

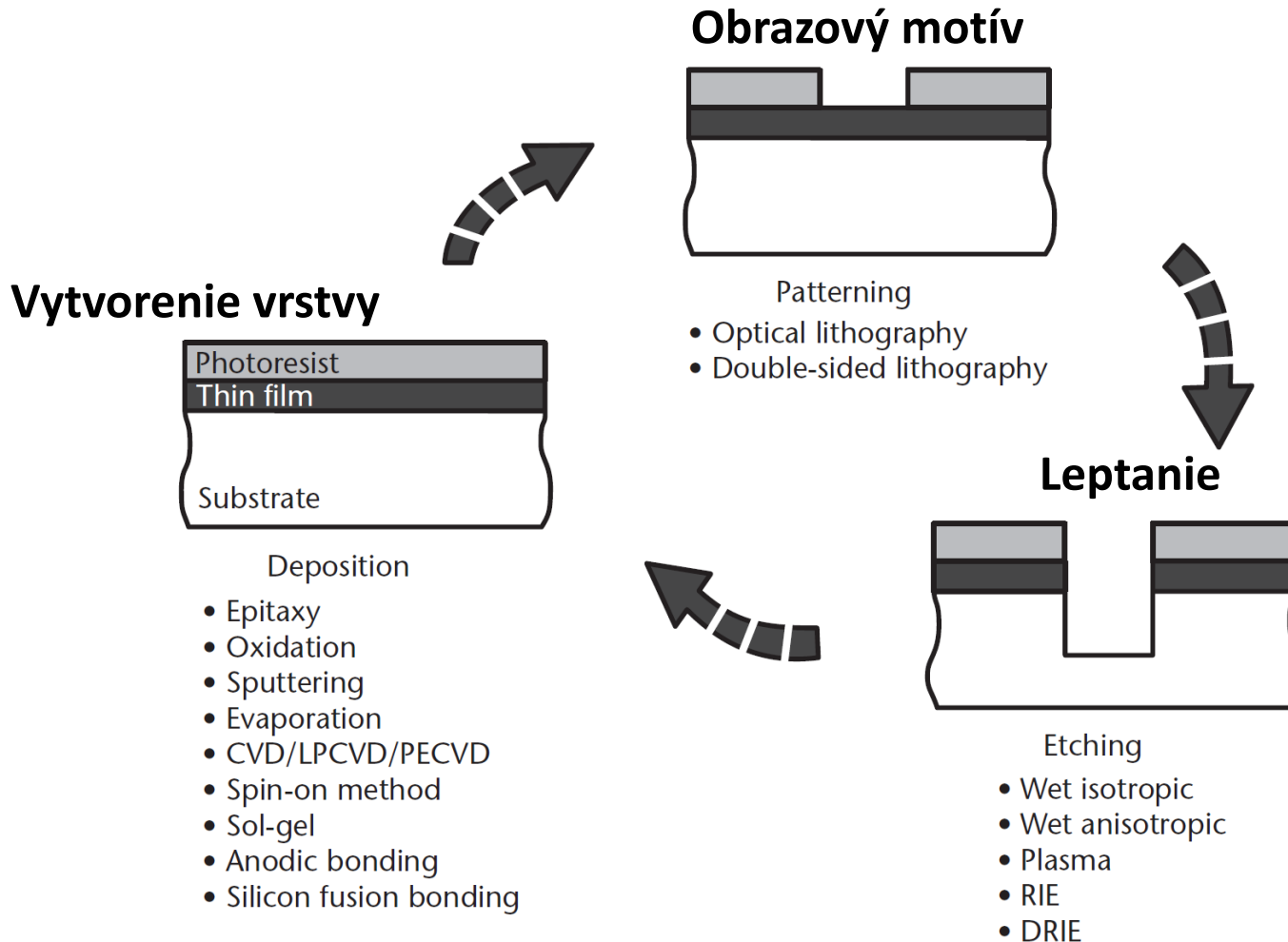
# Lekcia 4

## **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:

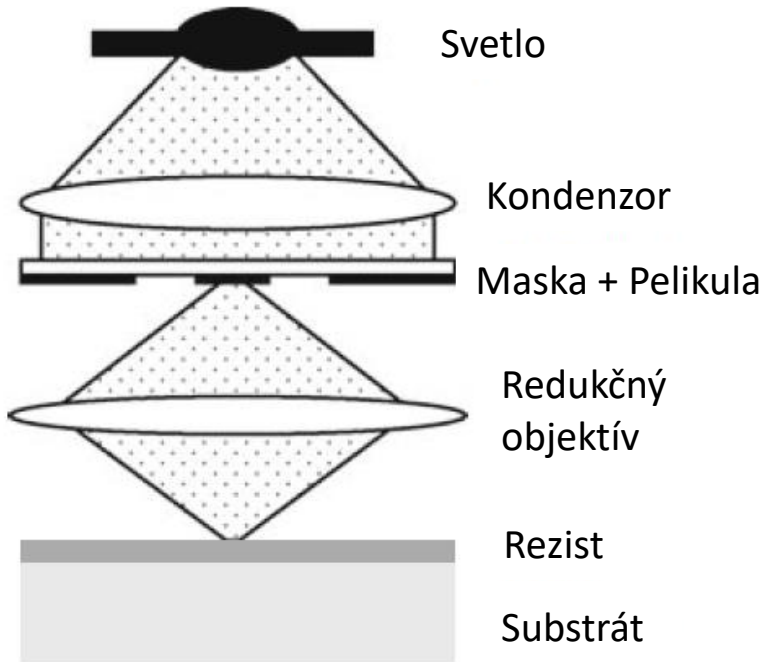
- Nanesenie fotosenzitívneho filmu - fotorezistu
- Zorientovanie masky/retiklu (*alligement*)
- Expozícia fotorezistu
- Vyvolanie vzorky

## Výzva:

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

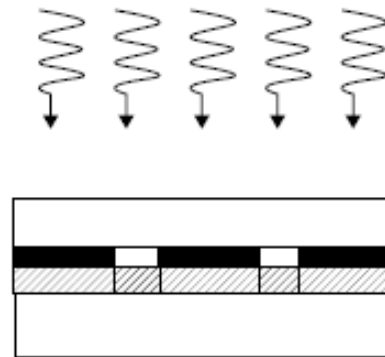
# Fotóny - základné expozičné metódy

## Projekčná litografia



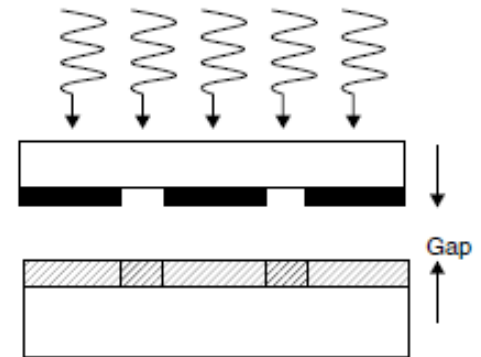
- Umožní projekciu zmenšeniny masky (5x typicky)
- Polohu substrátu je možné krokovať, a opakovane tak exponovať ostrý obraz čipu na celý wafer.

## Kontaktná litografia



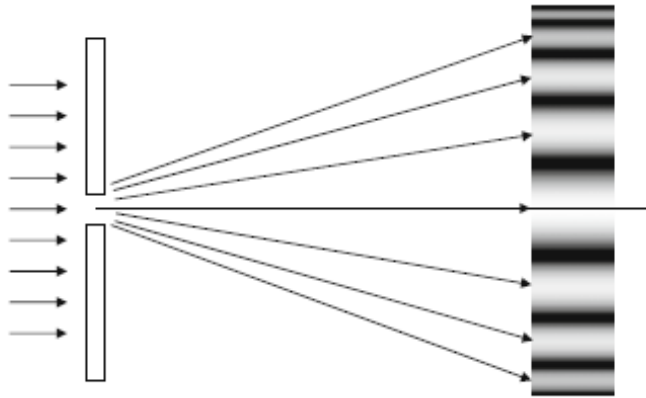
- Cena masky je privysoká pre sériovú výrobu mikro/nano štruktúr

## Separáčna litografia (proximity lithography)



- Medzera 3-50  $\mu\text{m}$
- Fresnelova, nie Franhouferova difrakcia

# Difrakčný limit => krátke $\lambda$

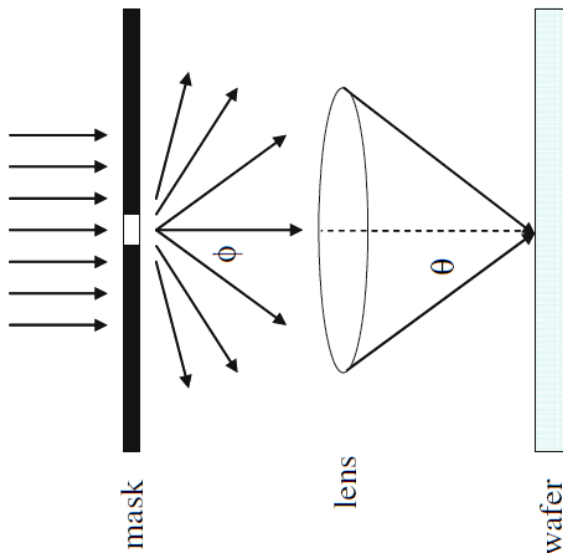


$$\sin\phi = m \frac{\lambda}{a}, m = 1, 2, 3, \dots$$

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

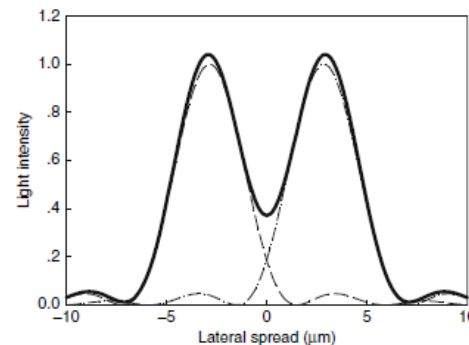
Problém nastane keď  $a \approx \lambda$

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.

