

Capitolo 3

LITOGRAFIA

3.1 Generalità, fotolitografia

I processi tecnologici hanno lo scopo di trasferire sul silicio le specifiche del progetto dell'integrato; ciò significa, in generale, posizionare opportune finestre nell'ossido, ricavare piste metalliche di interconnessione, creare giunzioni, pozzi di isolamento e così via.

Ciascun passo comporta la creazione di un modello da trasferire sul semiconduttore; tale modello è costituito da una maschera; il modello viene trasferito sullo strato superficiale della fetta; la maschera contiene una informazione spaziale binaria nel senso che individua per ciascun punto del wafer se il successivo passo tecnologico deve agire su quel punto o non deve agire. Un esempio di maschera è mostrato in figura 1. Nel caso specifico si tratta di una delle ultime maschere di un qualsiasi processo, bipolare o MOS e cioè quella che consente la definizione delle interconnessioni metalliche fra dispositivi (maschera della metal).

Il problema da risolvere è infatti, a ciascun passo tecnologico, quello di agire (con un attacco, una deposizione, una diffusione) selettivamente su una determinata porzione della superficie della fetta.

Il processo litografico consente di incidere selettivamente lo strato superficiale della fetta e può essere articolato nei seguenti passi: (alcuni passi sono schematicamente mostrati in figura 2)

▷ Stesura del resist.

▷ Precottura.

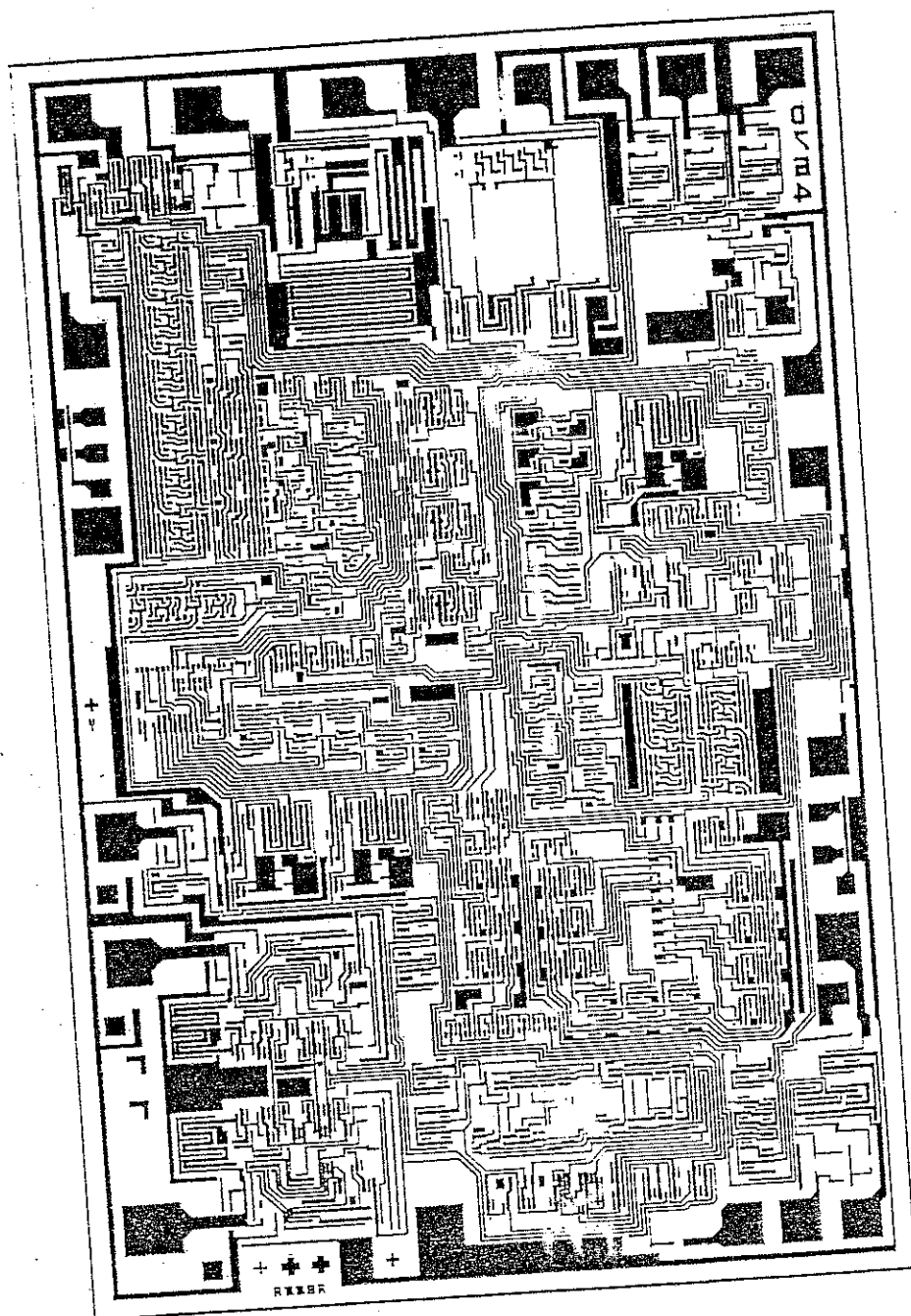


Figura 3.1: Esempio di un elemento di maschera per la definizione di piste metalliche.

