

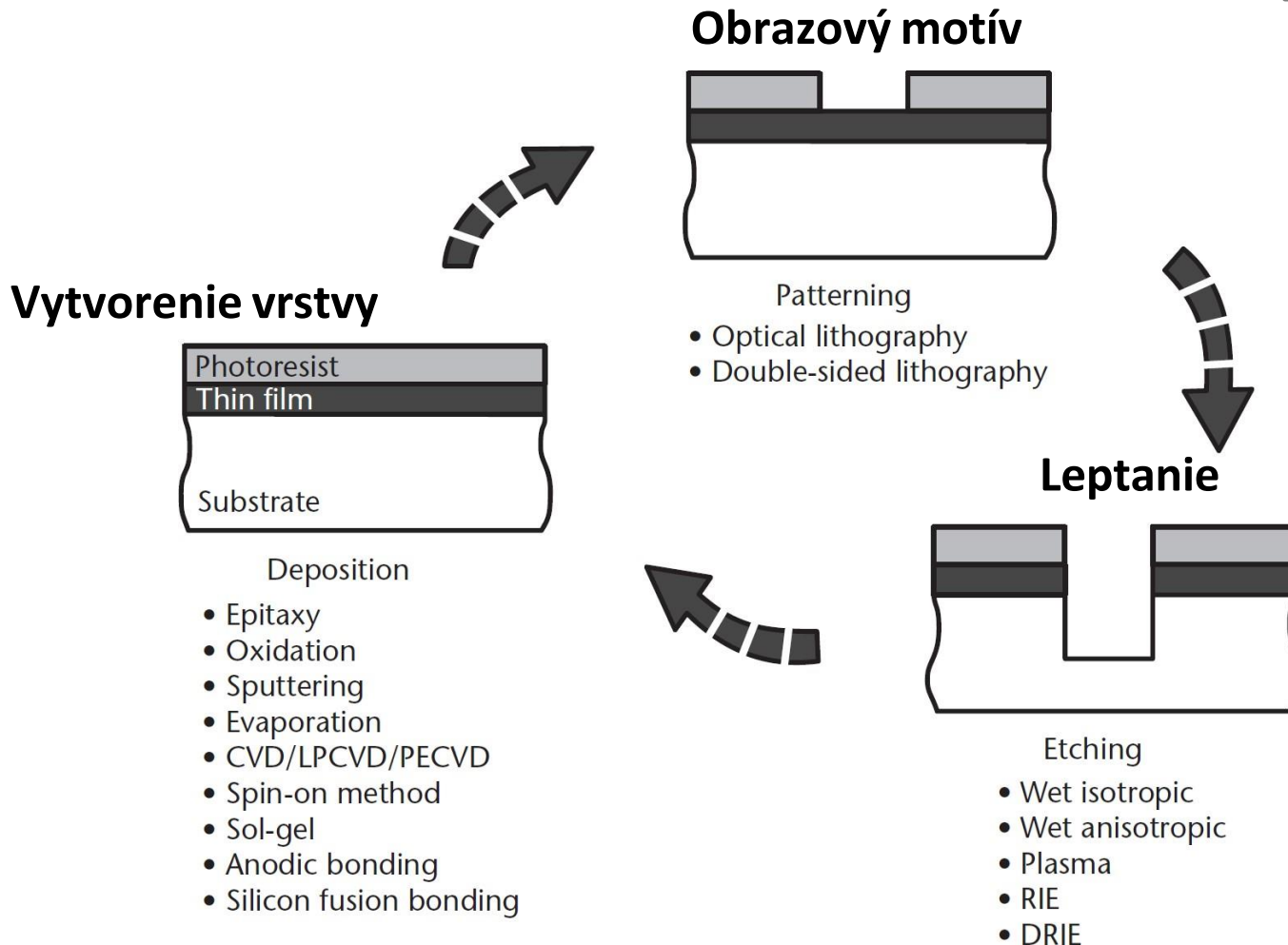
Lekcia 4

Prenos vzoru (*patterning*)

Fotóny, nabité zväzky a atomárne sondy

Základné procesy mikroobrábania

vid'. F3370



Základný vývojový diagram procesov pri mikroobrábaní: Prebehne depozícia vrstiev; Na fotorezist sa litograficky vytvorí motív ktorý slúži ako maska pri leptaní podkladového materiálu. Proces sa opakuje až kým nedôjde k dokončeniu požadovanej mikroštruktúry.

Optická litografia

Vyčerpávajúca prednáška vid'. **F6540** Fyzikální principy technologie výroby polovodičů, RNDr. Petr Pánek, Ph.D.

Základné kroky:

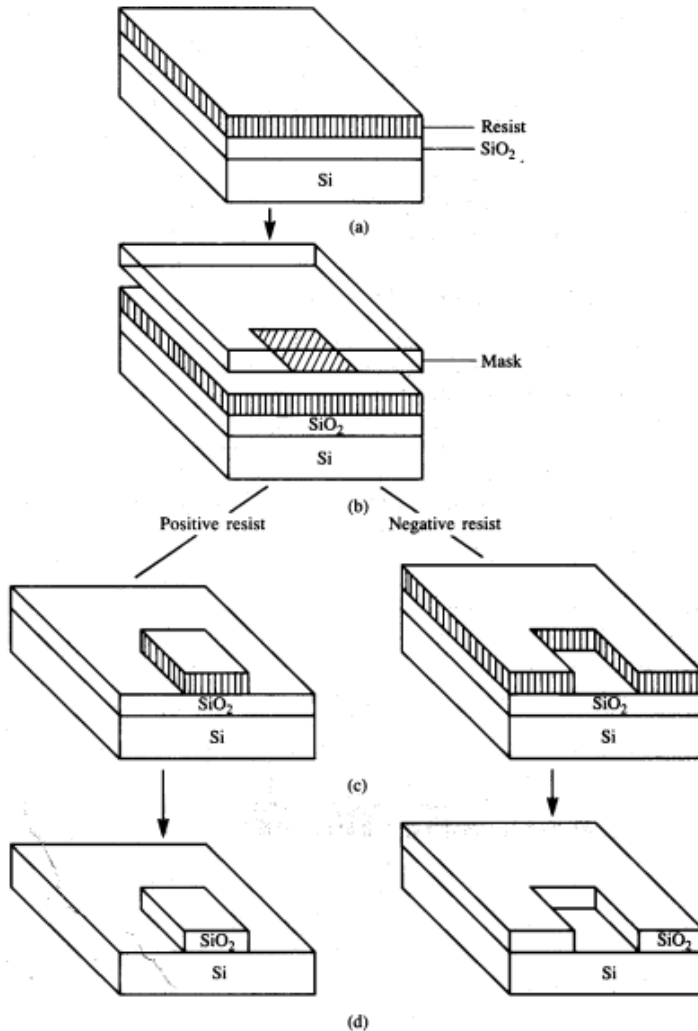
- Nanesenie fotosenzitívneho filmu - fotorezistu
- Zorientovanie masky/retiklu (*alligement*)
- Expozícia fotorezistu
- Vyvolanie vzorky

Výzva:

- Schopnosť efektívne prenášať čo najmenšie a-periodické štruktúry na forezist s danou hrúbkou.

Fotorezist

Positive or negative?



Positive PR

Light breaks chemical bonds
Exposed area dissolved out

Negative PR

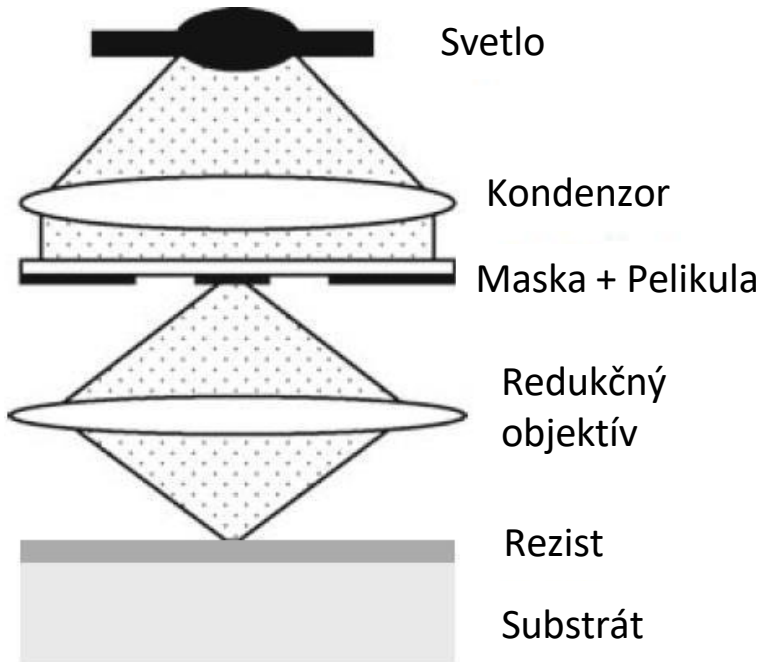
Light toughens chemical bonds
Exposed area remains

Image Reversal (only for specific positive PRs)

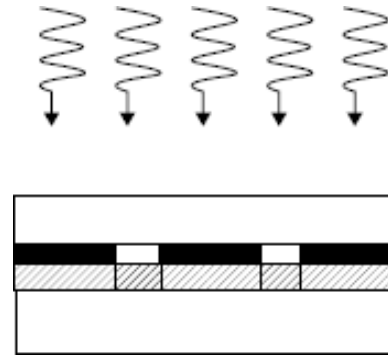
Overdose of light + temp process causes chemical bonds to toughen

Fotóny - základné expozičné metódy

Projekčná litografia

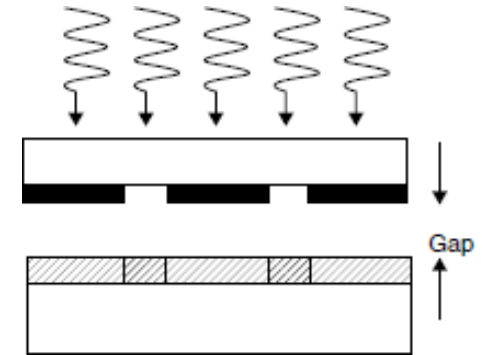


Kontaktná litografia



- Cena masky je prívysoká pre sériovú výrobu mikro/nano štruktúr

Separáčna litografia (proximity lithography)



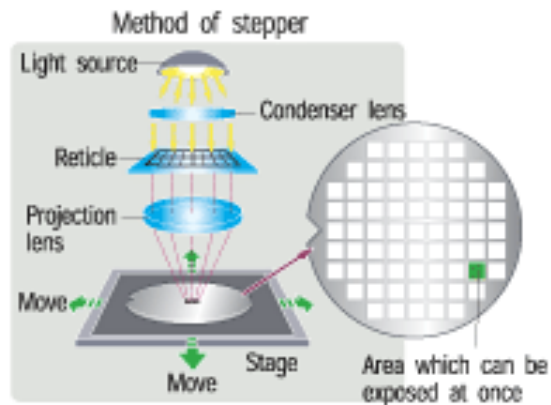
- Medzera 3-50 μm
- Fresnelova, nie Franhouferova difrakcia

- Umožní projekciu zmenšeniny masky (5x typicky)
- Polohu substrátu je možné krokovať, a opakovane tak exponovať ostrý obraz čipu na celý wafer.