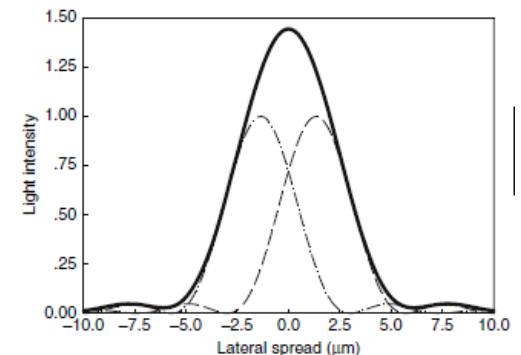


Rozlišovacia schopnosť (Rayleighovo kritérium):

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



VS.



# Skracovanie vlnovej dĺžky $\lambda$

- UV svetlo z ortuťových lúčnic, limitovaná dostupná intenzita žiarenia.
  - 'g'-čiara ( $\lambda = 436 \text{ nm}$ ).. rozlíšenie 7-1  $\mu\text{m}$
  - 'i'-čiara ( $\lambda = 365 \text{ nm}$ ).. rozlíšenie 1-0,35  $\mu\text{m}$
- 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)
    - $\lambda = 157 \text{ nm}$  ( $\text{F}_2$  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*.

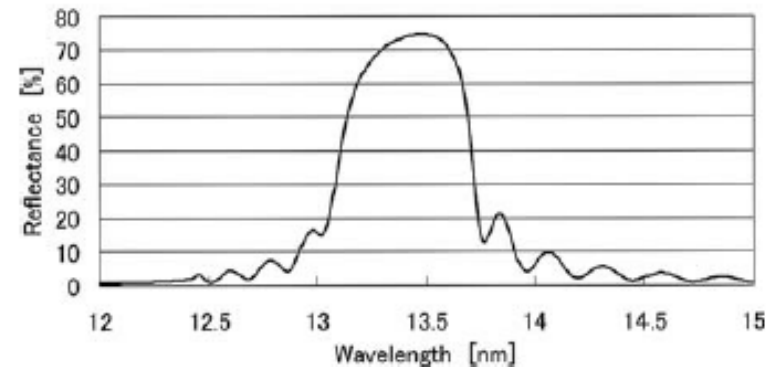
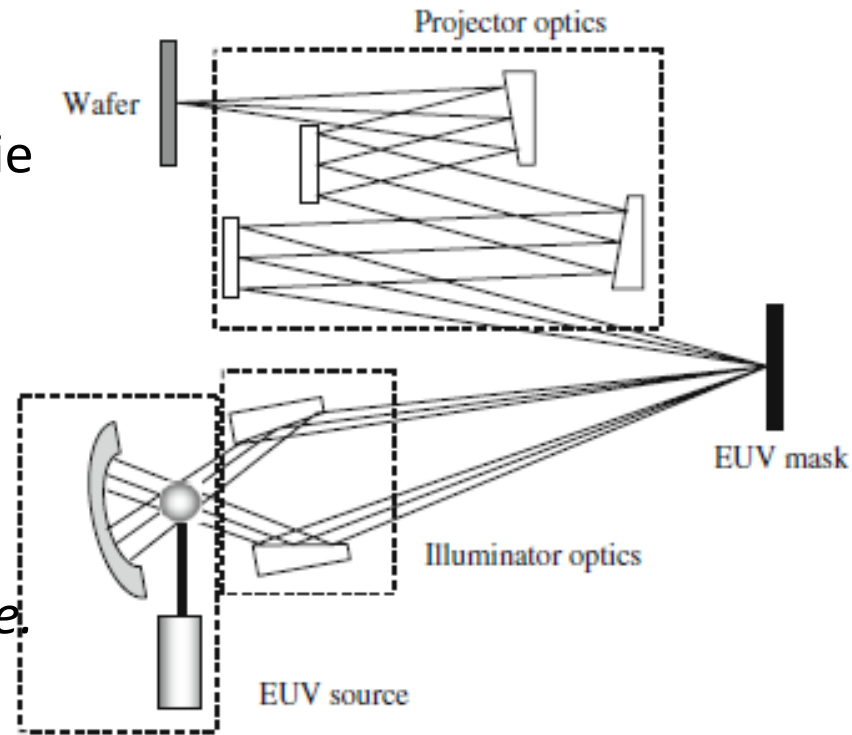
*Plazma* – vysokoionizované ióny Li, Xe<sup>+10</sup>, Sn<sup>+8</sup> až <sup>+12</sup>, pomocou pulzného pinču.

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

*Laser* – laserom indukovaný prieraz

### EUV optika

Základom je multivrstvové zrkadlo, tzv. *distributed Bragg reflector*. Kritickým faktorom je jeho životnosť.



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

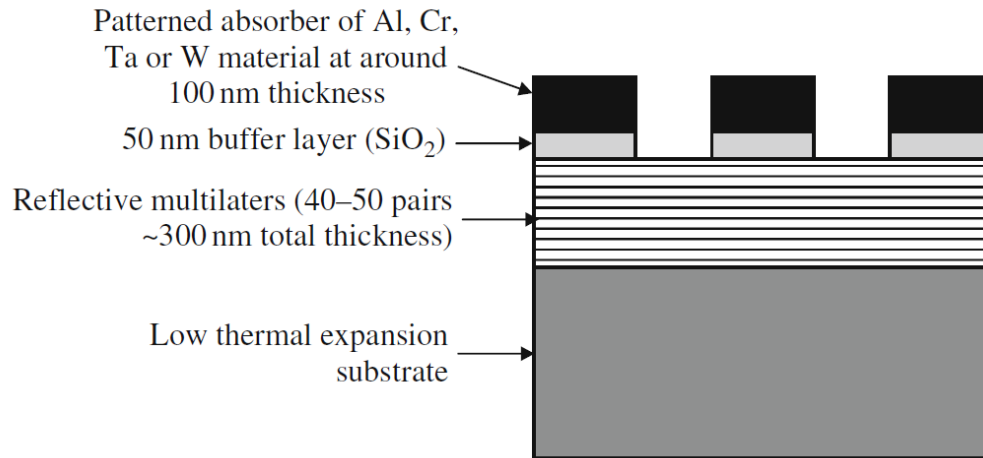
## EUV maska

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 je 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 $\mu$ m).

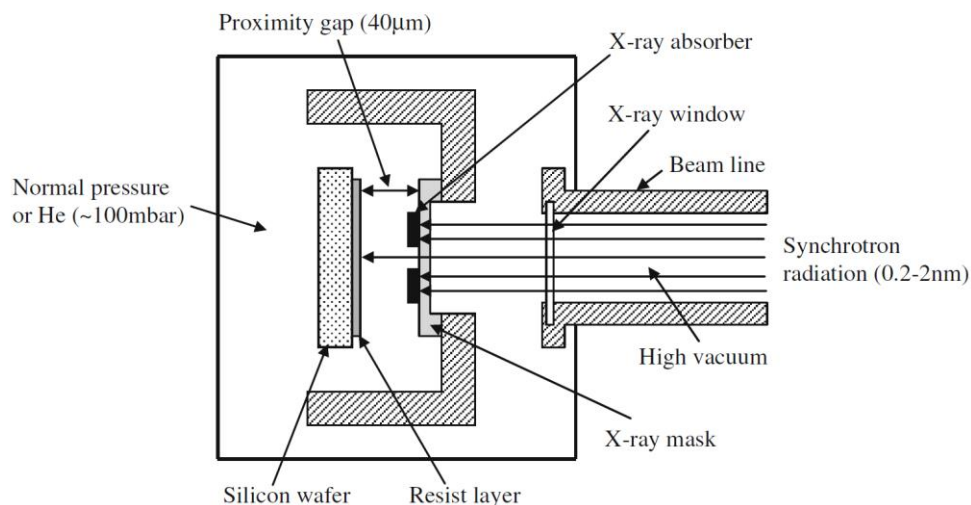


Fig. 2.12 Schematic of X-ray lithography

## Problémy:

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

# Zväčšovanie NA

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

$$\text{DOF} = k_3 \frac{\lambda}{2(1 - \sqrt{1 - \text{NA}^2})} \quad \text{NA} > 0,5$$

Zvýšenie NA zlepší rozlíšenie, ale zhorší hĺbku ostrosti:

(pozn. zhoršenie DOF platilo aj pri skracovaní  $\lambda$ )

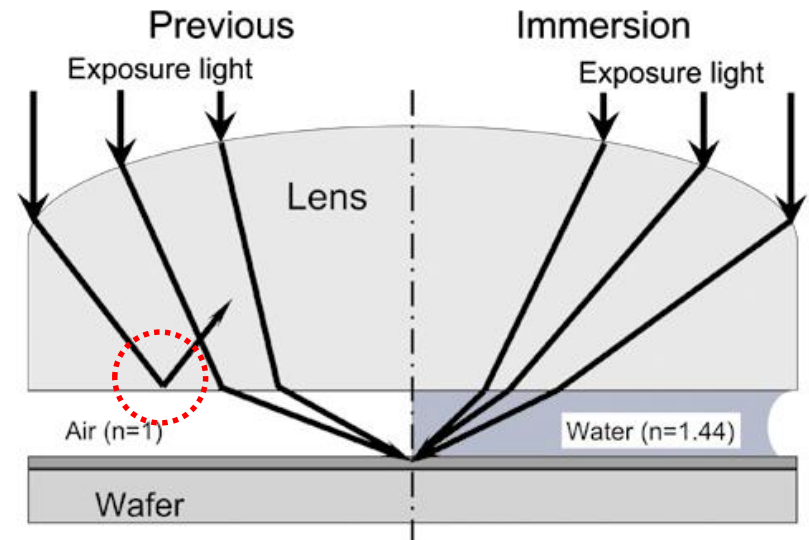
Pre výrobu veľkých waferov, ktoré nikdy nie sú ideálne rovné je DOF **dôležitejší parameter** ako rozlíšenie. Plus DOF vs. hrúbka rezistu. Až keď sme boli schopní pracovať s  $\text{DOF} < 0,5 \mu\text{m}$ , mohli sme začať zvyšovať NA.

