

# LITOGRAFIA E ATTACCO CHIMICO

## Introduzione

La litografia è il processo usato per trasferire disegni (pattern) di forme geometriche, generati da un computer, su un substrato (silicio, vetro, GaAs, etc...) attraverso l'utilizzo di una maschera di materiale sensibile alle radiazioni (*resist*) che copre la superficie del wafer. Per definire le varie regioni della struttura da realizzare questi disegni devono essere poi trasferiti negli strati sottostanti. Tale trasferimento è realizzato con un processo di *etching* (attacco chimico) che rimuove selettivamente porzioni non mascherate di uno strato. Ogni processo litografico richiede la presenza di un ambiente pulito in cui l'aria viene mantenuta a valori ben controllati di temperatura e di umidità. La deposizione di particelle sui wafer e sulle maschere litografiche può causare un'impropria definizione delle geometrie o la creazione di dislocazioni e punti difettosi che, soprattutto nelle strutture guidanti, portano a problemi (con relative perdite) nella propagazione della radiazione.

Un processo litografico presuppone la presenza dei seguenti elementi fondamentali: il resist, la sorgente per l'esposizione e la maschera. Il *resist* è una sostanza liquida organica o polimerica che, se esposta alle radiazioni, varia le proprie caratteristiche chimiche, diventando più o meno solubile; esso è positivo se, interagendo con la radiazione, diventa maggiormente solubile, mentre è negativo se, nelle parti esposte, subisce un rafforzamento dei legami tra le molecole che lo compongono. La sorgente per l'esposizione può essere di diverse tipologie, a seconda del tipo di radiazione emessa (ultravioletta, a elettroni, a ioni e a raggi X). La maschera è generalmente costituita da una lastra di quarzo coperta da un sottile film di cromo e riporta il disegno dei percorsi circuitali da trasferire sul substrato.

Per effettuare un processo litografico occorre mettere in atto le seguenti fasi:



**1 Preparazione del substrato;**

**2 Deposizione del resist;**

**3 Esposizione;**

**4 Sviluppo del resist;**

**5 Deposizione del metallo;**

**6 Lift-off;**

La fase di preparazione del substrato consiste nell'eliminazione dal substrato stesso di polvere o altri elementi contaminanti e nella stesura di una particolare sostanza, detta "primer", che facilita la successiva deposizione del *resist*.

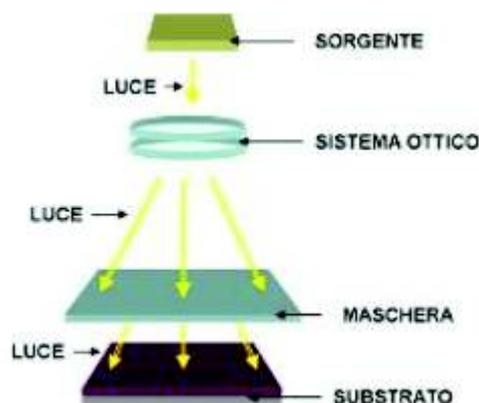
A seconda del tipo di sorgente utilizzata si possono distinguere le seguenti tecniche litografiche:

- ottiche
- a raggi X
- ioniche
- a fascio elettronico

La scelta del tipo di litografia dipende ovviamente dal tipo di circuito che si vuole realizzare (in termini di precisione, dimensioni, costi, etc...)

## 1 LITOGRAFIA OTTICA

La litografia ottica consiste nel trasferire, tramite l'azione di una sorgente di luce, l'immagine circuitale dalla fotomaschera al substrato coperto di *resist*.



Il sistema litografico in esame comprende: la sorgente di luce, il sistema ottico, la maschera e il substrato. A seconda della distanza cui sono posti la maschera e il substrato si distingue tra diverse tipologie di esposizione: **per trasparenza ‘a contatto’** o **‘a prossimità’** e **per proiezione**. Nell’esposizione a contatto la maschera e il substrato in silicio sono posti l’una sull’altro e, grazie a questo contatto, l’immagine impressa sulla maschera viene trasferita sul substrato con ottime risoluzioni. Tuttavia, la vicinanza tra maschera e substrato potrebbe determinare un danneggiamento del *resist* con conseguenze non trascurabili sulla qualità del disegno circuitale. Con la tecnica di esposizione a prossimità la maschera e il substrato sono posti a qualche decina di micrometri tra loro; ciò riduce la probabilità di eventuali difetti dovuti al contatto tra le due superfici, ma determina una lieve degradazione del livello di risoluzione dell’immagine. Nell’ambito della tecnica di esposizione a proiezione la maschera e il substrato sono posti a qualche centimetro di distanza e tra di essi viene inserito un sistema ottico di lenti per la proiezione dell’immagine sul substrato. Con quest’ultima tecnica si risolve il problema dei difetti, ma si degrada ulteriormente la risoluzione finale dell’immagine circuitale. Per aumentare la risoluzione può essere utilizzato il cosiddetto metodo “*step and repeat*”: la maschera contiene il disegno da trasferire ingrandito di molte volte rispetto all’originale e la sorgente illumina in maniera sequenziale una piccola porzione di maschera alla volta; tale porzione, poi, viene ridimensionata tramite il sistema ottico e trasferita sul substrato con le dimensioni originali, ma con un notevole livello di risoluzione.

I vantaggi legati alla tecnica litografica appena descritta sono connessi essenzialmente ai bassi costi dei materiali utilizzati per il sistema ottico e alla possibilità di impiego di numerose sorgenti di luce molto prestanti (ad esempio sorgenti laser). Nella stampa per trasparenza, la linea più sottile che può essere stampata ha approssimativamente una larghezza pari a:

$$l_m \cong \sqrt{\lambda \cdot g}$$

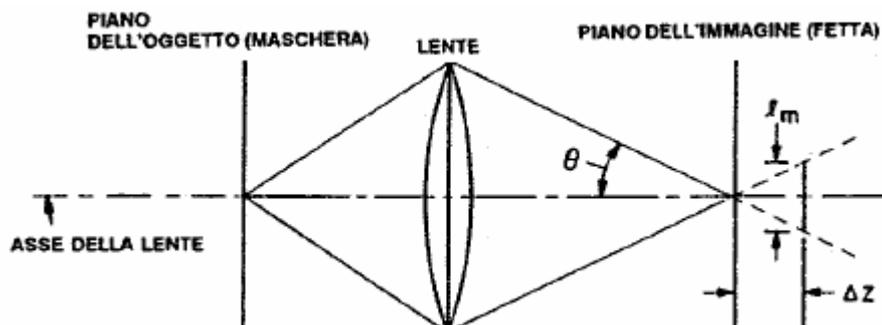
dove  $\lambda$  (in genere al di sotto del micron) è la lunghezza d’onda della radiazione utilizzata nell’esposizione e  $g$  è la distanza tra la maschera e la fetta (compreso lo spessore del *resist*). Nella stampa per proiezione abbiamo invece:

