

NANO



# MIKRO- ÉS NANOTECHNIKA II: NANOTECHNOLÓGIA

**Dr. Pődör Bálint**

*Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet*

## 2. A NANOTECHNOLÓGIA ESZKÖZEI I



2012/2013 1. félév

1

## 2. ELŐADÁS A NANOTECHNOLÓGIA ESZKÖZEI I

1. Mikroszkóp: optikai és elektron
2. Optikai mikroszkóp korlátjai
3. Elektron mikroszkóp fizikai elvek
4. Transzmissziós elektron mikroszkóp (TEM)
5. Pásztázó elektron mikroszkóp (SEM)

(H. Heinzelmann: *Processing techniques and tools for nanofabrication*, EuroTraining Course Nanotechnology for Electronics, Budapest 2010. június 14-15 előadása anyagainak felhasználásával)

2

## MÉRÉS ÉS MANIPULÁCIÓ A NANOVILÁGBN

A nanotechnológiai kutatások kétségtelenül legfontosabb eszközei a különböző mikroszkópok. A nanométeres mérettartományban azonban nem elegendő már a hagyományos optikai mikroszkópok maximális felbontóképessége sem, ezért új, a fénymikroszkópoktól alapelveiben is különböző eszközökre volt szükség a nanostruktúrák megfigyelésére.

Tények:

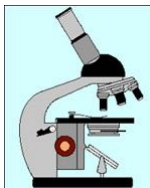
Az emberi szem feloldóképessége kb. 20  $\mu\text{m}$

1 nm körülbelül 5 nagyságrenddel kisebb mint az emberi szem felbontóképessége

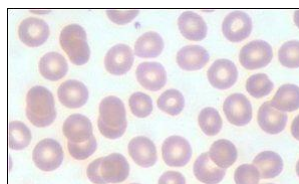
3

## MÉRÉS ÉS MANIPULÁCIÓ A NANOVILÁGBN

A legrégebbi és legáltalánosabban ismert mikroszkóp a fénymikroszkóp. Felbontását a fény hullámhossza korlátozza a 200 nm körüli értékre. Ekkora távolságra levő tárgyponthoznak megfelelő képpontok 1000-szeres nagyítás esetén lesznek a szabad szemmel is jól elkülöníthető 0,2 mm távolságra egymástól. A legtöbb optikai mikroszkóp ennél gyengébb, 1-2  $\mu\text{m}$  felbontású, azaz kisebb hasznos nagyításra képes.



Fénymikroszkóp max 1000x nagyítás



Vörös véresejt 400x nagyítás

4

## MÉRÉS ÉS MANIPULÁCIÓ A NANOVILÁGBN

A főbb lehetőségek, illetve eszközök:

Fény (elektromágneses sugárzás) helyett elektronsugár alkalmazása (transzmissziós és pásztázó elektron mikroszkóp).

A transzmissziós elektronmikroszkópban a lényeges tényező az, hogy a nagyfeszültséggel gyorsított elektron de Broglie (kvantummechanikai) hullámhossza jóval (több nagyságrenddel!) kisebb a látható fényénél,  $\lambda = h/p$ , (h a Planck állandó, p az elektron impulzusa).

5

## MÉRÉS ÉS MANIPULÁCIÓ A NANOVILÁGBN

A másik pedig az ún. pásztázószondás mikroszkópok (*Scanning Probe Microscope*, SPM) különböző válfajai, melyek nem "átvilágításon" vagy reflexión alapulnak, hanem új elven, azaz az alkalmazott szondának és a minta felületével illetve a minta felületén lévő atomokkal való kölcsönhatásán alapulnak. Az úttörő itt az 1981-ben megalkotott pásztázó alagútmikroszkóp (*Scanning Tunneling Microscope*, STM) volt,

6

## MIKROSKÓPIA

Görög: **mikros** kicsi, **skopein** néz

Optikai mikroszkópia

egyszerű

többféle különböző kontraszt mechanizmus: komplementáris információ

mikroszkópos „látás” megfelel a mindennapi tapasztalatainknak

Pásztázó szondás mikroszkópia: **új elv!**

Más típusú mikroszkópia (profilometria, akusztikus mikroszkópia, stb.)

7

## MIKROSKÓPOS MÓDSZEREK

Név	Működési elv	Előnyök	Hátrányok
Optikai mikroszkóp	Optikai transzmissziós, vagy reflexiós	- Egyszerű - Kiforrott technológia	- Diffrakciólimitált - Korlátozott mélységélesség
Pásztázó elektron-mikroszkóp SEM ( <i>Scanning Electron Microscope</i> )	Mintából kilépő (vagy visszaszórt, vagy szekunder) elektronok detektálása	- Nagy mélység-élesség („3D kép”) - Spektroszkópiai lehetőség (EDS)	- Szigetelő minták esetében mintaelőkészítést igényel - Vákuumot igényel
Transzmissziós elektronmikroszkóp TEM ( <i>Transmission Electron Microscope</i> )	Nagyenergiájú elektronokkal világítjuk át a mintát	- Atomi felbontás - Spektroszkópia	- Körülményes mintaelőkészítés (ionsugaras vékonyítás) - Költséges - Ultranagy vákuumot igényel

