

LA MICROMINIATURIZZAZIONE DEI CIRCUITI INTEGRATI

Nessun altro settore industriale ha dimostrato sin ora una velocità di innovazione lontanamente paragonabile a quella dei componenti elettronici e dei sistemi a cui questi danno luogo. Ciò spiega le rapide trasformazioni che il settore subisce e le opportunità che continuamente offre per nuove iniziative industriali.

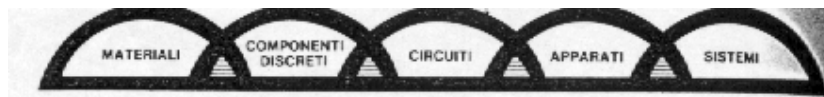
Quando negli anni '50 i principali componenti attivi erano i tubi elettronici, e quando nella seconda metà dello stesso decennio apparvero i transistori, le attività manifatturiere dell'elettronica potevano essere suddivise sostanzialmente in cinque filoni che andavano: dai materiali per l'elettronica, ai componenti discreti, ai circuiti, alle apparecchiature, ed infine alla sistemistica.

Negli anni '60-'70, con i circuiti integrati, la struttura della industria elettronica si è modificata portando ad una sostanziale riduzione dei filoni precedenti: i costruttori di componenti hanno esteso la loro attività dai materiali fino ai circuiti. Cioè il processo di integrazione circuitale dei transistori al silicio si è spinto via via verso una situazione in cui i componenti integrati si sono presentati come vere e proprie unità operative, tali da invadere lo stesso filone delle apparecchiature.

Negli anni '70-'80 l'elettronica dell'integrazione su larga scala è quella che potremmo chiamare, nella prospettiva del futuro, l'elettronica molecolare, portano l'industria dei componenti ad erodere ulteriormente i settori prima riservati ai fabbricanti di circuiti e di apparati che spingono tutta la attività industriale a suddividersi in due soli grossi predominanti filoni:

- l'industria dei componenti LSI o dispositivi funzionali, in cui il produttore assomma capacità e competenze che vanno dalla fisica dei materiali al progetto logico di unità funzionali operative
- l'industria dei sistemi, in cui l'attività nasce dalla richiesta di mercato e si sviluppa prima con uno studio di ricerca operativa per definire il sistema e poi con il progetto delle apparecchiature, effettuato utilizzando già in modo funzionale i dispositivi integrati

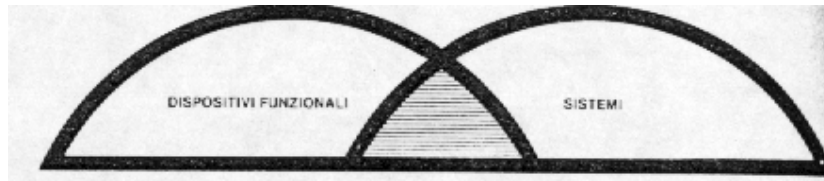
Negli anni '50



Negli anni '60-'70



Negli anni '70-'80



A seconda del tipo e delle dimensioni aziendali si dà il caso di costruttori di dispositivi che si spingono fino alla costruzione di apparati rivolgendosi anche direttamente al mercato dell'utilizzatore finale. Per converso, le società di sistemi sono spinte a sviluppare strategie diversificate nei rapporti con i costruttori di componenti, imponendo che uno stesso tipo di componente sia approvvigionabile da più costruttori al fine di mantenere una certa autonomia di pianificazione e resistere, grazie alla accesa concorrenza fra i componentisti, alla continua erosione del valore aggiunto nella costruzione degli apparati, cioè in quella parte dei sistemi che si definisce prodotto hardware. I sistemi tuttavia mantengono il controllo prevalente dell'applicazione perché interagiscono direttamente con l'utente finale. Essi vedono inoltre aumentare il valore aggiunto della loro attività con lo sviluppo di un nuovo prodotto: il software, che dà luogo a vere e proprie nuove forniture industriali, anche se non tangibili fisicamente. L'analisi dei problemi, la programmazione e la codificazione delle soluzioni, lo studio delle applicazioni dei sistemi, la produzione dei programmi per la gestione organizzativa o produttiva, per la soluzione di problemi tecnico-economici, sono tutte attività nuove in cui cercano di espandersi i vecchi costruttori di apparati.

Non esiste tuttavia un confine preciso fra i due filoni e la interfaccia, tra costruttori di dispositivi funzionali e costruttori di sistemi, dipende di volta in volta dalla particolare esperienza delle aziende nonché dall'organizzazione dagli accordi di collaborazione che esse si danno.

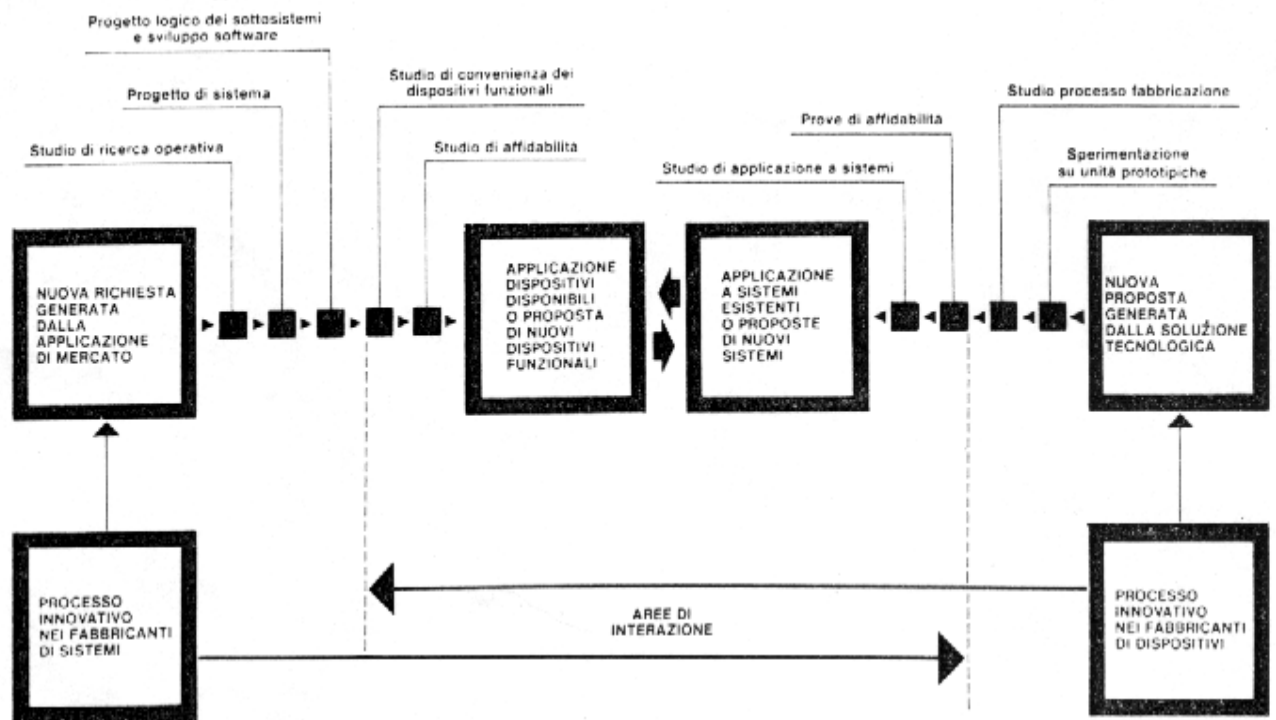
Solo pochissimi e ben noti gruppi multinazionali hanno risorse e competenze per estendere la propria attività interna dai materiali, ai dispositivi, fino alla fornitura del sistema nel settore applicativo in cui operano.

