

## **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.

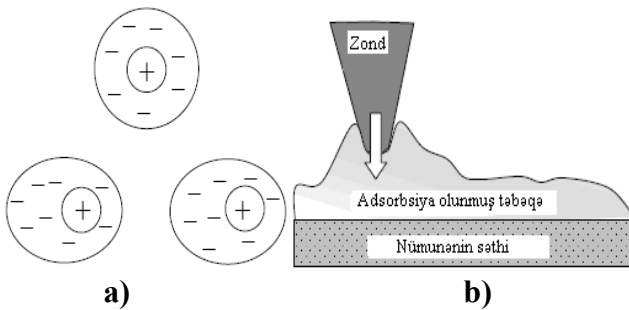
#### **Skanedici atom-qüvvə mikroskopunun əsasları.**

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

Kelvin 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

qüvvəsi yaranır. Cəzətmə qüvvələri eyni zamanda elektrostatik qüvvələrin hesabına yaranmağa bilər.

Məsafənin daha da kiçilməsi, itələmə qüvvələrinin yaranmasına səbəb olur. Zond və nümunə arasında məsafə atomlar arasındakı 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 tutulmuşdurlar. 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 arasındakı  $R$  məsafəsindən asılılığı

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

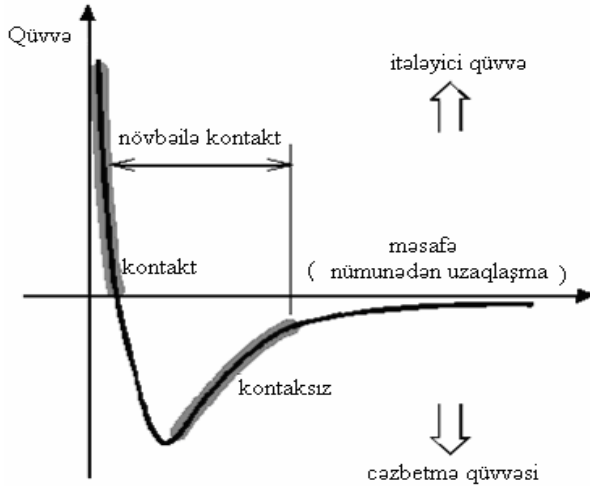
kimidir.

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 cəzətmə qüvvələrinin oblastında yerləşir. Yarımkontakt rejimdə zond səthə qismən toxunur, növbə ilə həm cəzətmə 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

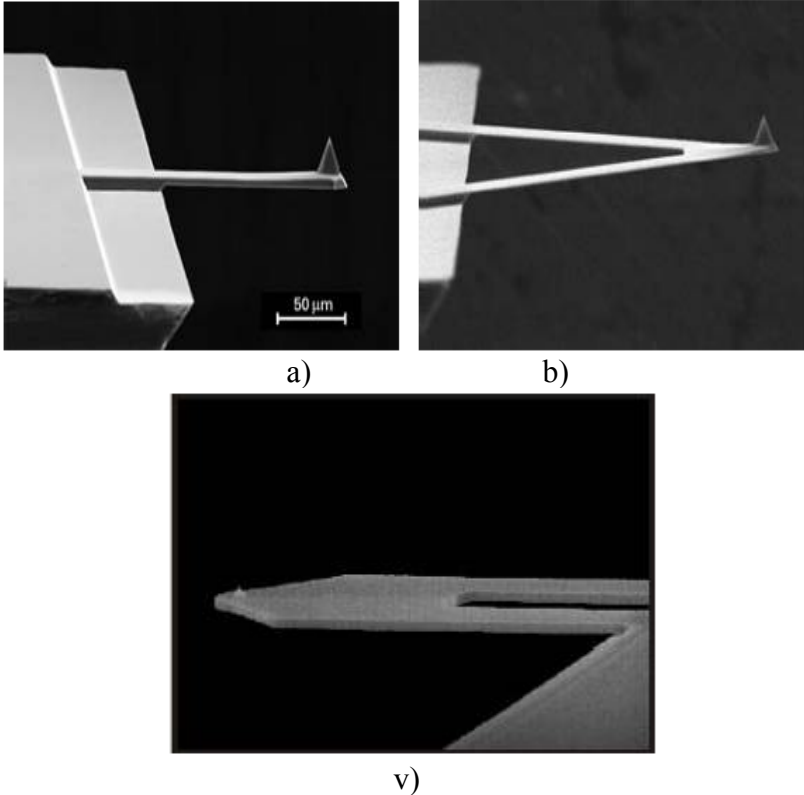
ölçmədir, yəni kontakt olan oblastda itələmə qüvvəsinin qiyməti cəzətmə qüvvəsinin qiymətindən xeyli böyükdür. Bəzən onun istifadə olunması zamanı nümunə səthinin strukturunun pozulması təhlükəsi mümkündür və ya zondun tez yararsız hala düşməsinə və sınımasına səbəb olar. Kontaktsiz üsulda ölçmələr zamanı nümunənin korlanması aradan çıxır, ancaq ölçmə siqnalları çox azalır. Buna görə atom-qüvvə mikroskopunda səthin müxtəlif xüsusiyyətlərinin vizualizasiyası zamanı qarşılıqlı təsirin aşkarlanması üçün ən çox yarımkontakt 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 - şəkilli kantilever, b) I - şəkilli kantilever,  
v) kontakt pyezolever

