

Materiali dell'elettronica allo stato solido

Circuiti integrati:

- I materiali elettronici si suddividono in 3 categorie:
 - Isolanti Resistenza (ρ) > $10^5 \Omega\text{-cm}$ (Resistività)
 - Semiconduttori $10^{-3} < \rho < 10^5 \Omega\text{-cm}$
 - Conduttori $\rho < 10^{-3} \Omega\text{-cm}$
- I semiconduttori elementari sono formati da atomi di un solo tipo, generalmente silicio.
- I semiconduttori composti sono formati dalla combinazione di elementi della III e della V colonna o della II e della VI.
- Il germanio era utilizzato in molti dei semiconduttori più vecchi.
- Il silicio ha rapidamente sostituito il germanio grazie alla sua maggiore ampiezza di banda proibita, al basso costo, e alla semplicità con cui può essere ossidato per formare maschere isolanti di diossido di silicio. → Vetro

RESISTIVITÀ: Difficoltà con cui curva all'avarsa giro sotto effetto di FBH

Vetro è ottimo sia come isolante dell'aria che mancano nella lavorat.
a strati

MOD. A BANDE DI ENERGIA: all'interno di un cristallo ci sono
regioni energetiche: es. Banda di valenza (insieme che contiene
gli elettroni legati per il legame covalente) ↴
insieme dell'
energia

Elettroni liberi dal legame di condut: sono un banda
di conduzione

Se formo ancora più energia, l'elettrone può essere sganciato
dal materiale.

Energia che separa le due bande: band gap

Più alto è l'intervallo, migliore è l'isolamento elettrico.

Banda proibita: salto per liberare un elettrone da legame covalente
e renderlo libero.

METALLO: band gap 0 (moltissimi elettroni sono libri di muoversi)

eV: energia acquisita da elettrone quando attraversa d.d.p. di 1 V.

Materiali semiconduttori (cont.)

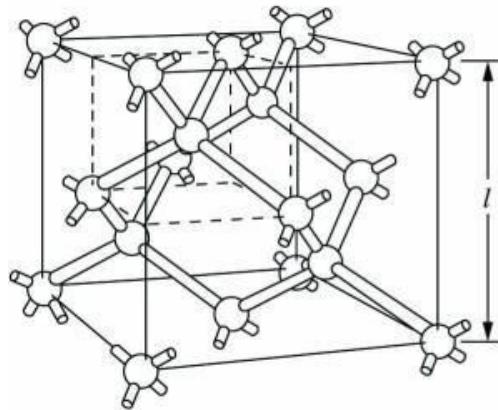
Semiconduttori	Banda Proibita E_G (eV)
Carbonio (diamante)	5.47
Silicio	1.12
Germanio	0.66
Stagno	0.082
Arsenuro di gallio	1.42
Nitruro di gallio	3.49
Fosfuro di indio	1.35
Nitruro di boro	7.50
Carburo di silicio	3.26
Seleniuro di cadmio	1.70

Più controllabile

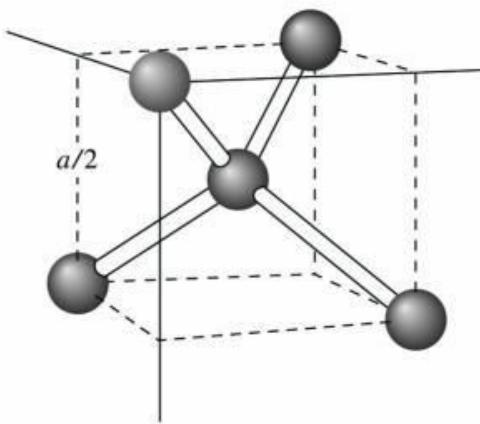
	IIIA	IVA	VA	VIA
	5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen
	13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur
IIB	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic
	30 65.37 Zn Zinc	31 69.72 Ga Gallium	32 72.59 Ge Germanium	33 74.922 As Arsenic
	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 118.69 Sn Tin	51 121.75 Sb Antimony
	80 Hg Mercury	81 204.37 Tl Thallium	82 207.19 Pb Lead	83 208.980 Bi Bismuth
				84 (210) Po Polonium

Semiconduttori nell'ordine dell'elt.