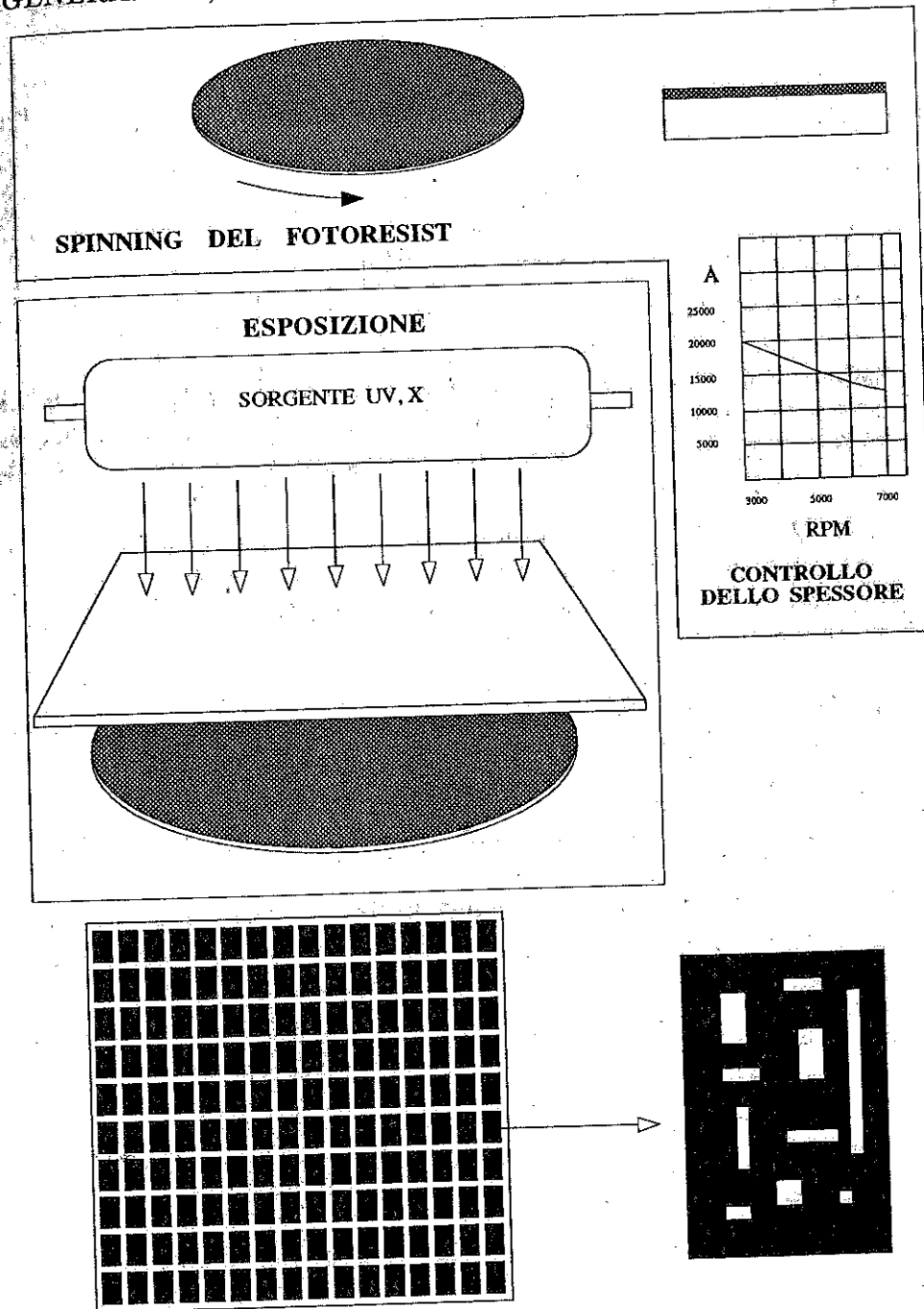


Figura 3.2: Alcuni passi tecnologici (stesura del resist, esposizione) e struttura delle maschere come composizione di una serie di elementi uguali.

- ▷ Esposizione del resist attraverso la maschera.
- ▷ Sviluppo.
- ▷ Cottura.
- ▷ Attacco dello strato non protetto dal resist.
- ▷ Rimozione del resist.

Nella figura 3 è schematizzato l'effetto di contaminazione superficiale da polvere tra le fasi di esposizione e sviluppo. È evidente la necessità di compiere i passi tecnologici sopra elencati in zone controllate prive di polvere e contaminanti.

La maschera individua dunque le zone su cui si deve agire (a ciascun passo corrisponderà una precisa mascheratura ed esisteranno relazioni di posizionamento tra le varie maschere utilizzate con strette tolleranze) (figura 4).

- Notare che talvolta il risultato di un passo tecnologico è proprio la creazione di una maschera: è il caso della apertura di una finestra nell'ossido per la successiva diffusione di impurezze droganti.

3.1.1 Resist per fotolitografia

Prima di esaminare i passi tecnologici relativi alla litografia con radiazione di esposizione ultravioletta - visibile (fotolitografia), osserviamo che in generale il resist deve essere adatto alla radiazione utilizzata per impressionarlo e descriviamo brevemente alcune delle caratteristiche essenziali dei resist per fotolitografia (fotoresist).

Il fotoresist deve avere le seguenti caratteristiche:

- ▷ deve essere in grado di riprodurre (e conservare) l'informazione contenuta nella maschera;
- ▷ deve essere in grado di proteggere le zone che non devono essere attaccate.
- notare che poiché il trasferimento di informazione avviene mediante illuminazione il fotoresist dovrà essere fotosensibile.

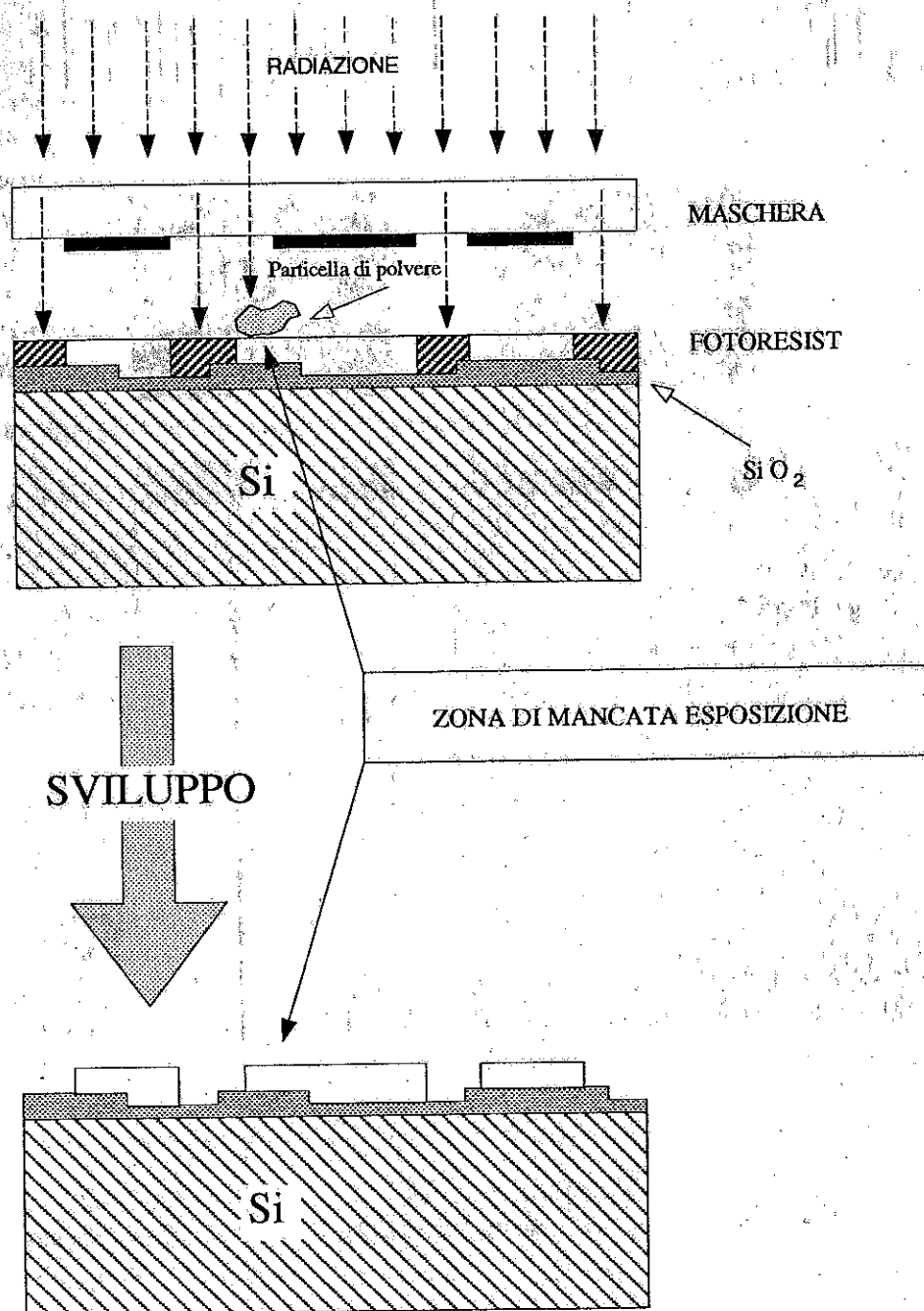


Figura 3.3: Mancata esposizione per contaminazione della superficie del resist.