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

$\text{NA} = n \cdot \sin \theta$ . 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.

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

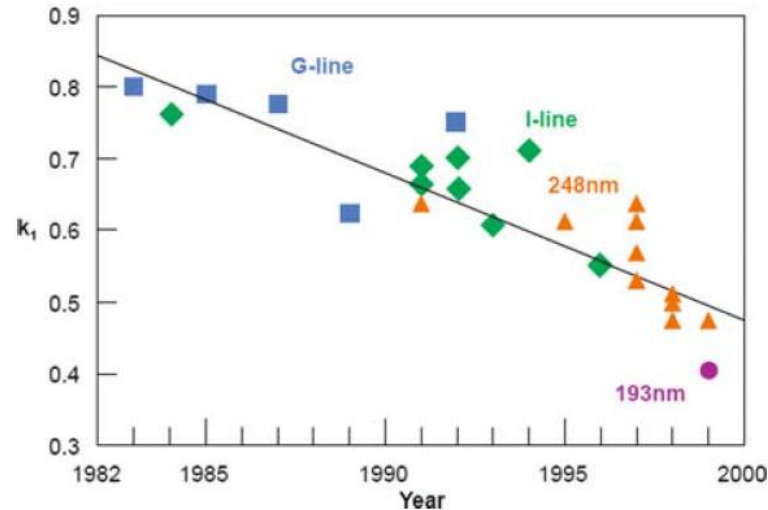
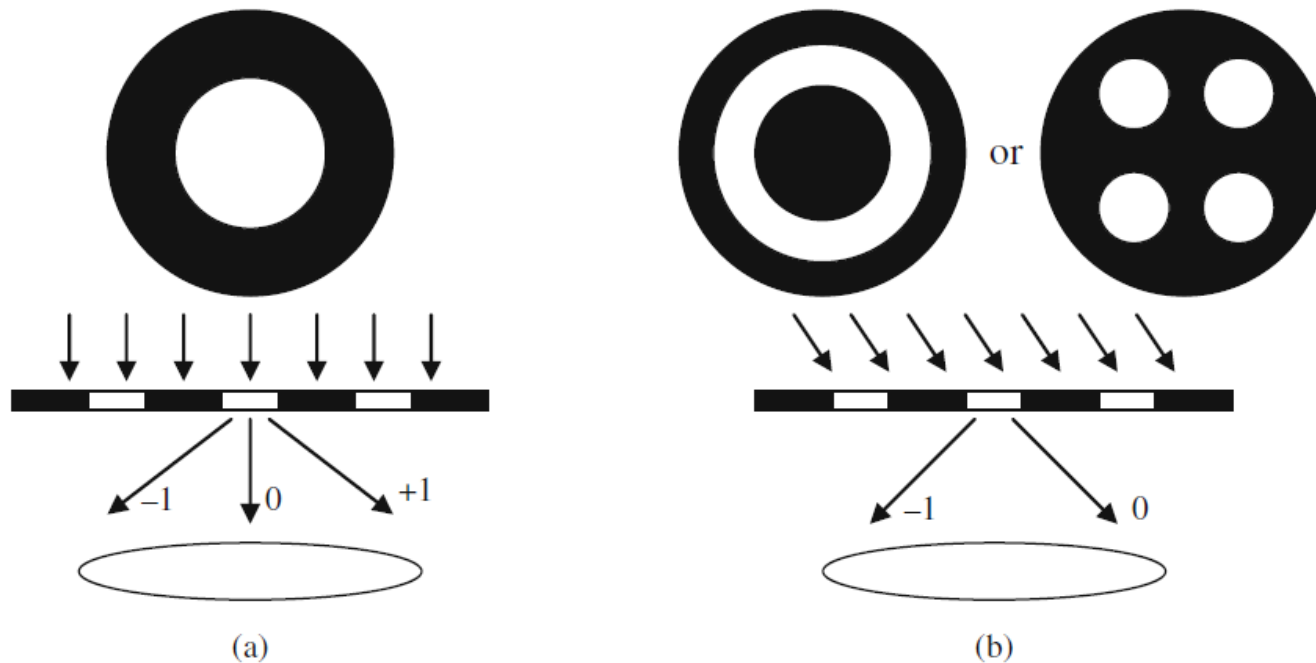


Table 2.4 Summary of resolution enhancement techniques

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)

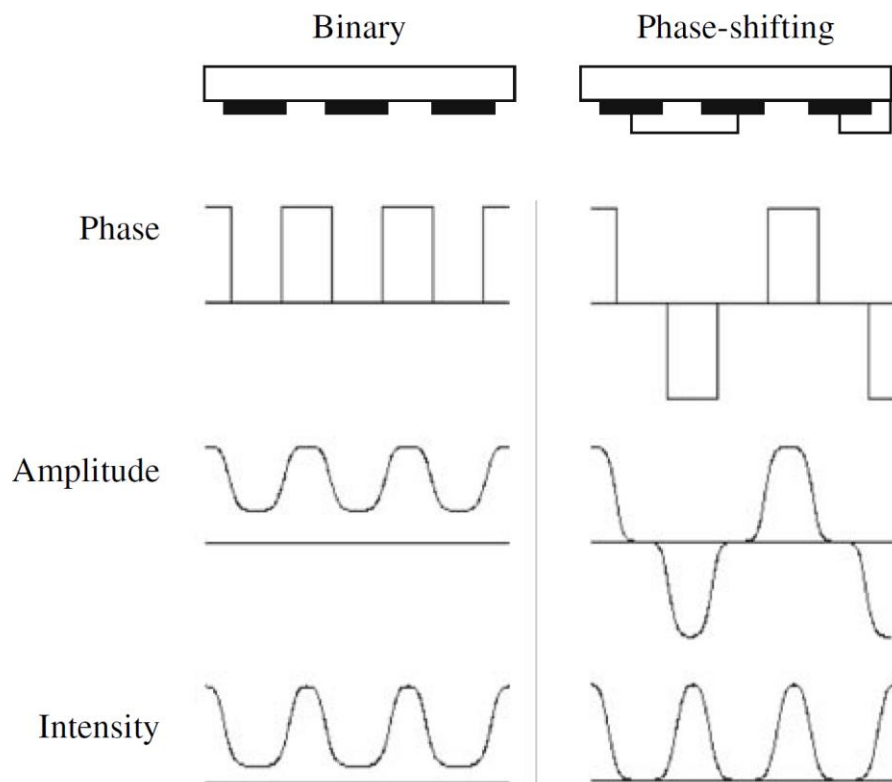
Pomocou vhodnej clonky prinútime svetlo dopadať na masku pod uhlom. Vďaka tomu sa otvor  $a$  javí pre svetlo väčší. Ďalej sa zlepší DOF. Zlepšenie funguje len pre istý typ štruktúr. Kvadrupól – čiarové štruktúry. Anulárna clona je univerzálnejšia, ale efekt už nie taký dramatický. Preto existujú programovateľné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

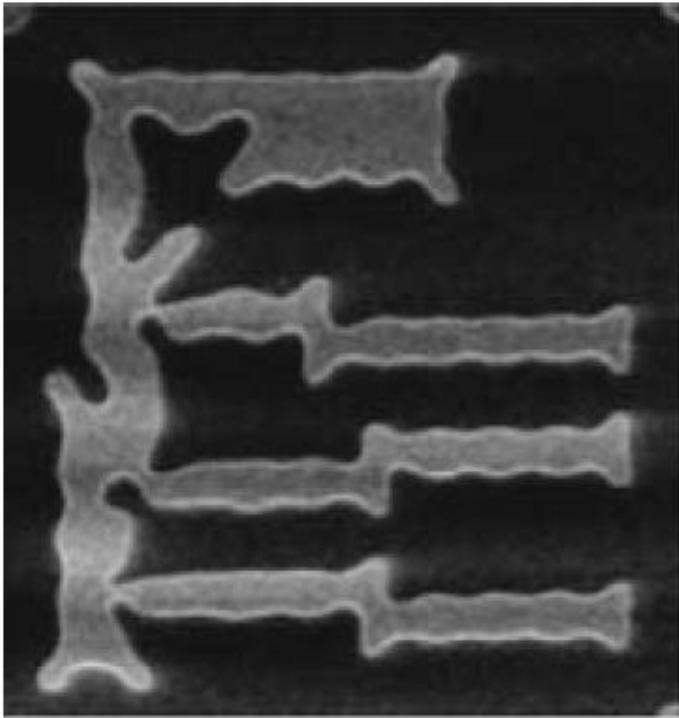
Niektoré oblasti masky sa zámerne urobia tenšie/hrubšie, aby svetlo prechádzajúce cez tieto oblasti zmenilo svoju fázu. Problémom sú oblasti, kde tenšie/hrubšie miesta končia.



