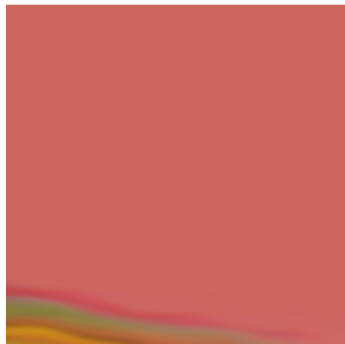
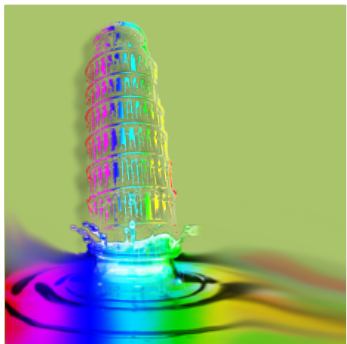
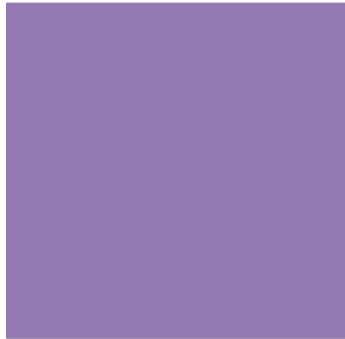