I PROCESSI DELLA MICROELETTRONICA

Un'analisi esemplificativa della possibile interfaccia fra componentisti e sistemisti, può essere svolta considerando come si sviluppano oggi i processi innovativi nell'elettronica.

Si può convenire che nell'industria dei sistemi l'innovazione è prevalentemente motivata da una richiesta di mercato, mentre nell'industria dei dispositivi essa è più spesso generata da una nuova soluzione tecnologica.

La sequenza del processo innovativo può essere descritta sinteticamente come in fig.3 che mette in luce le aree di prevalente interazione o sovrapposizione. Il costruttore di dispositivi logici deve comunicare con il progettista funzionale e con chi definisce la struttura del sistema, al fine di poter prevedere uno sbocco applicativo valido per la propria produzione. Per altro il sistemista deve poter accedere alla più recente tecnologia dei componenti per rendersi conto sia delle possibilità di raggiungere prefissate prestazioni a costi competitivi sia delle limitazioni che essa pone.



Evoluzione dei componenti attivi a semiconduttore nel settore delle applicazioni digitali

ANNO	COMPONENTE	TIPO DI FUNZIONE	TIPO DI PROGETTO
1955	Transistore	Commutazione di corrente	Circuitale
1965	SSI	Nand, Nor, Bistabile	Logico
1970	MSI	Registri, Unità aritmetiche	Logico funzionale
1975	LSI	Unità centrale di elaborazione (CPU), Unità di memoria (RAM, ROM)	Funzionale
1985	VLSI	Sistema completo di interfaccia	Funzionale sistemistico

L'economia dei costi di produzione dei componenti integrati

Di fronte all'incessante progresso di integrazione dei componenti a semiconduttore ci si domanda: come è possibile che a una crescente miniaturizzazione corrispondano costi di produzione per il singolo componente attivo sempre più bassi? In breve si può dire che ciò è dovuto essenzialmente a due fattori. Il primo è relativo al fatto che il processo di saldatura manuale, prima richiesto per collegare insieme i singoli componenti discreti, è stato sostituito con il processo di fotolitografia: cioè i componenti integrati vengono costruiti in un unico ciclo di produzione già completi di tutte le interconnessioni ottenute sulla piastrina di silicio per fotoincisione e per deposizione sottovuoto. La produzione avviene a lotti: cioè in un singolo ciclo vengono ottenuti con processi di produzione automatizzati decine di migliaia di circuiti integrati tutti identici. Il secondo fattore è determinato invece dalla cosiddetta "curva logistica di apprendimento" (*learning curve*): dal momento in cui per la produzione dei circuiti si adotta una nuova tecnologia, si inizia anche ad accumulare esperienza su di essa. Si affinano man mano le conoscenze tecniche ed operative, il che porta a migliorare la resa del processo e ad incrementare la produttività con un conseguente decremento del costo del singolo componente. La tecnica fotolitografica per tracciare microgeometrie su wafer di silicio è un processo di natura fotografica sorto in origine per essere applicato alla stampa. Applicato successivamente anche alla microelettronica per trasferire su uno strato del wafer il disegno di una fotomaschera, esso si compone di tre operazioni principali:

1. la prima consiste nel disegnare la configurazione geometrica, da trasferire poi su scala microscopica, su un foglio in scala molto maggiore di quella finale in modo che il disegno di partenza possa essere eseguito con metodi e precisioni convenzionali. Il disegno viene quindi fotografato e ridotto alla scala reale su una lastra di vetro: la fotomaschera;
2. nella seconda operazione si trasferisce il disegno della fotomaschera sullo strato del wafer di silicio, su cui si applica dapprima uno strato di emulsione fotosensibile detto "fotoresist". Si procede proiettando con un fascio di luce ultravioletta il disegno della fotomaschera sullo strato di fotoresist e sviluppando poi con attacco chimico, secondo il normale metodo fotografico. Si asportano così le parti del fotoresist non colpite dalla luce e perciò solubili nel bagno di sviluppo (o viceversa, a seconda del tipo di fotoresist), in modo da lasciare per fotoincisione scoperte le parti che riproducono la geometria disegnata sulla fotomaschera (ved. Fig. 4 a,b);
3. la terza operazione infine consiste nel sottoporre lo strato così trattato ad un processo fisico - chimico quale ad esempio: diffusione di materiale drogante, oppure deposizione sottovuoto di nuovo materiale, oppure impiantazione ionica. Nelle zone rimaste scoperte dal fotoresist il materiale del substrato di silicio viene allora modificato in modo da crearvi le caratteristiche desiderate per la conduzione elettronica, dopo di che anche le parti residue del fotoresist vengono rimosse chimicamente (ved. Fig. 4 c,d).

Questo processo fotolitografico viene ripetuto sullo stesso wafer di silicio, tante volte con tante diverse fotomaschere quante sono le modifiche necessarie da apportare al materiale per realizzare le strutture complesse corrispondenti ai componenti attivi e alle relative interconnessioni circuitali.

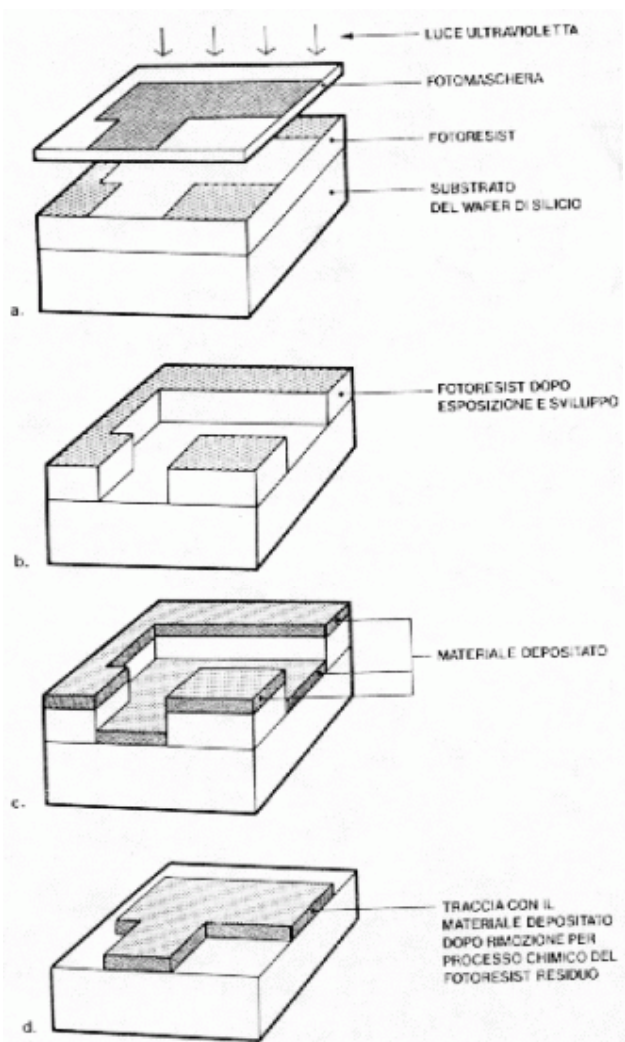


Fig.4 - Le operazioni successive del processo di trattamento del wafer di silicio nella produzione di circuiti integrati per fotolitografia.