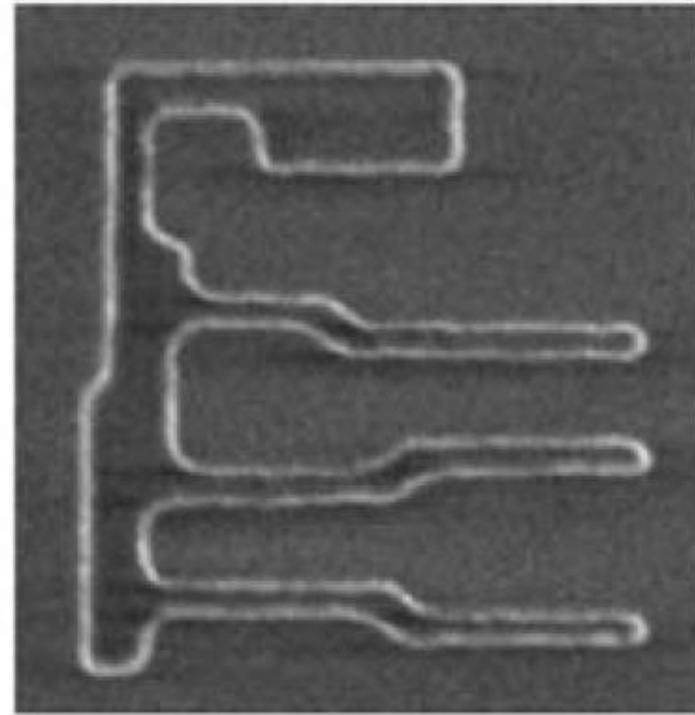
Ilustrácia ako môže PSM vytvoriť ostrejší obraz

# Optical Proximity Correction (OPC)

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



upravená maska

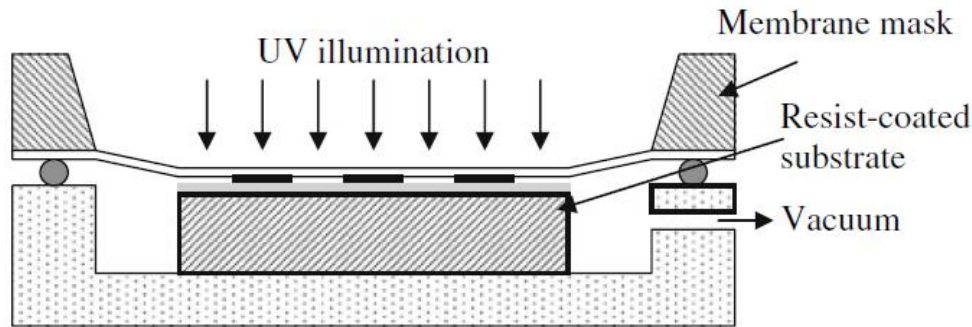


výsledok na reziste

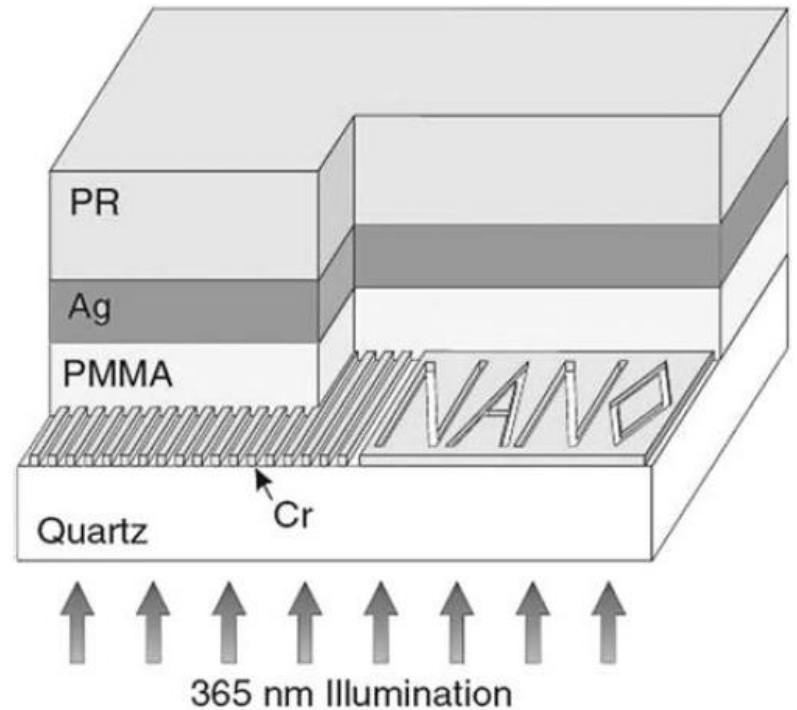
# Near-Field Optical Lithography

Lacná kusová výroba sub 100nm vzorov

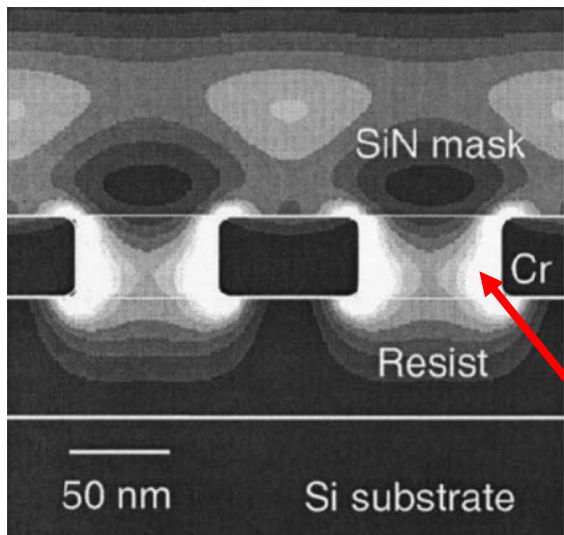
Limit  $\lambda/2$  je možné prekonať optikou v blízkom poli (evanescentnom poli), s bežnými UV zdrojmi. Evansc. vlna sa však šíri iba do 100 nm vzdialenosti, preto je expozícia plytká a je nutný dokonalý kontakt.



**Silver superlens** SPP v tenkej vrstve striebra ožiari fotorezist PR



Simulácia šírenia evanescentnej vlny



Povrchové plazmóny, zlý *line edge roughness LER*

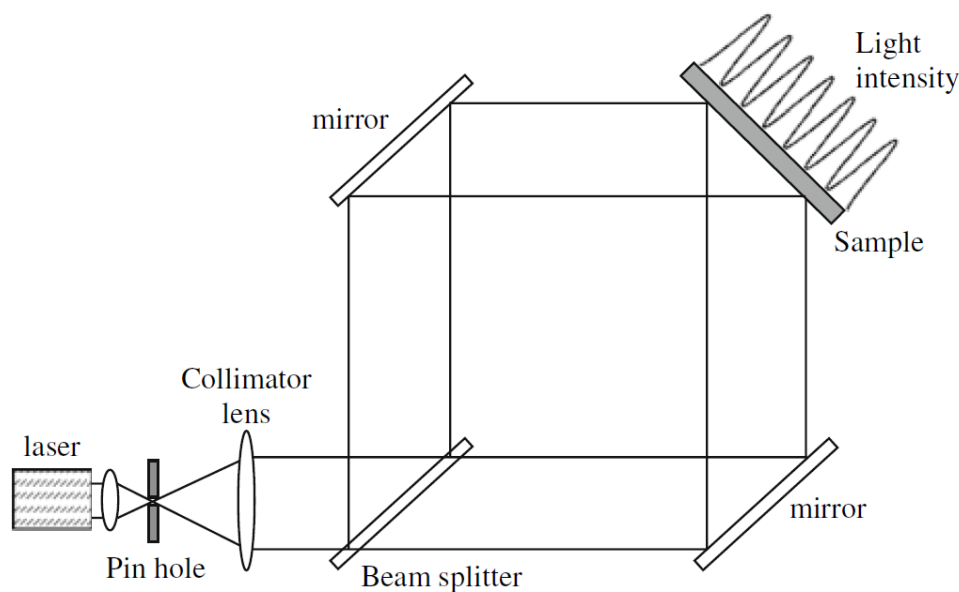
# Interferometrická optická litografia

Známa od 1970 z výroby hologramov.