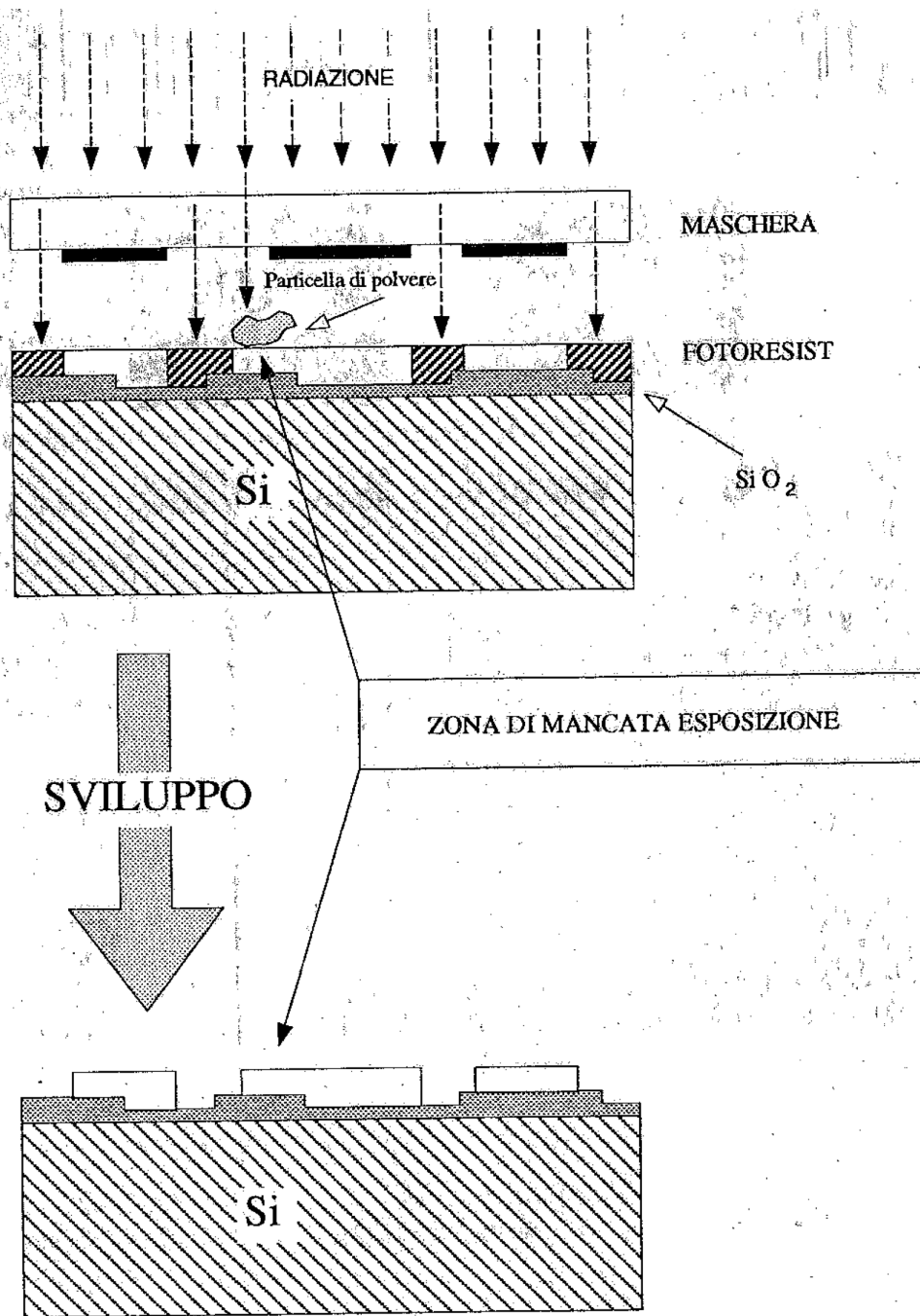
Litografia

G. Vozzi

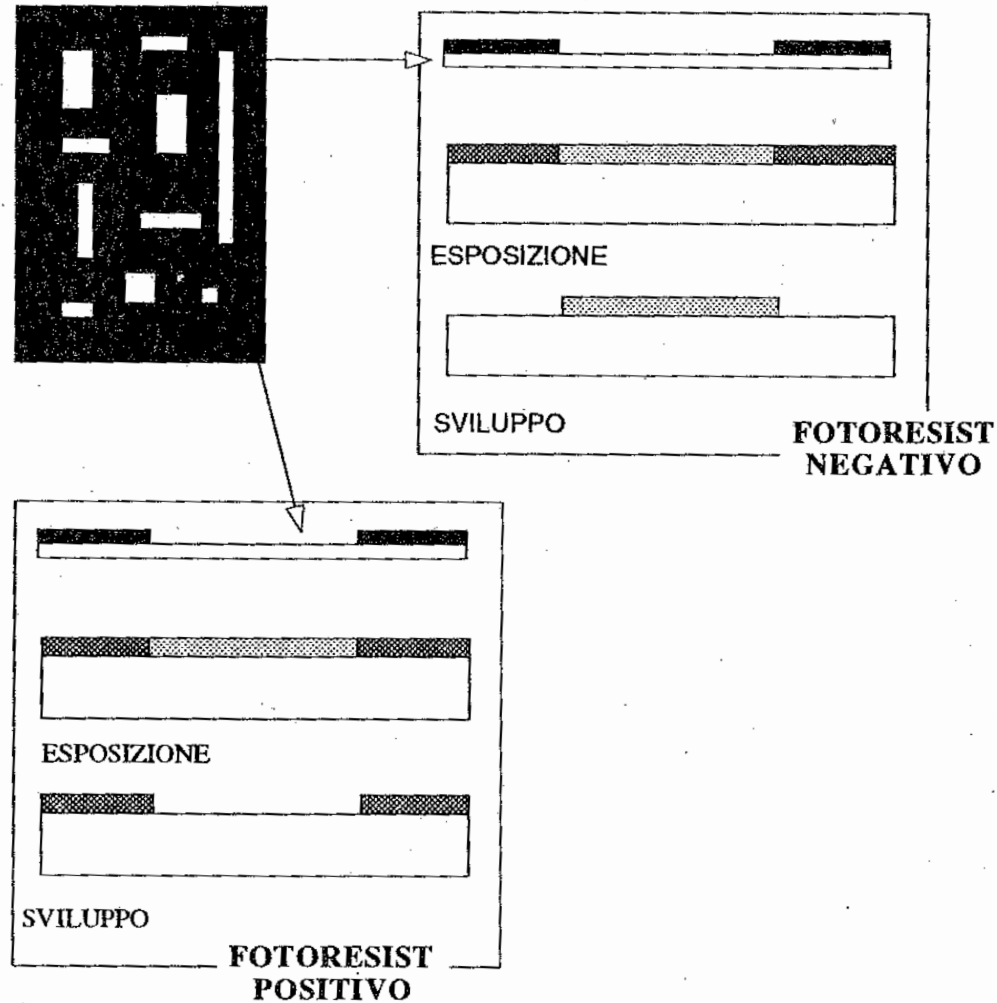


Passi del processo litografico

- Stesura del resist
- Precottura
- Esposizione del resist attraverso la maschera
- Sviluppo
- Cottura
- Attacco della zona della zona del resist non protetto
- Rimozione del resist



Photoresist positivo e negativo



Spinning process

$$sp = \frac{KS^2}{\sqrt{V}}$$

Sp= Spessore del fotoresist

S=frazione volumetrica di solido del resist

V= velocità di rotazione

K= funzione di proporzionalità legata alla viscosità del resist ed alla macchina di spinning

Metodi alternativi di deposizione

Deposizione Spray.

Dipende una buona sua riuscita da:

- Diluzione del resist
- Velocità di nebulizzazione
- Geometria e caratteristiche dell'ugello di uscita
- Pressione di nebulizzazione
- Distanza wafer-nebulizzatore
- Modalità di alimentazione del nebulizzatore

Deposizione a Rullo

Precottura (soft-baking)

La precottura permette di eliminare la maggior parte di solvente presente nel resist ed influenza l'esposizione e lo sviluppo.

Un softbaking ridotto (in tempo o temperatura) comporta un eccesso di solvente che danneggia l'esposizione e favorisce la rimozione di zone non esposte.

Un softbaking prolungato (in tempo o temperatura) degradano la fotosensibilità del fotoresist

Tecniche di soft-baking

Temperatura classica di utilizzo 80-90°C.

- **Ad infrarosso** (700 nm - 1mm). Permette di riscaldare il resist dall'interno e non si ha formazione di bolle
- **A conduzione**, Hotplate o forno controllato
- **A microonde** (0,1 mm - 1mm, $f=2,5$ GHz).

