

Capitolo 6

DEPOSIZIONE DI FILM SOTTILI

6.1 Cenni ai sistemi di vuoto

L'unità di pressione nel Sistema Internazionale è il Pascal (Pa) ($1 Pa = 1 N/m^2$). Diamo qui di seguito una lista delle conversioni fra le unità più comunemente usate per la misura della pressione.

1 Pa	$7.5 \cdot 10^{-3} Torr$	$7.5 \mu m Hg$
1 $Torr$	133.3 Pa	—
1 bar	$10^5 Pa$	750 $Torr$
1 atm	$1.013 \cdot 10^5 Pa$	760 $Torr$

Molti e importanti processi di fabbricazione dei circuiti integrati avvengono in vuoto, come pure in vuoto operano molte apparecchiature di analisi e di caratterizzazione di materiali e di dispositivi. Inoltre i processi e le caratteristiche elettriche dei dispositivi dipendono in maniera critica dal grado di vuoto, cosicché è indispensabile fornire qualche nozione elementare sul vuoto e sui sistemi che lo producono

nell'ambiente di lavoro. La figura 1 mette in relazione fra loro le principali quantità che definiscono il grado di vuoto di un certo ambiente, *isolato* dall'esterno.

Il grado di vuoto può essere definito in base all'intervallo interessato da ciascuna di queste quantità. E' interessante esaminare come varia in funzione della pressione residua (grado di vuoto) il *tempo di formazione di un monostrato* di atomi o molecole di gas ancora presenti nell'ambiente. La natura degli atomi o delle molecole è qui inessenziale: ciò che importa è che si tratta di uno strato *non voluto* che si deposita su di una superficie, teoricamente ideale: uno strato quindi di materiale contaminante difficilmente controllabile. A 10^{-8} Pa questo tempo vale 10 ore, mentre scende ad appena pochi minuti a 10^{-6} Pa. Se si tratta di deporre per evaporazione un film metallico su di una superficie di silicio per formare un contatto rettificante, il grado di vuoto condiziona la natura dell'interfaccia che a sua volta determina le caratteristiche del dispositivo. Se invece si esamina un circuito integrato con la tecnica del contrasto di tensione, la contaminazione della superficie in esame determina la durata di una misura affidabile di tensione. Facendo riferimento alla figura 1 avremo:

- vuoto medio: $1 - 10^{-3}$ Torr
- alto vuoto: $10^{-3} - 10^{-6}$ Torr
- ultra - alto vuoto: $10^{-6} - 10^{-13}$ Torr.

Nella figura 2 sono indicati in forma schematica due sistemi di vuoto, cui faremo riferimento come sistema convenzionale e sistema per ultra - alto vuoto. Come si vede, indipendentemente dal sistema usato, per ottenere nell'ambiente di lavoro un certo grado di vuoto sono necessarie due operazioni da compiere in successione: il prevuoto, che riduce la pressione da quella atmosferica ad un valore compreso fra i 10^{-2} e $5 \cdot 10^{-3}$ Torr e il vuoto finale.

Nel sistema convenzionale il prevuoto viene effettuato con una pompa meccanica rotativa, il cui funzionamento viene qui di seguito schematicamente descritto, sempre con riferimento alla figura 2 che mostra la pompa in sezione. Le fasi descritte in figura sono:

- aspirazione dall'ambiente di lavoro

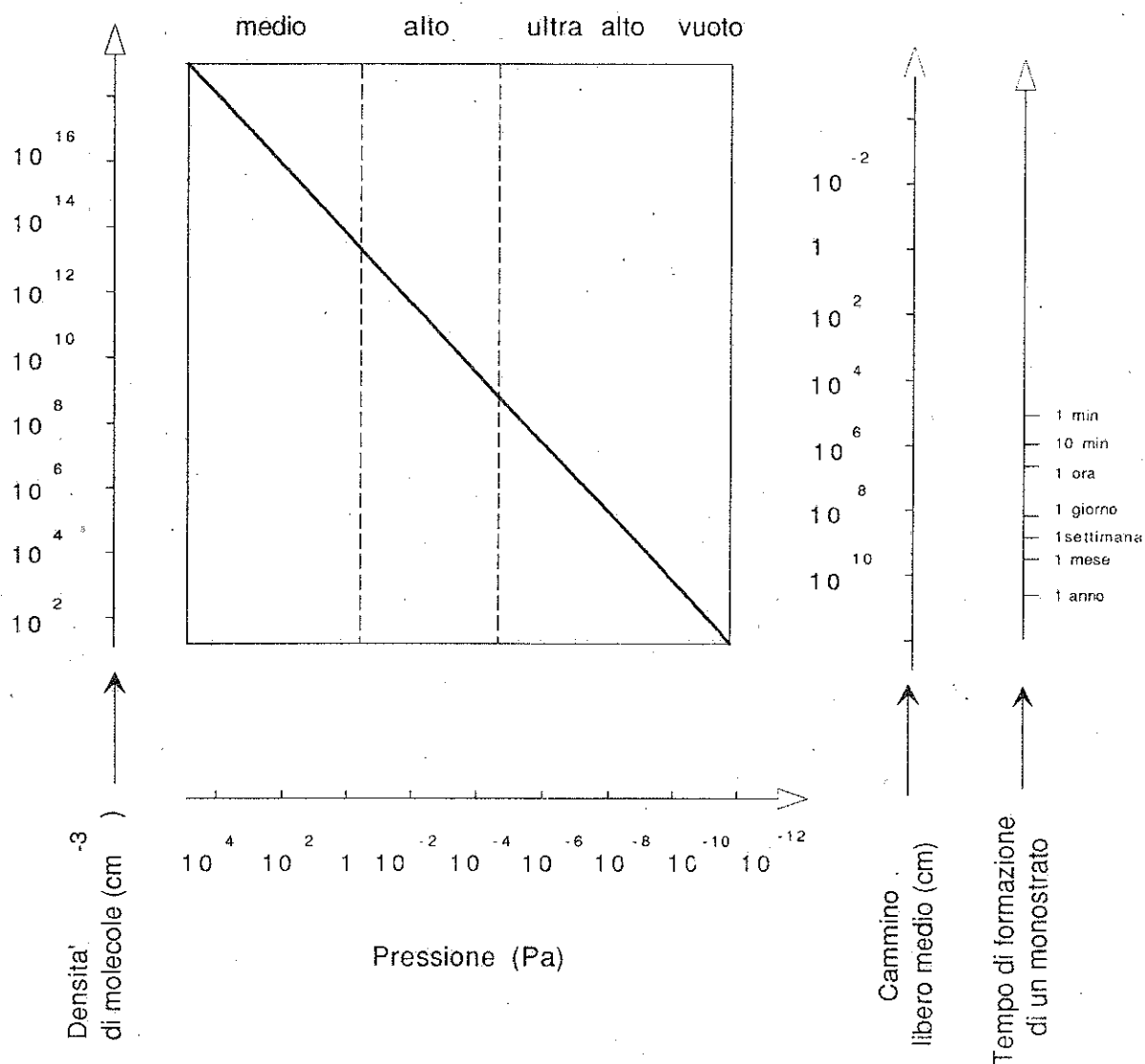


Figura 6.1: Relazione tra le varie quantità che definiscono il grado di vuoto e la pressione.