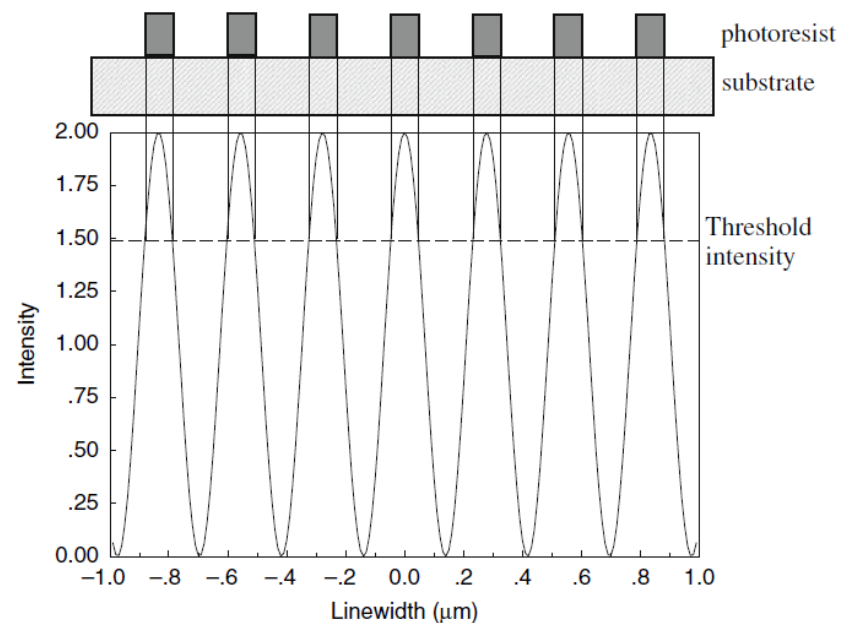
Fotorezist je exponovaný interferenčným obrazcom.

Je schopná vytvoriť iba čiary alebo body (2x čiara otočená o  $90^\circ$ ), 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  
skanuje lúč

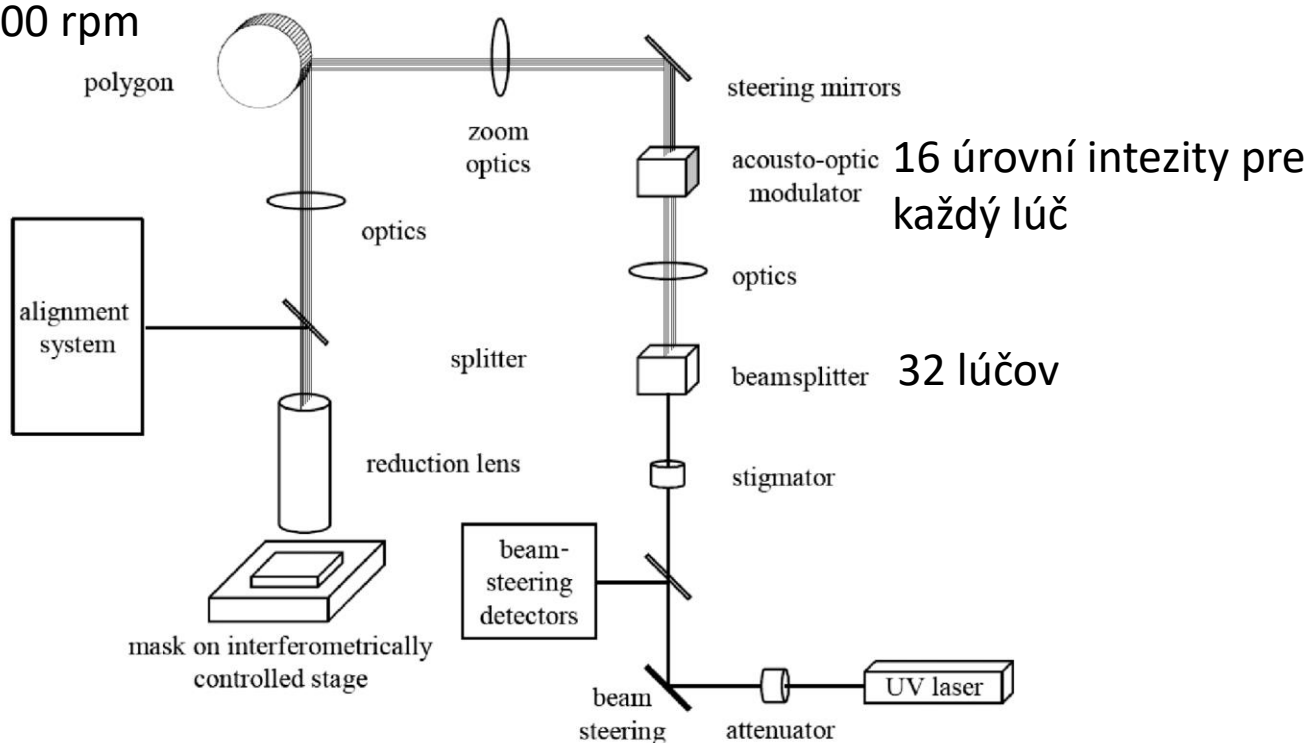


Figure 7.17 Schematic of the ALTA architecture.

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

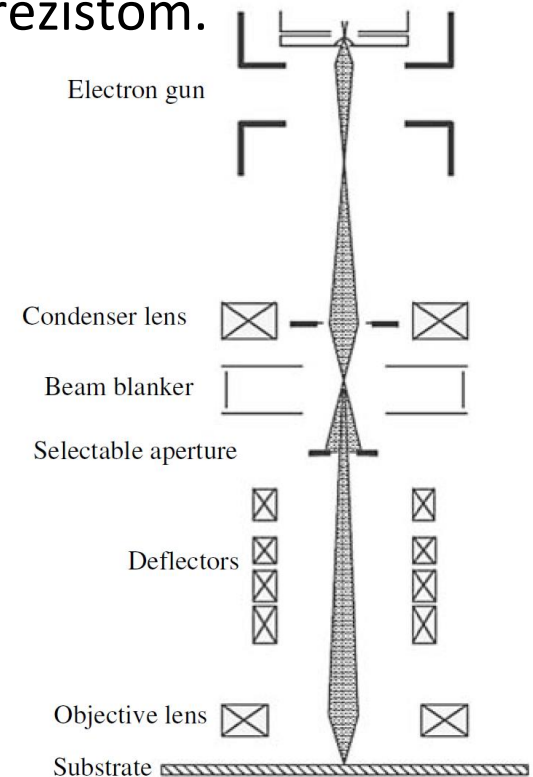
- E-beam litografia sa vyvinula v 1960 tých rokoch z SEM, keď sa zistilo, že PMMA (polymetylmetakrylát - plexisklo) možno použiť ako rezist citlivý na nabité častice. Napriek nižšej citlivosti zostáva vďaka výbornému priestorovému rozlíšeniu najpoužívanejší rezistom.

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.



# Litografia nabitými zväzkami

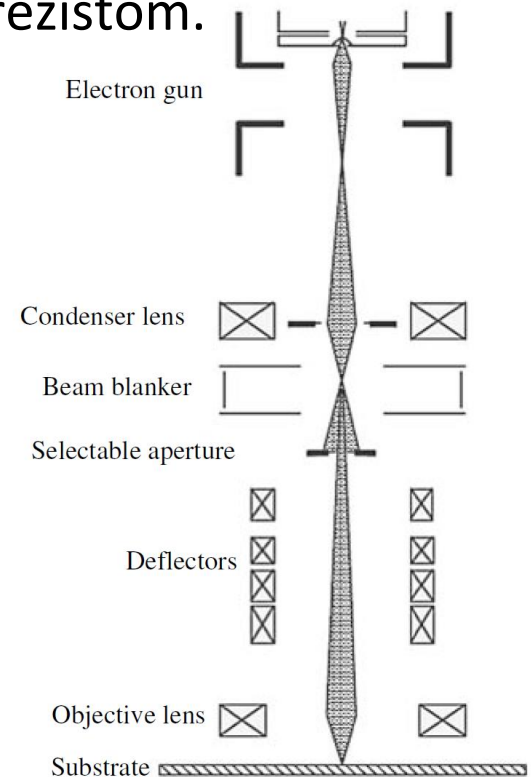
- E-beam litografia sa vyvinula v 1960 tých rokoch z SEM, keď sa zistilo, že PMMA (polymetylmetakrylát - plexisklo) možno použiť ako rezist citlivý na nabité častice. Napriek nižšej citlivosti zostáva vďaka výbornému priestorovému rozlíšeniu najpoužívanejší rezistom.

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)

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

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

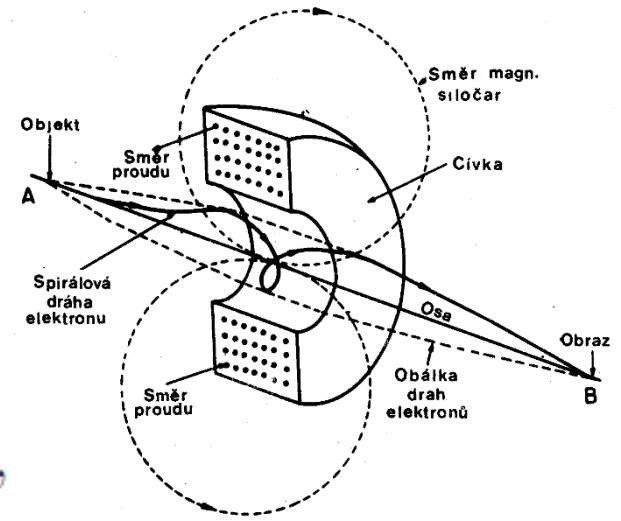
⇒

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

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

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

$V$  - rýchlosť



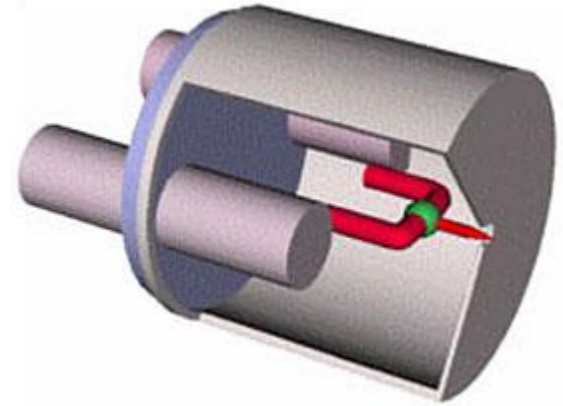
Vidíme že:

