

11 Metallizzazione

La metallizzazione è un processo di deposizione di sottili strati metallici sulla superficie di un wafer di silicio allo scopo di realizzare giunzioni conduttive tra i vari elementi di un circuito integrato.

11.1 Alluminio

L'alluminio è il metallo più adatto per la realizzazione di interconnessioni, poiché soddisfa le seguenti caratteristiche:

- ◆ È facilmente depositabile sul silicio
- ◆ Ha una bassa resistività di contatto, circa $2,7 \mu\Omega/\text{cm}$
- ◆ È meccanicamente stabile

Esistono tuttavia, anche degli svantaggi nell'uso dell'alluminio:

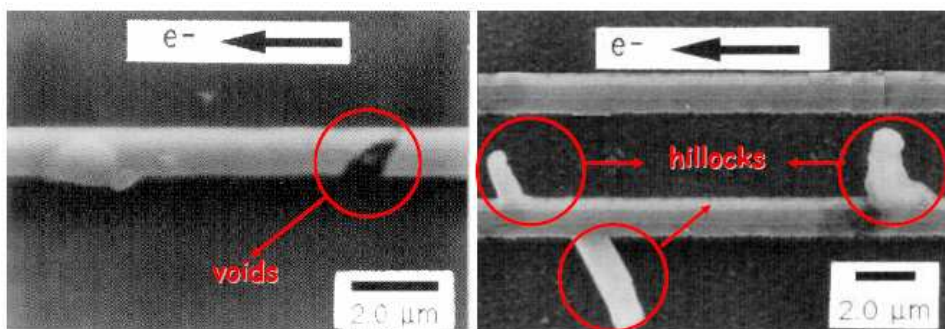
- ◆ Può contaminare la struttura del wafer
- ◆ Non è resistente alla corrosione e all'umidità
- ◆ Durante la deposizione si possono verificare fenomeni di retrodiffusione di Si in Al
- ◆ Risente del fenomeno dell'elettromigrazione

11.2 Retrodiffusione di Si in Al

Vista la caratteristica del silicio di essere solubile nell'alluminio, durante i processi termici che seguono la deposizione del metallo, e che sono volti a migliorare l'adesione tra metallo e substrato, possono verificarsi degli effetti (indesiderati) di retrodiffusione di Si in Al (anche a basse temperature). Questo crea una non uniforme distribuzione del metallo nel substrato. Una possibile soluzione a questo problema è data dalla deposizione di alluminio precedentemente saturato con silicio (circa 1%) in modo da prevenire la retrodiffusione. Una seconda soluzione è quella di operare con trattamenti termici molto rapidi (RTP), la cui velocità inibisce qualsiasi fenomeno diffusivo. Un'altra soluzione, ancora, è quella di creare, preventivamente alla deposizione dell'alluminio, uno strato sottile di metallo refrattario come ad esempio nitruro di titanio (TiN), dello spessore di $500 \div 1000$ Angstrom, il quale è sufficiente ad impedire la diffusione.

11.3 Elettromigrazione

La miniaturizzazione sempre più spinta nella tecnologia VLSI fa sì che le interconnessioni circuitali (piste di Al) siano soggette a valori sempre maggiori di densità di corrente ($J = nev_e$). Alti valori di J significano alta velocità di deriva degli elettroni di conduzione, che, andando a collidere con gli atomi di Al, ne provocano l'aumento dell'inerzia, fino a provocarne lo spostamento. Il risultato è una modificazione della struttura fisica della pista di Al che presenterà delle zone arricchite di atomi (hillocks, collinette) e ovviamente, anche delle zone svuotate (voids, vuoti).



I voids (figura a sinistra), degenereranno in interruzioni della pista, mentre le hillocks (figura a destra), porteranno al cortocircuito tra le due piste adiacenti.

La soluzione per evitare problemi di elettromigrazione consiste nel depositare, anziché alluminio puro, una lega di alluminio e rame (o alluminio e titanio) in quanto gli atomi di rame e di titanio hanno una inerzia molto alta e vengono difficilmente indotti allo spostamento dalla corrente di elettroni. Ipotizzando di usare una lega Al-Cu, occorre fare attenzione ai forti fenomeni corrosivi ai quali essa è soggetta. In particolare la corrosione è indotta dalla presenza di cloro (nei materiali di packaging o come sottoprodotto del dry etching), e dalla corrosione galvanica.

11.4 Deposizione dello strato metallico

La tecnica utilizzata per la deposizione di materiali metallici, su un substrato, è la deposizione fisica in fase vapore (PVD). Al contrario della CVD, con questa tecnica non avvengono reazioni chimiche del materiale depositato con la superficie del substrato. La tecnica PVD prevede una prima fase di evaporazione del metallo; questa può avvenire mediante uno dei due meccanismi descritti di seguito:

- ◆ E-BEAM EVAPORATION: intenso fascio elettronico puntato sul metallo, che fonde ed evapora
- ◆ FLASH EVAPORATION: si lascia passare il metallo in maniera continua attraverso una superficie ceramica che fornisce calore.