Il ciclo di fabbricazione dei microcircuiti

Il ciclo completo, che parte dal progetto per arrivare fino al collaudo del circuito LSI, è descritto in fig. 5.

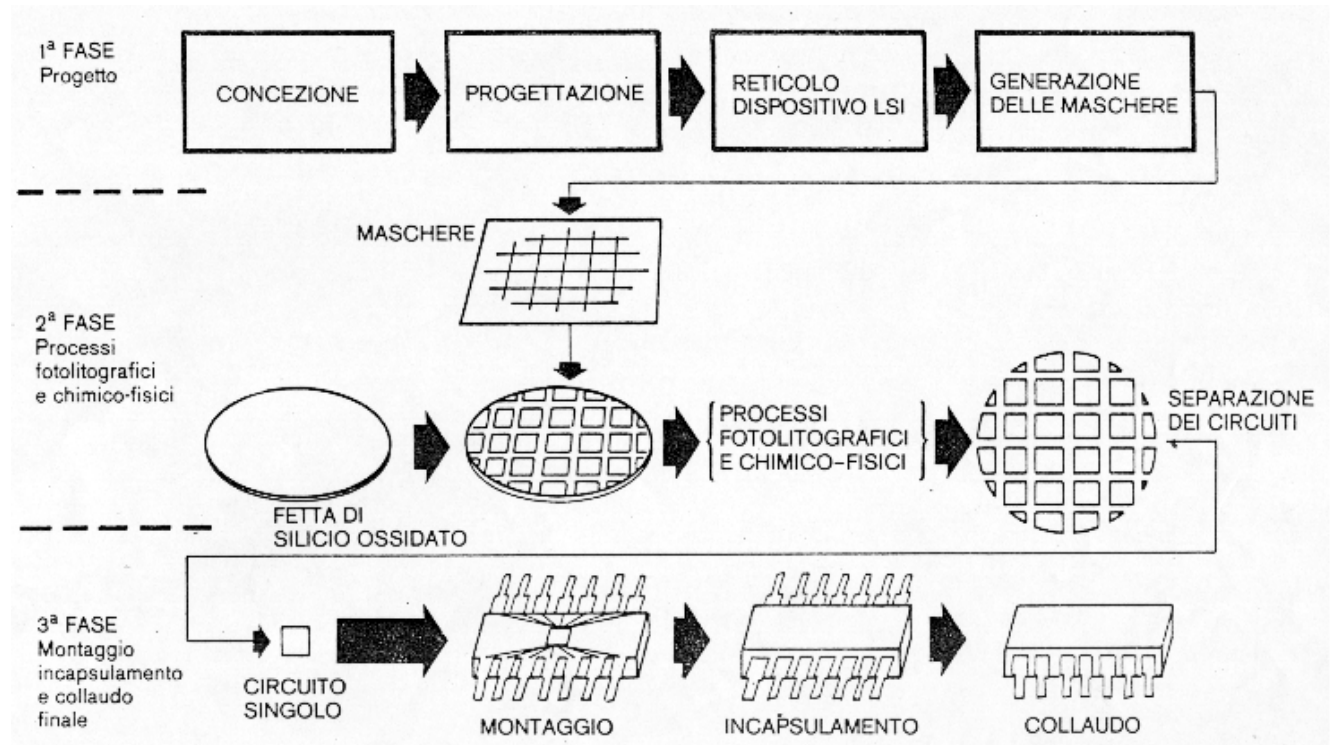
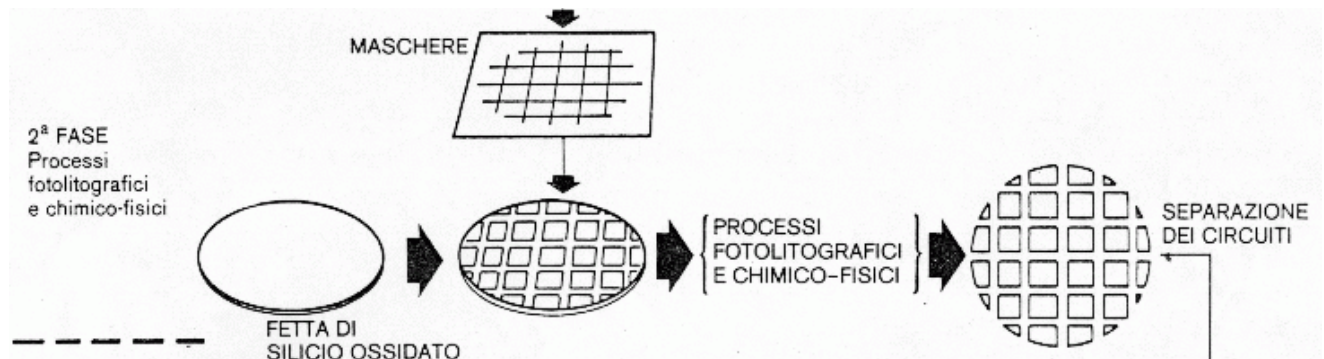


Fig.5

Per chiarezza espositiva, questo ciclo è stato suddiviso in tre successive fasi, caratterizzate da condizioni operative totalmente diverse dal punto di vista tecnologico, e quindi anche da costi che hanno una composizione e un andamento diversi. La prima fase consiste : nella concezione del nuovo circuito; nel relativo progetto logico e circuitale; nel disegno delle configurazioni geometriche con l'aiuto del calcolatore; nella generazione della fotomaschera per il singolo dispositivo LSI; nella generazione della fotomaschera di lavorazione per tutto il wafer di silicio, ottenuta con il metodo di giustapposizione passo-passo della fotomaschera del singolo LSI, fino a ricoprire per replica tutta l'area del wafer. L'analisi dei costi relativi a questa prima fase mostra che essi sono soprattutto dovuti a costi di lavoro del personale tecnico di progetto per giungere alle fotomaschere di lavorazione del wafer. E' anche evidente che questi costi sono indipendenti dalla quantità dei dispositivi LSI prodotti successivamente.

Il ciclo di fabbricazione dei microcircuiti: seconda fase



La seconda fase è relativa alla formazione dei dispositivi LSI sul wafer di silicio. Nel tempo il diametro del wafer di silicio, come pure l'area del chip (il frammento di silicio su cui si forma il dispositivo integrato LSI contenente i diversi transistori del circuito) sono aumentati come indicato in fig.6. Nel 1980 un wafer di 10 cm (4 pollici) di diametro arriva a contenere oltre 600 chips ciascuno di 10 mm^2 , oppure circa 200 chips di 30 mm^2 .