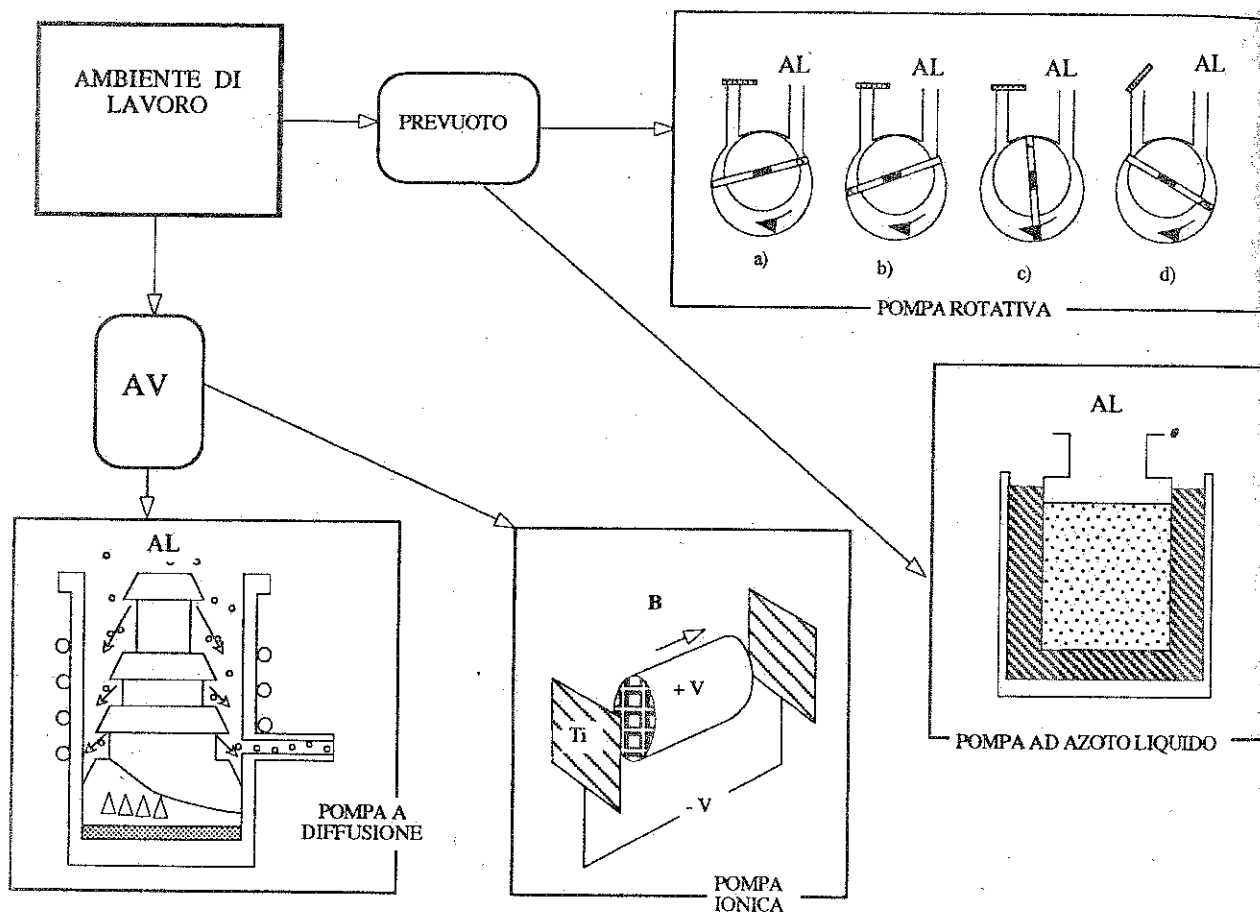


Figura 6.2: Sistema convenzionale: pompa rotativa + pompa a diffusione; sistema UHV: pompa ad azoto liquido + pompa ionica.

- chiusura fra camera pompa e ambiente di lavoro
- compressione
- scarico attraverso una valvola unidirezionale.

Lo scarico, e quindi la capacità della pompa di fare il vuoto, è possibile finché la pressione ottenuta durante la fase di compressione nel vano residuo della zona di scarico non diviene uguale a quella atmosferica. Da questo punto in poi la pompa si limita a mantenere il vuoto, ovvero a compensare le perdite inevitabili dell'ambiente di lavoro.

La pompa meccanica, che necessita di lubrificazione, produce tuttavia inevitabilmente un certo inquinamento dovuto ad un riflusso di vapori organici verso l'ambiente di lavoro. L'inquinamento può essere ridotto interponendo fra pompa e ambiente di lavoro una trappola che blocchi il riflusso di vapori organici.

La fase successiva di alto vuoto viene compiuta, nel sistema convenzionale, da una pompa a diffusione. L'olio, contenuto nella pompa, viene riscaldato ad una temperatura di circa 200 °C. I vapori d'olio, per effetto combinato della temperatura e della forma dei deflettori interni, acquistano una velocità supersonica che convoglia, comprimendoli, i gas dall'ambiente di lavoro verso l'uscita, dove vengono estratti dalla pompa rotativa. Anche in questo caso, come è facilmente intuibile, la presenza di vapori d'olio produce un certo inquinamento che, come nel caso precedente, può venire ridotto con l'uso di trappole interposte fra pompa e ambiente di lavoro. Per molte applicazioni il vuoto ottenibile con il sistema descritto ($\simeq 10^{-6}$ Torr) è più che sufficiente e l'inquinamento, soprattutto se ridotto con l'uso di trappole, non crea problemi di rilievo (ad esempio: deposizioni delle metal di Al mediante evaporazione). I vantaggi sono la semplicità d'uso e la relativa rapidità con cui si raggiunge la pressione di lavoro (dell'ordine di poche ore). Quando è necessario minimizzare l'inquinamento (ad esempio: crescita di semiconduttori composti con la tecnica MBE) si devono usare per il prevuoto una pompa ad azoto liquido e per la fase successiva una pompa ionica.

La prima (figura 2) consiste di un contenitore di acciaio inox che contiene un materiale finemente suddiviso e molto poroso (zeolite) che ha la capacità, a temperature basse, di condensare i gas dell'ambiente

di lavoro. La bassa temperatura è ottenuta raffreddando il contenitore con azoto liquido ($T = 77\text{ K}$). Solitamente è necessario operare con più pompe in parallelo. Il vuoto finale ottenibile è dell'ordine di 10^{-2} Torr . Entra quindi in funzione la pompa ionica. Una differenza di potenziale di qualche kV viene applicata fra due elettrodi sagomati come in figura. Un campo magnetico, di un magnete permanente, fa compiere alle cariche prodotte un percorso a spirale, aumentando così la probabilità di collisione con gli atomi e le molecole di gas residuo. Gli ioni, accelerati dalla differenza di potenziale, collidono con il catodo di titanio e provocano, per sputtering, emissione di atomi di Ti . Questi condensano sulla superficie a nido d'ape dell'anodo inglobando gli atomi e le molecole dell'atmosfera residua. Il vuoto finale ottenibile, se si usano particolari accorgimenti, è dell'ordine di 10^{-11} Torr . È evidente che in tutto il processo non intervengono agenti inquinanti che non siano quelli accidentalmente introdotti nell'ambiente di lavoro. Il vuoto finale richiede un tempo molto maggiore rispetto al caso precedente: qualche giorno in confronto a qualche ora. Il sistema descritto è solo un esempio; esiste una varietà di pompe la cui descrizione esula dallo scopo di questi appunti. È importante rimarcare che il grado di vuoto e di inquinamento dell'ambiente di lavoro hanno profonda influenza sulla qualità dei materiali, sul funzionamento e l'affidabilità dei dispositivi, sulla possibilità di compiere analisi e misure affidabili e riproducibili.

6.2 Evaporazione termica

Del materiale solido è riscaldato a temperature tali da indurne la evaporazione; il vapore condensa in forma di film sottile su un substrato freddo. La frazione di molecole in fase vapore che subiscono collisioni con il gas (residuo) nella camera di deposizione è proporzionale a $\exp - \left(\frac{d}{\ell}\right)$ dove d è la distanza percorsa dalla molecola ed ℓ il cammino libero medio.

Il cammino libero medio è funzione della pressione di gas residuo: ad esempio ℓ varia da $2 \cdot 10^2$ a $8 \cdot 10^3\text{ cm}$ per pressioni che variano da 10^{-4} a 10^{-6} Torr .

Il flusso di materiale evaporato ($\text{molecole cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$) da superfici pulite di area unitaria è dato dalla relazione di Langmuir:

$$N_e = 3.513 \cdot 10^{22} p_e \sqrt{\frac{1}{MT}}$$

dove si indica con p_e la pressione di vapore in *Torr*, con M il peso molecolare e con T la temperatura assoluta.