### AQM-in kontakt iş rejimi

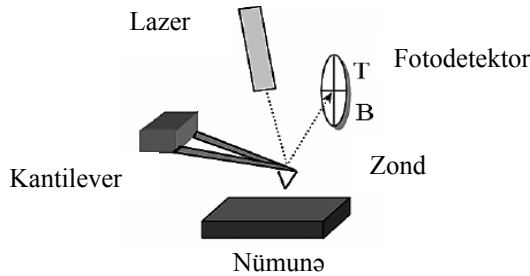
Bu iş rejimində zond və nümunə arasındakı qarşılıqlı təsir, itələmə qüvvələrinin təsir oblastında baş verir. Adətən, kontakt

rejimində  $\text{Si}_3\text{N}_4$  - dən hazırlanmış piramidalı nazik təbəqəli zond kantilever işlədilir (Şəkil 3-3). Kantileverlərin sərtlik əmsali  $k = 0,03 \div 1 \text{ N/m}$  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 köməyi ilə qeyd olunur. Optik sistem yarımkəçirici 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.

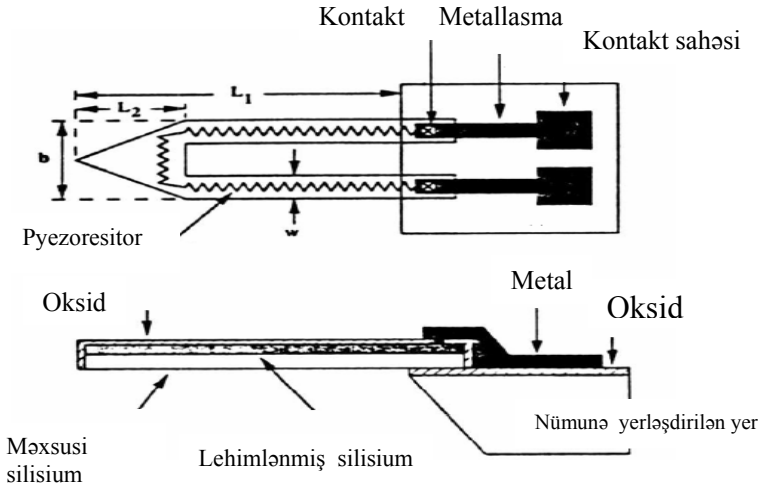


Şəkil 3-4. Qüvvə sensorunun sxemi

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

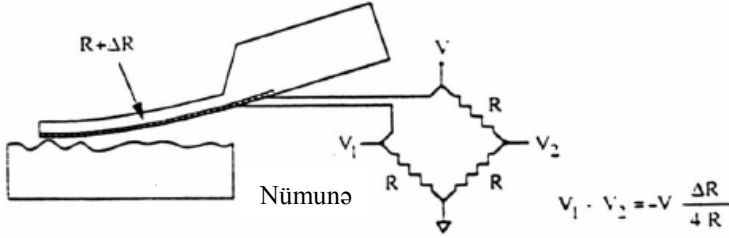
və o güclü pyezorezistiv effektə malikdir. Pyezoleverin iş prinsipi sadə olub, kantileverin əyilməsi qanunu güclü mexaniki gərginliyin baş verməsinə əsaslanır. Bu da rezistiv təbəqədə elektrik müqavimətin dəyişməsinə gətirib çıxarır. Pyezorezistiv material kimi kantileverin səthində amorf silisium oblastında 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 sxeminə birləşir ki, bu da birbaşa elektrik müqavimətinin dəyişməsinə görə kantileverin əyilməsini ölçməyə imkan verir.



