış nəticələri bakteriyaların Berci təyinedicisinə [30] əsasən verilmiş verilənlərlə uyğunlaşdırılır.

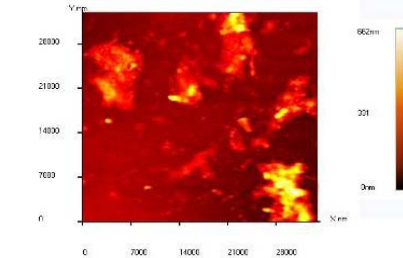
Turş-süd bakteriyaları laktobakteriyalara (lactobacillus) aiddir. Hüceyrənin adətən düzgün forması çubuq şəkilli formada olur. Çubuqlar uzun olub adətən qısa zəncirdə demək olar ki, yumru şəkilli olurlar. Ölçüləri 0,5-1,2x1,0-10 mkm olur. Nadir hallarda tel şəkilli ayaqlı olması hesabına bakteriyalar hərəkətdədir. Bu mübahisə doğurmur. Ətraf mühitdə geniş yayılmış heyvan və bitki mənşəli yemək məhsullarında xüsusilə tez-tez rast gəlinir. Turş-süd bakteriyalar normal mədə həzm etmə taktının mikroflorasına daxildir. Məlumdur ki, turş kələmdəki olan vitaminlər bağırsaqların mikroflorasının yaxşılaşmasına təsir edir.



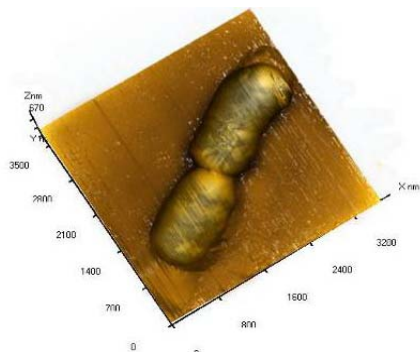
Şəkil 7-12. SZM - in köməyilə qoruyucu şüşədə turş - süd bakteriyaların alınmış şəkli. Məhlulun inkubasiya vaxtı 5 dəqiqədir.



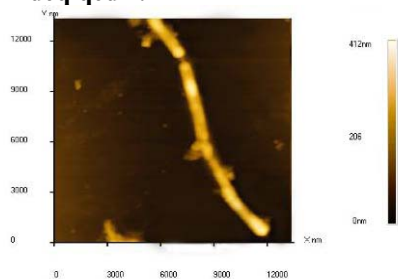
Şəkil 7-13. SZM - in köməyilə qoruyucu şüşədə turş - süd bakteriyaların alınmış şəkli. Məhlulun inkubasiya vaxtı 20 dəqiqədir.



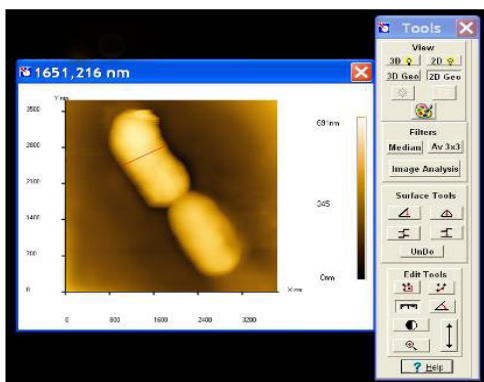
Şəkil 7-14. SZM - in köməyilə qoruyucu şüşədə şor - turş bakteriyaların alınmış şəkli. Məhlulun inkubasiya vaxtı 1 saatdır.



Şəkil 7-15. Qoruyucu şüşədə turş -süd bakteriyasının AQM-da alınmış şəkli. Məhlulun inkubasiya vaxtı 5 dəqiqədir.



Şəkil 7-16. Qoruyucu şüşədə turş -süd bakteriyaların zəncirinin AQM-də alınmış şəkli. Məhlulun inkubasiya vaxtı 5 dəqiqədir.



Şəkil 7-17. SZM NanoEducator tədris proqramının idarəetmə pəncərəsi. Alətlər paneli.

NanoEducator skanedici zond mikroskopunun konstruksiyası

Şəkil 7-18-da NanoEducatorun ölçən başlığının xarici görünüşü verilmiş və işləyərkən cihazın əsas elementləri göstərilmişdir.

Şəkil 7-19-də ölçən başlığın konstruksiyası verilmişdir. 1-bünövrəsi əsasında skanedici, 7-altıq və 6-zond, 2-addım mühərriki ilə nümunənin zonda yaxınlaşma mexanizmi yerləşdirilib. SZM NanoEducator tədris cihazında nümunə skanedicəyə bərkidilir və hərəkət etməyən zonda nəzərən nümunə səthinin skanedilməsi yerinə yetirilir. 4 qarşılıqlı təsir çeviricisinə bərkidilmiş 6 zondun yaxınlaşmasını 5 əl ilə gətirmə vintinin köməyi ilə etmək olar. 6-vintinin köməyi ilə nümunə üzərində tədqiqat üçün qabaqcadan yeri seçmək olar.

Tədris SZM NanoEducatoru-ölçən başlıqdan, elektron blokdan, birləşdirici kablərdən və idarəedicisi kompüterdən ibarətdir. Kompüterlə əlaqəsi olan videokamera ayrıca qurğu kimi göstərilmişdir. Qarşılıqlı təsir çeviricidən alınan siqnal əvvəlcə çevrildikdən sonra gücləndiricidən SZM kontrollerə daxil olur. SZM NanoEducatoru kompüterlə SZM Kontroller vasitəsi ilə idarə olunması həyata keçirilir.



Şəkil 7-18. SZM NanoEducatorun ölçən başlığının xarici görünüşü: 1 - əsası; 2 - altıq; 3 - qarşılıqlı təsir çeviricisi; 4 - çeviricini nizamlayan vint; 5 - əl ilə gətirmə vint; 6 - nümunə ilə birlikdə skanedicinin yerdəyişmə vint; 7 - kamera ilə birlikdə qapaq.

Qarşılıqlı təsir qüvvəsi və zond çevirici

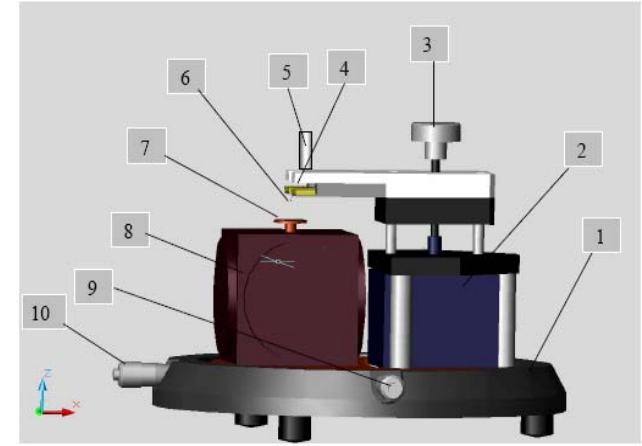
NanoEductor cihazında qarşılıqlı təsir qüvvəsi və zond çeviricisi-uzunluğu $l=7$ mm, diametri $d=1,2$ mm və divarın qalınlığı $h=0,25$ mm olan bir tərəfi möhkəm bağlanmış pyezokeramik boru şəklində hazırlanmışdır. Borunun daxili səthində keçirici elektrod yerləşir. Borunun xarici səthinə izolə edilmiş iki yarım silindrik elektrod yerləşdirilmişdir. Borunun sərbəst ucuna diametri 100 mkm olan volfram naqıl bərkidilmişdir (şəkil 7-20).

İstifadə olunan volfram naqılın sərbəst ucunun əyrilik radiusu 0,2-0,05 mkm olan zond elektrokimyəvi üsulla itilənir. Borunun daxili elektrodu ilə zond elektrik kontaktına malik olub cihazın korpusu ilə birlikdə yerə bərkidilmişdir.

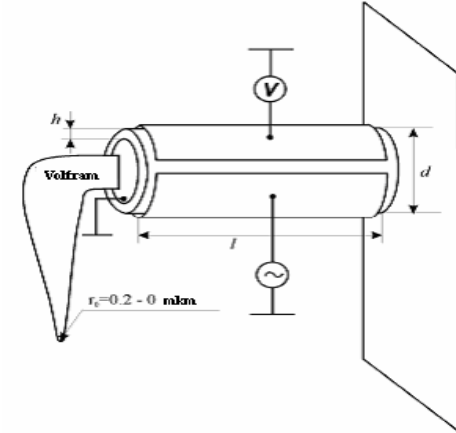
Pyezoboruda iki xarici elektrodların olması qarşılıqlı təsir qüvvə çeviricisini (mexaniki rəqs çeviricisi) bir hissəsini pyezo-elektrik boru (şəkil 7-21-də uyğun olaraq yuxarı hissə), digər hissəsini isə pyezovibrator kimi istifadə olunmasına imkan verir. Pyezovibratora qüvvə çeviricisinin rezonans tezliyinə bərabər tezliklə dəyişən elektrik gərginliyi verilir. Rəqs amplitudu zond və nümunə arasındakı məsafənin böyük qiymətlərində maksimal olur. Şəkil 7-22-dən görüldüyü kimi rəqs prosesində zond tarazlıq vəziyyətində A_0 kəmiyyəti qədər meyl edir. Bu onun məcburi mexaniki rəqs amplituduna bərabərdir (mkrnun az bir hissələrini təşkil edir). Bu zaman pyezoelementin ikinci hissəsində (rəqs çeviricisi) zondun yerdəyişməsinə mütənasib olan dəyişən elektrik cərəyanı yaranır və bu cərəyan cihaz tərəfindən qeydə alınır.

Rəqs zamanı zond nümunə səthinə yaxınlaşdıqda zond nümunəyə toxunmağa başlayır. Bu çeviricinin rəqslərinin amplitud tezlik xarakteristikasının (ATX) səthdən uzaqda olarkən ölçülmüş (şəkil 7-22) ATX ilə müqayisəsinə görə sola tərəf yerinin dəyişməsinə gətirir. Belə ki, pyezoborunun məcburi rəqslərinin tezliyi sabit saxlanılır və sərbəst vəziyyətdəki ω_0 -a bərabər olur, zond səthə yaxınlaşarkən onun rəqs amplitudu

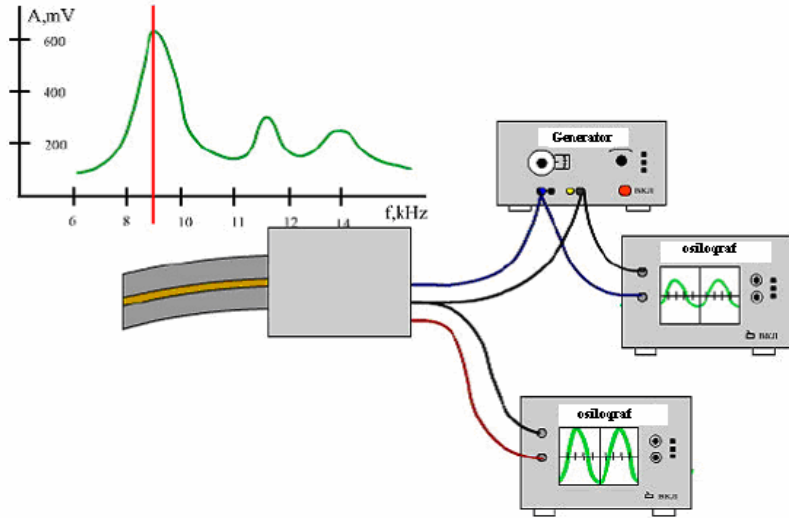
azalır və A -ya bərabər olur. Bu amplitud pyezoborunun ikinci yarım hissəsində qeydə alınır.



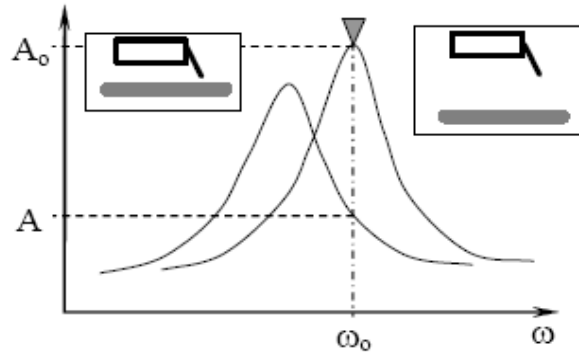
Şəkil 7-19. NanoEductorun konstruksiyası: 1 - bünövrə; 2 - gətirmə mexanizmi; 3 - əl ilə gətirmə vint; 4 - qarşılıqlı təsir çevirici; 5 - çeviricini nizamlayan vint; 6 - zond; 7 - altlıq; 8 - skanedici; 9, 10 - nümunə ilə birlikdə skanedicinin yerini dəyişdirən vint.



Şəkil 7-20. NanoEductor cihazının universal çeviricisinin konstruksiyası.



Şəkil 7-21. Pyzeoelktrik borunun qarşılıqlı təsir qüvvə çeviricisi kimi iş prinsipi.

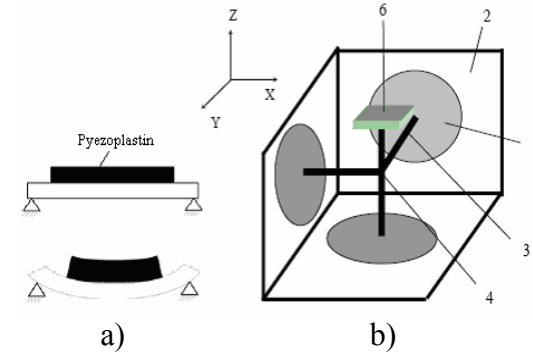


Şəkil 7-22. Qüvvə çeviricisinin nümunə səthinə yaxınlaşarkən rəqs tezliyinin dəyişməsi.

Skanedici NanoEducator cihazında istifadə olunan mikro-dəyişmələri təşkil etmək üsulları pyezolövhəyə yapışdırılmış

səthə metallik membranın bütün perimetri boyunca sıxılmasına əsaslanmışdır (şəkil 7-23a). İdarəedici gərginliyin təsiri altında pyezolövhənin ölçülərinin dəyişməsi membranın əyilməsinə gətirir. Kubun perpendikulyar tərəfləri üzrə membranlar yerləşdirilir və onların mərkəzlərini metal istiqamətləndirici ilə birləşdirərək 3 koordinatlı skanedici almaq olar (şəkil 7-23b).

2 kubun üzələrinə birləşdirilmiş hər bir 1 pyzeolementi ona birləşdirilmiş 3 itələyicisini tətbiq olunan elektrik gərginliyi hesabına x, y və z istiqamətlərdə hərəkət etdirə bilər. Şəkildən görünür ki, hər üç itələyici bir nöqtədə birləşibdir. Bəzi təqribiliyi nəzərə alaraq ki, bu nöqtə üç x, y və z koordinatları üzrə yerini dəyişir. Bu nöqtəyə 6-nümunə altlığı olan 4-dirək bərkidilmişdir. Beləliklə, üç asılı olmayan gərginlik mənbəyinin təsiri nəticəsində nümunə hər üç koordinat üzrə yerini dəyişir. NanoEducator da nümunənin maksimal yerdəyişməsi 50-70 mkm-dir. Bu skanetmənin maksimal sahəsini təyin edir.

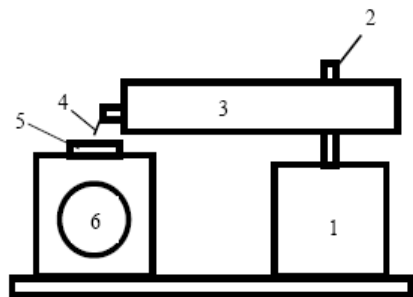


Şəkil 7-23. NanoEducator skanedici cihazının hərəkət prinsipi (a) və konstruksiyası (b).

Zondun nümunəyə avtomatik yaxınlaşma mexanizmi (əks əlaqənin yaranması).