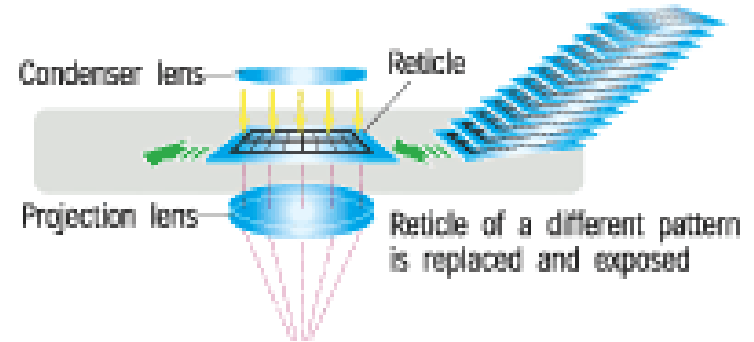
Stepper v. skenner

Step-and-repeat

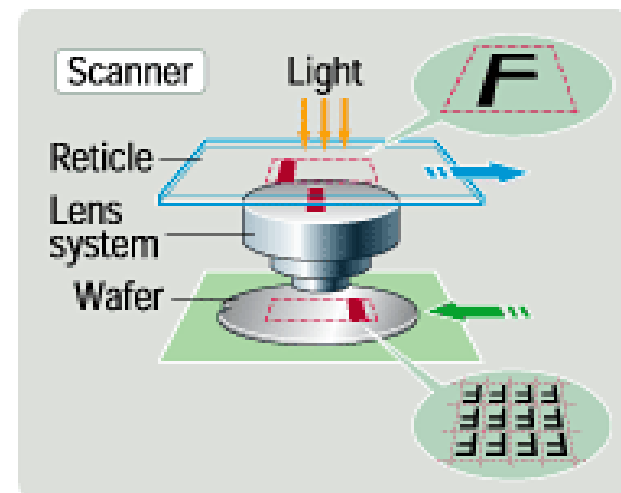
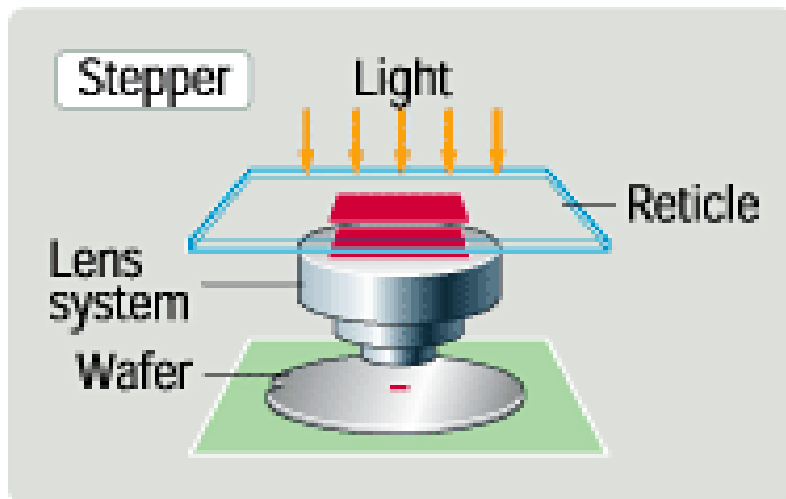
Exposure



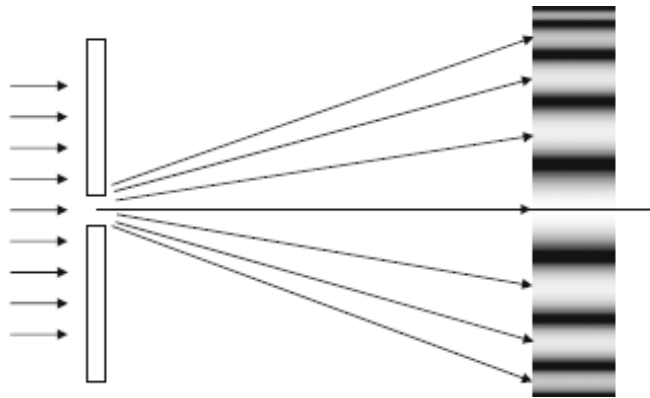
Reticle change



Step-and-scan



Difrakčný limit => krátke λ



$$\sin\phi = m \frac{\lambda}{a}, m = 1, 2, 3, \dots$$

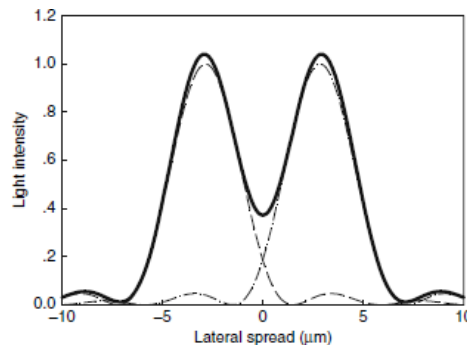
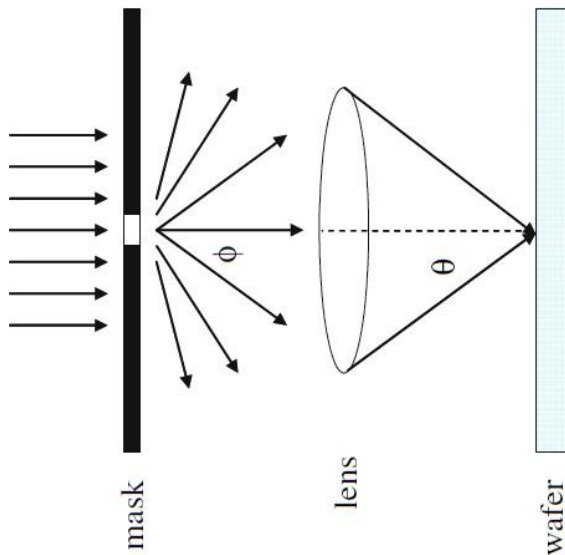
Prechod svetla cez malú štrbinu v maske šírky a vyvolá difrakciu (tu Franhoferovu), tj. vznik svetelných maxím pod uhlom ϕ .

Problém nastane keď $a \approx \lambda$

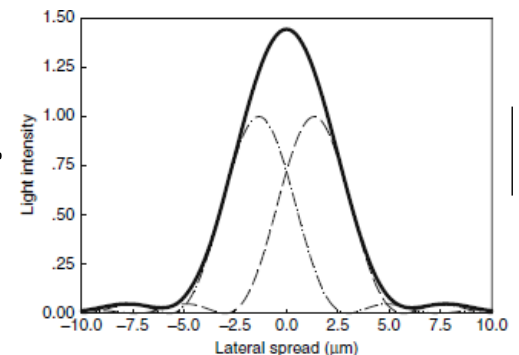
Redukčný objektív fokusuje z difrakčného obrazca na rezist iba časť, v závislosti od rozmerov šošovky, resp. jej numerickej apertúry $NA = n \cdot \sin \theta$, čím sa obraz rozmaže.

Rozlišovacia schopnosť (Rayleighovo kritérium):

$$x_{\min} = k_1 \lambda / NA$$



VS.



Skracovanie vlnovej dĺžky λ

- UV svetlo z ortuťových lúčnic, limitovaná dostupná intenzita žiarenia.
 - 'g'-čiara ($\lambda = 436 \text{ nm}$).. rozlíšenie 7-1 μm
 - 'i'-čiara ($\lambda = 365 \text{ nm}$).. rozlíšenie 1-0,35 μm
- Excimérové lasery Deep UV (DUV)
 - $\lambda = 248 \text{ nm}$ (KrF excimér laser) rozlíšenie 350-118 nm
 - $\lambda = 193 \text{ nm}$ (ArF excimér laser) rozlíšenie 180-32 nm / imerzná technika

-
- Vakuové UV (VUV)
 - $\lambda = 157 \text{ nm}$ (F_2 excimér laser),
 - Extrémne UV (EUV)
 - $\lambda = 13 \text{ nm}$, menej než 32 nm
 - X-ray $\lambda \sim 1 \text{ nm}$.

?? Materiál pre výrobu

- optických šošoviek (CaF, dvojlom)
- priesvitné a odolné pelikuly pre masky (CaF nevhodný)
- fotorezist (okamžite absorbuje)

Extrémne UV – EUV, 13 nm

- Prísne vzaté, ide už o mäkké RTG žiarenie
- Využíva reflexnú optiku

Hlavné komponenty:

EUV zdroj

Synchrotrónové žiarenie – extrémne drahé.

Kritickým faktorom je životnosť a *shot noise*.

Plazma – vysokoionizované ióny Li, Xe⁺¹⁰, Sn^{+8 až +12}, pomocou pulzného pinču.

Problémom je malá intezita sveteln. toku (aspoň 100W v ohnisku).

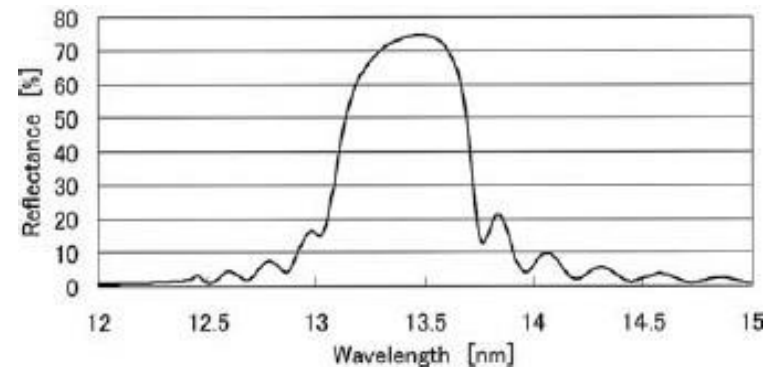
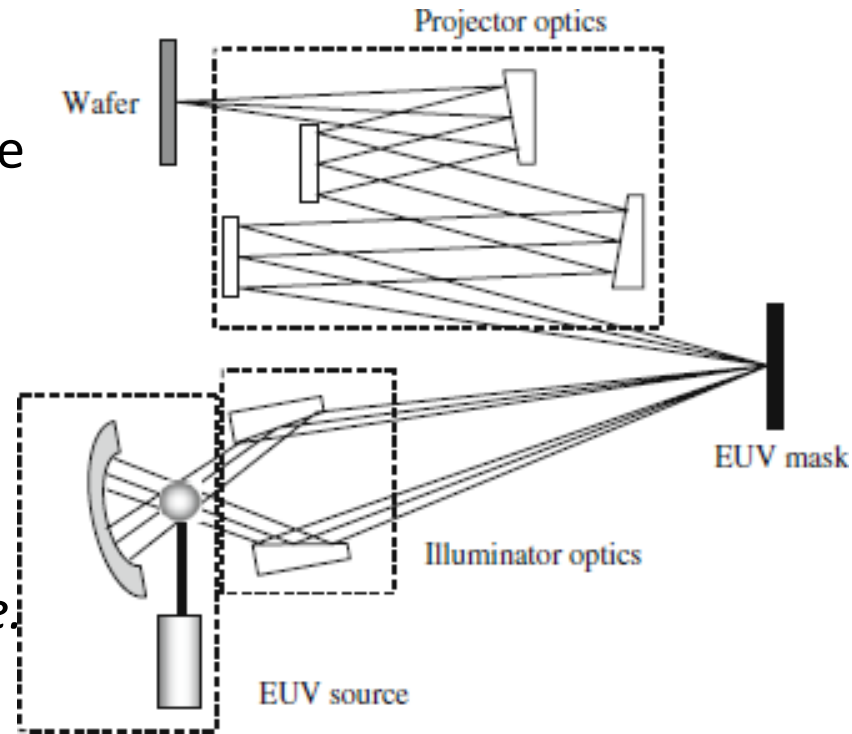
Laser – laserom indukovaný prieraz

EUV optika

Základom je multivrstvé zrkadlo, tzv.

distributed Bragg reflector. Kritickým

faktorom je jeho životnosť.



