

M Ü H A Z İ R Ə – 7 və 8

Nanomaterialların tədqiqində istifadə olunan üsullar.

Spektroskopiya və mikroskopiya

Optikadan bilirik ki, insan gözünün görə biləcəyi ən minimal ölçülü, yəni 0,1 mm tərtibli obyektə qədər olan məsafə 25 sm hesab olunur. Müasir optik mikroskoplar obyekti 1500 dəfə böyüdə bilir. Bu o deməkdir ki, bu mikroskoplarla yalnız 10^{-7} m ölçülü obyektləri görmək mümkündür. Nano tərtibli obyektləri görmək və tədqiq etmək üçün daha güclü, ayırdetmə qabiliyyəti daha yüksək olan mikroskopların yaranması zərurəti yarandı.

Lakin optik mikroskopların görmə (və ya ayırdetmə) qabiliyyətinin sonrakı artımı bir sıra prinsipial çətinliklərlə üzləşdi. Bu ilk öncə difraksiya qabiliyyəti ilə bağlı olan bir maneə idi. Belə ki, XIX əsrin 70-ci illərində Reley tərəfindən göstərilmişdir ki, aralarındakı məsafə $d=0,61 \lambda/n$ –dən kiçik olan obyektləri görmək mümkün deyil (λ - işıq dalğasının uzunluğu, n – mühitin sındırma əmsalıdır).

Bütün bunlara baxmayaraq, son illər yaradılan mikroskoplar vasitəsilə, hətta 200 nm ölçüyə malik obyektləri görmək və tədqiq etmək mümkündür.

Ümumiyyətlə, nanoquruluşları tədqiq etmək üçün istifadə edilən üsulları *ənənəvi və qeyri-ənənəvi* olmaqla 2 böyük qrupa bölmək olar. Ənənəvi üsullara spektroskopiya və difraksiya üsullarını, qeyri-ənənəvi üsullara isə aşağıdakı müasir mikroskopiya üsullarını aid etmək olar:

- | | |
|---|--|
| 1. Işıqburaxan elektron mikroskopiyası; | 5. Skanedici tunnel mikroskopiyası; |
| 2. Skanedici elektron mikroskopiyası; | 6. Atom-güvvət mikroskopiyası; |
| 3. Sahə elektron və ion mikroskopiyası; | 7. Yaxınsahəli skanedici optik mikroskopiyası; |
| 4. Skanedici zond mikroskopiyası; | 8. Zond nanolitoqrafiyası. |

Ənənəvi tədqiqat üsulları və onların fiziki əsasları

SPEKTROSKOPIK ÜSULLAR

Spektroskopik üsullar atomların, molekulların və onlardan əmələ gələn makrosistemlərin enerji quruluşunu, həmçinin, enerji səviyyələri arasında kvant keçidlərini tədqiq edir ki, bu da maddənin quruluşu və xassələri haqqında məlumat əldə etməyə imkan verir. Bunlara nüvələrarası məsafələr, valent bucaqları, rabitələrin enerjisi, atomların effektiv yükləri, dipol momenti, ionlaşma potensialı, elektrona hərislik və s. aiddir. Bu kəmiyyətlərin qiymətləri molekulun elektron konfiqurasiyası ilə, yəni elektronların molekulyar orbitallarda paylanması ardıcılığı ilə müəyyən edilir. Quruluş haqqında son nəticə isə, əksər hallarda, müxtəlif üsullar vasitəsilə alınmış məlumatların müqayisəli təhlilindən sonra əldə edilir.

Digər üsullarla müqayisədə spektral üsulların üstünlüyü ondan ibarətdir ki, ölçmə prosesində nümunədə dəyişiklik baş vermir və nümunənin əvvəlcədən hazırlanmasına ehtiyac duyulmur. Bu üsulları istifadə olunan elektromaqnit dalğalarının uzunluğuna (və ya tezliyinə) görə aşağıdakı kimi təsnif edirlər:

1. Radiospektroskopiya
2. İQ spektroskopiya
3. Görünən işıq spektroskopiyası
4. UB və fotoelektron spektroskopiyası
5. Rentgen spektroskopiyası
6. Qamma-şüalanma spektroskopiyası.

Biz adlarını çəkdiyimiz spektroskopik üsullardan yalnız 3-nü – radiospektroskopiyanın daha çox öyrənilən və ən maraqlı istiqamətlərindən olan Nüvə Maqnit Rezonansı (NMR) və Elektron Paraaqnit Rezonansı (EPR) üsullarını, və həmçinin, İnfraqırmızı (İQ) spektroskopiya üsulunu nəzərdən keçirəcəyik.

1. Radiospektroskopiya

Maddə quruluşunun və orada gedən proseslərin radiospektroskopik üsullarla tədqiqi radiodalğaların (dalğa uzunluğu > 500 mkm, tezliyi $< 10^{13}$ Hz) rezonans üsullarına əsaslanır. Radiospektroskopik üsullar, İQ spektroskopiyaqdan kvantların kiçik enerjilərlə udulmasına görə fərqlənir ki, bu da maddənin enerji səviyyələrinin kiçik parçalanmaları ilə əlaqədar yaranan zəif qarşılıqlı təsirləri də öyrənməyə imkan verir. Bundan başqa, müxtəlif tezlikli radiodalğalarda sistemin eyni vaxtda həyəcanlanma prosesinin sadəliyi, enerji səviyyələrinin nisbi məskunlaşmasını dəyişməyə və qadağan olunmuş keçidləri tədqiq etməyə imkan verir. Radiospektroskopiyanın bir neçə istiqaməti vardır ki, bunlardan biri də Nüvə Maqnit Rezonansı üsuludur.

Nüvə maqnit rezonansı (NMR) üsulu

NMR üsulu 1945-ci ildə amerika fizikləri E.Persell (Harvard Universiteti) və Blox (Stanford Universiteti) tərəfindən kəşf edilmiş və bu kəşfə görə onlar 1952-ci ildə fizika üzrə Nobel mükafatına layiq görülmüşlər. NMR spektroskopiyası molekulyar sistem haqqında daha çox məlumat almağa imkan verən üsul olub, atom və molekulların elektron halını, kondensə olunmuş hallarda maddənin quruluşu və dinamikasını hesablamağa, molekullararası qarşılıqlı təsirləri müəyyən etməyə və kimyəvi reaksiyaların mexanizmlərini başa düşməyə imkan verir. Bu üsulun üstünlüyü nümunənin hazırlanmasının sadəliyi və tədqiqatın nəticəsinin tez əldə olunması ilə bağlıdır.

NMR effekti, atom nüvələrinin maqnit momentləri istiqamətlərinin dəyişməsi ilə əlaqədar olaraq, maddə tərəfindən elektromaqnit enerjisinin rezonans udulması zamanı meydana gəlir. NMR üsulu spin "O"-dan fərqli olan nüvələrdə özünü doğruldur. (Məsələn, ^1H , ^2H , ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N , ^{19}F , ^{29}Si , ^{31}P və s.). ^1H nüvələrində NMR spektroskopiyası ən çox inkişaf edib və bu üsul proton maqnit rezonansı (PMR) adlanır.

Nüvə maqnetizmi mürəkkəb fiziki proses olduğu üçün, onu təsvir etmək üçün kvant mexanikasının riyazi aparatından istifadə edilir.

Biz NMR-nın fiziki əsaslarını başa düşmək üçün sadə “klassik” modeldən istifadə edəcəyik. Əgər atomun nüvəsini fırlanan “+” yüklü şar kimi təsəvvür etsək, görürük ki, yük halqavari orbit boyunca hərəkət edərək mikroskopik halqavari cərəyan yaradır. Halqavari cərəyan da, öz növbəsində, maqnit sahəsini induksiya etdiyi üçün, belə nüvə özünü mikroskopik maqnit kimi aparır. Bu halda nüvənin maqnit momenti fırlanma oxu boyunca yönəlir, oxa nəzərən pressesiya¹ edər. Bu cür nüvəni məxsusi spinə və maqnit momentlərinə malik kiçik milvari maqnitə bənzətmək olar.