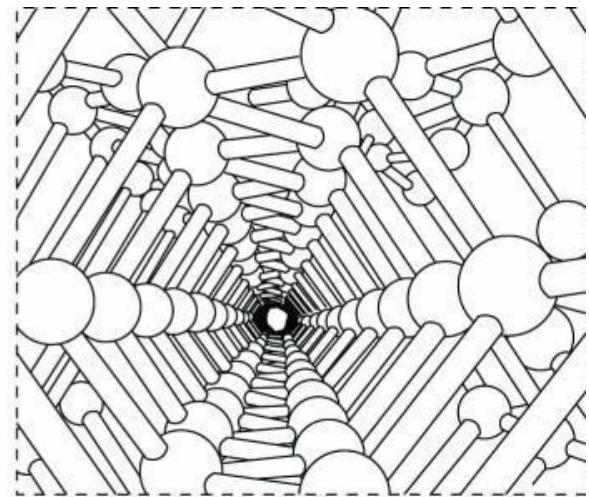
Modello a legame covalente



Cella unitaria del diamante.

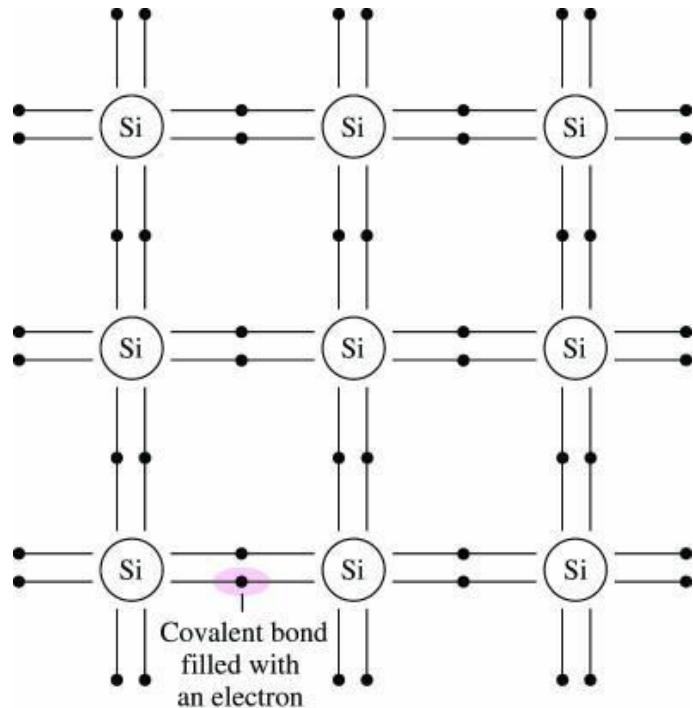


Angolo del cubo che mostra quattro legami covalenti.

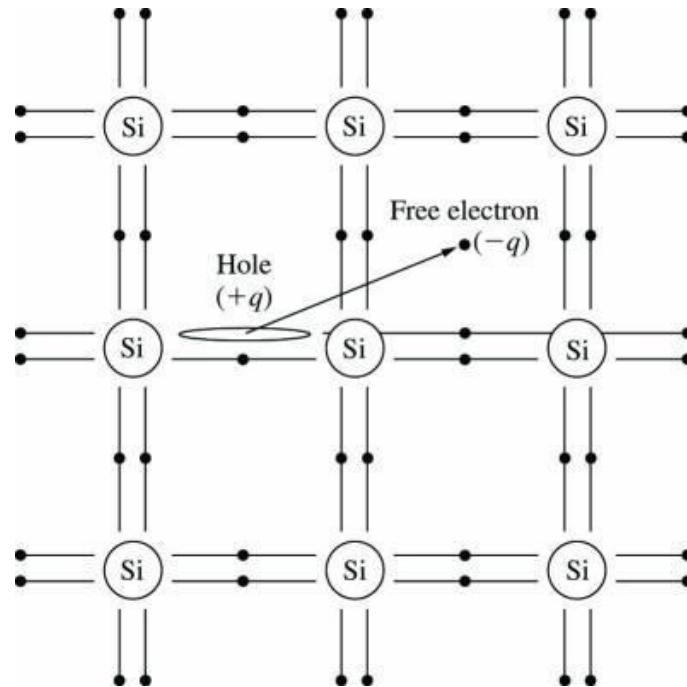


Vista lungo un asse cristallino.

Modello a legame covalente nel silicio (cont.)



Vicino allo zero assoluto tutti i legami sono soddisfatti. Ogni atomo di silicio contribuisce con un atomo per ognuna delle coppie di legami



L'aumento delle temperature aggiunge energia al sistema e rompe i legami generando coppie elettrone-lacuna.

Ogni atomo ha 6 elettroni di valenza che può usare per condividere per le legami covalenti.

Banda di conduzione: elettrone separato da legame covalente. Non appartengono più a nessuno degli atomi e sono liberi di girare: sono quelli che sono responsabili della corrente. (Si trovano nel reticolato cristallino)

Allontanamento di elettrone lascia un buco, una carica positiva.