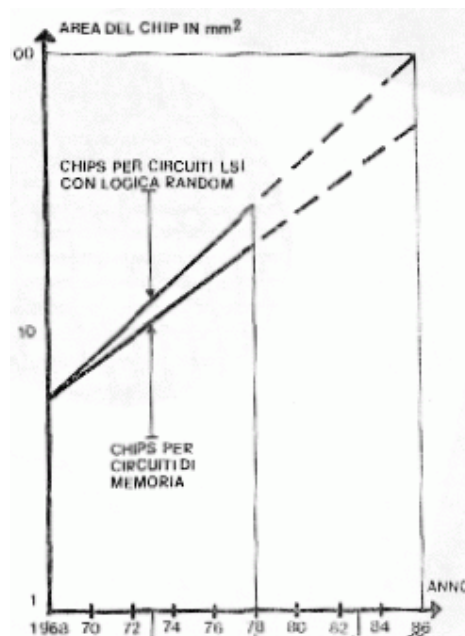


Fig.6 - Andamento nel tempo del diametro dei wafer di silicio e corrispondente incremento dell'area dei singoli chips a costi di produzione costante.

Il costo del dispositivo LSI contenuto nel chip, attribuibile a questa fase del ciclo di produzione, dipende sia dai costi dei processi fisico-chimici adottati per la lavorazione del wafer, sia dalla "resa" in chips che risultano buoni rispetto al numero totale dei chips contenuti nel wafer. Tale resa dipende molto dall'area del chip a causa dei difetti del cristallo di silicio distribuiti casualmente su tutta l'area del wafer.

Un modello semplificato per il calcolo della resa porta a stabilire che, se con un chip di determinata area si raggiunge una certa resa percentuale, ad esempio del 50%, con un altro chip di area doppia la resa scende di un fattore 10, cioè nell'esempio citato calerebbe al 5%. Ciò equivale a dire che ogni volta che si raddoppia l'area del chip, cioè si raddoppia la sua complessità funzionale in termini di numero di componenti attivi contenuti nel dispositivo LSI, il costo del chip aumenta di un fattore 20: un fattore 2 è dovuto all'area doppia usata, ed un altro fattore 10 è conseguente alla minore resa di cui si è appena parlato. Il costo del singolo elemento attivo, dovuto alla fase dei processi fotolitografici del wafer, cresce quindi esponenzialmente con l'area del chip: cioè cresce con il numero N di elementi attivi contenuti nel chip, ed ha un andamento del tipo Ae^{BN} , dove A e B sono costanti che dipendono dalla tecnologia del processo adottato (ved. Fig. 7).

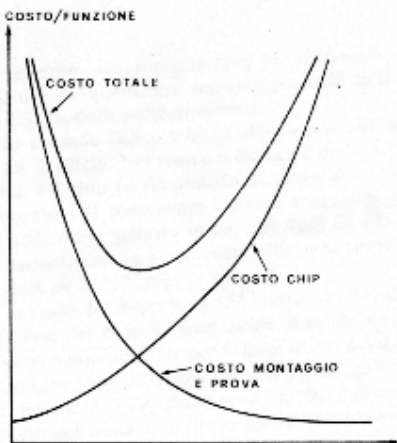
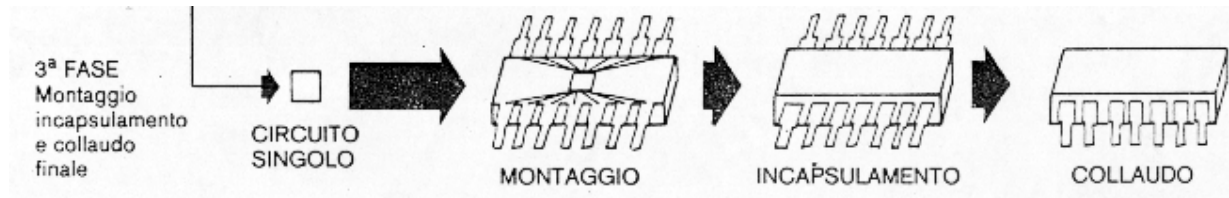


Fig.7 -

Le componenti che definiscono il costo globale del chip LSI in funzione: 1) del costo di produzione dovuto alla crescita del circuito con processo fotolitografico che ha un andamento del tipo Ae^{BN} ; 2) del costo di montaggio e prova del chip che ha un andamento del tipo $1/N$.

Il ciclo di fabbricazione dei microcircuiti:

terza fase



La terza fase del ciclo di produzione riguarda il montaggio, l'incapsulamento ed il collaudo finale del chip. Il costo di queste operazioni dipende dal lavoro richiesto per fissare su un supporto ceramico il chip contenente il dispositivo LSI e per saldare i fili di connessione che collegano i contatti terminali del circuito integrato (la cui distanza è dell'ordine di 10 micron) ai contatti terminali del supporto ceramico (le cui distanze sono di 2.5 mm). Questo lavoro, e quello richiesto per il collaudo finale del circuito LSI già incapsulato, non variano al variare dell'area del chip. Comportano quindi costi che crescono molto poco o sono quasi costanti in funzione della complessità del circuito LSI, cioè del numero dei componenti N in esso contenuti. Si può assumere allora che il costo per elemento attivo attribuibile a questa fase del ciclo produttivo ha un andamento che va come $1/N$ (ved. Fig. 7).

Il costo globale del singolo elemento attivo risulta allora composto da un costo costante dovuto a quello della fase iniziale, cioè del progetto; più il costo che cresce esponenzialmente con N dovuto alla seconda fase del ciclo di produzione, relativa ai processi fisico-chimici per fotolitografia; più ancora il costo che diminuisce come $1/N$, dovuto alla terza fase necessaria per il montaggio ed il collaudo finale del dispositivo.

La strategia dei costruttori di componenti è stata quella di fornire circuiti integrati con un numero N di elementi attivi che, in ogni epoca dell'evoluzione tecnologica, fosse posizionato sempre vicino al valore minimo della curva relativa al costo globale di fig. 7.

Ne è risultato che il costo per elemento attivo è andato diminuendo nel tempo, mentre la complessità è andata aumentando come mostrato in fig. 8. Le curve di fig. 7, relative a tecnologie di epoche successive, si sono mosse nel tempo in modo tale che i loro minimi si trovano su una retta con costi decrescenti di un fattore circa 10 ogni 5 anni.