Xarici maqnit sahəsi olmadıqda, spin halları enerjiyə görə cırlamış olur. Nüvəni xarici B_0 maqnit sahəsinə saldıqda isə, cırlama aradan çıxır, yəni sahə istiqamətində və onun əksinə yönəlmiş maqnit momentləri müxtəlif enerjilərə malik olur. Bunun nəticəsində də bir enerji səviyyəsindən digər enerji səviyyəsinə keçid baş verir. Maqnit sahəsində enerji səviyyələrinin parçalanması isə, bildiyimiz kimi, ümumi halda **Zeyeman effekti** adlanır.

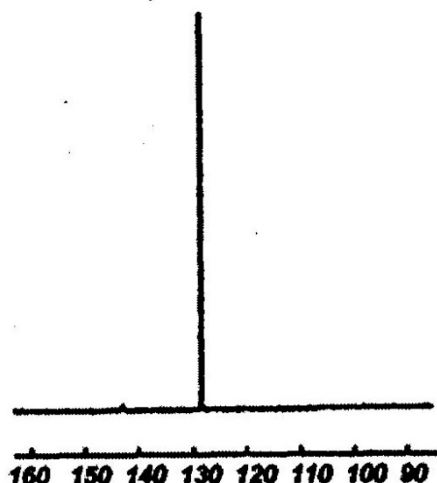
Məhz bu keçid, yəni maqnit sahəsinə salınan nümunənin nüvələri tərəfindən elektromaqnit şüalarının udulması NMR spektroskopiyasının fiziki əsasını təşkil edir.

Sadə halda, NMR spektroskopiyasını belə təsvir etmək olar: tədqiq olunan birləşmə, və ya molekul ampulaya qoyularaq, H_0 maqnit sahəsinə yerləşdirilir və ω tezlikli elektromaqnit şüaları ilə şüalandırılır. H_0 maqnit sahəsinə zəif radiotezlikli H maqnit sahəsi $\perp$ qoyulduqda ($H \perp H_0$) və ω_0 tezliyinin $\Delta E = \hbar \omega_0$ –a uyğun qiymətində enerjinin udulması baş verir, yəni NMR spektroskopiyası, əsasən, $\omega_0 = \gamma H_0$ tezlikdə müşhidə olunur və rezonansın xarakteri hərəkət miqdarı momenti $P = \hbar l$ və maqnit momenti $\mu = \gamma l$ ilə müəyyən edilir. Bburada l – nüvənin spini, γ – hiromaqnit ədədi, $\hbar$ – Plank sabitidir.

Hal-hazırda müasir qurğularda NMR üsulu ilə eyni zamanda 80 maqnit nüvəsini tədqiq etmək olar. NMR spektroskopiyası əsas fiziki-kimyəvi üsul olduğu üçün, onun nəticələrindən istifadə etməklə kimyəvi reaksiyaların həm orta məhsulları, həm də son məhsulları haqqında məlumat almaq olar. NMR konformasiya tarazlığı, bərk cisimlərdə atom və molekulların diffuziyası, daxili hərəkətlər, hidrogen rabitələri və s. haqqında informasiya verir.

Bundan başqa, ilk süni füllərinin varlığı da NMR üsulu ilə aşkar edilmişdir. NMR spektrləri ilə atom yığımlarının da, yəni nanoklasterlərin də ölçü parametrləri haqqında informasiya əldə etmək mümkündür.

¹ Pressesiya müəyyən nöqtə ətrafında daim fırlanma hadisəsidir.



C₆₀ fullerininin NMR spektri

Elektron Paramaqnit rezonansı (EPR) üsulu

Radiospektroskopiyanın digər istiqaməti EPR üsuludur. EPR üsulu NMR üsuluna analoji olub, santimetrlik, və ya millimetrlik dalğa uzunluqlu diapazonda, tərkibində paramaqnit zərrəciklər olan maddə tərəfindən elektromaqnit enerjisinin rezonans udulmasına əsaslanır.

Klassik fizika çərçivəsində EPR üsulu yalnız relaksasiya² proseslərinin təhlili üçün rahatdır. Lakin bu halda da EPR spektrlərini izah etmək üçün kvant yanaşmasından istifadə olunur. Bilirik ki, sabit H maqnit sahəsində sərbəst ionun J hərəkət miqdarı momenti $2J+1$ Zeyeman səviyyələrinin yaranmasına səbəb olur və bu səviyyələrin enerjisi $E=g\beta Hm$ ($m=J, J-1, \dots, -J$).

Bu səviyyələr arasında kvant keçidləri H -a $\perp$ olan H_1 sahəsi ilə həyəcanlandırılır. Onda rezonans şərti $h\nu=\Delta E=g_s\beta H$ kimi olacaq. Səviyyələr arasında elektronların keçidi spinin istiqamətinin dəyişməsi ilə baş verir.

Daha yüksək səviyyələrə keçidlər elektromaqnit enerjisinin udulması, əks keçiddə isə buraxılması ilə müşahidə olunur.

Bu proseslərin hər 2-nin baş vermə ehtimalı eyni olduğu üçün, alınan spektrin quruluşu səviyyələrin məskunluğundan asılıdır və onların təhlili mürəkkəb məsələdir.

EPR üsulu ilə paramaqnit mərkəzlər haqqında məlumat əldə etmək olur. Bundan başqa, kristalda ionların valentliyi, koordinatları, lokal simmetriyası, elektronların hibridləşməsi, kristalda sahənin istiqaməti və s. məlumatlar da EPR vasitəsilə əldə edilir.

İnfraqırmızı spektroskopiya (İQ)

İQ spektroskopiya infraqırmızı oblastda (dalğa ədədi $3 \cdot 10^{12}$ - $3 \cdot 10^{14}$ hs, dalğa uzunluğu 10^{-6} - 10^{-3} m) elektromaqnit şüalarının udulma və buraxılma spektrlərini öyrənir. İQ spektrlərin tədqiqi kimyəvi tərkib, quruluş, konfigurasiya və

² Relaksasiya latınca “*relaxatio*”- zəifləmək, təqətdən düşmək mənasını verir. Bu termindən termodinamik sistemdə tarazlığın bərpa edilməsi prosesində istifadə olunur.

konformasiya haqqında məlumat almağa imkan verir və burada enerjinin dəyişməsi rəqs səviyyələri arasında keçid zamanı baş verir.

İQ spektroskopiyada molekulun enerji halı üç faktorla – molekulun fırlanması ilə, molekul təşkil edən atomların bir-birinə nəzərən rəqsi hərəkəti ilə və molekulun elektron quruluşu ilə müəyyən edilir.

Enerjinin fırlanma səviyyələri arasındakı qiyməti 10^{-3} eV tərtibindədir. Bu səviyyələr arasındakı keçidlər dalğa uzunluğu 0,1 mm-lə 1 sm arasında olan şüalanmaya uyğun gəlir.

Enerjinin rəqsi səviyyələri arasındakı qiyməti isə təqribən iki tərtib böyük olub, 0,1 eV-a bərabərdir. Bu səviyyələr arasındakı keçidlər $1 \text{ mkm} \div 0,1 \text{ mm}$ dalğa uzunluqlu şüalanmanın generasiyasına səbəb olur. Səviyyələr arası valent elektronlarının enerji fərqi bir neçə elektron-volt a bərabərdir.