La velocità di deposizione dipende dalla

1. geometria della sorgente,
2. posizione sorgente - substrato,
3. coefficiente di condensazione (sticking coefficient).

Per sorgenti di piccola area N_e varia come $\cos^2 \theta / r^2$ essendo θ l'angolo tra la normale al substrato e la congiungente sorgente - substrato; r indica la distanza sorgente - substrato. Lo spessore del film depositato in funzione di x (figura 3) è dato dalla relazione:

$$\frac{t}{t_o} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{x}{h}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

6.2.1 Sorgenti termiche

Le sorgenti sono costituite da crogioli di metalli refrattari: W, Mo, Ta, Nb , riscaldati per effetto Joule. Sono utilizzate anche sorgenti in quarzo, grafite, ossidi vari. Diverse sono le possibili forme dei crogioli: cesto, spirale, navicella ecc. Il materiale da evaporare viene posto a contatto col crogiolo e portato a temperatura di fusione (sublimazione); la scelta di una particolare sorgente è determinata dalla temperatura che deve essere raggiunta e dalla resistenza del materiale con cui è ricavata a legarsi con il materiale da evaporare o comunque a reagire con esso.

Materiali da evaporare che tendono a spruzzare particelle fuse necessitano di sorgenti che schermano con geometrie chiuse il fuso e permettano la fuoriuscita del solo vapore.

La sorgente può essere fonte di inquinamento del vapore. Tipico esempio sono le sorgenti di tungsteno. Per motivi di lavorazione il tungsteno deve contenere una certa percentuale di sodio; durante l'evaporazione del gate di un transistor MOS parte del sodio evapora e contamina l'ossido.

*Per crogioli
1/2.000 mm
1.000 mm
1.000 mm*

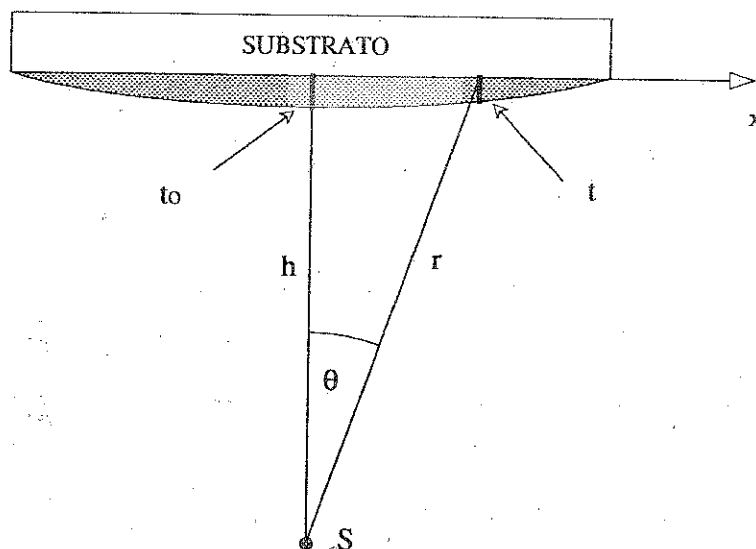


Figura 6.3: Spessore del film depositato da una sorgente puntiforme.

6.2.2 Evaporazione multipla

Componenti di composti o leghe tendono ad evaporare a differenti velocità a causa delle differenti tensioni di vapore. Questo fatto, insieme alla possibile tendenza alla decomposizione termica, alla nucleazione sul substrato diversa per i vari componenti, porta a film non stechiometrici e difficilmente riproducibili. Assumendo che la tensione di vapore di ciascun componente sia proporzionale alla sua concentrazione (C_*), si può determinare una espressione per il rapporto dei flussi di evaporazione N_a ed N_b dei due materiali componenti:

$$\frac{N_a}{N_b} = \frac{C_a p_a}{C_b p_b} \cdot \sqrt{\left(\frac{M_b}{M_a}\right)}$$

L'espressione di cui sopra è tuttavia solo indicativa e necessita di correzioni empiriche per i diversi composti.

Per ottenere films multicomponenti conviene evaporare ciascun componente da un crogiolo diverso controllando così in modo migliore ciascuna evaporazione.

6.2.3 Altre tecniche di evaporazione termica

Evaporazione flash si ottiene facendo cadere piccole quantità di fini grani di materiale da evaporare sulla sorgente preriscaldata. Si controlla bene la quantità di sostanza evaporata (anche piccole quantità) ma si ha la tendenza allo spruzzamento di particelle fuse ed a deviazioni forti dalla stechiometria per evaporazione di composti.

Evaporazione ad arco è utilizzata per evaporare metalli refrattari; si impiega un arco che scocca tra due elettrodi che vengono avvicinati ed utilizza l'energia immagazzinata in un banco di condensatori. È scarsamente riproducibile.

Riscaldamento Laser consente di aumentare la temperatura del materiale da evaporare fino a 20000°C con impulsi laser di 2 - 4 ms; è una tecnica in fase di studio per la deposizione di superconduttori ad alta temperatura.

6.3 Evaporazione con cannone elettronico

I maggiori limiti della evaporazione con sorgente termica sono la possibilità di inquinamento del vapore con atomi provenienti dal crogiolo e la limitazione alla potenza applicabile al crogiolo stesso; ciò comporta un abbassamento della temperatura massima ottenibile. Questi limiti possono essere superati riscaldando il materiale da evaporare con bombardamento di elettroni. Con riferimento alla figura 4 una tipica sorgente è costituita da:

- un filamento alimentato a bassa tensione (6 -12 V) ed alta corrente;
- un campo magnetico permanente;
- il crogiolo di rame raffreddato ad acqua;
- una tensione di accelerazione (fino a 20 kV);

Gli elettroni accelerati vengono focalizzati dal campo magnetico sul materiale da evaporare. L'alta conducibilità termica del rame fa sì che la temperatura del crogiolo non raggiunga valori tali da provocare inquinamento.

Devono essere prese precauzioni per evitare scariche dovute a scarso vuoto.

Bisogna anche tenere conto del fatto che gli elettroni cedono gran parte della loro energia nel tratto terminale della loro traiettoria nel bersaglio così che, se troppo accelerati, riscaldano prevalentemente una porzione sepolta del materiale; si possono verificare spruzzamenti di materiale fuso da parte del vapore creato internamente. Questo inconveniente può essere evitato regolando l'energia del fascio e lasciando riscaldare gradualmente il bersaglio.

La figura 5 mostra, in forma schematica, un tipico evaporatore da laboratorio.

6.4 Deposizione per sputtering

Lo sputtering è il fenomeno di espulsione di atomi da un bersaglio bombardato da particelle energetiche (generalmente ioni). Se tali particelle sono ioni positivi si parla di sputtering catodico.

Si definisce *resa di sputtering* il numero medio di atomi emessi per ione incidente; la resa di sputtering in funzione della energia dello ione incidente cresce rapidamente fino ad una energia caratteristica del sistema bersaglio - proiettile e quindi satura. Per energie ancora maggiori si osserva una diminuzione dovuta alla eccessiva penetrazione dello ione all'interno del bersaglio.

La resa cresce al diminuire del calore di evaporazione del bersaglio, mentre non è molto sensibile alla temperatura del bersaglio eccetto a temperature elevate ($> 600^\circ\text{C}$).

Le particelle emesse a seguito del bombardamento hanno energie considerevoli e velocità maggiori di quelle che si hanno nell'evaporazione termica. Si tratta prevalentemente di atomi o cluster di atomi, spesso molecole biatomiche. La specie emessa è spesso ionizzata o eccitata, ma le particelle eccitate decadono rapidamente irradiando una luminescenza caratteristica.

