

MIKROSKOPS VAI NANOSKOPS?

ILGONIS VILKS

Ierīci, kas ļauj saskatīt mikropasaules objektus, sauc par mikroskopu. Taču pēdējā laikā pētniekiem ar mikrolīmeni vairs nepietiek. Daudzas dabas parādības tiek pētītas nanolīmenī, izmantojot ļauidīgus elektronu mikroskopus, kuros var aplūkot pat atsevišķus atomus. Varbūt pienācis laiks šos mikroskopus pārdēvēt par nanoskopiem? Tāda doma radās, apmeklējot Dānijas Tehniskās universitātes Elektronu nanoskopijas centru.

Iztēlojieties tenisa bumbiņu, kas palielināta līdz zemeslodes izmēriem. Nav brīnums, ka uz tās iespējams saskatīt supersikas detaļas. Dānijas Tehniskās universitātes Elektronu nanoskopijas centra mikroskopi sniedz šādu iespēju, ar

tiem var iegūt līdz 100 miljoniem reižu palielinātus pētāmo objektu attēlus.

Elektronu mikroskopu vēsture sākās 1931. gadā, kad vācu inženieri Ernsts Ruska un Makss Knolls uzbūvēja pirmo elektronu mikroskopu, kas palielināja attēlu "tikai" 400 reizes. Divus gadus vēlāk Ruska izveidoja uzlabotu modeli, kas pārspēja optisko mikroskopu.

Pirmais elektronu mikroskops, kas pārspēja optiskos mikroskopus. 1933. gads.



Kas lācītim vēderā?

Elektronu mikroskops principā darbojas tāpat kā gaismas mikroskops, tikai gaismas vietā parauga "apgaismošanai" un attēla iegūšanai izmanto elektronu kūli. Gaismas mikroskopa maksimālais iespējamais palielinājums ir aptuveni 1500 reizes, lielāku palielinājumu neļauj iegūt gaismai piemītošās viļņu īpašības, jo izpaužas gaismas difrakcija – gaismas viļņu apliekšanās ap sikiem šķēršļiem, kuru izmēri



salīdzināmi ar gaismas viļņa garumu. Vienkārši sakot, gaismas viļņi ir pārāk "rupji", ar tiem nevar "aptaustīt" ļoti mazus objektus. Elektronu t. s. de Broļjī viļņa garums ir daudzkārt mazāks par gaismas viļņa garumu, tāpēc iespējams iegūt daudz lielāku palielinājumu un labāku izšķirtspēju.

Mikroskopa augšdaļā atrodas elektronu lielgabals, kas ar lielu ātrumu "izšauj" elektronus. Tā darbināšanai nepieciešams augstspriegums. Tālāk elektronu kūlis iziet cauri vairākām "lēcām", kas fokusē kūli uz pētāmo paraugu. Jā, arī elektronu mikroskopam ir "lēcas", tikai tajās elektronu kūļa fokusēšanai izmanto nevis stiklu, bet elektrisko un magnētisko lauku.

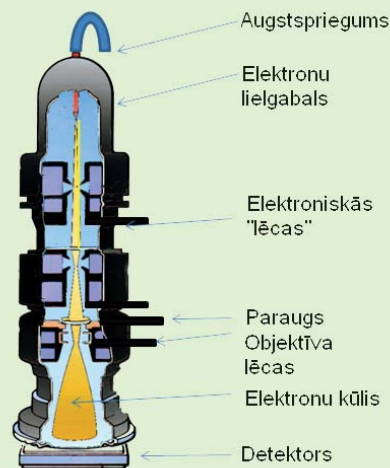
Elektronu kūlis "apgaismo" paraugu, kas daļēji laiž cauri elektronus, bet daļēji tos izkļiedē. Paraugam cauri izgājušie elektroni nes informāciju par parauga struktūru.

Tālāk objektīva magnētiskā lēca iegūto attēlu palielina, līdz tas nonāk uz detektora un kļūst redzams. Tāpat kā vecajos katodstaru televizoros un datoru CRT monitoros, detektorā ir pārklājums, kas spīd elektronu iedarbībā, padarot attēlu redzamu. Agrāk attēlu fiksēja uz fotoplates, bet mūsdienās izmanto lādiņsaistes matricas (CCD), kas ļauj attēlu uzreiz saglabāt datorā.