Molekulun fırlanma enerjisi onun simmetriyasından, ətalət momentindən və həmçinin, J fırlanma kvant ədədindən asılıdır, yəni o müəyyən diskret qiymətlər ala bilər. Fırlanma spektrinə malik olan ən sadə molekulara ikiatomlu (məsələn A və B) və xətti çoxatomlu molekuları misal göstərmək olar ki, onların hər ikisinin baş ətalət momentləri eynidir, üçüncü isə sıfır bərabərdir.

Bu cür molekul üçün fırlanma enerjisi aşağıdakı tənliklə hesablanı bilər:

$$E(J) = J(J + 1)Bhc$$

Burada B – fırlanma sabiti olub, $B = \frac{h^2}{8\pi^2 I}$ bərabərdir; I -ətalət momentidir və ikiatomlu molekul üçün onun qiymətini müəyyən etmək üçün

$$I = \frac{m_A m_B r_{AB}^2}{m_A + m_B}$$

düsturundan istifadə etmək olar.

Mürəkkəb molekul üçün isə fırlanma enerjisinin ifadəsi çox mürəkkəb şəkildə olur, bəzi molekul üçün isə bu ifadəni ümumiyyətlə yazmaq mümkün olmur.

İndi isə molekul təşkil edən atomların bir-birinə nəzərən rəqsi hərəkətini nəzərdən keçirək. Kvant mexanikəsindən məlumdur ki, ossolyatorlar sisteminin tezliyi rəqs edən zərrəciklərin kütlələrindən və onlar arasındakı məsafədən aşağıdakı kimi asılıdır:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{f}{m}}$$

Burada f – qüvvə sabiti, m – sistemin kütləsidir.

Bundan başqa, kvant mexanikasında harmonik ossolyator modelinin diskret enerji halları üçün aşağıdakı ifadə alınmışdır:

$$E(n) = h\nu \left(n + \frac{1}{2} \right) = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{f}{\mu}} \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

Burada $n=0, 1, 2, \dots$ fırlanma kvant ədədi, μ - sistemin gətirilmiş kütləsidir; seçmə qaydası isə $\Delta n = \pm 1$ kimidir. İkiatomlu molekul halında, hər iki ifadə öz görünüşünü saxlayır, lakin sistemin gətirilmiş kütləsi μ aşağıdakı kimi hesablanır:

$$\mu = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B}$$

Çoxatomlu sistemlər üçün isə bu ifadələr mürəkkəb şəkildə olur.

İQ spektroskopiya üsulları ilə sistemi təşkil edən atomların kütlələri, rabitə uzunluqları, valent və torsion bucaqları, potensial səthlərin xarakteristikaları (məsələn, qüvvə sabitləri), rabitələrin dipol momentləri və s. haqqında məlumat əldə etmək olar. Bundan başqa, bu üsulla fəza konformasiya izomerlərini müəyyən etmək, molekul daxili və molekullararası qarşılıqlı təsirləri öyrənmək, kimyəvi rabitələrin xarakterini, molekullarda yüklərin paylanması, faza keçidlərini, kimyəvi reaksiyaların kinetikasını, yaşama müddətləri kiçik olan (10^{-6} san) zərrəcikləri qeyd etmək, bir sıra həndəsi parametrləri dəqiqləşdirmək və termodinamik funksiyaları hesablamaq üçün nəticələr də almaq mümkündür.

İQ spektroskopiya vasitəsilə alınan rəqsi spektrləri interpretasiya (təhlil, analiz) etmək üçün müxtəlif modellərdən istifadə edilir ki, onları da 4 kateqoriyaya bölürlər:

- eyni tərkibli amorf və kristallik cisimlərin rəqsi spektrlərinin müqayisəsinə əsaslanan modellər;
- 102 atomdan ibarət böyük klasterlərə əsaslanan hesablamalar;
- müəyyən sayda atomlardan ibarət kiçik klasterlərə əsaslanan hesablamalar;
- digər klasterlərlə rəqsi bağlı olmayan lokal molekulyar klasterlərə əsaslanan hesablamalar.

Bu model hesablamalar keyfiyyət və kəmiyyət baxımından spektrləri dəqiq təhlil etməyə, spektr və quruluşlar arasındakı uyğunluğu müəyyən etməyə imkan verir.

MİKROSKOPİK ÜSULLAR

İşıqburaxan elektron mikroskopiyası

XX əsrin 30-cu illərində işıq dalğası yerinə elektron şüasından istifadə edən mikroskopun ilk sxemi verildi.

1932-ci ildə alman alimi Maks Kholll və Ernst Ruska tərəfindən ilk belə mikroskop yaradıldı. 1986-cı ildə bu kəşfə görə Ernst Ruska fizika üzrə Nobel mükafatına layiq görüldü. İEM-ları mikro- və nano ölçülü obyektlərin vizual görüntüsünü tədqiq edən üsullardan biri hesab olunur.

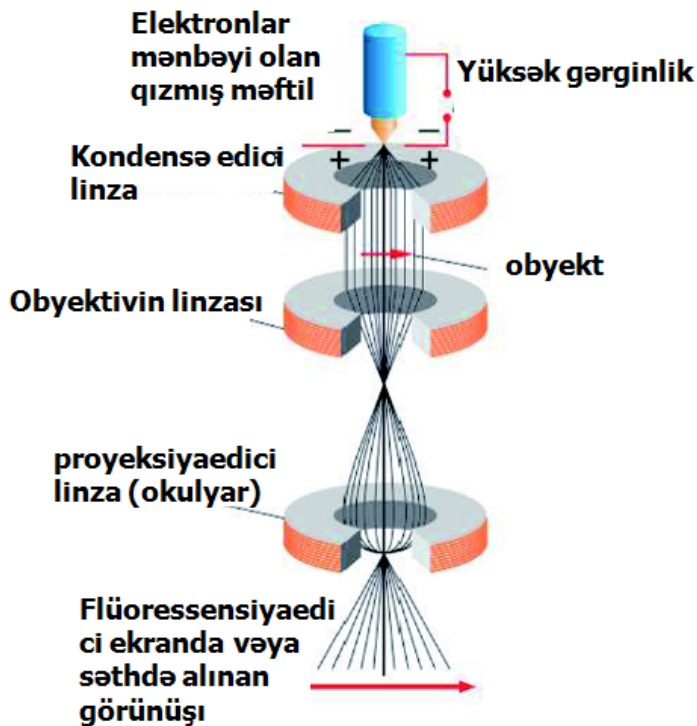
İşıqburaxan elektron mikroskopu (İEM) bir neçə prinsipial xüsusiyyəti ilə səciyyələnir, yəni aşağıdakı çatızmamazlığa malikdi:

- 1) elektronlar seli maddə tərəfindən güclü udulmaya məruz qaldığı üçün qurğu daxilində mütləq vakuum yaradılmalıdır;
- 2) tədqiq edilən nümunə çox nazik olmalıdır (~ 100 nm ətrafında), bu isə texniki cəhətcə çox çətin və mürəkkəbdir.

İşıqburaxan elektron mikroskopunda mənbədən gələn elektronlar nümunənin üzərinə düşür, onun səthindən keçir, səpilir, obyektiv linza ilə fokuslanır, böyüdücü linzadan keçir və nəhayət, səthin şəklini təsvir edir. Düşən şüada elektronların dalğa uzunluğu

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0eV \left[1 + \frac{eV}{2m_0c^2} \right]}} = \frac{0,0388}{\sqrt{V}} nm$$

düsturu ilə hesablanır. Burada h – Plank sabiti, m_0 – elektronun sükunət kütləsi, e – elektronun yükü, V – kilovatlarla ifadə olunan sürətləndirilmiş (gücləndirilmiş) gərginlik, c – işıq sürətidir. Elektronlar tərəfindən alınan enerji isə $E=eV$ –a bərabərdir.