Si chiamosca che questa lacuna si comporta come se fosse una particella di carica positiva che viaggia. Quindi bisogna tenere in considerazione tutte e due.

La lacuna si sposta quando elettrone salta da un legame covalente all'altro.

Se applico DDP ho corrente di elettroni e corrente di lacune. Moto di lacune in senso opposto a quello di elettroni; le correnti si sommano.

Questo nei semiconduttori

10^{10} el./cm³ liberi di girare a spasso a temp. ambiente.

Sva elettron che faccio

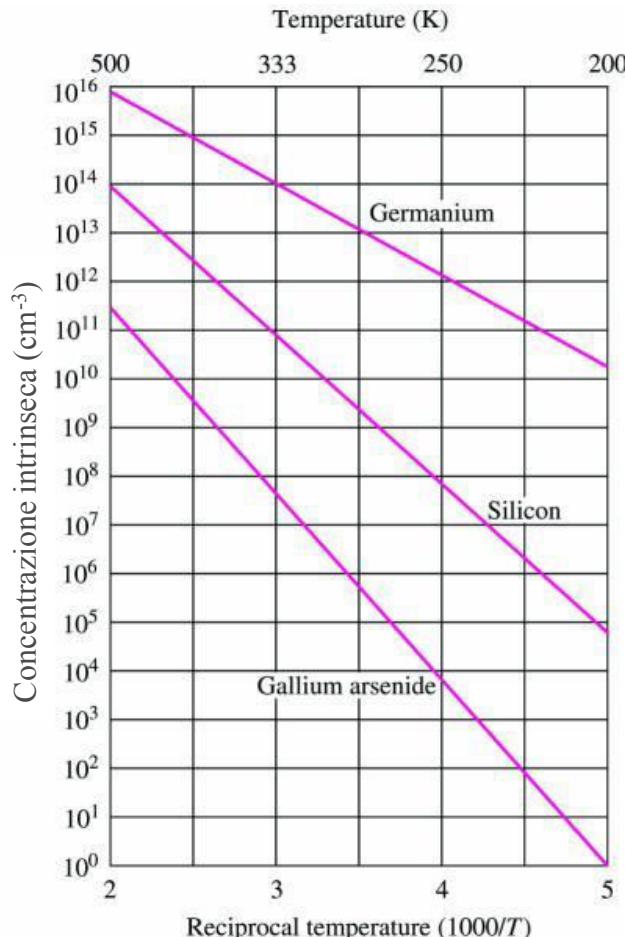
Concentrazione intrinseca dei portatori

- La densità dei portatori in un semiconduttore è funzione della temperatura e delle proprietà del materiale:

$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right) \text{ cm}^{-6}$$

- E_G = ampiezza di banda proibita del semiconduttore eV (elettronvolt)
- k = Costante di Boltzmann, 8.62×10^{-5} eV/K
- T = temperatura assoluta, K
- B = parametro caratteristico del materiale, $1.08 \times 10^{31} \text{ K}^{-3} \text{ cm}^{-6}$ per Si
- L'ampiezza della banda proibita è la minima energia necessaria per liberare un elettrone rompendo un legame covalente.

Concentrazione intrinseca dei portatori (cont.)



- La densità degli elettroni è n ($\text{elettroni}/\text{cm}^3$) e n_i per un materiale intrinseco con $= n_i$. $i \leftarrow$ intrinseco
- Un materiale è intrinseco se non contiene impurità.
- $n_i \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ per Si e Ge

Concentrazioni di elettroni e lacune

- Quando si rompe un legame covalente rimane una vacanza.
- La vacanza è chiamata lacuna.
- Una lacuna si muove quando la vacanza è riempita da un elettrone di un legame rotto nelle vicinanze (corrente di lacune).
- La concentrazione di lacune si indica con p .
- Per il silicio intrinseco, $n = n_i = p$. Se materiale è intrinseco
- Il prodotto delle concentrazioni di elettroni e lacune è $pn = n_i^2$.
- Il prodotto pn indicato precedentemente è valido solo quando un semiconduttore è in equilibrio termodinamico (senza l'applicazione di una tensione esterna).

Corrente di deriva

- La resistività ρ e il suo reciproco, la conducibilità σ , caratterizzano il flusso di corrente in un materiale a cui si applica un campo elettrico.
- Le particelle cariche si muovono o *derivano* sotto l'influenza del campo applicato.
- La corrente risultante è chiamata *corrente di deriva*.
- La densità della corrente di deriva è
$$j = Qv \text{ (C/cm}^3\text{)(cm/s)} = \text{A/cm}^2$$

j = densità di corrente, (la carica in Coulomb che si muove attraverso una sezione di area unitaria)

Q = densità di carica, (Carica in una unità di volume)

v = velocità delle cariche in un campo elettrico.