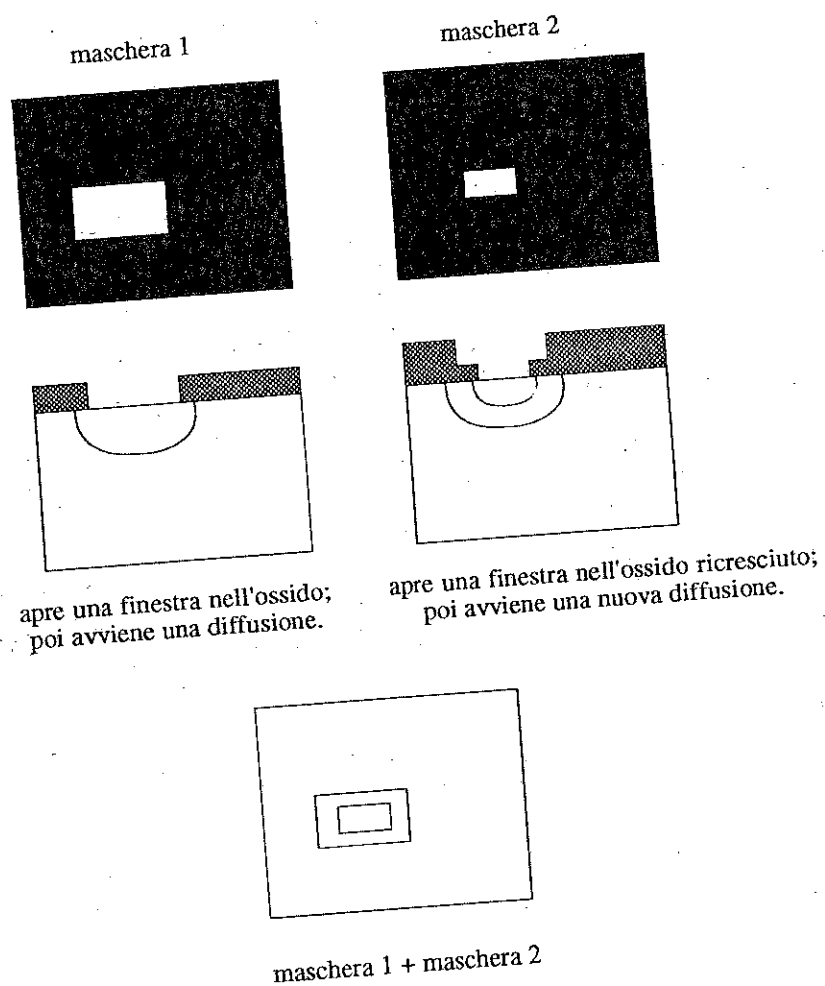


Figura 3.4: Relazioni di posizionamento tra maschere successive.

Classificazione dei resist e loro caratteristiche

I resist sono distinguibili in *positivi* e *negativi* (figura 5).

I resist positivi riproducono inalterata l'informazione contenuta nella maschera. Tali emulsioni *aumentano* la loro solubilità alle soluzioni di sviluppo nelle zone illuminate dalla radiazione di scrittura.

I resist negativi riproducono una informazione negata rispetto a quella contenuta nella maschera poiché *diminuiscono* la solubilità allo sviluppo nelle zone illuminate dalla radiazione di scrittura.

Composizione dei fotoresist

Fotoresist, sia positivi che negativi, sono composti da:

1. Una matrice polimerica (generalmente non fotosensibile).
2. Un solvente (che controlla la viscosità totale).
3. Un attivatore (fotosensibile).

Ciascun fotoresist ha una (o più) soluzioni di sviluppo. I fotoresist non sono in genere sensibili a radiazioni di lunghezza d'onda maggiore di 500 nm (luce gialla).

Esempio di fotoresist negativo

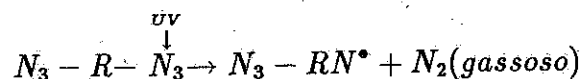
polimero: poliisoprene.

solvente: xilene - toluene.

attivatore: composti aromatici con gruppi azotati (diazidi)

sviluppo: solventi organici.

Meccanismo di azione (semplificato): l'illuminazione UV (300 - 400 nm) innesca una reazione fotolitica del composto sensibile:



Il radicale libero N^* cattura un idrogeno dal poliisoprene che è così in grado di formare dei legami con catene laterali (cross-linking) aumentando il suo peso molecolare e diminuendo la solubilità.

- L'ossigeno interagisce con il radicale N^* impedendo la reazione di crosslinking: conviene quindi usare i resist negativi in assenza di ossigeno.

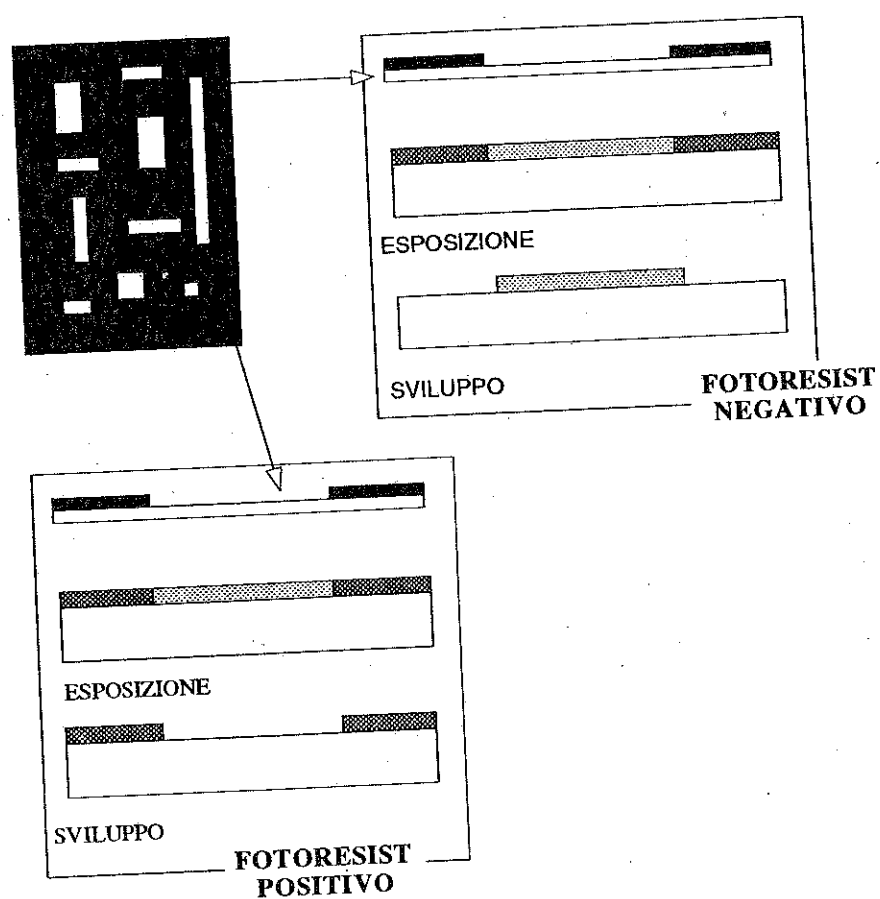


Figura 3.5: Impiego di resist positivi e negativi per la realizzazione di una struttura e della struttura complementare.