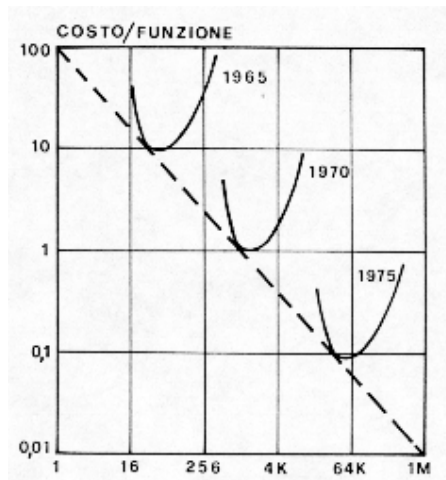
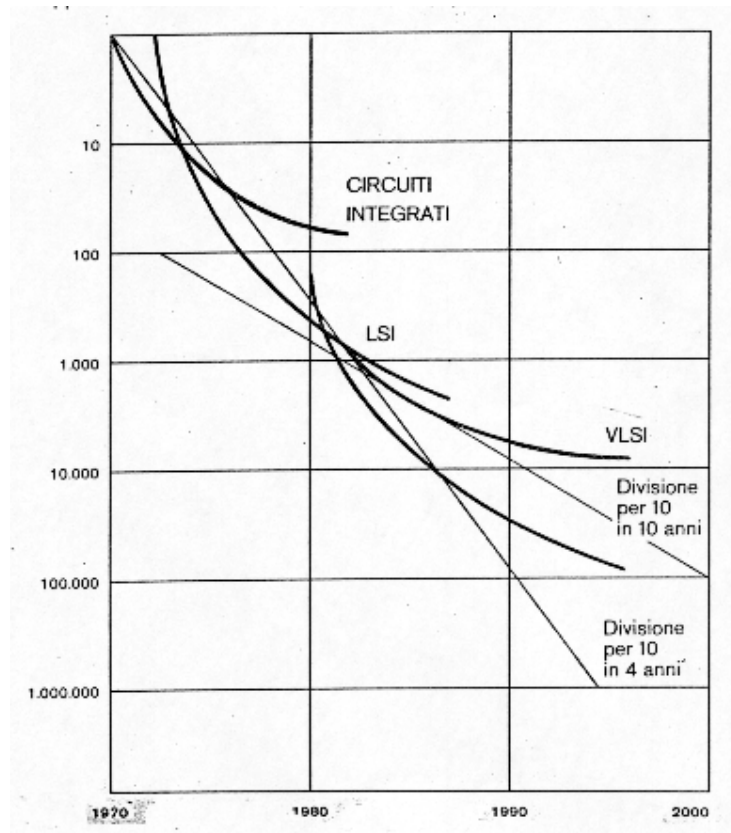


Fig.8 - Andamento nel tempo della curva di costo globale del chip LSI determinato dalle innovazioni tecnologiche e dalla curva di apprendimento nel periodo di validità di una stessa tecnologia.

Diminuzione di costi dei circuiti

Se ora passiamo a valutare l'effetto globale che l'aumento della complessità dei dispositivi LSI ha avuto sui sistemi, troviamo che, oltre alla riduzione di costo dovuta al decremento del costo relativo al singolo elemento attivo, si deve tenere conto di una ulteriore drastica riduzione dei costi di assemblaggio delle apparecchiature dovuta al minor numero di saldature, poiché la maggior parte delle interconnessioni risultano già fatte entro gli stessi circuiti integrati. Ciò ha condotto ad una sempre maggiore affidabilità dei sistemi, perché le interconnessioni attuate con il processo fotolitografico si sono mostrate più sicure delle interconnessioni eseguite con saldature o con connettori esterni. Ci si deve quindi aspettare che disponendo in futuro di circuiti integrati a complessità crescente grazie ai quali continuerà a diminuire il numero delle saldature e dei connettori delle apparecchiature, i sistemi elettronici conseguiranno gradi di affidabilità sempre maggiore. Rapportato al 1970, il costo di una porta logica è diviso per



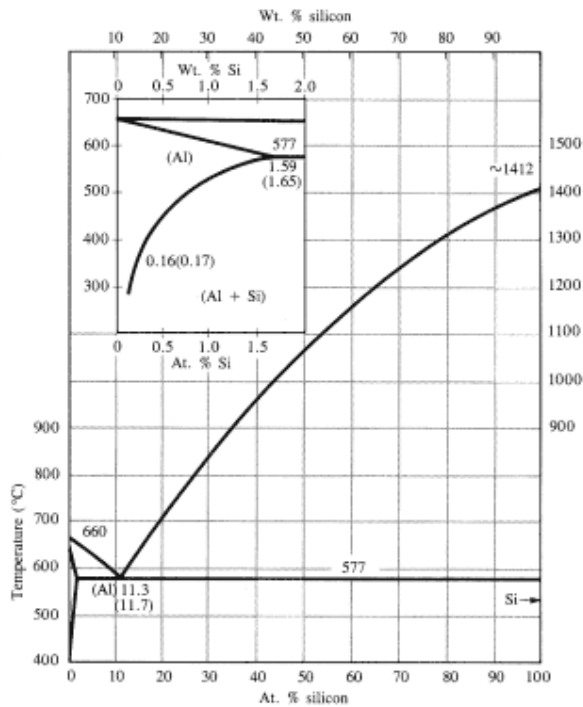


Figura 2.3 - *Diagramma di fase alluminio - silicio.*

La Figura 2.3 mostra il diagramma di fase del sistema Al-Si ad una atmosfera. Il diagramma di fase mette in relazione queste due componenti in funzione della temperatura. Il sistema Al-Si presenta caratteristiche eutettiche, in quanto il punto di fusione di una lega dei due elementi è inferiore a quello di ciascuno dei due elementi presi separatamente. In questo caso la temperatura minima, ovvero la temperatura eutettica, è 577°C, corrispondente a una composizione dello 11,3% di Si e dello 88,7% di Al. Il punto di fusione dell'alluminio puro e del silicio puro valgono rispettivamente 660°C e 1412°C. Come conseguenza di questa proprietà, durante la deposizione di alluminio la temperatura deve essere mantenuta inferiore ai 400°C. Ciò implica che l'alluminio possa essere introdotto nelle sequenze di produzione dei circuiti integrati solo dopo che tutti i processi ad alta temperatura siano stati completati. La zona evidenziata nella Figura 2.3 mostra anche la solubilità solida del silicio in alluminio. Per esempio, la solubilità del silicio in alluminio è dello 0,25% in peso a 400°C, dello 0,5% in peso a 450°C, e dello 0,8% in peso a 500°C.

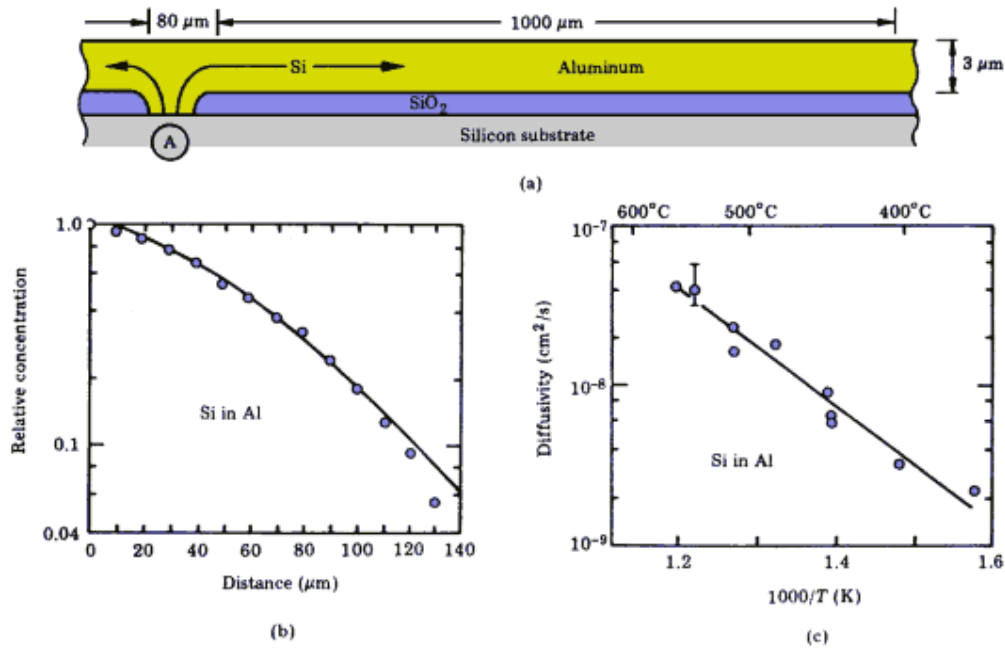


Figura 2.4 - Diffusione di silicio in un film di alluminio. (b) profilo di concentrazione; (c) grafico dei coefficienti di diffusione