Skanedicinin z oxu üzrə yerdəyişmə diapazonu 10 mkm təşkil edir, buna görə də skanetmədən əvvəl zondun nümunəyə bu məsafəyə qədər yaxınlaşdırmaq lazımdır. Bunun üçün gətirmə mexanizmi var. Bu şəkil 7-24 sxemində verilmişdir. 1

addım mühərrikinə elektrik impulsu verərkən 3 çevrici vintini fırladar və 3 plankasını 4 zond ilə birlikdə 6 skanedici ilə birləşdirilmiş nümunəyə yaxınlaşdırılır və ya uzaqlaşdırılır. Bir addımın uzunluğu təqribən 2mm-dir.



Şəkil 7-24. Nümunə səthinə zondun gətirilmə mexanizminin sxemi.

Yaxınlaşma mexanizminin addımı zond-nümunə arasındakı məsafədən xeyli böyük olduğundan skanetmə prosesi vaxtı zond deformasiyaya məruz qalması deyə onun yaxınlaşması addım mühərrikinin işləməsi ilə eyni zamanda həyata keçirilir və aşağıdakı alqoritm üzrə skanedici z oxu üzrə yerini dəyişir:

Əks əlaqə sistemi sönmür və skanedici qalxır, yəni nümunə aşağı son vəziyyətə düşür.


1. Zondun gətirilmə mexanizmi bir addım edir və dayanır.
2. Əks əlaqə sistemi işə düşür və skanedici yavaşca nümunəni yuxarıya qaldırır, bu zaman zond nümunə qarşılıqlı təsirin yaranması analiz edilir.
3. Əgər qarşılıqlı təsir yaranmırsa proses 1 punktunda yenidən təkrar olunur.

Əgər skanedici yuxarı hərəkət edərkən sıfırdan fərqli siqnal yaranarsa əks əlaqə sistemi skanedicinin yuxarıya hərəkətini saxlayır və bu səviyyədə qarşılıqlı təsirin qiymətini qeydə alır. Zondun nümunəyə yaxınlaşması dayandıqda və skanetmə prosesi baş verdikdə qarşılıqlı təsir qüvvəsinin qiyməti **NanoEducator** qurğusunda **Amplitud Suppresion** (amplitudun azalması) parametri ilə xarakterizə olunur:


$A=A_0(1-\text{Amplituda Suppresion})$.

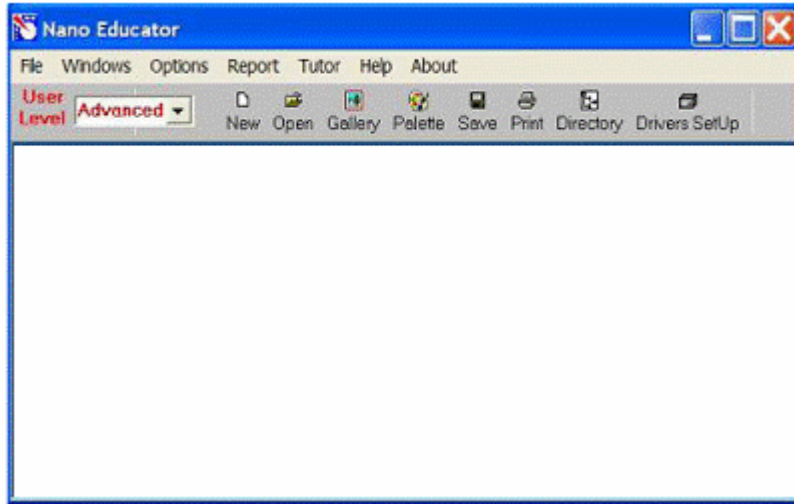
SZM səkilinin alınması

NanoEducator proqramını çağırıdıqdan sonra kompüterin ekranında baş pəncərə təsvir olunacaq (şəkil 7-25). **File** menyusundan istifadə edərək **Open** və ya **New** və yaxud alətlər panelində uyğun düymələri seçməklə işə başlamaq olar.


File ⇒ **New** komandasını seçməklə SZM-də ölçmələrə keçməyi göstərir. **File** ⇒ **Open** komandasını seçilməsi isə əvvəllər alınmış şəkillərə baxılması və işlədilməsi başa düşülür. Proqram ölçmələrlə yanaşı, həmçinin verilənlərin baxılmasını və həm də işlədilməsinə imkan verir. **File** ⇒ **New** komandasının icra olunmasından sonra ekranda dialoq pəncərəsi yaranmış olur, işçi qovluğu seçmək və ya yaratmaq imkanı yaranır və cari ölçmələrin nəticələrini qovluğa yazmaq nəzərdə tutulur. Ölçmə prosesini apararkən bütün alınmış verilənlər ardıcıl olaraq razılaşmaya görə **ScanData+i.spm** adlı fayla yazılacaq. Burada **i**-indeksi proqram işə düşərkən sıfır qiymətini alır və hər bir yeni ölçmələr üçün qiyməti artmış olur. **ScanData+i.spm** faylları işçi qovluqda yerləşdirilir. Hər yeni ölçmələrə başlamazdan əvvəl qərarlaşdırılır. Ölçmələr aparılan vaxtı başqa işçi qovluğun seçilməsi imkanı mövcuddur. Bunun üçün proqramın baş pəncərəsinin alətlər panelində yerləşən  düyməsini sıxmaq lazımdır.

Skanetmə pəncərəsində **Save Experiment** düyməsini sıxmaqla cari ölçmələrinin nəticələrini saxlamaq olar, yaranan dialoq pəncərəsində qovluğu seçmək və faylın adını göstərmək lazımdır. Bu zaman **ScanData+i.spm** faylı ölçmələr aparılan prosesi vaxtı müvəqqəti fayl olub sizin göstərdiyiniz fayl adına dəyişəcək. Ölçmələrə başlamazdan əvvəl fayl seçdiyiniz işçi qovluqda saxlanılacaq. Əgər ölçmələrin nəticələri saxlanılmazsa onda yenidən proqramı işlədərkən **ScanData+i.spm** müvəqqəti fayla yazılmış nəticələr ardıcıl olaraq yenidən yazılacaq (əgər işçi qovluq dəyişməyibdirsə). Proqramı bağlayarkən və yenidən işlədərkən işçi qovluqda ölçmələrin nəticələri olan

müvəqqəti faylların mövcudluğu haqqında xəbərdaredici məlumat verilir. **ScanData** standart adını dəyişmək olar. Bunu işçi qovluğun seçilməsi pəncərəsində etmək olar. İşçi qovluğun seçilməsi pəncərəsi proqramın baş pəncərəsinin alətlər panelində yerləşən  düyməsini sıxmaqla həyata keçirilir. **SPM File Explorer** pəncərəsində ölçmələrin nəticəsini saxlamaq olar. Lazımı faylları növbə ilə seçərək seçilmiş qovluqda onları saxlamaq lazımdır.



Şəkil 7-25. NanoEducator proqramının baş pəncərəsi.

NanoEducator cihazı ilə alınmış nəticələri **ASCII** formatına çevirmək olar. Bunu **NT MDT** istifadə olunan **Nova** və başqa proqramlarla etmək olar. Skanedilmiş şəkillər, həmçinin onların kəsikləri olan verilənləri **ASCII** formatına xaric edilə bilər. Verilənləri **ASCII** formatına xaric etmək üçün proqramın baş pəncərəsindəki alətlər panelində yerləşmiş **Export** düyməsini  sıxmalı və ya **File** menyusunun **Export** → **ASCII** rejimini seçmək lazımdır.

Dialog pəncərəsini bağladıqdan sonra ekranda cihazın idarə

olunması paneli görünür (şəkil 7-26). Cihazın idarə olunması panelinin sol hissəsində **SZM**-in konfigurasiyasını seçmək üçün düymələr yerləşir.

SFM - skanedici qüvvə mikroskopu (SQM)

STM - skanedici tunel mikroskopu (STM)



Şəkil 7-26. Cihazın idarəetmə paneli.

SQM ölçmələrinə hazırlıq aşağıdakı əməliyyatların yerinə yetirilməsindən ibarətdir:

1. Nümunənin yerinə qoyulması

DİQQƏT! Nümunəni qoymazdan əvvəl zond çeviricisini elə çıxarmalı ki, zond zədələnməsin.

Nümunənin bərkidilməsinin iki üsuluna baxılır:

- maqnit stolda (bu halda nümunə metal üzərinə bərkidilməlidir);
- ikitərəfli yapışqanlı lent vasitəsilə metal üzərində nümunə yerləşdirilməlidir.

DİQQƏT! İkitərəfli lentdə olan nümunəni qoymaq üçün dirəkdən saxlayıcıyı burmaqla açmaq (skanedicini zədələməmək üçün), sonra işə dayağa qədər onu yavaşca bağlamaq lazımdır. Maqnit bərkidilmə halında, nümunənin dəyişdirilməsi altlığı açmadan və ya bağlamadan həyata keçirilir.

2. Zond çeviricisinin yerinə qoyulması

DİQQƏT! Zond çeviricisinin yerinə qoyulması həmişə nümunənin yerinə qoyulmasından sonra yerinə yetirilməlidir. Çeviricini 1 əl ilə gətirmə vinti ilə saat əqrəbinin istiqamətində fırlatmaqla yuxarı vəziyyətə gətirilir (şəkil 7-21). Ölçü baş-

lığının qapağında 2 zond çeviricisinin vintini boşaldıb, zond saxlayıcının yuvasına qoymalı və qeydedici vinti saat əqrəbi istiqamətində yüngülcə bərkitmək lazımdır (şəkil 7-21).



Şəkil 7-27. Zond çeviricisinin yerinə qoyulması.

3. Skanetmənin yerinin seçilməsi

Nümunə üzərində tədqiq olunan yerin seçilməsi üçün cihazın aşağı hissəsində yerləşmiş iki koordinatlı stoldakı yerdəyişmə vintlərdən istifadə olunur.

4. Əvvəlcədən zondun nümunəyə yaxınlaşması

Hər bir ölçmə üçün zondun qabaqcadan yaxınlaşması əməliyyatı zəruri deyil. Onun zəruriliyi nümunə və zond arasındakı məsafənin qiymətindən asılı olaraq yerinə yetirilir. Əgər zondun ucu ilə nümunə səthi arasındakı məsafə 0,5-1 mm-dən böyükdürsə, onda zondun nümunə səthinə yaxınlaşması əməliyyatının aparılması məqsədə uyğundur. Zondla nümunə arasındakı məsafə böyük olarsa zondun nümunəyə avtomatik yaxınlaşması prosesinə çox vaxt tələb olunacaqdır.

Zondu aşağıya salmaq üçün əllə gətirmə vintindən istifadə edilir. Bu zaman zond və nümunə səthi arasındakı məsafəyə vizual olaraq lupa vasitəsi ilə nəzarət etmək lazımdır.

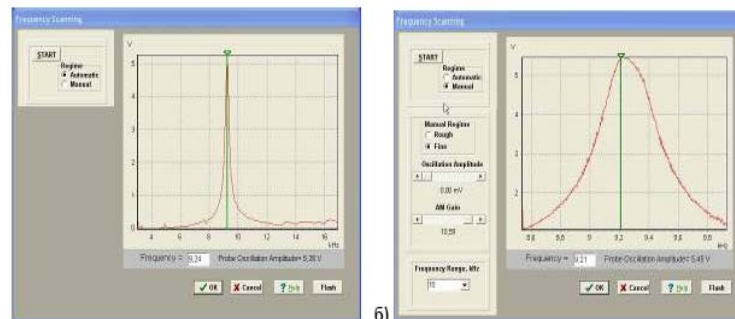
5. Rezonans əyrisinin qurulması və işçi tezliyin daxil edilməsi

Hər bir təcrübəni aparmazdan əvvəl bu əməliyyatın yerinə yetirilməsi zəruridir və bunu etmədən gələcək ölçmələrin mərhələlərinə keçid bağlıdır. Bundan başqa ölçmə prosesi

zamanı elə vəziyyət yaranır ki, bu əməliyyatın təkrar yerinə yetirilməsi tələb olunur (məsələn, kontakt itərkən).

Rezonans axtarışı **ADJUST**⇒**RESONANCE** əmri ilə yerinə yetirilir. Bu əməliyyatın yerinə yetirilməsi generator tərəfindən verilən məcburi rəqslərin tezlikləri dəyişərkən zondun rəqs amplitudunun ölçülməsi zəruridir. Bunun üçün **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır.

Avtomatik rejimində zondun rəqs amplitudunun müşahidə olunan maksimal qiymətinə bərabər generatorun tezliyi avtomatik təyin olunur. Verilmiş tezlik diapazonunda zondun rəqs amplitudunun dəyişməsinə göstərən qrafikdən rezonans pikinin formasını müşahidə etmək imkanı yaranır (şəkil 7-28a). Əgər rezonans piki aydın ifadə olunmayıbdırsa və ya rezonans tezliyində amplitud kiçikdirsə (**1V** aşağı), onda ölçmələri aparmaq üçün parametrləri dəyişmək zəruridir və rezonans tezliyini təkrar təyin etmək lazımdır.



Şəkil 7-28. Rezonansın axtarışı rejimi pəncərəsi və işçi tezliyin təyini: a) avtomatik rejim; b) əl rejimi.

Bunun üçün **Manual** rejimi istifadə olunur. Bu rejimi seçərkən **Frequency Scanning** pəncərəsində əlavə panel yaranır (şəkil 7-28b) və aşağıdakı parametrləri korrektə etməyə imkan verir:

Generator tərəfindən verilən rəqs amplitudı (**Oscillation Amplitude**). Bu kəmiyyətin qiymətinin minimal verilməsi təklif olunur (sıfıra kimi də olar) və 50mV-dan böyük olmasın.

Amplitudı gücləndirən əmsal (**AM Gain**). Zondun rəqs amplitudunun kifayət qədər böyük olmayan qiymətlərində (<1V) bu əmsalın qiymətinin artırılması məsləhətdir (təklif olunur).

Rezonansın axtarışına başlamaq üçün **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır.

Manual rejimi siçanın köməyi ilə seçilmiş tezliyi qrafikdə yaşıl kursurun yerini siçanla dəyişməklə etmək olar, həmçinin seçilmiş tezliyin kiçik qiymətlərinin diapazonunda rəqslərin amplitudunun dəyişmə xarakteri nəzərə alınır (bunun üçün **Manual Regime Fine** vəziyyətini seçərək və **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır).

6. Qarşılıqlı təsirin alınması

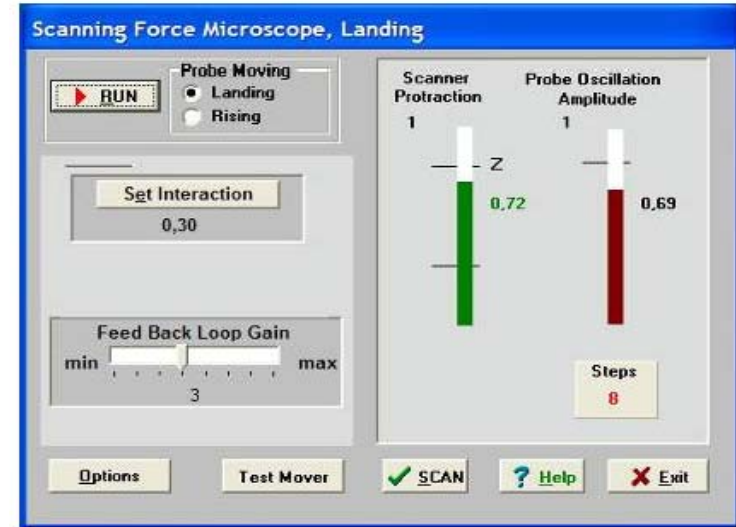
Qarşılıqlı təsirin alınması avtomatik gətirmə mexanizminin köməyi ilə zond və nümunə yaxınlaşmasını idarəetmə prosedurası ilə yerinə yetirilir. Cihazın idarəetmə panelin-

dəki **LANDING** düyməsini sıxmaqla bu proseduranı etmək olar. SQM-lə işləyərkən rezonans tezliyin axtarışı və qurulması əməliyyatından sonra bu düyməyə imkan yaranır. **Scanning Force Microscopy, Landing** (şəkil 7-29) pəncərəsində zondun yaxınlaşmasını idarə edən elementlər yerləşir, həmçinin proseduranın yerinə yetirilmə gedişini analiz etməyə imkan verən indikasiya parametrləri vardır.

