

## №2 ДӘРИСТІҢ ҚЫСҚАША МАЗМҰНЫ

**Дәріс 2** Микроскопияның зондты әдістері: атомды-күшті, сканирлеуші туннель.

**Дәрістің мақсаты:** Студенттерді нанакұрылымды материалдарды зерттеуде зондты микроскопияны қолданудың жолдарымен таныстыру. Жұмыс жасау принциптерін талқылау.

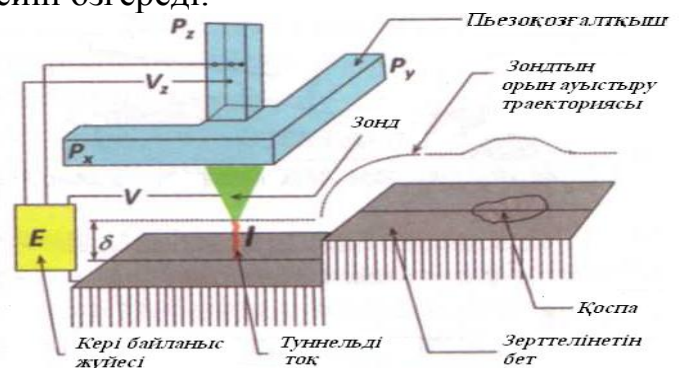
Сканирлеуші туннельді микроскопты (СТМ) IBM фирмасының Цюрих бөлімшесінде жұмыс істейтін Г. Биннинг пен Г. Рорер 1982 жылы ойлап тапқан болатын. 1986 жылы Г. Биннинг пен Г. Рорер зондты ангстрем үлесіндегі кадаммен қозғалтатын пьезоқозғалтқышты жасағандары үшін Нобель сыйлығына ие болды. СТМ - ның, оның артынан атомды - күштік микроскоптың және де сканирлеуші зондтық микроскоптардың басқа модификацияларының пайда болуы наноәлемді зерттеуге маңызды кадам жасауға мүмкіндік берді. Зондтық микроскоптардың қазіргі әдістері арқылы беттің рельефі, құрамы мен құрылысын тексеруге болады. Соңғы он жылдықта зондтық микроскопты пайдалану физика, химия және биологияның әртүрлі аймақтарында танымды кеңейтуге мүмкіндік тудырып отыр.

Сканирлеуші зондты микроскоптардың барлығының негізі зондтың зерттелініп отырған бетпен өзара әсерлесуі болып табылады.

Сканирлеуші туннельді микроскопта пьезоқозғалтқыш атомды-өткір металды инені үлгінің өткізгіш бетіне жақындатады (2.3 - сурет). Ине мен үлгі бетінің арасына вольттың ондық үлесінен бастап бірге дейін кернеу қойылады. Туннельді тоқтың ағуы ине мен үлгі атомдарының арасындағы қашықтық 1 нм шамасында болғанда басталады. Туннельді тоқтың табиғаты квантты, ал оның шамасы үлгі бетімен ине арасындағы қашықтықтан тәуелді: егер ине мен үлгі бетінің арасындағы кернеу 1 В шамасында болса және зондтың бетке жақындауы 1,5-нан 0,8 нм-ге дейін болса, онда ток 1 пикоамперден ондаған наноамперге дейін өзгереді.



а – сканирлеуші туннельді микроскоп қондырғысы



б – сканирлеуші туннельді микроскоп сызбанұсқасы

V кернеу берген кезде I туннельді ток шамасының  $\delta$  қашықтықтан тәуелділігін келесі формула арқылы бағалауға болады:

$$I \approx kVe^{-c\delta}, \quad (2.1)$$

мұндағы  $c$  және  $k$  – үлгі мен иненің материалынан аз ғана тәуелді тұрақты деп есептеуге болатын шамалар,  $c \approx 2,1 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$ . Келтірілген формула туннельді ток шамасына әсер ететін, елеулі фактор санымен байланысты жуықталған сипатқа ие. Мысалы, зондтың формасы, беттік ақаулар, беттегі адсорбцияланған молекулалардың қабығының қалыңдығы (мысалы, судың қабығы) және т.б. Бірақ, бұл тәуелділік вакуумда жүргізілетін эксперименттермен дәлелденген. Осыған ұқсас өрнекке әртүрлі потенциалы бар, үш аймақтың есебіне арналған Шредингер теңдеуін шеше отырып келуге болады.