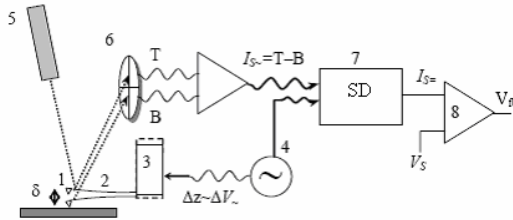


Şəkil 3-6. AQM pyezoleverli sensorun sxemi

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-yarımkeçirici 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  $\omega_c$  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  $\omega$  -pyezoqurğunun məcburi rəqs tezliyi,  $Z_0$  -rəqsin amplitudunun sıfıra bərabər qiymətindəki zond-nümunə məsafəsi,  $z(t)$ -t anında zond-nümunə məsafəsi,  $\Delta Z$  - məcburi rəqslərin amplitudu(kantileverin sonuna pyezovibrator bərkidilmişdir) həyəcanlanma amplitudu,  $Q$ -adsız kəmiyyətdir.  $Q$  keyfiyyətlilik əmsalı olub, rəqs sistemindən və xarici mühitin şərtlərindən asılıdır (hava, maye və ya vakuum).  $Q$  - kəmiyyəti rəqslərin xarakterik  $\tau$  sönmə vaxtı ilə aşağıdakı kimi əlaqədər:

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

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 sönmə və heç bir maraq kəsb etmir. Stasionar rəqs- $\omega$  rəqs tezliyi və  $\Delta Z \neq 0$  həyəcanlanma amplitudu olan harmonik rəqslərdir.

Zondun stasionar rəqslərinin amplitudu

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

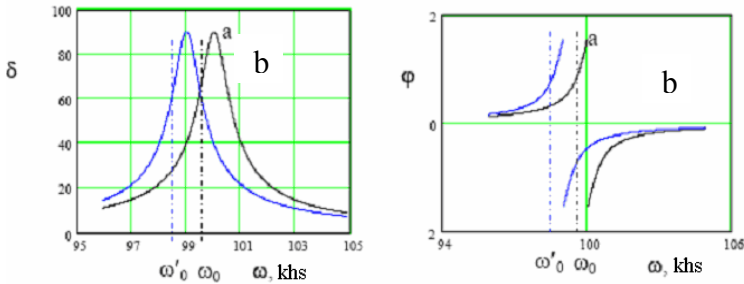
düsturu ilə hesablanır.

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  $\delta$  amplitudu və  $\varphi$  fazasının səthdən uzaqda (a) və səth yaxınlığında (b)  $\omega$  -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.

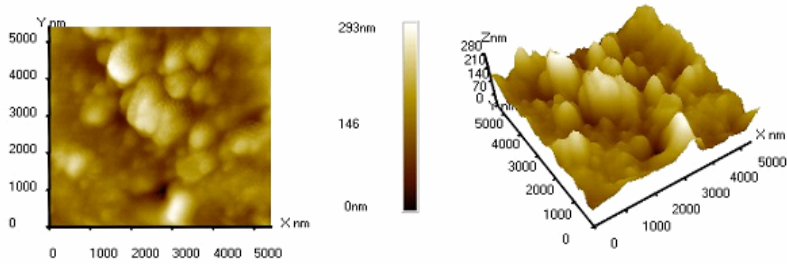
Kantileverin məcburi rəqslərinin tezliyi sabit saxlanılır və

sərbəst halda  $\omega_0$  -a bərabər qəbul olunur. Onda zond səthə yaxınlaşarkən kantileverin sərbəst ucunun rəqs amplitudu azalır. Bu rəqs amplitudu optik sistemin köməyi ilə qeyd olunur. Fotodetektorun yuxarı və aşağı yarım hissəsinin işıqlanmasının dəyişməsinə nəzərən təyin oluna bilər. Sonra sinxron detektorun köməyi ilə sabit siqnal seçilir. Bu cərəyan generatordan alınan sinxron siqnala uyğundur.

Komparator sensor dövrəsindəki cari siqnalı ilkin verilmiş  $V_s$  ilə müqayisə edir(zondu 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). Şəklin 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).