Rezonančná odrazivosť pre
50x Mo(2.76 nm)-Si(4.14 nm)

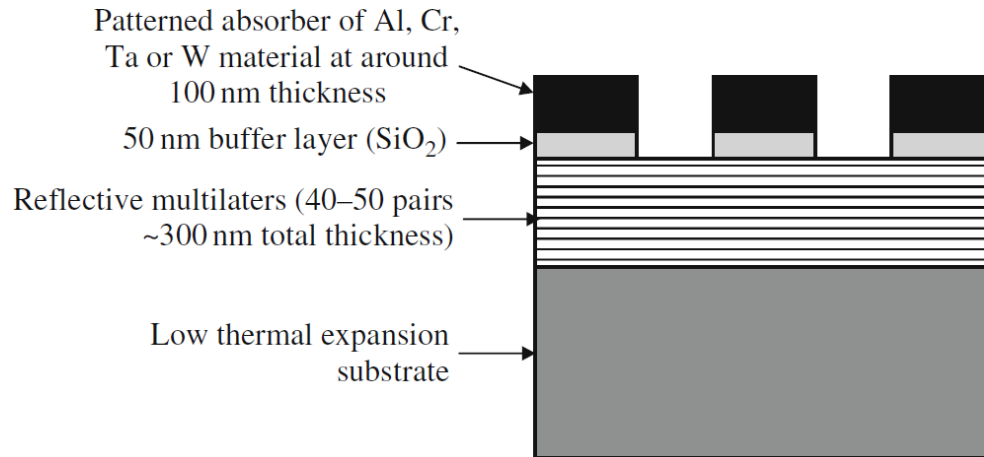
EUV maska

Pracuje na odraz, podobne ako EUV zrkadlo.

Našťastie je optika EUV redukčná (4:1)

Pre kvalitné zobrazenie je potrebná maximálna rovinnosť.

Maska musí byť tepelne odolná.



Prierez maskou

EUV rezist

Musí byť veľmi citlivý, pretože slabá intenzita žiarenia

To však vedie k neostrým kontúram.

RTG žiarenie 1 – 0,1 nm

Nie je možné použiť ani reflexnú optiku. Musíme používať separačnú litografiu 1:1. Kontaktná je vylúčená extrémne malou hrúbkou masky.

Maska z Au, W, Ta (300-500 nm) nanesených na Si, SiC(1-2 μ m).

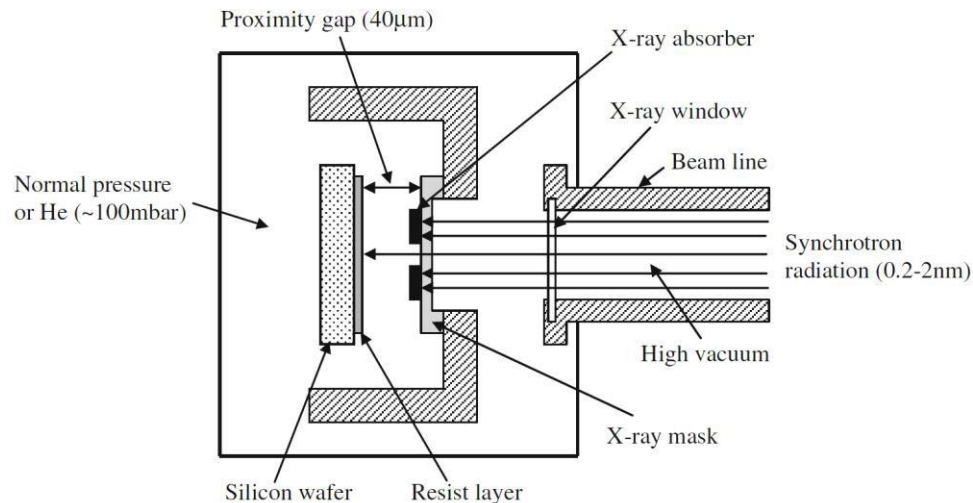


Fig. 2.12 Schematic of X-ray lithography

Problémy:

- Presná vzdialenosť medzi tenučkou maskou a substrátom.
- Augerovské elektróny a fotoelektróny vyvolané RTG vyvolávajú nežiaducu expozíciu rezistu (účinnnejšiu než samotné RTG).

Zväčšovanie NA

$$x_{\min} = k_1 \lambda / NA$$

NA > 0,5

Zvýšenie NA zlepši rozlíšenie, ale zhorší hĺbku ostrosti:

$$DOF = k_3 \frac{\lambda}{2(1 - \sqrt{1 - NA^2})}$$

(pozn. zhoršenie DOF platilo aj pri skracovaní λ)

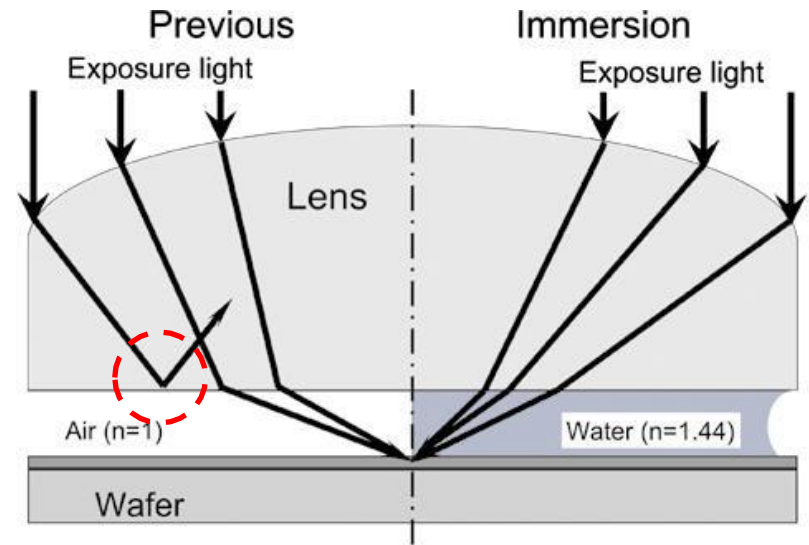
Pre výrobu veľkých waferov, ktoré nikdy nie sú ideálne rovné je DOF **dôležitejší parameter** ako rozlíšenie. Plus DOF vs. hrúbka rezistu. Až keď sme boli schopní pracovať s DOF < 0,5 μm , mohli sme začať zvyšovať NA.

Imerzná optická litografia – prielom k 22 nm @ 193 nm technológii.

NA = $n \cdot \sin \theta$. Vďaka kvapaline s vysokým indexom lomu (voda $n=1,44$) vytvára obraz väčšia čas šošovky (hranola).

Problémy:

- Rýchly pohyb waferu bez toho, aby vznikli v kvapaline mikrobubliny.
- Sušenie fotorezistu bez zanechania škvŕn po kvapaline.



Zmenšovanie k_1 - resolution enhancement technique RET

Pre kruhové apertúry (Airyho krúžok) $k_1=0,65$. Analogicky fungujú aj čiarové štruktúry.

$$x_{\min} = k_1 \lambda / NA$$

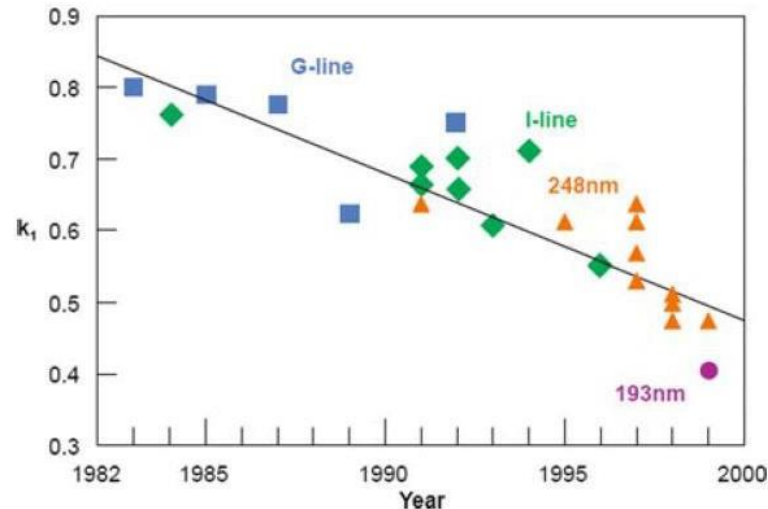


Table 2.4 Summary of resolution enhancement techniques

Components of optical lithography	Innovations to reduce k_1 factor
Illumination optics	Off-axis illumination (OAI): annular, quadrupole, or programmable
Photomask	Phase-shifting masks (PSMs), optical proximity correction (OPC)
Photoresist layer	Top surface imaging (TSI), antireflective coating (ARC), double exposure or double patterning

Off-Axis Illumination (OAI)

Pomocou vhodnej clonky prinútime svetlo dopadať na masku pod uhlom. Vďaka tomu sa otvor a javí pre svetlo väčší. Ďalej sa zlepši DOF. Zlepšenie funguje len pre istý typ štruktúr. Kvadrupól – čiarové štruktúry. Anulárna clona je univerzálnejšia, ale efekt už nie taký dramatický. Preto existujú programovateľné OAI, ktoré menia svoj tvar podľa potrieb.