Esposizione

- Esposizione a contatto
- Esposizione in prossimità
- Esposizione per proiezione

Si definisce Contrasto del resist

Dove $Q = I \cdot t =$ dose

$I =$ intensità della radiazione

$T =$ tempo di esposizione

$Q_1 =$ dose per cui si inizia a impressionare

$Q_2 =$ dose per cui si ha esposizione completa

$$\gamma = \frac{1}{\log \frac{Q_2}{Q_1}}$$

Se il contrasto fosse infinito allora $Q_1 = Q_2$ e quindi $Q = I \cdot t = 0.25 I_0 t$

Cioè il tempo di esposizione perfetta sarebbe $t = 4Q / I_0$

Esposizione

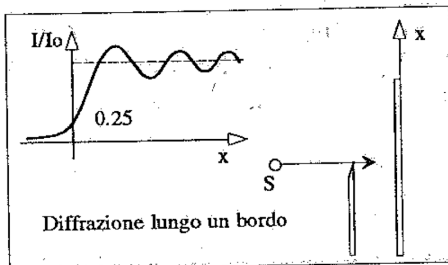
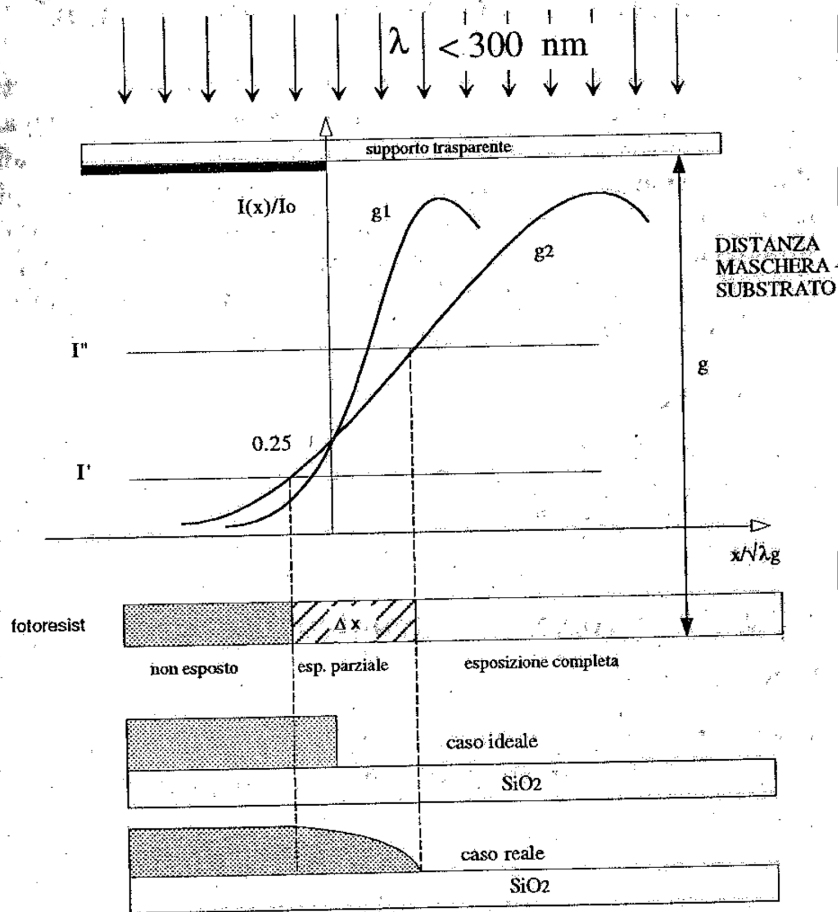
Dimensione minima ottenibile