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

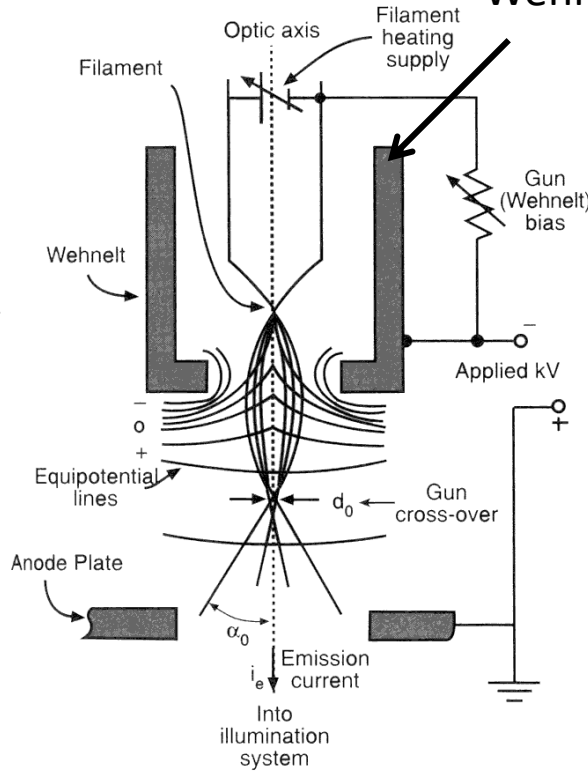
# Zdroje elektrónov

- Horúce a studené katódy



Wehneltov valec

**Studená katóda – emisia poľom z veľmi ostrého hrotu**



**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 <sub>6</sub>	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 <sup>-2</sup> )	3	30	17,000	5300
Total emission current (μA)	200	80	5	200
Brightness	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	2×10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>
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 <sup>-1</sup> )	0.1	0.2	5	<0.5
Vacuum requirement (Torr)	≤10 <sup>-5</sup>	≤10 <sup>-6</sup>	≤10 <sup>-10</sup>	≤10 <sup>-8</sup>
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

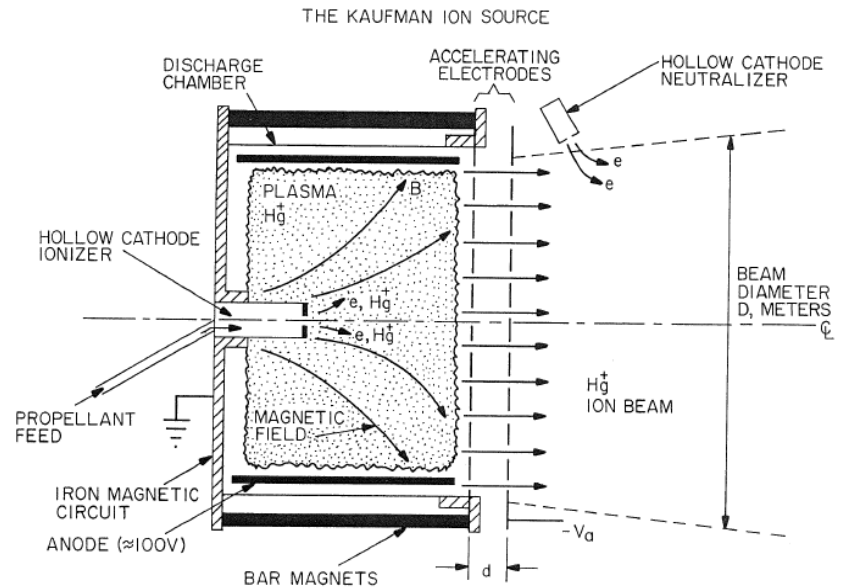
# Zdroje iónov

## Plošné - Kaufmanov iónový zdroj

Vyvinutý pôvodne pre vesmírne pohony

90% účinnosť, priemer až 1,5m

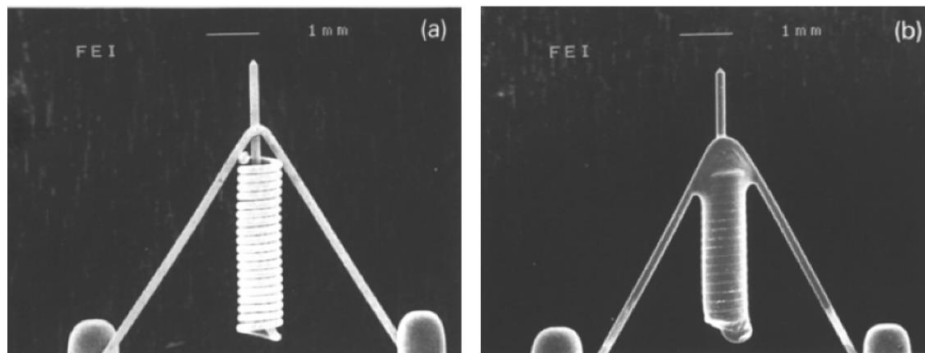
Slabé magnetické pole 5-12 mT zmagnetizuje dráhu  
Elektrónov, čo vedie k efektívnejším ionizačným  
zrážkam



## Bodové – LMIS – Liquid metal ion source

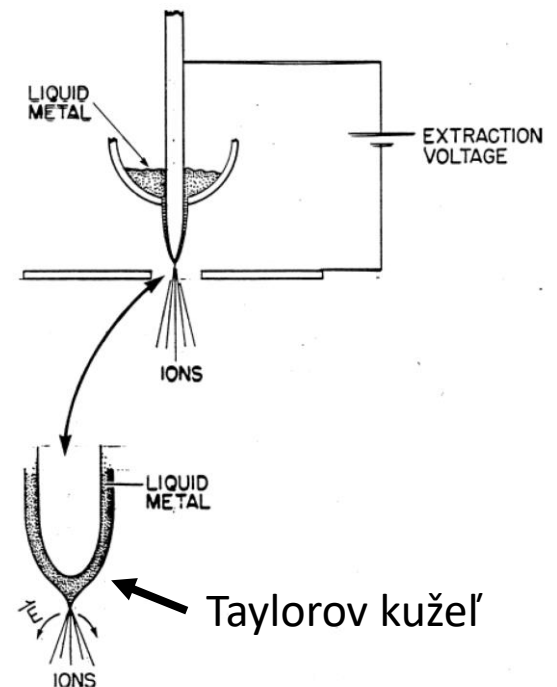
Ga – 30° teplota topenia + nízky tlak pár  
(vhodné do vysokého vákuu).

Plyny ako H sa schladia na kvapalinu.