Elektronu mikroskopa darbības princips.

Lai elektronu kustībai netraucētu gaisa molekulas, mikroskopa iekšienē jāuztur

vakuums. Tas rada zināmus ierobežojumus parauga izvēlē. Paraugšs nevar būt "slapjš", jo tad no tā izdalīsies ūdens molekulas, kas traucēs mikroskopa darbību. Tāpēc bioloģiskos paraugus žāvē, sasaldē un citādi apstrādā. Jebkurā gadījumā paraugam jābūt ļoti plānam, piemēram, akmens jāsagriež ļoti plānās "šķēlītēs", lai elektroni tiktu tam cauri. Bioloģiskos paraugus arī bieži "iekrāso" ar metālu atomiem vai pārklāj ar



Slejas augšā – Dānijas Tehniskās universitātes Elektronu nanoskopijas centra vadītājs R. Duņins-Borkovskis stāsta par centra darbību.



Ar zeltu pārklāta muša, kas sagatavota aplūkošanai elektronu mikroskopā.

plānu metāla slānīti, jo bioloģiskas struktūras elektroniem ir gandrīz caurspīdīgas.

Labākais pasaulē

Labā elektronu mikroskopa izšķirtspēja ir 0,2 nanometri (nm), kas atbilst tipiskiem atoma izmēriem. Līdz nesenam laikam to izšķirtspēju nebija iespējams paaugstināt, jo arī elektroniskajām lēcām piemīt līdzīgi trūkumi kā stikla lēcām, piemēram, sfēriskā aberācija. (Par sfērisko aberāciju vairāk lasiet G. Vilkas rakstā *Teleskopam – 400 gadu* šajā *Terras* numurā.) Jaunākajos mikroskopos ir papildu magnēti, kas koriģē sfērisko aberāciju.

Otra problēma ir tā, ka kūļa elektroniem ir dažāda enerģija (dažāds viļņa garums), kas arī rada attēla kropļojumus. To novērš, ar papildu magnētisko lauku novirzot “nevēlamos” elektronus projām. Uz paraugu krīt vienīgi elektroni ar noteiktu enerģiju. Tādējādi izšķirtspēju izdodas paaugstināt līdz 0,07 nm un ar šādu mikroskopu iespējams skaidri izšķirt atsevišķus atomus.

Ar caurstarojošo elektronu mikroskopu Bērklīja universitātē Kalifornijā iegūtais atomu attēls. Violetie – ūdeņraža atomi, sarkanie – oglekļa atomi. “Kalus” priekšplānā un dibenplānā veido amorfs ogleklis. Krāsas nosacītas.

Dānijas Tehniskās universitātes Elektronu nanoskopijas centra labākajam un dārgākajam elektronu mikroskopam, kas maksā piecus miljonus eiro, ir gan sfēriskās aberācijas korekcijas bloks, gan elektronu enerģijas regulators, t. s. monohromators. Piedevām tam ir speciāla vides kamera (*environmental chamber*), kurā paraugs nav jātur pilnīgā vakuumā, bet tam apkārt var būt neliels daudzums gāzes. Šis mikroskops ir vienīgais pasaulē, kam ir visi trīs uzlabojumi (sfēriskās aberācijas korekcijas bloks, monohromators un vides kamera), un tas padara šo instrumentu par labāko savā grupā un unikālu izpētes ierīci. Ar to iespējams līdz 100 miljonus reižu lielā palielinājumā pētīt, kā notiek ķīmiskās un fizikālās mijiedarbības starp cietiem materiāliem un gāzēm.

Aplūkosim trīs piemērus. 1. Varam pētīt, kā darbojas katalizatori – vielas, kas paātrina ķīmisko reakciju norisi. Katalizatorus izmanto, piemēram, lai samazinātu kaitīgo vielu

daudzumu automašīnu izplūdes gāzēs. Ar šo mikroskopu var atomu līmenī reāli **redzēt**, kā cietie katalizatori mijiedarbojas ar dažādām gāzēm.