Müasir İEM mürəkkəb fiziki qurğudur. Onun detalları (əsasən optik sistemin detalları) xüsusi materiallardan hazırlanır və dəqiqlik tələb edir. Bundan başqa, bu qurğu vibrasiyaya davamlı olmalıdır. Ona görə də yüksəkvoltlu EM-ları üçün xüsusi özül (fundament) hazırlanır. Işıqburaxan elektron mikroskopunun ayırdetmə qabiliyyəti 0,05 nm tərtibindədir. Bu mikroskopların elektron-optik böyütmə tərtibi $\sim 600.000 \div$

1.300.000 -ə bərabərdir. Sonrakı böyütmə isə fotoqrafik üsulla yerinə yetirilir (5 – 20 dəfə). 200 kV-a qədər sürətləndirilmiş elektronların dalğa uzunluğu 0,0025 nm tərtibində olur.

Alınan görüntüləri təhlil etmək üçün, tədqiqatçılar difraksiya nəzəriyyəindən istifadə edirlər. Çünki İEM-da obyektlərin şəkli 2 rejimdə alınır: işıqlı sahə və tünd sahə rejimində. Işıqlı sahədə şəkil (yəni obyektin görüntüsü) – kiçik enerji itkisi ilə obyektədən keçən elektronlar vasitəsilə formalaşır və böyüdülmüş olur.

Tünd sahədə isə şəkil səpilmiş elektronlar vasitəsilə formalaşır.

Işıqlı sahə ilə müqayisədə, tünd sahədə görüntü neqativ kimi alınır.

İEM vasitəsilə müxtəlif materialların: metalların, ərintilərin, keramikanın, polimerlərin, nanoboruların, füllerenlərin, nanoquruluşların və çoxlaylı nazuk təbəqələrin quruluşlarını tədqiq etmək mümkündür.

Skanedici elektron mikroskopiya

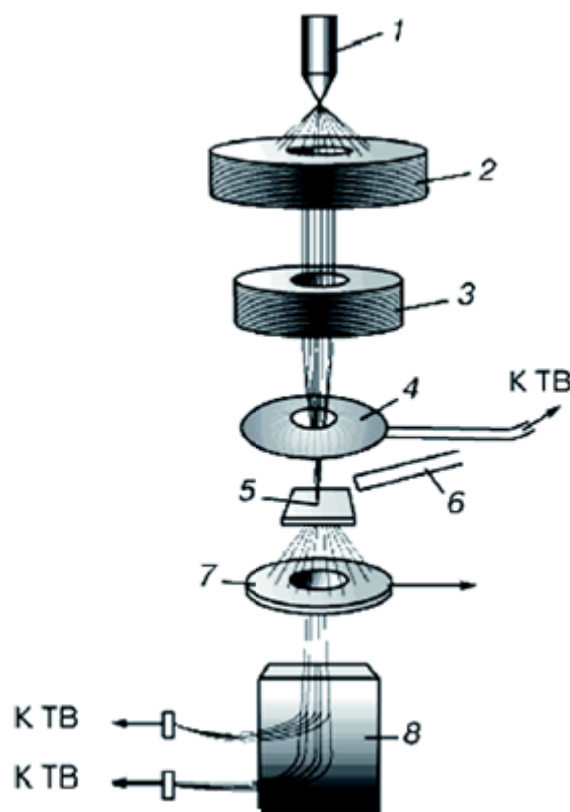
Nümunənin hazırlanması problemi skanedici elektron mikroskopu (SEM) ilə aradan götürülür.

SEM-in konstruksiyası İEM-ə çox oxşasa belə, onlar arasında prinsipial fərqlər vardır. Bu fərqlər ondan ibarətdir ki, 1) burada elektronlar seli bütün səthə düşür; 2) fokuslanma müəyyən bir nöqtədə baş verir və 3) sistemin köməyi ilə o hərəkət edərək səthi skan edir (tarayır). Bundan başqa, qurğu daxilində vakuum yaratmaq problemi də aradan götürülür.

Əgər işıqburaxan elektron mikroskopunun ayırdetmə qabiliyyəti 0,05 nm tərtibindədirsə, Skanedici elektron mikroskopunda bu göstərici 0,2 nm tərtibini aşsa bilmir.

Skanedici elektron mikroskopunun iş sxemi:

1 – elektronlar mənbəyi; 2-tezləndirən sistem; 3- maqnit linzası; 4- əyən çarx; 5- nümunə; 6-əks olmuş elektronlar detektoru; 7-yumru detektor; 8- analizator.



Şəkildən göründüyü kimi, SEM elektronlar mənbəyindən, elektronları sürətləndirən sistemdən, maqnit linzadan, elektronlar selini düzgün istiqamətləndirmək üçün əyici çarxdan, tədqiq olunan nümunənin yerləşdiyi xüsusi müstəvi plastinkadan, detektor və analizatordan ibarətdir.

Detektor sistemləri və spektrometrlər düzgün seçildikdə, SEM vasitəsilə katodlüminessensiyasını, tormozlanmış rentgen şüalanmasını da qeyd etmək mümkündür. Bu zaman alınan təsvirlər və spektrlərdən, nümunə səthindəki layların lokal element tərkibinin kəmiyyət xarakteristikaları haqqında informasiya almaq olar.

SEM ilə quruluşun səthini tədqiq etmək üçün nümunələrə bir sıra tələblər qoyulur: 1) skanetmə prosesində səthi yüklərin yığılması hesabına yaranan maneələri dəf etmək üçün nümunə səthi elektrokeçirici olmalıdır; 2) optiki sistemlərin parametrləri ilə ayırdetmə qabiliyyətini təyin edən signal/küy münasibəti düzgün tənzimlənməlidir. Bunun üçün tədqiqatdan öncə vakuum buxarlanması, və ya ion tozlandırılması vasitəsilə dielektrik səthlərə ikinci elektron

emissiya əmsalı yüksək olan bircins nazik (15-20 nm) metal təbəqə (Au, Au-Pd, Pt-Pd) çəkilir.

SEM-də alınan mürəkkəb, yarımfaçalı təsvirləri interpretasiya – təhlil etmək üçün kompüterdən istifadə olunur. Bu təhlil kəmiyyətə morfoloji analiz aparmağa, yəni quruluş elementlərinin ölçü və forması, onların oriyentasiyası (istiqaməti), fəzada yerləşməsi və quruluşun komponentlərinin skeleti haqqında məlumat almağa imkan verir.

Skanedici zond mikroskopiyası

İşıqburaxan və skanedici elektron mikroskoplarının texniki mürəkkəbliyi alimləri yeni üsullar axtarmağa sövq etdi.

Bu yeni üsul skanedici zond mikroskopiyası oldu. Zond mikroskopiyası özü 2 növ mikroskopla – atom-qüvvə və tunnel mikroskopları ilə xarakterizə olunur. Onları ümumiləşdirən əsas cəhət ölçmələrin iynə formalı ölçüsü bir neçə atom radiusu tərtibində olan (~ 10 nm) zondla aparılmasından ibarətdir.

Zond mikroskoplarında zond ilə nümunə səthi arasındakı xarakterik məsafə 0,1 -10 nm diapazonunda yerləşir. Bu mikroskopların iş prinsipi səthlə zond arasında müxtəlif qarşılıqlı təsirlərə əsaslanır. Belə ki, atom-qüvvə mikroskopiyasında skanedilən oblastın hər bir nöqtəsində zondun səthlə qarşılıqlı təsiri, skanedici tunnel mikroskopiyasında isə tunnel cərəyanı ölçülür. Hər 2 mikroskop ilə təsirləri təhlil – analiz etmək üçün, SEM-də olduğu kimi, kompüterdən istifadə olunur.