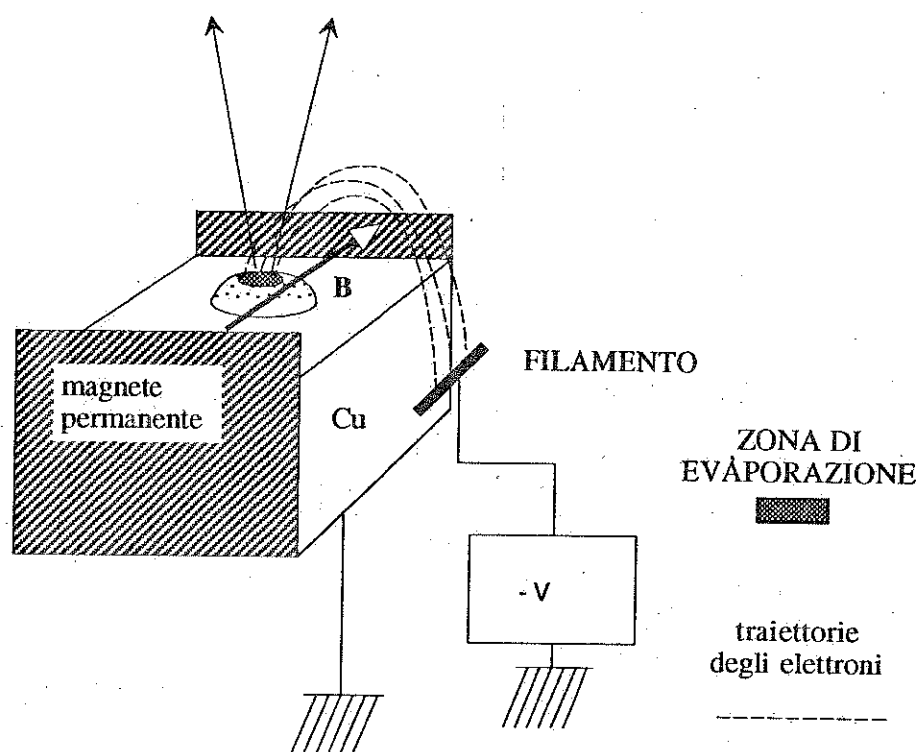


Figura 6.4: Schema di sorgente per evaporazione a cannone elettronico.

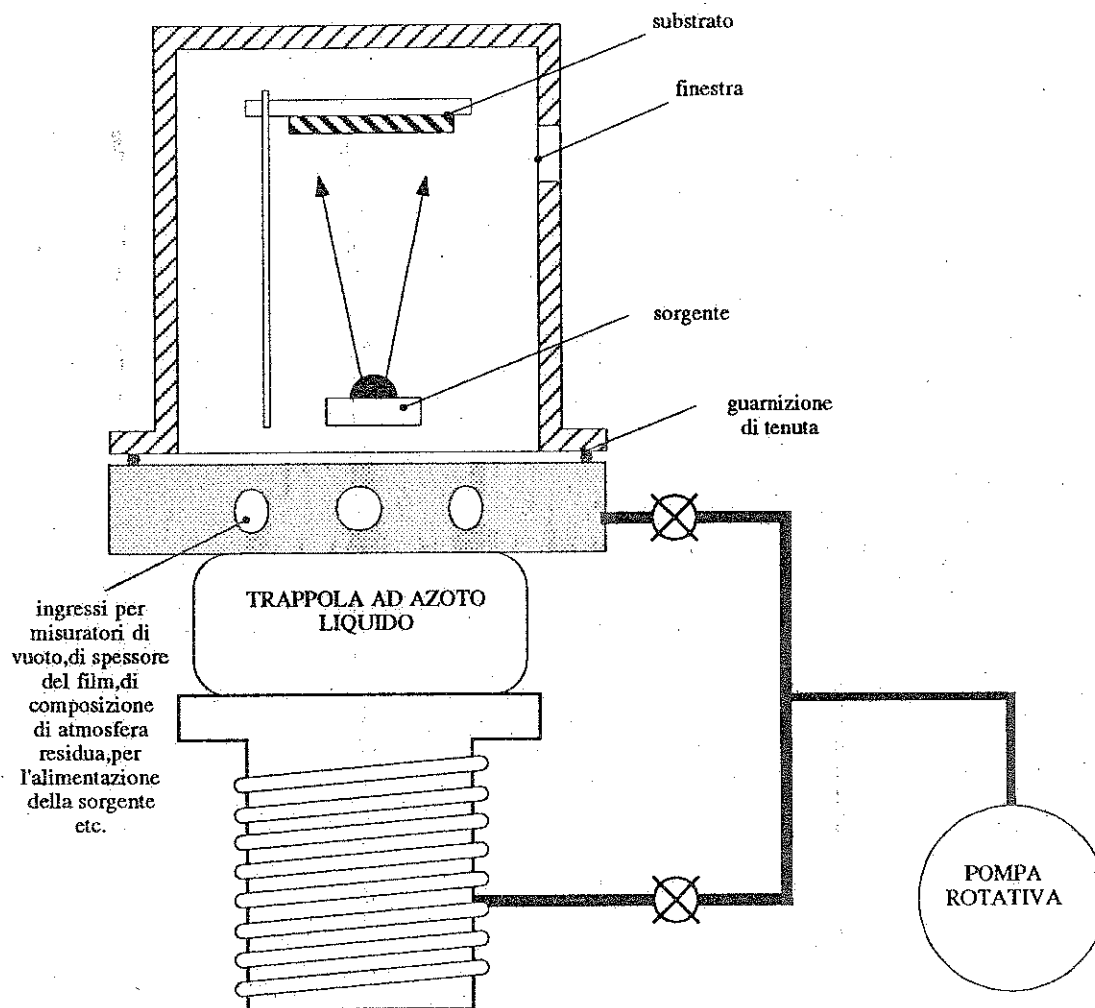


Figura 6.5: Schema di principio di un evaporatore.

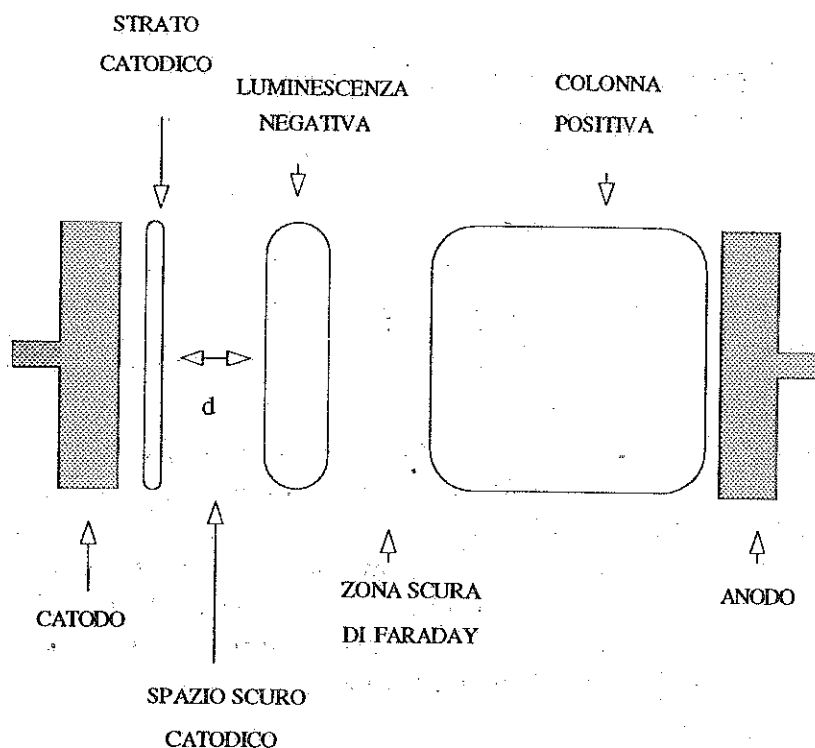


Figura 6.6: Struttura della scarica a bagliore.

6.4.1 La scarica a bagliore (sputtering a diodo)

Gli ioni per lo sputtering possono essere facilmente ottenuti da una scarica a bagliore in un gas a bassa pressione in una struttura a diodo alimentato in corrente continua (vedi figura 6).

La caduta di tensione maggiore si ha nella zona scura catodica, dove si ha la maggiore accelerazione di ioni positivi verso il catodo e di elettroni nella direzione opposta. Gli ioni che colpiscono il catodo produrranno sputtering catodico e anche gli elettroni secondari che contribuiscono a sostenere la scarica.