$$l_m \cong \frac{\lambda}{NA}$$

in cui  $NA$  è l’apertura numerica data da:

$$NA = n \cdot \sin \vartheta$$

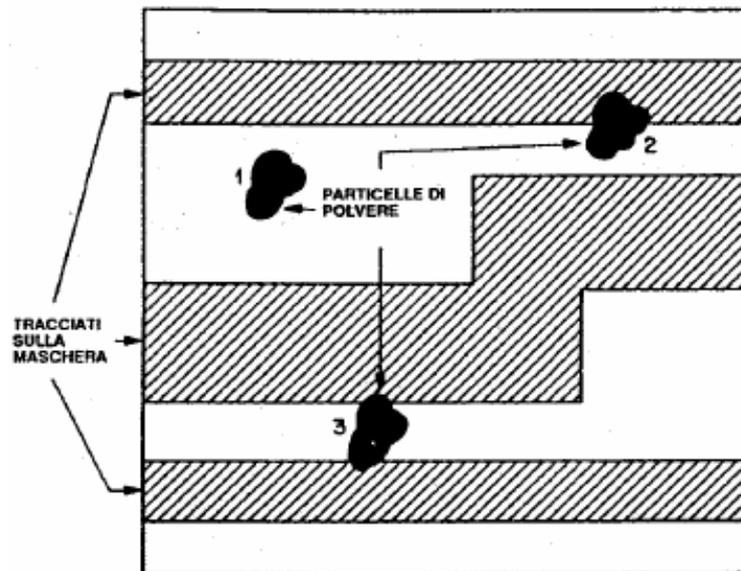
dove  $n$  è l’indice di rifrazione nel mezzo immagine (generalmente l’aria,  $n=1$ ) e  $\vartheta$  è la semiampiezza del cono di luce che converge a un’immagine puntiforme posta sulla fetta come da figura:



## CEAN ROOM (CAMERA PULITA)

I processi litografici, come la maggior parte dei processi necessari per la produzione di circuiti integrati, devono essere svolti in ambienti privi di impurità sospese in aria (polveri o agenti inquinanti, particelle di umidità, etc...).

Tali particelle impure possono infatti depositarsi sulle fette o sulle maschere litografiche causando così difetti che possono portare al malfunzionamento dei dispositivi realizzati, che hanno dimensioni ad esse paragonabili. Ad esempio, una particella depositata su una maschera, si comporta come sagoma opaca che verrà quindi trasferita sugli strati sottostanti assieme al tracciato del circuito. La particella 2 ad esempio può provocare uno strozzamento nel flusso di corrente in una pista metallica, oppure la particella 3 un cortocircuito tra due piste.



Le stanze in cui avvengono i processi vengono dette camere pulite (clean room) e sono suddivise in classi. Ad esempio una camera di classe 100 contiene mediamente 100 particelle di polvere (con diametro di circa  $0.5 \mu\text{m}$ ) per piede cubico (nell'atmosfera generalmente questo valore è circa quattro ordini di grandezza superiore); più sono piccole le dimensioni del circuito integrato, più rigoroso deve essere il controllo delle particelle di impurità della camera.

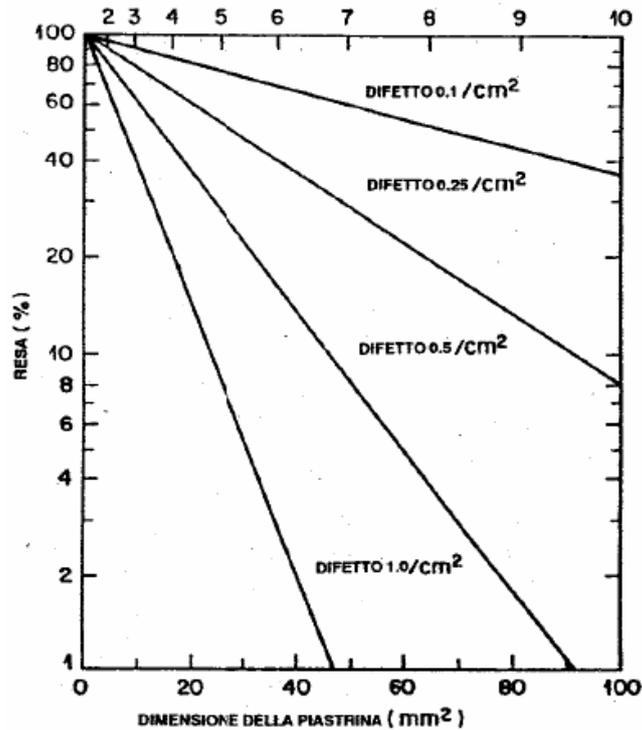
Si definisce camera pulita di 'classe N' una camera che contenga in media non più di N particelle per piede cubico di diametro maggiore o uguale a  $0.5 \mu\text{m}$ .

## MASCHERA

Il primo passo dei processi litografici consiste nel disegnare il tracciato (layout) complessivo (ingrandito da 100 a 2000 volte rispetto alla dimensione finale) suddiviso in vari livelli di maschere: ad esempio su un livello vengono disegnati gli elettrodi di gate, su un altro le regioni isolanti e così via. Circuiti ad alta precisione vengono realizzati con l'ausilio di un calcolatore (CAD) grazie al quale il progettista descrive il circuito da un punto di vista elettrico, dopodiché, attraverso un generatore di tracciati (una macchina a fascio elettronico) vengono trasferiti i circuiti su una maschera fotosensibile. Per elementi di dimensione uguale o superiore a 5 micron, le maschere utilizzate sono realizzate tramite delle piastrine di vetro ricoperte da uno strato di materiale tenero, quale un'emulsione, mentre per dimensioni inferiori si utilizza ricoprire le lastrine di vetro con materiali più duri come il cromo o l'ossido di ferro. Una caratteristica importante relativa alle maschere è la densità di difetti; si definisce 'resa' il rapporto tra il numero di chip non difettosi e il numero totale dei chip prodotti. Si è stimato che tale rapporto è ben approssimabile dalla formula:

$$Y \cong e^{-D \cdot A}$$

dove D è il numero di difetti per unità di superficie ed A è l'area della piastrina integrata (chip). La figura successiva mostra l'andamento della resa in funzione delle dimensioni della piastrina