Si noti che con "densità" ci si può riferire ad un'area o ad un volume, a seconda del contesto.

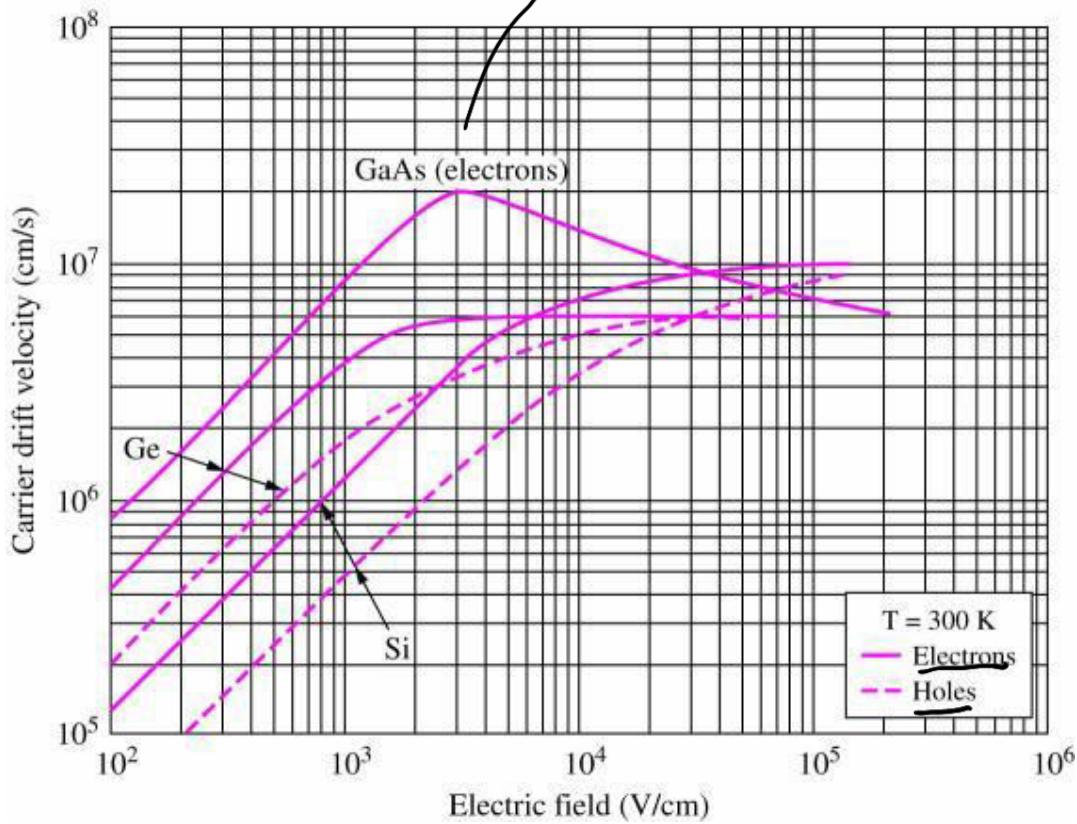
Mobilità

- Per piccoli campi, la velocità di deriva v (cm/s) è proporzionale al campo elettrico E (V/cm). La costante di proporzionalità è la mobilità, μ :
 - $v_n = -\mu_n E$ e $v_p = \mu_p E$, dove *stessa direzione di E*
 - v_n e v_p = velocità di elettroni e lacune (cm/s),
 - μ_n e μ_p = mobilità di elettroni e lacune ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)
-
- La mobilità delle lacune è minore di quella degli elettroni in quanto la corrente di lacune è il risultato di molteplici rotture di legami covalenti, mentre gli elettroni si possono muovere liberamente nel cristallo.

Anzi conseguente

Saturazione di velocità

Effetto di ordine Superiore



Per campi elevati, la velocità dei portatori **satura** e pone un limite alla risposta in frequenza dei dispositivi allo stato solido

A velocità **saturata** Si pone un limite a uno dei due fattori.