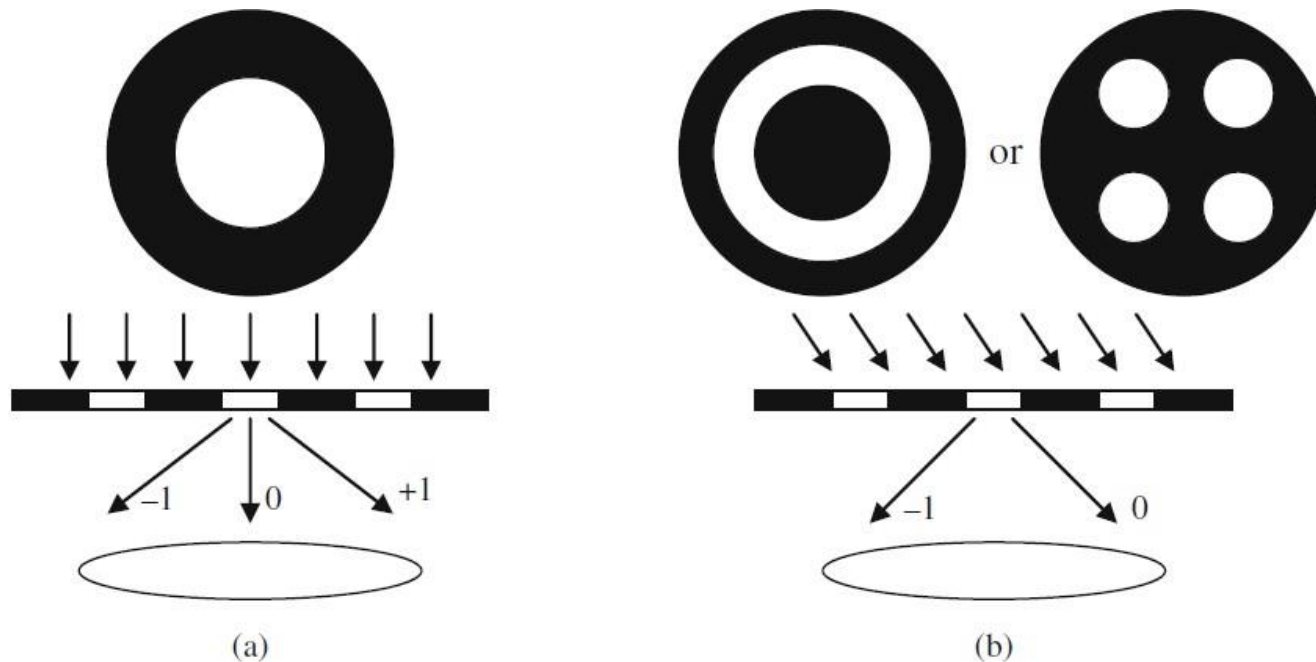
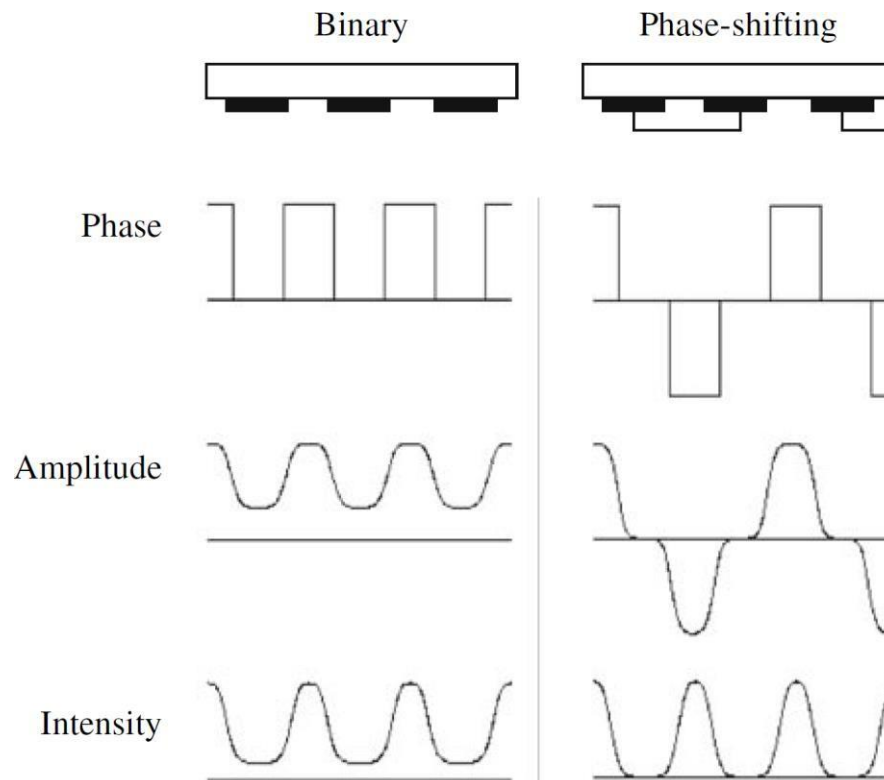


Fig. 2.21 Comparison of conventional and off-axis illumination schemes: (a) conventional aperture (b) off-axis apertures (annular or quadrupole)

Phase-Shifting Mask (PSM)

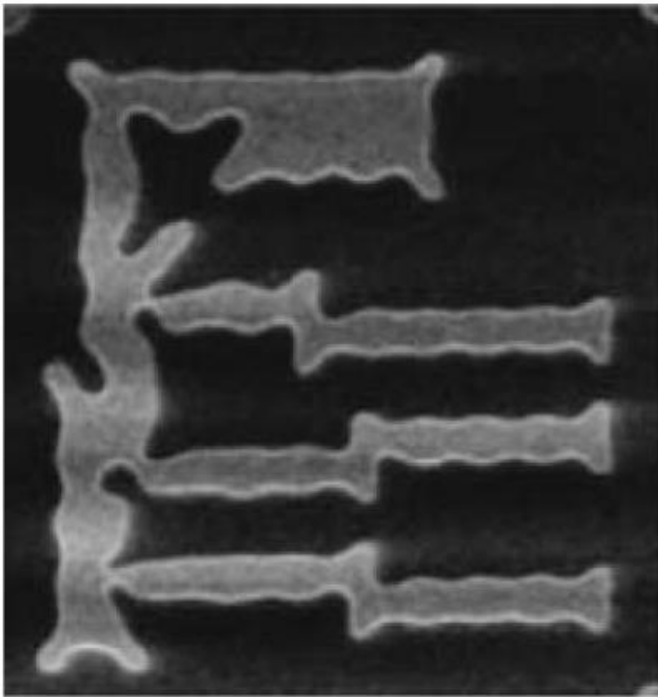
Niektoré oblasti masky sa zámerné urobia tenšie/hrubšie, aby svetlo prechádzajúce cez tieto oblasti zmenilo svoju fázu. Problémom sú oblasti, kde tenšie/hrubšie miesta končia.



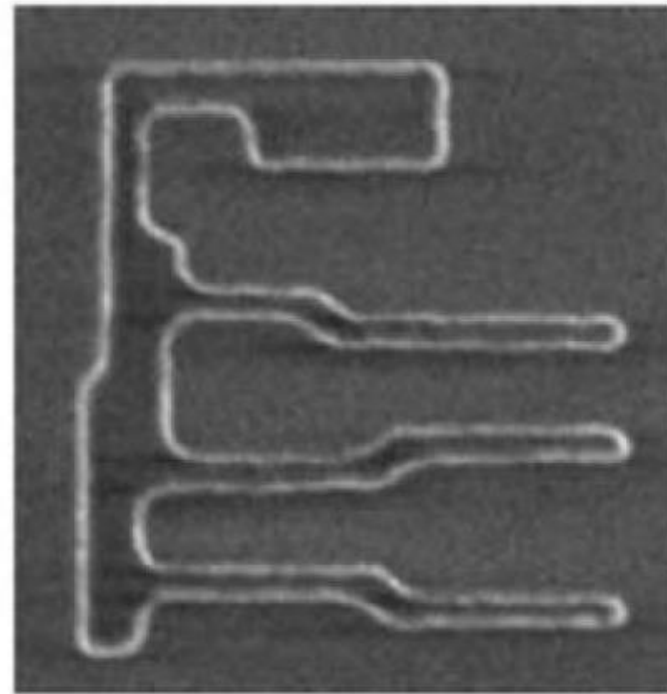
Ilustrácia ako môže PSM vytvoriť ostrejší obraz

Optical Proximity Correction (OPC)

Difrakčný limit sa prejavuje „zaobl’ovaním“ ostrých hrán motívu na maske. Tieto hrany môžeme zámerne zmeniť tak, že zmenená hrana po „zaoblení“ bude mať práve požadovaný tvar.



upravená maska



výsledok na reziste

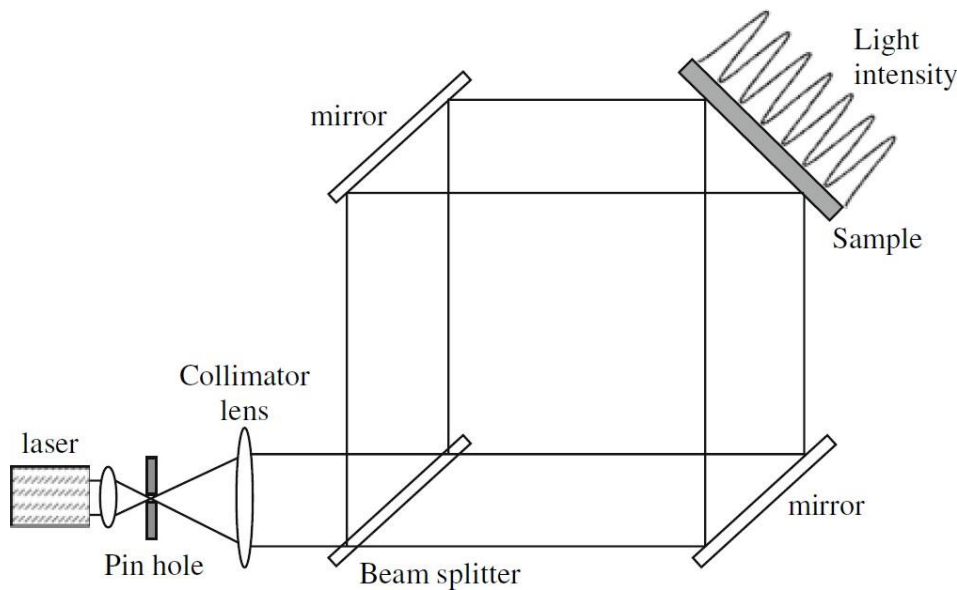
Interferometrická optická litografia

Známa od 1970 z výroby hologramov.

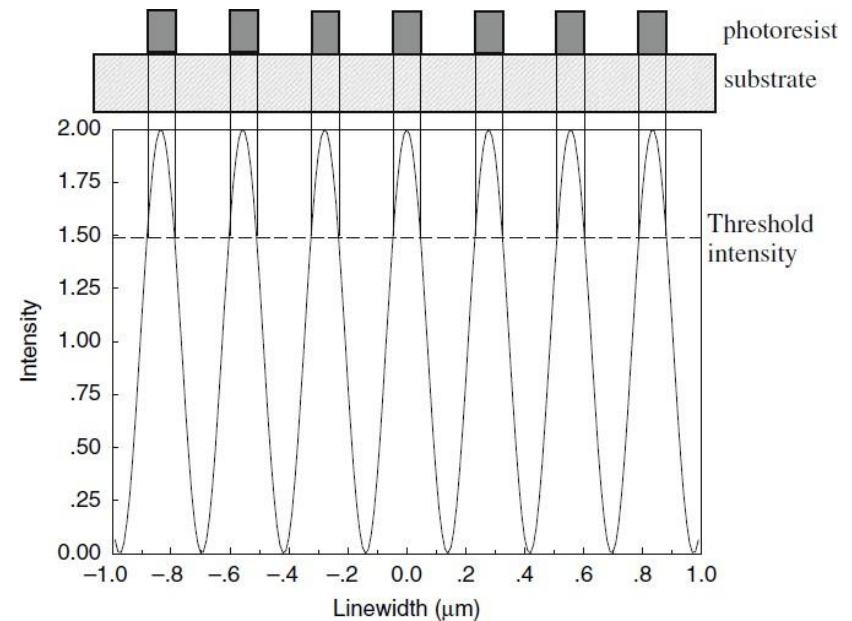
Fotorezist je exponovaný interferenčným obrazcom.

Je schopná vytvoriť iba čiary alebo body (2x čiara otočená o 90°), ale aj tie majú význam (fotonické kryštály, pamäťové prvky).

Sub 100nm štruktúry je možné získať ladením doby expozície a citlivosti fotorezistu.



Schéma



Doba expozície určí šírku čiary

Bezmasková litografia

Nároky na masku (výroba, defekty, transparentnosť) sa pri sub 100nm javia byť natoľko zásadné, že začína byť reálne masovo využívať skanovacie techniky (uplatnené zatiaľ iba pri výrobe masiek).