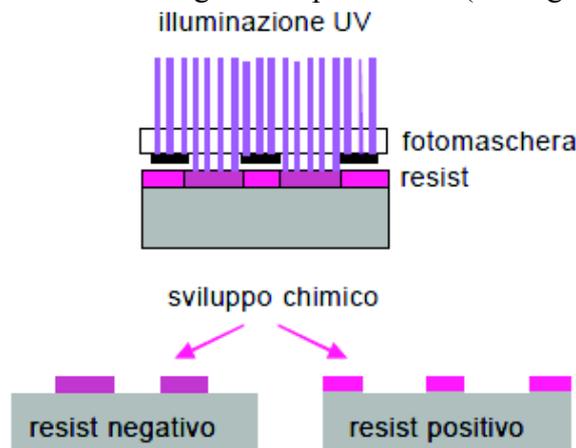


Per ottenere buone rese su piastrine di grandi dimensioni è necessario effettuare un controllo ed una pulizia accurata per ridurre al minimo il numero di difetti.

## FOTORESIST

I fotoresist sono composti organici sensibili alla radiazione. Ne esistono due tipi:

- **Fotoresist positivo** Consiste di tre componenti: un composto fotosensibile, una resina e un solvente organico. Prima dell'esposizione il composto fotosensibile è insolubile nella soluzione di sviluppo; invece dopo l'esposizione assorbe radiazioni (nelle aree non mascherate), cambia la sua struttura chimica (si depolimerizza) e diventa solubile nella soluzione di sviluppo. Quindi il disegno presente sulla maschera viene trasferito così com'è al substrato poiché il resist non esposto a radiazione non viene rimosso (immagine positiva) durante lo sviluppo.
- **Fotoresist negativo** Sono costituiti da polimeri combinati con composti fotosensibili: dopo l'esposizione, il composto fotosensibile assorbe l'energia luminosa e la trasforma in energia chimica, in modo tale da dare inizio ad una reazione che provoca la formazione di catene polimeriche intrecciate dotate di maggiore peso molecolare e insolubili nella soluzione di sviluppo. Durante lo sviluppo quindi, saranno le aree non esposte ad essere rimosse, per cui dalla maschera viene trasferita l'immagine complementare (immagine negativa).

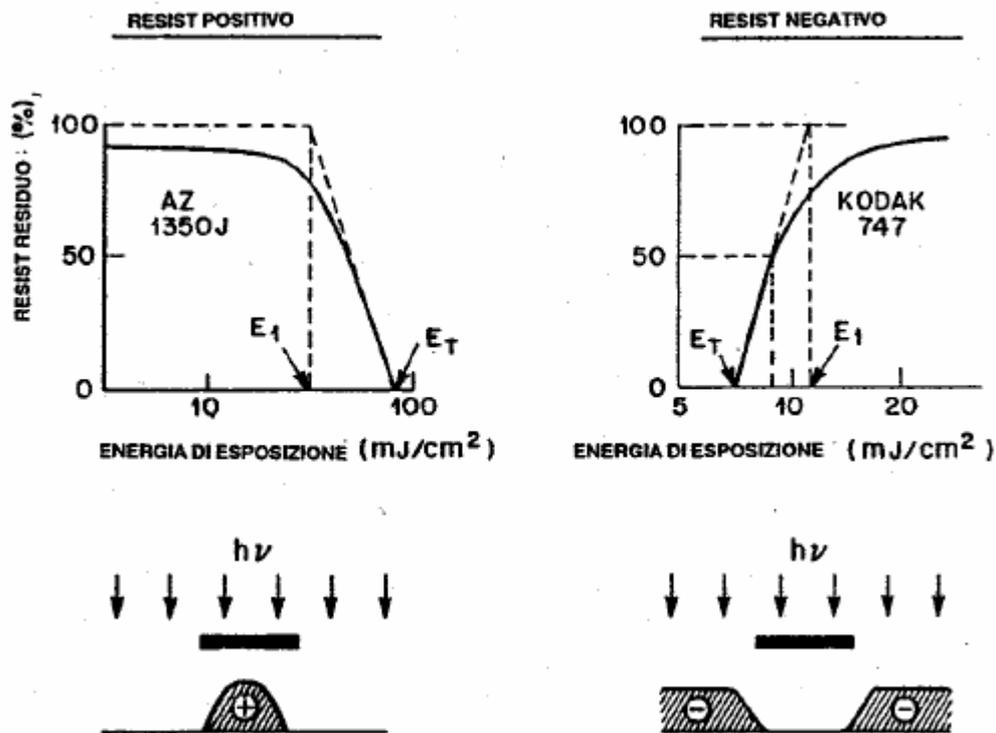


Il *fotore Resist* negativo assorbe solvente gonfiando in fase di sviluppo (limita la risoluzione), ma l'energia necessaria per impressionare il *fotore Resist* stesso è minore che con il positivo. In generale il *fotore Resist* è deposto tramite centrifugazione, allo stato di soluzione liquida, e quindi fissato tramite cottura a caldo (circa 100 °C). Lo sviluppo si ottiene tramite asportazione con solventi o attacco chimico assistito.

Definiamo rapporto di contrasto la quantità:

$$\gamma \cong \left[ \ln \frac{E_T}{E_1} \right]^{-1}$$

Dove  $E_T$  ed  $E_1$  si osservano dalla figura successiva la quale mostra come, al variare dell'energia di esposizione, varia la solubilità del *fotore Resist*. Nel *resist* positivo, superato il valore  $E_T$  (energia di soglia) esso diviene completamente solubile. Prende il nome di 'sensibilità' quel valore di energia per avere completa solubilità, che quindi coincide con  $E_T$ . Mentre  $E_1$  è ricavato tracciando una tangente (a partire da  $E_T$ ) che interseca la retta orizzontale relativa ad uno spessore di *resist* del 100%.