## MIKROSKÓPOS MÓDSZEREK

Név	Működési elv	Előnyök	Hátrányok
Pásztázó alagútmikroszkóp STM ( <i>Scanning Tunneling Microscope</i> )	Minta és SPM hegy közötti alagútáram mérése	- Nem igényel mintaelőkészítést - Nincs szükség különleges atmoszférára	- Csak vezető (esetleg félvezető) minta vizsgálható
Atomerő-mikroszkóp AFM ( <i>Atomic Force Microscope</i> )	Minta és AFM hegy közötti erőhatás mérése	- Sokrétű felhasználás - Nem igényel mintaelőkészítést - Nincs szükség különleges atmoszférára	- Atomi felbontás csak speciális körülmények között érhető el - Rezgésre fokozottan érzékeny
Közeltéri optikai mikroszkóp ( <i>Scanning Near-Field Optical Microscope</i> , SNOM())	Rendkívül kis apertúrájú fényforrást használó transzmissziós, vagy reflexiós optikai	- Spektroszkópiai alkalmazás - Diffrakciós limit nem korlátozza a felbontást	9

## OPTIKAI MIKROSKÓP: FEJLŐDÉSTÖRTÉNET

16. század: lencse csiszolás  
1590-1595: első összetett mikroszkóp  
(*Zacharias és Hans Jansen*)

17. század: Átlátszó és homogén üveg (flint, ólomüveg)

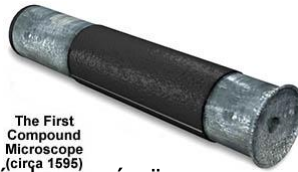
17. század vége:  
*Antony van Leeuwenhoek*  
(1 lencse, 1mm, 250 x, 1  $\mu$ m)  
*Robert Hooke*  
(3 lencse)

## OPTIKAI MIKROSKÓP: TÖRTÉNET

16. század: lencse csiszolás

1590-1595: első összetett mikroszkóp  
(Zacharias és Hans Jansen)

Kb. 3x (összetolva), kb. 10x (kihúzva)



The First Compound Microscope (circa 1595)

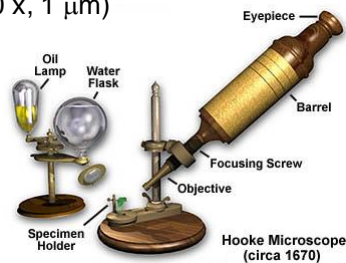


Leeuwenhoek Microscope (circa late 1600s)

17. század: Átlátszó és homogén üveg  
(flint, ólomüveg)

17. század vége Antony van Leeuwenhoek  
(1 lencse, 1mm, 250 x, 1  $\mu$ m)

17. század vége  
Robert Hooke  
(3 lencse)



Hooke Microscope (circa 1670)

## FELOLDÓKÉPESSÉG ÉS ÉRZÉKENYSÉG

A feloldóképesség és érzékenység NEM ugyanaz!

**Feloldóképesség:** két közeli objektum megkülönböztethetősége

Elvi korlát: Az optikai mikroszkóp feloldóképességét a fény hullámtermészetéből eredő diffrakció korlátozza, ez nagyságrendben az alkalmazott hullámhosszhoz közeleső érték.

Gyakorlati korlát: lencsehibák, zaj, stb.

**Érzékenység:** egy objektum jelenléte detektálásának képessége.

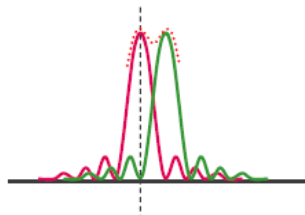
Ez a jel/zaj viszonytól függ!

A zaj statisztikailag determinált, illetve limitált, így az érzékenység is.

## FELOLDÓKÉPESSÉG

A fényrel történő nagyításnak határt szab a hullámhossz-nagyságrendű tárgyakon fellépő elhajlási jelenség (diffrakció). Egy pont képe az elhajlás miatt sötétebb és világosabb koncentrikus gyűrűkből áll.

Ha két egymáshoz közeli pontot vizsgálunk, az elhajlási képek szuperponálódnak. Jól megkülönböztethető még a két kép egymástól, ha az egyik kép maximuma a másik első minimumára esik, ebből adódik az *Abbe* féle kritérium.



13

## DIFFRAKCIÓ KÖRALAKÚ RÉSEN

Bessel function:

$$I(\theta) = I(0) \cdot \left[ \frac{2J_1(ka \cdot \sin \theta)}{ka \cdot \sin \theta} \right]^2$$

$$J_1(n) = 0 \text{ for } n = 3.83$$

$$\Rightarrow kaq_1/R = 3.83$$

$$\Rightarrow q_1 = 3.83 \cdot \frac{R}{ka} = 1.22 \cdot \frac{R\lambda}{2a}$$

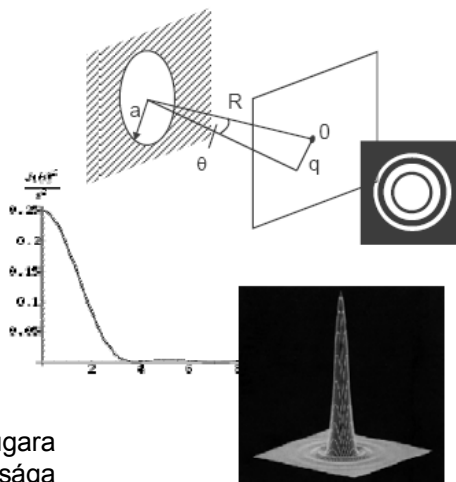
$$\text{Airy disk with } q_1 = 1.22 \cdot \frac{R\lambda}{2a}$$