Al fine di ottenere la formazione di un buon contatto, l'alluminio viene ricotto ad una temperatura di 410°C in atmosfera inerte dopo la fase di deposizione e di definizione della geometria (patterning: fotoresist, maschera, attacco chimico). Benché queste temperature siano di molto inferiori alla temperatura eutettica, il silicio diffonde comunque nell'alluminio. E ciò è la causa di uno dei maggiori problemi associati con la formazione di contatti di alluminio su silicio, soprattutto in presenza di giunzioni poco profonde. Ovunque l'alluminio venga a contatto con il silicio, il silicio si dissolverà nell'alluminio durante la fase di lega. La quantità di silicio entrata in soluzione dipenderà non solo dai tempi e dalla solubilità alla temperatura di lega, ma anche dal volume di alluminio nel quale il silicio può formare una soluzione satura.

Sono state fatte numerose misure della diffusione del silicio in alluminio. Un metodo, mostrato in Figura 2.4 misura la distribuzione di concentrazione e la lunghezza di diffusione di silicio in film di alluminio policristallino. Alla temperatura di 446°C il silicio ha raggiunto una lunghezza di diffusione di 140 μm in 40 minuti.

Misurando la concentrazione di silicio in funzione della distanza per un preciso valore di temperatura, è stato possibile ricavare la corrispondente funzione errore (*erf*) tipica dei processi diffusivi e quindi ottenere il valore del coefficiente di diffusione. I valori del coefficiente di diffusione sono stati calcolati per differenti temperature e sono stati riportati in un grafico logaritmico. La pendenza della retta interpolante i risultati sperimentali corrisponde all'energia di attivazione del fenomeno diffusivo ($E_A = 0,79$ eV). Il coefficiente di diffusione D del silicio in alluminio può così essere espresso:

$$D = D_0 e^{-E_A/kT} = 25 \times 10^{-4} e^{-0,79/kT} \quad (2.2.1)$$

Si consideri una lunga linea metallica di alluminio a contatto con area ZL di silicio, come illustrato nella Figura 1.5. Dopo un tempo t di ricottura, il silicio si sarà diffuso per una distanza pari approssimativamente a \sqrt{Dt} lungo la linea di alluminio, a partire dal bordo del contatto.

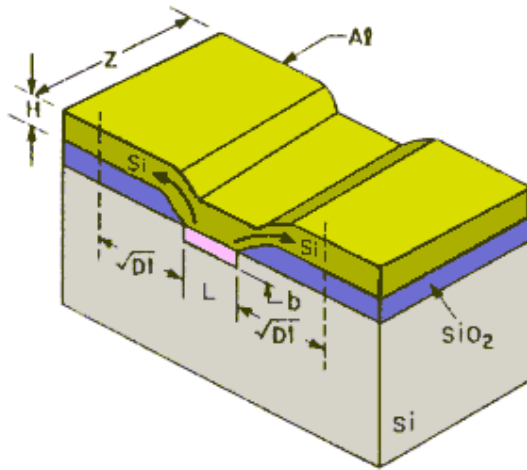


Figura 2.5 - Diffusione di silicio nelle metallizzazioni di alluminio.

Assumendo che questo tratto di alluminio sia completamente saturato da silicio, il volume di silicio impiegato è allora:

$$Vol \cong 2\sqrt{Dt} (HZ) S \left(\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Si}} \right) \quad (2.2.2)$$

dove ρ_{Al} e ρ_{Si} sono rispettivamente le densità di alluminio e silicio e S è la solubilità del silicio nell'alluminio alla temperatura di ricottura. Se il silicio si dissolvesse nell'alluminio in modo uniforme per tutta la superficie del contatto A (dove $A = ZL$), lo spessore di silicio consumato risulterebbe:

$$b \approx 2\sqrt{Dt} \left(\frac{HZ}{A} \right) S \left(\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Si}} \right) \quad (2.2.3)$$

In pratica, il silicio non si dissolve in modo uniforme nell'alluminio, ma il fenomeno avviene solo in alcuni punti. L'area efficace nella (2.2.3) è minore dell'area fisica del contatto e pertanto b è molto maggiore.

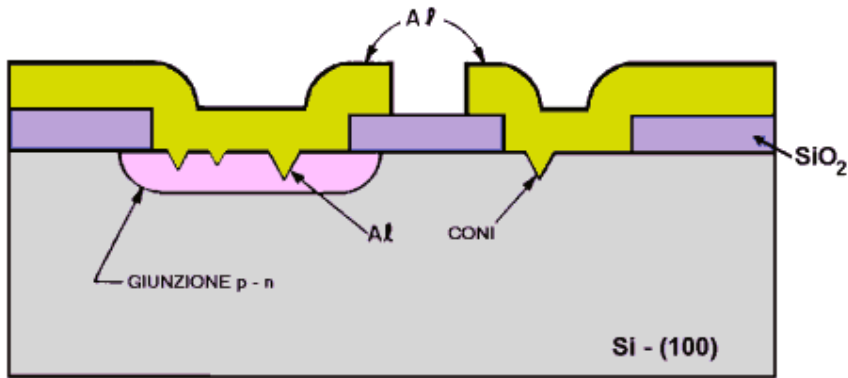


Figura 2.6 - Spiking dei contatti Al-Si.

La Figura 2.6 mostra la situazione che si verifica in realtà in corrispondenza di una giunzione *p - n* quando la dissoluzione del silicio porta alla formazione di cavità in cui l'alluminio penetra creando protuberanze a forma di punta (spikes).

Si consideri, ad esempio, un processo di deposizione di un film di alluminio su di un wafer di silicio, attraverso una *via* (contatto tra due metallizzazioni su livelli diversi) nello strato di ossido dielettrico. La superficie di silicio sarà coperta da un sottile strato di ossido nativo e questo deve essere ridotto dal metallo prima che un buon contatto alluminio - silicio si possa formare (Figura 1.7.a). Una breve ricottura a 300°C dà inizio alla riduzione ed è ragionevole pensare che alcune zone della superficie di silicio saranno liberate dall'ossido prima di altre. Ci saranno quindi zone localizzate del contatto in cui il silicio e l'alluminio saranno in grado di interagire. Nelle regioni in cui l'ossido nativo è stato dissolto, il silicio entrerà velocemente in soluzione con il film di alluminio. La solubilità invece dell'alluminio in silicio a queste temperature è molto bassa e perciò non vi sarà dissoluzione di alluminio nel wafer di silicio.

