

NANO



MIKRO- ÉS NANOTECHNIKA II

Dr. Pődör Bálint

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

4. ELŐADÁS: ELEKTRON- ÉS IONSUGARAS NANOMEGMUNKÁLÁS



2012/2013 tanév 1. félév

1

4. ELŐADÁS: ELEKTRON- ÉS IONSUGARAS NANOMEGMUNKÁLÁS

1. Elektronsugaras litográfia
2. Elektronsugaras nanomegmunkálás és leválasztás
3. Inonugaras nanomegmunkálás

(D. Brüggemann: Electron and ion beam lithography, nanoengineering (EuroTraining Course Nanotechnology for Electronics, Budapest 2010. június 14-15) előadása, Tóth Attila Lajos LEO 1540 XB Nanomegmunkáló rendszer c. előadása, Biró László Péter, EuroNanoForum, Budapest, 2011, és Ratter Kitti (ELTE) Fókuszált ionsugaras megmunkálás (előadás 2011) anyagainak felhasználásával.)

2

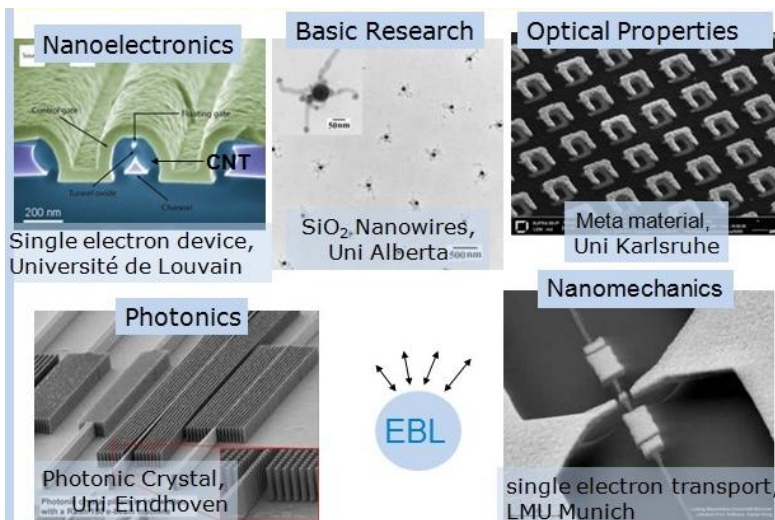
ELEKTRONLITOGRÁFIA ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY, EBL

Az elektronlitográfias készülék lényegében egy olyan elektronmikroszkóp, melyben az elektronnaláb kívülről vezérelve mozgatható. Az eljárást korábban elsősorban az ultraibolya (UV) és a távoli ultraibolya fénnel ($\lambda = 0,2-0,3 \mu\text{m}$) történő litográfias eljárások során alkalmazott fotomaszkok előállítására használták. Ez az eljárás a diszkrét és monolitikus mikrohullámú eszközök előállításában ma már a közvetlen technológia része lett.

Másik, és egyre fontosabbá váló alkalmazási területe a nanoszerkezetek és nanoeszközök kialakítása a nanolitográfia révén.

3

ALKALMAZÁSOK: NANOESZKÖZÖK



Elektron sugaras litográfia (Electron Beam Litography, EBL):
Nanostruktúrák és nanoeszközök kialakítása

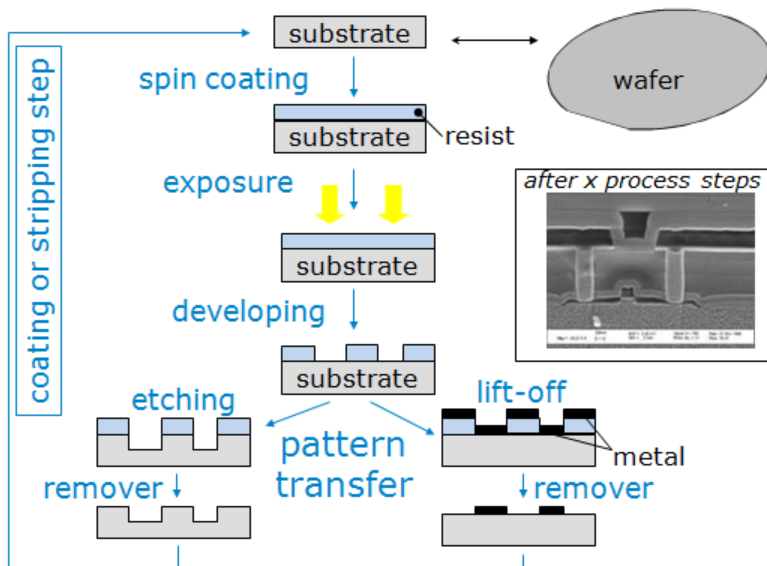
4

ELEKTRONLITOGRÁFIA

Megfelelő elektronoptikai lencsékkel az elektronnyaláb a félvezetőszelet felületére fókuszálható. Az elektronnyaláb eltérítését számítógéppel vezérelt eltérítőtekercek végzik, így megfelelő program révén a kívánt rajzolat előállítható. A minta eső elektronsugár által keltett visszaszórt elektronokat összegyűjtik, így egyúttal a minta pásztázó elektronmikroszkópos képe is megjeleníthető. A minta helyzetét igen nagy pontossággal kell érzékelni és szabályozni; az előbbi elvégezhető pl. egy lézer-interferométer segítségével. Az elektronlitográfia termelékenysége általában kisebb, mint a fotolitográfiaé, ezért gyakran a két módszer kombinációját használják.