- Lo sviluppo tende a far rigonfiare il resist favorendo il sottoattacco.
- Anche bassi livelli di radiazione sono in grado di innescare la reazione fotolitica.

Esempio di fotoresist positivo

polimero: resina fenolformaldeide (Novolac)

solvente: dimetilcellosolve acetato

attivatori: diazochinoni sostituiti

sviluppo: soluzioni alcaline

Meccanismo di azione (semplificato): la novolac è solubile in soluzioni alcaline ma l'attivatore la rende idrofoba; assorbendo radiazioni UV i diazochinoni si trasformano in cheteni (ed azoto); i cheteni si idratano ad acidi carbossilici; il risultato è che il resist perde le caratteristiche di idrofobicità ed è facilmente solubilizzabile da soluzioni alcaline.

- L'ossigeno non influenza la reazione mentre eccessive temperature favoriscono l'esterificazione dei diazochinoni ad un composto insolubile rendendo difficile lo sviluppo (si ha una sorta di desensibilizzazione del resist).
- Alcuni sviluppi contenenti sali di Na o di K , possono inquinare le fette; sono stati messi a punto sviluppi privi di ioni di metalli alcalini a base per esempio di idrossido di tetrametilammonio; tali sviluppi presentano cadute di efficienza all'aumentare della temperatura.

3.1.2 Stesura del resist

La stesura dei resist viene effettuata per centrifugazione (spinning): il resist viene sparso sulla superficie della fetta, quindi inizia la centrifugazione; le velocità tipiche di rotazione (che dipendono anche dal resist impiegato) sono di circa $5 \cdot 10^3 - 10^4$ giri al minuto.

Lo spessore raggiunto è dato da relazioni semiempiriche del tipo

$$t = \frac{kS^2}{\sqrt{V}}$$

dove t è lo spessore in Å, V è la velocità di rotazione espressa in giri al minuto ed S è la frazione percentuale di solido nel resist; k è una costante di proporzionalità funzione della viscosità del resist.

- Ci sono metodi alternativi di deposizione:
 - ▷ la deposizione *spry*: è funzione di numerosi parametri come la diluizione del resist, la velocità di nebulizzazione, la geometria e le caratteristiche fluidodinamiche dell'ugello e dello spruzzatore, la pressione di nebulizzazione, la distanza dello spruzzatore dal wafer, le modalità di alimentazione del sistema di nebulizzazione;
 - ▷ la deposizione *a rullo*: è utilizzata specialmente per strati protettivi in particolare sulle facce non lappate.
- la viscosità del resist è indice della capacità dell'emulsione di coprire in modo planare superfici a gradini.

3.1.3 Precottura (softbaking)

La precottura serve ad eliminare la maggior parte del solvente dal resist steso sul wafer. È un passo assai critico poiché gran parte dei successivi processi sono influenzati dal softbaking; tra essi l'esposizione e lo sviluppo. La precottura influisce sulla adesione del film protettivo e sulla risoluzione. Un softbaking ridotto (in tempo o temperatura) comporta un eccesso di solvente nel film che danneggia l'esposizione e favorisce lo sviluppo anche di parti non esposte (resist positivi). Al contrario una precottura troppo prolungata o una temperatura troppo elevata degradano la fotosensibilità (resist positivi) a causa del fenomeno di esterificazione del composto fotosensibile sopra menzionato.

Tecniche di softbaking

- In genere le fette ricoperte di resist sono precotte a $80 - 90^{\circ}\text{C}$ in forni a convezione con circolazione forzata di gas filtrato per eliminare il particolato. Tecniche di precottura alternative sono basate su forni
 - ▷ ad *infrarosso* che presentano un certo interesse poiché il riscaldamento procede dall'interno del film verso la superficie evitando bolle di gas e screpolature; si usano come riscaldatori lampade di quarzo. Per aumentare l'assorbimento di radiazione i resist sono talvolta opportunamente pigmentati;
 - ▷ a *conduzione*;
 - ▷ a *microonde*: ci sono forni commerciali funzionanti a $\sim 2.5\text{ GHz}$.

3.1.4 Esposizione

L'esposizione può essere ottenuta mantenendo la maschera in contatto con lo strato di resist [*esposizione a contatto*] il che comporta una inevitabile usura della maschera. Per evitare l'usura si può mantenere un sottile strato di aria tra maschera e resist [*esposizione in prossimità*]; infine la maschera può essere proiettata sul resist per mezzo di un (complesso) sistema ottico [*esposizione per proiezione*].

In funzione della lunghezza d'onda della radiazione impiegata λ e della dimensione tipica W delle geometrie ricavate sulla maschera, si possono distinguere i tre tipi di esposizione suddetti; possiamo considerare in contatto la maschera ed il film di resist se l'inevitabile strato di aria frapposto ha uno spessore minore di λ ; raramente è possibile raggiungere questa condizione; l'esposizione sarà considerata in prossimità se il gap tra maschera e resist è minore di $\frac{W^2}{\lambda}$. Questa condizione implica che l'esposizione in prossimità è limitata alle così dette zone di campo vicino o di Fresnel. Al contrario l'esposizione per proiezione interessa zone di campo lontano; in tali condizioni è critico il problema della messa a fuoco sull'area proiettata.

Salvo nel caso di esposizione a contatto ideale, si hanno problemi dovuti alla diffrazione; a causa della diffrazione si ha una zona in cui osserviamo un passaggio graduale tra intensità normalizzata nulla ($\frac{I}{I_0} = 0$) e massima ($\frac{I}{I_0} = 1$)¹. L'ampiezza di tale zona è funzione della distanza g tra maschera e substrato (per lunghezza d'onda della radiazione costante).

Definiamo la *funzione contrasto del resist*:

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

dove Q_1 è la dose ($Q \stackrel{\text{def}}{=} I \cdot t$, t è il tempo di esposizione) cui il resist inizia ad impressionarsi; Q_2 è la dose per cui l'esposizione è completa. È evidente che esiste una zona di parziale esposizione a causa della diffrazione e del valore di $\gamma < \infty$, che indichiamo con Δx in figura 6. La zona parzialmente esposta verrà quindi solo parzialmente sviluppata. L'effetto risultante sul profilo del resist è mostrato in figura 6.

¹L'inserito di figura 8 mostra l'andamento di $\frac{I}{I_0}$.