Потенциалдық тосқауыл арқылы өту коэффициентін тосқауылдан өткен бөлшектердің ықтималдылық ағын тығыздығының тосқауылға түскен бөлшектер ықтималдылық ағын тығыздығына қатынасы арқылы өрнектеуге болады. Түскен толқынның амплитудасы бірге тең деп қабылданғандықтан, ал түскен және өткен толқындардың толқындық векторлары сәйкес келетіндіктен, қарастырылып отырған жағдайда, бұл қатынас тосқауыл сыртындағы толқындық функцияның модулінің квадратына тең болады. Шредингер теңдеуін шеше отырып, келесі формуланы алуға болады:

$$D \propto \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int_a^b \sqrt{2m(U - E_x)} dx \right], \quad (2.2)$$

мұндағы  $a, b$  – үлгі беті және зонд координаталары ( $a - b = \delta$ ),  $U$  – метал сыртындағы электронның потенциалдық энергиясы,  $E_x$  – метал ішіндегі электронның энергиясы. Бұдан,

$$U = E_F + \varphi(x), \quad (2.3)$$

мұндағы  $\varphi(x)$  – потенциалды тосқауылдың биіктігі,

$$\begin{aligned} &\Rightarrow D \infty \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int_a^b \sqrt{2m(E_F + \varphi(x) - E_x)} dx \right] \Rightarrow \\ &\Rightarrow D \infty \exp \left[ -B \sqrt{2m(E_F + \bar{\varphi}(x) - E_x)} \delta \right], \end{aligned} \quad (2.4)$$

мұндағы  $\bar{\varphi}(x)$  – потенциалды тосқауылдың орташа биіктігі, ал  $B$  – берілген материал тұрақтысы.

Ағып өтетін туннельді токтың шамасын келесі теңдеумен көрсетуге болады:

$$I = e(N_1 - N_2) \infty \int_0^{E_{\max}} D(E_x) dE_x, \quad (2.5)$$

мұндағы  $N_1, N_2$  – тура және кері бағытта, потенциалды барьер арқылы туннельденетін бөлшектер саны. Онда  $V$  потенциалын беретін болсақ,

$$I = I_0 \left\{ \bar{\varphi} \exp \left[ -A \bar{\varphi}^{\frac{1}{2}} \delta \right] - (\bar{\varphi} + eV) \exp \left[ -A(\bar{\varphi} + eV)^{\frac{1}{2}} \delta \right] \right\}, \quad (2.6)$$

мұндағы,  $A$  – үлгі беті мен зонд материалын сипаттайтын тұрақты шама.