Metodo in prossimità

$$d_{\min} = 15 \sqrt{\frac{\lambda_g}{200}}$$

Metodo per esposizione

$$d_{\min} = \frac{0.8\lambda}{NA}$$



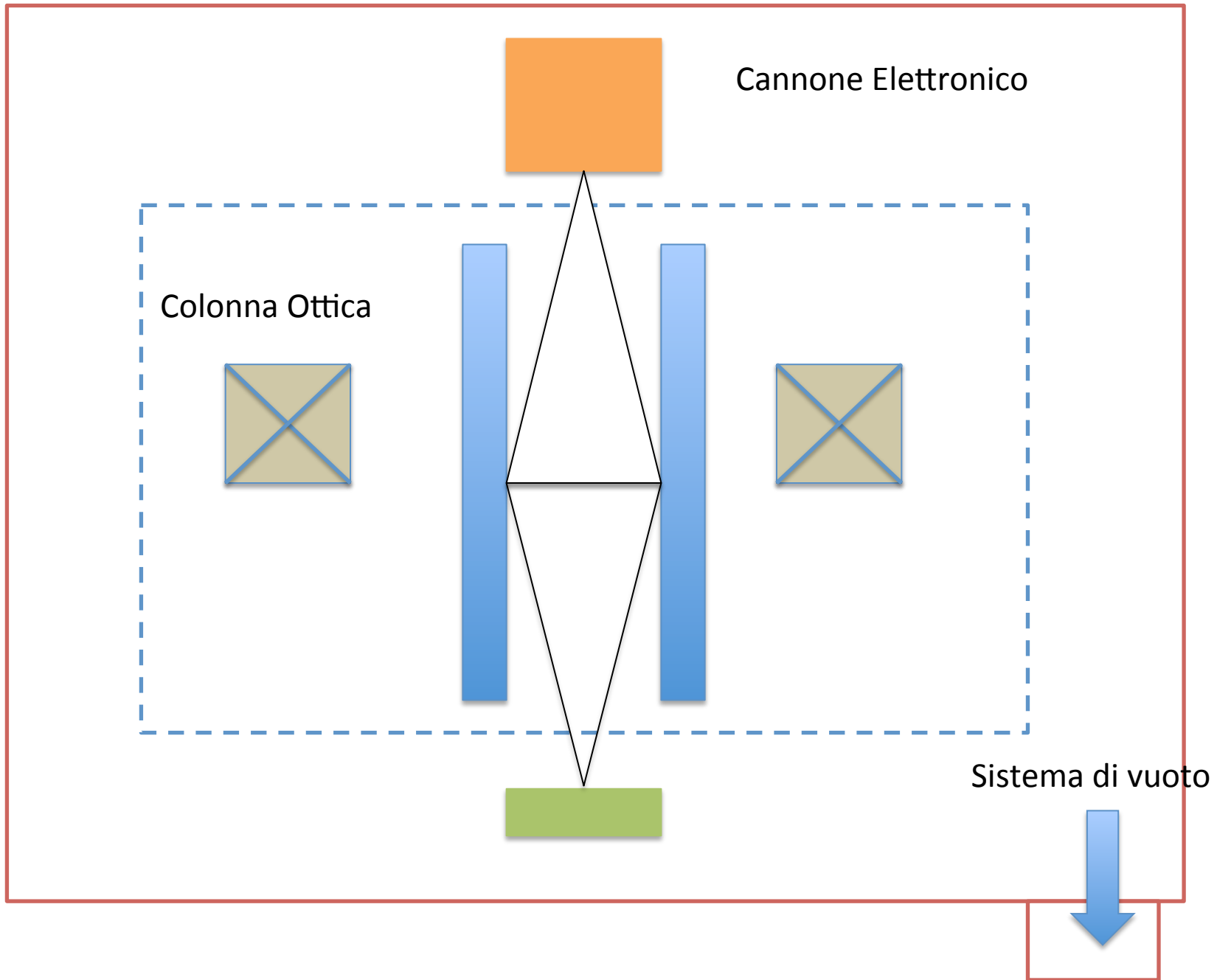
Apertura numerica

NA= apertura numerica è un numero adimensionale che indica il massimo angolo utile al sistema (obiettivo, condensatore ottico od altro) per ricevere od emettere luce.

$$NA = n \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$$

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo in cui opera la lente, ed $\alpha/2$ è l'apertura angolare della lente, cioè il semiangolo del cono di luce che entra nell'ottica. Più alta è NA, migliore, a parità di focale, è l'ottica. Il limite teorico dell'angolo del cono di luce, 180° , non è mai raggiungibile ed in pratica il valore massimo è circa 143° . Per aumentare il valore di NA si interviene spesso sul mezzo, utilizzando, anziché l'aria, olii naturali o sintetici, di indice di rifrazione più alto ed il più possibile vicino a quello del vetro (del vetrino coprioggetti e delle lenti), con l'ulteriore vantaggio di eliminare il passaggio della luce tra mezzi diversi con relative diffusioni e riflessioni. Per contro, un aumento dell'apertura esalta eventuali aberrazioni ottiche e, come in fotografia, riduce la profondità di campo. Per ovviare a quest'ultimo aspetto, per particolari situazioni di osservazione e negli strumenti di fascia alta, esistono obbiettivi microscopici con diaframma di apertura variabile.

Cannone Elettronico



Cannone elettronico

Filamento di tungsteno, che mette elettroni per effetto termoionico

$$J_c = AT^2 e^{-\left(\frac{\Phi_m}{kT}\right)}$$

$$A = \frac{4\pi mk^2 e}{h^3} = 1,20173 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2 K^2}$$

