

Nanoszerkezetű anyagok előállítási módszerei - Nanolitográfia

Dr. Bonyár Attila

bonyar@ett.bme.hu

Budapest, 2023.04.19.



BMEETT
ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA TANSZÉK

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS
DEPARTMENT OF ELECTRONICS TECHNOLOGY

Áttekintés

1. Optikai litográfia
2. Röntgen litográfia
3. Elektronsugaras litográfia
4. Ionsugaras litográfia
5. Lézerinterferencia litográfia
6. Nanoimprint litográfia
7. Nano-lift-off litográfia

1. Optikai litográfia

Bevezetés

- Általában UV fényel, klasszikusan 365 - 248 – 193 nm-es források
- A fény diffrakciója miatt korlátozott felbontás

$$d = \frac{\lambda}{2(n \sin \theta)}$$

d : felbontóképesség,
 λ : hullámhossz,
 n : törésmutató,
 $n \cdot \sin \theta$: numerikus apertúra

Trükkök a felbontás növelésére (példák):

- immerziós olaj ($n \sim 1,5$),
- fázistoló maszk alkalmazása (phase shift),
- maszk előtorzítás,
- „lito-friendly” tervezés.

Alternatívák:

- EUV (extreme-UV), $\sim 13,5$ nm
- Röntgen (X-ray) ~ 1 nm
- Elektronsugaras litográfia ~ 15 nm
- Ionsugaras litográfia ~ 15 nm
- Nano imprint ~ 10 nm

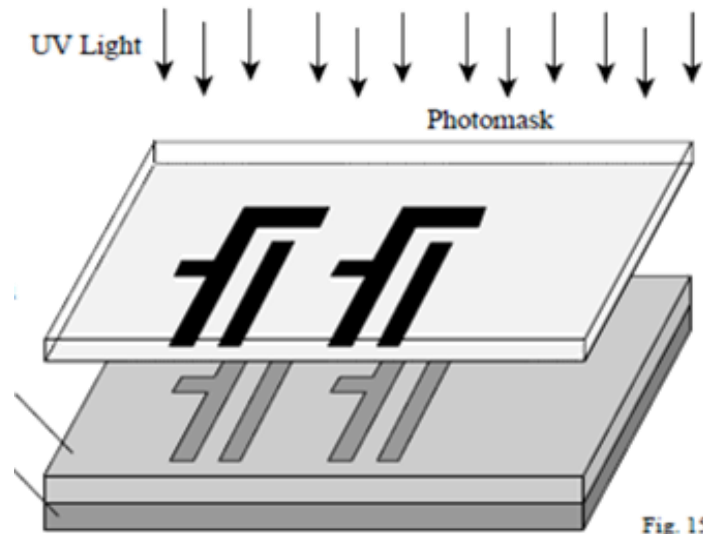
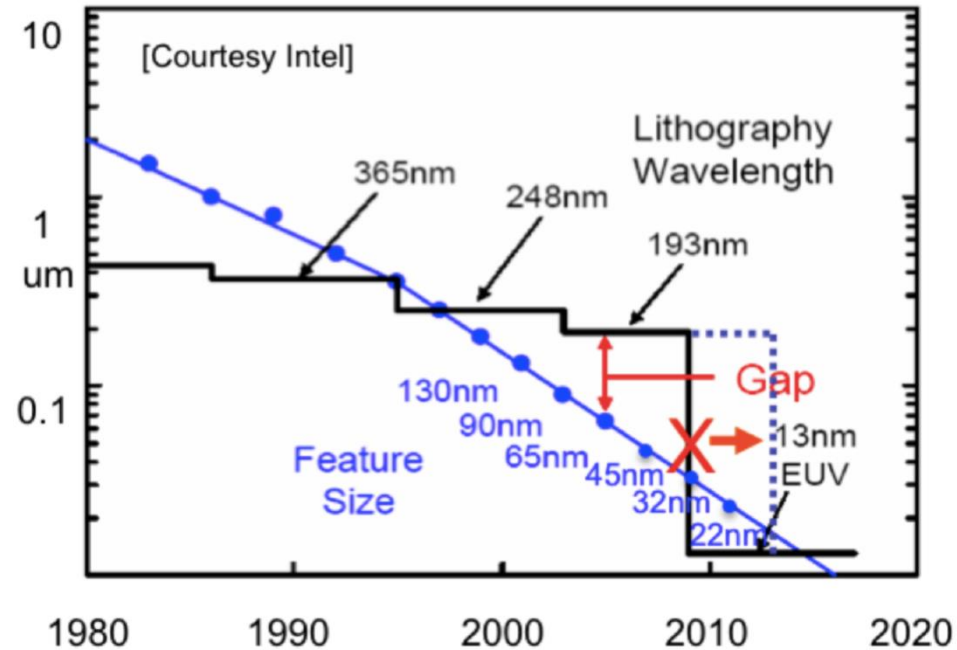


Fig. 150-1



1. Optikai litográfia

UV litográfia

Lehetséges fényforrások:

- higanygőzlámpa, UV vonala kb. 400 nm,
- excimer lézerek (KrF: 248 nm, ArF: 193 nm)
- az optikai elemek speciális anyagúak, amelyek nem nyelnek el az adott hullámhosszon. (pl. kalcium-fluorid)

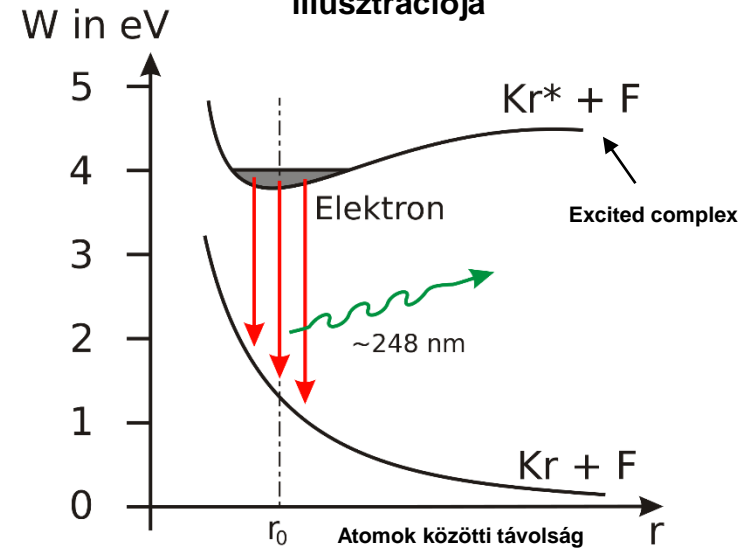
EUV tartomány – lehetőségek és problémák:

Az extrém UV tartomány: 13,5 nm-es hullámhossz (jelenleg 7 nm-es csíkszélességre tesztelik, 2018-2019-re).

Kihívások:

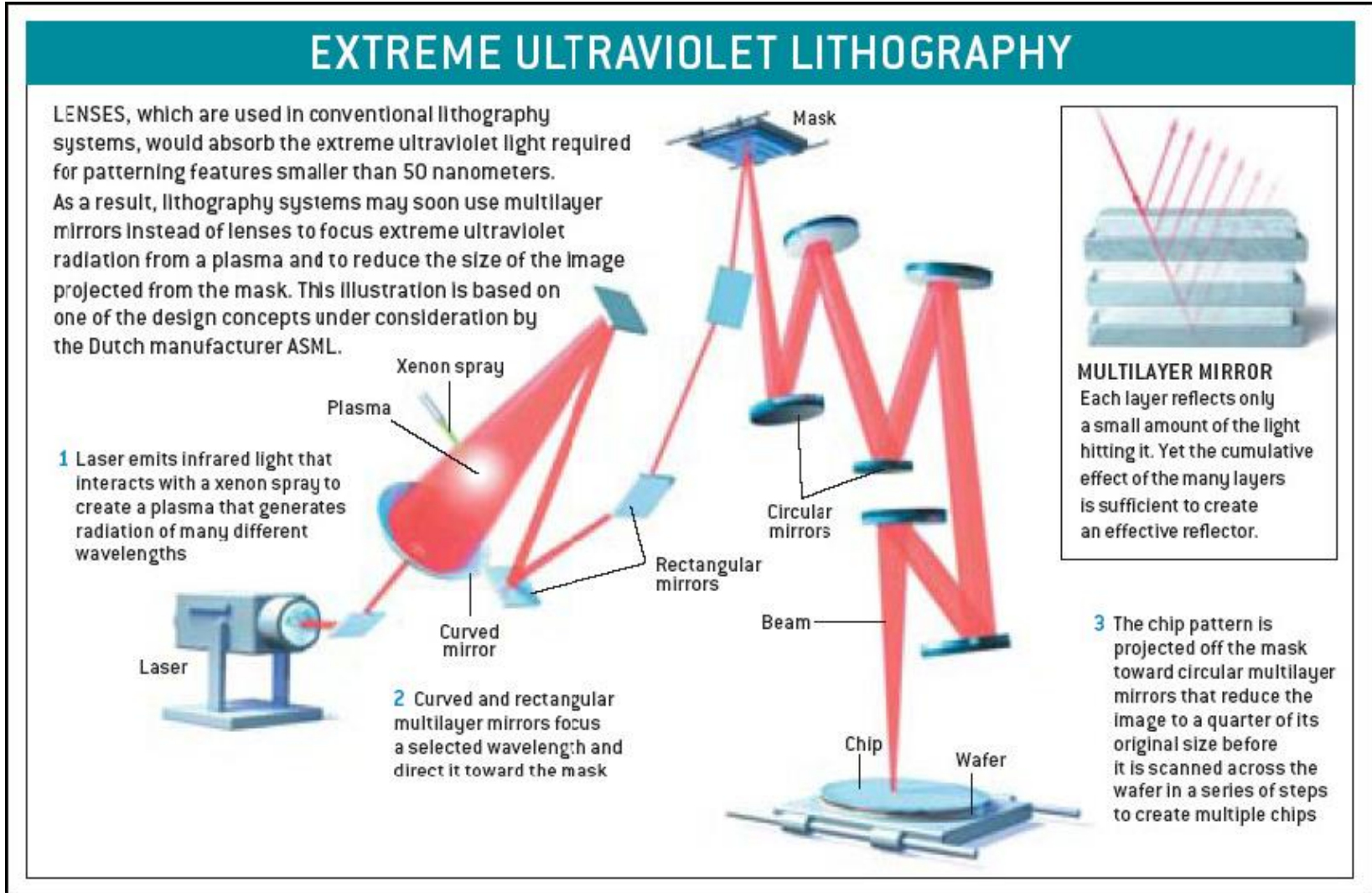
- A szükséges hullámhosszhoz (=foton energiája) többszörösen pozitívan kell ionizálni a forrás atomot (pl. Sn, Xe plazma).
- Ez nagyon energiaigényes (pl. excimer vs. EUV energiaigény 10 kW/2 MW).
- Ezen a hullámhosszon az optikai anyagok elnyelnek, nagyok a veszteségek,
- Nagy energiájú fotonok roncsolhatják az alapanyagot