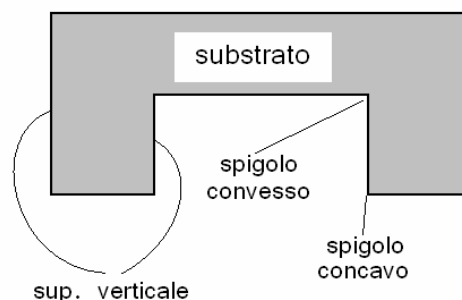
I processi di evaporazione avvengono ad alte temperature e a basse pressioni. Il materiale che deve evaporare, passa dallo stato solido, a quello liquido, a quello gassoso (carica evaporante), ed è contenuto in un apposito crogiolo che viene mantenuto a temperature maggiori di quella di evaporazione; inoltre il crogiolo deve conservare la sua integrità fisica e non deve essere chimicamente attaccato dalla carica evaporante in modo da non contaminarla.

11.5 Sputtering

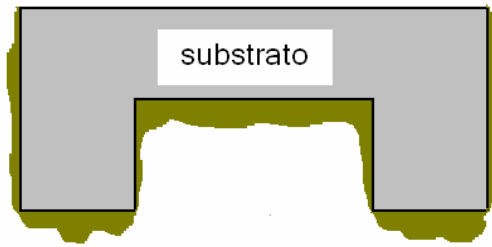
Lo sputtering è una tecnica che consente di ottenere lo stesso risultato delle tecniche di evaporazione descritte in precedenza. Consiste nel bombardamento del metallo allo stato solido (target) con un fascio di ioni ad elevata energia. Il risultato è il distaccamento, dal target, di atomi, ioni o frammenti molecolari, che formeranno un gas e si potranno depositare, per condensazione, sulla superficie del substrato.

11.6 Step coverage

Prendono il nome di step coverage tutte le problematiche relative alla deposizione non uniforme del metallo sul substrato. Quest'ultimo, è raramente formato da una superficie piana, ma, spesso, è caratterizzato da superfici verticali (alla direzione di deposizione) e da spigoli concavi e convessi:



Dalla figura seguente si nota come la deposizione sulle superfici verticali sia molto minore rispetto a quella delle superfici ortogonali alla direzione del flusso di metallo, mentre la deposizione in corrispondenza degli spigoli concavi è praticamente nulla in ragione della loro alta energia superficiale:



Per risolvere questi problemi si adottano due accorgimenti:

- ◆ Si fa ruotare il substrato per variare l'angolo di incidenza del fascio di particelle metalliche, con la superficie di deposizione.
- ◆ Si riscalda il substrato per diminuire l'energia superficiale su tutta la sua superficie, quindi anche sugli spigoli concavi.

11.7 Ablazione laser

È una tecnica che consente di ottenere risultati simili allo sputtering. Una sorgente di laser pulsante ad elevata energia viene puntata sul materiale da depositare, quest'ultimo evapora a causa dell'intenso calore che si sviluppa e forma una nube di materiale parzialmente ionizzato.

11.8 Ion plating

Ion plating è una tecnica usata per formare una ricopertura sui metalli e le leghe, ottenuta tramite la deposizione fisica del vapore. Essa consiste più specificatamente nel bombardamento periodico della superficie da trattare con un flusso di particelle ionizzate. Tale superficie è immersa in un gas inerte (spesso argon), insieme ad altri materiali ricoprenti. Successivamente, viene innalzata la temperatura ed applicato un arco elettrico in modo tale da far evaporare la componente metallica del materiale coprente. Le particelle ionizzate sono accelerate ad un'alta energia e quando tali particelle arrivano ad alta energia sulla superficie da placcare, viene a formarsi una pellicola.

11.9 Deposizione del film metallico mediante CVD

Il film metallico si crea mediante reazioni chimiche tra molecole gassose e substrato. Vantaggi:

- ◆ Eccellente step coverage
- ◆ Basse temperature di esercizio
- ◆ Elevato numero di gradi di libertà

Svantaggi:

- ◆ Elevati costi delle materie prime
- ◆ Problemi di controllo del processo
- ◆ Elevato numero di gradi di libertà

Le reazioni chimiche vengono attivate in modo termico, fotonico, o da un fascio di plasma. La deposizione della lega Al-Cu va fatta seguendo tre passi:

- ◆ Viene depositato il 50% circa di alluminio puro, mediante CVD (non è possibile depositare direttamente la lega mediante CVD, per problemi di elettromigrazione).
- ◆ Viene depositato il rimanente 50% di lega Al-Cu mediante sputtering.
- ◆ Viene riscaldato il materiale depositato per ridistribuire uniformemente il rame nell'alluminio.