Resistività del silicio intrinseco

- Data la deriva di corrente e la mobilità, possiamo calcolare la resistività:
 $j_n^{drift} = Q_n v_n = (-q_n)(-\mu_n E) = qn \mu_n E$ A/cm²
 $j_p^{drift} = Q_p v_p = (q_p)(\mu_p E) = qp \mu_p E$ A/cm²
- 2 strumenti per variare la conducibilità
(anche se per ora è intrinseco)
- $j_T^{drift} = j_n + j_p = q(n \mu_n + p \mu_p)E = \sigma E$ → Conducibilità

In questo modo si definisce la conducibilità elettrica:

$$\sigma = q(n \mu_n + p \mu_p) \quad (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

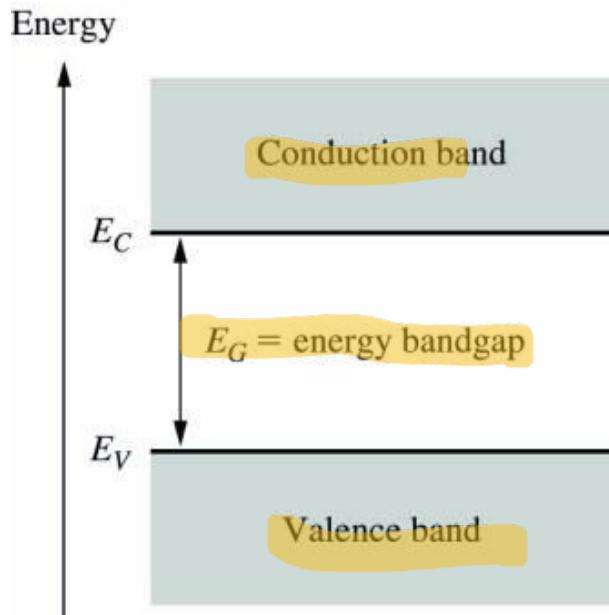
La resistività ρ è il reciproco della conducibilità:

$$\rho = 1/\sigma \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

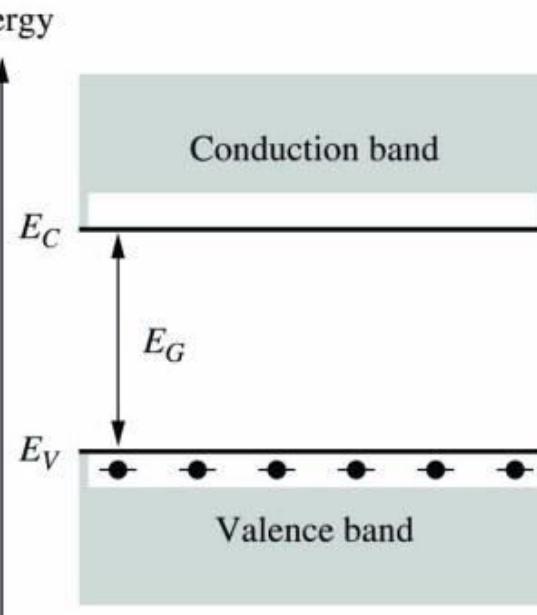
$$n_i = 10^{10}/\text{cm}^3$$

$$\rho = 1/\sigma = 3.38 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$$

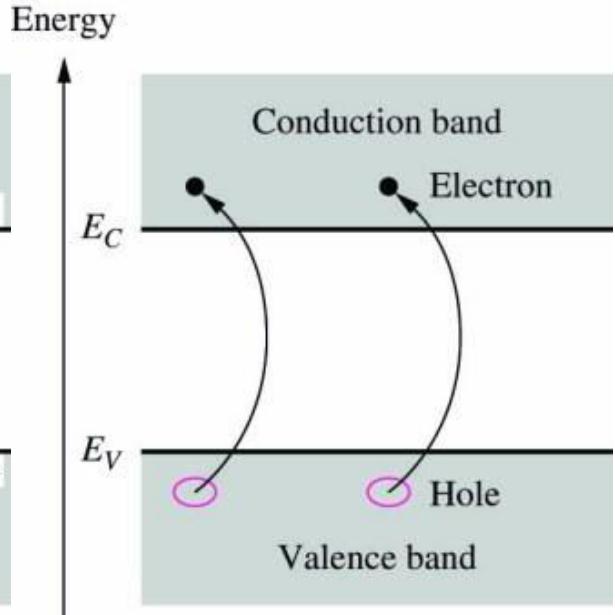
Modello a bande di energia



Modello a bande di energia. E_C e E_V sono i livelli di energia ai margini della banda di valenza e di conduzione.



L'elettrone che fa parte di un legame covalente si trova in uno stato di bassa energia nella banda di valenza. La figura si riferisce a 0 K.



L'energia termica rompe i legami covalenti e fa muovere gli elettroni nella banda di conduzione.

Semiconduttori drogati

- Il **drogaggio** è il processo con cui si aggiungono piccole quantità di impurità in un semiconduttore.
- Con il **drogaggio** è possibile controllare la resistività e altre proprietà in un intervallo molto ampio di valori.
- Per il **silicio**, le **impurità** appartengono alla III e alla V colonna della tavola periodica.