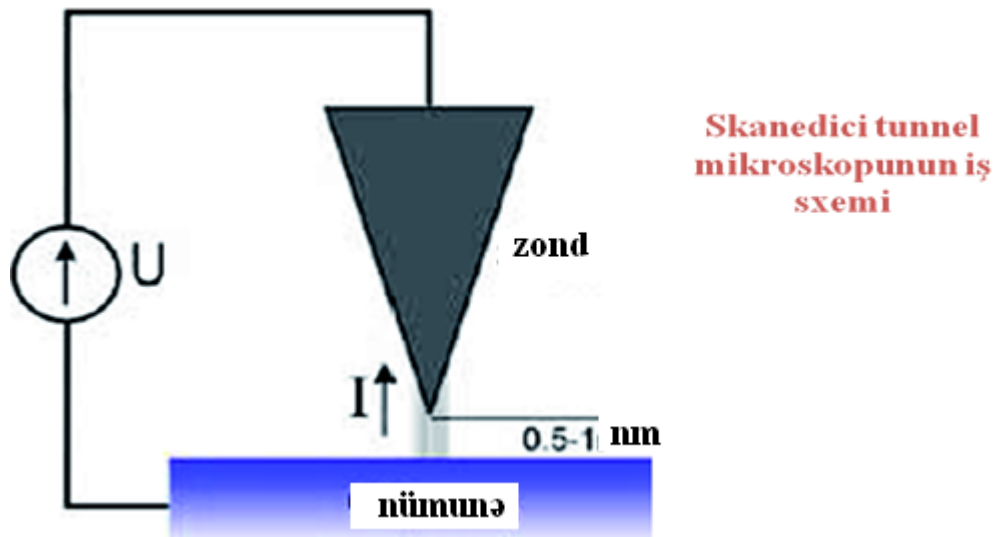
Skanedici zond mikroskopları vasitəsilə səthin təsviri aşağıdakı kimi alınır: zond nümunə üzərində xüsusi xətlə hərəkət etdirilir və səthin relyefinə uyğun qiymət alan siqnal kompüterin yaddaşına ötürülür; sonra zond ilkin vəziyyətinə qaydır və skanetmə digər xətt üzərində eyni cür təkrar gedir. Skanetmə prosesində bu cür yaranan siqnallar kompüter tərəfindən təhlil edilir və səthin $z=f(x, y)$ relyefinin kompüter qrafiki qurulur.

Skanedici zond mikroskoplarında ən vacib texniki problemlərdən biri zond və nümunənin bir-birindən asılı olmayan yerdəyişməsinin həyata keçirilməsi ilə bağlıdır. Səthin relyefinin tədqiqindən başqa, zond mikroskopları ilə səthin digər parametrlərini (mexaniki, elektrik, maqnit və optiki parametrlərini) də ölçmək olur.

SZM bütövlükdə rəqsi sistem olduğu üçün, onun hər bir hissəsinin ayrılıqda rezonans tezlikləri cəmi ω –dan asılıdır. Xarici mexaniki təsirlərin rəqsləri ω ilə üst-üstə düşdükdə, zondun iynəsində rezonans hadisəsi baş verir. Bu da zondun nümunəyə nəzərən rəqsinə səbəb olur və parazit periodik küy kimi qəbul edilir. Nəticədə nümunə səthinin SZM təsvirləri təhrif olunmuş görüntüyə malik olur. Xarici vibrasiyaları azaltmaq məqsədi ilə ölçmə başlıqları yüksək tezlikli (10 kHs-dən çox) böyük metallik detallardan hazırlanır. Qurğunu bütövlükdə xarici vibrasiyalardan qorumaq üçün isə müxtəlif vibroizolyasiya sistemlərindən istifadə olunur. Ümumiyyətlə, effektiv müdafiəni tam təmin etmək mümkün olmur. Lakin vibrasiya sisteminin rezonans tezliyini mümkün qədər azaltmaqla küyü də azaltmaq olar.

Skanedici tunnel mikroskopu

Skanedici tunnel mikroskopiyası (STM) Binniq və Rorer tərəfindən yaradılmış və bu nailiyyətlərinə görə onlara 1986-cı ildə Nobel mükafatı verilmişdir. Bu mikroskopun iş prinsipi tunnel cərəyanının ölçülməsi ilə səciyyələnir, yəni zond və nümunə arasında tunnel cərəyanı yaranır. Bunun nəticəsində də bərk cismin səthindən elektronların ucluğa - zonda tunnəlləşməsi baş verir. Cərəyan keçməsi üçün həm nümunə, həm də iynənin ucu keçirici, ya da yarımkeçirici olmalıdır



Zondu nümunə səthinə bir neçə anqstrom məsafəyə qədər yaxınlaşdırdıqda şəffaf-tunnel potensial çəpəri yaranır və onun qiyməti, əsasən, zond materialından (A_{zm}) və nümunədən çıxan elektronların işindən ($A_{çixış}$) asılı olur. Keyfiyyət baxımından potensial çəpəri materialların orta çıxış işinə bərabər olan effektiv hündürlüklü düzbucaqlı çəpər kimi qəbul etsək, elektronun orta çıxış işi

$$\varphi^* = A_{zm} + A_{çixış}$$

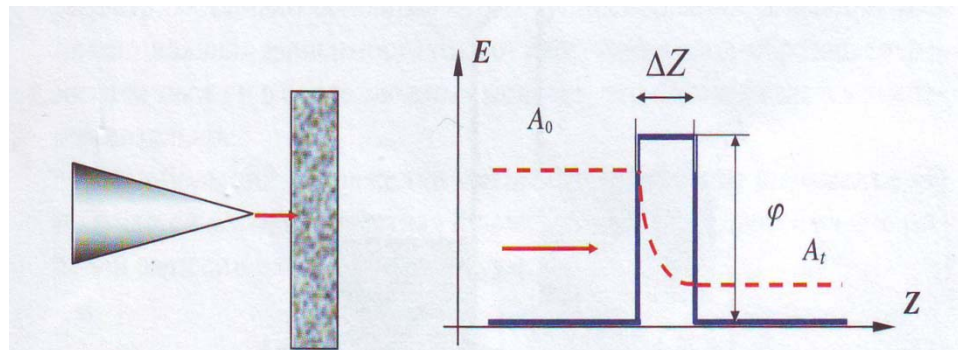
olar. Kvant mexanikasıdan məlumdur ki, düzbucaqlı formalı birölçülü çəpərdən elektronların tunnəlləşmə ehtimalı (keçid əmsalı)

$$D = \frac{|A_t|^2}{|A_0|^2} \cong e^{-k\Delta Z}$$

bərabərdir. Burada A_0 - çəpərə doğru hərəkət edən elektronun dalğa funksiyasının amplitudu, A_t - çəpərdən keçən elektronun dalğa funksiyasının amplitudu, k - potensial çəpərə uyğun oblastda dalğa funksiyasının sönmə sabiti, ΔZ - çəpərin enidir. İki metalın tunnel kontaktı üçün sönmə sabitinin ifadəsi isə aşağıdakı kimidir:

$$k = \frac{2\pi\sqrt{2m\varphi^*}}{h}$$

Burada m – elektronun kütləsi, φ^* - elektronun orta çıxış işi, h – Plank sabitidir.



Tunnel miukroskoplarında potensial çəpərdən elektronların tunnəlləşmə sxemi

Tunnel kontaktına V potensiallar fərqi verdikdə zond ilə nümunə arasında tunnel cərəyanı yaranır.