2. Nākotnes cerība ir superminiatūras elektroniskās mikroshēmas. Tās var izgatavot ar nanotehnoloģijas palīdzību, “saliekot” kopā no atsevišķiem atomiem. Ar šo mikroskopu pēta, kā no kamerā esošajām gāzēm atomu pa atomam “aug” nanovadi, kas nepieciešami pusvadītāju elementu savienošanai.

3. Ir svarīgi noskaidrot, vai nanodaļiņas, kuras arvien plašāk sāk izmantot dažādos rūpniecības izstrādājumos, nav kaitīgas veselībai. R. Duņins-Borkovskis: “Mēs varam audu paraugus apstrādāt ar nanodaļiņām un vērot, kurās šūnu vietās tās nonāk, vai tās var nodarīt ļaunumu.”

Citi elektronu mikroskopi

Līdz šim stāstītais attiecās uz *caurstarojošo* elektronu mikroskopu, tajā elektroni paraugam iet cauri. Vēl pastāv *skenējošais* elektronu mikroskops, kurā šaurs elektronu stars “apgaismo” paraugu fragmentu pa fragmentam. Šajā gadījumā elektroni neveido attēlu tieši, bet, saskaroties ar paraugu, zaudē daļu enerģijas, kas pārvēršas sekundāro elektronu plūsmā vai kādā starojumā. Šie sekundārie efekti raksturo parauga īpašības dotajā vietā. Tādā veidā ar elektronu staru pakāpeniski “iztausta” visu parauga virsmu un punktu pa punktu izveido tā attēlu.

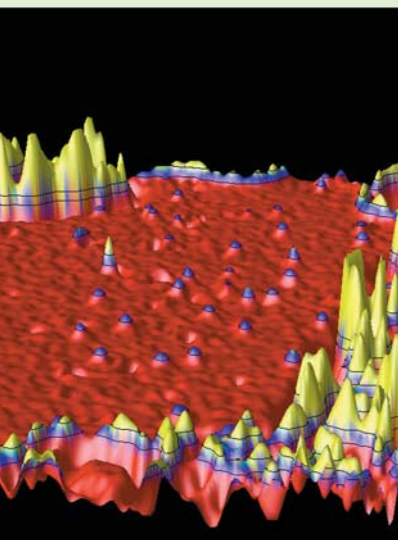
Skenējošā elektronu mikroskopa palielinājums un izšķirtspēja ir krietni mazāki nekā caurstarojošajam, toties ar to var aplūkot relatīvi lielus paraugus un tas spēj parādīt telpisku objekta attēlu – tam ir liels asuma dziļums.

Apvienojot abas idejas, izveidots skenējošais caurstarojošais elektronu mikroskops. Šaurs elektronu stars krīt uz plānu paraugu noteiktā vietā un *iziet tam cauri* (vai daļēji izkliedējas). Tādā veidā iespējams iegūt lielu palielinājumu un izšķirtspēju, kas raksturīgi caurstarojošajam mikroskopam, vienlaikus novērojot

Elektronu nanoskopijas centrā atrodas pasaules kvalitatīvākais un pētniecības iespējām bagātākais elektronu mikroskops.

Skudras galvas attēls, kas iegūts ar skenējošo elektronu mikroskopu.

iepriekš minētos sekundāros efektus, kas sniedz papildu informāciju par parauga struktūru. Šis mikroskopa tips ir izrādījies īpaši noderīgs bioloģisko objektu izpētei (paraugu nav nepieciešams “iekrāsot”), un dažādu atomu aplūkošanai.