A=costante di Richardson

Φ_m =è la funzione lavoro del metallo

Il filamento lavora tra qualche KV e qualche centinaio di KV

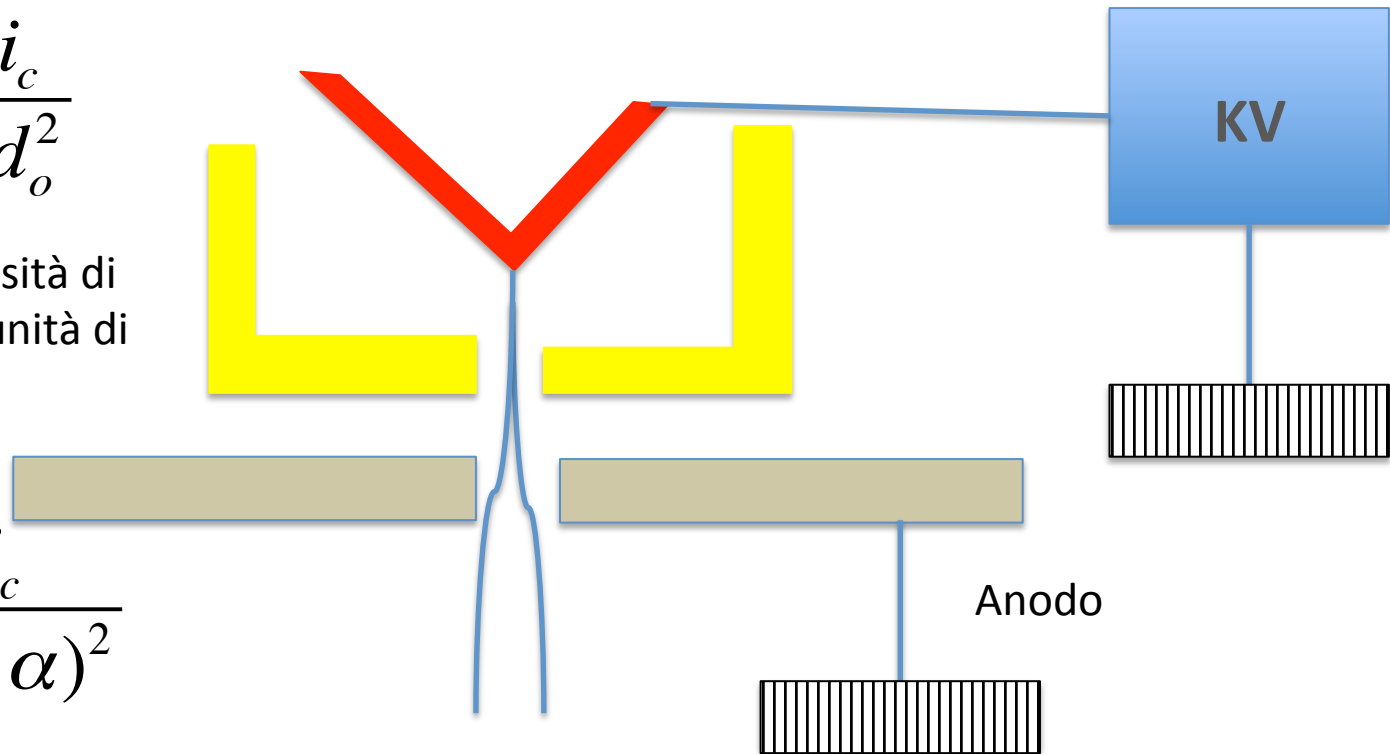
Cannone elettronico

- Anodo tenuto a massa
- Un elettrodo in prossimità del filamento che è tenuto a potenziale negativo per collimare il fascio di elettroni

$$J_{co} = \frac{4i_c}{\pi d_o^2}$$

Brillanza= densità di corrente per unità di angolo solido

$$\beta = \frac{4i_c}{(\pi d_o \alpha)^2}$$



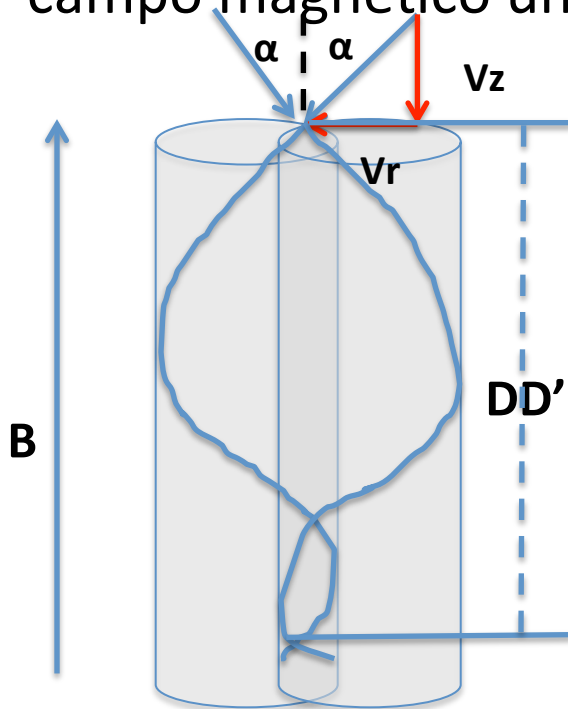
Cannone elettronico

- In genere si ha un fascio di emissione di 100°A rispetto al diametro di 100 micrometri del cross-over
- La vita del filamento è 200 ore per 2500°K 5 ore se la temperatura è 2900°K
- In genere si usano filamenti di Esaboruro di Lantanio (LaB_6) che permettono di avere una funzione di lavoro più bassa, densità di corrente di emissione più alta, temperatura di lavoro più bassa, brillantezza più alta, diametro di crossover più piccolo e durata maggiore.