Landing pəncərəsi istifadəçiyə aşağıdakı kəmiyyətləri müşahidə etməyə imkan verir:

- Z oxu üzrə skanedicinin maksimal mümkün uzaqlaşması (yuxarıya qalxması) (**Scanner Protraction**) vahid qəbul olunmuşdur. Skanedicinin qalxmasını cari vəziyyəti uyğun sol indikatorun dolması səviyyəsinin rəngi ilə xarakterizə olunur: yaşıl rəng-işçi zona, göy-iş zonasından kənar, qırmızı skanedicinin nümunə səthinə xeyli yaxınlaşmışdır və bu zondun deformasiyasına (zədələnməsinə) gətirib çıxara bilər. Sonuncu halda proqram xəbərdar edici səs verir.

- Qarşılıqlı təsir qüvvəsinin olmamağına uyğun olaraq zondun rəqs amplitudu (**Probe Oscillation Amplitude**) vahid qəbul edilir. Zondun rəqs amplitudunun qiyməti sağ indikatora çəhrayı rənglə dolması səviyyəsi ilə göstərilir. **Probe Oscillation Amplitude** indikatorundakı üfqi nişan skanedicinin vəziyyətinin analiz edilməsi və onun avtomatik işçi vəziyyətinə gəlməsini göstərir.



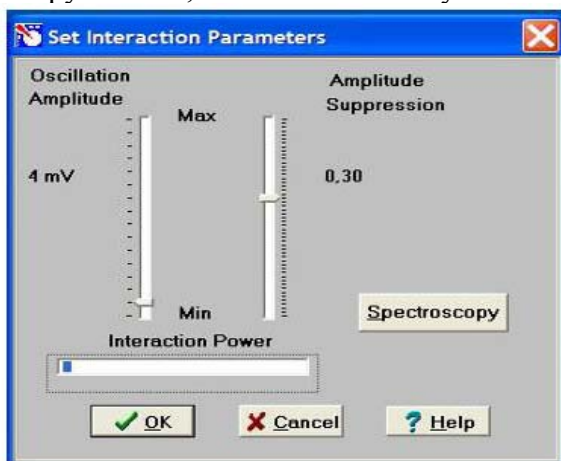
Şəkil 7-29. Qarşılıqlı təsirin alınması rejiminin pəncərəsi.

- **Steps** verilmiş istiqamətdə (**Probe Moving**) gedilmiş addımların sayıdır: **Landing** - yaxınlaşma, **Rising**- uzaqlaşma.

Zondun aşağı salınması prosesinə başlamazdan əvvəl zəruridir:

1. **Probe Moving** elementində **Landing** (yaxınlaşma) imkanının seçilməsinə əmin olmaq.
2. Yaxınlaşma parametrlərinin düzgün verilməsini yoxlamaq:
 - Əks əlaqə dövrəsində **Feed Back Loop Gain** - gücləndirmə əmsalı 3 qiymətinə bərabər götürülür.
 - **Set Interaction** düyməsini sıxaraq və **Set Interaction** pəncərəsində **Amplitude Suppression** (şəkil 7-30) pa-

rametrinin qiymətini 0,3 bərabər olmasını yoxlamaq.



Şəkil 7-30. Zond və nümunə qarşılıqlı təsirinə kəmiyyətlərinin verilməsi pəncərəsi.

RUN düyməsini sıxmaq.

Steps indikatoru keçilmiş addımları hesablamğa başlayır. Qarşılıqlı təsirin əmələ gəlməsindən sonra ekranda **Landing done** məlumatı yaranır.

Zondu əks əlaqədən çıxarmaq, zond və nümunə arasındakı məsafəni artırmaq üçün zondun uzaqlaşması rejimindən istifadə olunur (**Probe Moving: Rising**). Uzaqlaşma əməliyyatının yerinə yetirilməsi üçün **Probe Moving: Rising** hərəkət istiqamətini seçmək və **RUN** düyməsini sıxmaq zəruridir.

7. Skanetmə

Yaxınlaşma (**Landing**) prosesinin yerinə yetirilməsindən sonra və qarşılıqlı təsirin əmələ gəlməsindən sonra skanetmə mümkün olur (cihazın idarə olunması pəncərəsində



düyməsi).

Bu düyməni sıxaraq (şəkil 1-25 də skanetmə pəncərəsinin şəkli verilmişdir) istifadəçi bilavasitə ölçmələrin aparılmasına və ölçmələrin nəticələrinin alınmasına başlayır.

Skanetmə rejimində skanetmənin parametrlərinin daxil edilməsi zəruridir. Bu parametrlər **Scanning** pəncərəsinin yuxarı sağ hissəsində verilmişdir:

Proqramı birinci dəfə işlədərkən bu kəmiyyətlərin qiymətləri razılaşmaya görə qəbul olunur:

Skanetmə sahəsi **Scan Area (Xnm*Ynm): 5000*5000;**
Oxlar üzrə ölçmə nöqtələrin sayı **X,Y: NX = 100, NY = 100;**
Skanetmənin sürəti **Velocity = 1000nm/s;**
Skanetmənin yolu **Path** skanetmənin istiqamətini müəyyənləşdirir. Proqram sürətli skanetmənin ox istiqamətini seçməyə imkan verir (X və Y). Proqramla işə başlayan zaman **Path = X+** qəbul olunur.

Skanetmə parametrlərini verdikdən sonra daxil edilmiş parametrlərin qəbul olunması üçün **Apply** düyməsini və skanetməyə başlamaq üçün **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır.

Cari ölçmələrin nəticələrinin saxlanması üçün skanetmə pəncərəsində **Save Experiment** düyməsini sıxmaq və bu zaman görünən dialoq pəncərəsində qovluğu seçmək və faylın adını göstərmək lazımdır.

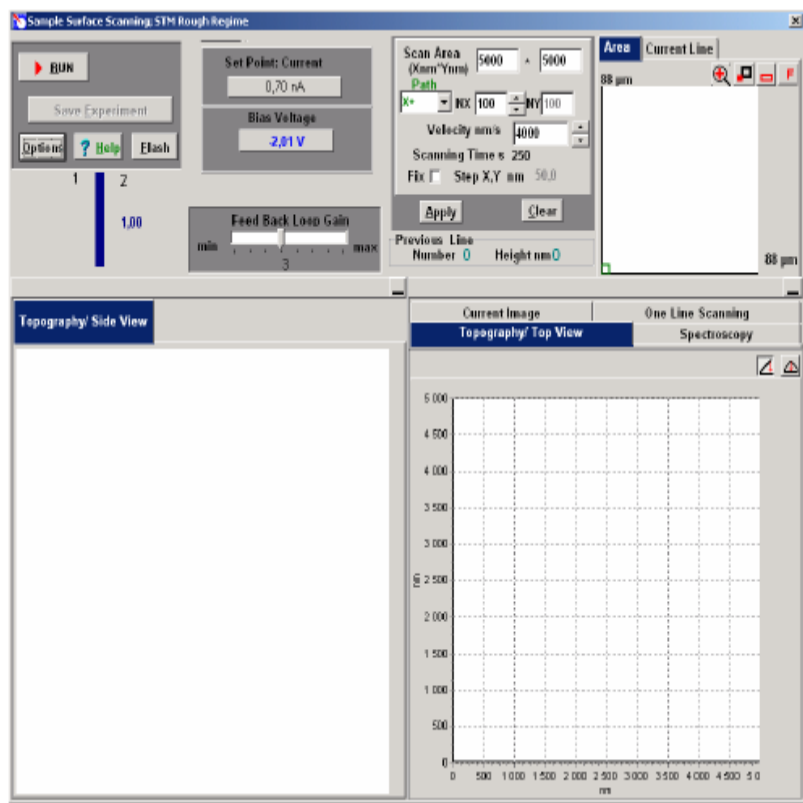
7.3. Metodik göstərişlər

NanoEducator skanedici zond mikroskopunda işləməyə başlamazdan əvvəl cihazın istifadəçilərə rəhbərlik sənədini öyrənmək zəruridir.

7.4. Tapşırıq

1. SZM üsulu ilə tədqiq üçün bioloji nümunələrin müstəqil hazırlanması.
2. Təcrübədə **NanoEducator** cihazının ümumi konstruksiyasının öyrənilməsi.
3. **NanoEducator** cihazının idarə olunması proqram ilə tanış olmalı.
4. Müəllimin nəzarəti altında birinci SZM şəkilin alınması.

5. Alınmış şəklın işlənməsi və analizinin aparılması. Sizin məhlul üçün bakteriyaların hansı formaları xarakterikdir? Bakteriya hüceyrələrinin forma və ölçüləri nə ilə təyin olunur?
6. Berci bakteriya təyin edicisini götürün və alınmış nəticələri oradakı nəticələrlə müqayisə edin.



Şəkil 7-31. SQM skanetmə və nəticələrinin təsviri prosesinin idarə olunması pəncərəsi.

7.5. Yoxlama sualları

1. Bioloji obyektlərin tədqiqinin hansı üsulları vardır?
2. Skanedici zond mikroskopiyası nədir? Hansı prinsip onun əsasında durur?
3. SZM əsas komponentlərini və onların təyinatını deyin.
4. Pyezoelektrik effekt nədir və SZM-də o necə tətbiq olunur. Skanedicilərin müxtəlif konstruksiyalarını təsvir edin.
5. **NanoEducator** cihazının ümumi konstruksiyasını təsvir edin.
6. Qarşılıqlı təsir qüvvə çeviricisinin və onun iş prinsipini təsvir edin.
7. **NanoEducator** cihazında nümunəyə zondun yaxınlaşdırılması mexanizmini təsvir edin. Zondun nümunə ilə qarşılıqlı təsir qüvvəsini təyin edən parametrləri aydınlaşdırın.
8. Skanetmənin prinsipini və əks əlaqə sisteminin iş prinsipini aydınlaşdırın. Skanetmənin parametrlərinin seçilməsi kriteriyaları haqqında danışın.

Laboratoriya işi № 8

Skanedici zond mikroskopunun köməylə suyun mikroflorasının öyrənilməsi

8.1. İşin məqsədi	185
8.2. İşin məzmunu.....	185
8.3. Metodik göstərişlər	218
8.4. Tapşırıq.....	219
8.5. Yoxlama sualları	220

İşdə skanedici zond mikroskopiyasının əsaslarının öyrənilməsi və distillə edilmiş su mühitlərində mikrofloranın tədqiq edilməsinə tətbiqi təklif olunur.

8.1. İşin məqsədi

1. Skanedici zond mikroskopunun iş prinsipinin öyrənilməsi.
2. **NanoEducator** cihazının konstruksiyası və iş prinsiplərinin öyrənilməsi.
3. SZM vasitəsilə nümunə səthinin şəklinin alınması.
4. Təcrübənin nəticələrinin işlənməsi və təqdimatı, iş vərdişlərinin yaranması.

Ləvazimat: Skanedici zond mikroskopu (Model SZMU-L5), zond, NanoEducator proqramı və kompüter.

Tədqiqat üçün nümunə: distillə olunmuş su və adi suyun mikroflorası

Laboratoriya işi bir neçə mərhələdə yerinə yetirilir:

1. Nümunənin hazırlanması hər bir tələbə tərəfindən fərdi qaydada yerinə yetirilir.
2. Birinci şəklın alınması müəllimin nəzarəti altında cihazların birində yerinə yetirilir, sonra hər tələbə özünün nümunəsini sərbəst tədqiq edir.
3. Təcrübənin nəticələrinin işlənməsi hər tələbə tərəfindən fərdi aparılır.

İşə başlamazdan əvvəl amplitud tezlik xarakteristikası ən yaxşı xarakterli (bir simmetrik maksimumu olan) zond seçməli, tədqiq olunan nümunənin səthinin şəklinin alınması.

Laboratoriya işinin hesabatına daxil olmalıdır:

1. Nəzəri hissə (yoxlama suallara cavablar).
2. Təcrübi hissənin nəticələri (aparılmış tədqiqatın izahı, alınmış nəticələr və çıxarılmış nəticələr).

8.2. İşin məzmunu

1. SZM-in yaranma tarixi;
2. SZM-in iş üsulları;

- kontakt iş üsulu;
- lateral qüvvə üsulu;
- qüvvə modulyasiya üsulu;
- yarımkontakt üsulu;
- faza təzadı üsulu, alınmış şəklin fiziki mənası.

3. SZM-də şəklə təsir edən faktorlar.

4. Preparatın hazırlanması və SZM-in tətbiqi ilə onun tədqiqi.

5. İşin ardıcılığı: şəklin alınması, işlənməsi və analizi.

Skanedici zond mikroskopunun yaranması tarixi

70 il əvvəl keçmiş SSRİ vətəndaşı Q.A.Qamov ilk dəfə olaraq enerjisi potensial çəpərdən kiçik olan mikrohissəciklərin, potensial çəpərdən keçməsi prosesini təsvir etmişdi. Bu hadisə tunnəşmə adlandırılmışdı. Tunnel effekti kvant hadisəsi olub, mikrohissəciyin hərəkəti mümkün olan potensial çəpərlə ayrılan bir oblastdan digər oblasta daxil olmasıdır.

Əgər cərəyan keçirən iki cisim götürsək, onları bir-birinə yaxın məsafədə yerləşdirərək onlara müəyyən potensiallar fərqi tətbiq etsək, onda bu cisimlər arasında atomların qarşılıqlı müdaxiləsi olmadan tunnel elektrik cərəyanı yaranar. Cisimlər arası məsafənin 10 nanometr səviyyəsində bu sahə avtoelektron emissiyasının cərəyanı olacaqdır. Bunun qiyməti cisimlər arası məsafədən güclü surətdə asılı olacaqdır. Bu effekt ABŞ Milli Standartlar İnstitutunun əməkdaşı R.Yanq tərəfindən cərəyan profelometrinin yaradılması zamanı istifadə olunmuşdu. Metal iti uclu zond tədqiq olunan cərəyan keçirən nümunənin səthinə yaxınlaşdırılır, onlar arasında verilmiş qiymətə malik avtoelektron emissiya cərəyanının keçməsinə başlanana qədər yaxınlaşma davam edir. Bundan sonra zond nümunənin səthinə skan etməyə başlayır. Bu zaman elektromexaniki əks əlaqə sistemi cərəyanın verilmiş qiymətini sabit saxlayır. Cərəyanın qiyməti zond və nümunə səthi arasındakı məsafədən güclü surətdə asılı olduğundan, onda skan etmə prosesində zond yüksək dəqiqliklə səth üzərində yerini dəyişir. Bu zaman skan etmə sisteminin idarəetmə siqnalı səthin relyefinin şəklinin qurulması üçün

istifadə olunur. R.Yanq tərəfindən bu qurğu **Topografiner** adlandırılmış, şaquli istiqamətdə 3 Å səviyyəsində ayırdetmənin əldə olunmasına imkan verdi. R.Yanq həmmüəlliflərlə göstərdilər ki, zond və nümunə səthi arasındakı məsafədən eksponensial asılı olan tunnel cərəyanının istifadə olunması ayırdetməni daha da yaxşılaşdırmağa imkan verəcəkdir.

Bu kəşfdən sonra alimlər belə bir suala cavab axtardılar: əgər əvvəlki təcrübəni təkrar etsək bu zaman maraqlı olan cisim səthinə iti uclu predmet yaxınlaşdırılırsa onda nə olacaq? Aparılmış təcrübələr nəticəsində aydın oldu ki, çox nazik iti uclu iynənin köməyiylə (iynənin ucundakı atom əsas hiss edən elementdir) atom səviyyəsində öyrənilən maddi obyektin quruluşu haqqında məlumat əldə etməyə imkan verir.