24 zrkadiel s 20 000 rpm skenuje lúč

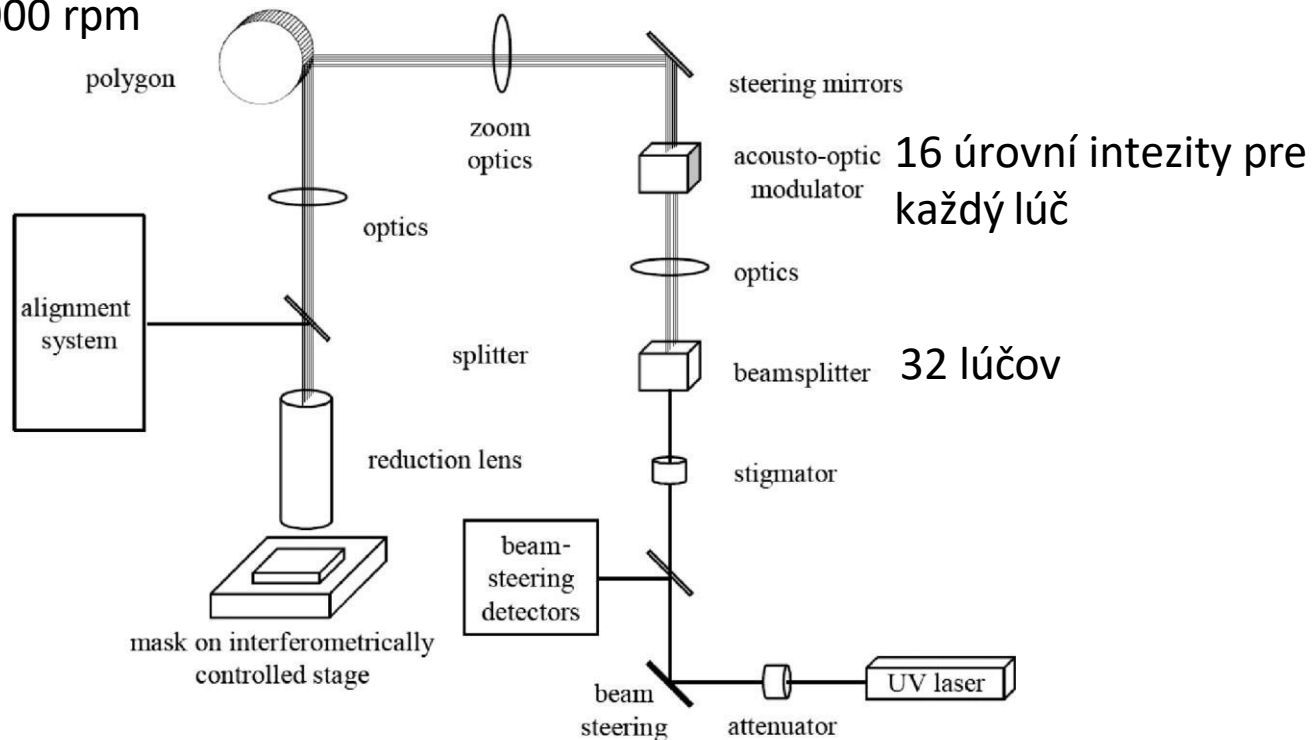


Figure 7.17 Schematic of the ALTA architecture.

Iné systémy používajú na projekciu lasera Digital Micromirror Devices (DMDs). Tieto systémy nepotrebujú aby bol laser cw, a môžu tak ísť do kratších vlnových dĺžok.

Litografia nabitými zväzkami

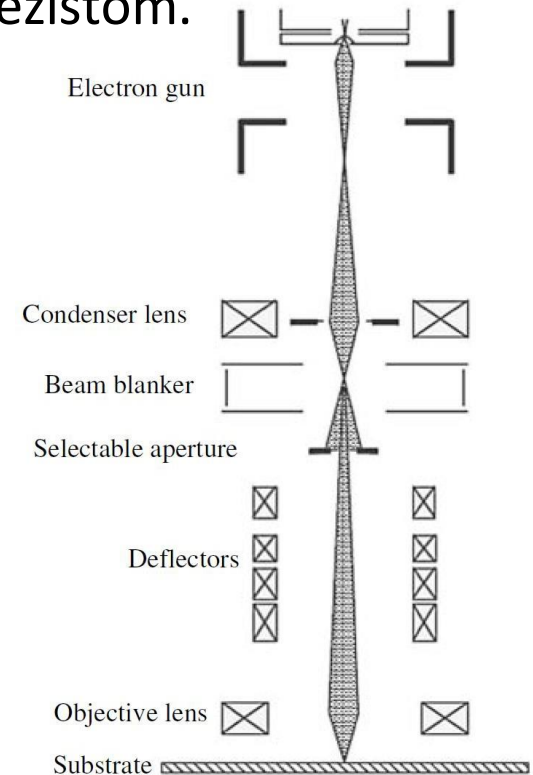
- E-beam litografia sa vyvinula v 1960 tých rokoch z SEM, keď sa zistilo, že PMMA (polymetylmetakrylát - plexisklo) možno použiť ako rezist citlivý na nabité častice. Napriek nižšej citlivosti zostáva vďaka výbornému priestorovému rozlíšeniu najpoužívanejší rezistom.

Table 3.2 Sensitivity and resolution of some e-beam resists

	Resist tone	Sensitivity* ($\mu\text{C cm}^{-2}$)	Resolution(nm)
PMMA	+	100	10
ZEP-520	+	30	10
ma-N 2400	-	60	80
EBR-9	+	10	200
PBS	+	1	250
COP	-	0.3	1000

*Sensitivity measured at 20-keV beam energy.

- Na rozdiel od fotónov dokážame nabité zväzky veľmi presne manipulovať (viď SEM).
- Elektróny sú viac ako $1000\times$ ľahšie než ióny, preto nevyvolávajú rozprašovanie.



Manipulácia zväzkov

- Pre základnú predstavu (časovo nemenné pole) nám stačí použiť výraz pre Lorentzovu silu:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Elektrické pole (rotačne súmerné):

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = qE_z = q \frac{\partial V(r, z)}{\partial z}, \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{(1 + r'^2)}{2V(r, z)} \left[\frac{\partial}{\partial r} V(r, z) - r' \frac{\partial}{\partial z} V(r, z) \right]$$
$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = qE_r = q \frac{\partial V(r, z)}{\partial r} \quad r' = \frac{dr}{dz}$$

$E(r)$ zabezpečí fokusovanie zväzku, preto nás zaujíma $r(z)$.

Vidíme že:

- Fokusovanie nezávisí od q a m
- Fokusovanie je priamo úmerné priestorovej zmene $V(z)/z$ - riziko elektrického prierazu
- Vysoká hodnota $V(r, z)$ v menovateli zhorší efekt zaostrenia, častica preletí príliš rýchlo cez šošovku + zväzok získava od E energiu.

Magnetické pole (rotačne súmerné)

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = qr \frac{d\phi}{dt} B_r,$$

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -qr \frac{d\phi}{dt} B_z,$$

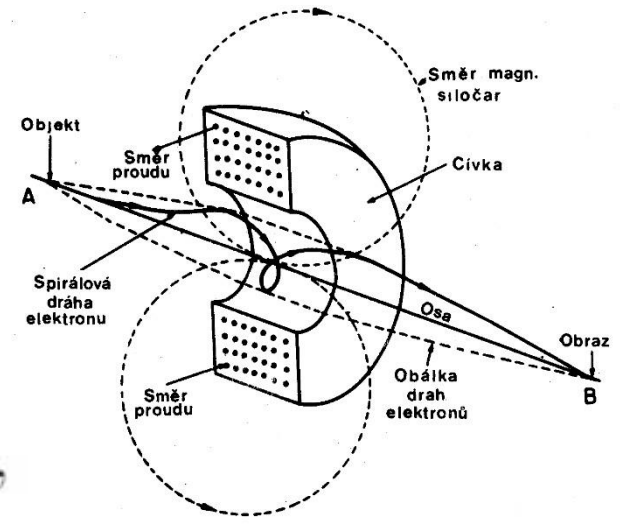
⇒

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{q}{2m} B_z,$$

$$\frac{d\phi}{dz} = \sqrt{\frac{q}{8mV}} B_z,$$

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{q}{8mV} r B_z^2.$$

V - rýchlosť



Vidíme že:

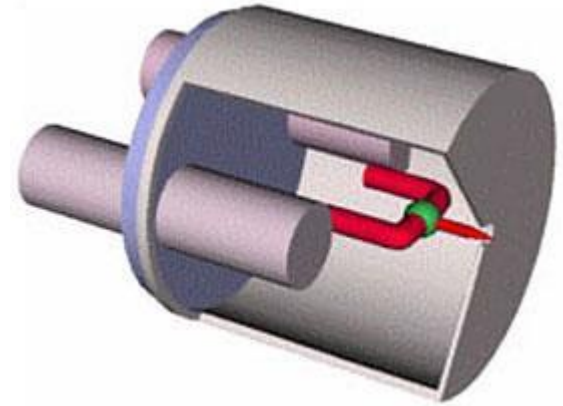
- Fokussovanie závisí od q a m
- Vysoké elektrické pole zvýši rýchlosť V a tým zhorší zaostrovaciu silu dr^2/dz^2

Na fokusovanie elektrónov sa používajú hlavne magnetické polia, ktoré možno na rozdiel od \mathbf{E} zväčšovať bez hrozby elektrického prierazu.

Pre ióny sa fokusovanie pomocou \mathbf{B} nepoužíva, kvôli citlivosti na q a m .

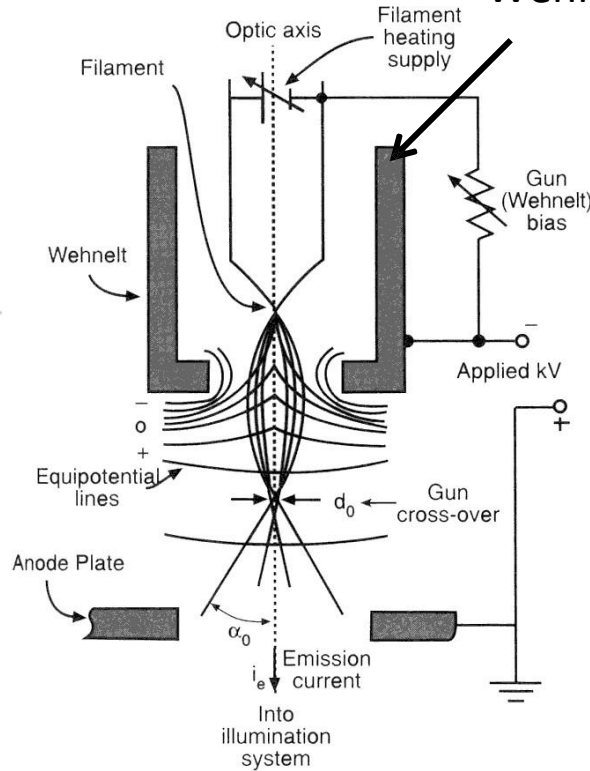
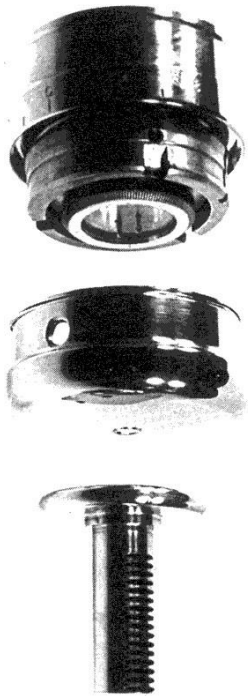
Zdroje elektrónov

- Horúce a studené katódy



Studená katóda – emisia poľom z veľmi ostrého hrotu

Wehneltov valec



Horúca katóda – problém so zabezpečením bodovosti zdroja

Table 3.1 Comparison of electron emission sources

Emitter type	Thermionic	Thermionic	Cold FE	Schottky FE
Cathode materials	W	LaB ₆	W	ZrO/W
Operating temperature (K)	2800	1900	300	1800
Cathode radius (μm)	60	10	<0.1	<1
Virtual source radius (nm)	15,000	5000	2.5	15
Emission current density (A cm ⁻²)	3	30	17,000	5300
Total emission current (μA)	200	80	5	200
Brightness	10 ⁴	10 ⁵	2×10 ⁷	10 ⁷
Maximum probe current (nA)	1000	1000	0.2	10
Energy spread at cathode (eV)	0.59	0.40	0.26	0.31
Energy spread at gun exit (eV)	1.5–2.5	1.3–2.5	0.3–0.7	0.35–0.7
Beam noise (%)	1	1	5–10	1
Emission current drift (% hr ⁻¹)	0.1	0.2	5	<0.5
Vacuum requirement (Torr)	≤10 ⁻⁵	≤10 ⁻⁶	≤10 ⁻¹⁰	≤10 ⁻⁸
Cathode life (h)	200	1000	2000	2000
Cathode regeneration	Not required	Not required	Every 6–8 h	Not required
Sensitivity to external influence	Minimal	Minimal	High	Low