Excimer laser működésének illusztrációja



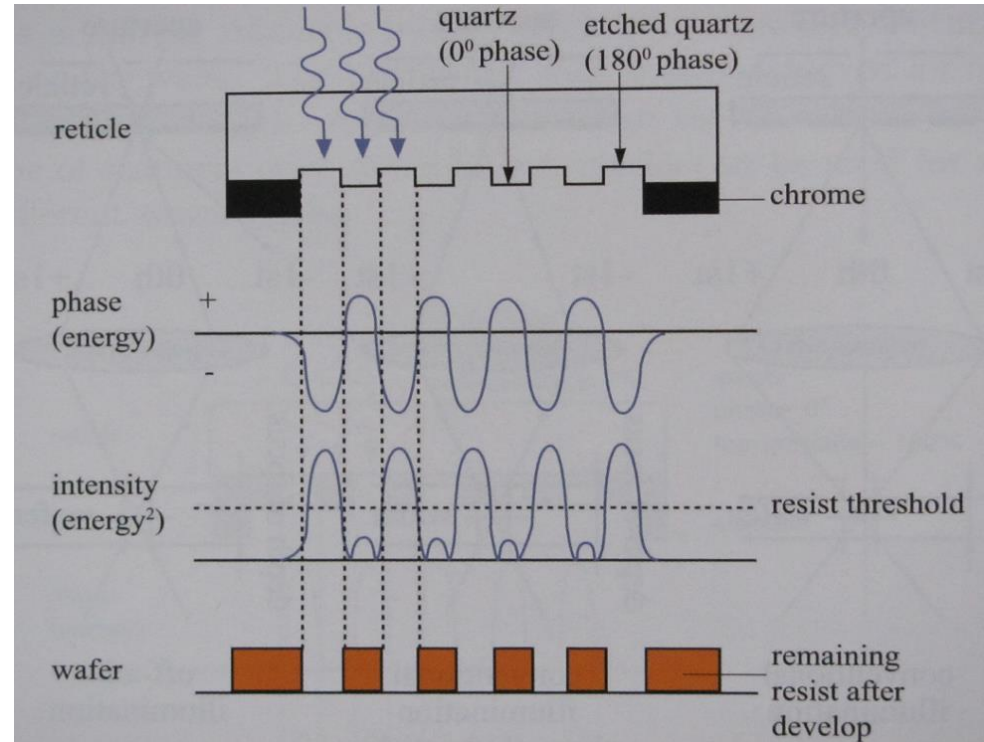
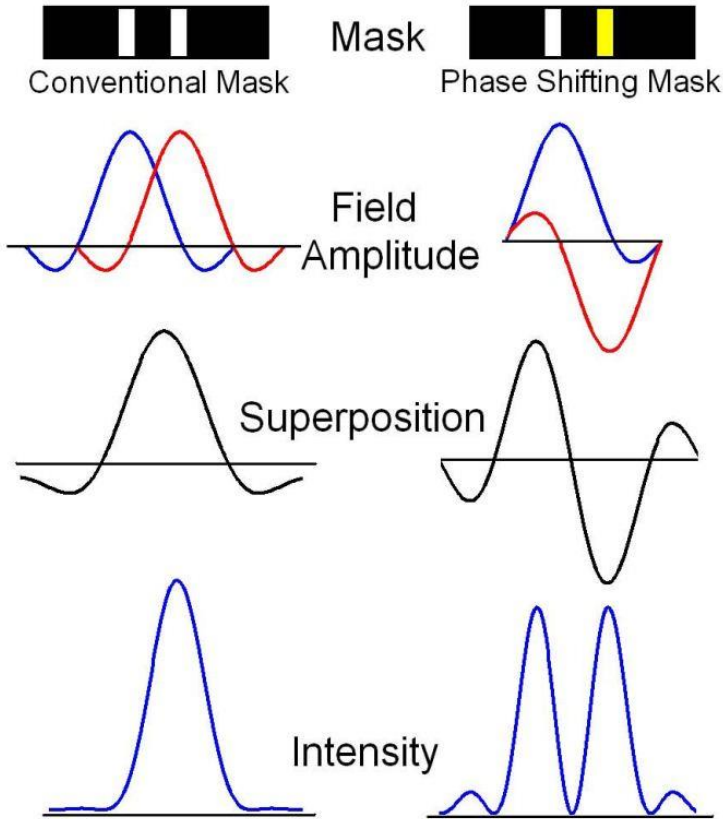
1. Optikai litográfia

EUV litográfia



1. Optikai litográfia

Trükkök a felbontás növelésére 1) fázistoló maszk

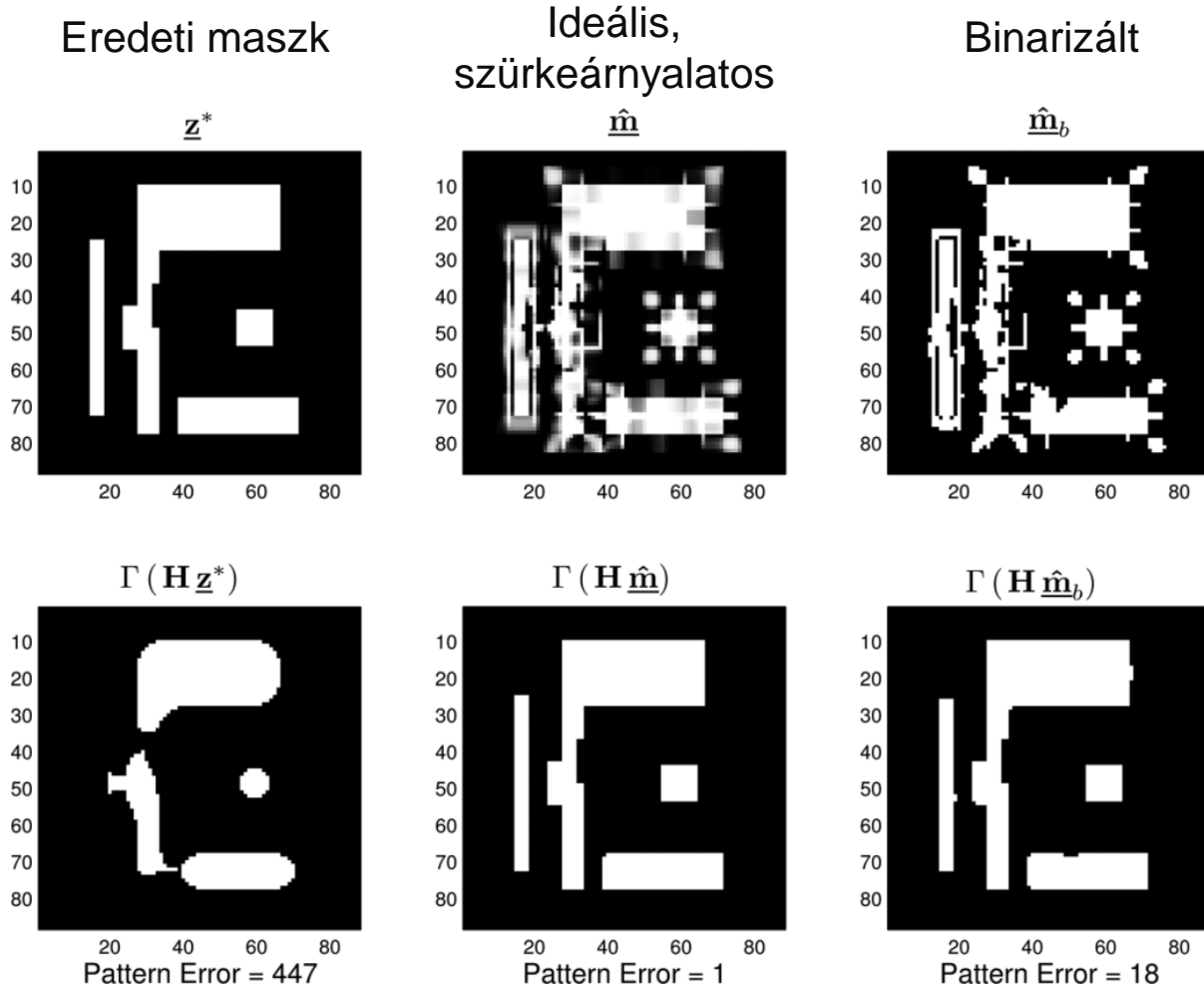


Forrás: J. Mizsei

http://images.anandtech.com/doci/8223/PSM_575px.jpg

1. Optikai litográfia

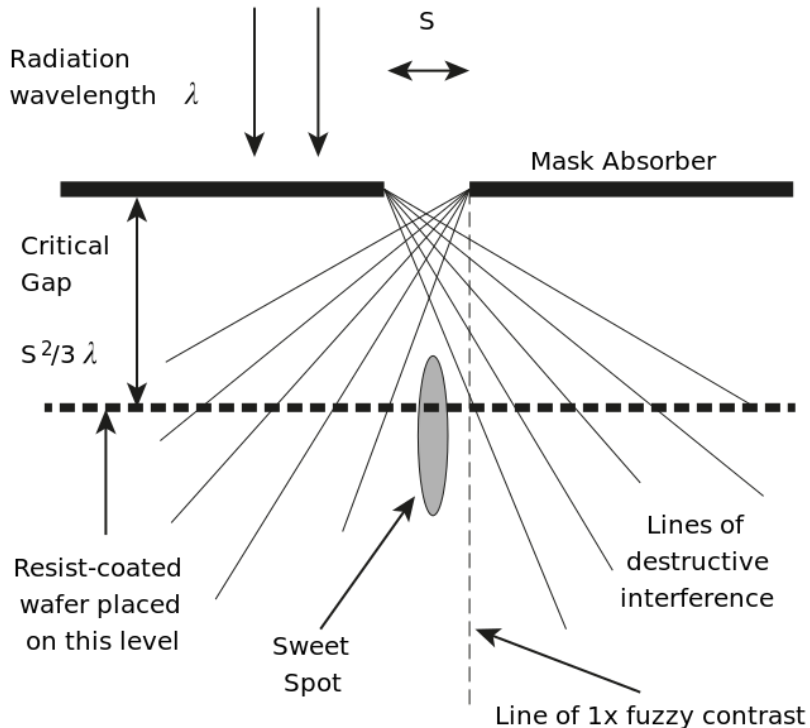
Trükkök a felbontás növelésére 2) maszk előtorzítás



2. Röntgen litográfia

X-Ray lithography, XRL

Transmission from a clear mask feature



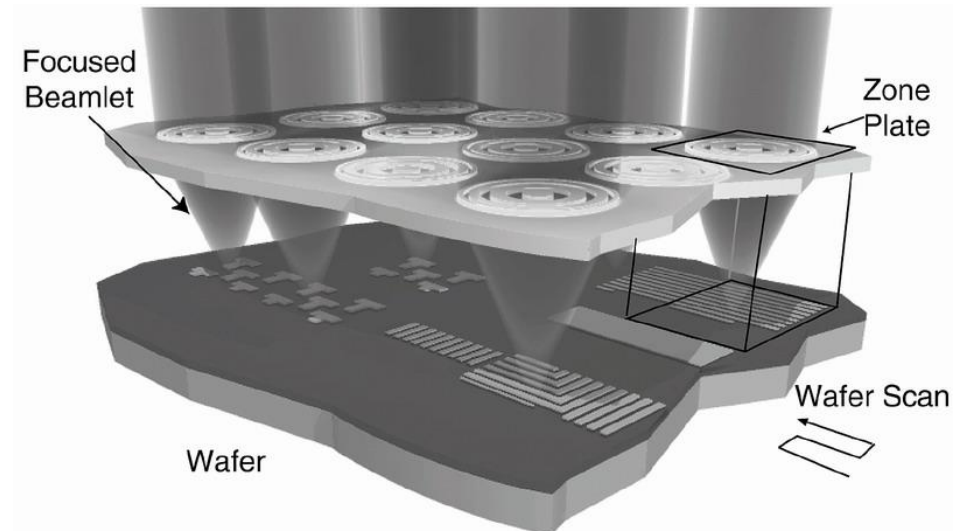
Forrás: Wikipedia

Előnyök:

➤ Rtg foton hullámhossza: $\lambda < 1$ nm,

Problémák:

- Rtg fotonra nézve a törésmutató: $n \sim 1$,
- Reflexiós optika helyett diffraktív optika az előnyösebb,
- Klasszikusan kollimált levilágítás, maszk használata,
- Újabban diffraktív optika (Fresnel zone plates),
- A rezisztben szekunder elektronok keletkeznek, szóródás van, elérhető felbontás ~ 30 nm.