6.4.2 Fattori che influenzano la scarica a bagliore

Lo spessore della zona scura catodica è inversamente proporzionale alla pressione di gas. Aumentando la pressione di gas aumenta la corrente, diminuisce la caduta di tensione ed aumenta il numero di ioni ma diminuisce la loro energia. La resa di sputtering catodico aumenta ma meno che linearmente e raggiunge rapidamente un limite dovuto alle collisioni degli atomi sputterati con gli ioni incidenti. Le pressioni tipiche di utilizzo possono raggiungere i 10 *mTorr*.

Il catodo è generalmente piano; è necessario raffreddarlo poiché si riscalda rapidamente.

Si hanno problemi di contaminazione che hanno origine principalmente dal degasaggio della camera di sputtering provocato dal riscaldamento che si ha durante l'uso. Un'altra fonte di contaminazione è legata alla decomposizione di vapori di olio dovuti a correnti di ritorno dalle pompe a diffusione utilizzate a pressioni troppo elevate. La decomposizione di idrocarburi porta ad una marcata contaminazione da H_2 (fino al 3%) del film sputterato.

6.4.3 Varianti dello sputtering a diodo

Lo sputtering con scarica a bagliore in una struttura a diodo è schematizzato nella figura 7 insieme a due varianti di esso: il "bias" sputtering e lo sputtering a triodo.

Nello sputtering con "bias" il substrato è tenuto a una tensione negativa in modo che sia in certa misura bombardato anch'esso da ioni che operano un ciclo continuo di pulizia favorendo il desorbimento di impurezze. Una variante del bias sputtering è il così detto sputtering *asimmetrico*, in cui catodo ed anodo cambiano di ruolo a causa della particolare alimentazione alternativa del catodo; il tempo t_1 (vedi figura 7) di scambio, serve per pulire il substrato ed il tempo t_2 è quello di sputtering; notare che affinché si abbia una crescita netta del film da deporre, deve essere $t_2 > t_1$.

6.5 Sputtering a bassa pressione

Alcune delle ragioni che spingono a tentare di diminuire la pressione del gas (che nello sputtering a diodo è dell'ordine delle decine di *mTorr*) sono:

- diminuire la quantità di gas intrappolato nel film,
- limitare l'influenza del gas sul cammino delle particelle sputterate.

Questo obiettivo può essere ottenuto senza abbattere la resa di sputtering:

- aumentando l'efficienza di ionizzazione,
- aumentando il numero di elettroni nel plasma,
- utilizzando una sorgente di ioni.

Un campo magnetico trasverso aumenta la lunghezza della traiettoria dell'elettrone nel gas e la probabilità che incida su un atomo di gas ionizzandolo; questo è un metodo per aumentare l'efficienza di ionizzazione e poter diminuire la pressione di gas.

Elettroni ausiliari possono essere prodotti per effetto termoionico da un filamento riscaldato ed essere accelerati da un terzo elettrodo che li inietta nel gas (figura 7). Questa configurazione, che prende il nome di sputtering a triodo, consente di raggiungere velocità di deposizione di metalli nobili fino a 20 Å/min ad una pressione di 1 *mTorr*.

Per ridurre la pressione al di sotto del *mTorr* bisogna produrre gli ioni in una camera separata ed iniettarli nella camera di sputtering con sistemi di accelerazione opportuni. La camera di sputtering viene tenuta a circa 10^{-5} *Torr* mentre la sorgente funziona a circa 50 *mTorr*. Il sistema suddetto è di fatto un cannone ionico; con questa tecnica di sputtering, che prende il nome di *ion beam sputtering*, si possono raggiungere velocità di crescita di 40 Å/min.

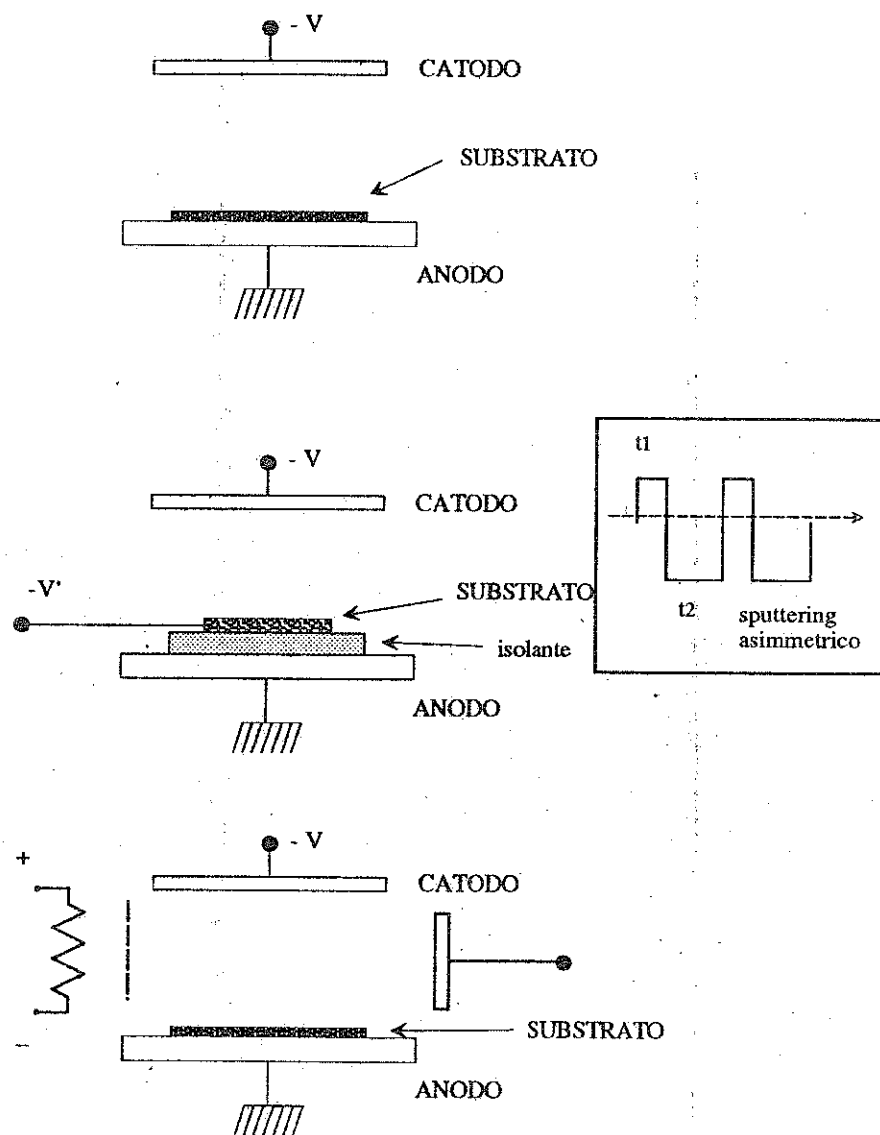


Figura 6.7: Varianti dello sputtering a diodo e sputtering a bassa pressione.

6.6 Sputtering a radio frequenza

Una considerazione particolare merita la tecnica di sputtering a radio frequenza; lo sputtering di isolanti non è infatti possibile nella configurazione a diodo poiché si viene a creare un accumulo di carica positiva sul bersaglio che respinge gli ioni incidenti. Lo sputtering di isolanti è invece possibile con lo sputtering RF poiché il bersaglio è periodicamente scaricato a seguito della inversione di polarità della tensione applicata. Una sorgente a radio frequenza riesce a ionizzare un gas a bassa pressione: la potenza a RF (tipicamente $\sim 13\text{ MHz}$) può essere applicata direttamente al catodo tramite una rete di accordo con accoppiamento capacitivo. Devono essere messi in evidenza alcuni punti per comprendere il funzionamento del processo di sputtering RF:

- a causa della diversa mobilità degli ioni e degli elettroni contenuti nel gas ionizzato, se la frequenza di pilotaggio è sufficientemente maggiore del tempo di transito degli ioni, molti più elettroni riusciranno a raggiungere l'elettrodo durante la semionda positiva di quanti ioni non lo possano fare durante la semionda negativa. Quanto sopra equivale a dire che il plasma si comporta come un elemento rettificante.
- In base ancora alla diversa mobilità dei portatori, si deduce che un gas ionizzato è sempre positivo rispetto alle pareti metalliche del contenitore entro cui è posto. Infatti, poiché mediamente le pareti devono ricevere carica nulla, deve nascere un potenziale ritardante per gli elettroni (più mobili) ed accelerante per gli ioni positivi.
- Gli elettrodi cui si applica la potenza a RF non sono di area uguale ma il bersaglio (catodo) ha dimensioni molto minori dell'anodo (che in generale è costituito dalla intera camera di sputtering) (vedi figura 8). L'anodo è messo a massa.