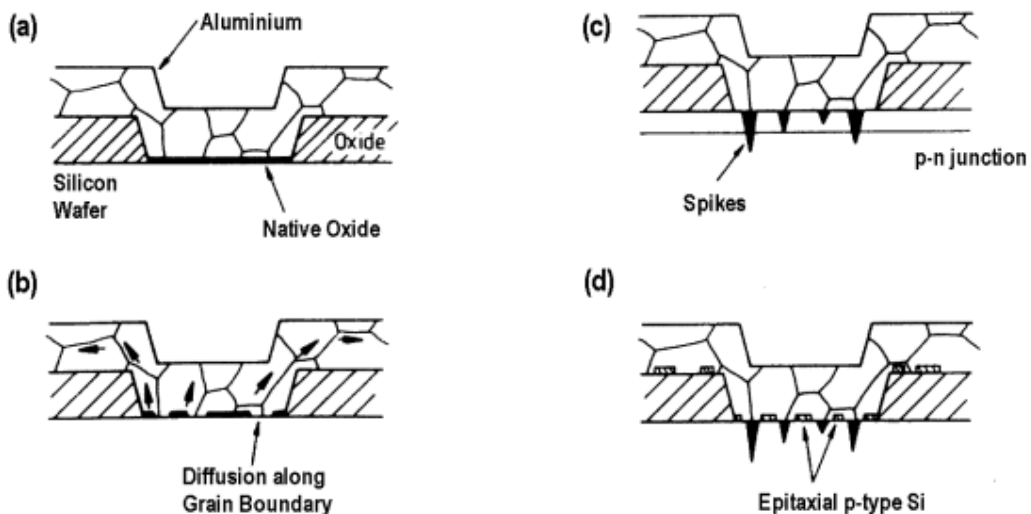


Figura 2.7 - Schema delle reazioni che si possono presentare all'interfaccia Al -Si.

La Figura 2.7.b illustra la situazione in cui lo strato di ossido nativo è parzialmente ridotto ed inizia la dissoluzione del wafer di silicio. Si è evidenziata la diffusione degli atomi di silicio attraverso i bordi grano nel film di alluminio, provenienti dalle zone dove lo strato

di ossido è stato perforato. Il trasporto di silicio dalla superficie del wafer sarà efficace in particolare intorno ai bordi del contatto, dove la quantità di alluminio agisce come pozzo diffusivo. La saturazione del film di alluminio sarà completa solo quando una grande quantità della superficie del wafer si sarà dissolta. Il risultato di questo processo di dissoluzione localizzata è la formazione di cavità nel wafer di silicio sotto il contatto ed il loro riempimento con alluminio per causare i caratteristici "spikes". Alla sommità di queste punte il campo elettrico sarà fortemente accentuato, cosa che può alterare le caratteristiche elettriche del contatto. Nei casi peggiori queste protuberanze possono anche cortocircuitare le giunzioni $p-n$ poco profonde (Figura 2.7.c).

Nei dispositivi a semiconduttore fabbricati fino a metà degli anni '70, la formazione di punte nel silicio non era un limite, poichè la quantità di silicio dissolta in alluminio poteva essere controllata mediante opportune geometrie e regole progettuali. Recentemente, dal momento che le dimensioni dei transistor si sono sempre più ridotte (le risoluzioni litografiche nelle attuali tecnologie VLSI, very large scale integration, sono ben al di sotto del μm), la funzionalità di un dispositivo può essere compromessa da giunzioni cortocircuitate in questa maniera.

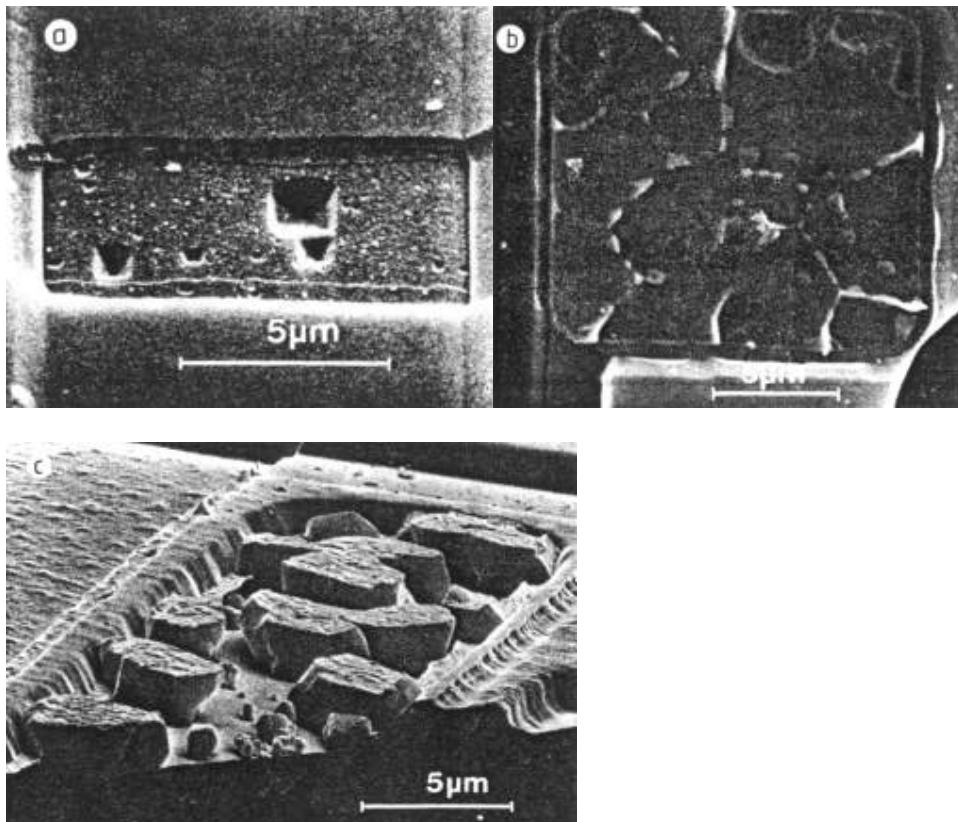


Figura 2.8 - Immagini al SEM: (a) esempio di spikes formati sotto un contatto Al-Si a seguito di invecchiamento; (b) isole epitassiali di tipo p precipitate sulla superficie del wafer; la geometria replica la morfologia dei bordi grano del film di alluminio; (c) grossi precipitati di tipo p a seguito di invecchiamento di contatti Al 1%Si.

La Figura 2.8.a mostra un esempio di morfologia della superficie del wafer sotto un contatto di alluminio - silicio invecchiato (il film metallico è stato rimosso).

Se il tempo di ricottura è sufficientemente lungo, ci si può aspettare che tutto l'alluminio nelle vicinanze del contatto sia saturo di silicio. Nel raffreddamento, la solubilità di equilibrio del silicio in alluminio cala fortemente (si veda la zona evidenziata in Figura 2.3) e quindi il silicio può precipitare sul wafer, su superfici di ossido o in corrispondenza dei bordi grano del film di alluminio. La Figura 2.8.b mostra un esempio di precipitazione epitassiale di silicio di tipo p sulla superficie del wafer (si ricordi che l'alluminio è un drogante di tipo p). La presenza di isole di tipo p , in contatto con il substrato di tipo n , può portare a comportamenti elettrici indesiderati, per la modifica della struttura a bande del contatto stesso e può alterare le prestazioni dei diodi Shottky o pregiudicare il funzionamento di un intero circuito integrato. La morfologia di queste piccole isole replica quella del bordo grano del film di alluminio che è stato rimosso chimicamente per evidenziare il fenomeno.