Forrás: www.x-rom.com

3. Elektronsugaras litográfia

Elektronmikroszkópia és litográfia felbontóképessége

Határozzuk meg az elektronmikroszkópia elvi felbontóképességét!

➤ Az elektronok ekvivalens hullmáhossza DeBroglie alapján: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$

➤ Ahol h a Planck állandó, m az elektron tömege. A sebesség (v) kifejezhető a gyorsítófeszültséggel.

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

➤ Tehát elvileg 1 kV gyorsítófeszültséggel $\lambda = 0.0387$ nm.

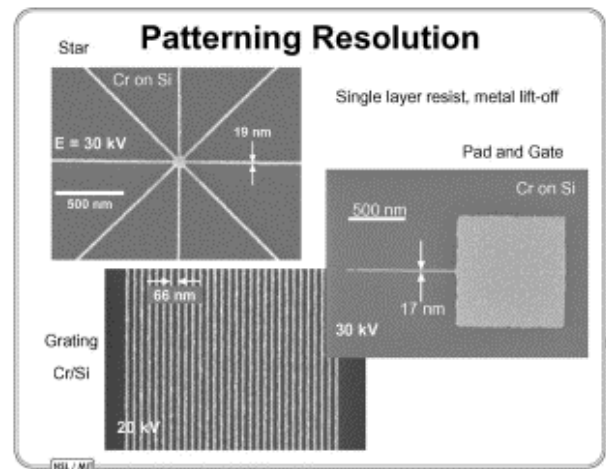
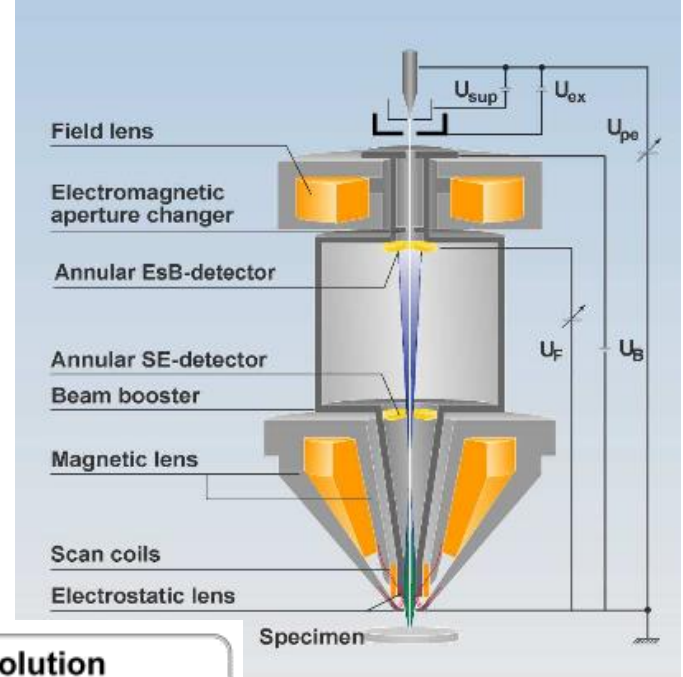
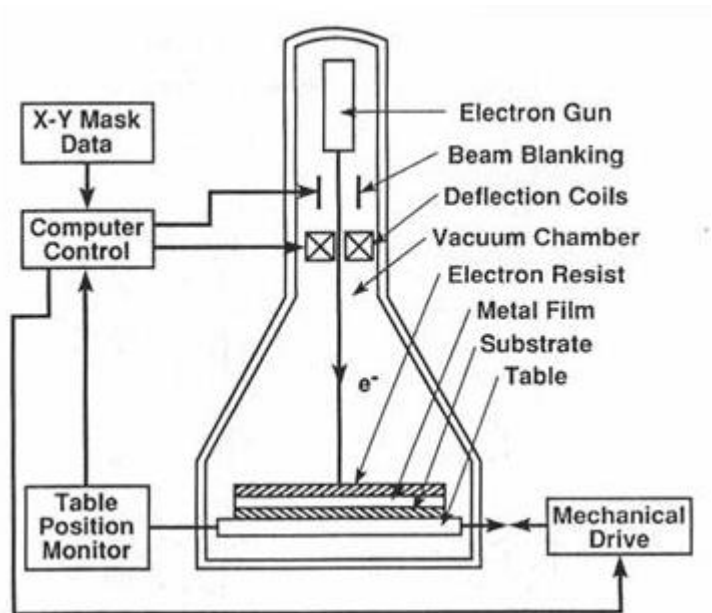
➤ Ebből az **elvi felbontóképesség** számítható, ami az 1-10 pm-es nagyságrendbe esik. Az elektronmikroszkópok technikai tökéletlenségei miatt azonban a tényleges felbontás ennél kb. 1000x rosszabb. Ezek a hibák többek között pl.:

- szférikus aberrációs,
- kromatikus aberráció,
- asztigmatizmus...

3. Elektronsugaras litográfia

Elektronsugaras litográfia – elektronsugaras direktírás

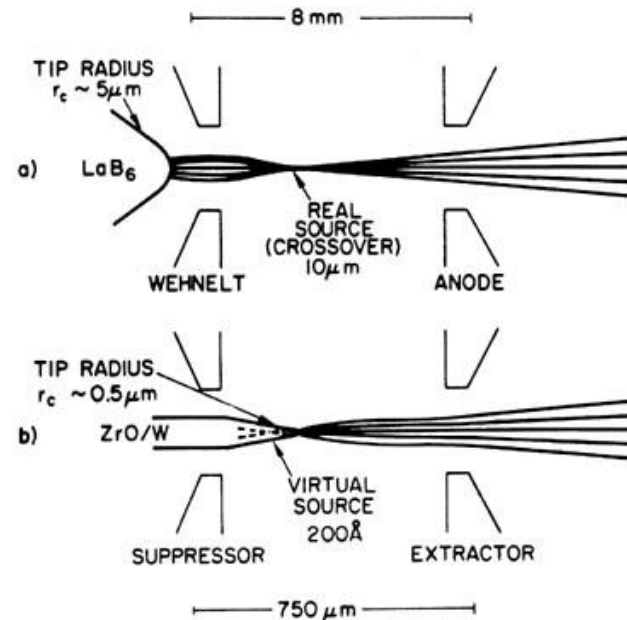
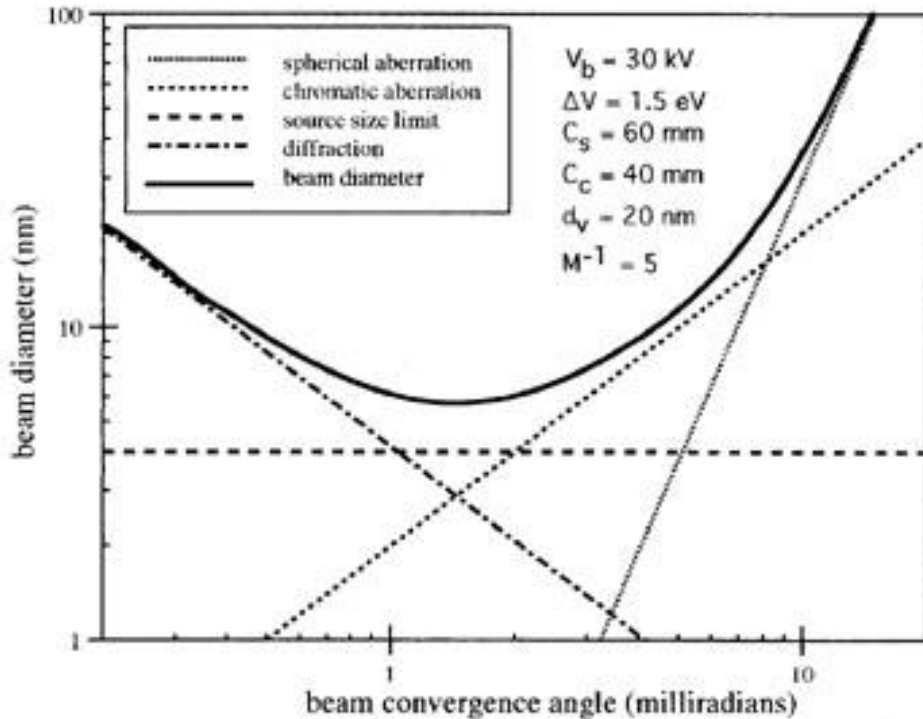
- Az elérhető elvi felbontás az elektronok de-Broglie hullámhosszából számítva pm-es lehetne.
- Ezt korlátozzák a berendezés műszaki adottságai és a fotorezisztben lejátszódó folyamatok:
 - nyaláb kiszélesedés (proximity effect),
 - visszaverődő elektronok expozíciója (back scattering effect).



3. Elektronsugaras litográfia

Elektronsugaras direktírás

Az elektronsugár fókuszálhatóságát befolyásoló elvi és gyakorlati (berendezés által okozott) limitáló tényezők



V_b – gyorsító feszültség,
 ΔV – energia szórás (nyalábé),
 d_v – forrás átmérő,
 C_s – szférikus aberrációs együttható,
 C_c – kromatikus aberrációs együttható,
 M^{-1} – kicsinyítés (demagnification) mértéke.

Forrás: SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication

3. Elektronsugaras litográfia

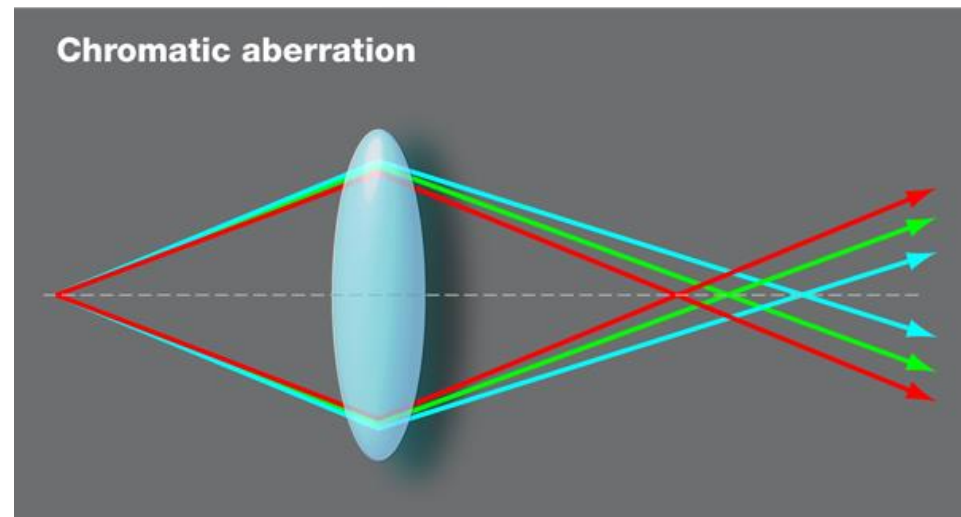
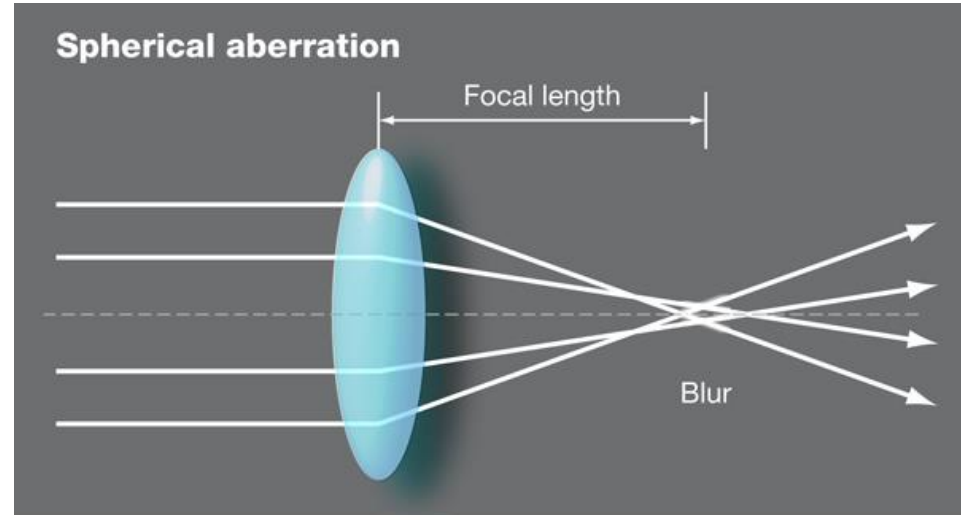
A felbontóképesség korlátai

Szférikus aberráció:

A lencse optikai tengelyétől nagyobb távolságra beeső párhuzamos nyalábokat a lencse különböző fókusz távolsággal képezi le. A lencse szélein megváltozik a törési szög.