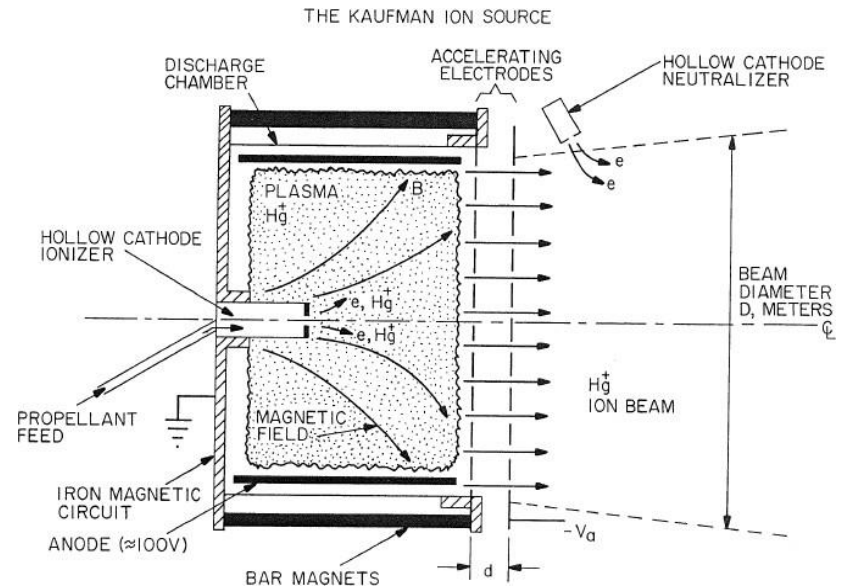
Zdroje iónov

Plošné - Kaufmanov iónový zdroj

Vyvinutý pôvodne pre vesmírne pohony

90% účinnosť, priemer až 1,5m

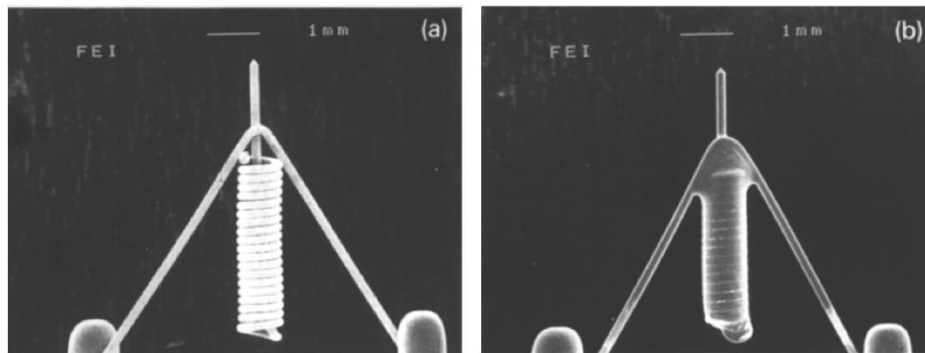
Slabé magnetické pole 5-12 mT zmagnetizuje dráhu elektrónov, čo vedie k efektívnejším ionizačným zrážkam



Bodové – LMIS – Liquid metal ion source

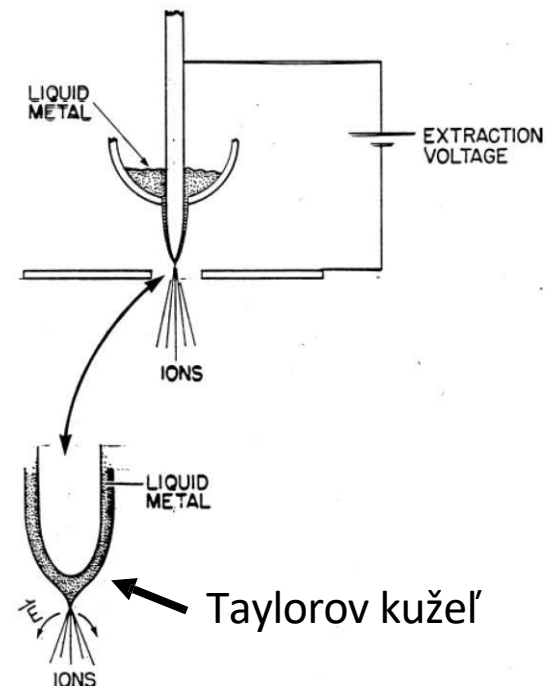
Ga – 30° teplota topenia + nízky tlak pár (vhodné do vysokého vákuua).

Plyny ako H sa schladia na kvapalinu.

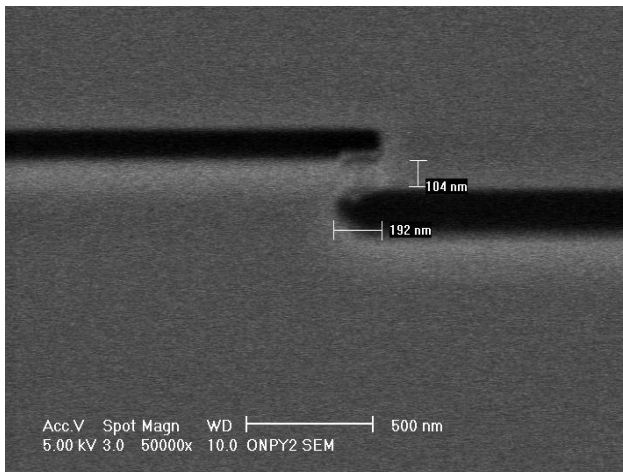
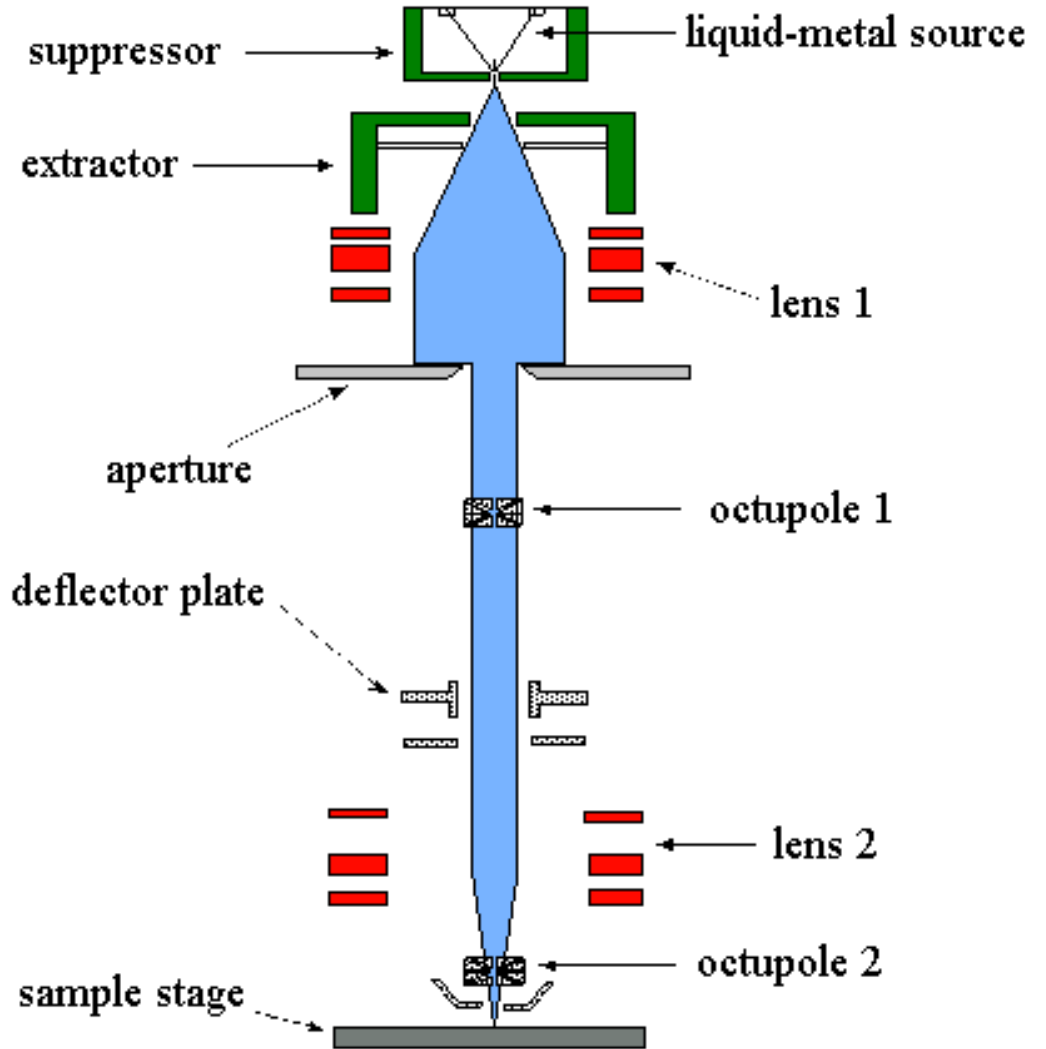
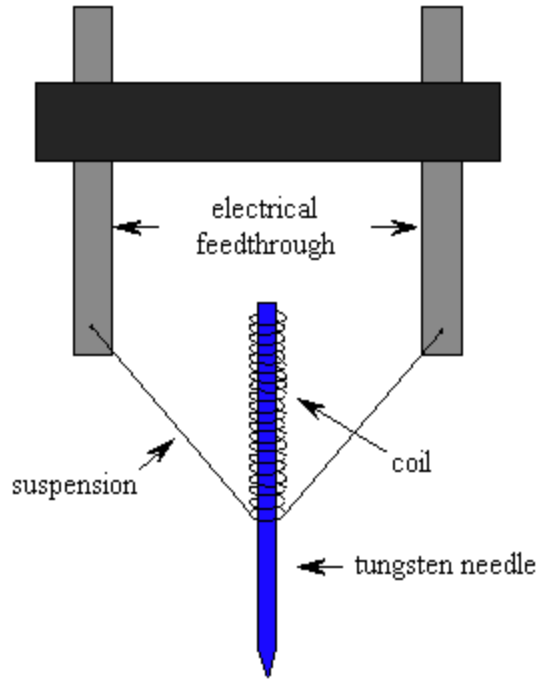


Before dipping

After dipping



FIB (Focused Ion Beam) system



Rozptyl elektrónov

Vysoko-energetické elektróny sa lepšie fokusujú, veľká kinetická energia potlačí význam Coulombovských odpudivých síl.

Pretože sú elektróny ľahké, budú sa na atómoch rezistu významne rozptyľovať, kým úplne stratia svoju kinetickú energiu. Navyše sú schopné vyrábať sekundárne elektróny. Zníženie energie elektrónov však znemožní exponovať hlbšie vrstvy rezistu.