Cannone elettronico: La colonna ottica

La colonna ottica contiene le lenti magnetiche, i diaframmi, le bobine di scansione ed eventuali sistemi di spegnimento del fascio.

Per comprendere come avviene la focalizzazione supponiamo un campo magnetico uniforme (caso ideale di un solenoide infinito)



Forza di Lorentz, agisce solo sulla componente radiale (V_r)
Mentre quella assiale (V_z) resta inalterata

$$F = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

La traiettoria dell'elettrone 1 è un'elica di periodo $T=2\pi m/eB$ che parte da alfa e quella dell'elettrone 2 è simile solo parte da $-\alpha$.

Il tratto DD' che percorrono per reincontrarsi è pari a $vT \cos \alpha$

Per angoli alfa piccoli

$$DD' = vT \cos \alpha = \frac{2\pi m v}{eB} \cos(\alpha) = \frac{2\pi m v}{eB} \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) = Z_0 \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right)$$

Z_0 è il punto di focalizzazione dei due elettroni se alfa cresce il punto diventa un disco

Cannone elettronico: La colonna ottica

Z_0 è il punto di focalizzazione dei due elettroni se alfa cresce il punto diventa un disco il cui raggio è pari a

$$r = Z_0 \left(\frac{\alpha^2}{2} \right) \operatorname{tg}(\alpha) = Z_0 \left(\frac{\alpha^3}{2} \right) = C_s \alpha^3$$

Dove C_s è il coefficiente di aberrazione sferica

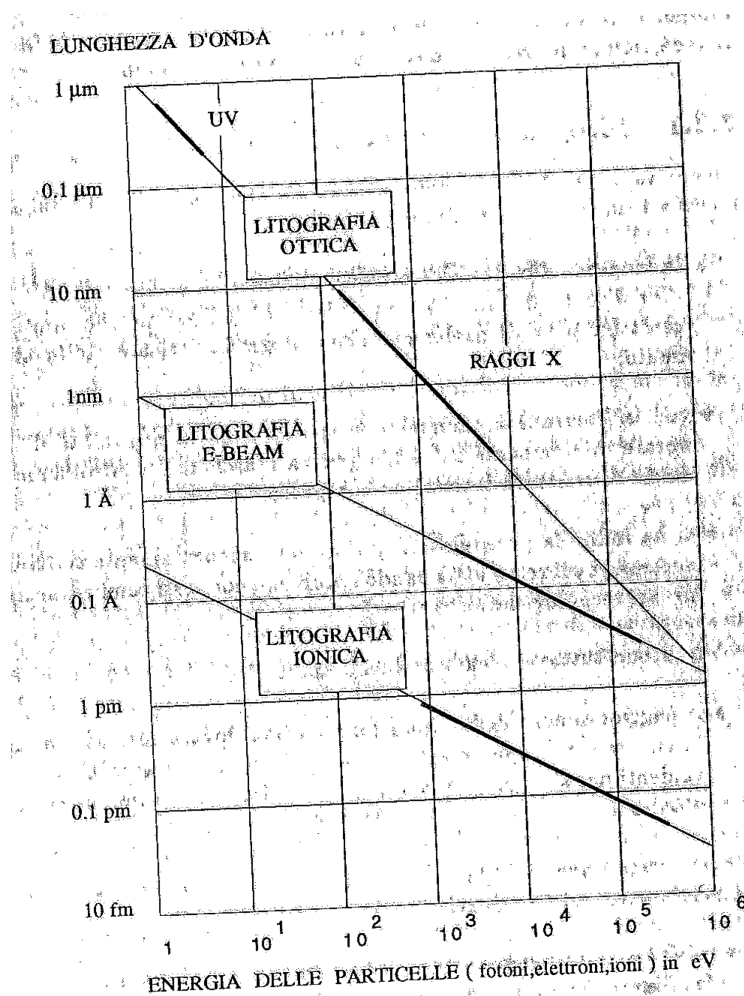
Le lenti magnetiche hanno anche la aberrazione cromatica (C_c), in quanto gli elettroni emessi non sono monoenergetici

Cannone elettronico: Il sistema di vuoto

Il cannone elettronico prevede un sistema di vuoto sia per mettere il moto libero degli elettroni sia per evitare contaminazioni del materiale

Tecniche di litografia avanzata

- Radiazioni UV limite intorno al micron
- Litografia a fasci elettronici risoluzione 0.4 micrometri
- Litografia a raggi X risoluzione 0.25 micrometri
- Litografia a fasci ionici risoluzione 0.2 micrometri



Litografia a cannone elettronico

- Lunghezza d'onda usa 0.2-0.5 °A che limita la diffrazione
- Si lavora sul wafer direttamente senza maschera
- Si possono effettuare scritture successive con un buon posizionamento del fascio

Problemi

- La risoluzione peggiora a causa dello scattering di elettroni primari e secondari nel resist
- Fenomeni di swelling del resist
- Processo lento
- Processo costoso (3-5 volte quello ottico)