1979-cu ildə IBM-in Sürix bölməsindəki laboratoriyasında işləyən İsveçrə alimləri Q.Binning və U.Rorer fiziki obyektlərlə yeni iş prinsipini, Skanedici zond mikroskopunu (SZM) [4] təklif etdilər. Qeyd edək ki, ilkin ideya mikroskopun yaradılması olmayıb, 100 anqstremdən kiçik olan səth hissələrinin spektroskopik tədqiqatlarının həyata keçirilməsindən ibarət idi. Tezliklə tədqiqatçılar başa düşdülər ki, nəinki lokal spektroskopik zond yaratmaq olar, həmçinin skan etmə ilə spektroskopik və topoqrafik şəkillər almaq olar.

Beləliklə, yeni tipli mikroskopun yaradılması imkanına yol açıldı. Skanedici tunnel mikroskopunun (STM) hazırlanması konsepsiyasından 27 ay keçdikdən sonra, o yaradılmış oldu. Bu cihazın işləmə prinsipi bundan ibarətdir ki, zond tədqiq olunan nümunə səthinə yaxın məsafəyə (anqstremin hissələri) qədər yaxınlaşdırılır. Zond və nümunə arasında sabit gərginlik verilir. Bunun nəticəsində onlar arasında tunnel cərəyanı yaranır. Onun qiyməti zond və nümunə arasındakı məsafədən güclü surətdə asılı olub, izləyən sistem tədqiq olunan səthin relyefindən asılı olaraq skanedicini aşağıya və yuxarıya hərəkət etdirməklə bu məsafə sabit saxlanılır. Bu yerdəyişmələr haqqında məlumatı kompüterdə izləyərək bu məlumatın proqram vasitəsilə işlən-

məsindən sonra nümunə səthinin ekranda şəklini görmək olar.

İfrat yüksək vakuum şəraitində qurğularla iş təcrübəsi qızılın (*Au*) və silisiumun (*Si*) səthlərinin atom quruluşunun birinci şəklini almağa imkan verdi. 1983-cü ilin sonunda müəliflər yeni üsulun imkanını karbon təbəqəsinin səthində DNK zəncirinə baxaraq biologiyaya tətbiqini öyrənməyə başladılar. Birinci STM-lər vakuum şəraitində aşağı temperaturlarda işləyirdi. 1984-cü ildə atmosfer təzyiqində, distillə olunmuş suda, duz məhlullarında tədqiqatların aparılması haqqında birinci məlumatlar yarandı. 1986-cı ildə alimlər Q.Binning və R.Rorer Skanedici tunel mikroskopunun kəşfinə görə fizika sahəsində Nobel mükafatına layiq görüldülər.

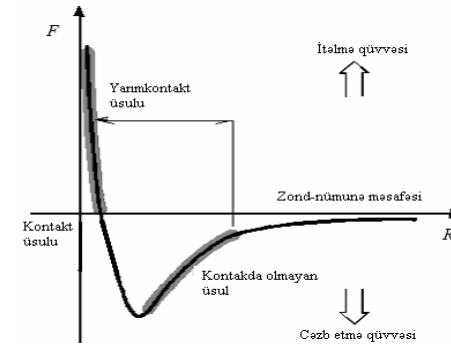
Skanedici tunel mikroskopunun əsas çatışmazlığı onun yalnız cərəyan keçirici nümunələrin tədqiqi imkanı olmasıdır. Bu 1986-cı ildə Qerd Binning, Kelvin Kueyt və Kristofer Qerber tərəfindən zond mikroskoplarının yeni nəslinin-atom-qüvvə mikroskopunun (AQM) yaradılması ilə bu çatışmazlıq aradan qaldırıldı [8]. AQM-in iş prinsipi atomlar arasındakı təsir edən atom qüvvələrinin istifadə olunmasına əsaslanır. Analoji qüvvələr ixtiyari yaxınlaşan cisimlər arasında təsir edir. AQM-ə belə cisimlər tədqiq olunan səth və onu skanedən zond ola bilər. Kiçik iti uclu iynə zond kimi istifadə olunur. Nazik platin folqadan hazırlanmış müstəvi elastik yay kantileveronun bir tərəfinə bərkidilmiş iti uclu iynə, o biri tərəfi isə saxlayıcıya bərkidilir. Bu kantilever iti uclu zondla birlikdə-zond çevirici adlanır. Skanetmə prosesində zond səth üzrə sürüşür. Onun relyefini gəzərək, bu zaman uyğun qeydiyyat sistemi kantileverin əyilməsini izləyir.

90-cı illərdə skanedici zond mikroskopunun bioloji obyektlərin tədqiqində istifadə olunmasının mümkünlüyünü təsdiq edən çoxlu elmi işlər yarandı. SZM yüksək ayırdetmə imkanına malik olub (elektron mikroskopların ayırdetmə imkanları ilə müqayisədə) bu zaman səthin relyefini ölçmək və maye mühitlərdə tədqiqat aparmaq mümkündür. Bu da bioloji ob-

yektlərin (həmçinin fiksə olunmayan canlıların da) strukturların -fizioloji və morfoloji xarakteristikalarının dinamik dəyişməsini izləməyə imkan verir. SZM-in ən üstün cəhətlərindən biri real vaxtda bioloji obyektlərin (ən əvvəl hüceyrələrin) tədqiqini aparmağa, bəzi bioloji proseslər haqqında, hətta mikrofilmlər-məsələn iki komplementar DNK molekullarının hibridləşməsini çəkməyə, səthin üç ölçülü şəklini almağa, obyektlərin lateral ölçülərini və kələ-kötürlülüyünü dəqiq təyin etməyə imkan verir.

SZM-in iş üsulları

SZM-in çoxlu iş üsulları mövcuddur. Onlar zond və nümunə arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsinin növlərinin, zondun nümunə səthi üzrə yerdəyişmə alqoritmlərinin, səthin müxtəlif xarakteristikalarının müxtəlif şəkillərini almaq üçün verilənlərin istifadə olunması üsullarının müxtəlifliyinin istifadə olunması ilə fərqlənir. Uyğun üsulun seçilməsi nümunənin tipi, çirkliliyi və mühitindən asılı olaraq skanetmənin aparılma şəraitindən asılıdır.



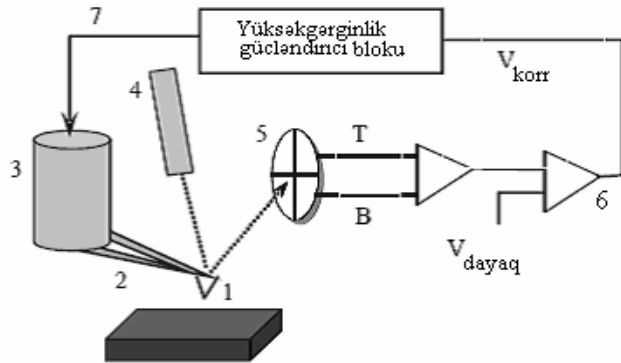
Şəkil 8-1. Zond və nümunə arasındakı F qarşılıqlı təsir qüvvəsinin R məsafəsindən asılılığı.

Zond və nümunə arasında təsir edən qüvvənin xarakterindən asılı olaraq atom-qüvvə mikroskopunun - kontakt, kontakt-sız, toxunmaqla kontakt (yarım kontakt) kimi müxtəlif üsulları vardır. Kontakt üsulunun istifadə olunmasında qəbul olunur ki,

zond nümunə səthində sürüşür və itələmə qüvvələrinin təsir oblastında yerləşir. Kontaktsiz üsulun istifadə olunması zamanı zond səthdən uzaqda və uzaqdan təsir edən cəzətmə qüvvələrinin təsir oblastında yerləşir. Yarımkontakt iş üsulunda işləyərkən, zond rəqs prosesində periodik olaraq növbə ilə həm cəzətmə, həm də itələmə oblastında olur.

Kontakt iş üsulu

Bu üsulda iş zond və nümunə arasında qarşılıqlı təsir itələmə qüvvələrinin təsir oblastında həyata keçirilir. Bu halda kantilever nümunə istiqamətində əyilmiş olur. Zond nümunə ilə kontaktda olur, bunun nəticəsi olaraq nümunə səthinin zədələnməsi təhlükəsi yarana bilər və zondun tez xarab olmasına və ya sınımasına səbəb olar bilər. Buna görə sərtlik əmsalı $k = 0,03 \div 1 \text{ N/m}$ kiçik olan kantilever istifadə olunur.



Şəkil 8-2. Kontakt iş üsulunda skanedici atom-qüvvə mikroskopunun sxemi. İşarələnmə: 1 - zond; 2 - kantilever; 3 - skanedici; 4 - lazer; 5 - dörd seksiyalı fotodetektor; 6 - komparator; 7 - yüksək gərginlik gücləndirici blok.

Səth və zond arasında təsir edən qüvvələrin ölçülməsi kantileverin tarazlıq vəziyyətindən əyilməsinə görə həyata keçirilir. Atom-qüvvə zond çeviricisi-yaylı kantilever olub sonunda iti uclu zond olan, yüksək həssaslığa malik olmaqla ayrıca atomlar arasında qarşılıqlı təsir qüvvələrini qeyd etməyə imkan

verir.

Kantileverin kiçik əyilmələrində zond və nümunə arasında F qarşılıqlı təsir qüvvəsini və zondun yerdəyişməsi z arasında münasibət Huk qanunu ilə təyin olunur: $F = -kz$, burada k - kantileverin sərtlik əmsalıdır.

Səth və zond arasında təsir edən qüvvənin dəyişməsi, zond bərkidilmiş kantileverin tarazlıq vəziyyətindən meyl etməsi baş verir, bu meylətmə yarımkeçirici lazer 4 və dörd seksiyalı fotodioddan ibarət olan xüsusi qeyd etmə qurğusunda qeyd olunur (şəkil 8-2). Kantileverin əyilməsindən alınan əks olunmuş şüa dörd seksiyalı fotodetektorun mərkəzinə nəzərən yerini dəyişmiş olur. Beləliklə, kantileverin əyilməsinin qiyməti fotodetektorun yuxarı və aşağı yarım hissəsində işıqlanmanın dəyişməsinə nəzərən təyin oluna bilər.

Komparator 6 qeydə alınmış siqnalı ilkin verilmiş V_{dayaq} (zond və nümunə arasındakı qarşılıqlı təsir qüvvəsini xarakterizə edən kəmiyyətlə) müqayisə edərək onun verilmiş qiymətdən meylinə görə korrektə edən V_{kor} siqnalını əmələ gətirir. Zondun səthlə qarşılıqlı təsirin qiyməti zondun səthə yaxınlaşması və səthdən uzaqlaşması 7 əks əlaqə sisteminin köməyi ilə həyata keçirilir. Əks əlaqə zond çeviricinin vəziyyətini dəyişməklə pyezogətiricini (skanedici ilə) idarə edərək, zond və nümunə arasındakı qarşılıqlı təsir qüvvəsini sabit saxlayır. Skanetmə sahəsinin hər bir nöqtəsində (x,y) Z hündür-lükdə siqnalı Z -pyezogətirmə kanalından götürülür.

Lateral qüvvə üsulu

Kontakt rejimində səthin relyefindən başqa, skanetmə prosesində zonda təsir edən lateral qüvvələrin qeydiyyatı kanalından istifadə edərək (**Lateral Force Mikroskopy-LFM**) skanetmə ilə nanometr məştabda səthin tribolik xüsusiyyətləri haqqında məlumat almaq olar.

Lateral qüvvə üsulunu istifadə edərkən, səth və onun üzərində sürüşən zond arasındakı sürtünmə qüvvəsi tədqiq olunur. Zond çeviricinin iş prinsipi AQM zond çeviricinin iş prinsipinə

oxşar olub, burada relyefin şəklinin alınması fotodetektorun (T-B) yuxarı və aşağı sektorlarının arasındakı fərq siqnalının qeydiyyatı hesabına formalaşır. Lateral qüvvələrin paylanmasının xəritəsini almaq üçün fotodetektorun (L-R) sol və sağ sektorlarının siqnallar fərqi seçilməsi əsasında olur. Skanetmə prosesində zonda təsir edən nümunə səthi lateral sürtünmə qüvvəsi $F_{mq} = \mu N$ kimi təyin olunur, burada N-nümunə tərəfindən zonda təsir edən qüvvənin reaksiyası, μ - lokal sürtünmə əmsalındır.

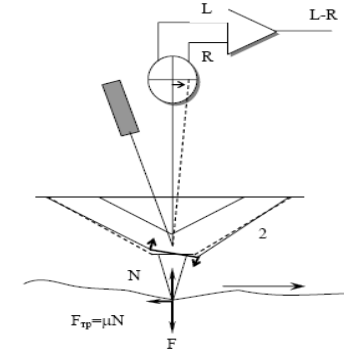
Kantilever şaquli müstəvidə fırlanma deformasiyasını hiss edir. Bu sol və sağ fotodetektorların (şəkil 8-3.) qeyri-balanslaşdırılmasına gətirib çıxarır. Zond nümunə səthinə bilavasitə toxunur. μ sürtünmə əmsalı nə qədər böyükdürsə, o qədər də kantileverin gövdə əyilməsi və L-R fərq siqnalı böyük olacaqdır. Beləliklə, SZM-də böyük sürtünmə əmsalı olan sahənin şəkli işıqlı olacaq, kiçik olan isə tutqun alınacaqdır. Adətən lateral qüvvələrin ölçülməsi kanalı relyefin tədqiqi ilə eyni zamanda işə başlayır. Fotodetektorun bütün sektorlarından daxil olan siqnallar eyni zamanda qeyd olunur.

Şəkil 8-4-də səthin relyefinin şəkli göstərilmişdir. (a) və (b) sağlam donorun bukal epiteliçit səthdə sürtünmə qüvvələrinin paylanmasının xəritəsi verilmişdir. Bu halda lateral qüvvə üsulu ilə epitelisit hüceyrənin səthinin hamarlığında bakteriyanın olduğunu aşkar etməyə imkan verir.

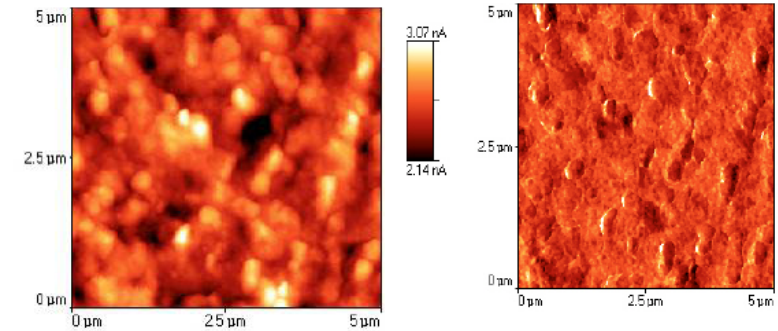
Qüvvənin modulyasiyası üsulu

Səthin relyefinin qeydə alınması ilə eyni zamanda nanometr masştabda nümunə səthinin mikromöhkəmliyini öyrənmək olar.

Bu üsuldə Z pyezogətirməyə (skanedic) şaquli oxu üzrə zondun yerdəyişməsinin və topoqrafiyasının izlənməsinin təmin olunması üçün sabit gərginlikdən əlavə kantileverin məxsusi rezonans tezliyindən çox kiçik olan 5 kHs yaxın tezlikli dəyişən tərkibli gərginlik verilir və deməli zond, şaquli ox üzrə 2-20A amplitudla rəqs edir (zond səthi oyadır və zond-səth qarşılıqlı təsiri yaranır).

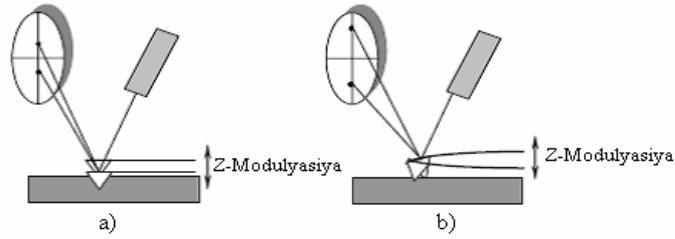


Şəkil 8-3. Lateral qüvvə çeviricisinin iş sxemi.



Şəkil 8-4. Bukal epiteliositin səth hissəsinin relyefi (solda) və sürtünmə qüvvəsinin şəkli (sağda). Sağ şəkildə bakteriya hüceyrələrinin identifikasiyası verilmişdir.