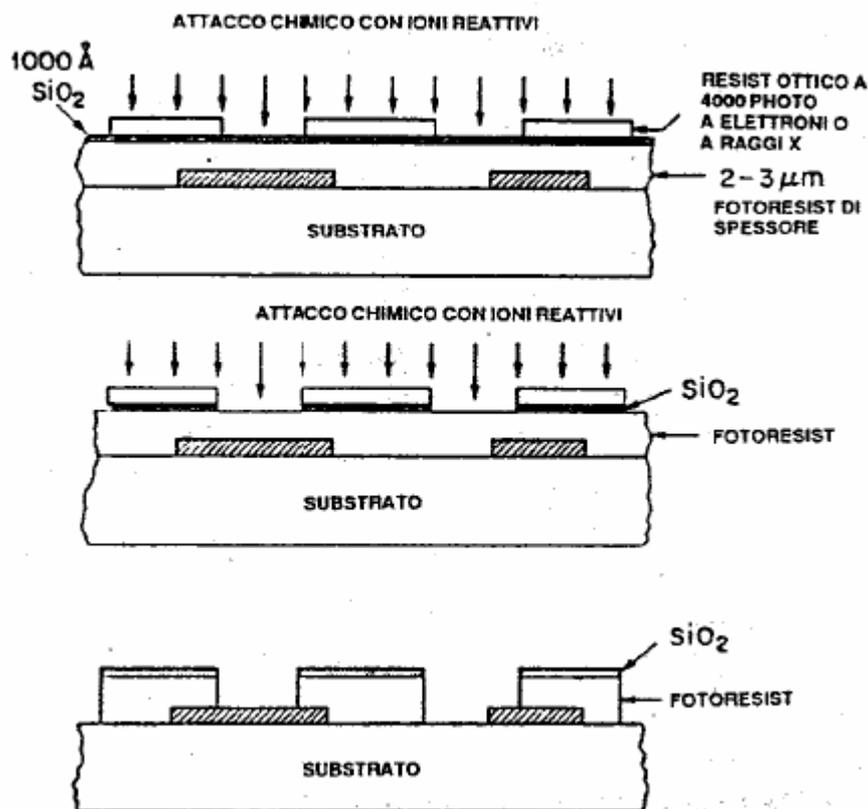
Il *resist* negativo resta completamente solubile per energie inferiori ad  $E_T$ , mentre per energie superiori alla soglia quantità sempre maggiori di pellicola di *resist* restano dopo lo sviluppo. La sensibilità di un *resist* negativo è data da quell'energia richiesta per conservare il 50% dello spessore originale della pellicola; nel calcolo del rapporto di contrasto vanno scambiati  $E_T$  ed  $E_1$ . La scelta del *resist* dipende dalla sorgente che si utilizza. Molto usato è il polimetilmetacrilato (PMMA).

Esiste una tabella che riporta i valori della sensibilità, il rapporto di contrasto in base al tipo di litografia che si vuole realizzare:

| Litografia          | Nome      | Tipo     | Sensibilità                 | $\gamma$ |
|---------------------|-----------|----------|-----------------------------|----------|
| Ottica              | Kodak 747 | Negativo | 9 mJ/cm <sup>2</sup>        | 1,9      |
|                     | AZ-1350J  | Positivo | 90 mJ/cm <sup>2</sup>       | 1,4      |
|                     | PR102     | Positivo | 140 mJ/cm <sup>2</sup>      | 1,9      |
| Fascio di elettroni | COP       | Negativo | 0,3 $\mu$ C/cm <sup>2</sup> | 0,45     |
|                     | GeSe      | Negativo | 80 $\mu$ C/cm <sup>2</sup>  | 3,5      |
|                     | PBS       | Positivo | 1 $\mu$ C/cm <sup>2</sup>   | 0,35     |
|                     | PMMA      | Positivo | 50 $\mu$ C/cm <sup>2</sup>  | 1,0      |
| Raggi X             | COP       | Negativo | 175 mJ/cm <sup>2</sup>      | 0,45     |
|                     | DCOPA     | Negativo | 10 mJ/cm <sup>2</sup>       | 0,65     |
|                     | PBS       | Positivo | 95 mJ/cm <sup>2</sup>       | 0,5      |
|                     | PMMA      | Positivo | 1000 mJ/cm <sup>2</sup>     | 1,0      |

Migliori risoluzioni si ottengono con *resist* positivi, ma richiedono energia di esposizioni superiori. Anche pellicole di *resist* sottili consentono di avere elevate risoluzioni.

La figura a fianco mostra un esempio di *fotoregist* realizzato a tre strati che comprende uno strato di fotoregist molto spesso (2-3 micron), uno sottile di SiO<sub>2</sub> ed infine un altro strato di *resist* (4000 Å) che una volta sviluppato verrà utilizzato come maschera per attaccare chimicamente il sottile strato di ossido che a sua volta serve come maschera per l'attacco dello strato spesso di *resist* posto inferiormente



#### APPLICAZIONE DEL RESIST

Il metodo standard per l'applicazione del *fotoregist* nella fabbricazione di circuiti integrati è quello di mettere in rapida rotazione il wafer di silicio. Questa tecnica, detta *spin coating*, si effettua attraverso questi passi:

- \* Il substrato viene montato sul piattello di un alberino sotto-vuoto;
- \* Inondazione del substrato con una soluzione di resist;
- \* Accelerazione ad una desiderata velocità;
- \* Rotazione a velocità costante che viene mantenuta per circa 30 sec, fino a raggiungere la quasi completa evaporazione del solvente.

In questo modo si ottiene un sottile strato uniforme di *fotoresist* sulla superficie del wafer. Lo spessore del *resist* è determinato dalla viscosità del *resist* e dalla velocità di rotazione dello *spinner*:

$$I_r = \frac{\text{viscosità} \_ \text{contenuto} \_ \text{solido} \_ \text{percentuale} \_ \text{resist}}{\sqrt{\text{velocità} \_ \text{di} \_ \text{rotazione}}}$$

Spessori usuali per processi commerciali sono di 1-2 μm. La velocità di rotazione è generalmente di 1000-10000 giri al minuto.

Dopo la deposizione del *resist* la fetta viene riscaldata alla temperatura di 80°C-100°C allo scopo di evaporare il solvente residuo(1-3%) e temperare stress causati dal precedente *spinning*, questo al fine di migliorare l'adesione del *resist* al substrato. Il *prebaking* (preriscaldamento) assicura l'uniformità del *resist* sul substrato ed è fondamentale per i successivi passi di sviluppo ed *etching*.