Litografia a cannone elettronico

IL fascio di scrittura è sui 400-400 °A mentre la sorgente ha un diametro tra 10 e 100 micrometri quindi deve il cannone elettronico ridurre il fascio di 100-1000 volte

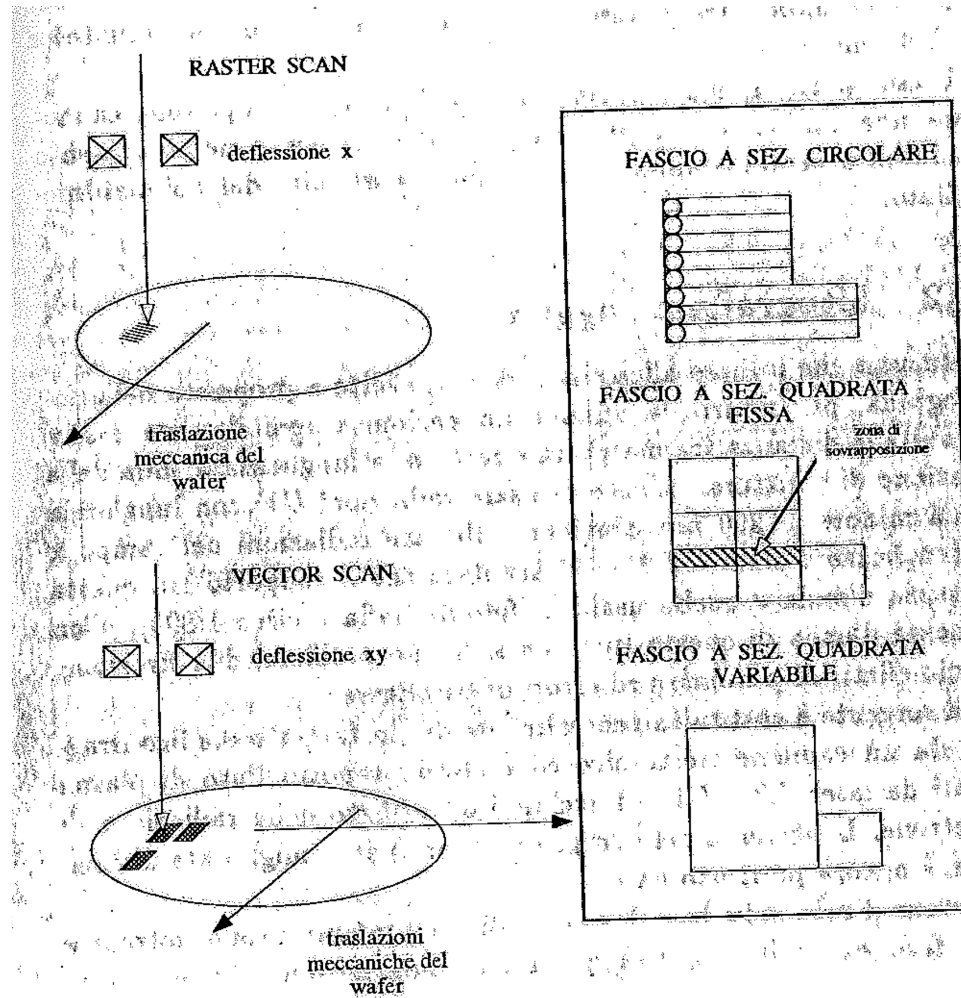
La riduzione deve avvenire minimizzando le aberrazioni delle lenti.

In genere è presente un traslatore con una accuratezza di posizionamento pari a 0.01 micrometri e velocità pari a 10 cm/sec che muove il wafer sotto il fascio elettronico.

Le tecniche di scrittura sono:

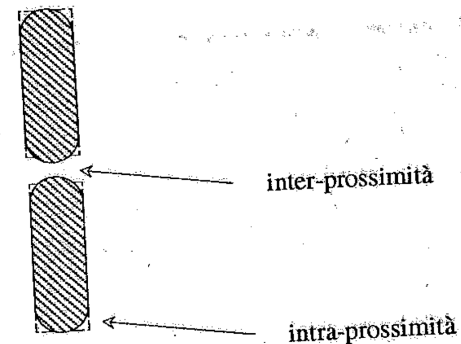
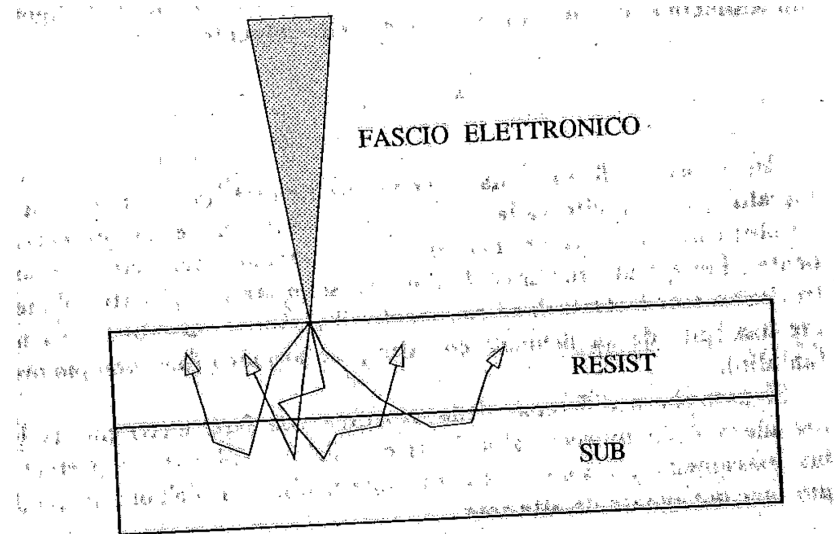
- Raster scan
- Vectort scan