Simulácia rozptylu v reziste:

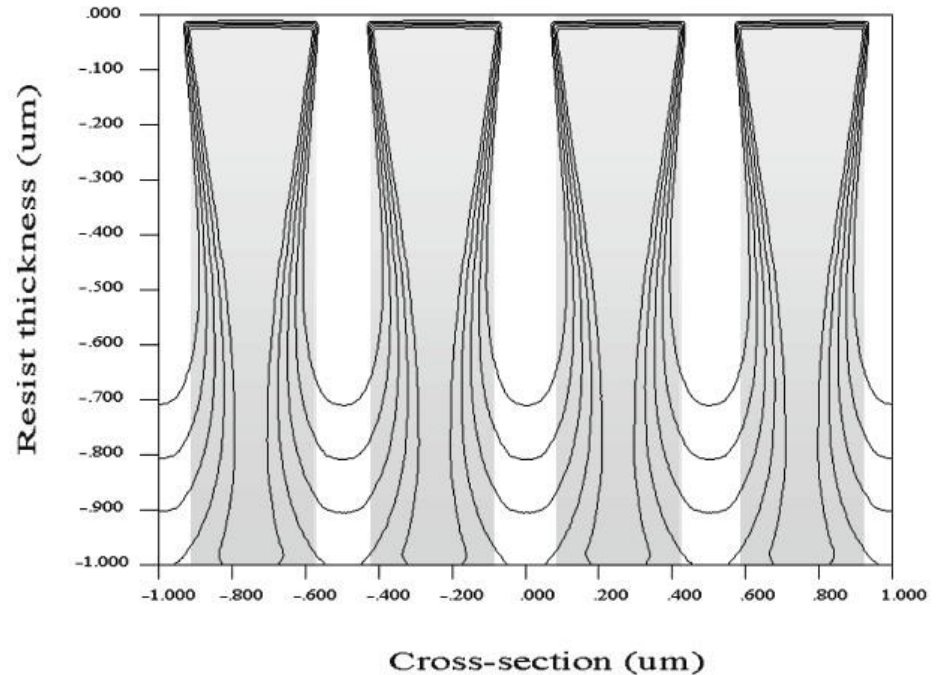
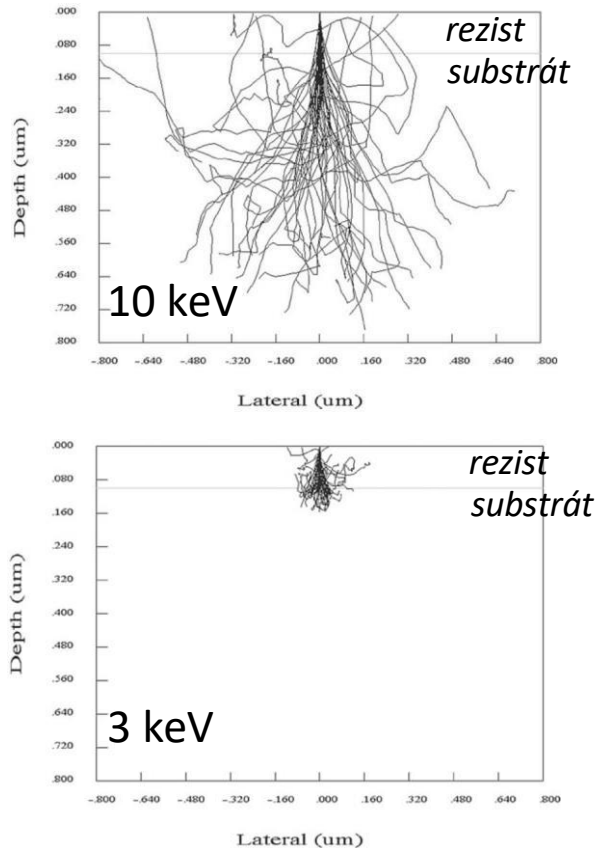
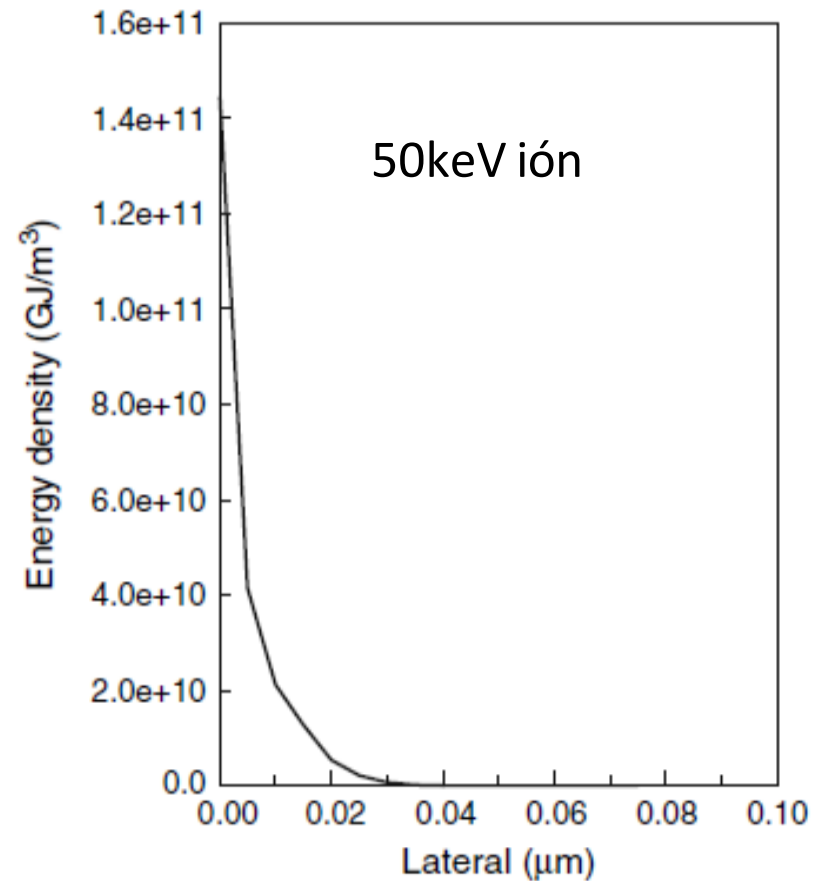
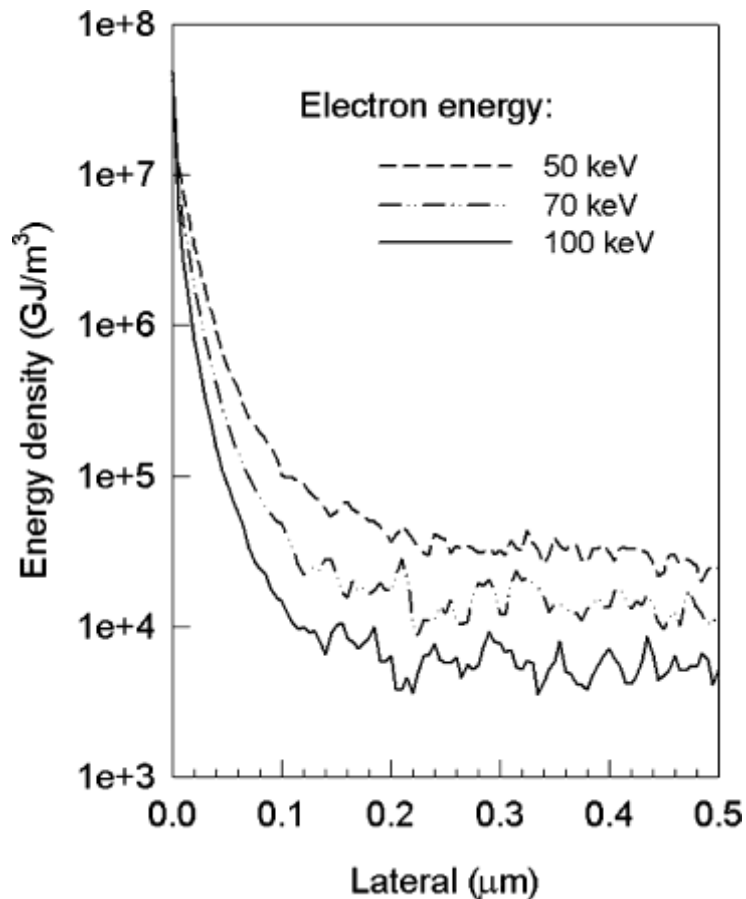


Fig. 3.11 Simulated resist cross-section profiles for 20-keV e-beam exposure of 1- μm PMMA resist layer on silicon substrate; the *shaded area* represents the ideal resist profile and the *contours* represent the actual resist profiles at exposure doses from 80 $\mu\text{C cm}^{-2}$ to 120 $\mu\text{C cm}^{-2}$ with 10 $\mu\text{C cm}^{-2}$ increment

Rozptyl iónov

Ťažké ióny majú menší rozptyl než elektróny (vid'. grafy), súčasne však ale majú menšiu hĺbku prieniku.



PSF – *point spread function*

Projekčná litografia nabitých častíc

Single beam nemôže konkurovať pri masovej výrobe optickej litografii (60ks/hod).

Projekcia cez masku narazí na problém jej pevnosti a coulombovského odpudzovania širokého zväzku ktorý je potrebný (viď SCALPEL system).

Multibeam projekcia masku nepotrebuje. Pre elektróny napr. MAPPER, pre ióny je systém podobný.

MAPPER
13 tis. elektrónových
lúčov, každý ovládaný
vlastnou MEMS –
napätie na laserom
ovládanej fotodióde
vychýli individuálny
zväzok .

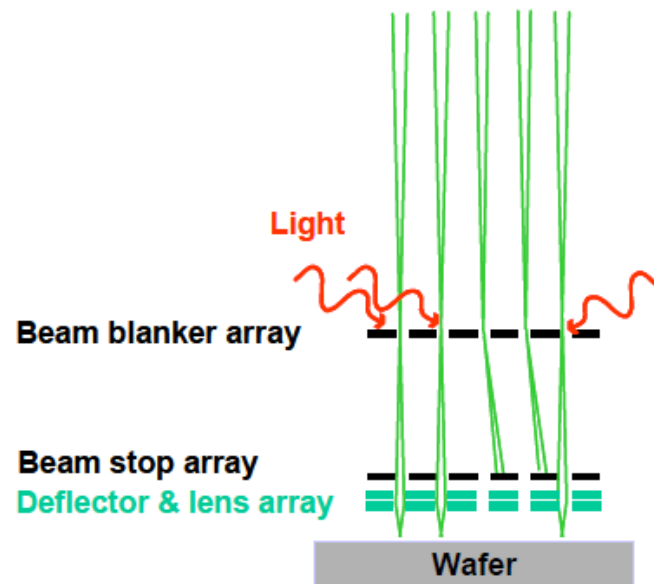
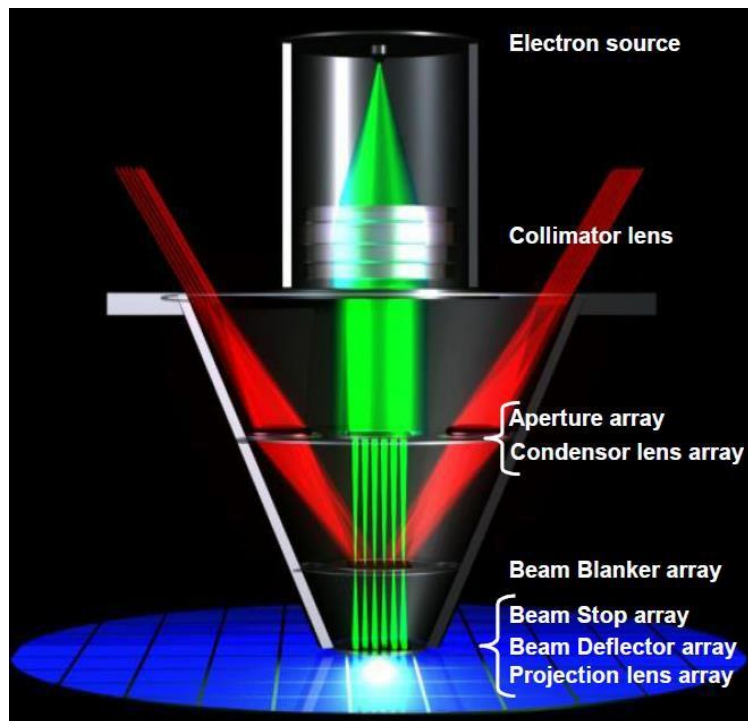
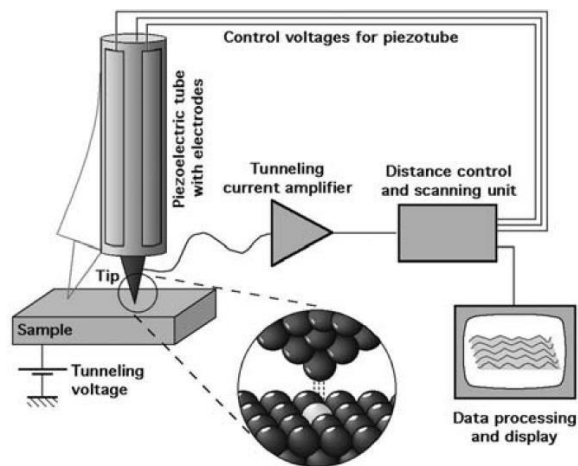