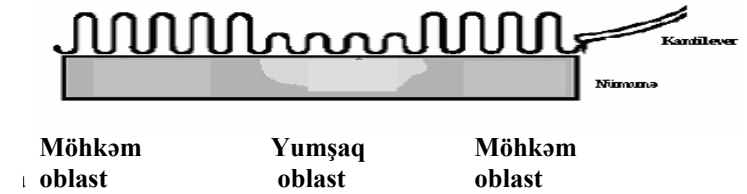
Beləliklə, zonda təsir edən dəyişən qüvvə nümunə materialın elastikliyi ilə mütənasib olub, tarazlıq vəziyyətinə nəzərən kantileverin əyilməsinə gətirir və T-B dəyişən tərkibli fərq siqnalının yaranması baş verir. Bu dəyişən tərkib seçilir və **Z - modulation** kanalına verilir. Buradan səthin mikromöh-kəmliyinin şəkil xəritəsi formalaşdırılır.



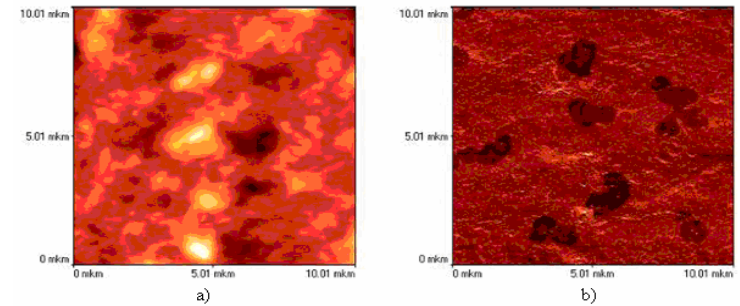
Şəkil 8-5. Modulyasiya qüvvəsi üsulu ilə işləyərəkən kantileverin əyilməsinin dəyişməsi. a - yumşaq nümunə halında; b - möhkəm nümunə halında.

Əgər nümunənin səthi yumşaqdırsa zondun ucu çətinliksiz nümunəyə daxil olur. Bu halda skanedicinin Z-ə nəzərən yer-dəyişməsi və zond təqribən eyni amplituda malik olacaq. Bu zaman fotodioddakı fərq siqnalı çox kiçik olacaq (şəkil 8-5a). Möhkəm nümunə səthini skan edərkən zond nümunə səthinə daxil olarkən müqavimətə rast gələcəkdir və bu zaman kantileverin güclü sürətdə əyilməsi və ya bükülməsi olacaq ki, bu fotiodda fərq siqnalının artmasına səbəb olacaqdır. Beləliklə, nümunə səthinin möhkəmliyinin dəyişməsi fotiodda siqnalın amplitudunun dəyişməsinə səbəb olacaq. Böyük amplituda səthin möhkəmliyi uyğun olacaq (ışıqlı hissələr), kiçik amplituda daha yumşaq səth uyğundur (tutqun hissələr). Beləliklə, möhkəmlik xəritəsinə görə təzadı fərqləndirmək olar. Bu nümunənin təbəqələrinin gətirilmə tərkibinin müxtəlif fazaları ilə şərtlənir (şəkil 8-6).

Qeyd edək ki, verilmiş üsulda Z üzrə modulyasiya amplitudu çox kiçik olur, belə ki zond itələmə qüvvələrinin təsiri oblastında rəqs edir. Bu nümunə səthinin relyefinin tədqiqi və nümunə səthinin mikromöhkəmliyinin paylanması xəritəsinin almaq üçün AQM kontakt üsulunu eyni zamanda reallaşdırmağa imkan verir. Şəkil 8-7-də səthin relyefi (a) və nanometr masştabda sağlam donor epitelial yastı hüceyrənin səth hissəsinin möhkəmliyinin paylanma xəritəsi verilmişdir (b).



Şəkil 8-6. Nümunə səthinin elastiklik xüsusiyyətlərindən asılı olaraq fotioddan alınan siqnalın amplitudunun dəyişməsinin sxemi (kantileverin əyilməsinin dərəcəsi).



Şəkil 8-7. Səthin relyefi (solda) və bukal epiteliositin səth hissəsinin mikromöhkəmlik xəritəsi (sağda).

Yarımkontakt iş üsulu

Bu üsulda iş zond və nümunə arasındakı qarşılıqlı təsir cəzətmə qüvvələrinin təsir oblastında həyata keçirilir.

Adətən yarımkontakt üsulu üçün I-şəkilli sərtlik əmsalı $k = 10 \div 100 N/m$ olan kantilever istifadə olunur.

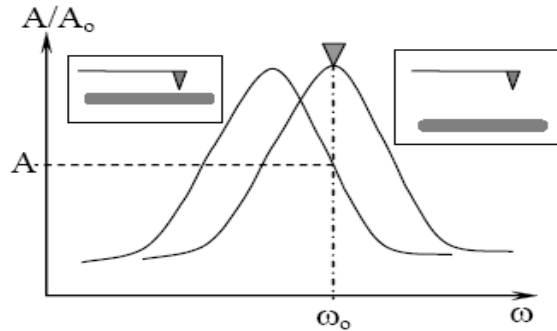
Yarımkontakt üsulunu istifadə edərkən pyezoskanedicinin z seksiyasına dəyişən gərginlik verilir (şəkil 8-8). Bu kantileverin həndəsi ölçülərinin dəyişməsinə səbəb olur. Dəyişən gərginliyin tezliyi kantileverin məxsusi rəqs tezliyinə bərabər götürülür (adətən 150-250 kHs intervalında qiymətləri dəyişir, rəqs amplitudu isə bir neçə on anqstrem olur). Bunun nəticəsi olaraq kantilever səth üzərində rezonans tezliyi ω_0 olmaqla

rəqs edir:

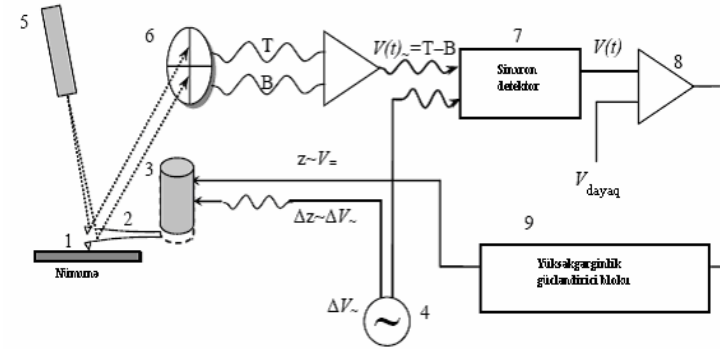
$$\omega_0 \sim \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ burada } m\text{-zond-kantilever sisteminin kütləsi, } k -$$

qüvvə sabitidir.

Nümunə səthinə zond yaxınlaşarkən kantileverin rəqlərinin xarakteri dəyişmiş olur, zond-nümunə qarşılıqlı təsir qüvvəsinin qradiyentinin olması kantileverin rəqləsinin rezonans tezliyinin ATX dəyişməsinə səbəb olur. Cəzətmə qüvvələrinin oblastında bu səthdən uzaqda ATX ölçmələrlə müqayisədə (şəkil 8-8) kantileverin rəqlərinin ATX sola yerinin dəyişməsinə səbəb olar. Belə ki, kantileverin məcburi rəqlərinin tezliyi sabit saxlanılır və sərbəst vəziyyətdəki rəqlərin ω_0 tezliyinə bərabər olur, bu zaman səthə yaxınlaşarkən kantileverin sərbəst ucunun rəqlərinin amplitudu azalmış olur. Bu rəqlərin amplitudu optik sistem vasitəsilə qeyd olunur və bu fotodetektorun yuxarı və aşağı yarım hissəsinin işıqlanmasının dəyişməsinə nəzərən təyin edilə bilər. Sonra sinxron detektor 7 vasitəsilə skanetmə vaxtı kantileverin rəqlərinin amplituduna mütənasib olan $V(t)$ sabit siqnal seçilir. Bu zaman gərginlik generatordan sinxron detektora 7 sinxrosiqnal verilir və skanedicijə verilən siqnalın rezonans tezliyinə bərabər tezlikdə kantilever rəqs etmiş olur (şəkil 8-9).



Şəkil 8-8. Kantileverin nümunə səthinə yaxınlaşması zamanı rəqlərin tezliyinin dəyişməsi.



Şəkil 8-9. Skanedici atom-qüvvə mikroskopunun yarımkontakt üsulunda iş sxemi: 1-zond; 2-kantilever; 3-skanedicijə; 4-dəyişən gərginlik mənbəyi; 5-lazer; 6-dörd seksiyalı fotodetektor; 7-sinxron detektor; 8-komparator; 9-əks əlaqə elektron dövrəsi.

Komparator 8 dövrədə qeydetmə qurğusu ilə qeyd olunan siqnalı ilkin verilmiş V_{dayaq} (zond-nümunə qarşılıqlı təsir qüvvəsinə xarakterizə edən) müqayisə edərək V_{dayaq} qiymətindən meyl etməsinə görə V_{korr} edən siqnalı əmələ gətirir. Zondla səth arasında qarşılıqlı təsirin səviyyəsi əks əlaqə sisteminin 9 köməyi ilə zond çeviricini səthə yaxınlaşdırmaq və səthdən uzaqlaşdırmaq yerinə yetirilir. Əks əlaqə zondun vəziyyətinin dəyişməsinə istifadə edərək, pyezogətirmə idarəedicinin köməyi ilə zond-nümunə qarşılıqlı təsir qüvvəsinə sabit saxlayır. Şəklinin hər bir (x, y) nöqtəsində Z hündürlüyü haqqında siqnal Z pyezogətirmə kanalından götürülür.

Bu üsul yüksək dəqiqliklə ayırdetmə imkanı ilə yumşaq və yapışqanlı nümunələrin (polimer, hüceyrə və bioloji molekullar) skan edilməsi üçün idealdır və ya daha möhkəm nümunələrin skan edilməsi zamanı isə zond möhkəm səthlə kontaktada olarkən kütləşməsinə və ya sınımasına səbəb ola bilər.

Faza təzadı təsviri üsulu

Tədqiq olunan nümunə səthinin relyefini əks etdirən zondun

rəqs amplitudunun dəyişməsinin qeydiyyatı ilə eyni zamanda, rəqslərin faza dəyişməsinə aşkar etmək imkanı mümkündür.

Rəqs prosesində zondun ucu nümunə səthinə toxunur, nəinki o itələmə, həmçinin adqezion, kapilyar və bir sıra başqa qüvvələrin təsirlərinə məruz qalır. Nəticədə zond və nümunə səthinin qarşılıqlı təsiri həm tezliyə, həm də rəqsin fazasına görə sürüşməsi baş verir. Əgər səthin ayrıca hissələri adsorbsiya xüsusiyyətlərinə malikdirsə, onda şəkildə əlavə təzadə malik olacaqdır, bu nümunənin materialından asılı olub müxtəlif hissələrdə özünü göstərəcəkdir. Bu zondun rəqs fazasının dəyişməsində özünü göstərir. Rəqsin fazasının aşkar olunması, səthin relyefinin alınması ilə eyni zamanda baş verir, onda amplitud və faza şəkillərini müqayisə etməklə nümunənin faza tərkibi haqqında informasiya əldə etmək olar. Faza tərkibinin şəkildən titanın səthinin məsaməli struktura malik olmasını görmək olar, bu implantantda sümük saplarının yetişdirilməsində zəruridir.

Faza təzadə üsulu geniş sahədə tətbiq olunmasından qiymətli məlumat, bəzi hallarda şəkillərinin qeyri-adi təzadəli materialın xüsusiyyətləri haqqında məlumat əldə etməyə imkan verir. Bu üsul, məsələn bioloji obyektlərin, maqnit və elektrik xarakteristikaları olan nümunələrin tədqiqi üçün istifadə oluna bilər və i. a.

SZM şəkillərinə təsir edən faktorlar

Zondun həndəsi parametrlərinin ayırdetməyə təsiri

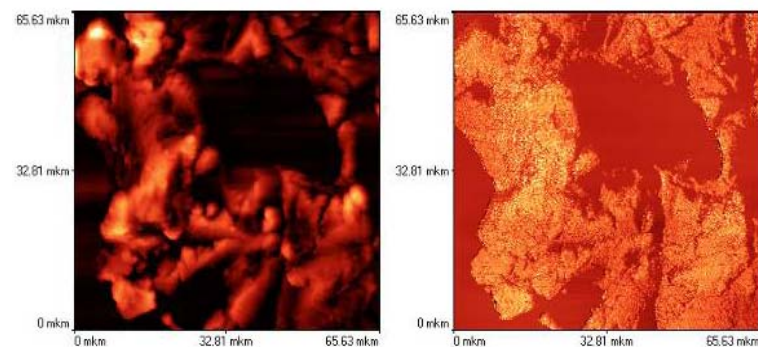
SZM - in hər bir X, Y və Z oxları üzrə maksimal ayırdetmə qabiliyyəti müxtəlif faktorlarla təyin olunur.

Z oxu üzrə ayırdetmə aşağıdakılarla məhdudlanır:

-Kantileverin əyilməsini qeyd edən optik sistemin həssaslığı ilə
-Nümunə səthinə nəzərən zondun rəqslərinin amplitudu ilə.

XY - müstəvisində maksimal ayırdetmə hər şeydən əvvəl zondun işləmə dəqiqliyi ilə təyin olunur. Ən əsası zondun ucunun həndəsi xarakteristikaları ilə bağlıdır. Atom müstəvi səthlərin skan edilməsi zamanı, ayırdetmə zondun ucundakı ato-

mun ölçüləri ilə məhdudlaşır (şəkil 8-11). Beləliklə, zondun makroskopik forması atom səviyyəsində ayırdetmə üçün təyin edici deyildir.



Şəkil 8-10. Titan diş implantantının hissəsinin səthinin relyefi (sağda), faza tərkibinin şəkli (solda).

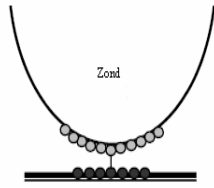
Relyefin çoxlu detallarının müqayisəli aşkarlığı vaxtı, şəklın keyfiyyəti iynənin həndəsi parametrləri ilə təyin olunur. Kritik olanları bunlardır: zondun sonunun əyrilik radiusu R və zondun hündürlüyünün onun oturacağıın diametrinə olan $\frac{L}{W}$ nisbəti (şəkil 8-13).

Zondun xüsusiyyətlərinin təsiri

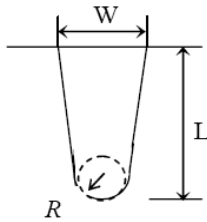
Atom-qüvvə mikroskopunda zond-nümunə qarşılıqlı təsir qüvvəsi elastiki kantileverin əyilməsinə görə ölçülür. Kantileverin ən mühüm xarakteristikaları-qüvvə sabiti (sərtlik əmsalı) və rezonans tezlikdir. Qüvvə sabiti zond və nümunə arasında kontaktda olarkən qüvvəni təyin edir və öz növbəsində kantileverin forması və hazırlandığı materialın növü ilə təyin olunur. Kontakt üsulu üçün çox kiçik qüvvə sabiti olan çox yumşaq kantilever istifadə olunur.

Yarımkontakt iş üsulunda sərt kantilever (qüvvə sabitinin böyük qiymətlərində) yumşaq kantileverə nəzərən böyük rezonans tezliyinə malikdir. Rezonans tezlik kantileverin ölçülərin-

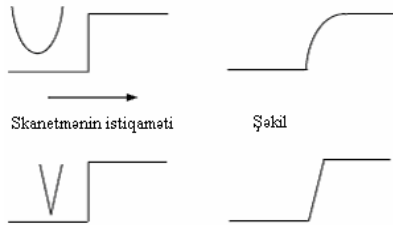
dən və materialdan asılı olur. AQM üçün istifadə olunan kanti-
leverlərin rezonans tezliyi 15÷500 kHs diapazonda dəyişir.



Tədqiq olunan nümunənin səthi
Şəkil 8-11. Axırncı atomun effekti.