Litografia a cannone elettronico



Litografia a cannone elettronico

- Effetto di interprossimità
- Effetto di intraprossimità



Litografia a raggi X

Lunghezza d'onda da 10 nm a 1 pm.

La sorgente è in genere un metallo irraggiato da un fascio elettronico.

Le sorgenti a raggi x sono sorgenti isotrope e danno fasci non collimati.

I resist sono a base di polimetilmetacrilato, che viene depolimerizzato dopo l'assorbimento della radiazione a raggi X.

.

Litografia a raggi X

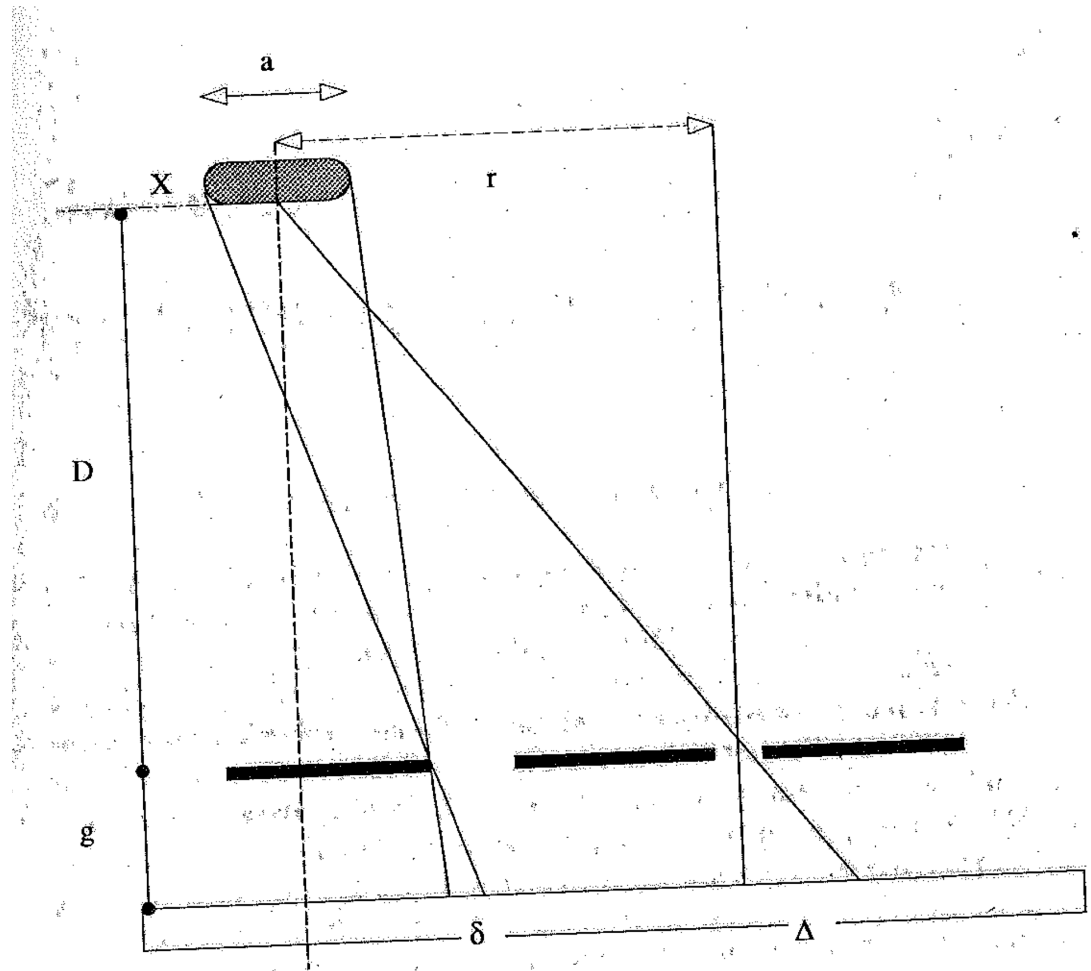
Con questa tipologia di radiazione si hanno solo problemi di penombra ed errori di parallasse.

- Errore di penombra

$$\partial = \left(\frac{g}{D} \right) a$$

- Errore di parallasse

$$\Delta = \left(\frac{g}{D} \right) r$$



Le maschere sono in genere fatte di mylar e /o sottili strati di silicio ed il materiale assorbente è oro, tanatlio o piombo