Həqiqətdə isə STM-də real tunnel kontaktı birölçülü olmayıb, mürəkkəb həndəsəyə malikdir. Təqribən $d=0,5\div1,0$ nm məsafədə iynənin ucunun və səthin atom orbitallarının bir-birini örtmə ehtimalı az olduğu üçün, yaranan nanokontaktda potensial çəpərdən elektronların tunnəlləşmə ehtimalı

$$D \sim \exp \{-2d \sqrt{A_{\text{çixış}}}\}$$

ifadəsi ilə təyin oluna bilər: burada, $A_{\text{çixış}} \gg V$ ($A_{\text{çixış}}$ - elektronların çıxış işi, V – zondun gərginliyidir).

Bu deyilənlərdən aydın olur ki, səth üzərində iynənin yerdəyişməsi nəticəsində yaranan tunnel cərəyanının qiyməti (V və d -nin bəzi seçilmiş qiymətlərində) səthin relyefindən (kələ-kötürlüyündən) və elektron sıxlığından - $\rho(E,R)$ asılıdır. “Biratomlu” iynələr üçün (burada tunnel cərəyanı yalnız səthə yaxın bir atom orbitalının örtülməsi nəticəsində meydana çıxır) $\delta J / \delta R \approx 1$ nA/nm. Bu qiymət skan prosesində səthin görüntüsünün alınması üçün kifayət edir.

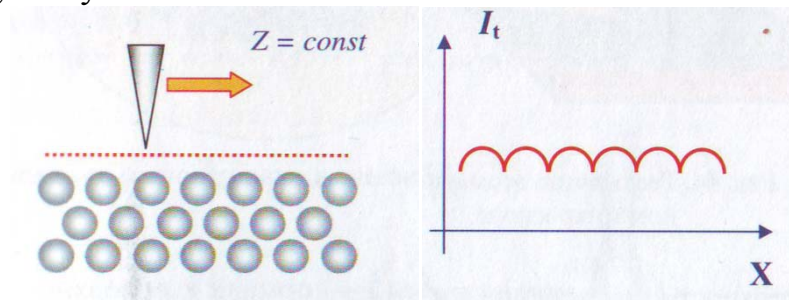
STM ilə ayrı-ayrı atom və molekulları, nanoklasterləri tədqiq etmək, səthin relyefini öyrənmək, atom səviyyəsində adsorbsiya və desorbsiya proseslərini izləmək və molekulların rəqs spektrlərini ölçmək olur. Bundan başqa, STM-dən istifadə etməklə hər hansı bir atomu ucluq vasitəsilə müxtəlif hissələrə aparmaq və yeni quruluş yaratmaq mümkündür.

STM vasitəsilə müxtəlif material və nümunələri tədqiq etmək üçün 2 rejimdən istifadə edilir:

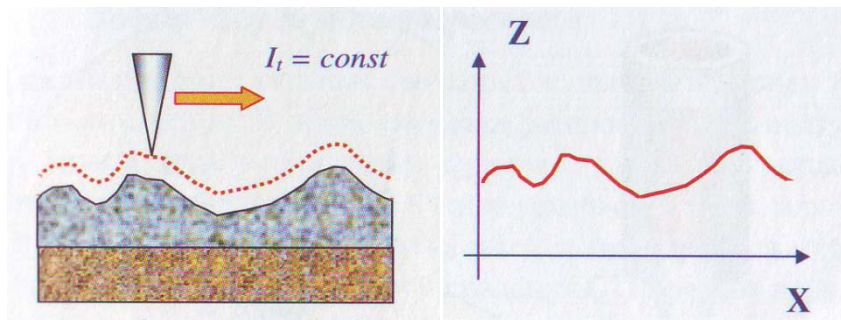
- 1. Sabit hündürlük rejimi.** Adından göründüyü kimi, sabit hündürlük rejimində hündürlük sabit qalır, iynənin ucu isə nümunə üzərində horizontal müstəvi xətt üzrə hərəkət edir; dəyişən tunnəlləşmə cərəyanı olur. Nümunə səthinin skan edilməsi prosesində tunnəlləşmə cərəyanının qiymətinə uyğun olaraq topoqrafiya nümunəsi qurulur.

Atomar səviyyədə hamar səthlərin sabit hündürlük rejimində ($Z = \text{const}$) STM təsvirlərini almaq daha effektiv sayılır. Bu halda zond səth üzərində bir neçə anqstrem məsafədə yerdəyişmə edir və tunnel cərəyanı səthin STM təsviri kimi qeyd olunur (şəkil a). Bu rejimdə skanetmə yüksək sürətlə gedir, STM təsvirləri

də yüksək tezliklə alınır. Bu da, praktik olaraq, səth üzərində baş verən bütün dəyişiklikləri görməyə imkan verir.



(a)



(b)

Sabit məsafədə (a) və sabit tunnel cərəyanı rejimində (b) səthin STM təsvirinin yaranması

2. **Sabit cərəyan rejimi.** Sabit cərəyan rejimində isə cərəyanı sabit saxlamaq üçün səthin hər bir nöqtəsində skan edən qurğunun hündürlüyü tez-tez dəyişdirilir. Məsələn, sistem tunnel cərəyanının artdığını qeyd etdikdə, o saat iynənin nümunədən uzaqlaşması və yaranan disbalansı aradan qaldırılması üçün skan edici qurğuya gələn gərginlik dəyişdirilir (şəkil b).

Hər bir rejimin öz üstünlükləri var. 1-ci rejim çox tez işləmə rejimi hesab olunur. Çünki burada sistemi aşağı-yuxarı hərəkət etdirmək lazım gəlmir. Lakin bu üsulla yalnız hamar səthləri ölçmək olar. 2-ci rejim isə daha uzun vaxt aparması ilə bərabər, hamar olmayan (qeyri-müntəzəm) səthləri tədqiq etməyə imkan verir.

Tədqiqatlar içərisində **spindən-asılı yaranan effektlər** və **elektronların qeyri-elastiki tunnəlləşməsi** ön plana çəkilir. Spindən-asılı effektlər elektronun spininin oriyentasiyasından (istiqamətindən) asılı olub, tunnel keçidlərinin ehtimalı ilə müəyyən edilir. Elektronların qeyri-elastiki tunnəlləşməsi dedikdə isə, adsorbsiyaya uğramış zərrəciklərin elektron və rəqs enerjilərinin tunnəlləşən elektronlar ilə mübadiləsi başa düşülür. Bu proseslərin hər 2-si volt-ampere xarakteristikaları ilə tədqiq olunur.

Tunnel kontaktının volt-ampere xarakteristikalarının (VAX) hesablanması. Səthin müxtəlif nöqtələrində STM ilə tunnel kontaktının VAX-ını qiymətləndirmək, nümunənin lokal keçiriciliyi haqqında fikir yürütmək və elektronların enerji spektrinin lokal sıxlığının xüsusiyyətlərini öyrənmək olar. STM-də tunnel kontaktının VAX-nı qeyd etmək üçün aşağıdakı prosesi yerinə

yetirmək lazımdır. Əvvəlcə nümunə üzərində hesablama aparılacaq oblast seçilir və zond skaner vasitəsi ilə səthin həmin yerinə gətirilir. VAX kontaktını almaq üçün tunnel keçidlərinə xətti artan gərginlik verilir. Bu zaman tunnel kontaktından keçən gərginliyin dəyişməsinə uyğun gələn cərəyan qeyd edilir. Hər bir nöqtədə VAX üçün bir neçə qiymət götürmək olar. Ona görə də, ümumi VAX-ı qiymətləndirmək üçün bir nöqtədən götürülmüş VAX-ların orta qiyməti tapılır. Ortalanma tunnel keçidləri zamanı küylərin təsirini də minimuma endirməyə imkan verir.

Ümumiyyətlə, VAX tunnel kontaktı ətrafında nümunənin böyük olmayan oblastındakı xassələrlə təyin edilir.