Before dipping

After dipping



Taylorov kužeľ



# 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:

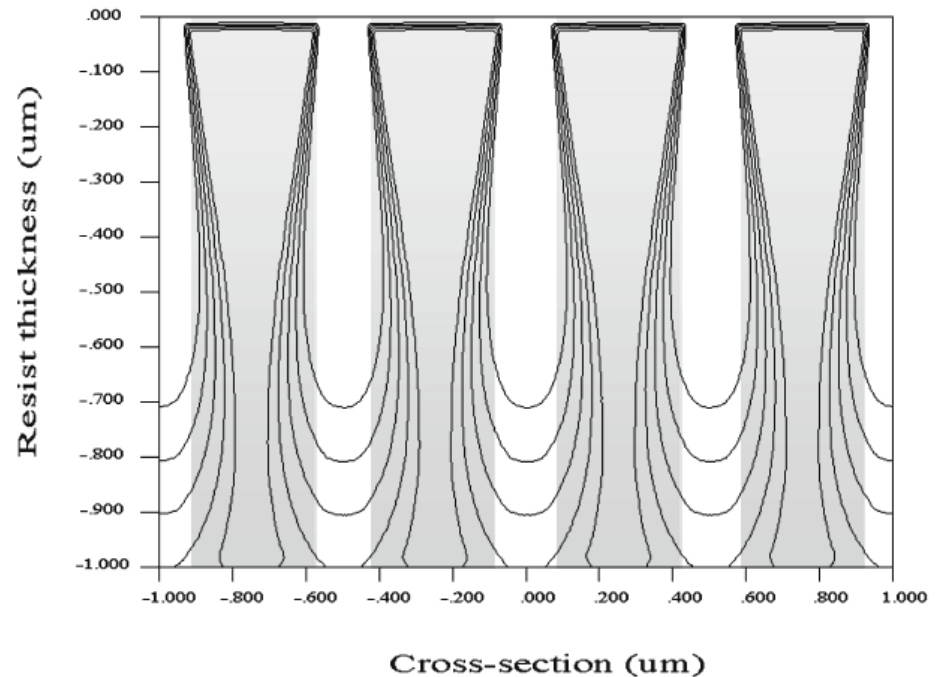
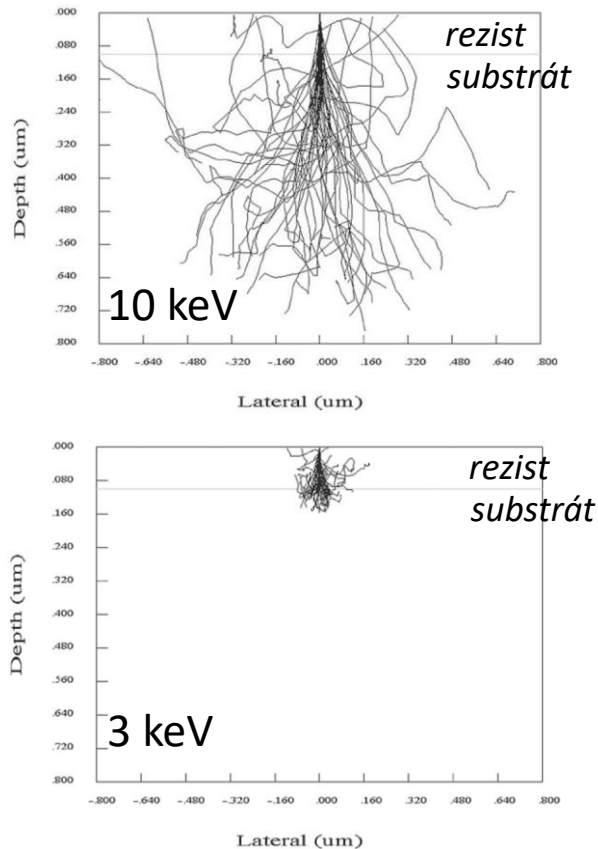
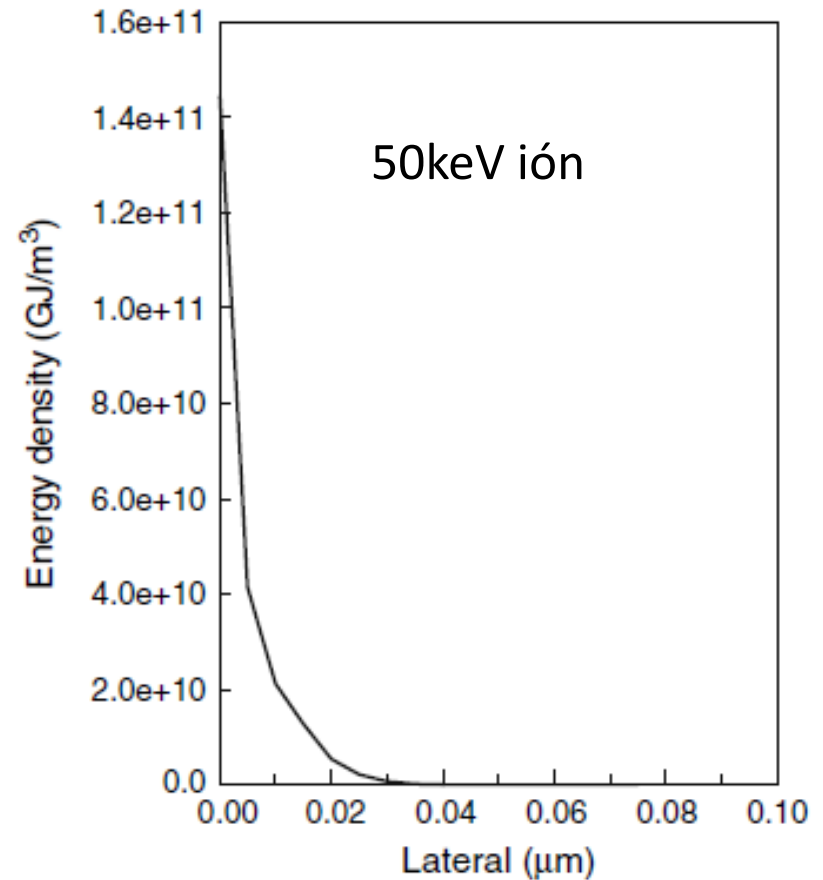
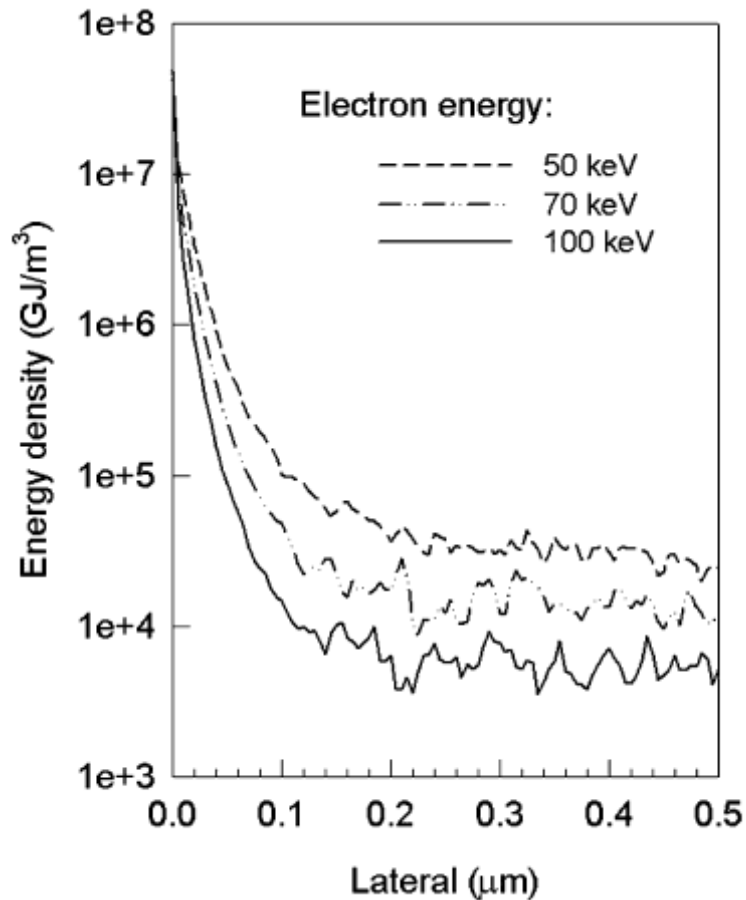


Fig. 3.11 Simulated resist cross-section profiles for 20-keV e-beam exposure of 1- $\mu\text{m}$  PMMA resist layer on silicon substrate; the *shaded area* represents the ideal resist profile and the *contours* represent the actual resist profiles at exposure doses from  $80 \mu\text{C cm}^{-2}$  to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