L'esposizione alla radiazione crea un'immagine latente nello strato di *resist*, la cui qualità dipende dallo strumento di esposizione, dalla fisica e dalla chimica dell'interazione tra radiazione e *resist* e dalla qualità della maschera. Spesso si effettua un altro riscaldamento a temperatura maggiore del primo (*postbake*) per migliorare l'adesione del *resist*, per fare avvenire delle reazioni chimiche nel *resist* o per eliminare le onde stazionarie provocate dai fenomeni di interferenza.

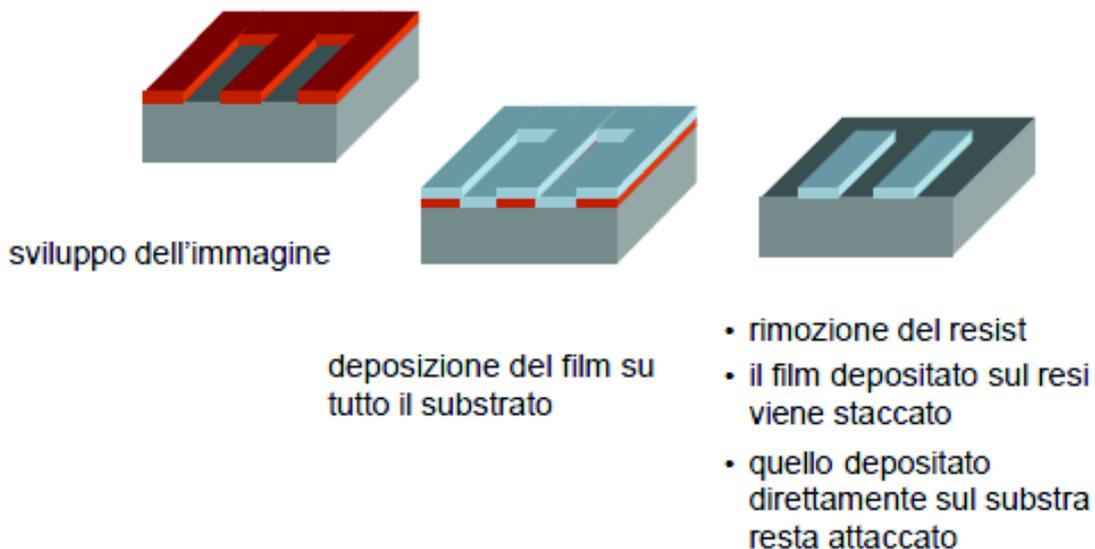
Il *resist* viene quindi sviluppato o mediante immersione in una soluzione opportuna oppure spruzzando la stessa soluzione di sviluppo sulla fetta.

Attraverso la fase di *etching* viene rimosso lo strato isolante esposto (ma non il *resist*); mediante solvente o ossidazione da plasma, viene poi asportato il *resist* lasciando così sulla superficie della fetta un'impronta di isolante o di piste a seconda che sia stato effettuato un *resist* positivo o negativo

#### LIFT-OFF

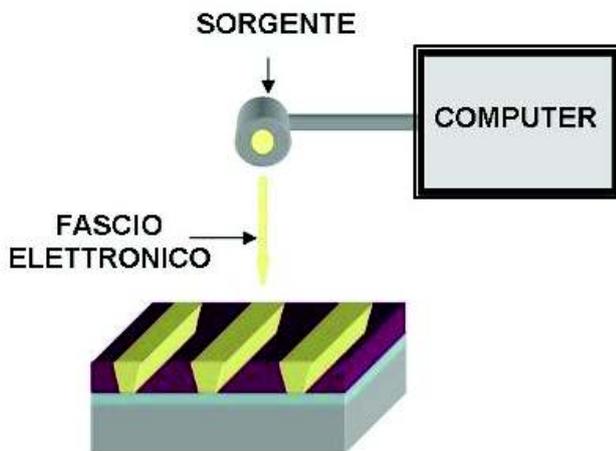
In un processo *lift off* un *resist* positivo è utilizzato per formare le sagome sul substrato

- Si depone una pellicola di film metallico (ad es. alluminio) in modo che ricopra tutto (resist e substrato)
- Si rimuove il *resist* (attraverso solvente organico) così come il film metallico che gli sta sopra
- Il film metallico rimane attaccato al substrato



## 2 LITOGRAFIA A FASCIO DI ELETTRONI

La litografia a fascio elettronico viene impiegata per creare percorsi circuitali sul substrato senza l'utilizzo della maschera.

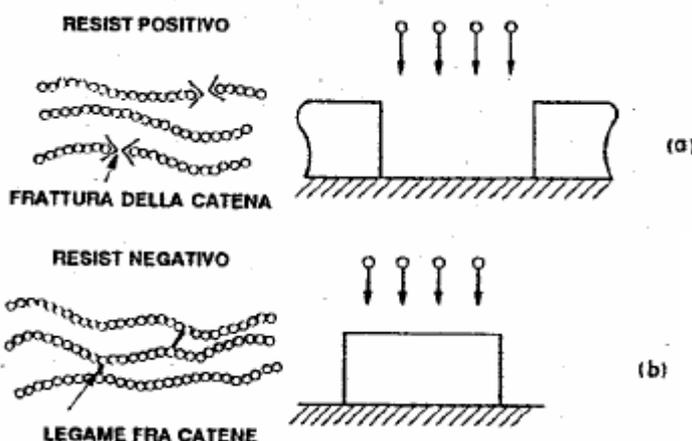


Il fascio elettronico, generato in una colonna elettro-ottica simile a quella di un microscopio elettronico a scansione, viene indirizzato verso il substrato coperto di *resist* e guidato da un computer verso le regioni da impressionare; usa un sottile pennello di elettroni, sottoposto a scansione elettronica attraverso un sistema di lenti elettrostatiche e pilotato da un calcolatore; il pennello è guidato sulla superficie del circuito ricoperto da *fotoreist* in modo da scrivere direttamente il tracciato senza l'uso di maschere.

Il controllo software del fascio rappresenta uno dei principali vantaggi di questa tecnica litografica, in quanto consente di realizzare disegni circuitali diversi semplicemente variando i dati in ingresso al calcolatore e minimizza la possibilità di errori.