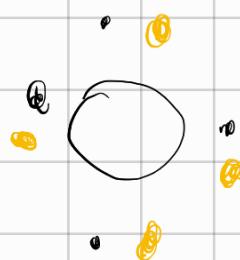
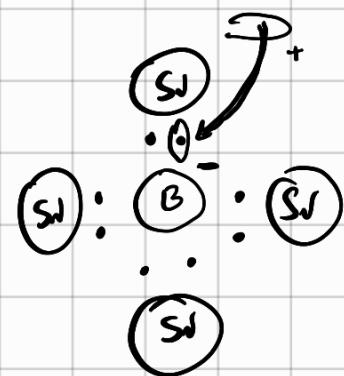
4^ colonna per il silicio

Si usano atomi che hanno un numero di elettroni di valenza

Osservazione: drogare senza farne una legge.

Dominio: Aumento del numero di elettroni rispetto ai buchi.

Si può parlare di una fetta già drogata o anche fetta neutralizzata.

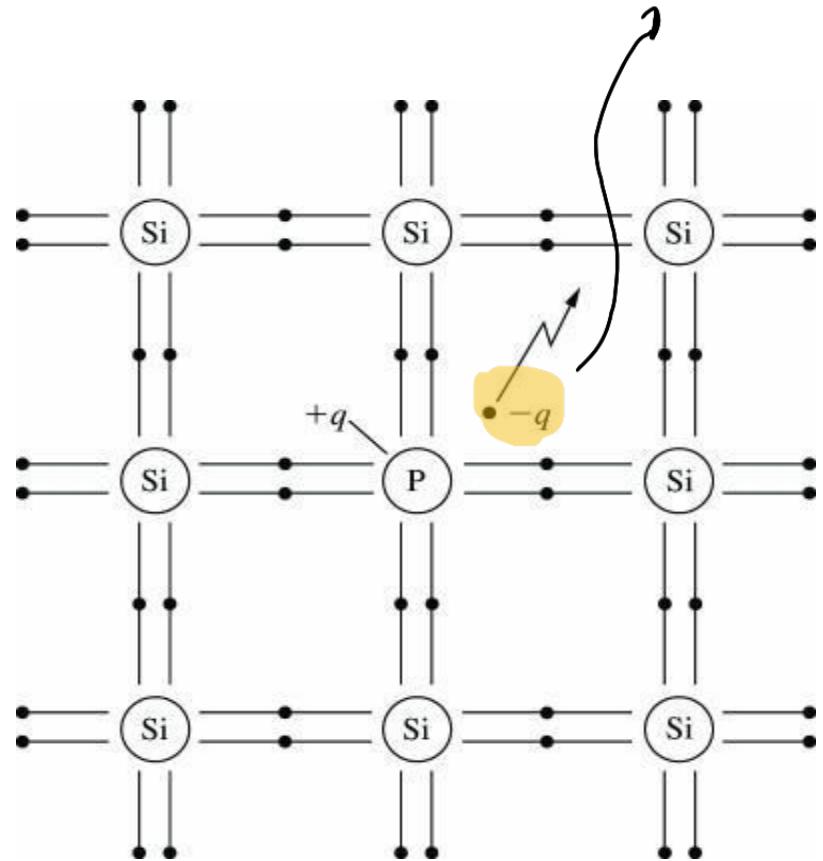


Impurità di tipo donatore per il silicio

Impurità di tipo n

Avanzato

- Gli atomi di fosforo (o altri elementi della V colonna) rimpiazzano atomi di silicio nella struttura cristallina.
- Siccome il fosforo ha cinque elettroni sull'orbita esterna, ci sarà un elettrone 'extra' nella struttura.
- Il materiale ha ancora carica neutra, ma basta poca energia per rendere disponibile l'elettrone per il processo di conduzione, dato che non fa parte di nessun legame covalente