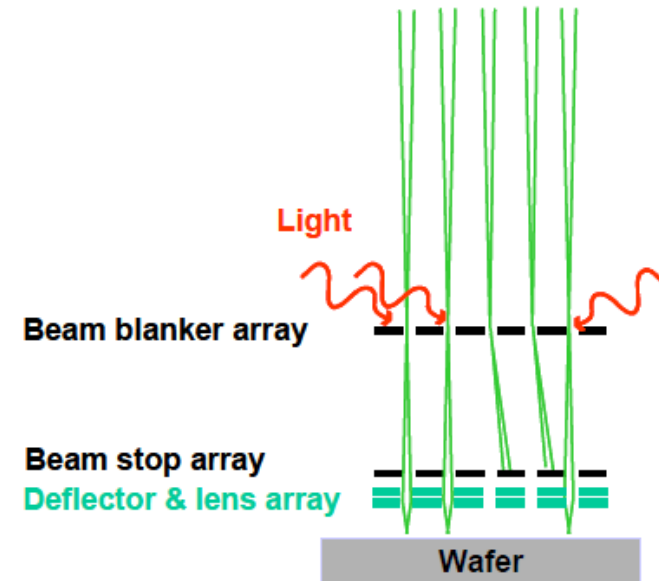
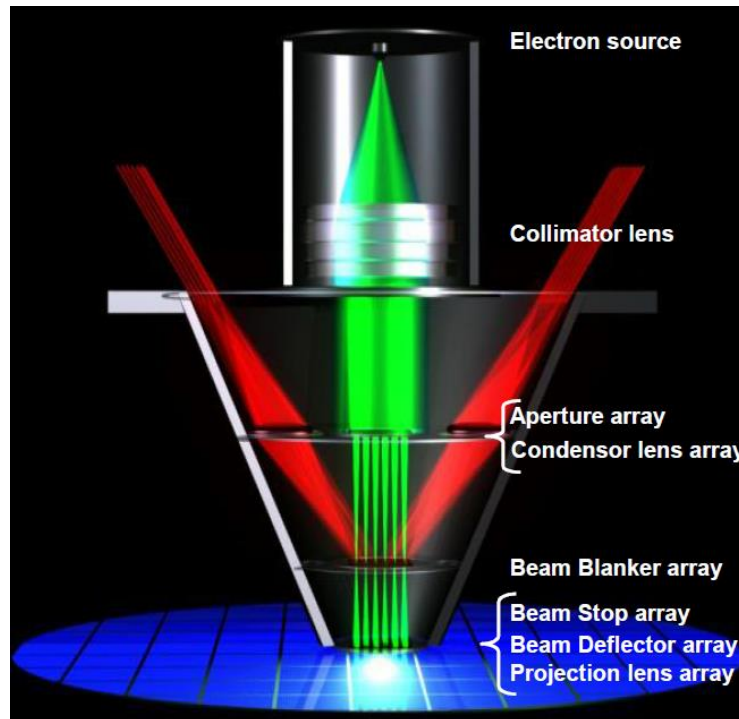
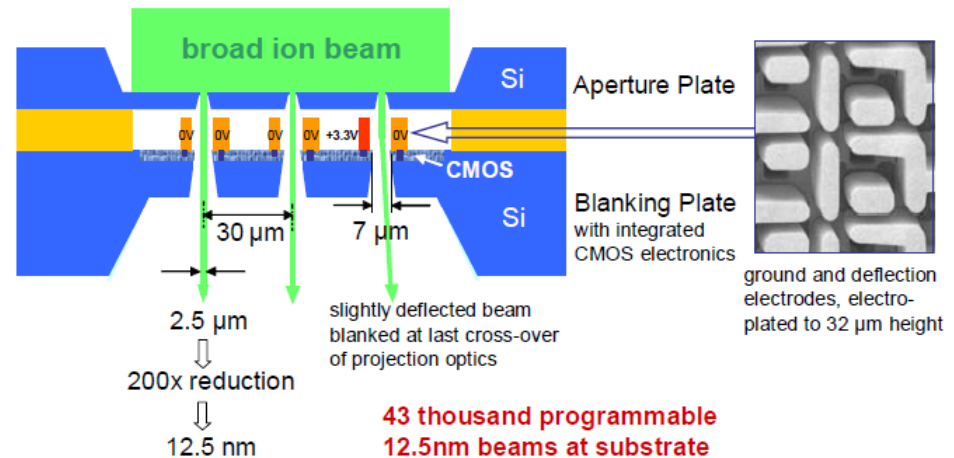
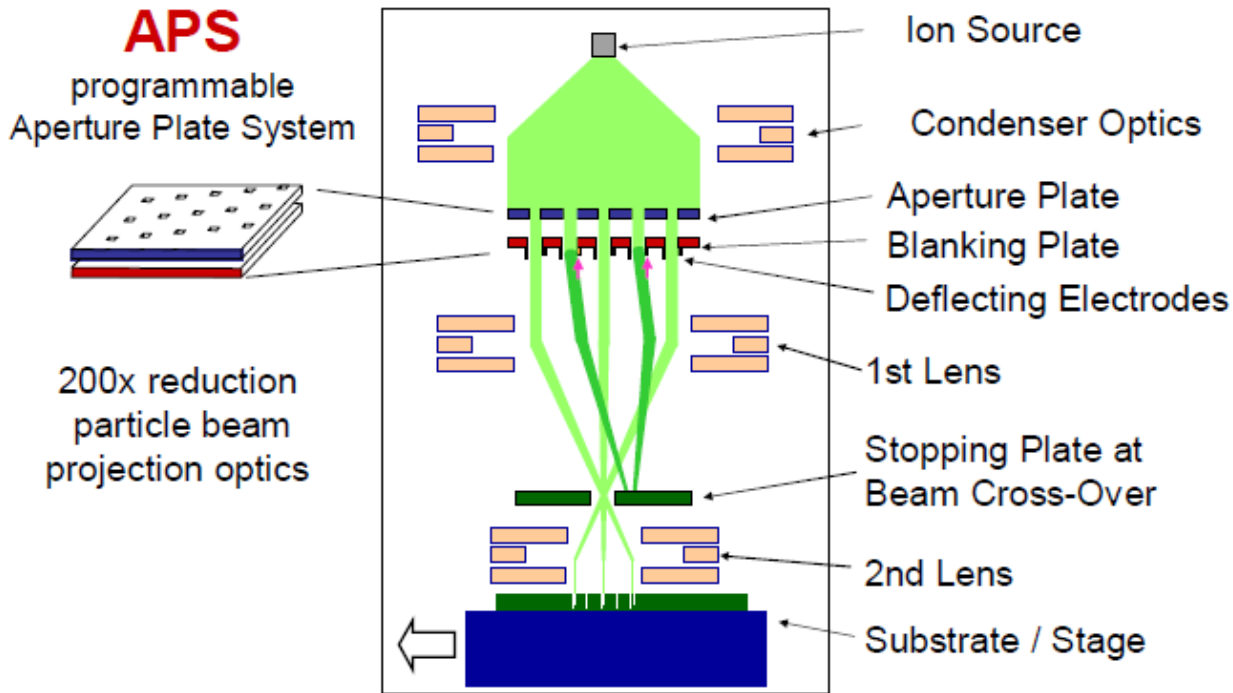


Figure 5. Schematic of 'beam on'/'beam off' states

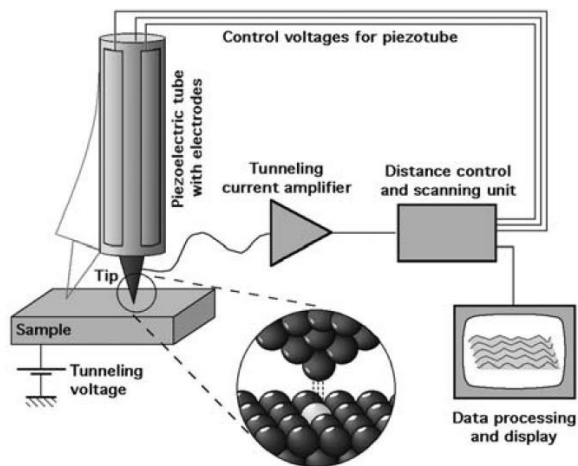
# Ióny - Projection Mask-Less Lithography



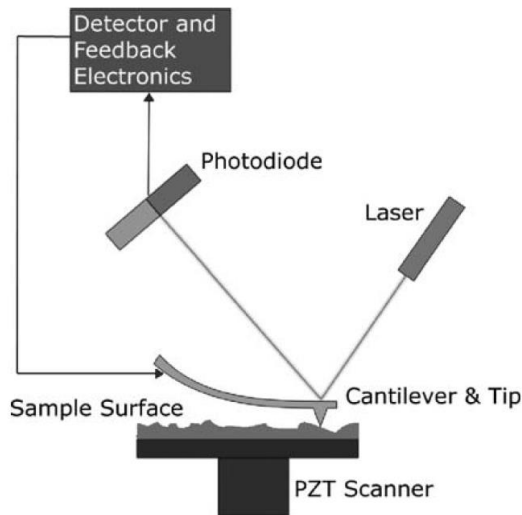
# Sondové metódy STM, AFM a NSOM

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).

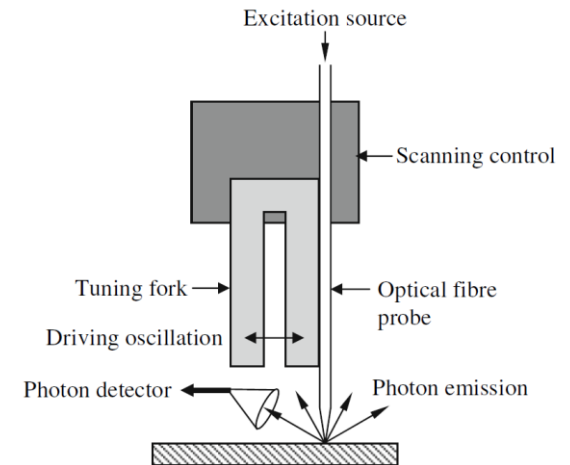
## STM



## AFM



## NSOM



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

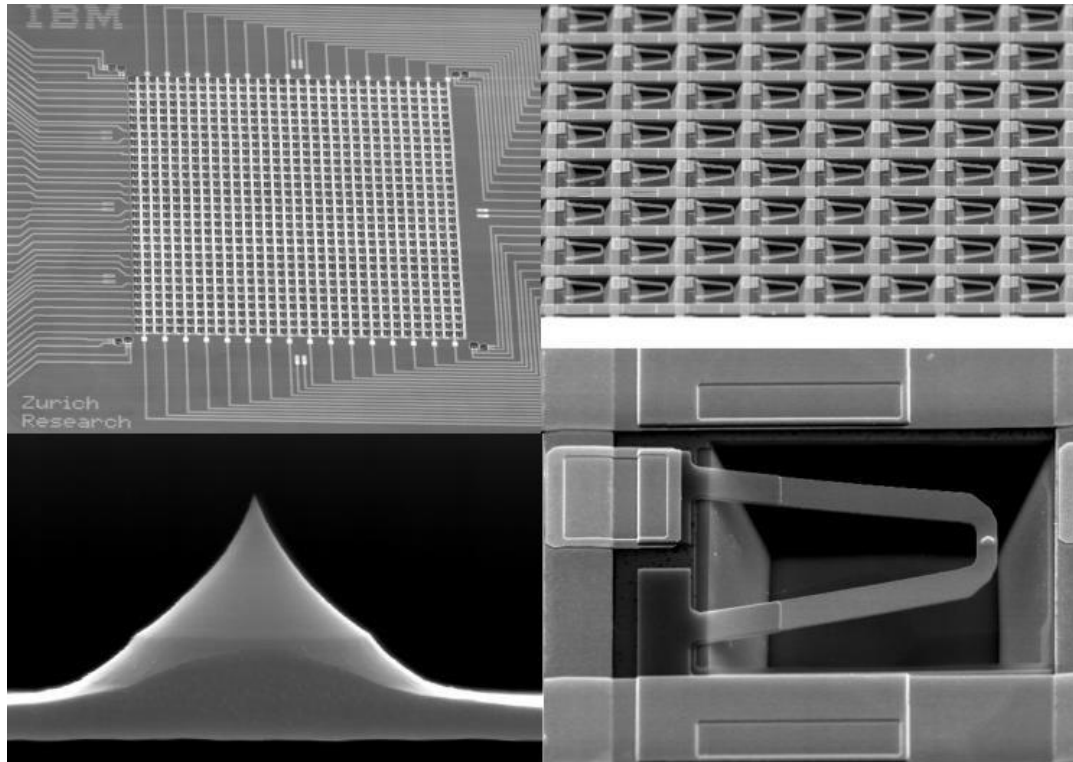
STM + AFM – *lokálna oxidačná litografia*, ak je hrot pripojený k zápornému pólu.

*Uberanie materiálu* – ak hrot použijem ako rydlo

*Nanášanie materiálu* – dip pen method

# 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)



# 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