- Notare che anche in presenza di diffrazione, se γ fosse infinito, ciò che implica $Q_1 = Q_2 = Q$, sarebbe sufficiente porre $Q = It = 0.25 \cdot I_o t$ ossia $t = \frac{4Q}{I_o}$ per avere una definizione perfetta.
- La minima dimensione d_{min} ottenibile in modo riproducibile sul substrato è stimata dalle relazioni semiempiriche:

$$d_{min} = 15 \cdot \sqrt{\frac{\lambda g}{200}}$$

valida per esposizione in prossimità, e

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

per l'esposizione in proiezione; NA è l'apertura numerica del sistema ottico di proiezione.

3.1.5 Sviluppo

Consiste nella rimozione del resist solubile dopo l'esposizione (zona esposta alla radiazione per resist positivi e zona mascherata per resist negativi). Si tratta di un passo critico per i resist negativi in quanto gli sviluppi (a base di solventi organici in questo caso) tendono a far rigonfiare ed a distaccare il resist esposto. Temperatura ed agitazione sono parametri che influenzano lo sviluppo del resist.

3.1.6 Cottura (postbaking)

Si tratta di un procedimento che migliora le qualità di resistenza del film polimerico agli attacchi chimici e fisici. Si effettua a temperature dell'ordine di $120 - 150^\circ C$; vengono indotti cambiamenti sia fisici che chimici: viene eliminato totalmente il solvente residuo; si può creare uno stato di tensione interna al polimero; si possono avere in qualche caso reazioni di deidratazione ed anche un modesto collasso di spessore. Per quanto riguarda i forni per il postbaking vale quanto esposto per gli apparati di softbaking.

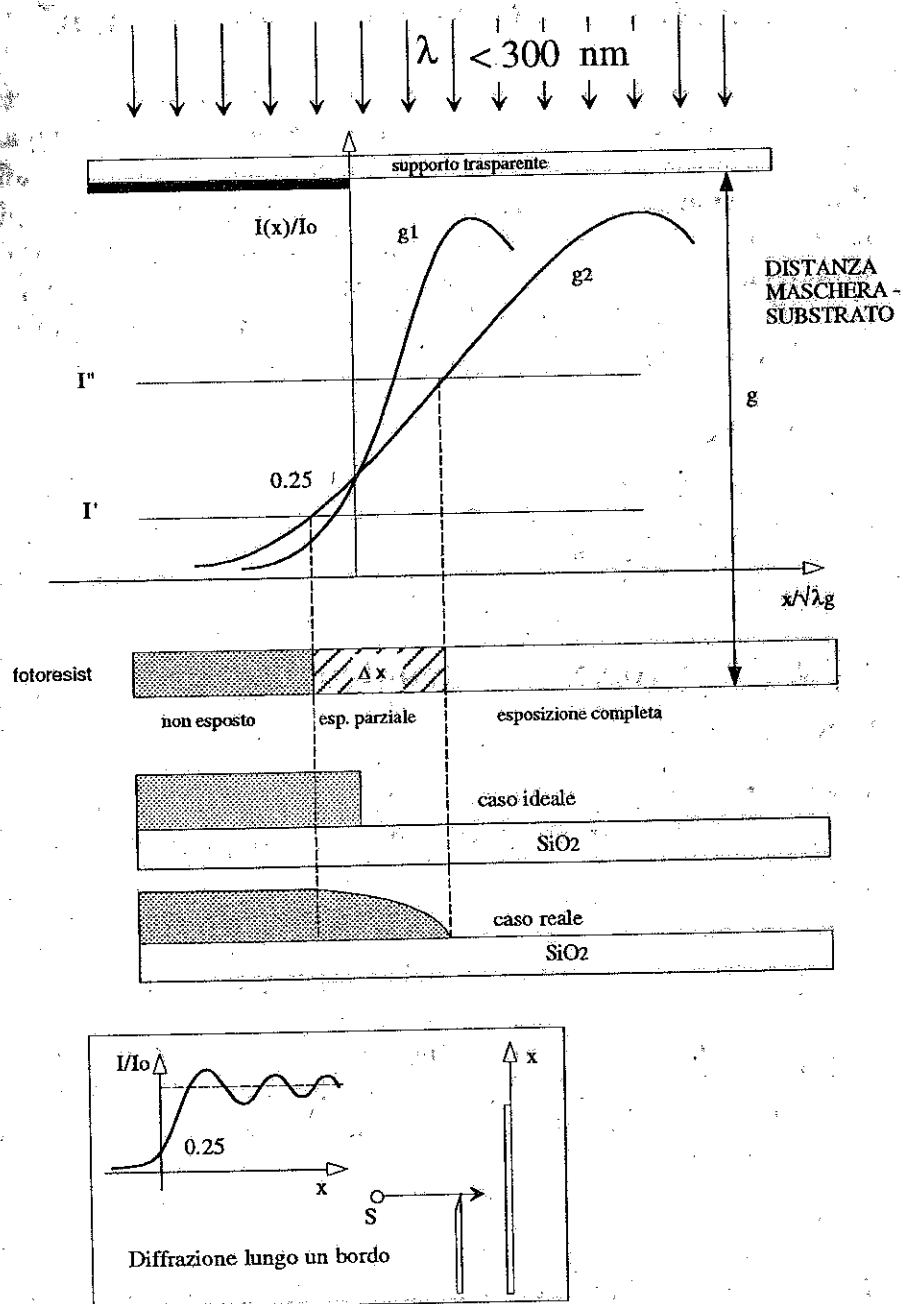


Figura 3.6: Esposizione in prossimità: effetto della diffrazione.

di lenti, ovvero la possibilità di ottenere piccoli valori di d senza dover ridurre eccessivamente α e in definitiva la corrente utile del fascio di elettroni. In generale alte intensità di corrente e diametri ridotti del fascio sono requisiti incompatibili. Esempi quantitativi verranno forniti in seguito.

3) Il sistema di vuoto

Il cannone elettronico, la colonna ottica, la camera del campione devono avere una bassa pressione residua sia per consentire agli elettroni di muoversi senza subire altre interazioni (collisioni con atomi o molecole di gas) che non siano quelle dei campi elettrici e magnetici, sia, in generale, per evitare la contaminazione del campione. A seconda dello strumento la pressione residua necessaria può essere tale da richiedere l'impiego di sistemi per alto vuoto e non contaminanti; ad esempio nel caso di filamento di LaB_6 sono necessari due sistemi di vuoto separati: uno per la colonna ottica e uno per il cannone elettronico. Vedi per maggiori dettagli il paragrafo relativo ai sistemi di vuoto.

3.3 Tecniche di litografia avanzata

Il limite di risoluzione della litografia tradizionale che fa uso di radiazione nell'ultravioletto per impressionare il fotoresist, è intorno al μm ; tale risoluzione non è sufficiente per i moderni dispositivi e pertanto sono state sviluppate nuove tecniche litografiche con lo scopo di raggiungere risoluzioni migliori; sono tuttora in corso intense attività di ricerca in questo campo.

Tra le nuove tecniche litografiche devono essere ricordate:

- la litografia a fasci elettronici che raggiunge una risoluzione di $0.4 \mu m$;
- la litografia a raggi x con risoluzione di $0.25 \mu m$;
- la litografia a fasci ionici con risoluzione teorica fino a $0.2 \mu m$.