Сканирлеуші туннельді микроскоп үшін жуықтауда,  $\varphi \gg 1 eV \Rightarrow$

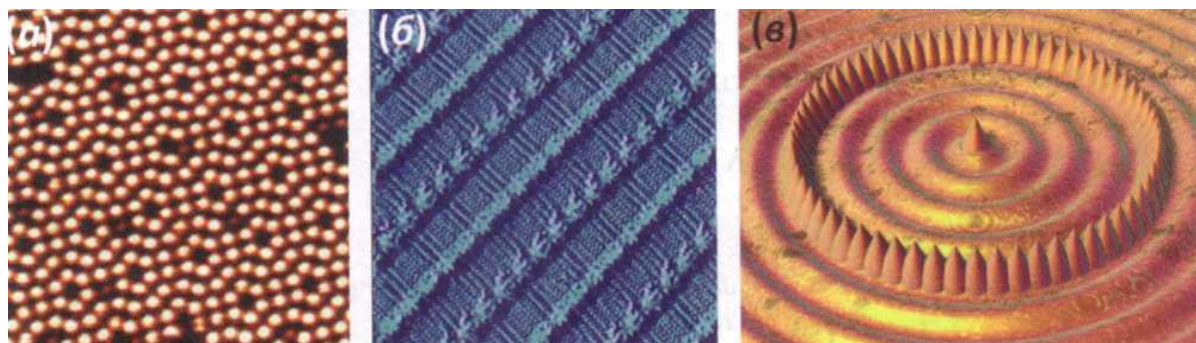
$$I = I'_0 \bar{\varphi}^{\frac{1}{2}} V \exp \left[ -A \bar{\varphi}^{\frac{1}{2}} \delta \right], \quad (2.7)$$

мұндағы  $I'_0$  және  $I_0$  – ине мен үлгі материалының қасиетінен тәуелді коэффициенттер. Бұл формуланы үлгі беті мен ине арасындағы арақашықтықтан туннельдік токтың шамасынан және саңылауға берілген кернеу шамасынан эмпирикалық жолмен ертеде табылған тәуелділігі арқылы мына қатынасқа келтіру оңай  $I \approx k V e^{-c\delta}$ .

Берілген шамадағы туннельді токтың ағып өтуіне сәйкес келетін биіктікте зондты өз кезегінде позиционирлейтін, туннельді ток күшейткіш пен аналогты-сандық түрлендіргіш көмегімен компьютерге тіркеледі. Металл

және жартылайөткізгіш үлгілер үшін тоқтың мәндері бірнеше наноампер шегінде және органикалық қабықтар үшін 1-100 пикоампер аралығында таңдалады (үлгі құрамының өзгерісін болдырмау үшін). Стандартты сканирлеуші туннельді микроскоптың сканирлеу қадамы ондық үлестегі ангстремге дейін жетуі мүмкін. Иненің үлгі бетімен әрекеттесуін жою үшін немесе туннельді тоқтың (~10 ангстрем) жүріп өту аймағынан алшақтауы үшін кері байланыс жүйесін қолданады. Бұл жүйе әрдайым туннельді тоқты тіркеп отырады, сонымен қатар сканирлеудің әр нүктесінде туннельді тоқтың берілген шамасымен сәйкес зондтың тежеліп қалу биіктігін қалпына келтіреді. Бұл кезде зонд үлгі бетінен бірдей қашықтықта тұрады, бұл үлгі бетіндегі электронды тығыздықтың таралуын орнатуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, зонд траекториясы үлгі бетінің рельефін сипаттайды.

СТМ әдісі жұқа қабықшаларды, кванттық нүктелерді, көміртекті нанотүтікшелерді және т.б. заттарды зерттеу кезінде кең қолданылады. Туннельді микроскоппен жеке атомдардың орнын ауыстыруға, сонымен қатар күрделі квантты құрылымдарды құруға қол жеткізуге болады. Вакуумды СТМ әдісінің дамуы монокристаллдардың бетінің, Лэнгмюр-Блоджеттің қабықшаларының, өздігінен жиналатын моноқабаттардың атомдық құрылысын (2.3 - сурет) анықтауға мүмкіндік берді. Ал, спин-поляризациялық туннельді микроскопия жеке атомдардың магниттік моменттерінің бағыттарын бақылауға мүмкіндік туғызды.



2.3 - сурет. СТМ – ғы беттің көрінісі Si(111)7x7 (а, Omicron); 1,3-динонадекан-бензеннің моноқабаты (б, К. Kim, А. Matzger, Veeco); Cu(111) бетіндегі Fe - нің 48 атомдарының кванттық кораллы (в, IBM Almaden Research Center) [7]