Kromatikus aberráció:

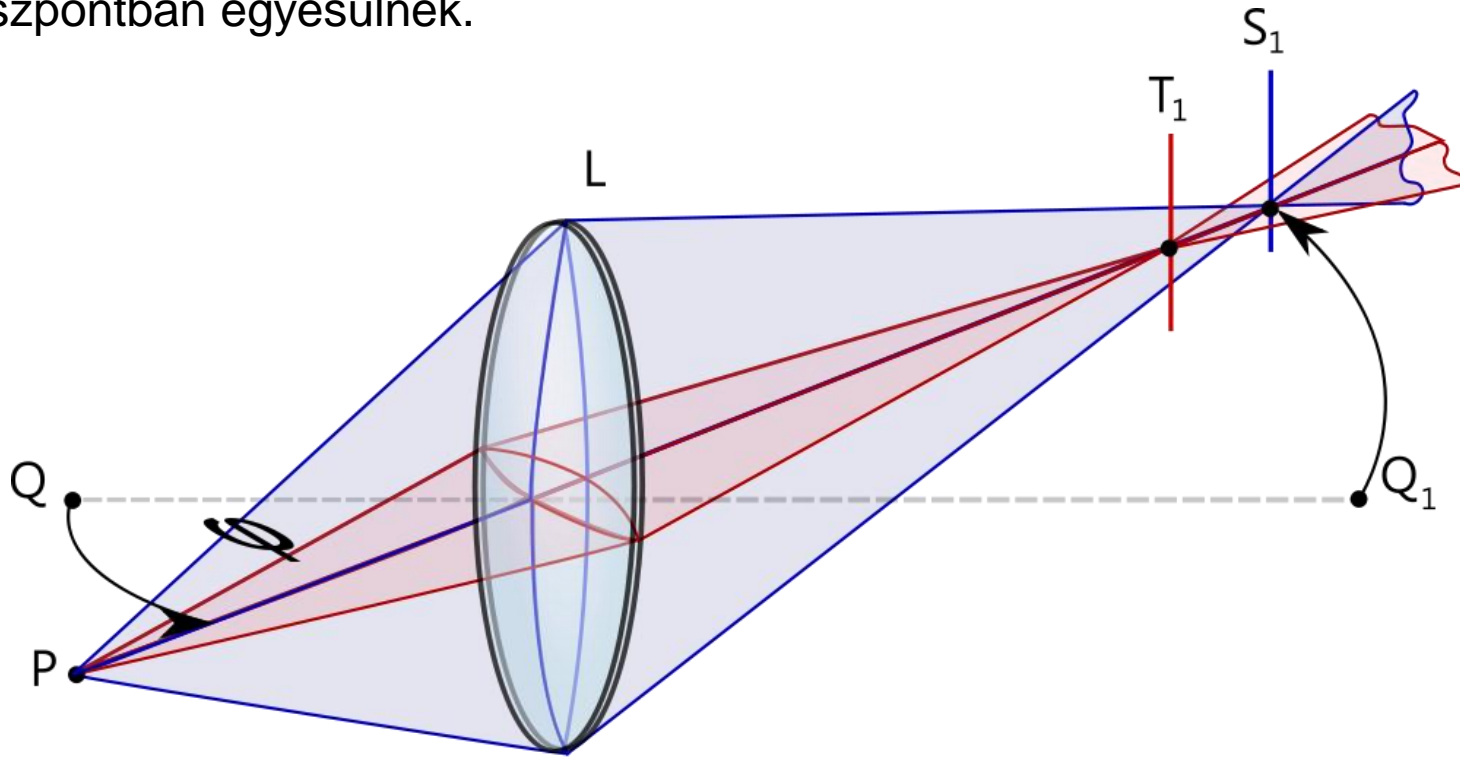
A lencsére azonos pontba érkező, de különböző hullámhosszú nyalábokat a lencse különböző fókusz távolsággal képezi le. Oka az lencse törésmutatójának függése a hullámhossztól.



3. Elektronsugaras litográfia

A felbontóképesség korlátai

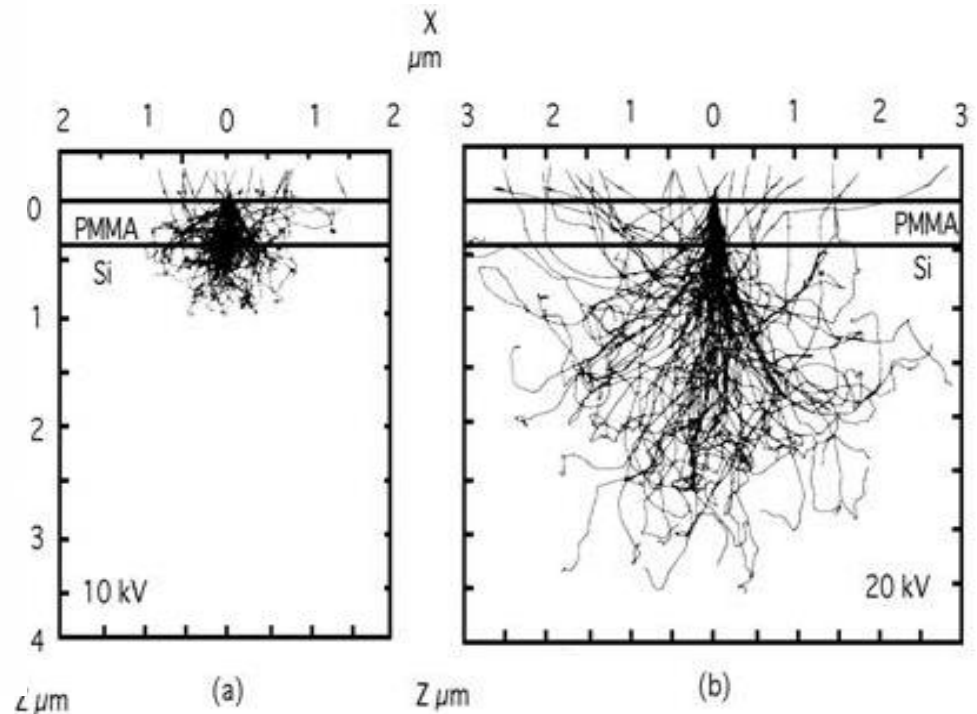
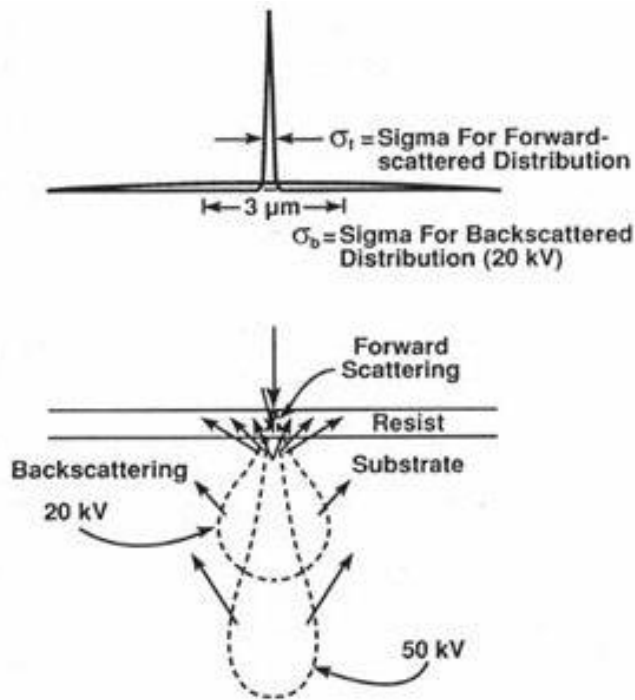
Asztigmatizmus: A lencse optikai útra merőleges két tengelye mentén a fókuszpontok eltérnek. A viszonylag távol elhelyezkedő tárgypontról kiinduló függőlegesen haladó nyalábok és a vízszintesen haladó nyalábok eltérő fókuszpontban egyesülnek.



3. Elektronsugaras litográfia

A felbontóképesség korlátai

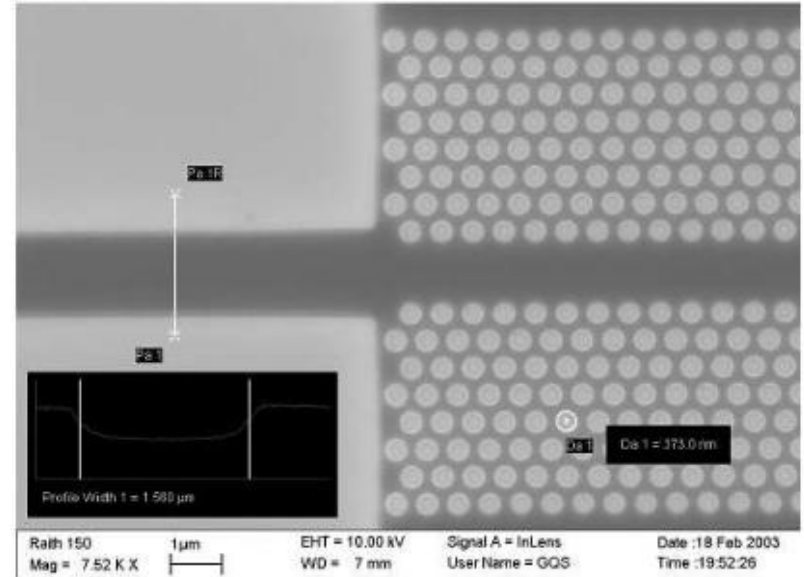
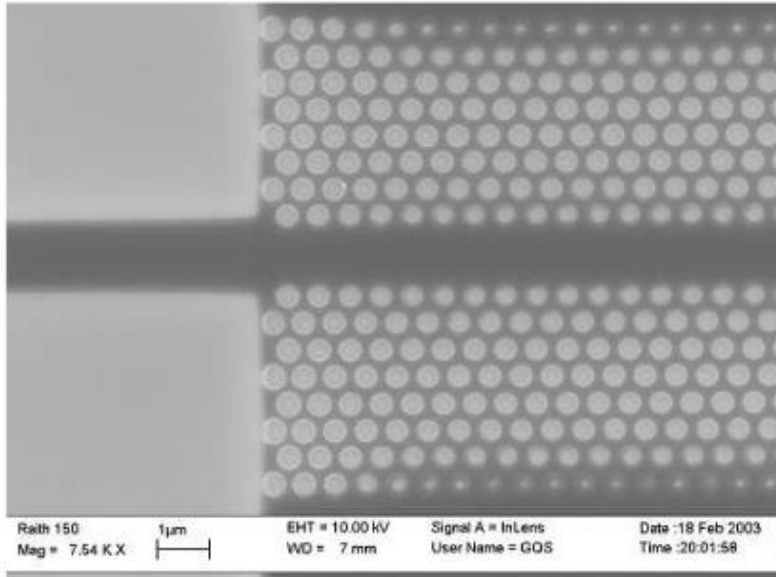
- **Nyaláb kiszélesedés** (proximity effect): a rezisztben az elektron ütközik, szóródik, a kiexponált vonalszélesség lényegesen nagyobb lehet a beállított fókusznál.
- **Visszaverődő elektronok expozíciója** (back scattering effect): a hordozóról, alaplemezről visszaszórt elektronok szintén exponálják a rezisztet (függ a rendszámtól).
- Nagyobb energia -> kisebb szóródási hatáskeresztmetszet a rezisztben.