$a$  – köralakú rés (apertúra) sugara

$R$  – rés (tárgy) és ernyő távolsága

$q_1$  – első sötét gyűrű sugara („folt” sugara)

$\lambda$  - fény hullámhossza



14

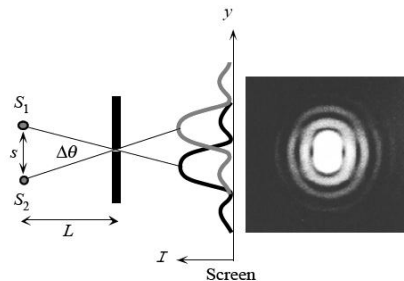
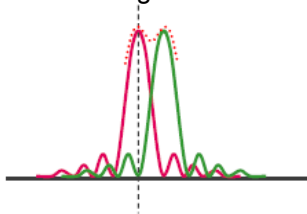
## DIFFRAKCIÓ ÁLTAL KORLÁTOZOTT FELOLDÁS

**Abbe-féle korlát** (Ernst Abbe, 1840-1905)

Két részlet megkülönböztethető, ha mindegyikük elsőrendű diffrakciós képe regisztrálható.

**Rayleigh-féle kritérium** (Lord Rayleigh, 1842-1919)

Az egyik diffrakciós kép maximuma a másik első minimumára esik, ekkor a 26,5 %-nyi fényerőcsökkenés a kettősség érzetét kelti.



Ahogy  $S_1$  és  $S_2$  egyre közelebb kerülnek egymáshoz az Airy-korongok átfedésbe kerülnek, és a feloldás végül eltűnik.

15

## DIFFRAKCIÓ ÁLTAL KORLÁTOZOTT FELOLDÁS

A hagyományos optikai mikroszkópokban a megvilágító fényforrás a mintától távol helyezkedik el. Emiatt a felbontást a diffrakció korlátozza.  $f$  fókusztávolságú,  $a$  apertúrájú optikai rendszeren áthaladó  $\lambda$  hullámhosszúságú nyaláb által létrehozott folt legkisebb lehetséges átmérője

$$d = 1,22 \frac{\lambda f}{a}$$

Ha a fényforrás távolférr sugárzóknak tekinthető (pl. hagyományos fénymikroszkóp) akkor a rendszer felbontása nem növelhető minden határon túl.

16



## TRANSZMISSZIÓS ÉS PÁSZTÁZÓ ELEKTRON MIKROSKÓP

A finomabb részletek vizsgálatára alkalmas elektronmikroszkópok között két eltérő elven működő műszer családot kell elkülönítenünk.

A képet nem optikai elven, hanem, a televízió képképzéséhez hasonlóan, elektronikus módon előállító pásztázó elektronmikroszkópot ([scanning electron microscope, SEM](#)), illetve az optikai analógia alapján megérthető képképzésű transzmissziós elektronmikroszkópot ([transmission electron microscope, TEM](#)).

17

## TRANSZMISSZIÓS ÉS PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓP

Az átvilágító, azaz transzmissziós elektronmikroszkópban (TEM), amelynél az elektronsugár a vékony (jellemzően 100–500 nm vastagságú) mintát átvilágítva, elektromágneses lencserendszeren áthaladva az optikai mikroszkópéhoz hasonló, párhuzamos képképzést használva hoz létre nagyított képet.

A párhuzamos képképzést azt jelenti, hogy a mikroszkópi kép valamennyi képpontja egyszerre jön létre.

A másik irány a pásztázás elvét alkalmazza, amely a soros képképzést használja. Ennek során a kép pontjai nem egyszerre, hanem pontról-pontra, időben egymás után jönnek létre.

18

## ELEKTRONMIKROSKÓP ELVE

Elektronsugár – hullámtermészet – leképezés

Kvantummechanikai alapösszefüggés :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Lencsék: elektromos és mágneses erők (Lorentz erő),

Kondenzátorok (elektródák), tekercsek, stb.

Kép: fluoreszcens ernyő, fotolemez, stb.

19

## ELEKTRONMIKROSKÓP ELVE

Elektronmikroszkópban a gyorsító feszültség tipikusan néhány tíz kV, ekkor az elektronok sebessége már a fénysebességhez képest nem elhanyagolhatóan kicsi, sőt jelentős.

SEM tipikusan 10-40 kV, és 10 kV-nál az elektronok sebessége a fénysebesség kb. 20 %-a, míg egy korszerű TEM-ben, mely 200 kV-al működik, az elektronok elérik a fénysebesség 70 %-át!