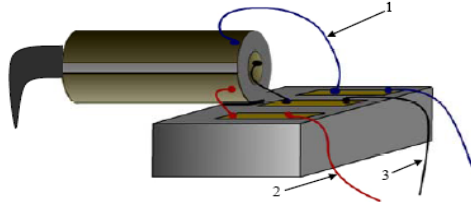


**Şəkil 3-9. Polimer nanokompozit sisteminin səthinin 2D (solda) və 3D (sağda) şəkilləri.**

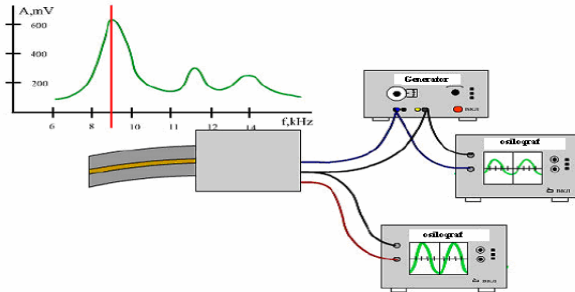
### **NanoEducator skanedici zond mikroskopunun qarşılıqlı təsir qüvvəsi çeviricisinin konstruksiyası və iş prinsipi**

**NanoEducator** cihazında tunel cərəyanı və qarşılıqlı təsir modulyasiya qüvvəsinin universal çeviricisi tətbiq olunur. Çevirici uzunluğu  $l=7\text{mm}$ , diametri  $d=1,2\text{mm}$  və divarın qalınlığı  $h=0,25\text{mm}$  olan bir tərəfi möhkəm bağlanmış pyezokeramik boru şəklində hazırlanmışdır. Borunun daxili səthində keçirici elektrod yerləşir. Borunun xarici səthinə izole edilmiş iki yarım silindrik elektrod yerləşdirilir. Borunun sərbəst ucuna diametri  $100\text{mkm}$  olan volfram naqıl bərkidilmişdir(Şəkil 3-10). Zond kimi istifadə olunan volfram naqılın sərbəst ucu elektrokimyəvi üsulla itilənir və ayrılık radiusu  $0,2-0,05\text{mkm}$ -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 yerdəyişməsinə mütənasib olan dəyişən elektrik cərəyanı yaradır. Bunu cihaz qeydə alır.



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



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

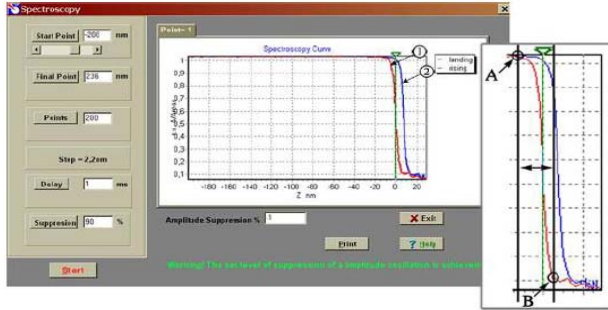
### Spektroskopiyanın yerinə yetirilməsi.

**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 mənfəi 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 sıxmaqla 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 ayrılarının 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 skanediciyə 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(şaquli yaşıl xətt) qrafikin maksimal pikində yerləşir. Tezliyin qiyməti bu zaman **Frequency** pəncərəsində yerləşmiş olar. Buna uyğun rəqsin amplitudu **Probe Oscillation Amplitude** hissəsində göstərilir. Zondun amplitudunun(**Oscillation Amplitude**) qiymətlərinin nizamlayaraq 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 50mV-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 amplitudunun azaltmağa çalışmalı. 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 skanedicinin nümunəni zondun uzaqlaşdırır, ancaq Z indikatorunda bu dəyişiklik kiçik olduğuna görə hiss olunmur. Əgər qarşılıqlı təsirin qiyməti çox kiçik seçilibsə (0,01) skanedicinin 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 (**Amlitude Suppresion**) optimal seçməli. Yaşıl kursoru 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 kontaktsız iş prinsipini izah edin.
5. AQM kontaktsız iş rejimində işləyərkən nəyə görə faza təzad seçmələri rejimi istifadə olunur?
6. **NanoEducator** cihazının kontaktsız qüvvə sensoru qurğusu və iş prinsipini izah edin.
7. **NanoEducator** cihazında spektroskopiyanın yerinə yetirilməsi rejimini izah edin.