Per contro, una tecnica di questo tipo (comunque lenta) può presentare problemi relativi allo scattering degli elettroni; queste particelle, infatti, penetrano nel *resist* con traiettorie non parallele, impressionando porzioni di *resist* di dimensioni non rispondenti alle specifiche di progetto. Questo determina una deformazione dei percorsi circuitali di cui si deve tenere conto nella valutazione finale della qualità dell'immagine trasferita; tuttavia viene aggirato il limite della litografia ottica in cui si presenta il limite della diffrazione della luce, consentendo la fabbricazione di dispositivi di dimensioni nanometriche.

I *resist* utilizzati nella litografia a fascio di elettroni sono costituiti da polimeri: l'irradiazione consente di cambiarne lo stato fisico e chimico quindi su di essi è possibile tracciare delle figure. Nel caso *resist* elettronico positivo, l'interazione tra il polimero e gli elettroni provoca la rottura dei legami chimici con la conseguente formazione di frammenti molecolari a catena più corta come mostrato in figura a.



Il peso molecolare del polimero quindi diminuisce e può essere fatto sciogliere in una soluzione tale da attaccare solamente il materiale che ha peso molecolare più basso. Nel caso di *resist* negativi (figura b), la radiazione provoca polimerizzazione, cioè catene intrecciate e complesse caratterizzate da peso molecolare superiore rispetto a quello del polimero non irradiato che quindi viene fatto sciogliere in soluzione.

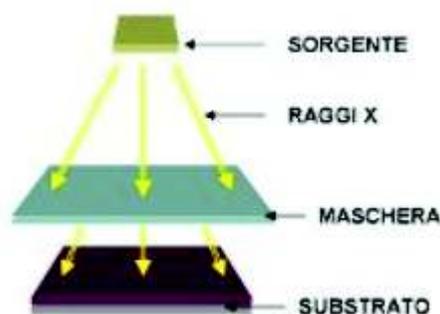
Le risoluzioni migliori ( $0.1 \mu\text{m}$ ) si ottengono con *resist* positivi. Con *resist* elettronici negativi si arriva al massimo a  $1 \mu\text{m}$ .

Lo svantaggio in questo tipo di litografia deriva dalla diffusione degli elettroni irradiati: essi penetrano il polimero ma possono arrivare al substrato con conseguente deviazione della traiettoria (causa dell'urto) e si disperdono finché non esauriscono la propria energia provocando delle

fratture. Questo implica che l'irradiazione del fascio elettronico in un punto influenza anche le aree circostanti (effetto di prossimità) quindi è necessario porre un limite alla distanza tra un componente e l'altro. Per ovviare a questo inconveniente spesso si suddividono le aree da tracciare in segmenti più piccoli in modo che la dose di elettroni incidenti su ciascun segmentino sommata alla dose proveniente (per diffusione) da quella dei segmenti vicini, sia quella corretta di esposizione. L'energia posseduta da questi elettroni è dell'ordine dei 20keV.

### 3 LITOGRAFIA A RAGGI X

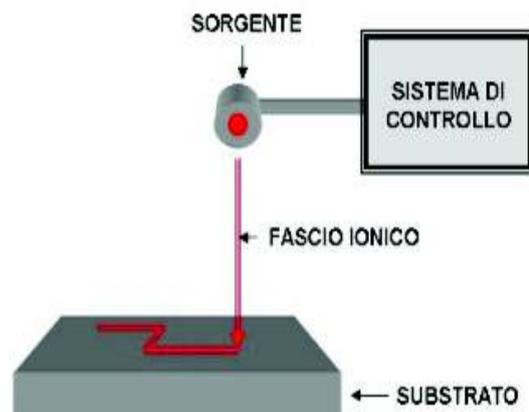
La litografia a raggi X rappresenta una tecnica molto utilizzata per realizzare strutture di dimensioni micrometriche caratterizzate da un'elevatissima densità di percorsi circuitali. Il sistema litografico comprende: il substrato su cui dovrà essere realizzato il circuito, una maschera riportante il disegno dei percorsi circuitali da realizzare e una sorgente di raggi X. La maschera è posta a una certa distanza dal substrato, al fine di evitarne eventuali danneggiamenti superficiali.



A differenza di quel che accade con la litografia a fascio elettronico, in questo tipo di tecnica litografica i raggi X si propagano nella *resist* seguendo traiettorie parallele e, di conseguenza, consentono il raggiungimento di elevate risoluzioni. Lo svantaggio principale di questo tipo di tecnica, però, risiede nella necessità di utilizzare una sorgente di raggi X di dimensioni molto ridotte, al fine di evitare che la sorgente stessa ponga in ombra alcune regioni di *resist*; inoltre, dato che la sorgente deve essere posta ad elevata distanza dal substrato per garantire il perfetto trasferimento del disegno, occorre utilizzare sorgenti ad elevata potenza (25keV), al fine di evitare eccessivi tempi di esposizione.

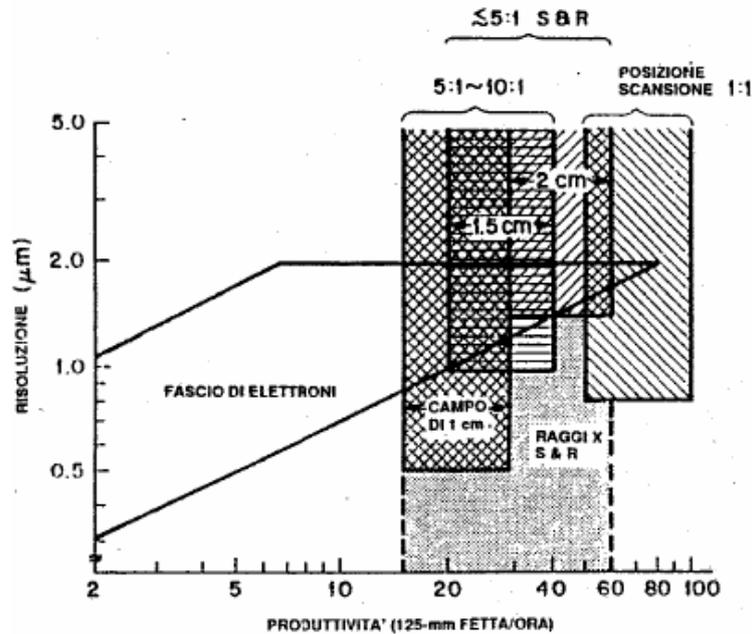
### 4 LITOGRAFIA A FASCIO DI IONI

La litografia ionica consiste nel realizzare sul substrato percorsi circuitali tramite un fascio di ioni ad elevata energia, senza l'utilizzo di fotomaschere o *resist*. Gli ioni, infatti, entrando in contatto con il substrato si depositano nelle zone di incidenza e possono, in tal modo, realizzare percorsi circuitali rispondenti alle specifiche progettuali. Rispetto agli elettroni, gli ioni, essendo più pesanti, sono meno soggetti al fenomeno dello scattering e riducono, quindi, la probabilità di un aumento delle dimensioni dei pattern realizzati. Per contro la necessità di disegnare percorsi circuitali in modo sequenziale e le difficoltà di controllo della posizione del fascio ostacolano la piena diffusione della tecnica litografica appena descritta e si pongono come sfide aperte per i numerosi centri di ricerca coinvolti nel settore della litografia per la microelettronica.