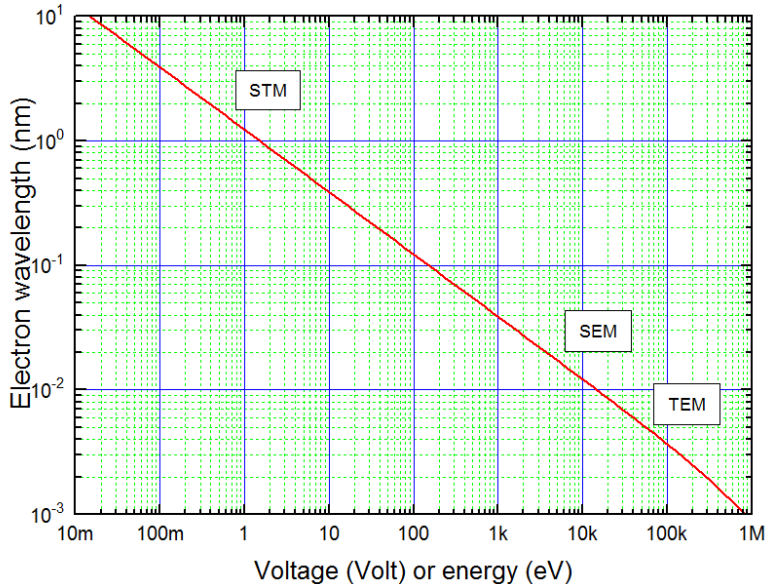
Tehát a  $\lambda$  meghatározásánál a relativisztikus hatást is figyelembe kell venni

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0eU}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{eU}{2m_0c^2}}}$$

Egy 35 kV-os SEM-ben tehát  $\lambda \approx 0,0065$  nm, míg egy 200 kV-os TEM-ben pedig  $\lambda \approx 0,0027$  nm.

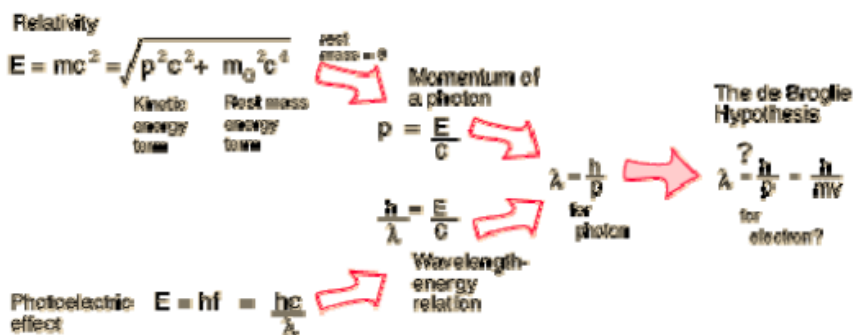
20

## ELEKTRON DE BROGLIE HULLÁMHOSSZA



21

## HULLÁM ÉS RÉSZECSCKE: A GONDOLATMENET VÁZLATA



Louis De Broglie (1924): a fotoelektromos effektus bizonyossága szerint a fénynek részecske természete (is) van, lehetséges-e tehát, hogy az anyagi részecskéknak pedig hullámtermészete (is) van ?

$$\lambda = h/p = h/(mv)$$

"Anyaghullám" vagy De Broglie hullám, Fizikai Nobel díj, 1929

22

## RÉSZECSCKE ÉS HULLÁM

Direkt kísérleti bizonyíték:

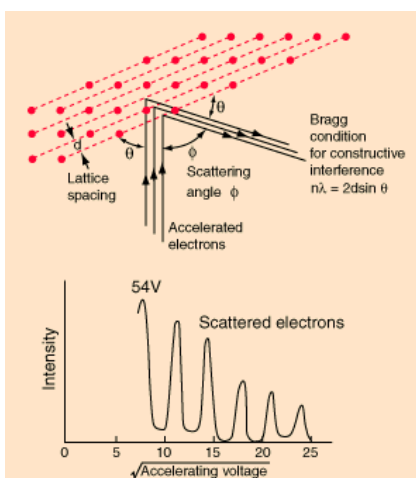
*Clinton Joseph Davisson* (1927) : kisenergiájú elektronok diffrakciója nikkell (Ni) egykristályon (reflexió)

*Georg Paget Thomson* (1927): elektronok diffrakciója fém egykristályon transzmisszióban

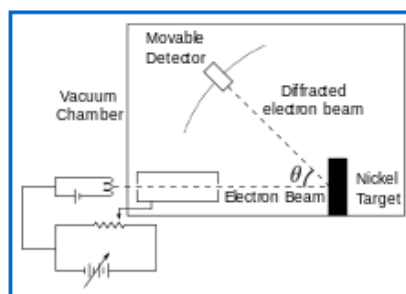
Fizikai Nobel díj (1937): mindketten...

23

## DAVISSON-GERMER: ELEKTRONDIFFRAKCIÓ



Davisson, C. J., "Are Electrons Waves?,"  
Franklin Institute Journal 205, 597 (1928)



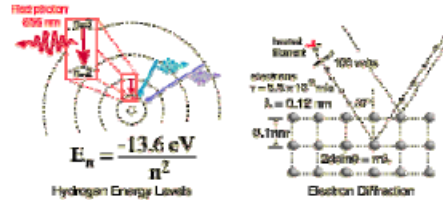
Kisenergiájú elektronok diffrakciója nikkell (Ni) egykristályon (reflexió). A Davisson-Germer kísérlet.

24

## RÉSZECSCKE ÉS HULLÁM

- DeBroglie wavelength:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$



- the electron has mass  $m = 9 \times 10^{-31}$  kg, charge  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C  
Planck's constant  $h = 6.62 \times 10^{-34}$  Js /  $2\pi$
- for  $E = 20$  keV,  $\lambda \approx 0.1 \text{ \AA}$
- for technical reasons, the resolution is 1000x worse

25

## ELEKTRONSUGÁR: HULLÁMHOSSZ ÉS FELOLDÓKÉPESSÉG

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = eU \quad \lambda = \frac{h}{m \times v} = \frac{6,6218 \times 10^{-34} \text{ Js}}{9,1046 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 1,88 \times 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 3,87 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad \Rightarrow \text{DeBroglie wavelength at 1 kV: } 0,0387 \text{ nm}$$

Nem túl nagy, pl. 40 kV gyorsítófeszültségnél a hullámhossz

$$\lambda = 0,006 \text{ nm}$$

A feloldóképesség elvi korlátja

$$\Delta d \approx \lambda/3 = 0,002 \text{ nm}$$

Ez több tízezerszer jobb mint a fényvel elérhető érték!