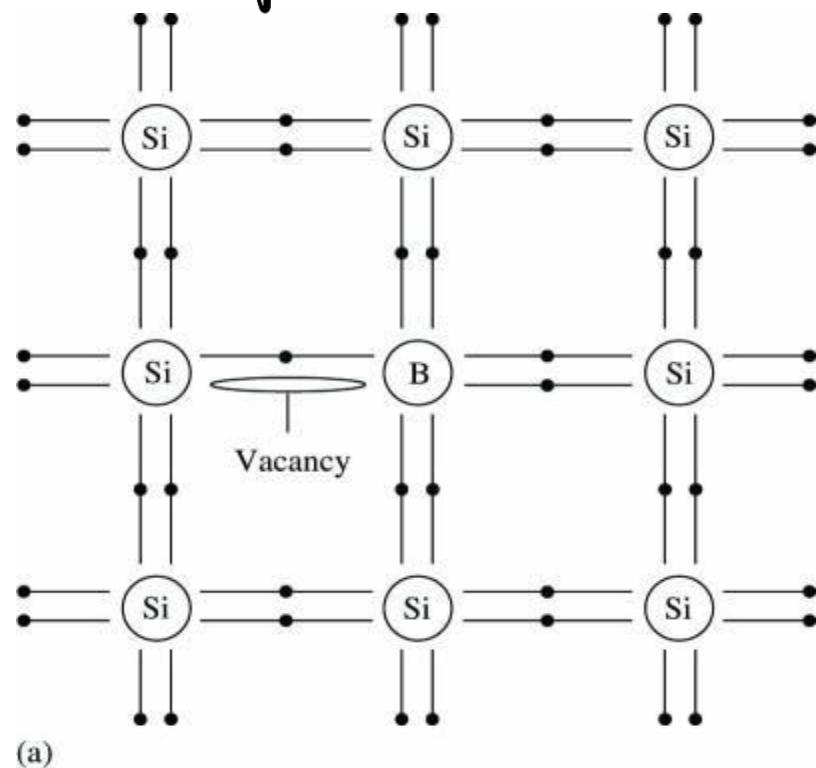
Impurità di tipo accettore per il

Impurità di tipo P

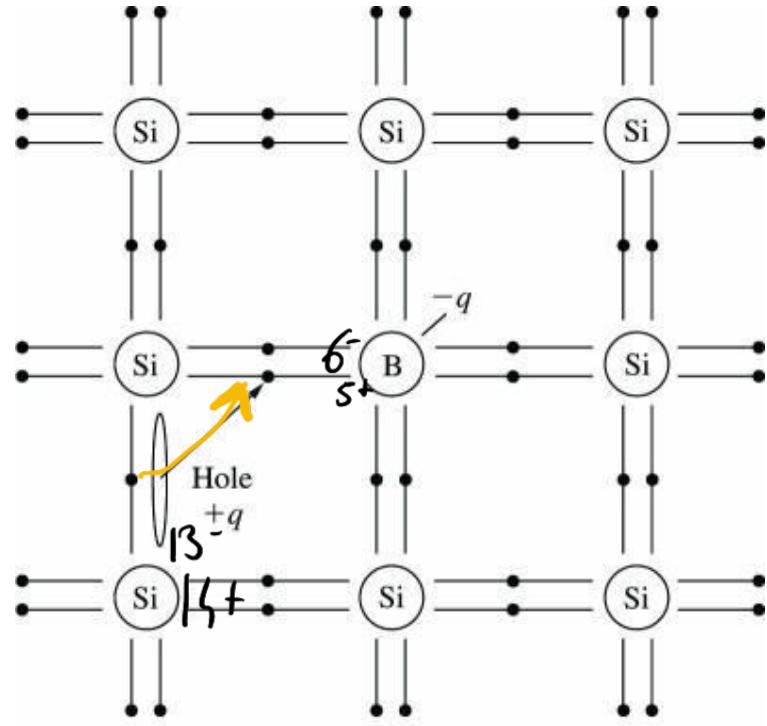
silicio

Una lacuna non può
rispettare a quelle che potranno
fare

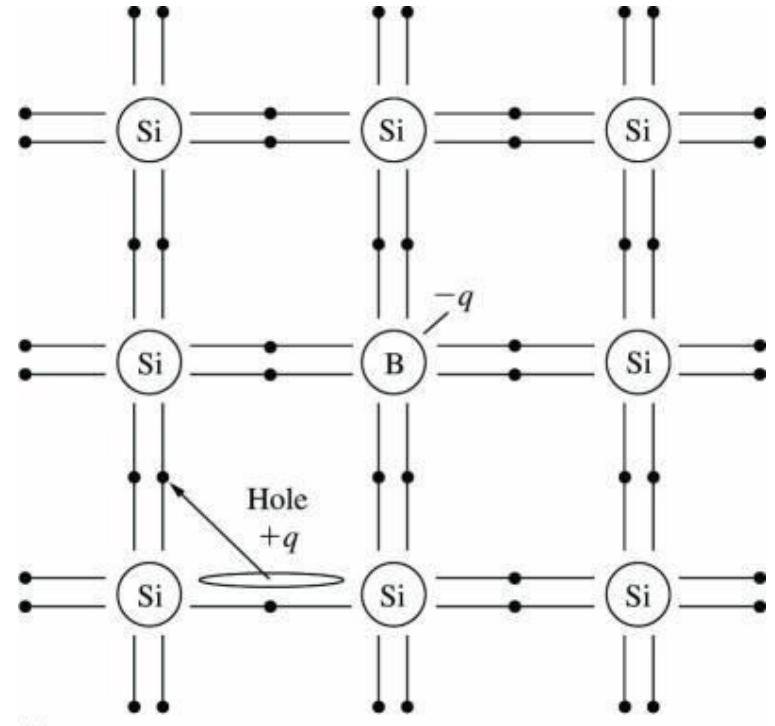
- Il boro (elemento della colonna III) è stato aggiunto al silicio.
- Ora esiste un legame incompleto, che crea una lacuna.
- E' richiesta poca energia per spostare un elettrone vicino nella lacuna.
- Siccome la lacuna si muove, anche la carica si propaga attraverso il silicio