Şəkil 8-12. Zondun həndəsi parametrləri.



Şəkil 8-13. $\frac{L}{W}$ parametrinin sonlu qiyməti və iynə ucunun əyrilik radiusunun təsirinə nəticəsinin səth profilinin şəklindəki təhrifləri.

Nümunə səthindəki adsorbsiya təbəqəsinin SZM zondla qarşılıqlı təsir qüvvəsinə təsiri

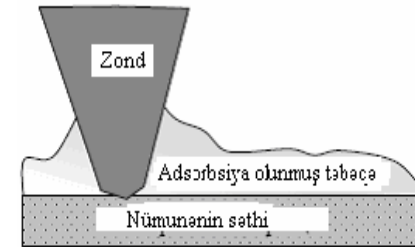
Havada nümunə səthi həmişə adsorbsiya olunmuş atomların nazik təbəqəsi ilə örtülmüş olur. Bu təbəqə sudan və havanın başqa komponentlərindən, həmçinin nümunənin hazır-

lanması zamanı kontaktda olduğu maddələrin atomlarından, çirklənmələrdən və i.a. ola bilər. Təbəqənin qalınlığı müxtəlif şəraitlərdən, məsələn, havanın rütubətindən asılı olaraq 2÷50 nm intervalı daxilində dəyişə bilər.

Zondun ucunun adsorbsiya təbəqəsinə toxunarkən kapillyar cəzətmənin nəticəsində güclü cəzətmə qüvvənin komponenti yaranmış olur. Kapillyar cəzətmə effekti, həmçinin iynə səthdən uzaqlaşarkən çox güclü hiss olunur. Bu hal da tez-tez kapillyar qüvvələr zondun səthə yaxın yerdə elə möhkəm saxlayır ki, bu zondun nümunədən qoparmaq əvəzinə çox vaxt kantileverin zədələnməsinə səbəb olur (nümunə sanki yapışqanlıdır).

Zondun ucunun forması da zond və adsorbsiya təbəqəsi arasında qarşılıqlı təsirin xarakterinə güclü təsir edir. Kapillyar qarşılıqlı təsir qüvvəsi böyük əyrilik radiusu və $\frac{L}{w}$ nisbəti ki-

çik olan zondların istifadə olunması zamanı güclü hiss olunur. Əksinə iti uclu və R-əyrilik radiusunun kiçik qiymətləri üçün, zond kapillyar qüvvələrin təsirinə az hiss edir, bu adsorbsiya təbəqəsinin kontakt sahəsinin az olmasına və səthdən zondun asanca qoparmağa imkan verir.



Şəkil 8-14. Nümunə səthində zondun adsorbsiya təbəqəsi ilə qarşılıqlı təsiri/

Nümunənin materialının təsiri

Nümunənin materialı zond və nümunə səthi arasındakı qarşılıqlı təsir qüvvələrinin xarakterinə güclü təsir edir. Belə ki, müxtəlif materiallar müxtəlif adsorbsiya sabitlərinə malikdir və

deməli adsorbsiya təbəqəsinin əmələ gəlməsinə meyillilik müxtəlifdir. Bundan əlavə bəzi materiallar statistik elektrik sahəsi yığmağa meyillidir, bu isə ilə səth arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsinə hiss olunacaq dərəcədə təsir edə bilər və AQM ölçmələrin aparılmasını çətinləşdirir.

Preparatların hazırlanması və SZM - də tədqiqi

Bu işdə skanedici zond mikroskopunun su mühitlərində mikrobiosenozların tədqiqində istifadə olunması təklif olunur: adı su və distillə edilmiş su.

Nümunənin hazırlanması:

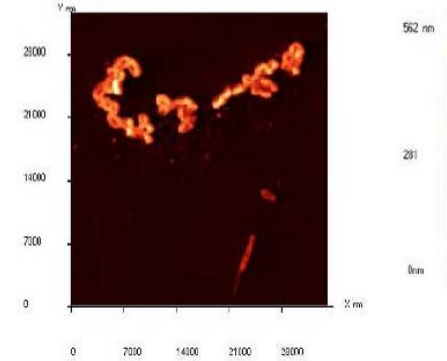
Su nümunəsi əvvəlcədən yağı təmiz silinmiş 1-2 həftəlik ekspozisiyalı dibində qoruyucu şüşə yerləşdirilmiş Petri fincanına tökülür. Petri fincanını bağlayıb 17⁰S-dən 20⁰S qədər temperaturda inkubasiya edirlər. Sonra şüşə çıxarılır, təmiz yuyulur (bir neçə dəfə preparat distillə olunmuş su olan stəkana salıb çıxarılır) və qurudulur.

Sonra preparatın bir neçə hissələrində ümumi skanetmə prosesi aparılır, suyun mikrobiotları son dərəcədə müxtəlifliyi ilə fərqlənir.

I. Distillə olunmuş su. Şəkil 8-15, şəkil 8-16-da distillə edilmiş suda 1-2 həftə ərzində inkubasiya zamanı alınmış preparatların ümumi skan edilmiş şəkilləri verilmişdir. Adı suda inkubasiya olunmuş şüşə ilə müqayisəyə görə, qoruyucu şüşə kifayət qədər “təmiz” alınmış, mikroorqanizmlərin lokal yığılması qeyd olunmuşdur.

Bir neçə ümumi skan edilmiş şəkilləri alıb müşahidə edirik ki, distillə olunmuş suda olan preparatlarda 4 növ mikroorqanizmlər müşahidə olunur:

- çubuq formalı yetişmiş mikroorqanizmlər;
- dairə şəkilli zəncirdə yerləşən mikroorqanizmlər;
- düzgün çubuq formalı ayrıca yerləşən hüceyrə;
- spiral formalı dartılmış mikroorqanizmlər.



Şəkil 8-15. Distillə edilmiş suda alınmış preparatın ümumi skan edilmiş şəkl: İnkubasiya - 1 həftəlik.

Skandetmə oblastının ölçülərini kiçildib, maraqlı kəsb edən hər bir mikroorqanizmləri skandərək (cədvəl 8-1) bundan sonra **NanoEducator** proqramının alətlərinin köməyi ilə hüceyrələrin ölçüləri təyin edilir:

Distillə olunmuş suda tapılmış mikrobiotlar əsasən bakteriya formasında təsvir olunmuşdur. Bakteriyaların mənsubiyyət qrupunu və formalarını təyin etmək üçün Berci təyinedicisindən istifadə olunmuşdur [30]. Skanedici zond mikroskopun bakteriyaların morfoloji strukturu və onların ölçülərinin dəqiq təyin edilməsi üçün unikal vasitədir. Onların təsnifatını vermək üçün bakteriyaların morfolojiyasına (formasına və bakteriyaların ölçüləri) əsaslanılır. Bundan əlavə, mikroorqanizmlərin yaşama mühiti və temperatur rejimləri nəzərə alınmışdır (su, adı orqanik birləşmələr və 17⁰S-dən 22⁰S-yə qədər temperatur).

Bu kriteriyalar əsasında aşağıdakı nəticələr alınmışdır:

1. Çubuqvarı formalı yetişmiş sonu tumurcuq şəkilli olan bakteriya. Formasına görə bu hüceyrələr tumurcuqlu və ya yetişmiş bakteriyalar 13-cü qrupa aiddirlər. Bakteriya hüceyrələrinin ölçüləri və yetişməsinə əsasən, onların miqdarına (çubuqvarı və yaşama mühitinə) görə belə nəticə çıxır ki, tapılmış mikroorqanizmlər Prostecobacter fusiformis növünə daxildir: hüceyrələr vereten və ya fibroid formaya

və yetişməsi nəzərə alınmadan 0,5-0,9x2-5 mkm ölçülərə malikdir. Hər bir hüceyrə heç olmasa bir polyar aralıq yarıdır. Aralığın diametri 0,1-0,2 mkm olub, hüceyrə polyusuna nəzərən yavaşca sıxılır və sonunda qalınlaşma müşahidə olunur. ≤0,1% tərkibli orqanik maddələr mühitdə

yaxşı böyüyürlər. İnkişaf etmə temperaturu 1⁰S dən 40⁰S kimidir. Suda, torpaqda və axar sulara rast gəlinir.

Bakteriyanın kifayət qədər maraqlı morfolojiyası vardır (şəkil 8-17).

Daha aydın bakteriya hüceyrələrin səthinin strukturunun tədqiqi üçün, faza təzadının təsviri üsulu tətbiq olunur. Faza təzadı şəkillərindən aydın görünür ki, hüceyrə divarının strukturu birceinsli deyildir.

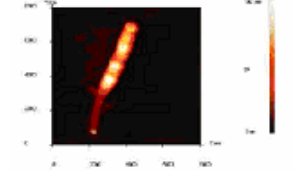
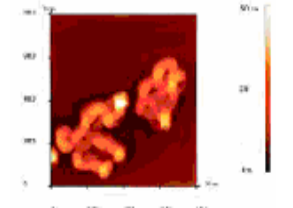
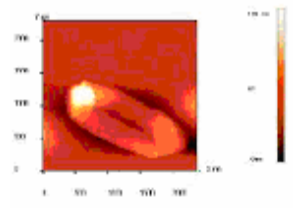
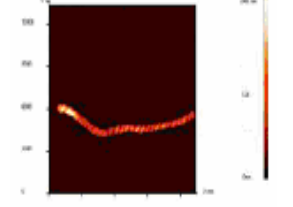
2. Xarakterik dairədə əyilmiş və qapalı, zəncir cisim formasına və diametrinə görə hörülmüş mikroorqanizmlər 3 “hərəkətsiz qrammənilik əyilmiş bakteriyalar” qrupuna aiddirlər. Berci təyin edicisinə görə yaşama mühitini nəzərə almaqla bu bakteriyalar Ancylobacter equaticus və ya Runella slithyfor-mis görünüşlü qrupa aiddirlər. Daha dəqiq aydınlaşdırmaq üçün əlavə üsulların, məsələn, biokimyəvi testlərin tətbiq olunması tələb olunur.

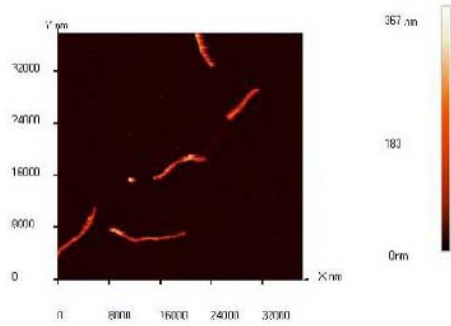
3. Tədqiqatlar nəticəsində, su mühitlərdə unikal mikroorqanizmlər (cədvəl 8-1: 1, 2) olduğu aşkar olunmuş, həmçinin bakteriya kimi digər yaşama mühitlərində, məsələn, insanın normal mikroflorasına daxil olan və ya torpaq saprofitlərdə (cədvəl 8-1: 3) rast gəlinəni aşkarlanmışdır. Maraqlı misal olan (3) faza təzadı üsulunu istifadə edərkən xüsusi ilə dəqiq aydınlaşdırılmış düzgün çubuqvari formalı sonlarında qidalanma maddəsi olan hüceyrələr aşkarlanmışdır (şəkil 8-19).

Su mühiti üçün bakteriya unikal olmayıb və onların ölçüləri Berci təyin edicisinin siyahısında əksər qruplara uyğun gəlir, bakteriyaların qrup, say əlaməti və görünüş klassifikasiyası çox saylı əlavə tədqiqatların aparılmasını tələb edir

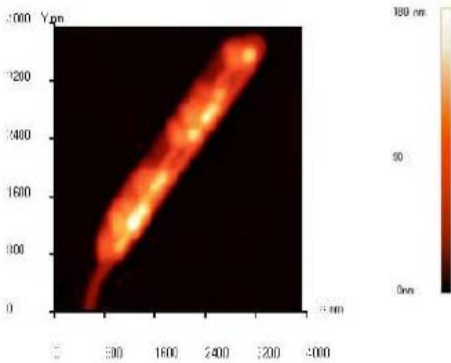
(məsələn, Grama görə rəngləmə, biokimyəvi yoxlamalar və i.a.).

Cədvəl 8-1

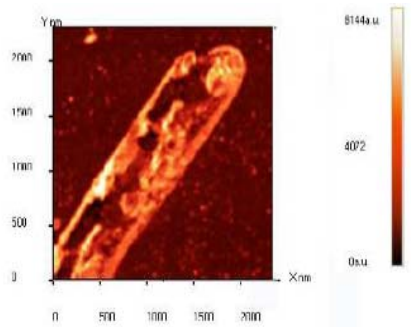
№	SZM şəkillər	Forma	Mikroorqanizmin orta ölçüsü
1		Çubuqşəkilli yetişmiş asanca əyilən, sonunda tumurcuq hamar daralan mikroorqanizmlər	Bütün hüceyrələr 0,8x7,5 mkm Diametri 450 mkn
2		Dairəşəkilli zəncirdə yerləşən mikroorqanizmlər	1,3dən 1,6 mkn
3		Ayrıca yerləşən düzgün çubuqvari formalı hüceyrə	0,8x2 mkn
		Spirala oxşar formalı dartılmış mikroorqanizmlər	0,5x13mkn



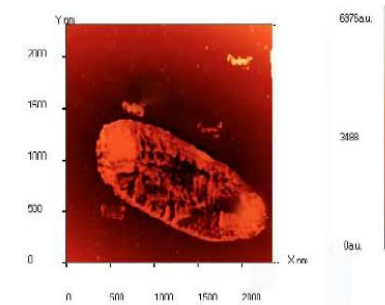
Şəkil 8-16. Distillə edilmiş sudan alınmış preparatların ümumi skanedilmiş şəklİ İnkuvasiya - 2 həftəlik.



Şəkil 8-17. Prostecobacter fusiformis səthinin relyefi.



Şəkil 8-18. Faza təzadının təsviri metodunun istifadə edərkən aşkarlanmış hüceyrə divarının morfoloji xüsusiyyəti.



Şəkil 8-19. Bakteriya hüceyrələrinin faza təzadı şəkilləri^ Polyuslarda qidalanma maddəsinin çökməsinin aydın görünməsi/

4. Görülmüş spiral görünüşlü formalı mikroorqanizmlər «spiroxet» qrupuna aiddir. Spiral quruluşlu hüceyrə çoxtəbəqəli xarici membrana xidmət edir. Bu membran protoplazmatik silindr-sitoplazmatik membran və hüceyrə divarı ilə əhatə olunan nüvə örtüklü sitoplazmanı örtür. Spiral bağlanmış protoplazma silindr, telşəkilli ayaqlı periplazma ilə üz çəkilmişdir. Telşəkilli ayaqlı hissələr hüceyrənin hərəkətmə komponentinə xidmət edir. Başqa bakteriyaların telşəkilli ayaqlı hissələrdən fərqli periplazma telşəkilli ayaqlı spiroxet hüceyrə ilə üz çəkilmişdir, membran ilə əhatə olunan və tamamilə hüceyrə daxilində yerləşmişdir.

Tapılmış mikroorqanizmlər hüceyrələrin forması və ölçülərinə görə onları Spirocheta plicatilis-spiral şəkilli hüceyrələrə aid olub, diametri 0,2-0,75 mkm və uzunluğu 5-250 mkm olub su mühitlərində yaşayır.

- II. **Adi su.** Şəkil 8-21 adi suda 1-2 həftəlik inkubasiyasından alınmış preparatın ümumi skan edilmiş şəklİ verilmişdir:

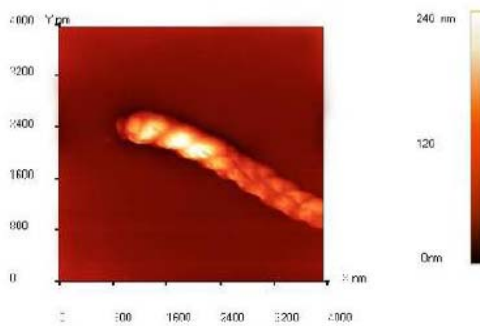
Qeyd edək ki, distillə olunmuş sudan alınmış şüşə preparatla müqayisəyə görə alınmış şəkillərdə bircinsli çirklənmələr alınmışdır. Sarı rəngli böyük həcmdə maddə toplanması müşahidə olunmuşdur (optik mikroskopda müşahidələr zamanı). Skan edərkən bu toplanmış maddələr özlülük və ya yapışqanlılıq

xüsusiyyətinə malik olduğundan onlar zonda yapışaraq tədqiqata mane olur (şəkil 8-22). Bunlar morfoloji olaraq düzgün forma əmələ gətirmirlər. Bu çirklənmələr həm orqanik, həm də qeyri orqanik xarakterlidir (Qeyri-orqanik maddələrdəki mikro-hissəciklər: dəmir oksidi, qum və ya digər qeyri-orqanik çirklər).