26

## ELEKTRONOPTIKA

Alapelv: fénysugár és elektron pálya analógiája.

Általános elektrosztatikus térben mozgó elektron pályája megegyezik egy, a térben meghatározott módon változó törésmutatójú közegben terjedő fénysugár útjával. A törésmutatót a tér minden pontjában az ott mérhető feszültség szabja meg.

Mágneses térben a vektorpotenciál játssza a megfelelő szerepet.

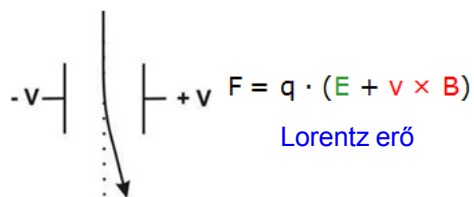
A mechanika és az optika általános analógiája:

Mind a mechanika mind a (geometriai) optika törvényei egy-egy variációs elvből, a *Fermat*-, illetve *Maupertius*- elvből vezethetők le.

27

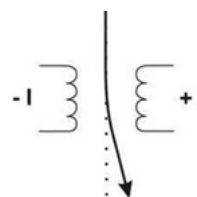
## ELEKTRONSUGÁR "FOKUSZÁLÁSA"

electro-static



fast deflection

electro-magnetic



large deflection

Elektromos és mágneses térben az elektronokra (és minden töltéssel rendelkező részecskére) ható erő: Lorentz erő

28

## ELEKTRONOPTIKA

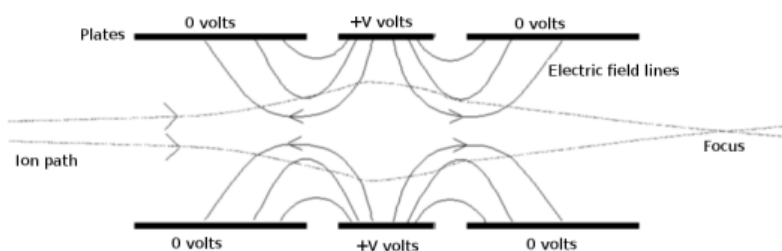
A nyalábformáló és fókuszáló elektronoptikai rendszer a Lorentz-erő alapján működik. Lehetőség van mágneses és elektrosztatikus lencsék kialakítására, de az utóbbiak a nagy feszültségigényük révén szigetelési és feltöltődési problémákat okozhatnak. Emiatt az elektronoptikai rendszerekben elsősorban mágneses lencsét alkalmaznak.

A elektromos és mágneses lencsék az optikai tengelyhez közeli mozgó elektronokat az optikai lencsékhez hasonlóan fókuszálják. A hasonlóság még a lencsehibákra is kiterjed.

Különbség azonban, hogy a mágneses lencsék az optikai lencsékkel ellentétben a képet forgatják. Nagy előnye a mágneses lencséknek, hogy fókusz távolságuk a tekercseken átfolyó áram erősségével változtatható. További különbség, hogy mágneses lencsékkel csak gyűjtőlencse alakítható ki, szórólencse nem.

29

## ELEKTROSZTATIKUS LENCSE

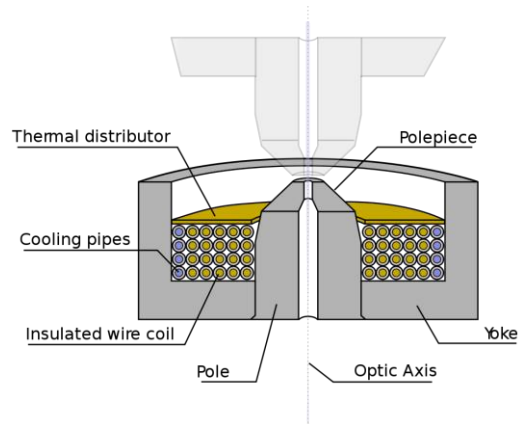


Elektrosztatikus lencse. Koaxiális hengerekből áll.

An *einzel lens* is a charged particle lens that focuses without changing the energy of the beam. It consists of three or more sets of cylindrical or rectangular tubes in series along an axis.