5

TECHNOLÓGIAI FOLYAMAT



6

ELEKTRONSUGARAS LITOGRÁFIA: FELOLDÓKÉPESSÉG

Elvi határ a de Broglie hullámhosszból adódik ($\lambda = h/p = h/(mv)$):

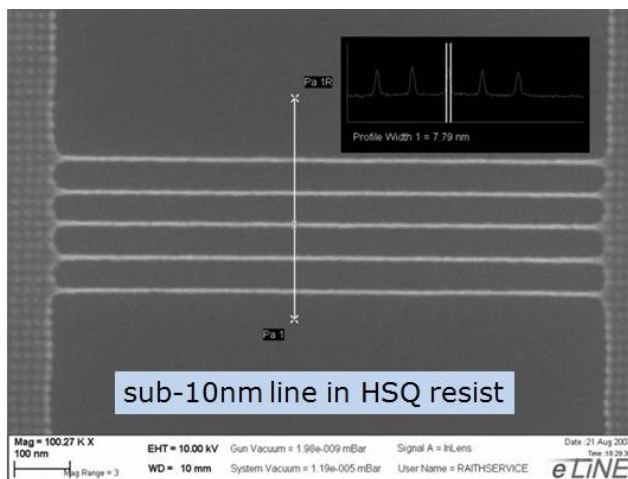
$$\frac{1}{2}m_e v^2 = eU \quad \lambda = \frac{h}{m \times v} = \frac{6,6218 \times 10^{-34} \text{ Js}}{9,1046 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 1,88 \times 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 3,87 \times 10^{-11} \text{ m}$$

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

Az elektronoptikák feloldó-képességének határa jelenleg 1-2 nm.

7

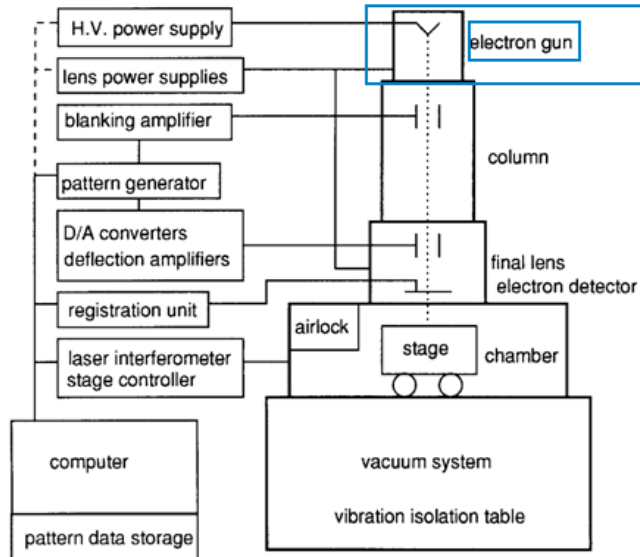
EBL FELOLDÓKÉPESSÉG



Egy konkrét készülék feloldóképessége (a nanoszálak keresztirányú vonalprofilja alapján) 7,8 nm, azaz 10 nm alatti vonalszélesség valósítható meg megfelelő rezisztanyaggal.