3. Elektronsugaras litográfia

A felbontóképesség korlátai

➤ A proximity effect illusztrálása



Fotonikus kristály példa:

Fent: a proximity effect hatása

Jobb: intenzitás korigált mintázat

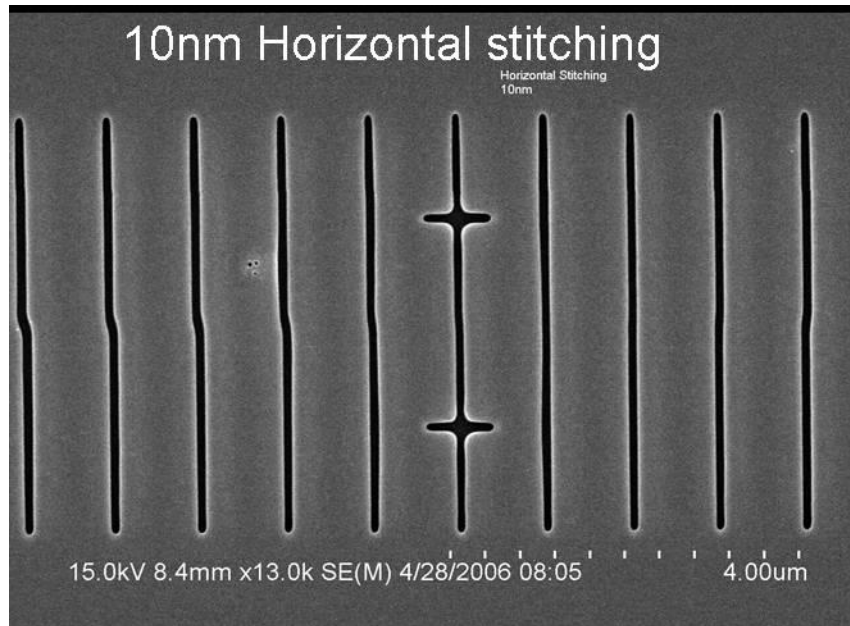
Jobb-fent: a javított alakzat.



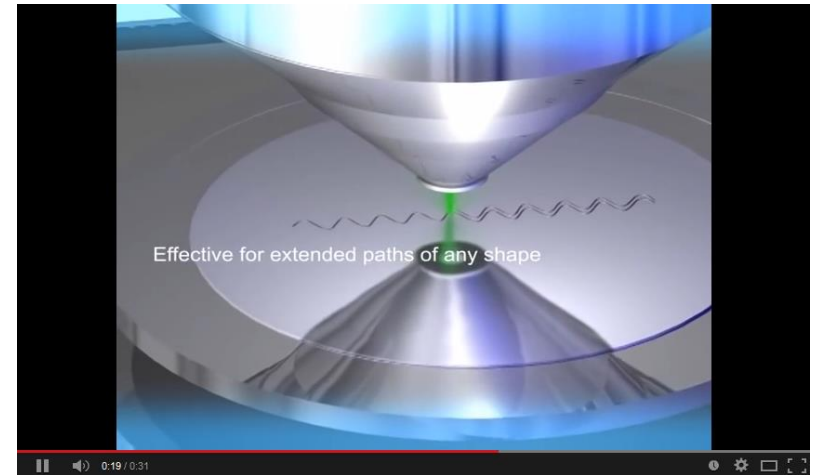
3. Elektronsugaras litográfia

A felbontóképesség korlátai

- Az illesztési hibák (stiching) és kiküszöbölésük



- A képmozgató illesztésénél léphetnek fel, nagyobb mintázandó alapterület esetén.
- Megoldás a stage mozgatása írás közben.
- Continuous writing mode.



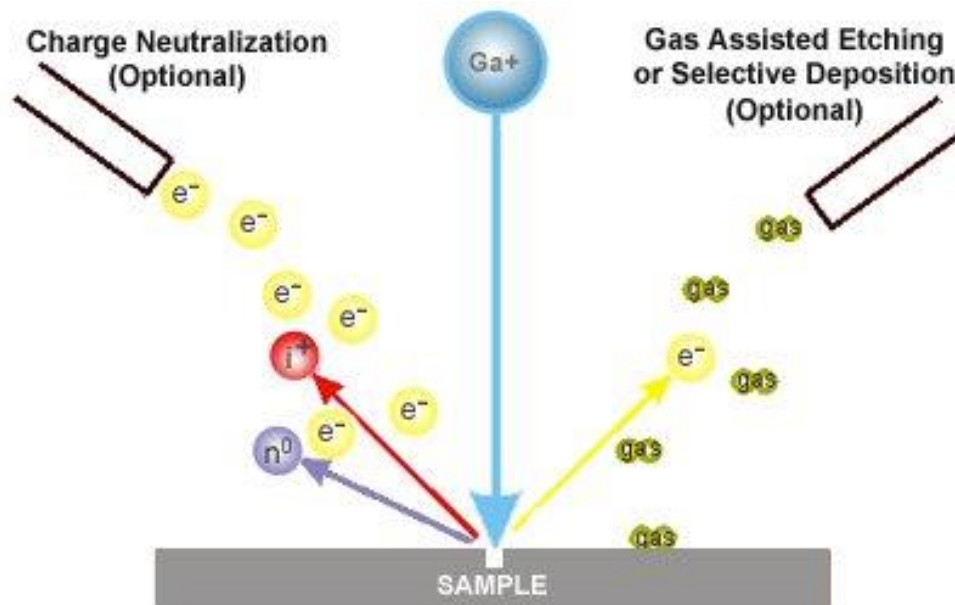
Raith Traxx rendszer

www.youtube.com/watch?v=hTTquStsC24

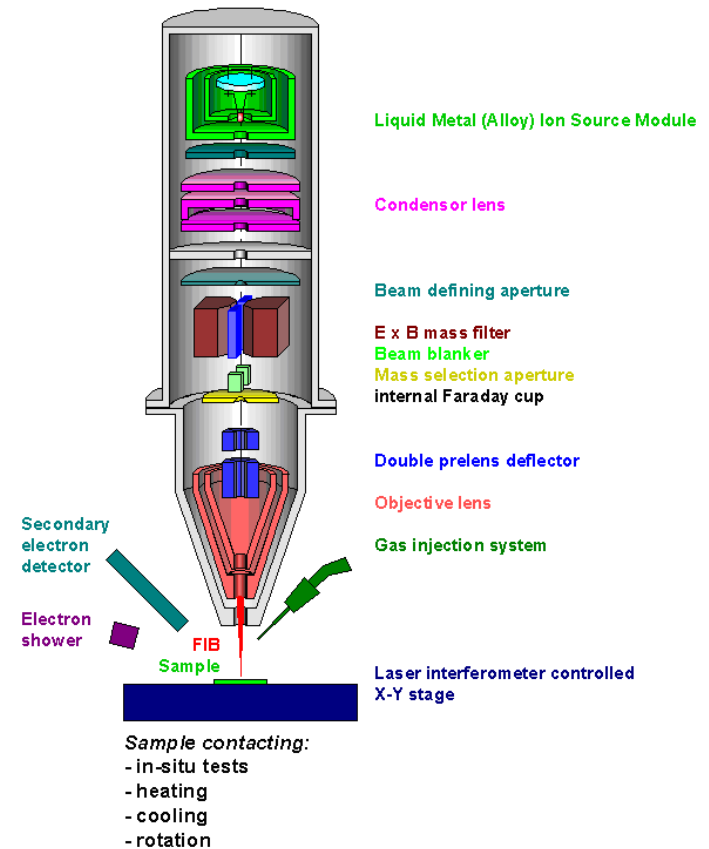
4. Ionsugaras litográfia

Ionsugaras litográfia és a FIB (Focused Ion Beam)

- keresztmetszet készítése (TEM mintákhoz is),
- változatos alakzatok kialakítása, fúrás,
- szelektív direktírás gáz fázisból,
- képalkotáshoz is használható (szekunder elektronok révén).

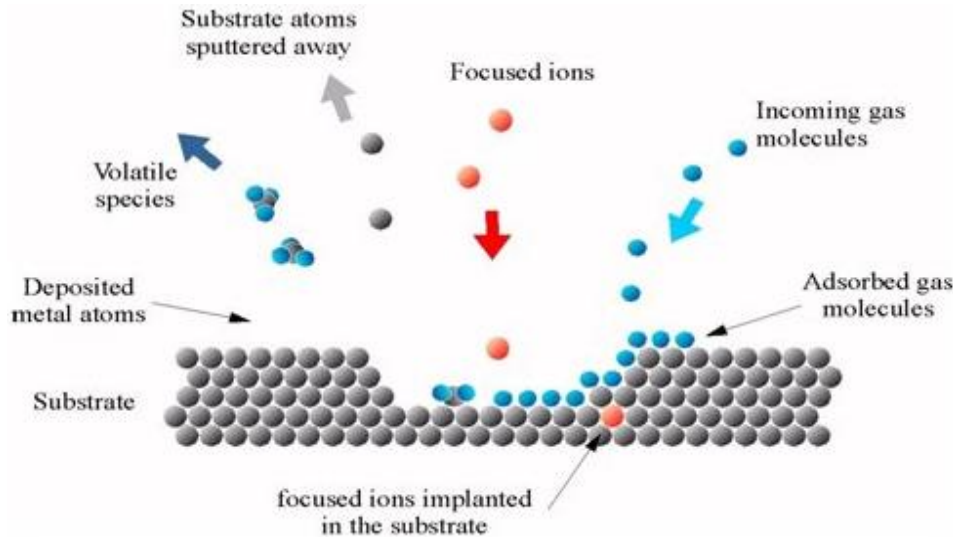


Ion Optical Column CANION 31Mplus

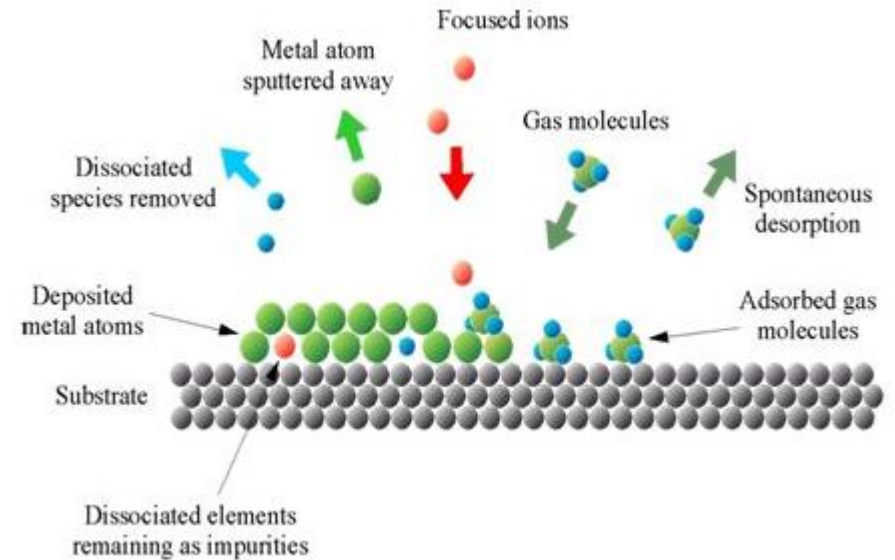


4. Ionsugaras litográfia

Gáz segítette marás és leválasztás



1. Adsorption of the gas molecules on the substrate
2. Interaction of the gas molecules with the substrate
Formation of volatile and non volatile species
3. Evaporation of volatile species and sputtering of non volatile species