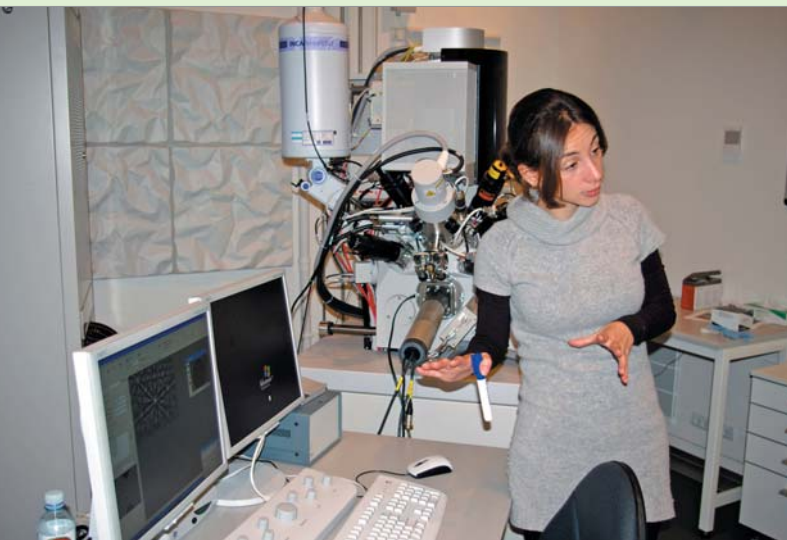


Abi šie mikroskopi tipi pieejami Elektronu nanoskopijas centrā. Centra skenējošais caurstarojošais elektronu mikroskops ir ļoti jaudīgs, tam ir sfēriskās aberācijas korekcija un monohromators, līdz ar to tas dod tikpat lielu palielinājumu un izšķirtspēju, kā "lielais brālis". Paraugiem tomēr jāatrodas vakuumā, tādēļ ar šo mikroskopu šobrīd pēta un cenšas uzlabot pusvadītājus, lai tos sekmīgāk izmantotu nanoelektronikā, nanooptikā un kā nanosensorus.



Elektronu nanoskopijas centra skenējošais caurstarojošais elektronu mikroskops darbībā.

Skenējošie elektronu mikroskopi Elektronu nanoskopijas centrā ir veseli trīs. Tā kā tie dod mazāku palielinājumu – līdz 200 tūkstošiem reižu, tos izmanto paraugu sākotnējai izpētei un arī individuāliem pētījumiem. Brazīlijas zinātniece Alise Bastosa da Silva Fanta (*attēla par kreisi*) pastāstīja, ka viņa mikro- un nanolīmeņi analizē jaunu tērauda šķirni. Jaunais tērauds ir izturīgāks, no tā var veidot plānākas konstrukcijas, tādā veidā samazinot metāla patēriņu. Tomēr, pirms to laist pārdošanā, materiāls vispusīgi jāizpēta.



Diviem no trim skenējošajiem mikroskopiem pievienota papildierīce, kas rada fokusētu jonu plūsmu. Metāla gallija joni ar lielu ātrumu triecas pret parauga virsmu un noārda plānu tā slāni. Kad tas izdarīts, iegūst parauga attēlu un noārda nākamo slāni. Tādā veidā iegūst informāciju par samērā bieža parauga telpisko struktūru.

Vēl jonu plūsmu izmanto gravēšanai. Tā kā jonu plūsmu var virzīt ar 100 nm precizitāti, iespējams radīt ļoti precīzas "nanoskulptūras" turpmākai aplūkošanai lielajos elektronu mikroskopos, kā arī veidot nanoierīces, piemēram, miniatūras pincetes, ar kurām satvert supersīkās oglekļa nanocaurulītes.

Slejš pa labi – ceļojums sniegpārslas iekšienē. Attēlu virkne iegūta ar skenējošo elektronu mikroskopu. Ceļojums sākas ar attēlu, kurā redzama visa sniegpārsla, tās diametrs ir 1 mm. Jau 4. attēlā ar 1860 reižu palielinājumu ir pārsniegta optisko mikroskopa iespēju robeža. Ceļojuma beigās, kad sasniegts 36 000 reižu palielinājums, apakšējā attēlā redzami atsevišķi ūdens molekulu konglomerāti (aptuveni 30 nm lielas detaļas). Salīdzinājumam – ūdens molekulas diametrs ir vēl 100 reižu mazāks.

Šis bija stāsts par *elektronu mikroskopiem*. Vēl ir arī citi mikroskopi ar tikpat lielu palielinājumu un izšķirtspēju, kā šeit aplūkotie, vai savā ziņā pat tos pārspējoši – skenējošais tunēlmikroskops un atomspēku mikroskops. Uz jautājumu, kāpēc Elektronu nanoskopijas centrā neizmanto arī tos, R. Duņins-Borkovskis atbildēja, ka tā ir cita tehnoloģija, kas nav saistīta ar elektronu kūli, bet ar ārkārtīgi asin adatas izmantošanu. Tāpēc par šiem mikroskopiem pastāstīsim kādā citā rakstā.