8

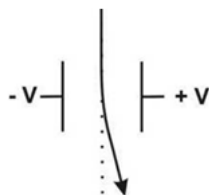
EBL KÉSZÜLÉK



9

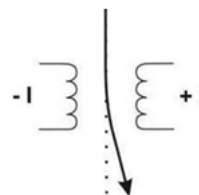
ELEKTRONSUGÁR MOZGATÁSA

electro-static



fast deflection

electro-magnetic



large deflection

$$F = q \cdot (E + v \times B)$$

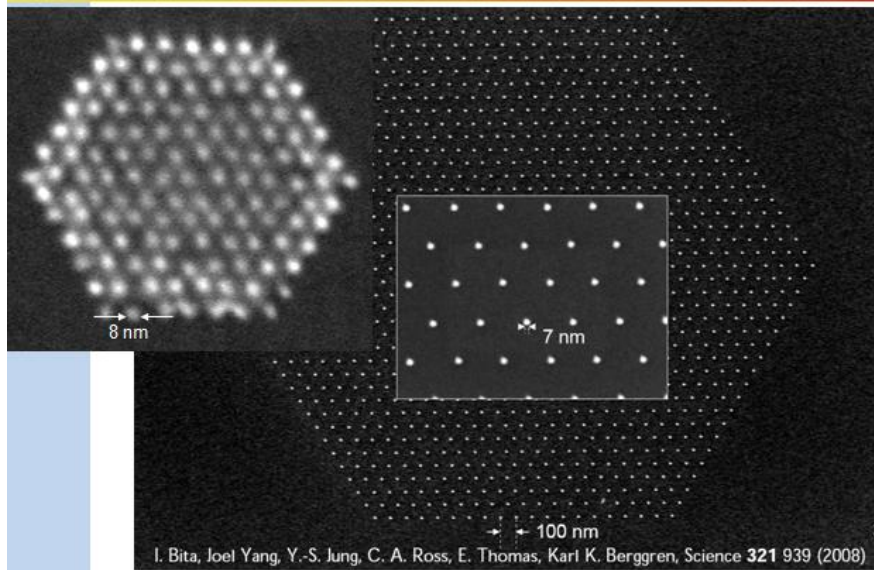
Lorentz erő

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

Maximális eltérítés nagyságrendben 100 μm a nagy feloldás és a jó pozicionálási pontosság érdekében.

10

ULTRA NAGY FELBONTÁSÚ LITOGRÁFIA



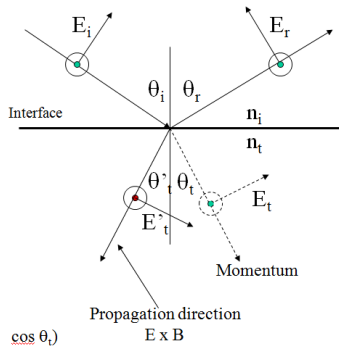
METAANYAGOK: EBL LEHETŐSÉGEK...

... have lattice constants **smaller** than the wavelength of light ($\lambda / a > 1$).

... are artificial materials.

... can be treated as homogeneous media (Maxwell $\rightarrow \epsilon, \mu, n, \tilde{Z}$).

... can have a negative index of refraction $n < 0$.



"Balkezes" anyagok: μ és ϵ negatív!

Furcsa tulajdonságok

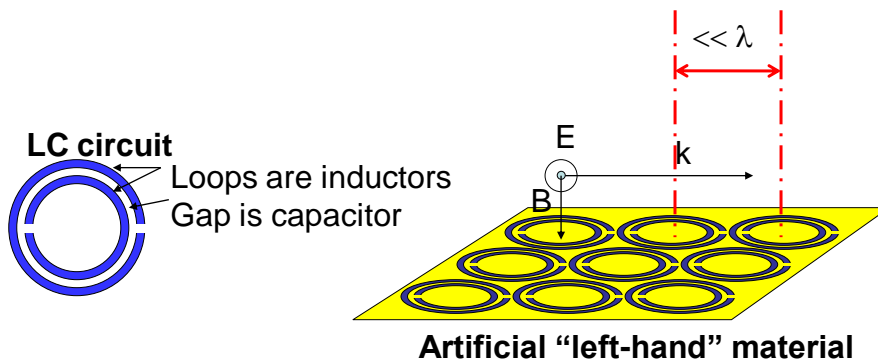
Fénytörés "visszafelé"

Anyag "gyártása"

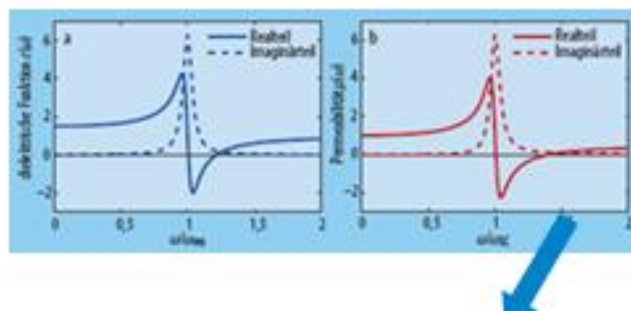
MESTERSÉGES BALKEZES ANYAGOK

Need sign of ϵ and μ both negative

- Problem: magnetic part usually ~ 1
- Solution: Fool the EM field
 - LC circuit – material in capacitor gap indirectly modifies magnetic material



METAANYAGOK: FIZIKAI MECHANIZMUS

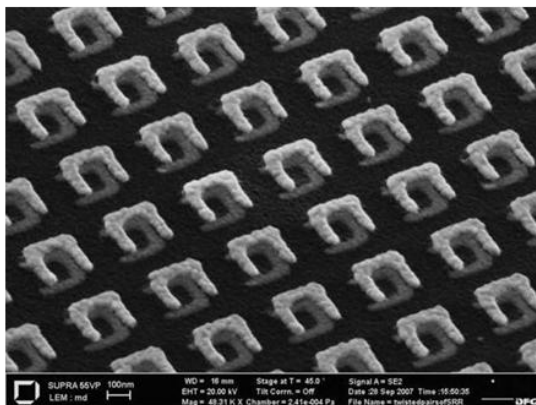


Refractive index negative! Does NOT exist in nature!

A komplex dielektromos állandó valós és képzetes részeinek frekvenciafüggése (Lorenz modell).