1. Adsorption of the precursor molecules on the substrate
2. Ion beam induced dissociation of the gas molecules
3. Deposition of the material atoms and removal of the organic ligands

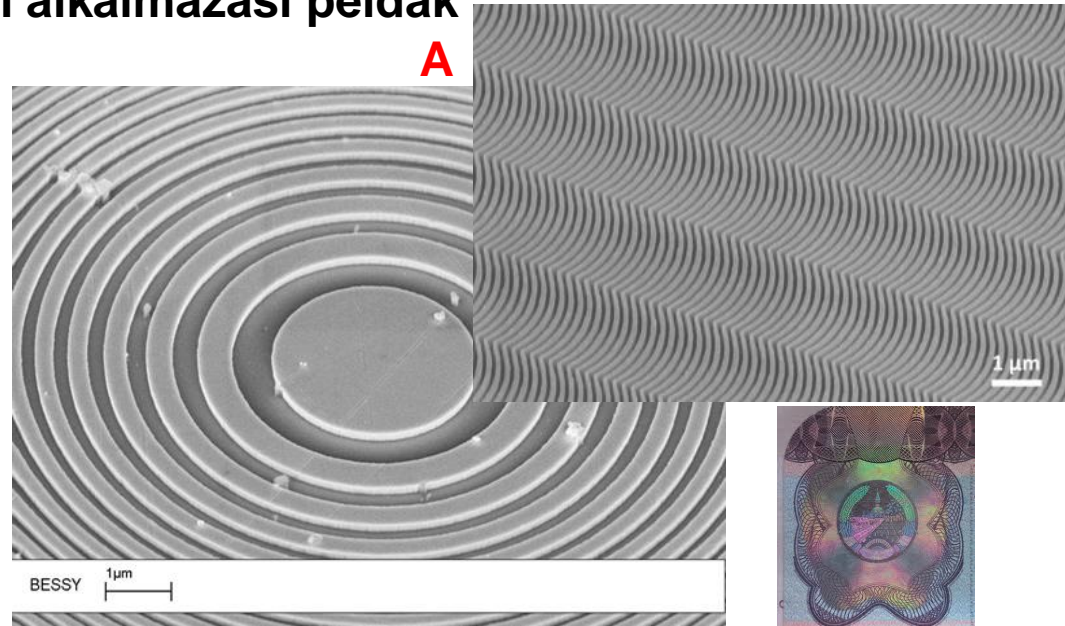
Forrás: Wikipedia

4. Ionsugaras litográfia

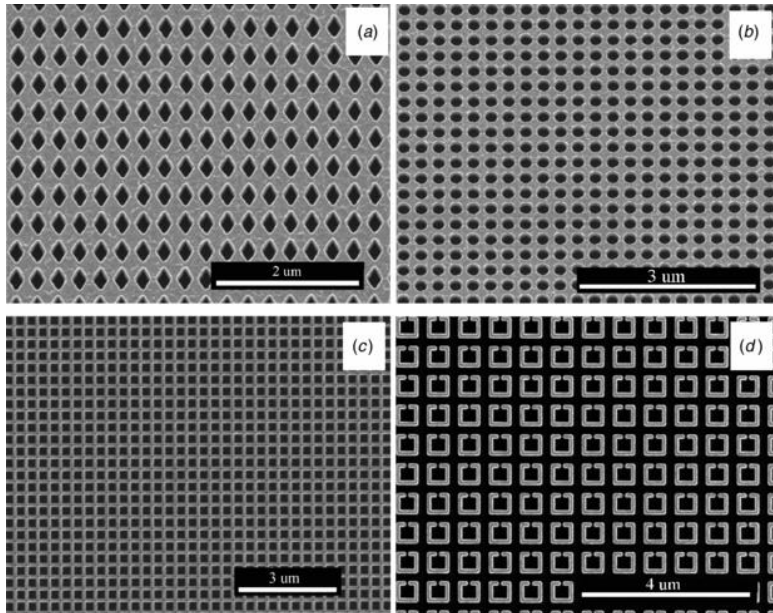
Elektron- és ionsugaras litográfiai alkalmazási példák