A causa della differenza di area tra gli elettrodi il potenziale *medio* che essi vengono ad assumere rispetto al gas ionizzato (sempre positivo, come si è detto) sarà diverso. La caduta di tensione verso il bersaglio risulterà molto maggiore; una relazione tra le due cadute e le aree degli

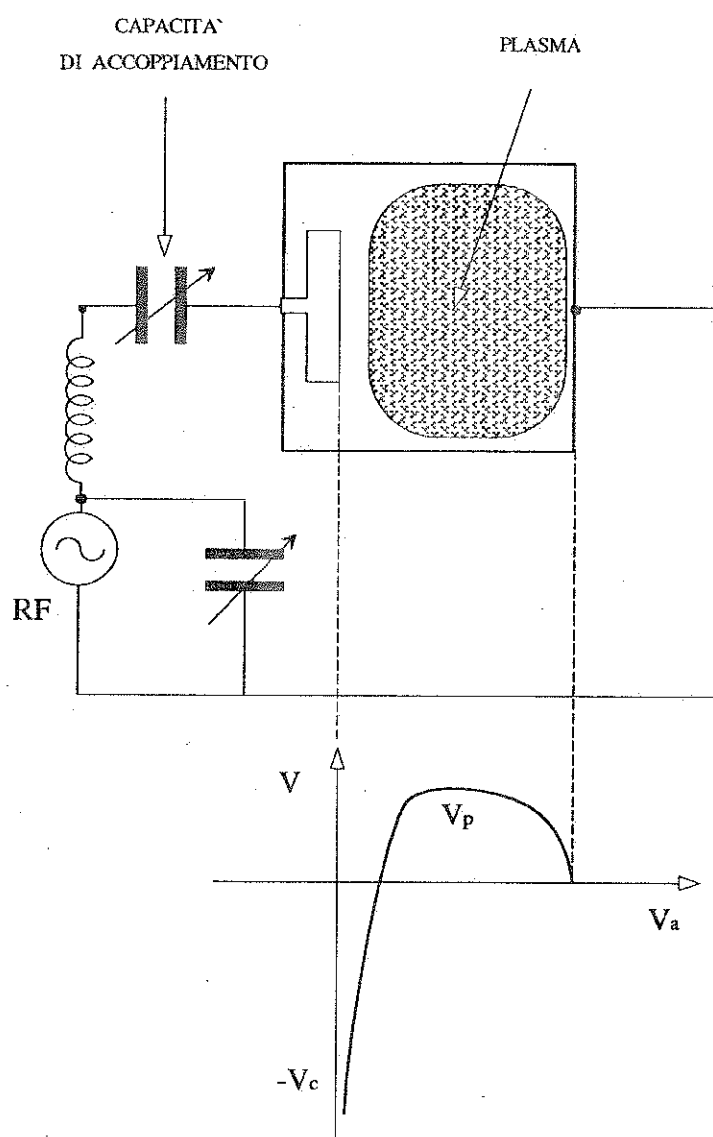


Figura 6.8: Sputtering a radio frequenza. Viene mostrato l'andamento del potenziale medio dall'elettrodo che si carica negativamente alla parete della camera di sputtering (anodo).

elettrodi è :

$$\frac{V_c}{V_a} = \left(\frac{A_a}{A_c} \right)^4$$

Sebbene la dipendenza funzionale (dalla quarta potenza) sia contestata da alcuni autori, rimane confermato che il sistema elettrodi - plasma si comporta come un divisore capacitivo di tensione con una impedenza molto maggiore dalla parte dell'elettrodo di area minore. È questa caduta di tensione che accelera gli ioni positivi verso il bersaglio. Ricordiamo infine che a causa dell'accoppiamento capacitivo, il bersaglio non può scaricarsi e si instaura quindi una condizione stazionaria in cui il bersaglio funziona da catodo ad un potenziale negativo variabile (in funzione dell'ampiezza della tensione RF di pilotaggio) da qualche centinaio di V a qualche KV.

6.7 Crescita e struttura del film

6.7.1 Film conduttori

La struttura del film depositato, sia mediante evaporazione sia mediante sputtering, dipende da:

- velocità di deposizione
- tipo di substrato
- temperatura del substrato
- pulizia del substrato
- composizione dell'atmosfera residua nella camera di deposizione.

L'evoluzione della struttura (e dello spessore) del film durante la crescita può essere schematizzata come segue :

- a Un atomo (una molecola) che giunge dalla sorgente sul substrato può o rievaporare dopo un tempo molto breve oppure, dopo aver perso la componente della quantità di moto in direzione normale al substrato muoversi su di esso alla ricerca di un minimo di energia.

- b In posizione di riposo agisce come nucleo di attrazione per altri atomi o molecole della stessa specie. Si forma così un nucleo cristallino (grano) la cui orientazione dipende sia dal mismatch reticolare materiale depositato - substrato che dalle condizioni locali del substrato. La struttura iniziale del film è dunque una struttura discontinua a isole.
- c Con il procedere della deposizione le dimensioni dei grani aumentano dando luogo ad una struttura a rete, costituita da grani connessi fra di loro. Tale struttura tuttavia non copre ancora interamente il substrato.
- d I grani esistenti aumentano le loro dimensioni e si formano nuovi grani; la struttura del film diviene continua.

Il processo di crescita è schematizzato nella figura 9.

Il film non è né monocristallino né amorfo, ma è costituito da grani cristallini con orientazione diversa a contatto fra loro. La regione di contatto, caratterizzata da una disposizione disordinata degli atomi, prende il nome di bordo di grano (vedi figura 10).

La natura policristallina del film è causa di fenomeni (elettromigrazione, diffusione lungo i bordi di grano) che condizionano l'affidabilità dei circuiti integrati. Inoltre i bordi di grano agiscono come centri di scattering che riducono il valore della mobilità, e quindi della conducibilità, del film policristallino.

Le dimensioni medie dei grani dipendono dalla velocità di deposizione e dalla temperatura del substrato. Se indichiamo con T la temperatura del substrato e con T_f la temperatura di fusione del materiale depositato, la struttura del film dipende dal rapporto T/T_f e dalla pressione dell'argon (si tratta in questo caso di deposizione mediante sputtering) come mostrato nella figura 11, che condensa i risultati di numerose osservazioni sperimentali.

Una volta depositato il film le dimensioni dei grani possono essere accresciute con un opportuno procedimento di annealing.

La struttura granulare di un film può essere osservata mediante microscopia elettronica a scansione o a trasmissione (figura 12).