Un modo per rendere minima l'entità della formazione di "spikes" è quello di aggiungere silicio all'alluminio durante la deposizione, mediante la coevaporazione di due target, oppure utilizzando la tecnica di deposizione *sputter* con un target di alluminio che contenga circa 1% di silicio. Entrambe queste soluzioni portano alla deposizione di uno strato metallico in cui la soluzione di silicio in alluminio risulta saturata e l'interconnessione metallica non può assorbire ulteriori quantità di silicio nei processi di ricottura seguenti.

Un altro metodo consiste nel depositare il film di alluminio su di uno strato di silicio policristallino. Il silicio policristallino può essere drogato p^+ o n^+ per mezzo di drogaggio in-situ o successivo alla deposizione dello strato. Sarà poi questo strato di silicio policristallino a fornire il silicio necessario a saturare l'alluminio.

Un terzo metodo consiste nell'introdurre uno strato metallico di barriera fra l'alluminio ed il substrato di silicio (Figura 1.9). Questo strato metallico interposto deve soddisfare ai seguenti requisiti: (1) presentare una bassa resistenza di contatto con il silicio, (2) non reagire con l'alluminio, e (3) garantire che la sua formazione e la sua deposizione siano compatibili con l'intero processo. I produttori di semiconduttori hanno preso in considerazione diversi metalli, quali platino, palladio, titanio e tungsteno, o composti, quali il nitruro di titanio (TiN). Si è verificato che essi sono stabili per tempi di ricottura di 30 minuti a temperature fino a 550°C.

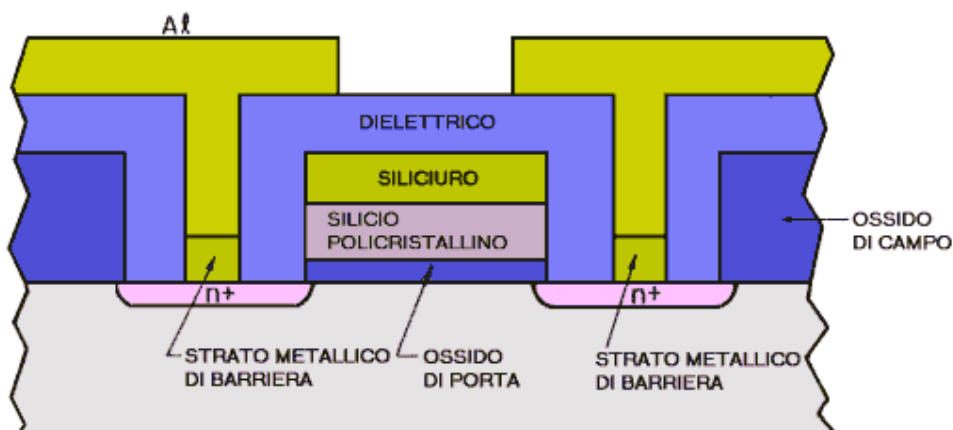


Figura 2.9 - Struttura delle metallizzazioni in un dispositivo MOSFET.

2.2.1 - Barriere diffusive.

Il concetto di usare strati di barriera nei sistemi di metallizzazione è estremamente semplice: due materiali, tra i quali può avvenire una reazione chimica indesiderata o un processo di interdizione, sono tenuti separati da uno strato intermedio. Le caratteristiche che dovrebbe possedere uno strato di barriera ideale sono:

- Se lo strato di barriera separa i materiali A e B, essa dovrebbe essere termodinamicamente stabile quando in contatto con A e B. Come contropartita, questa mancanza di reattività chimica potrebbe portare a cattiva adesione alle due interfacce della barriera.
- La maggior parte delle barriere diffusive sono policristalline, dal momento che questa è la sola struttura con cui i film sottili possono essere facilmente depositati. Tuttavia è generalmente richiesto che non ci possa essere rapida diffusione dei materiali A e B attraverso i bordi grano del film barriera.
- Lo strato di barriera dovrebbe formare contatti a bassa resistenza sia con A che con B. La resistenza dello strato stesso è comunque di solito insignificante, dal momento che le barriere hanno uno spessore minore di 200nm.
- Lo strato di barriera deve aderire bene con tutti i materiali con cui viene a contatto. Questi includono i film dielettrici di tipo vetroso, i contatti e i film conduttivi.
- Il materiale dello strato di barriera dovrebbe avere un potenziale elettrochimico non troppo differente da quello di A e B, altrimenti potrebbero presentarsi fenomeni di corrosione galvanica negli strati di metallizzazione.

I processi diffusivi attraverso i bordi grano hanno la loro principale forza motrice nel gradiente di concentrazione. Non c'è nulla che si possa fare per modificare la termodinamica di questo processo, ma l'uso di uno strato di barriera può alterare la velocità di diffusione in due modi: rallentando la diffusione con l'uso di un materiale in cui tutti i processi diffusivi hanno un'alta energia di attivazione, oppure introducendo possibili reazioni chimiche alternative. La prima soluzione risulta comunque il metodo più conveniente. Tuttavia il solo fatto di interporre uno strato di qualche materiale tra A e B non porta necessariamente ad una riduzione di velocità alla quale essi reagiscono. Il motivo principale è che tutti i film sottili depositati da fase vapore sono policristallini e l'alta densità di bordi grano in questi film offre percorsi preferenziali per una veloce diffusione di A e B. Si è anche supposto che il fatto di usare una barriera in cui né A né B sono solubili potrebbe bloccare il trasporto di queste due specie attraverso i bordi grano. Ma da diverse prove sperimentali questa non si è dimostrata una buona soluzione in quanto, anche se totalmente insolubili nel grano cristallino, gli atomi diffondenti possono essere solubili a bordo grano dello strato di barriera che ha una struttura relativamente aperta.

Un materiale è quindi adatto come barriera diffusiva solo quando il meccanismo di trasporto diffusivo è *intrinsecamente* lento. Il caso ideale è di far crescere strati di barriera monocristallini, ma ciò è praticamente impossibile con le attuali tecnologie. Ci si deve quindi rivolgere a materiali in cui la diffusione attraverso il bordo grano sia lenta. La scelta è perciò ricaduta sui materiali refrattari (es: tungsteno e molibdeno) in base al fatto che più alto è il punto di fusione più alta è l'energia di attivazione del processo. Un materiale molto comunemente usato è una lega titanio tungsteno (10 -30% at. Ti). Il film, depositato con metodo *sputter*, è di tipo policristallino con struttura metastabile BCC e la sua stabilità garantisce resistenza alle normali temperature incontrate nei processi di metallizzazione. Migliori risultati si ottengono effettuando la deposizione in atmosfera "inquinata" dalla presenza di ossigeno o azoto: si pensa che i contaminanti fungano da blocco alla diffusione intergranulare o perfino dalla formazione di ossidi e nitruri al bordo grano.

La tabella seguente riassume alcuni esempi di barriere utilizzate nella formazione di contatti alluminio - silicio.

Struttura di metallizzazione	Massima temperatura operativa [°C]	Causa di rottura
Al / PtSi / Si	350	Formazione di composti
Al / TiSi ₂ / Si	400	Diffusione
Al / Cr / PtSi / Si	450	Formazione di composti
Al / Ti / PtSi / Si	450	Formazione di composti
Al / Ti ₃₀ W ₇₀ / PtSi / Si	500	Diffusione
Al / TiN / PtSi / Si	600	Formazione di composti
Al / TiC / PtSi / Si	600	Formazione di composti

Tabella 2.1 - Strutture di metallizzazione e massime temperature operative.