## 5 CONFRONTO TRA I VARI METODI LITOGRAFICI

La scelta del tipo di litografia influisce innanzitutto sul potere risolutivo. La figura mostra la risoluzione stimata di vari sistemi litografici in funzione della produttività per fette del diametro 125 mm:



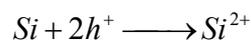
Per circuiti con elementi di dimensione minima superiore ad 1  $\mu\text{m}$ , il sistema di proiezione a scansione 1:1 è più conveniente grazie all'elevata produttività. Per circuiti di dimensione compresa tra 1 e 0.5  $\mu\text{m}$  domani il sistema passo-passo M:1; per quello che riguarda la litografia a fasci di elettroni, il numero di fette all'ora diminuisce al diminuire della dimensione minima del circuito: 20 fette all'ora per circuiti da 2  $\mu\text{m}$ , 1 fetta all'ora per dimensioni di 0.5  $\mu\text{m}$ . Nel prossimo futuro, lo sviluppo di tecniche passo-passo a raggi X consentirà di trovare un ottimo compromesso tra risoluzione e produttività.

## 6 INCISIONE CHIMICA PER VIA UMIDA

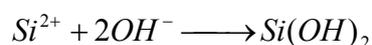
È un attacco chimico utilizzato per lappare e lucidare le fette di semiconduttore grezze in modo da ottenere una superficie piana e priva di difetti od anche per tracciare finestre nel materiale isolante. Tale meccanismo comprende tre passi fondamentali: 1) i reagenti per l'attacco vengono trasportati sulla superficie della fetta; 2) viene fatta avvenire la reazione; 3) i prodotti di tale reazione vengono asportati. La velocità di incisione è influenzata sia dall'agitazione che dalla temperatura dell'agente chimico utilizzato per l'attacco.

Nel caso di **incisione isotropa**, la velocità con cui avvengono le reazioni è uguale lungo tutte le direzioni. Le soluzioni di attacco più comunemente utilizzate sono miscele di acido nitrico e acido fluoridrico in acqua o acido acetico:

Si porta inizialmente il silicio ad uno stato di ossidazione superiore (2+):



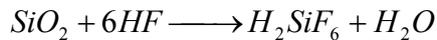
poi lo si fa reagire con ioni  $\text{OH}^-$  derivanti dalla dissociazione di  $\text{H}_2\text{O}$ :



che in seguito libera idrogeno generando  $\text{SiO}_2$ :

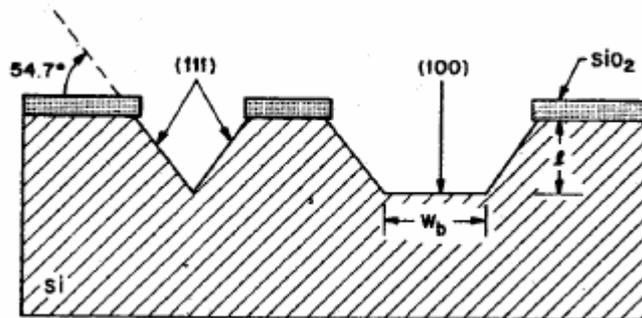


Per sciogliere l'ossido di silicio, come accennato, si può utilizzare ad esempio acido fluoridrico:



in cui  $H_2SiF_6$  è facilmente solubile in acqua.

Nel caso di **incisione anisotropa**, è possibile far in modo che la velocità di dissoluzione vari a seconda del piano cristallino considerato. In generale le velocità di attacco sono inferiori per quei piani cristallini che hanno densità maggiore. Negli attacchi di questo tipo viene in genere utilizzato idrossido di potassio (KOH) in acqua e acido isopropilico; nel silicio un attacco anisotropo forma dei solchi esattamente a forma di V (quello a sinistra della figura) i cui bordi sono dei piani (111) formanti un angolo di circa  $54.7^\circ$  rispetto alla superficie (100); se il tempo di attacco è breve si forma invece un solco a forma di U (quello a destra della figura)

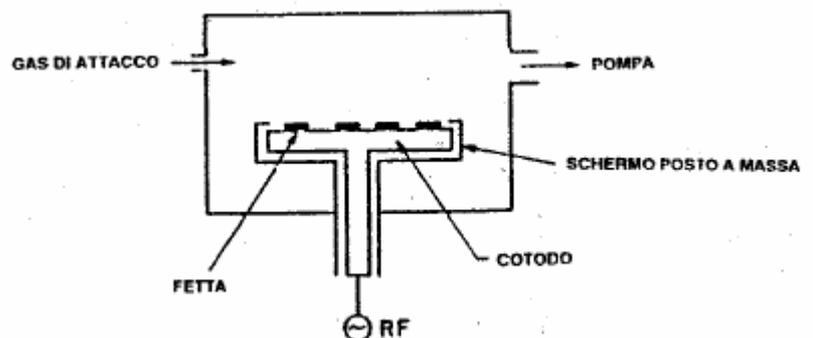


Solchi di forma differente si realizzano utilizzando silicio orientato secondo piani cristallini diversi.