30

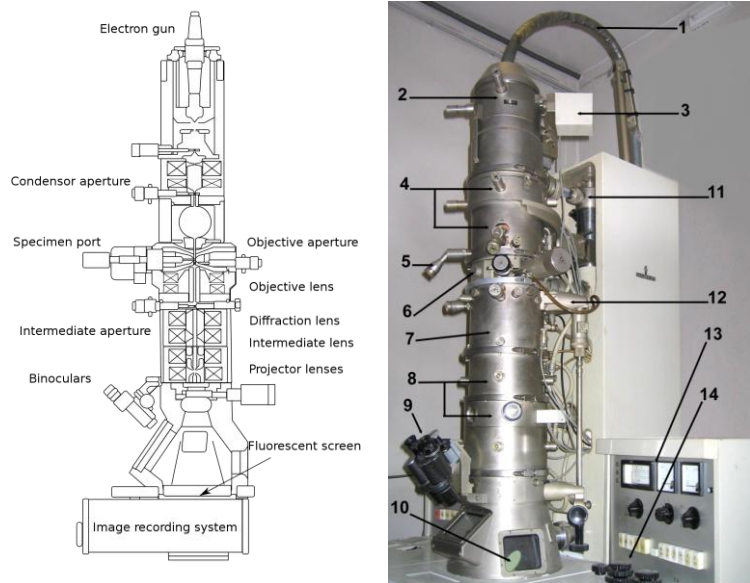
## MÁGNESES LENCSE



Elektronmikroszkóp mágneses lencséje

31

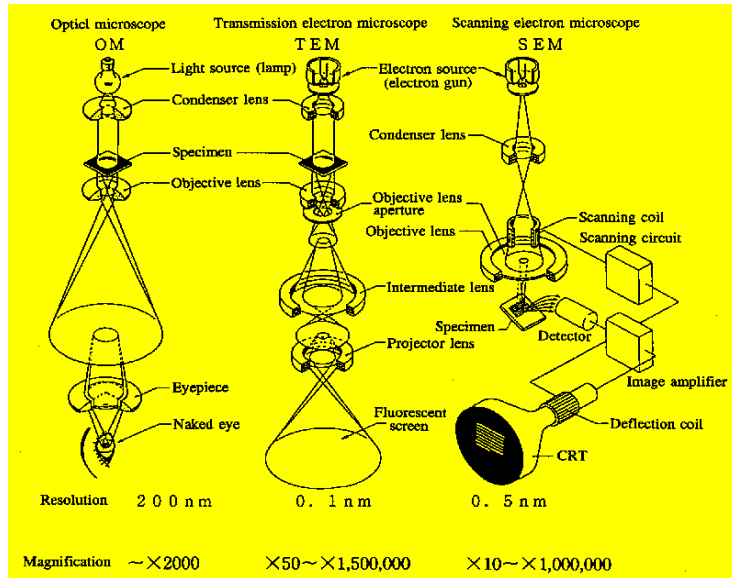
## ELEKTRONMIKROSKÓP



32



## OPTIKAI MIKROSKÓP, TEM ÉS SEM

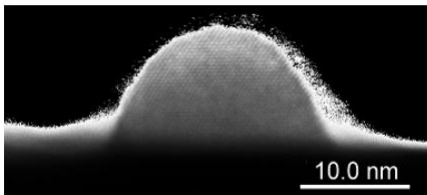


33

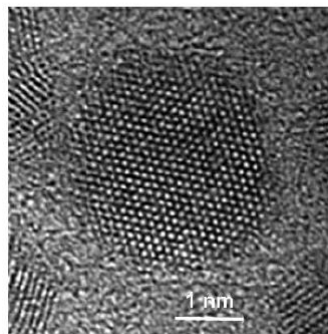
## NANOMETROLÓGIA: TEM



Transzmissziós elektronmikroszkóp  
(max. felbontás: 0,1 – 0,2 nm)



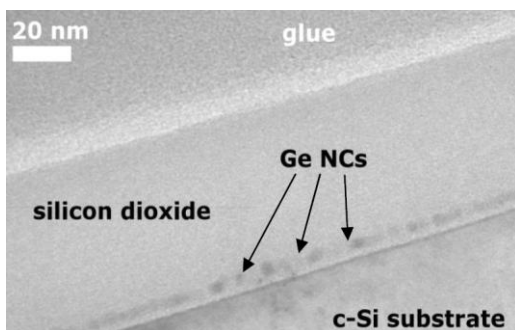
InAs nanorészecske



CdSe nanorészecskék

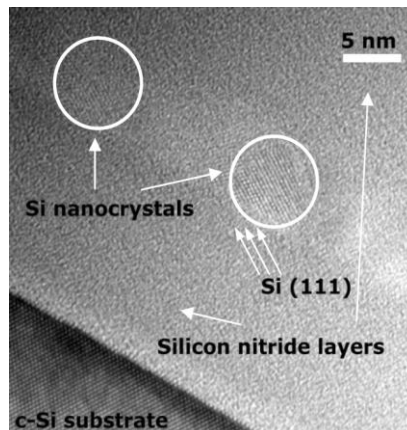
4

## TEM ÉS HRTEM: Si ÉS Ge NANOKRISTÁLYOK



Ge nanokristályok  $\text{SiO}_2$ -ban

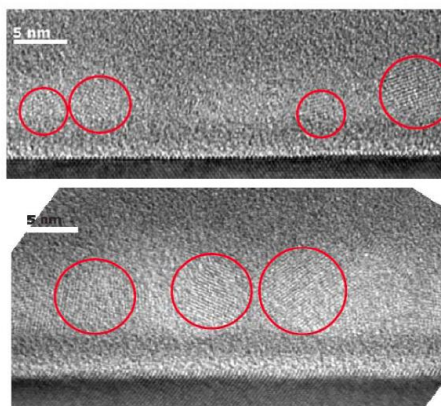
(MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet, Horváth Zsolt József és munkatársai.)