A rezonancia frekvencia felett van olyan tartomány, ahol negatív törésmutató alakulhat ki, bár a természetben ilyen anyag nem létezik!₁₄

EBL ALKALMAZÁS: METAANYAGOK



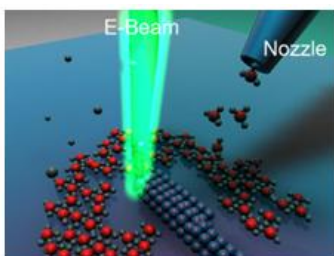
M. Decker et al., Opt. Lett. **32**, 856 (2007),
(University of Karlsruhe)

Kb. 200 nm-es félhurkokból álló kb. 400 nm-es periódusú EBL-el létrehozott szerkezet mellyel a látható fény tartományában negatív törésmutató valósítható meg.

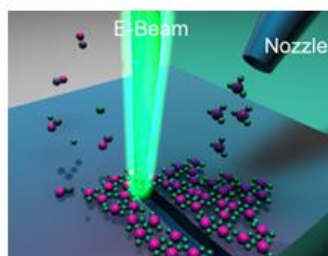
15

ELEKTRONSUGARAS LEVÁLASZTÁS

Az elektronsugaras leválasztás (*Electron Beam Deposition*, EBD) vagy elektronsugárral segített leválasztás (*Electron Beam Induced Deposition*, EBID) egy olyan maszk nélküli eljárás, ami alkalmas nanométeres pontosságú és méretű alkatatok előállítására.



EBID - Electron Beam Induced Deposition



EBIE - Electron Beam Induced Etching

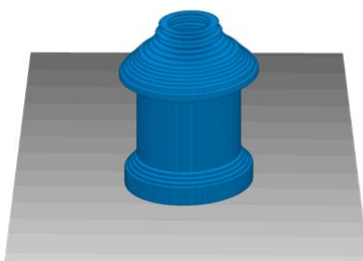
16

ELEKTRONSUGARAS LEVÁLASZTÁS

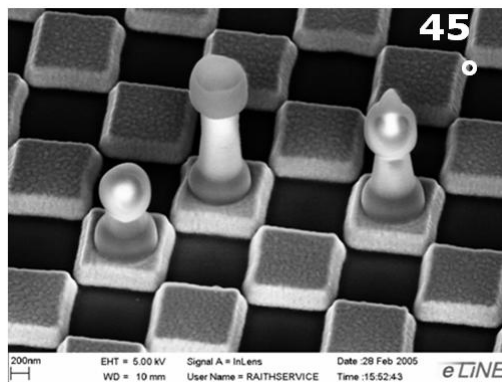
Az elektronsugaras leválasztás (Electron Beam Deposition, EBD) vagy elektronsugárral segített leválasztás (Electron Beam Induced Deposition, EBID) egy olyan maszk nélküli eljárás, ami alkalmas nanométeres pontosságú és méretű alakzatok előállítására.

17

DEMO: 3D ELEKTRONSUGÁRRAL SEGÍTETT LEVÁLASZTÁS



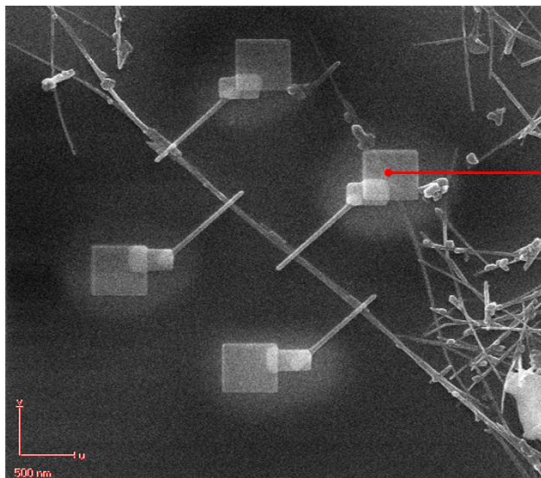
200 nm →



3D mikro/nano sakk-készlet (3D-EBID demonstráció)

18

EBID ALKALMAZÁS



**Contact pad
for „Nano-
Manipulator
“**

”Wiring” of CNTs on SiO₂ surface (by metalorganic precursor deposition)₉

STM NANOLITOGRAFIA

Az STM hegyéből a mintába alagúteffektus révén folyó elektronáram is felhasználható nanométer felbontású litográfiára. Az alagutazó elektronokkal a tű mozgatásával alakzatok rajzolhatók. Ez tulajdonképpen egy speciális elektronsugaras eljárásnak felel meg.

Az elektronsugaras litográfia rezisztanyagai (pl. PMMA) ekkor is használhatók.

Si szelet oxidmentesítése HF-es marással

Reziszt felvitele (50-100 nm vastagság)

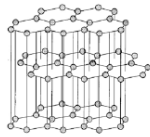
”Exponálás”: STM tű pásztázása a kívánt mintázatnak megfelelően. Eközben akkora feszültséget kell a tű és a minta közé kapcsolni, hogy az STM tűből elektronok emittálódnak a rezisztbe.

Előhívás: mint a hagyományos elektronlitográfiában.