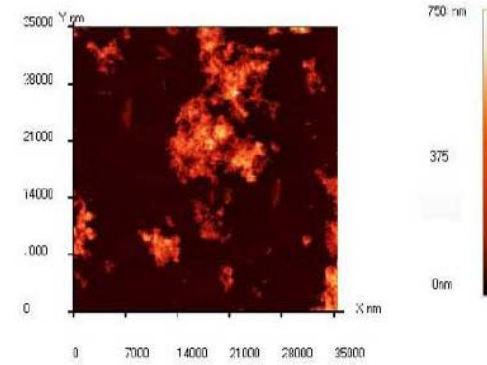
“Yapışqanlı” yığıntıda 2 növ bakteriya hüceyrələri aşkar edilmişdir:

Cədvəl 8-2 təsvir olunmuş bakteriya hüceyrələrinin böyük miqdarda onlarla çubuqşəkilli formalı xarakterik morfolojiyaları vardır. Fərz etmək olar ki, bu bakteriyalar kopsulu olan bakteriyalar tipinə aiddir. Verilmiş tip hüceyrələri aydınlaşdırmaq üçün əlavə tədqiqatların aparılması tələb olunur (Qrama görə rəngləmə, biokimyəvi əlamətlərin kompleks tədqiqi və i.a.). Bunlar bu laboratoriya işi daxilində deyildir.

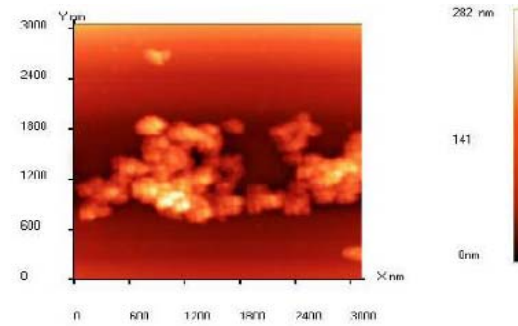
Sərbəst olaraq tələbələrini hazırladıqları, adi su, akvarium suyu və ya başqa müxtəlif mühitlərlə müqayisədə nümunənin mikroflorasını öyrənmək üçün qaynadılmış sudan istifadə etmək olar. Məsələn, müxtəlif duz məhlullarının qoruyucu şüşədə qurudulması nəticəsində alınmış kristal tədqiq etmək olar (şəkil 8-23).



Şəkil 8-20. AQM spirochet plicatilis şəklili: Hörülmə periodu 400nm.




Şəkil 8-21. Adi sudan alınmış preparatların ümumi skanedilməsinin şəklili: İnkubasiya - 1 həftəlik.



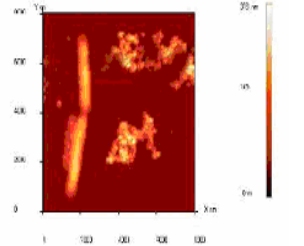
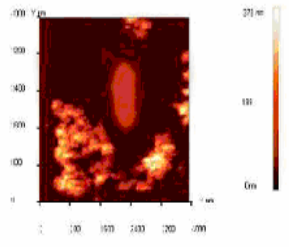
Şəkil 8-22. Adi sudakı mikrohissəciklər çirki.

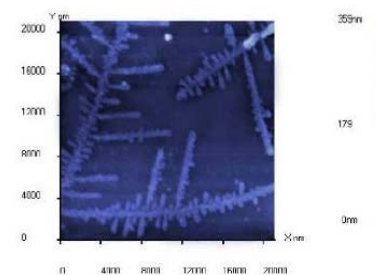
SZM şəkillərinin alınması

NanoEducator proqramını çağırdıqdan sonra kompüterin ekranında baş pəncərə təsvir olunacaq (şəkil 8-19). **File** menyusundan istifadə edərək **Open** və ya **New** və yaxud alətlər panelində uyğun düymələri seçməklə işə başlamaq olar. **File** ⇒ **New** komandasının seçilməsi SZM-də ölçmələrə keçməyi göstərir. **File** ⇒ **Open** komandasını seçmək isə əvvəllər alınmış şəkillərə baxılması və işlədilməsi başa düşülür. Proqram ölçmələrlə yanaşı, həmçinin verilənlərin baxılmasına və həmdə işlədilməsinə imkan verir.

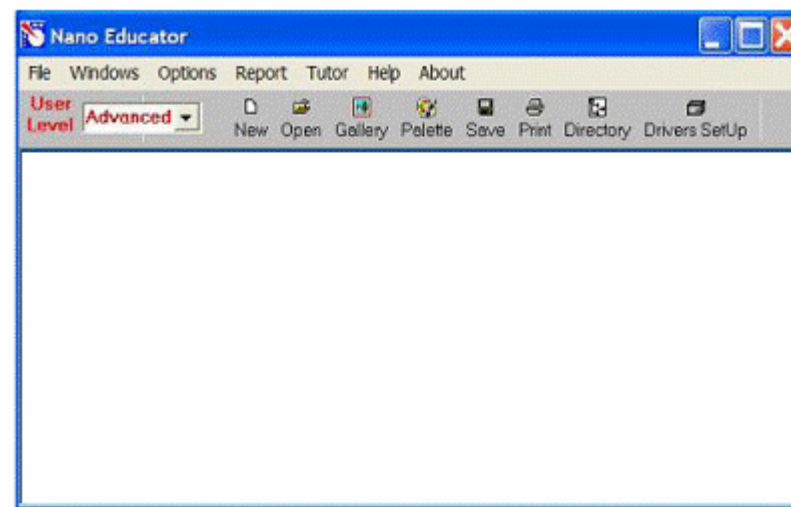
File ⇒ **New** komandasının icra olunmasından sonra ekranda dialoq pəncərəsi yaranmış olur, işçi qovluğu seçmək və ya yaratmaq imkanı yaranır və cari ölçmələrin nəticələrinin qovluğa yazılacağı nəzərdə tutulur. Ölçmə prosesini apararkən bütün alınmış verilənlər ardıcıl olaraq razılaşmaya görə **ScanData+i.spm** adlı fayla yazılacaq, burada **i**-indeksi proqram işə düşərkən sıfır qiymətini alır və hər bir yeni ölçmələr üçün qiyməti artmış olur. **ScanData+i.spm** faylları işçi qovluqda yerləşdirilir. Hər yeni ölçmələrə başlamazdan əvvəl qərarlaşdırılır. Ölçmələr aparılan vaxtı başqa işçi qovluğun seçilməsi imkanı mövcuddur. Bunun üçün proqramın baş pəncərəsinin alətlər panelində yerləşən  düyməsini sıxmaq lazımdır.

Cədvəl 8-2

Nö	SZM	Forma	Mikroorqanizmin orta ölçüsü
1		Uzun gərilmiş çubuqlar	0,5 x 3 mkm
2		Sonları bağlanmış çubuq şəkilli kiçik hamar.	0,6 x 1,6 mkm





Şəkil 8-23. NaCl damcısının qoruyucu şüşədə qurumasından alınan kristal.



Şəkil 8-19. NanoEducator proqramının baş pəncərəsi.

Skantmə pəncərəsində **Save Experiment** düyməsini sıxmaqla cari ölçmələrinin nəticələrini saxlamaq olar, yaranan dialoq pəncərəsində qovluğu seçmək və faylın adını göstərmək lazımdır, bu zaman **ScanData+i.spm** faylı ölçmələr aparılan proses vaxtı müvəqqəti fayl olub sizin göstərdiyiniz fayl adına dəyişəcək. Ölçmələrə başlamazdan əvvəl fayl seçdiyiniz işçi qovluqda saxlanılacaq. Əgər ölçmələrin nəticələri saxlanılmazsa onda yenidən proqramı işlədərəkən **ScanData+i.spm** müvəqqəti

qəti fayla yazılmış nəticələr ardıcıl olaraq yenidən yazılacaq (Əgər işçi qovluq dəyişməyibdirsə) proqramı bağlayarkən və yenidən işlədərəkən işçi qovluqda ölçmələrin nəticələri olan müvəqqəti faylların mövcudluğu haqqında xəbərdaredici məlumat verilir. **ScanData** standart adını dəyişmək olar. Bunu işçi qovluğun seçilməsi pəncərəsində etmək olar. İşçi qovluğun seçilməsi pəncərəsi proqramın baş pəncərəsinin alətlər panelində yerləşən  düyməsini sıxmaqla həyata keçirilir. **SPM File Explorer** pəncərəsində ölçmələrin nəticəsini saxlamaq olar. Lazımi faylları növbə ilə seçərək seçilmiş qovluqda onları saxlamaq lazımdır. **NanoEducator** cihazı ilə alınmış nəticələri **ASCII** formatına çevirmək olar. Bunu **NT MDT** istifadə olunan **Nova** və başqa proqramlarla etmək olar. Skan edilmiş şəkillər həmçinin onların kəsikləri olan verilənləri **ASCII** formatına xaric edilə bilər. Verilənləri **ASCII** formatına xaric etmək üçün proqramın baş pəncərəsindəki alətlər panelində yerləşmiş **Export** düyməsini  sıxmalı və ya **File** menyusunun **Export** → **ASCII** rejimini seçmək lazımdır.

Dialog pəncərəsini bağladıqdan sonra ekranda cihazın idarə olunması paneli görünür (şəkil 8-20). Cihazın idarə olunması panelinin sol hissəsində SZM-in konfigurasiyasını seçmək üçün düymələr yerləşir.

SFM -skanedic qüvvə mikroskopu (SQM)

STM -skanedic tunel mikroskopu (STM)



Şəkil 8-20. Cihazın idarəetmə paneli.

SQM ölçmələrinə hazırlıq aşağıdakı əməliyyatların yerinə yetirilməsindən ibarətdir:

Nümunənin yerinə qoyulması

Nümunəni qoymazdan əvvəl zondun zədələnməməsi üçün zond çeviricisini çıxarmalı.

Nümunənin bərkidilməsinin iki üsuluna baxılır:

- maqnit üzərində (bu halda nümunə maqnit altlığı üzərinə bərkidilməlidir);

- ikitərəfli yapışqanlı lent vasitəsilə metal üzərində nümunə yerləşdirilməlidir.

İkitərəfli lentdə olan nümunəni qoymaq üçün dirəkdən saxlayıcını burmaqla açmaq (skanedicini zədələnməmək üçün), sonra isə dayağa qədər onu yavaşca bağlamaq lazımdır. Maqnit bərkidilmə halında, nümunənin dəyişdirilməsi altlığı açmadan və ya bağlamadan həyata keçirilir:

Zond çeviricisinin yerinə qoyulması

Zond çeviricisinin yerinə qoyulması həmişə nümunənin yerinə qoyulmasından sonra yerinə yetirilməlidir. Çevirici 1 əl ilə götürmə vinti ilə saat əqrəbinin istiqamətində fırlatmaqla yuxarı vəziyyətə gətirilir (şəkil 8-21). Ölçü başlığının qapağında 2 zond çeviricisinin vintini boşaldıb, zonu saxlayıcının yuvasına qoymalı və qeydedici vinti saat əqrəbi istiqamətində yüngülce bərkitmək lazımdır (şəkil 8-21).



Şəkil 8-21. Zond çeviricisinin yerinə qoyulması.

Skannetmənin yerinin seçilməsi

Nümunə üzərində tədqiq olunan yerin seçilməsi üçün

cihazın aşağı hissəsində yerləşmiş iki koordinatlı stoldakı yerdəyişmə vintlərindən istifadə olunur.

Əvvəlcədən zondun nümunəyə yaxınlaşdırılması

Hər bir ölçmə üçün zondun qabaqcadan yaxınlaşdırılması əməliyyatı zəruri deyil. Onun zəruriliyi nümunə və zond arasındakı məsafənin qiymətindən asılı olaraq yerinə yetirilir. Əgər zondun ucu ilə nümunə səthi arasındakı məsafə 0,5-1mm-dən böyükdürsə, onda zondun nümunə səthinə yaxınlaşdırılması əməliyyatının aparılması məqsədə uyğundur. Zondla nümunə arasındakı məsafə böyük olarsa zondun nümunəyə avtomatik yaxınlaşması prosesinə çox vaxt tələb olunacaqdır.

Zondu aşağıya salmaq üçün əl ilə gətirmə vintindən istifadə edilir. Bu zaman zond və nümunə səthi arasındakı məsafəyə vizual olaraq lupa vasitəsi ilə nəzarət etmək lazımdır.

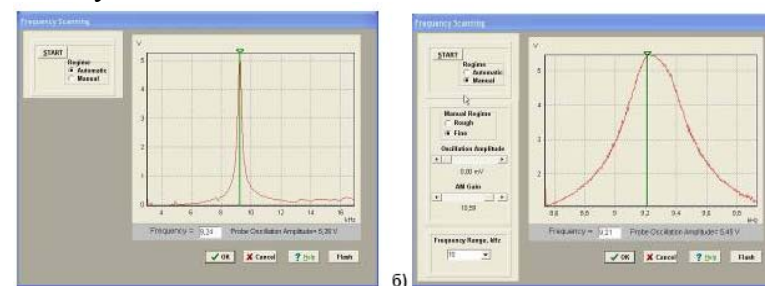
Rezonans əyrisinin qurulması və işçi tezliyin müəyyən edilməsi

Hər bir təcrübəni aparmazdan əvvəl bu əməliyyatın yerinə yetirilməsi zəruridir və bunu etmədən gələcək ölçmələrin mərhələlərinə keçid bağlıdır. Bundan sonra ölçmə prosesi zamanı elə vəziyyət yaranır ki, bu əməliyyatın təkrar yerinə yetirilməsi tələb olunur (məsələn, kontakt itərkən).

Rezonans axtarışı **ADJUST**⇒**RESONANCE** əmri ilə yerinə yetirilir. Bu əməliyyatın yerinə yetirilməsi deyərəkən, generator tərəfindən verilən məcburi rəqslərin tezlikləri dəyişərəkən, zondun rəqs amplitudunun ölçülməsi nəzərdə tutulur. Bunun üçün **Run** düyməsini sıxmalı.

Avtomatik rejimində zondun rəqs amplitudunun müşahidə olunan maksimal qiymətinə bərabər generatorun tezliyi avtomatik təyin olunur. Verilmiş tezlik diapazonunda zondun rəqs amplitudunun dəyişməsini göstərən qrafikdən rezonans pikinin formasını müşahidə etməyə imkan verir (şəkil 8-22a). Əgər rezonans piki aydın ifadə olunmayıbdırsa və ya rezonans tezliyində amplitud kiçikdirsə (1V aşağı), onda ölçmələri aparmaq üçün parametrləri dəyişmək zəruridir və rezonans tezliyini

təkrar təyin etmək lazımdır.



Şəkil 8-22. Rezonansın axtarışı rejimi pəncərəsi və işçi tezliyin təyini: a) - avtomatik rejim; b) - əl rejimi.

Bunun üçün **Manual** rejimi istifadə olunur. Bu rejimi seçərək **Frequency Scanning** pəncərəsində əlavə panel yaranır (şəkil 8-22 b) və aşağıdakı parametrləri korrektə etməyə imkan verir:

-Generator tərəfindən verilən rəqs amplitudu (**Oscillation Amplitude**). Bu kəmiyyətin qiymətinin minimal verilməsi təklif olunur (sıfıra kimi də olar) və 50 mv böyük olmasın.