- A) Diffrakciós rácsok
- B) Plazmonikus rácsok
- C) Mikrofluidikai keverő

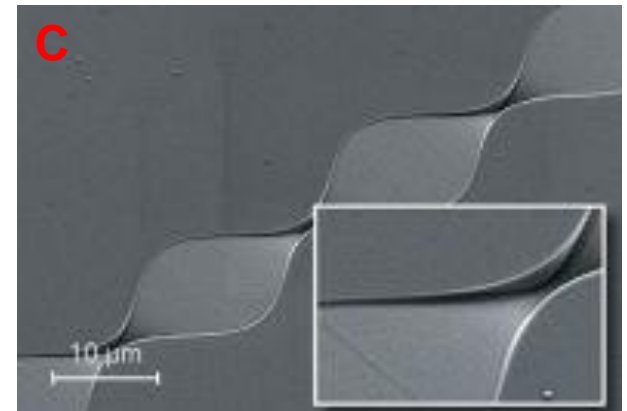
A



B



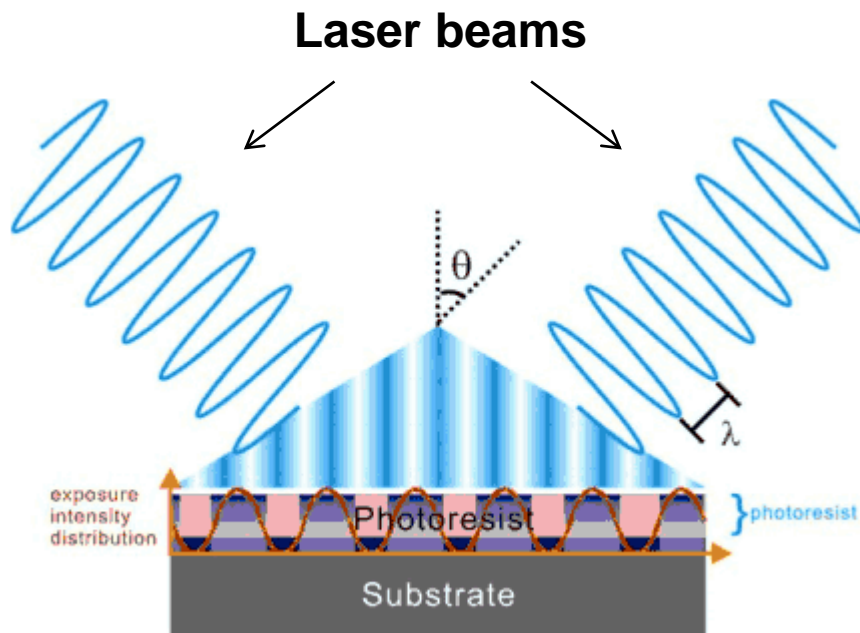
C



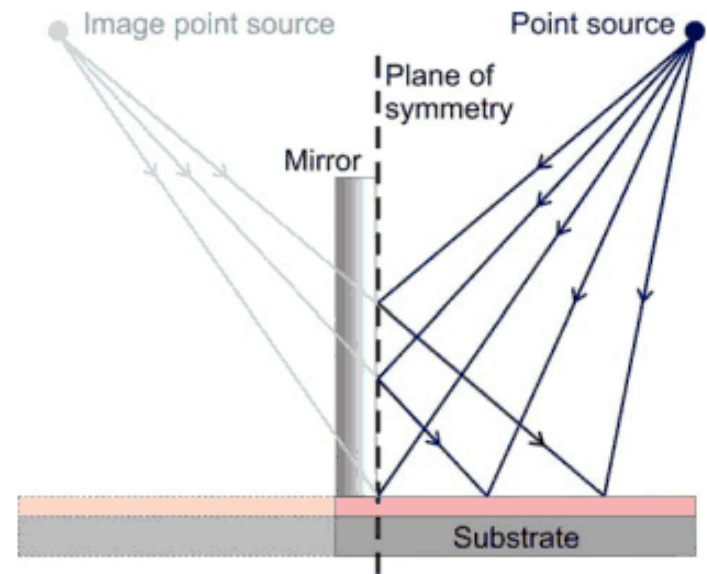
5. Lézerinterferencia litográfia

Nanovezetékek létrehozása lézerinterferenciás litográfiával

Kiindulás: pl. arany vékonyréteg üveghordozón



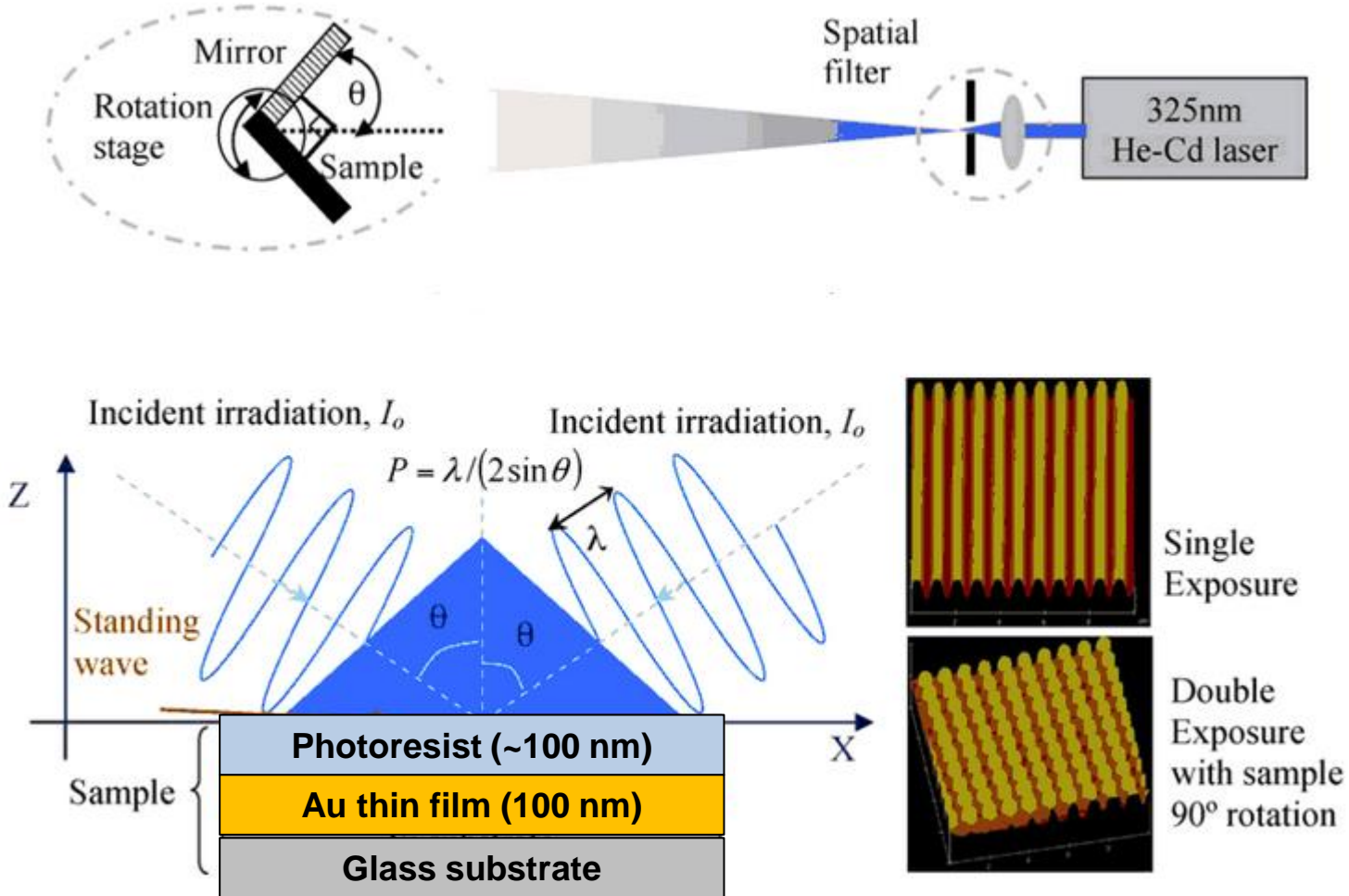
Két koherens fénycsugár interferenciája és a rezisztben kialakuló állóhullám mintázat



Lloyd tükör-rendszerének sematikus illusztrációja és összehasonlítása a Mach-Zehnder interferométerrel

5. Lézerinterferencia litográfia

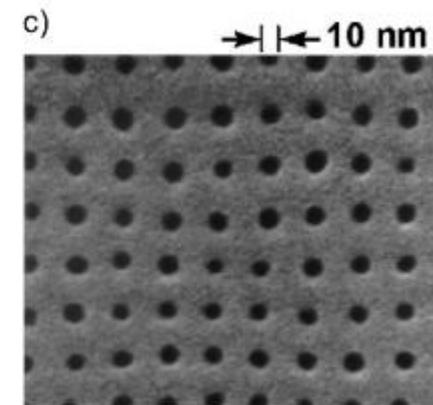
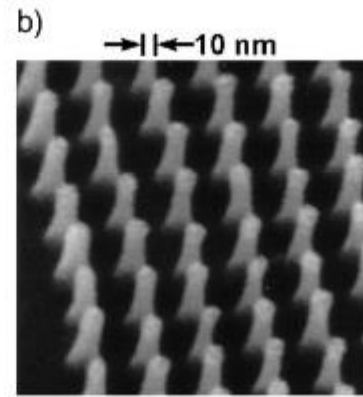
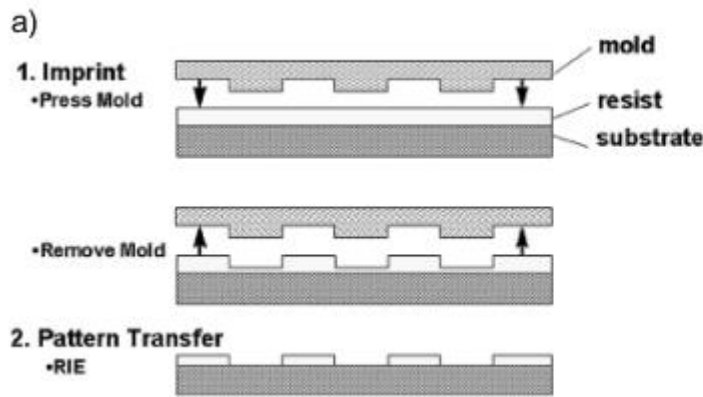
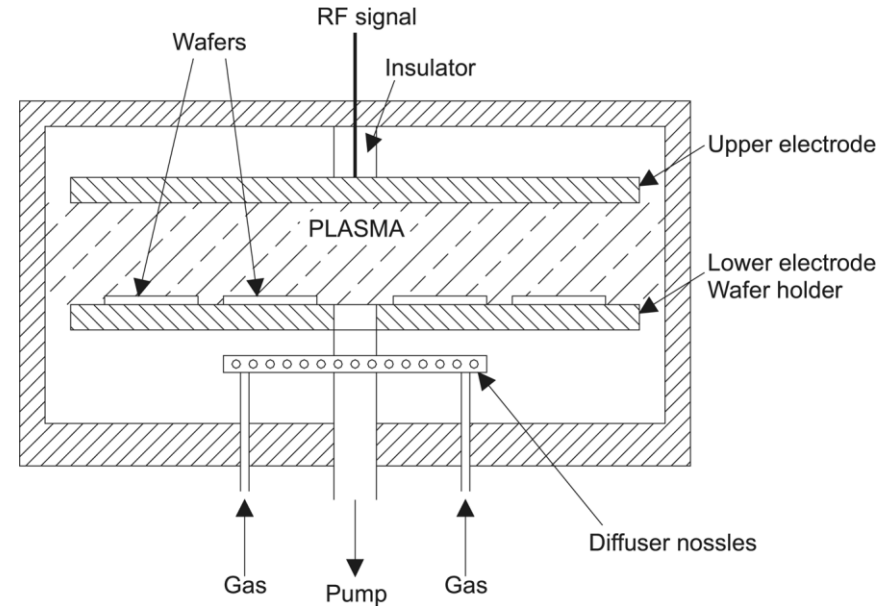
Nanovezetékek létrehozása lézerinterferenciás litográfiával



6. Nanoimprint litográfia

Nanoimprint litográfia (NIL)

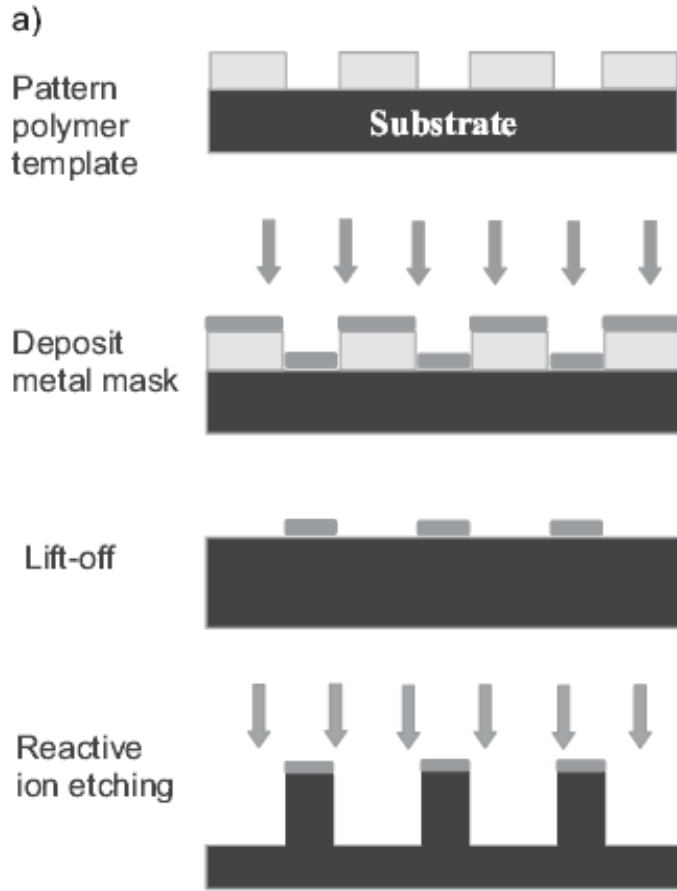
- Kiinduláshoz egy kemény öntőformát használunk (pl. szilícium), amin előzetesen nanostruktúrákat alakítunk ki.
- A kemény öntőformát egy puha polimerbe nyomjuk, amit kontrollált nyomáson és hőmérsékleten kikeményítünk.
- A visszamaradó anyag és a struktúrák élesítése érdekében RIE utókezelés (Reactive Ion Etching)



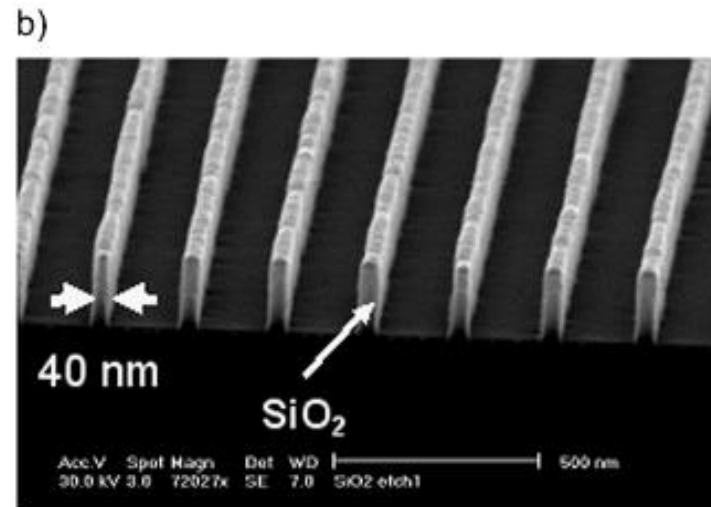
a) A NIL folyamata, b) a kemény maszk SEM képe, c) a PMMA-ban létrehozott mintázat (polimetilmetakrilát)

6. Nanoimprint litográfia

Az öntőforma kialakítása



- a felületre polimer alapú maszkot viszünk fel spin-coatinggal,
- a polimer maszkban kialakítjuk a mintázatot (pl. elektronsugaras litográfiával)
- fém leválasztása (maszknak), majd lift-off technika,
- Si kimarása RIE technológiával.