20

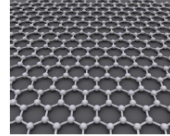
GRAFIT- GRAFÉN

Grafén: egy atomréteg "vastag" lemez

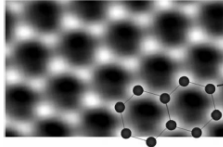


grafit

- Gyengén kölcsönható síkból áll.
- A síkokon belül hatszöges elrendezés.
- c-síkban a grafit vezetőként viselkedik.
- A síkokat gyenge *van der Waals*-erők kötik össze.
- A síkok egymáshoz képest eltolva.
- A síkok „vastagsága” $\sim 0,3 \text{ nm}$. Egy-egy sík *1D* nanostruktúrának tekinthető.



grafén sík



grafén TEM kép

Ha egy síkot leválasztunk, akkor annak különleges tulajdonságai lesznek.



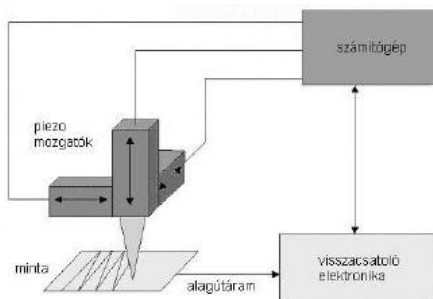
Andre Geim és Konstantin Novoselov
fizika Nobel-díj 2010

- Elektromos vezetőképessége jobb mint az ezüsté
- Kétdimenziós vezetési tulajdonságok
- A grafén réteg a fehér fényre átlátszatlan, és az átlászóság elektronos térrel változtatható.
- Hővezetőképessége kb. 10-szerese mint az ezüsté
- Szakító szilárdsága ~ 200 szorosa az acélénak

Megoldották az egy atomsíknyi grafitlemez tömbről való leválasztását!

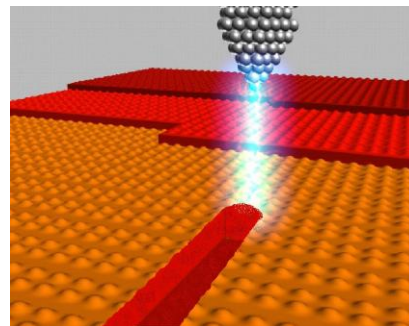
21

STM NANOMEGMUNKÁLÁS: STM MINT VÁGÓSZERSZÁM



A felület lokális megmunkálása
STM tú atomi pontosságú
pozicionálása
Atomi feloldású leképezés

Grafén strukturálása STM
mint "vágószerszám"
felhasználásával.



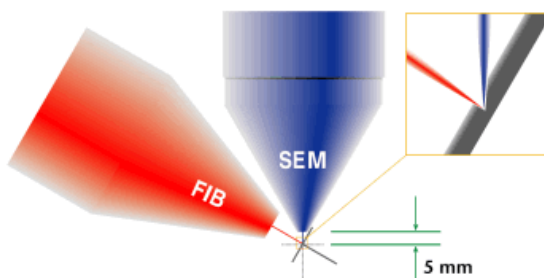
ION LITOGRAFIA

Az ionlitográfiában az expozícióra ionsugarat használnak. A fókuszált ionsugár litográfia (focused ion beam lithography) elvében hasonló az elektronlitográfiához, mivel mindkettő töltött részecskék fókuszált nyalábját alkalmazza. A rezisztanyagok azonban az ionokra általában érzékenyebbek, mint az elektronokra. Az ionok energiája nagyobb, ezért az érzékenység egy-két nagyságrenddel is megnőhet. Az ionok energiájának változtatásával a behatolási mélység jól beállítható. Az anyagokba behatoló ionok kevés visszaszórt elektront keltenek, ez javítja az exponálás minőségét. A litográfias célra kialakított ionforrás használható ionimplantálásra is, így ez lehetővé teszi az összetett technológiai berendezés megvalósítását is.

23

FOKUSZÁLT IONSUGARAS MEGMUNKÁLÁS (FIB)

Megmunkálásra szolgáló fókuszált ionsugár (FIB) és pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) egy készülékben.



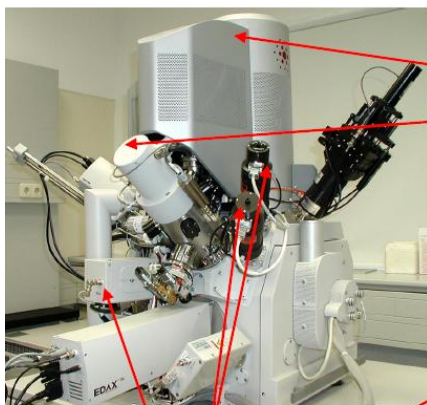
Elektron nyaláb –függőlegesen ionnyaláb –52o-ot zár be a függőlegessel

Hogy a FIB merőlegesen lássa a mintát, dönteni kell azt 52o-kal

24

FIB BERENDEZÉS

FIB = Focused Ion Beam (Fókuszált ionnyaláb)