I film conduttori usati in microelettronica, qualunque sia la tecnica con la quale vengono depositi, devono avere i seguenti requisiti:

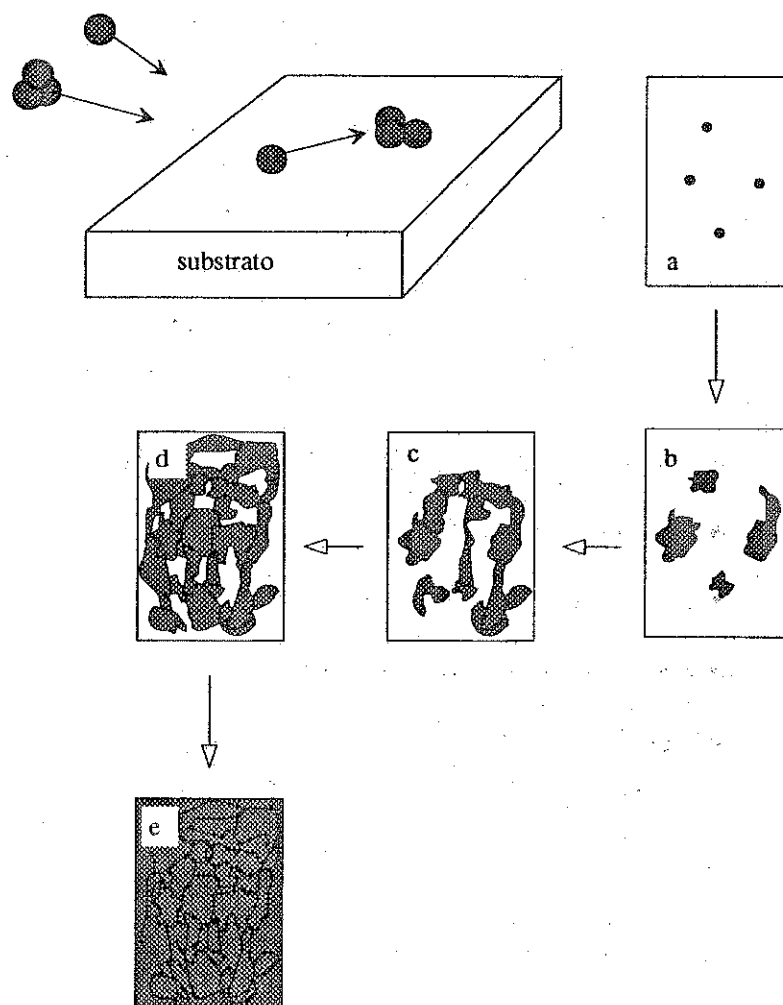


Figura 6.9: Fasi di crescita di un film sottile policristallino.

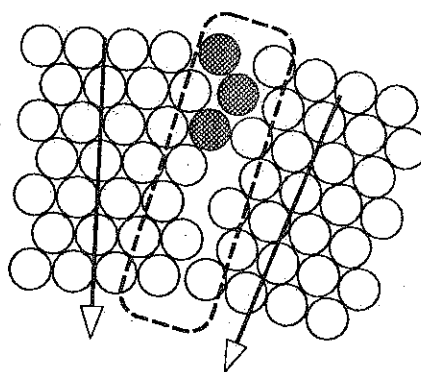


Figura 6.10: Struttura schematica di un bordo di grano.

- buona aderenza al substrato
- elevata conducibilità
- resistenza all'elettromigrazione
- non interagire con il substrato
- non essere contaminante (l'oro, che ha un elevato coefficiente di diffusione nel silicio, è un contaminante)
- essere facilmente litografabile.

6.7.2 Siliciuri

I materiali più comunemente usati come interconnessioni nei circuiti integrati sono l'alluminio e il polisilicio (poly) pesantemente drogato.

Il poly non è altro che silicio in forma policristallina, depositato con una tecnica particolare che verrà descritta nel capitolo seguente. La resistività del poly (che dipende dal drogaggio, dai difetti e dalle dimensioni dei grani) è compresa nell'intervallo $750 - 1000 \mu\Omega \cdot cm$ ed è quindi assai elevata rispetto a quella dell'Al ($2.6 \mu\Omega \cdot cm$). Come vedremo, i circuiti digitali MOS impiegano come materiale di gate e come piste

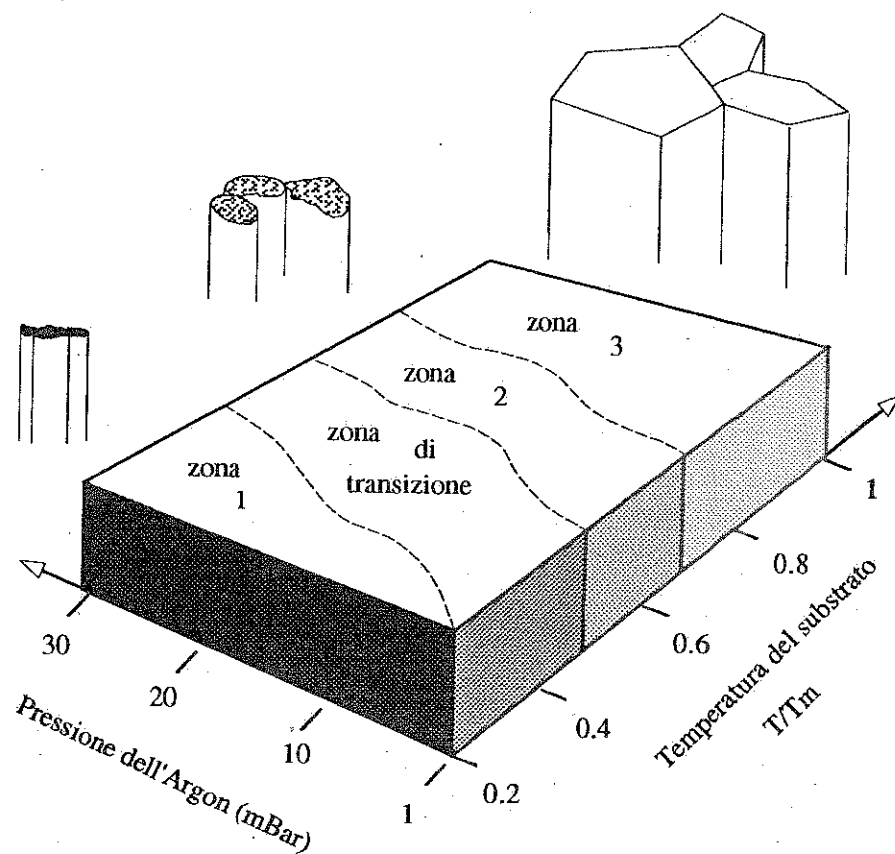


Figura 6.11: Dimensioni tipiche dei grani di film policristallini. Zona 1: piccoli cristalli a struttura "fibrosa" verticale con parte superiore (superficie del film) a cupola. Il diametro delle fibre cresce con la temperatura. Zona 2: grani più grandi a struttura colonnare; la superficie presenta un aspetto satinato. Zona 3: grani di maggiori dimensioni a struttura colonnare ordinata (assi dei grani paralleli) e superficie riflettente.