Nella figura 12 sono mostrate le lunghezze d'onda caratteristiche delle particelle (radiazioni) impiegate in funzione della loro energia; si nota una progressiva diminuzione della lunghezza d'onda passando dalla litografia tradizionale a quella con elettroni, a quella con ioni.

LUNGHEZZA D'ONDA

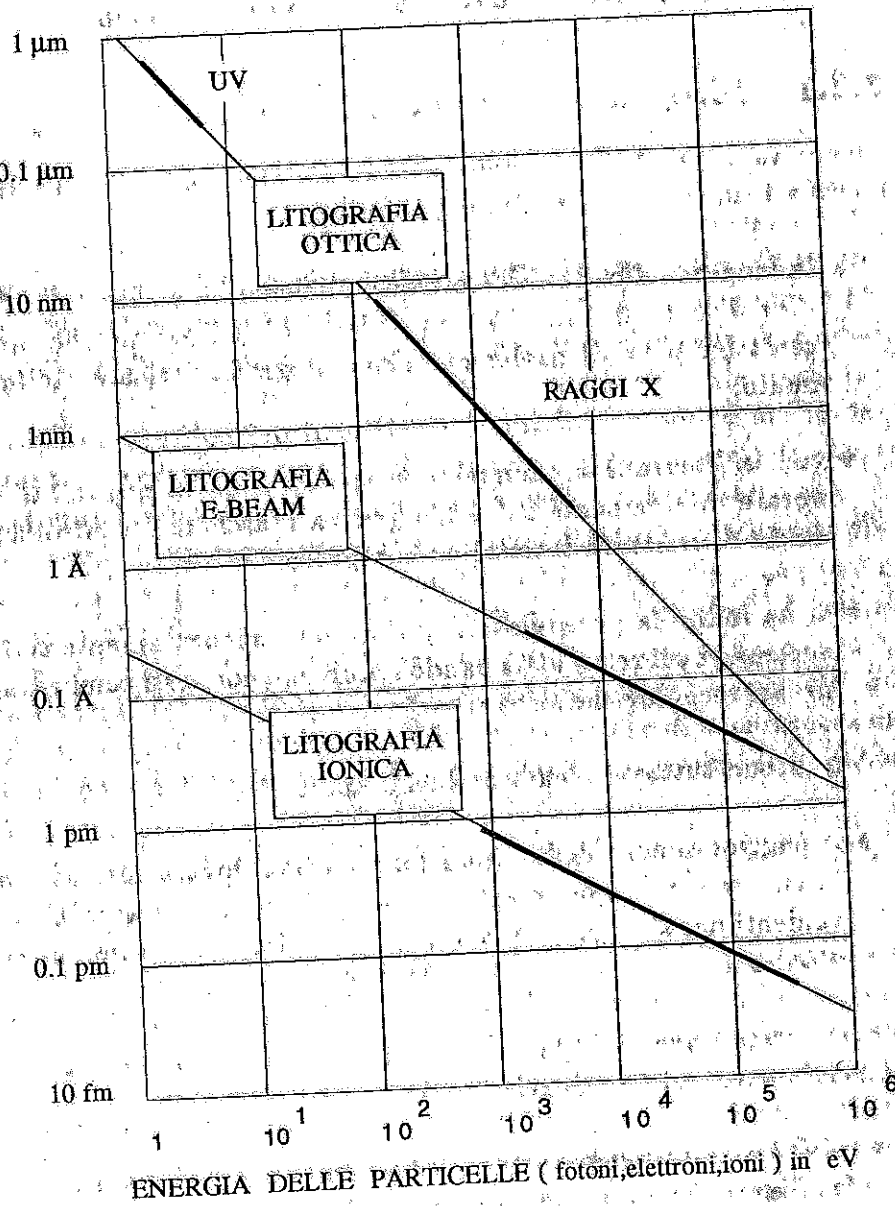


Figura 3.12: Lunghezze d'onda di radiazioni (particelle) utilizzate in litografia.

Nel seguito saranno esaminate la litografia a fasci elettronici e quella a raggi x mentre la tecnica litografica a fasci ionici, tuttora in fase di ricerca, non sarà presa in considerazione in questi appunti.

3.3.1 Litografia a cannone elettronico

Alcuni vantaggi della litografia a cannone elettronico (EBL) sulla litografia tradizionale sono immediatamente evidenti:

- la lunghezza d'onda dell'elettrone, alle energie utilizzate, è dell'ordine di $0.2 - 0.5 \text{ \AA}$ per cui l'effetto di diffrazione che limita le caratteristiche di risoluzione della litografia ottica è molto attenuato;
- con la litografia a cannone elettronico si ha la possibilità di lavorare direttamente sul wafer (senza maschera), controllando il fascio di scrittura tramite un computer;
- si ha infine la possibilità di posizionare accuratamente scritture successive sul resist attenuando i problemi connessi con l'allineamento di fasi tecnologiche successive.

Sussistono tuttavia alcuni problemi aperti:

- il peggioramento della risoluzione teorica dovuto allo scattering di elettroni nel resist e agli elettroni secondari e retrodiffusi provenienti dal substrato: si ha una esposizione più ampia di quella desiderata;
- si possono avere effetti di rigonfiamento (swelling) del resist (specialmente resist negativi);
- EBL è una tecnologia estremamente lenta poiché l'esposizione con fasci elettronici è un processo essenzialmente sequenziale;
- il sistema per EBL è molto costoso (costa da 3 a 5 volte di più di un sofisticato sistema di esposizione ottico).

La scrittura diretta per mezzo di un pennello di elettroni presuppone infatti una colonna di ottica elettronica del tipo di quella descritta nella sezione precedente, in grado di generare sul resist uno spot del diametro di $400 - 500 \text{ \AA}$. Poiché la sorgente di elettroni (il catodo) ha una ampiezza stimabile in $10 - 100 \text{ }\mu\text{m}$ si deduce che la colonna di ottica elettronica (lenti magnetiche e relative aperture) dovrà essere in grado di ridurre il diametro del fascio di $100 - 10000$ volte.

Questa riduzione deve avvenire minimizzando le aberrazioni delle lenti e conservando una significativa densità di corrente nella sonda. La necessità di mantenere una corrente significativa nella sonda appare evidente considerando che, nel caso della EBL, sono proprio gli elettroni che inducono le modificazioni strutturali del resist che sono alla base dell'aumento [diminuzione] della sua solubilità nella soluzione di sviluppo (resist positivo [negativo]). Quindi, con sonde molto deboli sarebbe necessario insistere sulla zona da impressionare per tempi estremamente lunghi a parità di numero di elettroni necessari.

Le esigenze di cui sopra possono essere soddisfatte se si riduce sufficientemente l'area spazzolata dal pennello elettronico; allora, per poter esporre un wafer di dimensioni tipiche (15 cm di diametro), è necessario disporre anche di un *traslatore meccanico* su cui verrà montata la fetta e che assicurerà le traslazioni ampie necessarie per esporre superfici estese. Il traslatore dovrà avere caratteristiche di accuratezza di posizionamento dell'ordine di $10^{-2} \text{ }\mu\text{m}$ e velocità di movimento tipiche di 10 cm/sec .