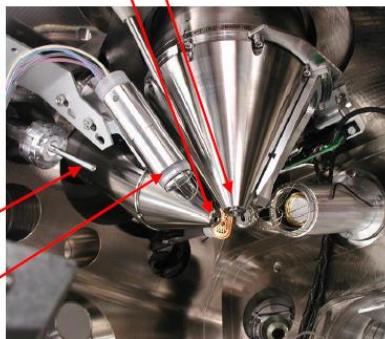
Miből áll egy SEM/FIB berendezés?

elektron oszlop

ion oszlop

gáz injektorok

detektor – CDEM (SE, SI)



25

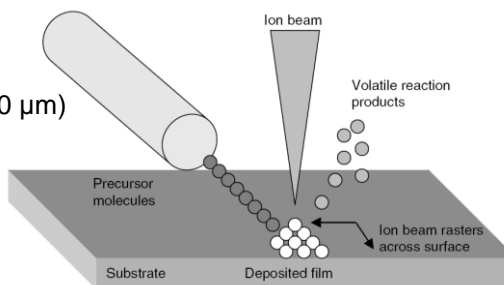
FOKUSZÁLT IONSUGARAS MEGMUNKÁLÁS

Különböző anyagokat (szén, szigetelő vegyület, platina) választhatunk le a minta felületére nanométeres mérettartományban.

Nanolitográfia, nano-leválasztás

Egy tű megközelíti a mintát (50-200 μm)

Prekurzorgázt juttat a felületre

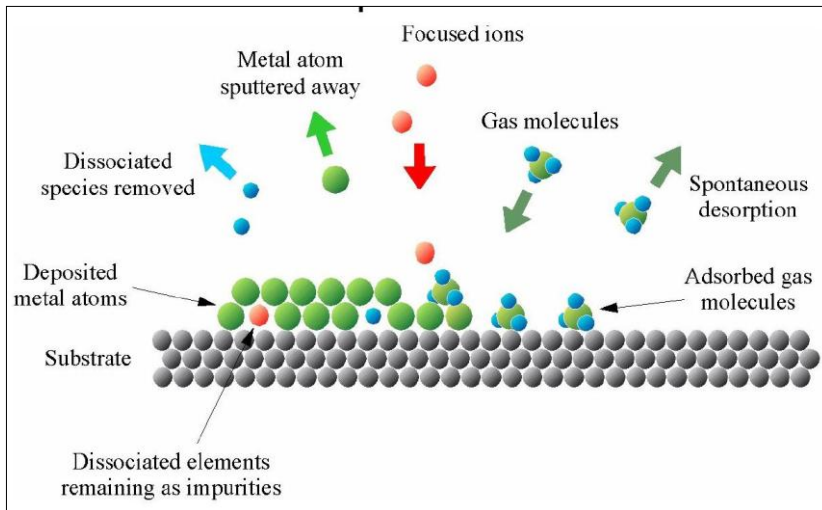


Az ion nyaláb pásztázza a felületet, hatására a prekurzorgáz elbomlik illékony molekulákra és a minta felületére szánt anyagra