Tunnel kontaktı zamanı gərginliyin xarakterik qiyməti $0,1 \div 1$ V, tunnel cərəyanının qiyməti $0,1 \div 1$ nA, tunnel kontaktı müqavimətinin qiyməti isə $10^8 \div 10^{10}$ Om tərtibində olur. STM səthin ixtiyari nöqtəsində zondla nümunə arasında tunnel-kontaktının VAX-nı təyin etməklə yanaşı, nümunənin lokal elektrik xassələrini də təhlil etməyə imkan verir.

Yaxınsahəli skanedicilə optik mikroskopiya

Yaxınsahəli skanedicilə optik mikroskopiya (YSOM) STM-dən sonra IBM firmasının əməkdaşı Diter Pol tərəfindən yaradılmışdır. Bu mikroskop STM-in bir növü olub, STM-dən yalnız onunla fərqlənir ki, burada görünən işıqdan istifadə olunur. Məhz bu səbəbdən də bu mikroskopun digər adı – *skanedicilə işıq mikroskopu* (SİM) adlanır.

Bu mikroskoplarda nümunəni skan edən zond əvəzinə “ışıq çuxurundan” istifadə olunur. Görünən işıq diametri $10 \div 30$ nm olan işıq çuxurundan gələrək, ya nümunədə keçir, ya da nümunədən əks olunaraq detektor üzərinə düşür. Optik signalın intensivliyi hər bir nöqtədə qeyd edilərək nümunə haqqında təsəvvür yaradır.

YSOM ilə səthin görünüşü o zaman alınır ki, burada işıq mənbəyi ilə nümunə arasındakı məsafə 5 nm-dən çox olmasın. Bu halda mikroskopun ayırdetmə qabiliyyəti 15 nm-ə bərabər olur. Bu mikroskopun digər skanedicilə üsullardan bir sıra üstünlükləri var: 1. YSOM-da səthin görünüşü optik diapazonda (görünən işıqda) alınır; 2. Bu mikroskopun ayırdetmə qabiliyyəti digər optik sistemlərin ayırdetmə qabiliyyətindən qat-qat yüksəkdir.

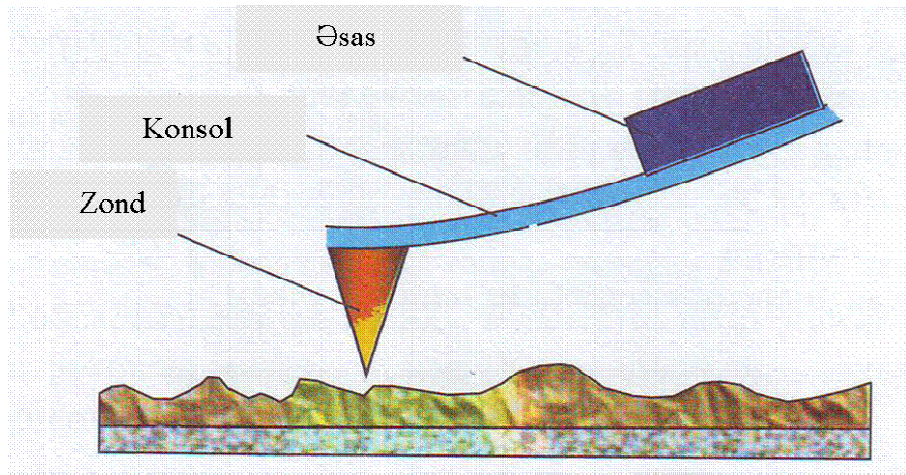
Atom-qüvvə və maqnit-qüvvə mikroskopiyası

STM-dən təqribən 5 il sonra Skanedicilə tunnel mikroskopunun yaradıcılarından biri olan Binnig digər əməkdaşlarla - Xueyton və Herber ilə birgə yeni bir mikroskop yaradırlar və onu Atom-qüvvət mikroskopu (AQM) adlandırırlar.

STM kimi atom-qüvvə mikroskopu (AQM) da zondlu mikroskopdur, lakin burada tunnel cərəyanı deyil, iynənin ucu ilə nümunə arasında yaranan qarşılıqlı təsir qüvvəsi ölçülür.

Bu yeni mikroskop öz “əvvəlki qardaşı” STM-dən də irəli getdi. Onun üstünlüyü odur ki, bu mikroskopla atmosfer təzyiqi şəraitində həm keçirici, həm də keçirici olmayan materialların səthini tədqiq etmək mümkündür.

Səthin təsvirini almaq üçün ucunda iti zond olan mütəhərrik xüsusi “qollardan” - konsoldan istifadə edilir (şəkil). Səth tərəfindən zonda təsir edən qüvvə konsolun meyl etməsinə səbəb olur. Meyilliliyi qeyd etməklə zond və səth arasındakı qarşılıqlı təsiri qiymətləndirmək olar.



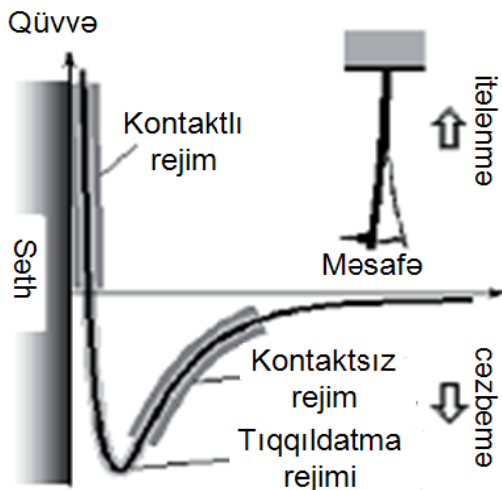
Atom-qüvvə mikroskopunun iş prinsipi

Yuxarıda qeyd etdik ki, STM-in atom tərtibində ayırdetmə qabiliyyəti zond və səth arasındakı tunnel cərəyanından eksponensial asılıdır. AQM-da isə bu göstərici molekullarası qarşılıqlı təsirin onlar aralarındakı R məsafədən asılılığı ilə xarakterizə olunur:

$$F = C_1/R^{13} - C_2/R^7$$

Burada F – Van-der-Vaals qarşılıqlı təsiri, C_1 və C_2 isə sabitlərdir. Tənliyin I həddi kiçik qarşılıqlı təsirlərə malik itələmə qüvvələrini, II həddi isə - cazibə qüvvələrini göstərir.

AQM-nun iş prinsipi belədir: iynə səthə yaxınlaşdıqca, iynənin atomları nümunənin atomları tərəfindən cəzb olunur. Qarşılıqlı təsir qüvvəsinin qiyməti



atomların elektron örtükləri bir-birini itələyəne qədər artır. Atomlararası məsafənin sonrakı kiçilməsi ilə, elektrostatik itələnmə nəticəsində, cazibə qüvvəsi eksponensial azalmağa başlayacaq.

İtələmə və cazibə qüvvələri atomlararası məsafənin 0,2 nm tərtibində bir-birinə bərabər olur.

Səth və zond arasındakı qarşılıqlı təsir qüvvələrinin **yaxıntəsirli** və **uzaqtəsirli** olmaqla 2 növünü ayırd edirlər.

Yaxıntəsirli qüvvələr iynənin ucundakı atomların elektron örtükləri ilə səthdəki

atomların elektron örtüklərinin bir-birini $\sim 0,1-1$ nm məsafədə örtməsi zamanı meydana çıxır və məsafə artdıqca azalmağa başlayır. Yaxıntəsirli qüvvələr səth atomları ilə iynənin ucundakı çox az qisim atomlar arasında mövcud olur. Bu zaman AQM ilə səthin görüntüsünün alınması rejimi kontaktlı rejim adlanır.