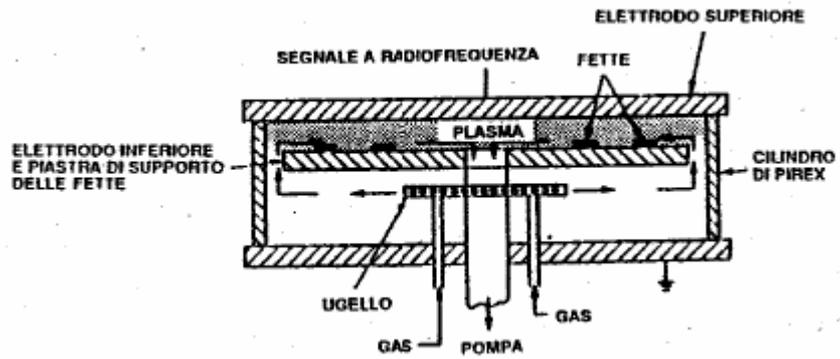
## 7 INCISIONE CHIMICA PER VIA SECCA

Un inconveniente dell'attacco chimico per via umida è quello di non riuscire ad ottenere un attacco solo in una direzione, ma almeno parzialmente l'attacco avviene in modo isotropo; questo significa che se ad esempio si vuole realizzare un'incisione verticale, si avrà comunque un attacco anche nelle direzioni laterali. L'attacco per via secca (ovvero, incisione assistita da plasma) consente di ridurre al minimo questo problema. Il plasma è un gas completamente o parzialmente ionizzato costituito da ioni, elettroni e neutroni; esso viene realizzato applicando al gas un campo elettrico il quale accelera elettroni liberi presenti i quali urtano gli atomi del gas e ne liberano altri che verranno accelerati ed andranno a urtare altri atomi per liberare altri elettroni: il meccanismo diventa un processo a valanga.

Un primo apparato per via secca prevede che la fetta sia posta su un elettrodo a potenziale elevato mentre ioni di argon sono accelerati dal campo applicato in modo tale da bombardare la superficie del bersaglio, i cui atomi diventano volatili quindi asportati dalla fetta. La direzione del campo elettrico (perpendicolare alla superficie del bersaglio), quindi la maggior parte degli ioni arriva in direzione normale alla fetta, riducendo così al minimo la velocità di attacco laterale. L'inconveniente sta nel fatto che le velocità di attacco sono simili per la maggior parte dei materiali e non è quindi possibile incidere solamente uno strato arrestando l'incisione al materiale sottostante.



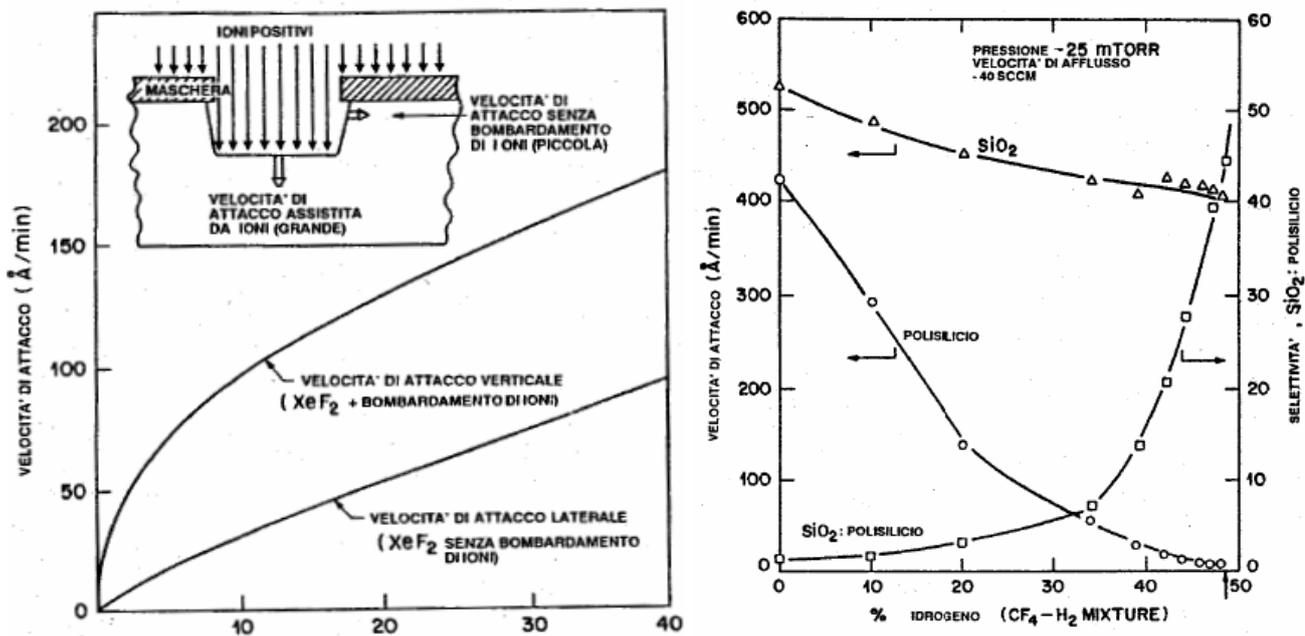
La figura successiva mostra un apparato d'incisione a elettrodi piani paralleli in cui il plasma è confinato tra due elettrodi posti a distanza ravvicinata. il principio è sempre lo stesso, ma qui il plasma utilizzato contiene atomi alogeni ( $\text{Cl}_2$  o  $\text{CCl}_4$ )



Un processo di incisione al plasma consiste di cinque passi:

- generazione della specie in grado di effettuare l'attacco
- trasporto sulla superficie bersaglio attraverso un gas
- assorbimento in superficie
- reazione chimica e bombardamento ionico producono composti volatili in superficie
- diffusioni (desorbimenti) di tali composti dalla superficie

la velocità di attacco risulta accresciuta nel caso di reazioni chimiche assistite da ioni (figura a sinistra), oppure nel caso in cui al gas siano aggiunte altre miscele di gas (figura a destra):



Nel caso di silicio bombardato da ioni, la velocità di attacco laterale dipende dalla capacità delle molecole di  $\text{XeF}_2$  (difluoruro di xeno) di attaccare il silicio in assenza del bombardamento di ioni, mentre la velocità di attacco verticale dipende da entrambi i fenomeni (all'ascissa è riportata la velocità di afflusso delle molecole di  $\text{XeF}_2$ ).

Nella figura a destra è mostrato l'attacco con aggiunta di idrogeno a un gas di tetrafluoruro di carbonio ( $\text{CF}_4$ ); se l'idrogeno aggiunto è inferiore al 40% , la velocità di attacco del  $\text{SiO}_2$  rimane pressoché costante, mentre desce monotonicamente per percentuali superiori fino ad annullarsi.