A leválasztott anyag a felületen marad

26

FIBD LAVÁLASZTÁSI MECHANIZMUS



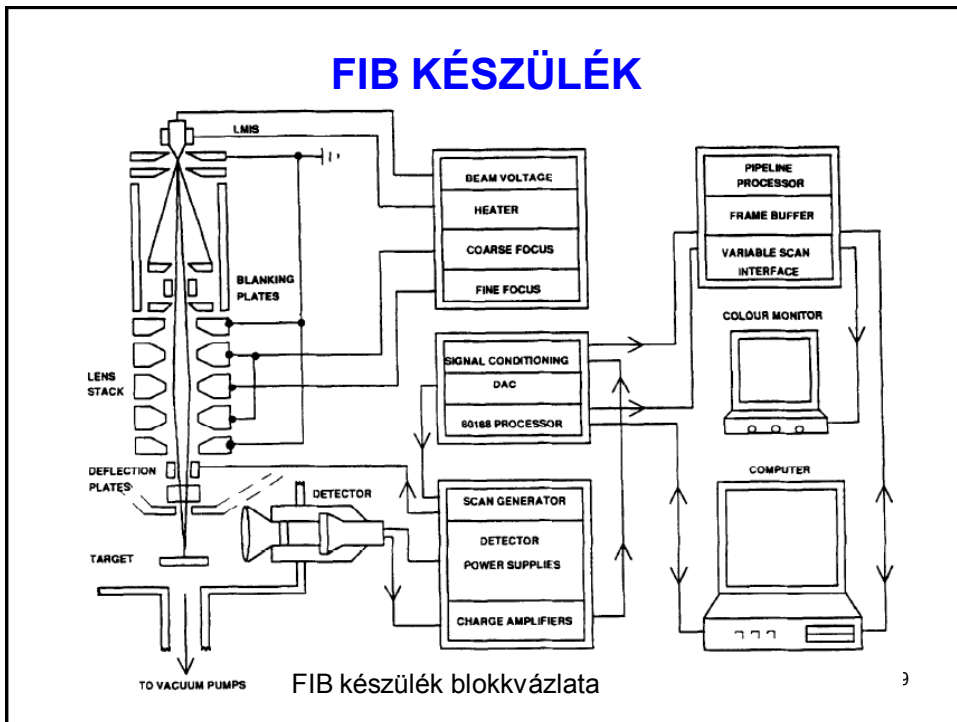
27

FOKUSZÁLT IONSUGARAS MEGMUNKÁLÁS ÉS LEVÁLASZTÁS

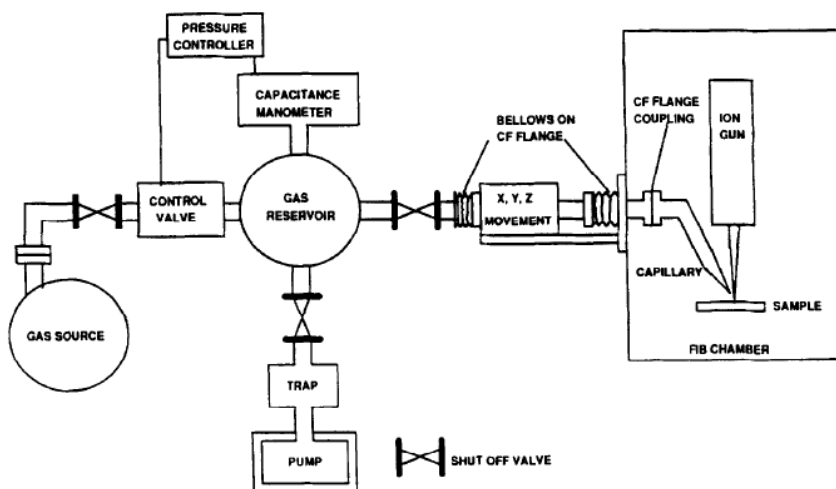
Focused ion beam micromachining (FIBM) and focused ion beam deposition (FIBD) enable spatially selective, maskless, patterning and processing of materials at extremely high levels of resolution. State-of-the-art focused ion beam (FIB) columns based on high brightness liquid metal ion source (LMIS) technology are capable of forming probes with dimensions of order 10 nm with a lower limit on spot size set by the inherent energy spread of the LMIS and the chromatic aberration of ion optical systems. The combination of high lateral and depth resolution make FIBM and FIBD powerful tools for nanotechnology applications. In

28

FIB KÉSZÜLÉK



FIBD KÉSZÜLÉK: GÁZ ADAGOLÁS



Fókuszált ionsugaras leválasztó (FIBD) gázadagoló rendszere

IONNYALÁB: GALLIUM (Ga⁺)

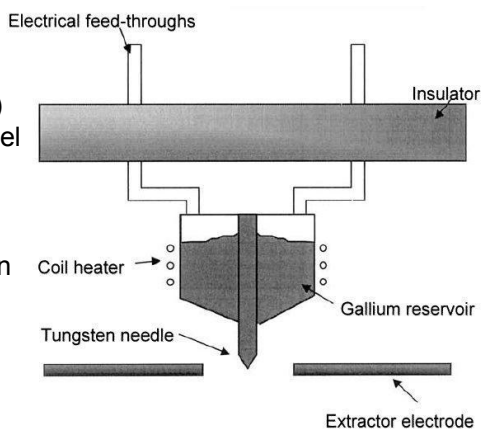
Leggyakrabban használt fém ion FIB
készülékekben: Ga⁺

Alacsony olvadáspont ($T_{olv} = 29,8 \text{ °C}$)
Minimális kölcsönhatás a volfrám tűvel
Nem illékony, alacsony gőznyomás
Kicsi felületi feszültség – kellően
viszkózus

Ga hetekig folyékony marad, könnyen
megnedvesíti a W tűt (átm. 2-5 μm),

10^8 V/cm tér pontforrássá formázza a
Ga-ot 2-5 nm átmérővel

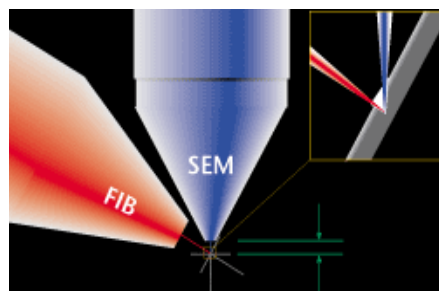
Kihúzófeszültség ionizálja az atomokat és
elindítja a Ga áramot (10^8 A/cm^2)



31

NANOMEGMUNKÁLÁS

Keresztsugaras elrendezés:
Marás **gallium ionokkal**
energia: 30 keV,
sugárátmérő <10 nm
Megfigyelés a **SEM**
szekunder elektron képén

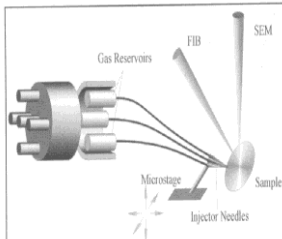


Ionsugaras marás

IN SITU ionsugaras marás (**FIB**)
FOLYAMATOS nyomonkövetése a **SEM**
NAGY FELOLDÁSÚ SEI képén