Strategie di scrittura

La procedura di scansione del wafer segue la tecnica della scansione a pettine (raster scan) in cui il pennello elettronico è deflesso in una sola delle direzioni planari mentre la fetta è mossa meccanicamente nella direzione perpendicolare (vedi figura 13); con questa strategia viene scandita tutta la superficie della fetta tenendo il fascio spento allorché non si intende impressionare il resist (la colonna di ottica elettronica è provvista di apposite placche di deflessione e defocalizzazione del fascio). Questa tecnica risulta piuttosto lenta. Procedure più veloci utilizzano scansioni vettoriali su aree piccole e traslazioni per coprire l'intera superficie (figura 13); è tipico che l'area scandita vettorialmente

coincida con quella occupata da un singolo integrato (vector scan).

Un ulteriore progresso è rappresentato da macchine in grado di variare la geometria del fascio per esporre con un solo flash ampie zone di wafer. In figura 13 sono confrontati i casi di fascio di forma circolare, quello di forma quadrata e di ampiezza fissa, ed infine quello di forma quadrata ed ampiezza variabile; è evidente che per i fasci di forma quadrata sono necessarie colonne di ottica elettronica provviste di aperture e placche addizionali dedicate alla formazione del pennello elettronico. La complicazione della colonna è giustificata dal fatto che il fascio di forma quadrata di ampiezza variabile espone mediamente 30 pixel alla volta (con pixel si intende l'elemento minimo di risoluzione).

Limiti alla risoluzione

Come già accennato il maggior limite alla risoluzione è dovuto allo scattering degli elettroni della sonda all'interno del resist ed al contributo di secondari e retrodiffusi provenienti dal substrato; questi effetti tendono ad allargare la zona di resist esposta.

Specialmente ad alte energie della sonda possono aversi interazioni dei retrodiffusi con zone esposte limitrofe (vedi figura 14); è evidente l'alterazione delle geometrie che deriva da questo fenomeno di accoppiamento detto *effetto di interprossimità*. Risulta poi chiaro che se un punto interno ad una geometria da esporre riceverà, in mancanza di correzioni, una certa dose di radiazione, un punto sul bordo ne riceverà la metà mentre un punto posto su un vertice solo un quarto. Quanto sopra è causa dell'arrotondamento degli angoli mostrato in figura 14 che prende il nome di *effetto di intraprossimità*.

Resist per litografia a fasci elettronici

Si tratta di polimeri in grado di subire cambiamenti chimico-fisici a seguito della interazione con gli elettroni; questi cambiamenti sono:

1. cross - linking tra catene laterali,
2. rotture nelle catene polimeriche.

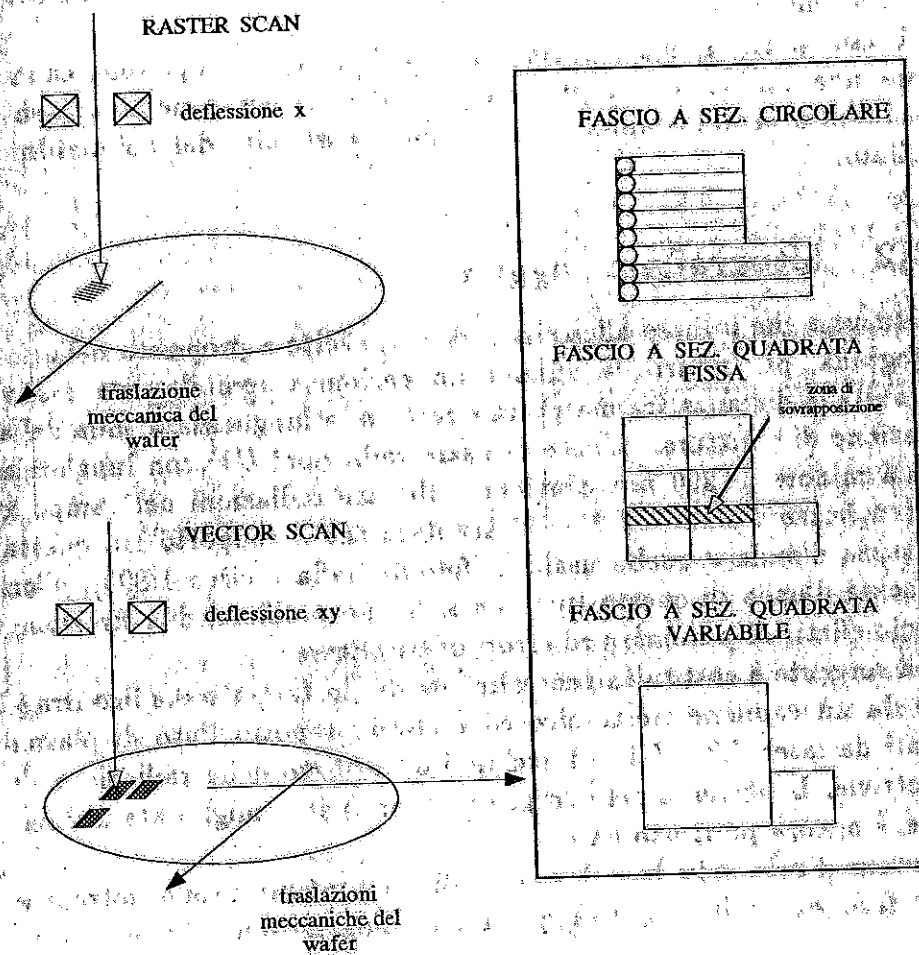


Figura 3.13: Strategie di scrittura del resist nella litografia e-beam; nell'inserto le varie forme del fascio di scrittura.

I resist negativi, in cui si assiste al cross-linking mostrano un aumento del peso molecolare ed una diminuzione di solubilità nella soluzione di sviluppo. Tra di essi ricordiamo il poli(glicidil metacrilato) e il polistirene.

I resist positivi, in cui si hanno scissioni della catena polimerica mostrano una diminuzione di peso molecolare ed un conseguente aumento di solubilità nello sviluppo. Un esempio è costituito dal polimetilmetacrilato.

3.3.2 Litografia a raggi x

Ricordiamo che in base alle considerazioni svolte a proposito della fotolitografia, per ridurre la minima dimensione ottenibile deve essere diminuita la distanza tra maschera e resist o la lunghezza d'onda della radiazione di scrittura. Invece di usare radiazioni UV con lunghezza d'onda minore di 200 nm conviene utilizzare radiazioni nel campo x con lunghezze d'onda tra 4 e 40 Å (notare che il rapporto tra questa lunghezza d'onda e quella usata in fotolitografia è circa 1:800). Con lunghezze d'onda di questo tipo non si hanno problemi di diffrazione, ma solo effetti di *penombra* ed errori di parallasse.

La sorgente è costituita generalmente da un target metallico irraggiato da un cannone elettronico ed è stato proposto l'uso di plasmi eccitati da laser IR o UV ad eccimeri o l'utilizzo della radiazione di sincrotrone. L'efficienza delle sorgenti x, per quanto migliorata ultimamente, è ancora piuttosto bassa.