Uzaqtəsirli qüvvələrin yaranması ilə van-der-Vaals, elektrostatik və maqnit qarşılıqlı təsirləri ilə sıx bağlıdır. Bu qüvvələrin məsafədən asılılığı çox azdır və onlar iynə-nümunə məsafəsinin $0,1-1000$ nm qiymətlərində yaranır. Ona görə də bu qüvvələrə çoxlu sayda atomlar cəlb edilmiş olur. AQM ilə səthin görüntüsünün uzaq təsirli qüvvələrlə alınma rejimi kontaktsiz rejim adlanır.

Gördüyümüz kimi, AQM qarşılıqlı təsirin növündən asılı olaraq 2 rejimdə işləyə bilər: **1. Kontaktlı ; və 2. Kontaktsiz.**

Kontaktlı qarşılıqlı təsir rejimində cəzibmə qüvvələri üstünlük təşkil edir və bu qüvvələr aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$\frac{dF(R)}{dR} = 2k \frac{\Delta v}{v_r}$$

Burada $\Delta v = v - v_r$ – zond və səthin cazibəsi ilə əlaqədar meydana gələn rəqs tezliyinin dəyişməsidir, k – elastiklik əmsalıdır. Δv kəmiyyəti iynə ilə səthin skan edilməsi prosesində rəqs amplitudunun dəyişməsi ilə müəyyən edilir.

Kontaktsiz qarşılıqlı təsir rejimində kiçik məsafələrdə itələmə qüvvələri üstünlük təşkil edir. Sadə halda zond özünü qrammofon iynəsi kimi aparır və onun vertikal (şaquli) rəqsləri səthin relyefini təsvir edir.

Kontaktlı və kontaktsiz rejimlər arasında olan rejim isə kiçik zaman ərzində səthlə iynə arasında periodik olaraq yaranan **“tıqqıldatma” rejimi** (tapping mode) adlanır. Bu rejimdə iynəni hərəkətə gətirən konsol öz məxsusi rezonansı hesabına $50-100$ nm amplitudla rəqs edir. Bu rejim kontaktlı rejimlə müqayisədə horizontal səthdə daha yüksək ayırdetmə qabiliyyəti ilə xarakterizə olunur.

Hal-hazırda AQM-nin səthin maqnit, elektrostatik, mexaniki və digər xassələrini tədqiq edən müxtəlif modifikasiyaları yaradılmışdır ki, bunlardan birinin maqnit-qüvvə mikroskopunun (MQM) iş prinsipi ilə tanış olaq.

İlk öncə onu qeyd edək ki, MQM-də AQM-dən fərqli olaraq Van-der-vaals qüvvələri ilə yanaşı, maqnit dipol qüvvələrindən də istifadə olunur. Zond səthdən $10-50$ nm məsafəyə qədər uzaqlaşdıqda zonda yalnız maqnit qüvvələri təsir edir. Bu halda zondun düz xətt boyunca hərəkətindən kənara çıxmaları, məhz maqnit qüvvələri hesabına baş verir. MQM-də iynəyə təsir edən qüvvə

$$F = m_0 \text{ grad } H$$

Burada m_0 -maqnit momenti, H -maqnit sahəsinin gərginliyidir.

Gəlin səth üzərində hər hansı bir maqnit klasterinin olduğunu fərz edək. Bu maqnit klasteri öz ətrafında maqnit sahəsi yaradacaq və onun gərginliyinin R məsafəsindən asılılığı:

$$H(R) = \frac{3r(rm) - m}{R^2}$$

tənliyi ilə qiymətləndiriləcək. Burada r – seçilmiş istiqamətdə radius-vektor, m isə klasterin maqnit momentidir. Onda MQM-ndə iynə ilə maqnit klasteri arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsi

$$F = grad \left[\frac{3(rm)^2 - mm_o}{R^3} \right].$$

Z oxu istiqamətində yönəlmiş dipol momentləri üçün iynə ilə klaster arasında qarşılıqlı təsir qüvvəsi $F_z = -6m_0m/z^4$ -ə, qüvvə sahəsinin qradiyenti isə $dF/dz = 24m_0m/z^4$ -ə bərabərdir.

MQM ilə nazik səthləri, nanoklasterləri və nanoquruluşları, informasiya daşıyıcı maqnitləri tədqiq etmək daha məqsəduyğun hesab olunur. Bundan başqa, MQM ilə maqnit yazılarını optimizasiya etmək də olur. Bu üsul ayrı-ayrı maqnit oblastlarını görməklə yanaşı, bir neçə nanometr tərtibində domenləri də görmək imkanına malikdir.

Nanolitoqrafiya: zond nanolitoqrafiyası və çap litoqrafiyası

Yuxarıda qeyd etmişdik ki, Skanedici zond mikroskopiyasının qeyri adiliyi ondan ibarətdir ki, ondan tədqiqat üsulundan başqa, həm də nanoobyektlərin yaradılmasında da istifadə etmək olar. Bu üsul sonralar ***zond nanolitoqrafiyası*** adını aldı. Yüksək gərginlik verməklə zond nümunə səthindən atomu “qopararaq” – “tutaraq” digər yerə apara bilir. Bu da bir-bir atomlarla ixtiyari molekulu, və ya nanoquruluşu yığmağa imkan verir.

Bu üsulun əsas çatışmamazlığı onun kiçik istehsal qabiliyyəti ilə bağlıdır. Belə ki, bir zond həttə maksimal sürətlə işləsə belə, böyük həcmrlərlə, yəni çoxlu sayda məhsul yarada bilməz. Hal-hazırda bu maneə çoxzondlu qurğuların yaradılması ilə aradan götürülür.

Nanolitoqrafiyanın daha bir istiqaməti çap litoqrafiyası adlanır. Litoqrafik üsullar haqqında məlumat verdikdə qeyd etmişdik ki, çap litoqrafiyasını digər litoqrafik üsullardan fərqləndirən əsas cəhət odur ki, burada şüadan istifadə olunmur; ümumi cəhət isə odur ki, burda klassik litoqrafiyada olduğu kimi səthlə şablon birbaşa kontaktda olur. Çap litoqrafiyasında şəkil zond ilə çəkildiyi üçün onu çap nanolitoqrafiyası da adlandırırlar.

Bu üsulun əsas çatışmamazlığı iş prosesində yüksək təzyiqdən istifadə edilməsi ilə bağlıdır. Bunun nəticəsi olaraq şablonda gərginlik artır və o tez xarab olur. Çap nanolitoqrafiyasında rezistis kimi şüşədən istifadə etdikdə, bu çatışmamazlığı aradan qaldırmaq mümkün olur. Belə ki, şüşə özlü-axıcı maddə olduğu üçün, onun özlülüyünü emal zamanı temperaturun artırılması hesabına azaltmaqla şablona qoyulan təzyiq də azalır. Bu da onun “ömrünün uzanmasına” imkan verir. Rezisti yumşaltmaq məqsədi ilə, əsasən, şüşə əmələ gəlmə temperaturundan 20-50° yüksək temperaturdan istifadə olunur. Bu halda rezistis təzyiq altında axan özlü mayeyə çevrilir. Çap prosesi özü 40-150 bar təzyiqində həyata keçirilir; rezistis layının qalınlığı 50-250 nm tərtibində olur. Bu prosesin düzgün həyata keçməsi üçün rezistis layı altlıqla kimyəvi cəhətcə uyğunlaşmalıdır. Bu o deməkdir ki, rezistis ilə altlıq kimyəvi cəhətcə uyğunlaşmış materialdan ibarət olsa, onda yüksək temperaturun təsiri nəticəsində onlar arasında yaranan qarşılıqlı təsir qüvvələri hesabına aydın, defektsiz şəkil almaq mümkün olmayacaq.