32

NANOMEGMUNKÁLÁS

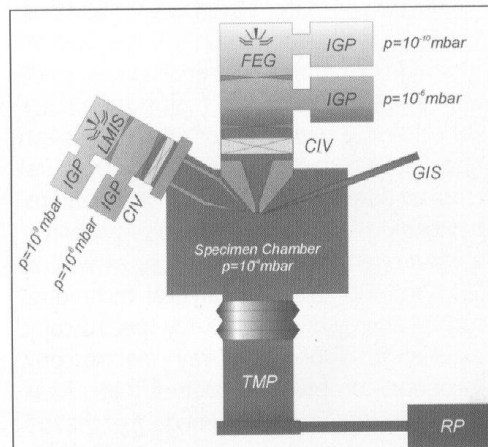


Gázbevezetés:

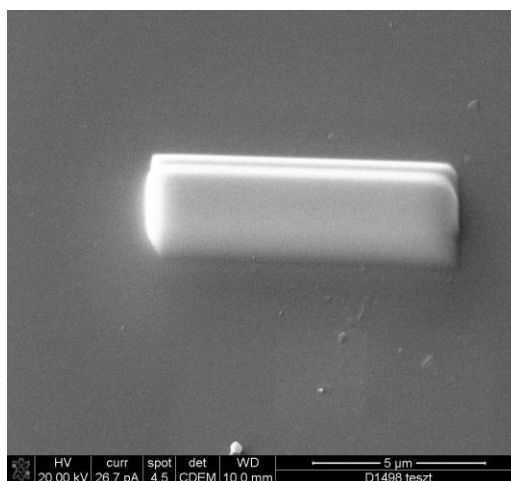
- W leválasztás
- Pt leválasztás
- SiO₂ leválasztás
- Fém-marás
- Szigetelő-marás

Speciális vákuumrendszer:

Reaktív marás és leválasztás



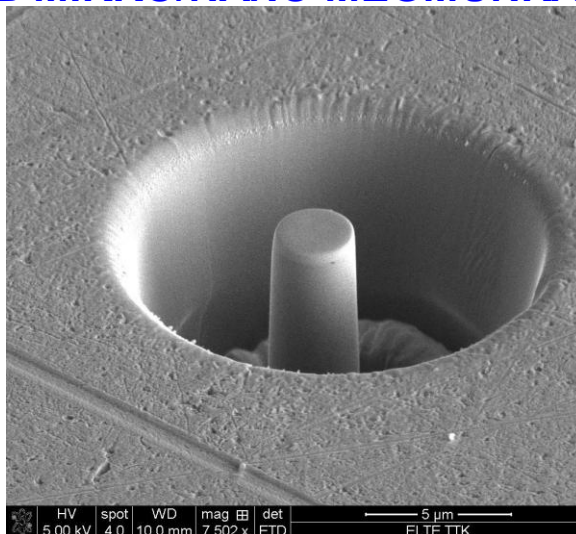
FIBD ALKALMAZÁSI PÉLDA



FIB leválasztással létrehozott Pt réteg szilícium hordozó felületén
(méretskála: 5 μm)

34

FIB MIKRO/NANO MEGMUNKÁLÁS



Réz (Cu) mikrooszlop (méretskála 5 μm)

35

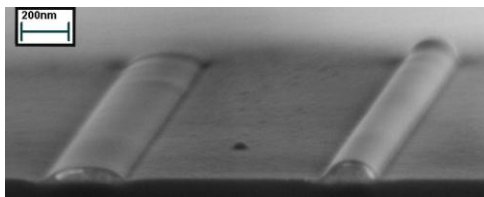
FIBD ALKALMAZÁS: ELEKTROMOS KONTAKTUSOK NANOOBJEKTUMOKHOZ

Miután a felvezető elektronika fejlődése messze túllépte a szubmikrometeres tartományt, szükségesse vált a nanoobjektumok elektromos tulajdonságainak vizsgálata. E nanoobjektumok elektromos jellemzéséhez szükséges azok kivezetése a hagyományos litográfiával kialakított kontaktus felületekhez.

Hasznos és megbízható eljárásként, egyedi nanoobjektumok mikrofelületekhez való kikötéséhez fókuszált elektron- vagy ionsugarral leválasztott volfrám (W) vagy platina (Pt) rétegeket alkalmaznak.

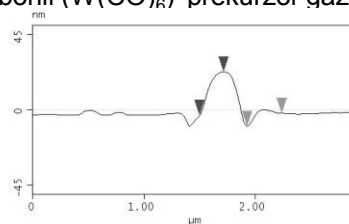
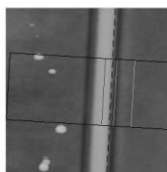
36

FIBD PÉLDA: W CSÍK SI HORDOZÓN



Fokuszált ionsugara leválasztással készült volfrámcsík (Si hordozó) keresztmetszetének pásztázó elektronmikroszkópos képe (csíkszélesség 300 nm, hossz 60 μm). Volfrám hexakarbonil ($\text{W}(\text{CO})_6$) prekursor gáz.

A leválasztott csík AFM képe és magassági profilja.



(Forrás: Tóth Attila Lajos, MTA MFA)

37

VÉGE

38