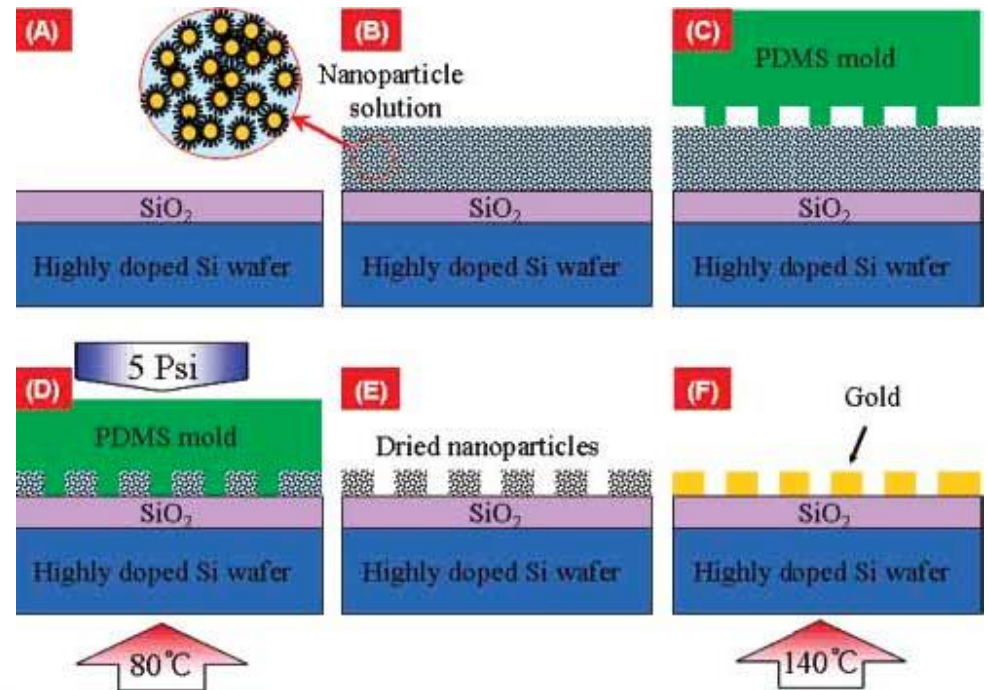


a) Az öntőforma kialakításának folyamata. b) SiO₂-ből kialakított mintázat SEM-es képe.

6. Nanoimprint litográfia

Nanoimprint PDMS segítségével

- **PDMS:** Poldimetilsziloxán
- változatos alkalmazása lehetséges,
- pozitívként és negatívként is,
- transzfer technológia,
- biomolekulák beültetése (stamping).



1 The PDMS stamp is inked with a solution consisting of organic molecules called thiols and then pressed against a thin film of gold on a silicon plate.

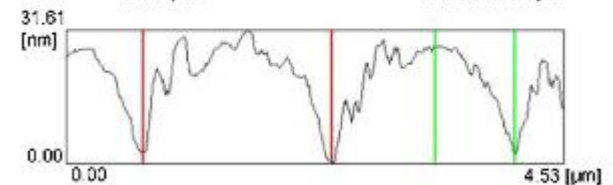
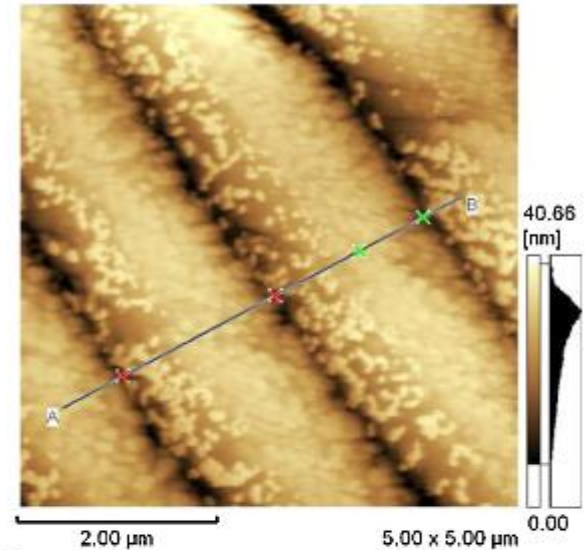
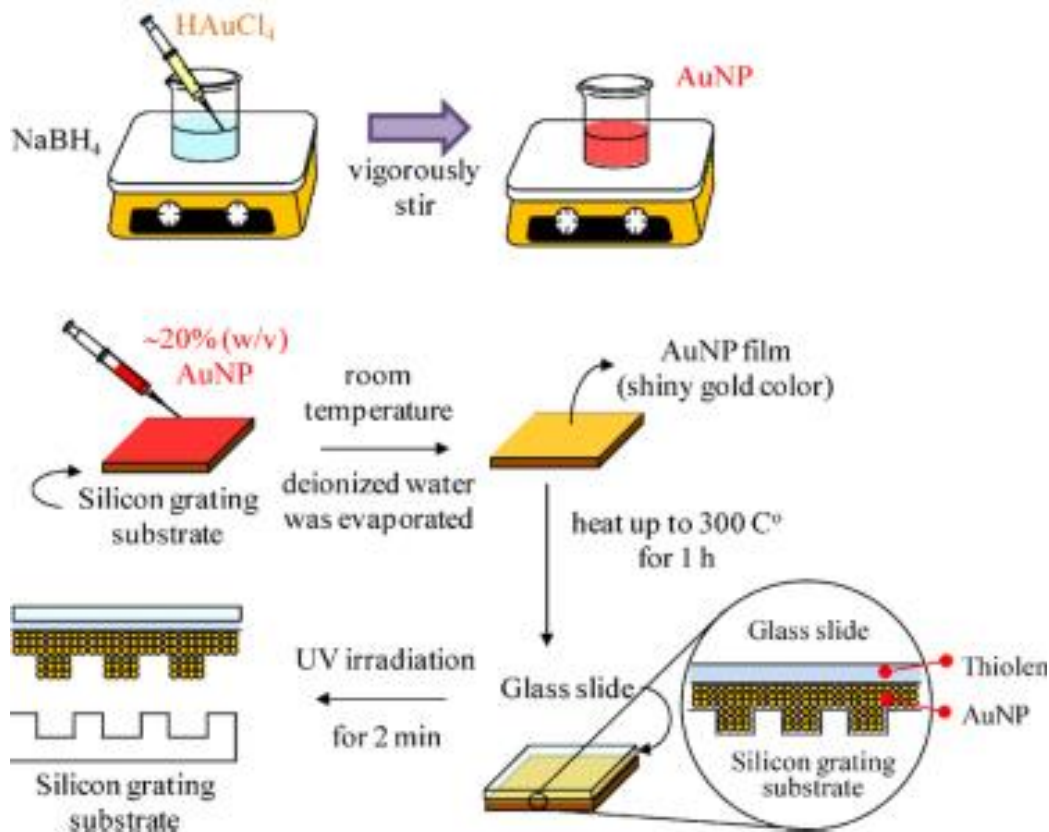
2 The thiols form a self-assembled monolayer on the gold surface that reproduces the stamp's pattern; features in the pattern are as small as 50 nanometers.



6. Nanoimprint litográfia

Arany vezetékek létrehozása nanorészecskékből, transzfer technológiával

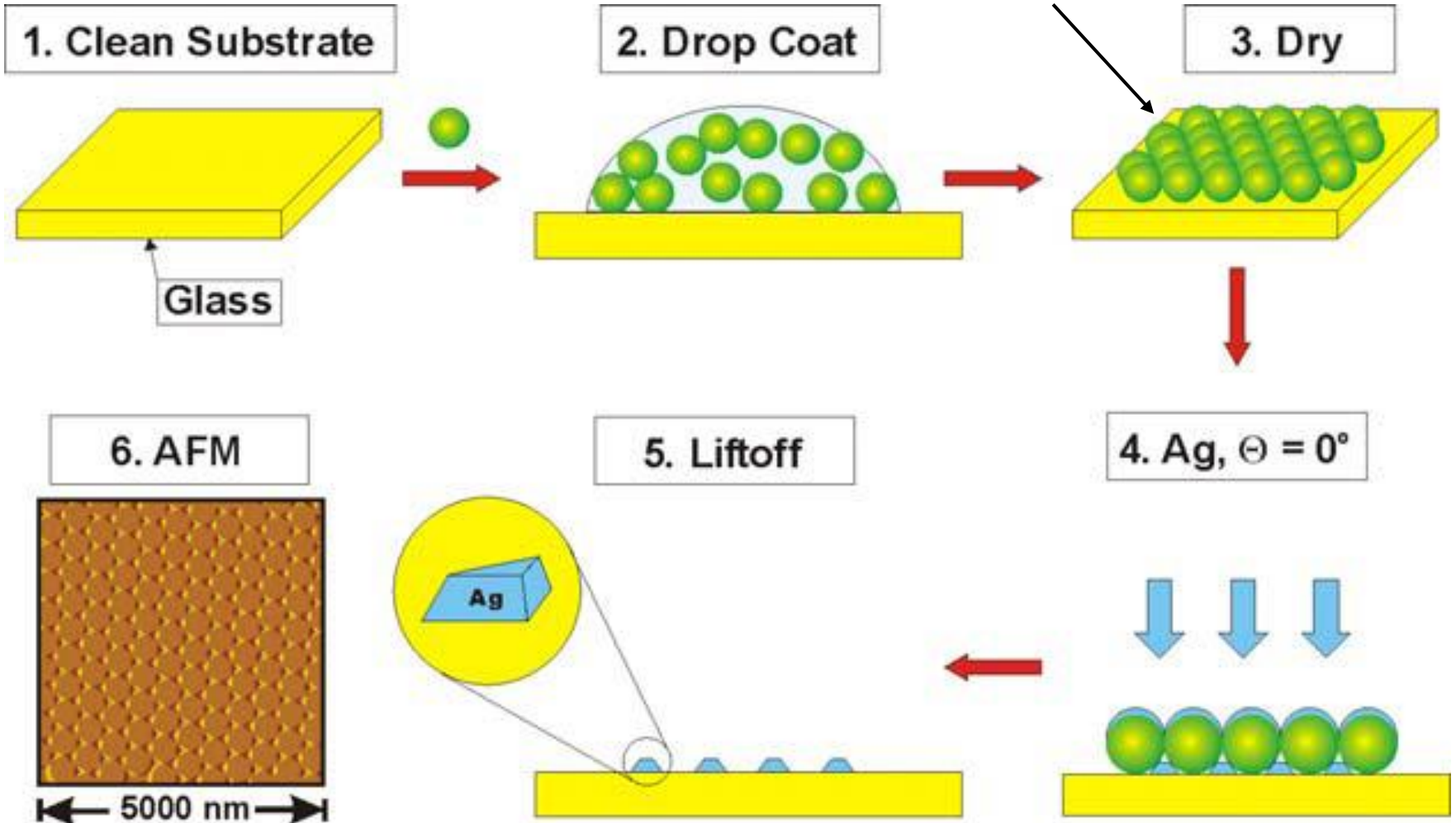
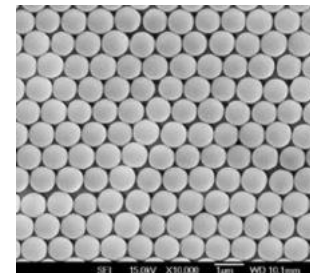
Arany nanorészecskék + formázás + hőkezelés.



| | Distance (μm) | High (nm) | Angle ($^\circ$) |
|---|----------------------------|-----------|--------------------|
| — | 1.72 | 2.21 | 0.07 |
| — | 0.73 | 25.38 | 2.00 |

7. Nano-lift-off litográfia

Litográfia nanorészecskék segítségével



Forrás: J. Mizsei

Ellenőrző kérdések:

1. Ismertesse az elektromágneses sugárzás (fény) diffrakciójából adódó Rayleigh féle felbontóképesség korlátot. Milyen lehetőségek vannak a felbontóképesség növelésére EM hullám alkalmazásával?
2. Mekkora egy elektronmikroszkóp elvi felbontóképessége? Milyen berendezésből adódó tényezők limitálják ezt a gyakorlatban? Elektronsugaras litográfia esetén milyen további felbontóképességet limitáló hatásokat kell figyelembe vennünk?
3. Mik az atomerő mikroszkópia és litográfia fő limitáló tényezői?
4. Ismertesse az alábbi litográfiai technológiát (előny, hátrány, felbontóképesség stb.), UV litográfia, EUV litográfia, X-Ray litográfia, elektronsugaras litográfia, ionsugaras litográfia (gáz segített marás/leválasztás), lézerinterferencia litográfia, nanoimprint litográfia, nano-lift-off litográfia.