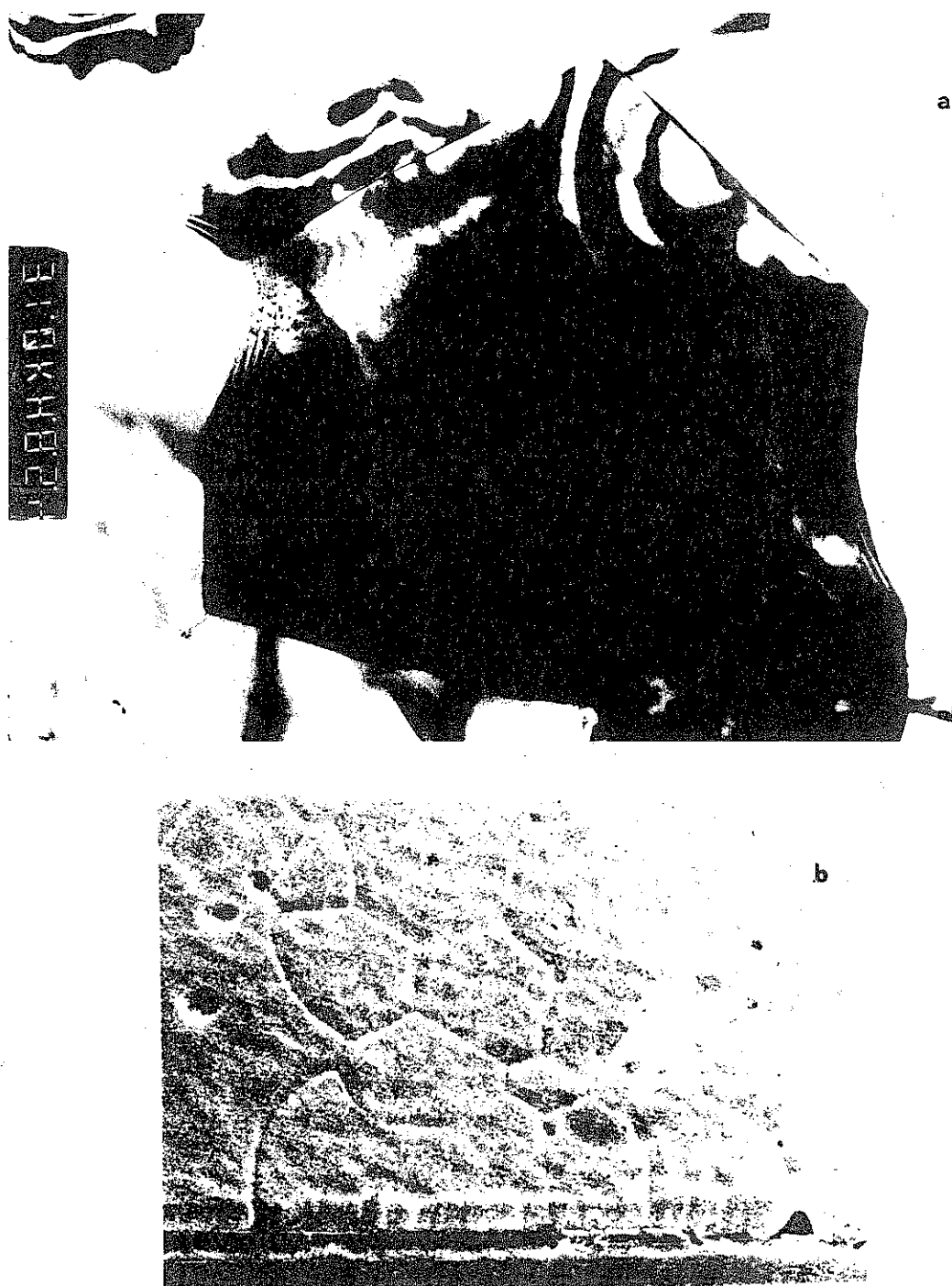


Figura 6.12: Fotografie al microscopio elettronico di piste di alluminio grani e bordi di grano in film di alluminio. La foto al TEM (a) è stata eseguita all'istituto LAMEL CNR di Bologna mentre la foto al SEM (b) presso l'Istituto di Elettronica dell'Università di Pisa.

di interconnessione il poly. All'aumentare del livello di integrazione diminuiscono le dimensioni di tutti i componenti del circuito integrato e quindi anche la larghezza e lo spessore delle linee di interconnessione. I valori di resistenza risultanti possono rivelarsi troppo elevati e dar luogo a costanti di tempo RC inaccettabili (resistenza della interconnessione di gate, capacità di gate). È immediato verificare che con uno spessore di poly di 2000 Å si ha una resistenza di strato di 20 Ω per quadro.

Il problema della eccessiva resistività del poly può essere risolto ricorrendo a materiali che sono dei composti metallo/silicio. Ci si può chiedere perché non fare a meno invece del poly e sostituirlo una volta per tutte con l'alluminio. La risposta è che quest'ultimo ha un basso punto di fusione (660 °C) ed è quindi incompatibile con molti dei processi (vedi tecnica silicon-gate).

Molti metalli formano con il silicio dei composti del tipo M_2Si (Pd, Pt, Co), MSi (Ni, Pd, Pt, Ti) e MSi_2 (Mo, Ta, Ti, W). In particolare i composti dell'ultimo gruppo, siliciuri di metalli ad alto punto di fusione (refrattari), presentano le seguenti notevoli caratteristiche: alto punto di fusione (1500 - 2100 °C) , bassa resistività (13 - 100 $\mu\Omega \cdot cm$), stabilità fino a temperature dell'ordine di 1000 °C. Poiché è desiderabile non cambiare nella sostanza la tecnica silicon-gate (per vari motivi, fra i quali la buona adesione, il materiale a contatto con l'ossido di gate deve essere il poly) una soluzione che accoppia il requisito ora menzionato con la bassa resistività dei siliciuri è la seguente: i) si depone il poly , ii) si depone su questo uno strato di metallo refrattario di spessore opportuno, iii) si fa avvenire la reazione (mediante un annealing termico) che converte gran parte del poly in siliciuro, lasciando inalterato un sottile strato di poly a contatto dell'ossido di gate. Il risultato è un film a doppio strato in cui il siliciuro fa da resistenza di shunt per il poly. Il termine inglese per siliciuro è *silicide*, quello per il doppio strato è *polysilicon + silicide = polycide*.

Torneremo a parlare di siliciuri nel capitolo sulle tecniche di analisi.

6.7.3 Stress meccanici

Un circuito integrato è costituito da materiali diversi in contatto fra loro che hanno non solo proprietà elettriche diverse (metalli, semiconduttori, isolanti) ma anche proprietà *meccaniche* diverse.

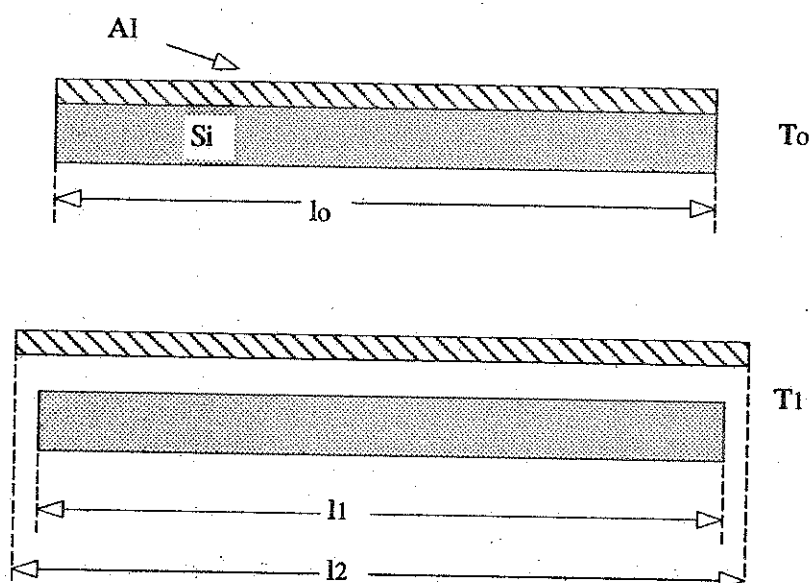


Figura 6.13: Origine di uno stato compressivo in un film di alluminio.

Si consideri un film di *Al* deposto su un substrato di *Si* e si supponga che alla temperatura T_o non esista uno stato tensionale fra i due materiali. Il coefficiente di dilatazione lineare α_i di un materiale è definito dalla relazione

$$l_i(T) = l_{oi}(T_o)(1 + \alpha_i(T - T_o))$$

dove con l_{oi} ed l_i si indicano le lunghezze alla temperatura T_o e T rispettivamente. Ad esempio :

$$\alpha(Al) = 23.6 \cdot 10^{-6} K^{-1}, \quad \alpha(Si) = 3.6 \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

Se ammettiamo che alla temperatura T_o non esista stato tensionale, alla temperatura T avremo, a causa dei diversi valori di α , una differenza di allungamento in una direzione parallela all'interfaccia data da $\Delta l = l_2(T) - l_1(T)$ e quindi ¹ (figura 13)

$$\frac{\Delta l}{l_o} = \alpha_2(T - T_o) - \alpha_1(T - T_o) = \frac{T^*}{E}$$

dove E è il modulo di Young del film e T^* ha le dimensioni di una forza per unità di superficie.

$$T^* = E(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T$$

Il film si trova dunque in uno stato di tensione o di compressione a seconda del segno di ΔT . Se il valore di T^* supera il limite di elasticità lo stato tensionale può dare origine a difetti (ad esempio dislocazioni) nei due materiali a contatto.

¹Il film di *Al* tenderebbe ad allungarsi di più di quanto non gli consenta il substrato di silicio.