-Amplitudu gücləndirən əmsal (**AM Gain**). Zondun rəqs amplitudunun kifayət qədər böyük olmayan qiymətlərində (<1V) bu əmsalın qiymətinin artırılması məsləhətdir (təklif olunur). Rezonansın axtarışına başlamaq üçün **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır.

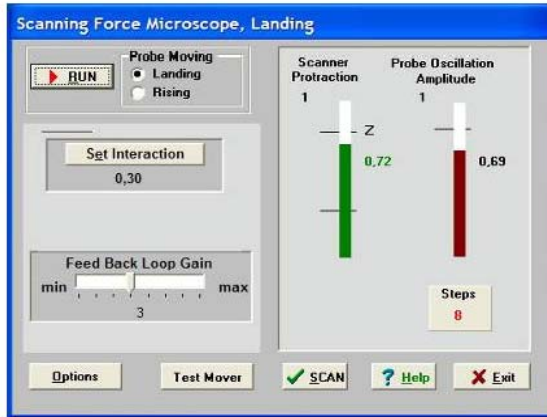
Manual rejimi mışın köməyi ilə seçilmiş tezliyi qrafikdə yaşıl kursurun yerini dəyişməklə etmək olar, həmçinin seçilmiş tezliyin kiçik qiymətlərinin diapazonunda rəqslərin amplitudunun dəyişmə xarakteri nəzərə alınır (bunun üçün **Manual Regime Fine** vəziyyətini seçərək **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır).

Qarşılıqlı təsirin alınması

Qarşılıqlı təsirin alınması avtomatik gətirmə mexanizminin köməyi ilə zond və nümunə yaxınlaşmasının idarəetmə prosedurası ilə yerinə yetirilir. Cihazın idarəetmə panelindəki



düyməsini sıxmaqla bu proseduranı çağırmaq olar. SQM-lə işləyərkən rezonans tezliyin axtarışı və qurulması əməliyyatından sonra bu düyməyə imkan yaranır. **Scanning Force Microscopy, Landing** (şəkil 8-23) pəncərəsində zondun yaxınlaşmasını idarə edən elementlər yerləşir, həmçinin proseduranın yerinə yetirilmə gedişini analiz etməyə imkan verən idikasiya parametrləri vardır.



Şəkil 8-23. Qarşılıqlı təsirin alınması rejiminin pəncərəsi.

Landing pəncərəsi istifadəçiyə aşağıdakı kəmiyyətləri müşahidə etməyə imkan verir:

- Z oxu üzrə skanedicinin maksimal mümkün uzaqlaşması (yuxarıya qalxması) (**Scanner Protraction**) vahid qəbul olunmuşdur. Skanedicinin qalxmasının cari vəziyyəti uyğun sol indikatorun dolması səviyyəsinin rəngi ilə xarakterizə olunur: yaşıl rəng-işçi zona, göy rəng-iş zonasından kənar, qırmızı rəng-skanedici nümunə səthinə çox yaxınlaşmışdır və bu zondun deformasiyasına (zədələnməsinə) gətirib çıxarar. Sonuncu halda proqram xəbərdaredici səs verir.
- Qarşılıqlı təsir qüvvəsinin olmamasına uyğun olaraq zondun rəqs amplitudu (**Probe Oscillation Amplitude**) vahid qəbul edilir. Zondun rəqs amplitudunun qiyməti sağ indikatora

çəhrayı rənglə dolması səviyyəsi ilə göstərilir. **Probe Oscillation Amplitude** indikatorundakı üfqi nişan skanedicinin vəziyyətinin analiz edilməsi və onun avtomatik işçi vəziyyətinə çıxmasını göstərir.

-Verilmiş istiqamətdə (**Probe Moving**) gedilmiş (**Steps**) addımların sayıdır: **Landing**-yaxınlaşma, **Rising**-uzaqlaşma.

Zondun aşağı salınması prosesinə başlamazdan əvvəl zəruridir:

1. **Probe Moving** elementində **Landing** (yaxınlaşma) imkanının seçilməsinə əmin olmalı.
2. Yaxınlaşma parametrlərinin düzgün verilməsini yoxlamaq:
 - Əks əlaqə dövrəsində **Feed Back Loop Gain** - gücləndirmə əmsalı 3 qiymətinə bərabər götürülür.
 - **Set Interaction** düyməsini sıxaraq və **Set Interaction** pəncərəsində **Amplitude Suppression** (şəkil 8-24) parametrlərinin qiyməti 0,3 bərabər olmasını yoxlamaq.
3. **RUN** düyməsini sıxmaq.

Steps indikatoru keçilmiş addımları hesablamağa başlayır. Qarşılıqlı təsirin əmələ gəlməsindən sonra ekranda **Landing done** məlumatı yaranır.

Zonda əks əlaqədən çıxarmaq, zond və nümunə arasındakı məsafənin artırılması üçün zondun uzaqlaşması rejimindən istifadə olunur (**Probe Moving: Rising**). Uzaqlaşma əməliyyatının yerinə yetirilməsi üçün **Probe Moving: Rising** hərəkət istiqamətini seçmək zəruridir və **RUN** düyməsini sıxmalı.

Skametmə

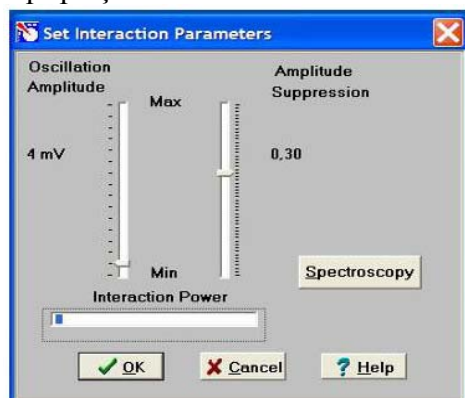
Yaxınlaşma (**Landing**) prosesinin yerinə yetirilməsindən sonra və qarşılıqlı təsirin əmələ gəlməsindən sonra skanetmə mümkün olur (cihazın idarə olunması pəncərəsində



düyməsi). Bu düyməni sıxaraq (şəkil 8-25 də skanetmə pəncərəsinin şəkli verilmişdir) istifadəçi bilavasitə ölçmələrin aparılmasına və ölçmələrin nəticələrinin alınmasına başlayır.

Skametmə rejimində skanetmənin parametrlərinin daxil edilməsi zəruridir. Bu parametrlər **Scanning** pəncərəsinin yuxarı

sağ hissəsində qruplaşdırılıbdır.



Şəkil 8-24. Zond və nümunə qarşılıqlı təsirinin kəmiyyətlərinin verilməsi pəncərəsi.

Proqramı birinci dəfə işlədərkən bu kəmiyyətlərin qiymətləri razılaşmaya görə qəbul olunur:

Skantmə sahəsi Scan Area (Xnm*Ynm): 5000 * 5000;

Oxlar üzrə ölçmə

nöqtələrin sayı

Skantmənin sürəti

Skantmənin yolu

X, Y: NX = 100, NY = 100;

Velocity = 1000 nm/s;

Path skantmənin istiqamətini müəyyənləşdirir. Proqram sürətli skantmənin ox istiqamətini seçməyə imkan verir(X və Y).

Proqramla iş başlayan zaman

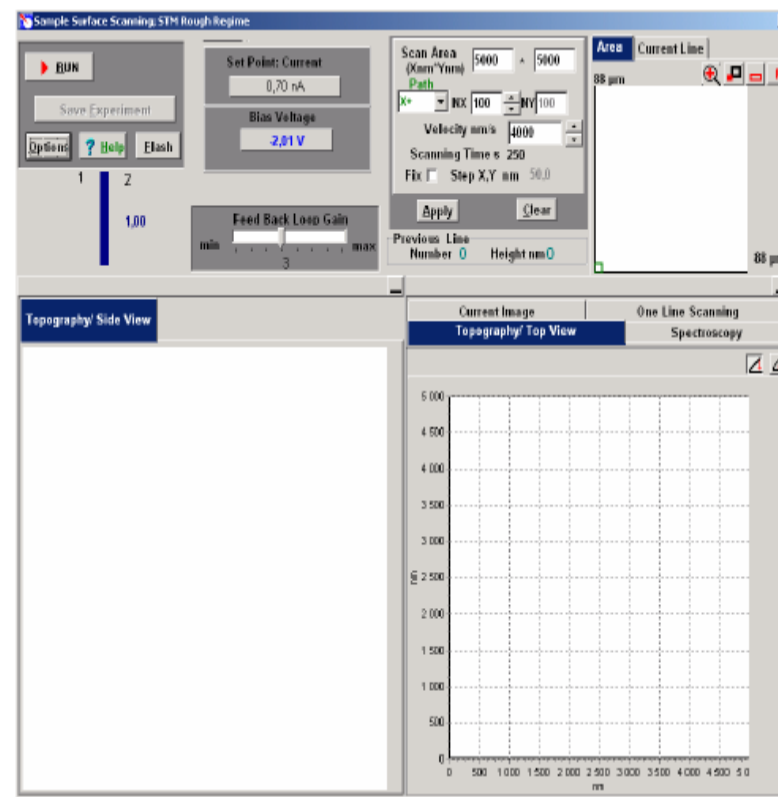
Path =X+ qəbul olunur.

Skantmə parametrlərini verdikdən sonra, daxil edilmiş parametrlərin qəbul olunması üçün **Apply** düyməsini və skantməyə başlamaq üçün **Run** düyməsini sıxmaq lazımdır.

Cari ölçmələrin nəticələrinin saxlanması üçün skantmə pəncərəsində **Save Experiment** düyməsini sıxmaq lazımdır və bu zaman görünən dialoq pəncərəsində qovluğu seçməli və faylın adını göstərməli.

8.3. Metodik göstərişlər

NanoEducator skandeci zond mikroskopunda işləməyə başlamazdan əvvəl cihazdan istifadə qaydalarını öyrənmək zəruridir [7].



Şəkil 8-25. SQM skantmə və nəticələrinin təsviri prosesinin idarə olunması pəncərəsi.

8.4. Tapşırıq

1. Sizi maraqlandıran mühit seçərək və müstəqil bioloji nümunələri SZM-də tədqiq etmək üçün hazırlayın.
2. Təcrübədə **NanoEducator** cihazının ümumi konstruksiyasını öyrənin və **NanoEducator** cihazın idarə olunması proqramı

ilə tanış olun.

3. **NanoEducator** optik sistemindən istifadə edərək, nümunə səthinin maraqlandıran hissələrini seçib SZM-də bir neçə ümumi skanetmənin şəkillərini almalı.
4. Sizi maraqlandıran mikroorqanizmlər və ya sadə orqanizmləri seçərək, faza təzadı üsulunu tətbiq etməklə səthin skanedilməsini aparın.
5. Alınmış şəkillərin işlənməsi və analizini aparıb, alınmış sadə və ya böyümüş bakteriyaların aydınlaşdırılmasına çalışın.

8.5. Yoxlama sualları

1. SZM-in əsas müxtəlifliyini deyin.
2. AQM əsas iş üsullarını və onların təyinatını təsvir edin.
3. SZM şəkillərinə təsir edən faktorları deyin.
4. Faza təzadı ölçmələri üsulu nə üçün istifadə olunur?
5. Bioloji obyektlərin SZM tədqiqatları hansı imkanlar verir?

ƏDƏBİYYAT

1. A.M.Məhərrəmov, M.Ə.Ramazanov, L.İ.Vəliyeva. **Nanotexnologiya**, Çarşıoğlu nəşriyyatı, Bakı, 2007.
2. М.Борн, Э.Вольф. Основы оптики. **М.: Наука**, 1973.
3. Э.Руска. Развитие электронного микроскопа и электронной микроскопии - **Нобелевские лекции по физике** - 1996. УФН, т. 154 (1988), вып.2, с. 243.
4. Г.Бинниг, Г.Рорер. Сканирующая туннельная микроскопия-от рождения к юности - **Нобелевские лекции по физике** - 1996. УФН, т.154 (1988), вып.2, с. 261.
5. В.С.Эдельман. Сканирующая туннельная микроскопия (обзор). **Приборы и техника эксперимента**, 1989, №5, с.25.
6. В.Л.Мионов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. **Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений**. ИФМ РАН г.Н. Новгород, 2004 г. -110 с.
7. Руководство пользователя прибора **NanoEducator**.
8. J.A.Kubby, J.J.Boland. Scanning tunneling microscopy of Semiconductor Surfaces. Eslevier, 1996, **Surface Science Reports**, 26 (1996) 61-204).
9. G.Binnig, C.F.Quate, Ch.Gerber. Atomic force microscope. **Phys. Rev. Lett.**, 1986, Vol. 56, № 9, p.930-933.
10. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. **Нижний Новгород: Изд. ННГУ**, 1993.
11. M.Tortonesi, R.C.Barrett, C.F.Quate. Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection. **Appl. Phys. Lett.**, 1993, Vol. 62, No. 8, p.834.
12. А.А.Ерофеев, СВ. Бойцов, Т.А.Поплевкин. Пьезокерамические микроманипуляторы для сканирующего туннельного микроскопа. **Электронная промышленность**, 1991, № 3, стр.54.

13. А.П.Володин, А.Е.Панич. Применение пьезокерамических материалов ПКР в низкотемпературных сканирующих туннельных микроскопах. **Приборы и техника эксперимента**, 1989, № 5, с.188.
14. R.C.Barrett, C.F.Quate. Optical Scan-Correction System Applied to Atomic Force Microscopy. **Rev. Sci. Instrum.** 62(6), 1393 (1991). Имеется перевод на русский язык: Р. Барретт, К.Куэйт. Оптическая система коррекции растра для атомно-силового микроскопа. Приборы для научных исследований, 1991, №6, с. 3.
15. J.E.Griffith, G.L.Miller, C.A.Green. A Scanning Tunneling Microscope with a Capacitance- Based Position Monitor. **J. Vac. Sci. Technol.** В 8(6), 2023 (1990).
16. Mizutani et. Al. A Piezoelectric-Drive Table and its Applications to Microgrinding of Ceramic Materials. **Precision Engineering**. 12(4), 219 (1990).
17. P.M.Williams, K.M.Shakesheff et al. Blind reconstruction of scanning probe image data. **J.Vac. Sci. Technol.** В 14 (2) p. 1557-1562 (1996).
18. А.А.Бухараев, Н.В.Бердунов, Д.В.Овчинников, К.М.Салихов. ССМ метрология микро- и наноструктур. **Микро-электроника**, т. 26, № 3, с. 163 -175(1997).
19. В.И.Никишин, П.Н.Лускинович. Нанотехнология и нанoeлектроника. **Электронная промышленность**. 1991, № 3, с. 4.
20. Неволин В.К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии. **Учебное пособие/ М: МИЭТ**, 2000 г.
21. Matsumoto K., Ishii M., Segawa K., Oka Y., Vartanian B.J., Harris J.S. Room temperature operation of single electron transistor made by the scanning tunneling microscope nanooxidation process for the TiO_x/TiO system. **Appl. Phys. Lett.**, 68, 34 (1996).
22. Cooper E.B., Manalis S.R., Fang H., Dai H., Matsumoto K., Minne S.C., Hunt T., Quate C.F. Terabit-per-square-inch

- data storage with the atomic force microscope. **Appl. Phys. Lett.**, 75, 3566 (1999).
23. Рамбиди Н.Г., Замалин В.Н. Молекулярная микроэлектроника: физические предпосылки и возможные пути развития. **Поверхность. Физика, химия, механика.** 1986, №8, с. 5.
24. Неволин В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии. **Электронная промышленность.** 1993, №10, с. 8.
25. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: **Мир**, 1976, 511 стр.
26. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: **Мир**, 1982, книги 1, 2, 790 стр.
27. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. М.: **Сов.радио**, 1979, 312 стр.
28. Поль де Крюи. Охотники за микробами. М.: **Терра.** 2001.
29. Руководство к практическим занятиям по микробиологии. Под ред. Егорова Н. С. М.: **Наука**, 1995.
30. Хоулт Дж., Криг Н., П.Снит, Дж.Стейли, С.Уильяме. Определитель бактерий Берджи. М.: **Мир**, 1997. Т. № 2. с.574.