Figure 5. Schematic of 'beam on'/'beam off' states

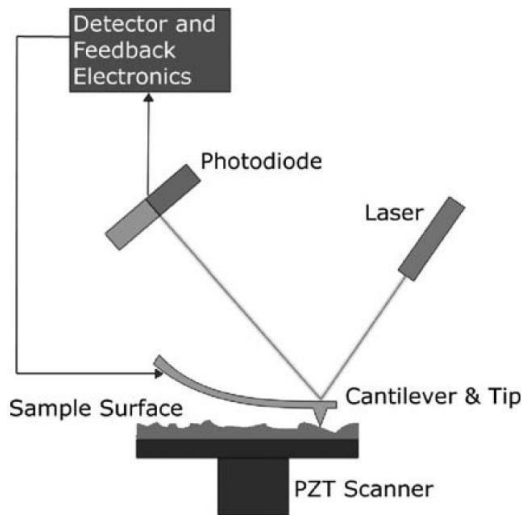
Sondové metódy STM, AFM a NSOM

Výnimočnú rozlišovaciu schopnosť *skanovacieho tunelového mikroskopu (STM)*, *mikroskopu atomárnych síl (AFM)* alebo optického mikroskopu v blízkom poli (NSOM) možno úspešne použiť na litografiu (STM, NSOM) alebo obrábanie materiálu (STM, AFM).

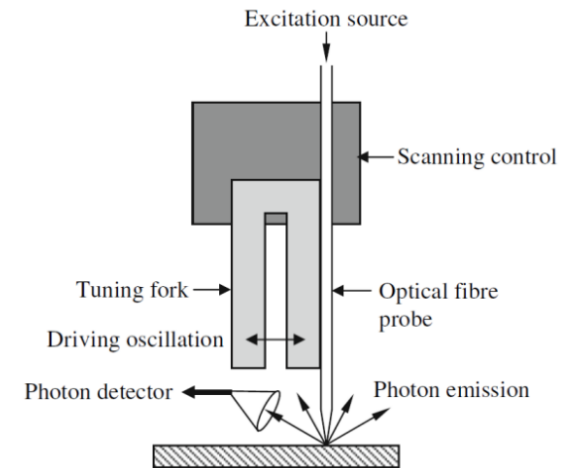
STM



AFM



NSOM



Litografia – pomalé, malá hĺbka expozície, horšie rozlíšenie než pri SPM.

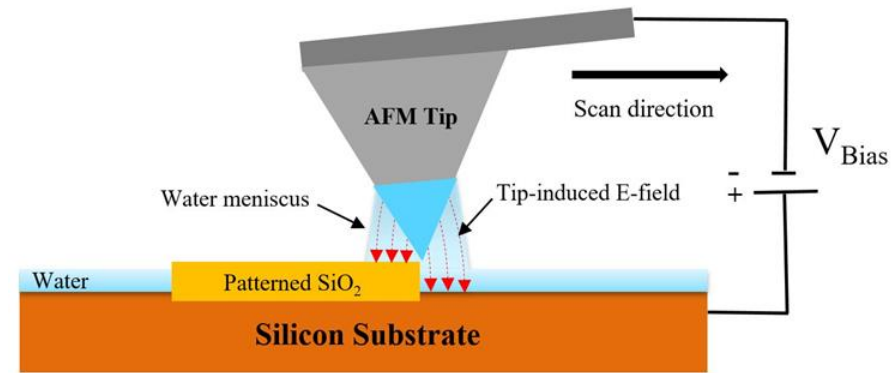
STM + AFM – *lokálna oxidačná litografia*, ak je hrot pripojený k zápornému pólu.

Uberanie materiálu – ak hrot použijem ako rydlo

Nanášanie materiálu – dip pen method

AFM nanolitografia

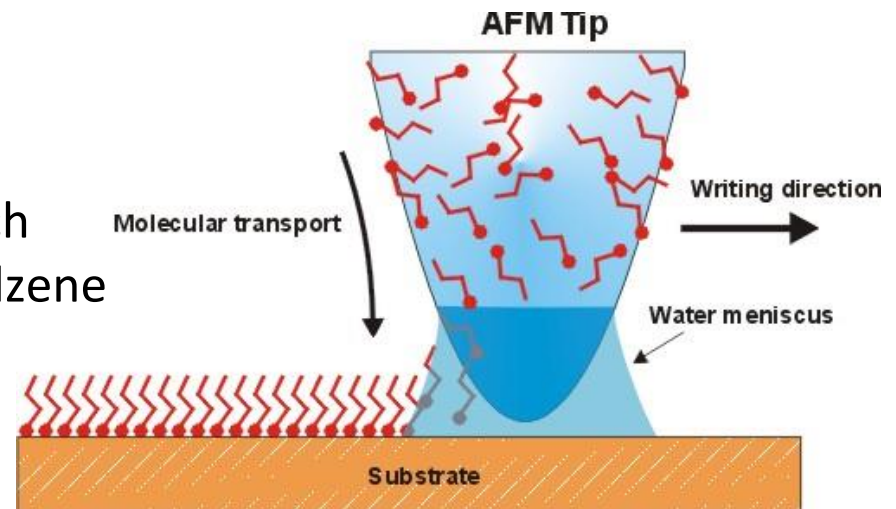
Priložením zodpovedajúcej intenzity elektrického poľa bude prebiehať elektrochemická reakcia na hranici voda-povrch a voda-ihla, cez vytvorený vodný mostík. Pri kladnom náboji na povrchu vrstvy a zápornom napätí na ihle bude narastať oxid v bode priamo pod ihlou.



Schematic illustration of Bias-Assisted AFM Nanolithography [Park systems]

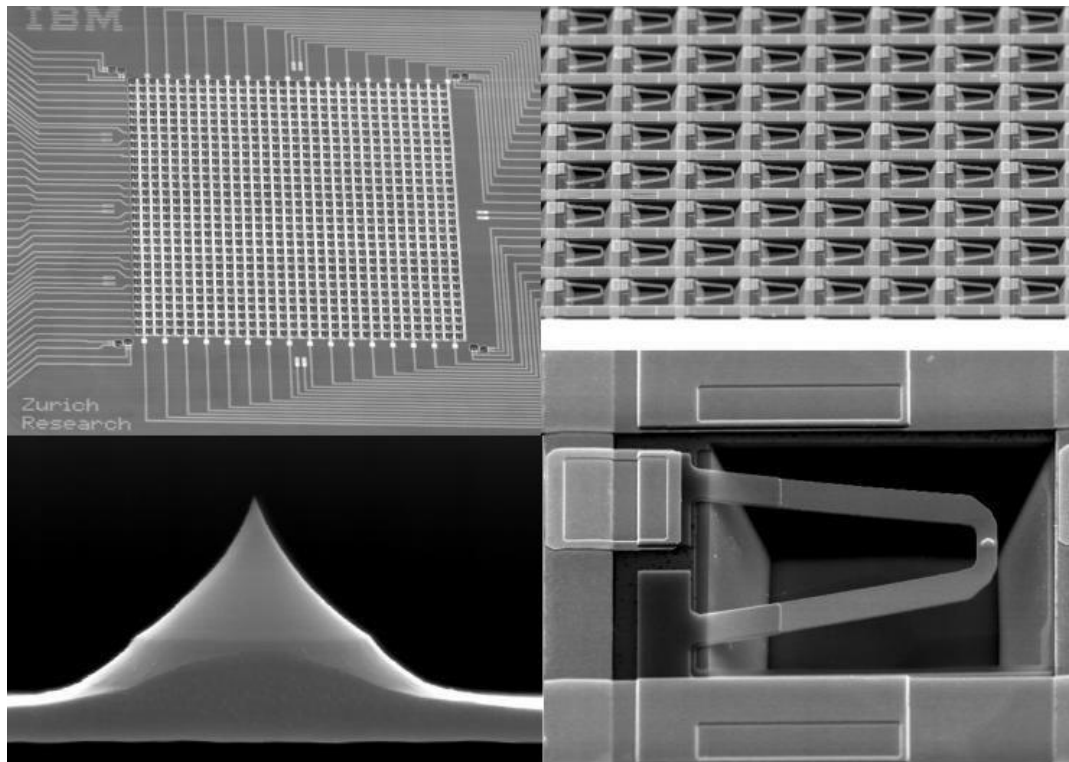
Dip pen nanolitografia

Dip-Pen Nanolitografia (DPN) je technika sondovej litografie pri ktorej je AFM hrot použitý na umiestnenie molekúl na povrch cez meniskus rozpúšťadla, ktorý sa prirodzene vytvorí vo vonkajšej atmosfére.



Veľkokapacitné sondové metódy

- Bežné STM a AFM hroty skanujú rýchlosťou 1-10 $\mu\text{m/s}$. Optimalizácia realizácie spätnej väzby umožnila dosiahnuť 3 mm/s, stále je to však málo pre veľkokapacitné využitie.
- Riešením sa javí byť konštrukcia multisondových zostáv (napr. IBM Zurich – Millipede, pre zápis dát)



Konvenčné litografické techniky

- Optická litografia (fotoligrafia) (436 –157 nm)
- Elektrónová litografia (10 keV –100 keV)
- Röntgenová litografia (5 nm – 0,4 nm)
- Iónová litografia (50 keV – 3 MeV)

Sondové litografické techniky

- AFM (Atomic force microscope)
- mechanicky vtláčanie ihly do materiálu (kontaktný mód)
- lokálnou oxidáciou - elektrickým poľom (polokontaktný mód)

- SPM (Scanning probe microscope)
- odparenie z ihly alebo desorpcia z povrchu elektrickým poľom
- zdroj nízkoenergetických elektrónov (1-10 eV)

Literatúra

Zheng Cui: *Nanofabrication Principles, Capabilities and Limits*, Springer Science & Business Media, 2008

Sami Fransilla: *Introduction to Microfabrication*, Wiley; 2nd Edition 2010

Harry J. Levinson: *Principles of Lithography*, 3rd Edition, SPIE, 2010