Si nanokristályok  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -ben

35

## HRTEM: Si NANOKRISTÁLYOK



*Figure 1 High resolution transmission electron microscope images of two  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  NC/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  structures*

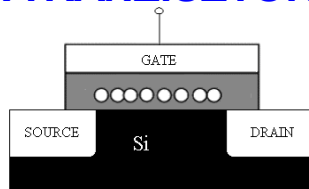
Si nanokristályok szilíciumnitridben. Rácsfeloldású transzmissziós elektronmikroszkópi képek. A Si nanokristályok mérete néhány nm. Jól láthatók az egykristály atomi síkjai. (A Si rácsállandója 0,357 nm.)  
(MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet, Horváth Zsolt József és munkatársai).

36

## NANOKRISTÁLY MEMÓRIA TRANZISZTOR

*Nanokristály alkalmazás:*

Lebegő vezérlőelektrodájú (memória-) tranzisztor. Az információt megtestesítő töltések (elektronok) a nanokristályok alkotta elektrodán tárolódnak.

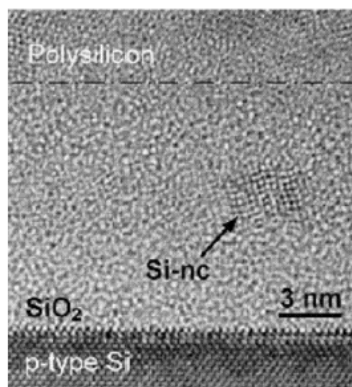


Freescall: 24 Mbit nanokristály alapú memóriagyártásban: 2005.

Si nanokristályok  $\text{SiO}_2$  mátrixban, rácsfeloldású elektronmikroszkópiai kép.

NC méret 2-10 nm, 2-8 nm távolságban a Si/ $\text{SiO}_2$  határfelülelettől. Oxid vastagság 8-30 nm.

(MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet, Pécz Béla, Horváth Zsolt József és munkatársaik).

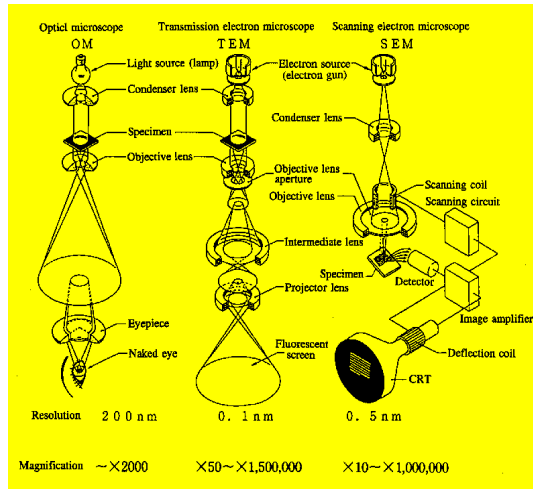


## PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓP: SEM

A pásztázó elektronmikroszkópban (*Scanning Electron Microscope, SEM*) a mintát jól fókuszált elektronsugárral bombázva az általa visszaszórt részecskéket vagy a besugárzás hatására kilépő elektromágneses sugárzást detektálják.

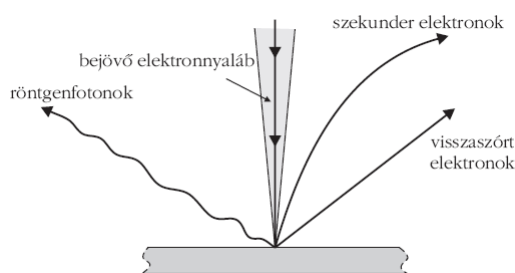
Előnye, hogy rendkívül nagy mélységélességgel rendelkezik, azonban felbontásban csak a legjobb eszközök érik el a nanométeres tartományt. Ezen túlmenően az elektrosztatikus feltöltődés miatt szigetelő mintákat nem lehet vele közvetlenül megfigyelni, csak akkor, ha vékony vezető (pl. arany) réteget párologtatnak a mintára.

## PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓP



Szemben az optikai mikroszkóppal (és a transzmissziós elektronmikroszkóppal) a pásztázó elektronmikroszkóp TV-kép szerűen, pontonként besugározva és a mintán mozgó sugárral szinkronban soronként végig-<sup>39</sup> pásztázva hozza létre a képet egy hosszú utánvilágítású képernyőn (CRT).

## PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓP: SEM



A pásztázó elektronmikroszkópban a fókuszált elektronnyaláb a minta felületét pásztázza, miközben különböző „termékeket” vált ki a felületből. Mivel a pásztázó elektronmikroszkópban többnyire vastag mintát használunk, ezért általában a bombázó nyaláb nem jut át a mintán. Ilyenkor a kölcsönhatás „termékei” csak a minta nyaláb felőli oldalán jelennek meg

## PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓP: SEM

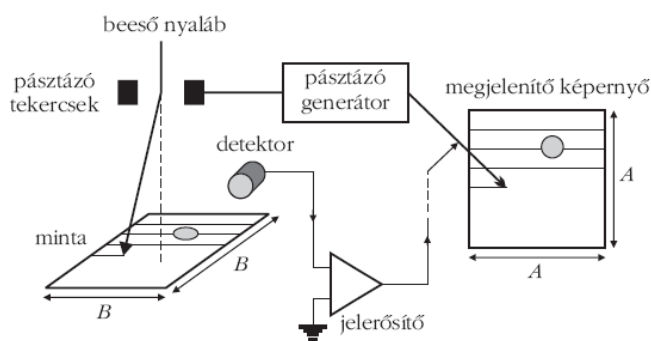
A pásztázó elektronmikroszkópia egy nagyon hatékony roncsolásmentes karakterizálási módszer mindenféle felülethez, kb. 2,5-50 kV elektrongyorsító feszültséget használva.