Tranne il caso della luce di sincrotrone le sorgenti x sono isotrope e danno fasci non collimati; i raggi x inoltre non possono essere focalizzati.

I resist sono a base di polimetilmetacrilato (resist positivo) che viene depolimerizzato dagli elettroni secondari emessi dopo l'assorbimento di raggi x.

Nella figura 15 sono mostrati gli effetti di penombra e l'errore di parallasse dovuti alla geometria ed alle caratteristiche della sorgente di raggi x: l'ampiezza δ della zona di penombra può essere facilmente calcolata e risulta:

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

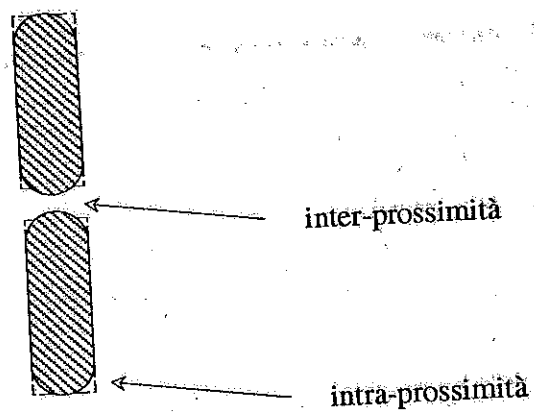
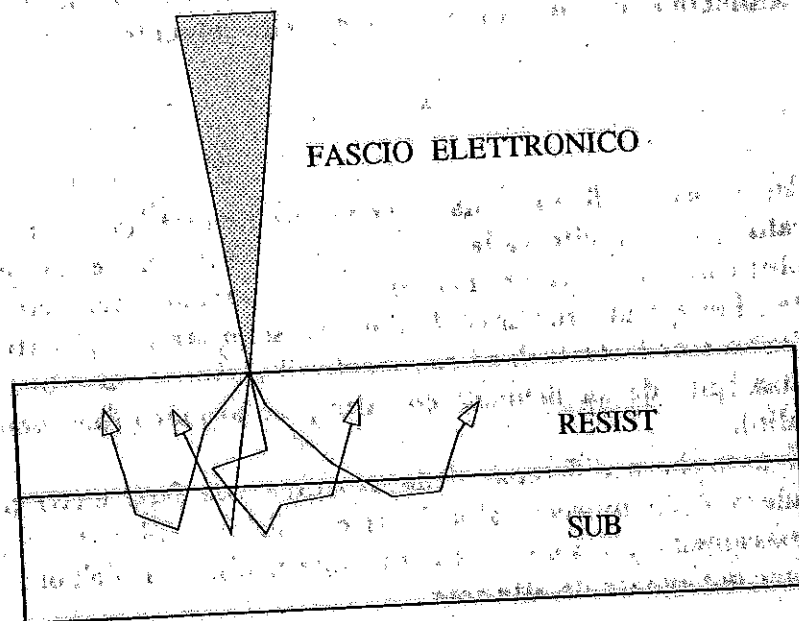


Figura 3.14: Effetto di intraprossimità e di interprossimità.

dove a è l'ampiezza della sorgente. L'errore di parallasse Δ dipende linearmente dalla distanza r dall'asse della sorgente:

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

Deve essere infine ricordato che un problema fondamentale della litografia x è costituito dalla produzione delle maschere che presentano problemi per la scelta dei materiali del supporto e dello strato assorbente. Per quanto riguarda il supporto sono stati impiegati polimeri (mylar) o sottili strati di silicio, mentre il materiale assorbente è sempre costituito da un elemento con alto peso atomico (per esempio oro, tantalio).

Si noti che a differenza della litografia con fasci elettronici la litografia x è un processo globale di esposizione del wafer e pertanto intrinsecamente più veloce. Si hanno alte risoluzioni (dell'ordine di $0.5 \mu m$) accompagnate da alte rese.

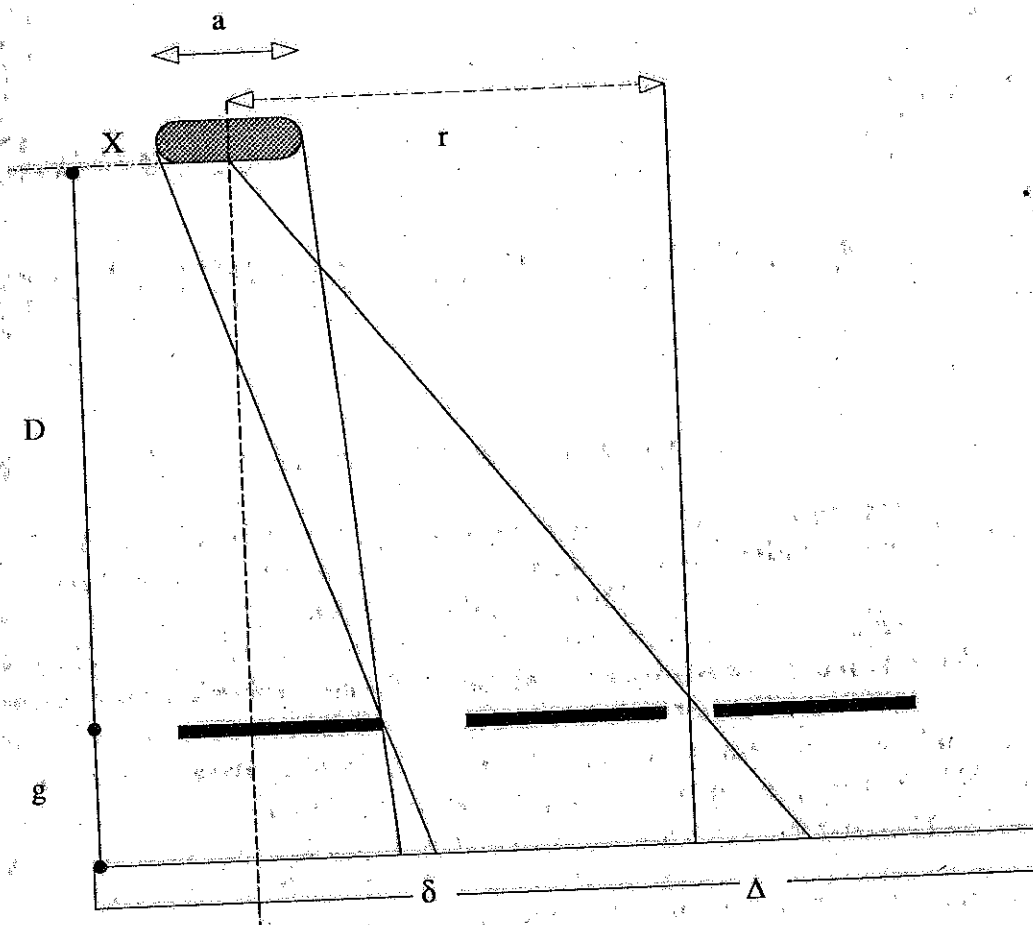


Figura 3.15: Litografia a raggi x: errore di parallasse ed effetto di penombra.