A másodlagos és visszaszórt elektronok detektálásán túlmenően a legtöbb SEM készülék további kiegészítővel is fel van szerelve, pl. Röntgen-sugárzás, abszorbeált elektronok, transzmissziós elektronok, katodolumineszcencia (CL) detektálása.

Ha energia-diszperzív Röntgen analizátor (*Energy Dispersive X-Ray*, EDX) is kapcsolódik az elektronmikroszkóphoz, akkor roncsolásmentes mikroanalizátorként is alkalmazhatóvá válik.

41

## SEM: KÉPALKOTÁS ELVE

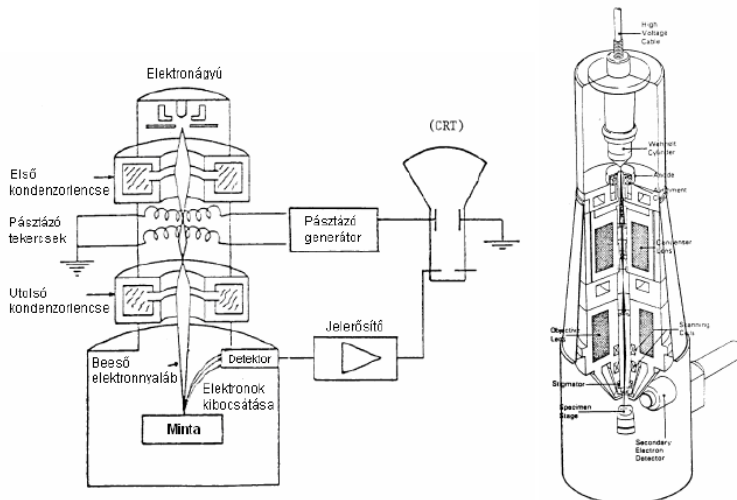


A pásztázó elektronmikroszkóp működésének elve.

A kép létrehozásában a lencséknek nincs közvetlen szerepe, ezért a pásztázó mikroszkópok esetén nem is érvényes a felbontásra vonatkozó Abbe-feltétel. A soros képalkotás esetén a felbontást meghatározó tényezők: a nyaláb mérete a minta felületén, a nyaláb által a felület alatt gerjesztett térfogat, illetve a mintából kilépő termék energiája.

42

## SEM: PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓP



SEM blokkvázlata a főbb alkotórészekkel, illusztrálva az indirekt képalkotást, valamint egy SEM berendezés oszlopának kialakítása.

43

## SCANNING ELECTRON MICROSCOPE

Képképzés: pásztázással (NEM leképező lencsékkel)

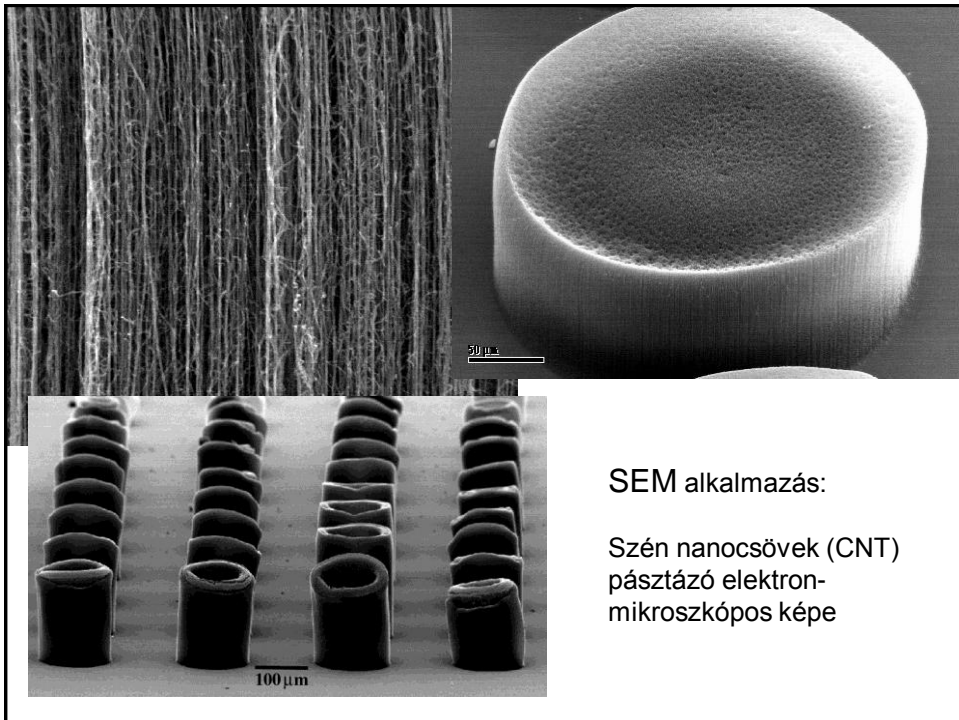
Elektronok: részecske **ÉS** hullám  
Feloldás fizikai korlátja: diffrakció

Gyakorlatban: lencsehibák korlátozzák a feloldást

Nagyobb feloldás:  
nagyobb elektron energia  
tökéletesebb lencsék



1



**VÉGE**