Impurità di tipo accettore per il silicio (cont.)



(b)



(c)

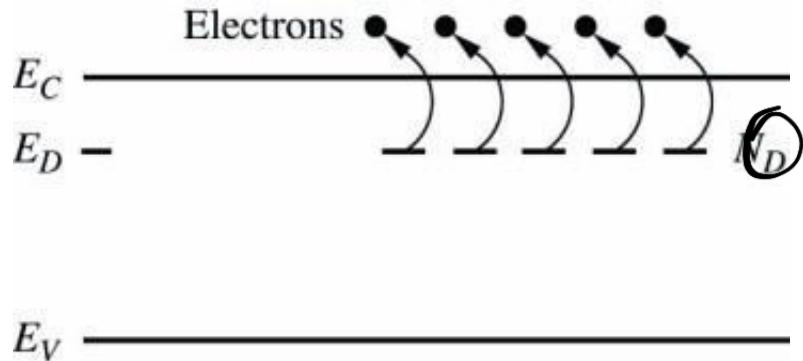
Moto della lacuna attraverso il silicio.

Buco può saltare solo ad un atomo vicino

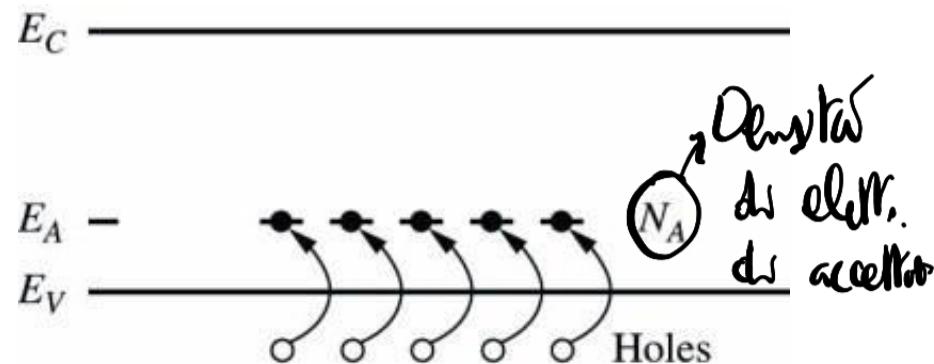
Luigi Zeni DII-SUN

Fondamenti di Elettronica Digitale

Modello a bande di energia in un semiconduttore estrinseco



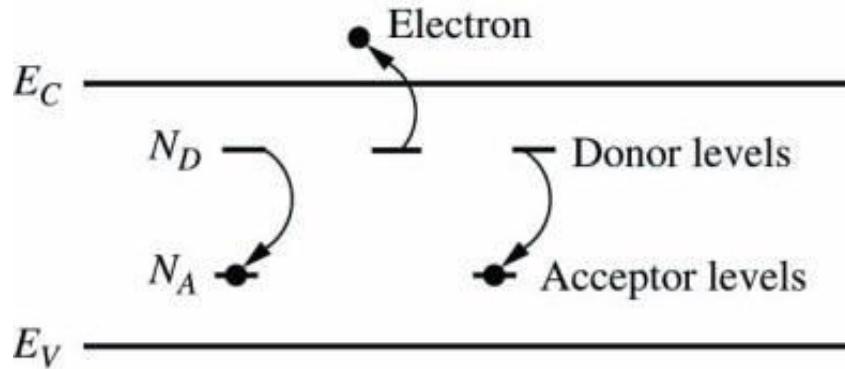
Semiconduttore con donatori o droganti di tipo n. Gli atomi donatori hanno elettroni liberi con energia E_D . Dato che E_D è vicino a E_C , (circa 0.045 eV per il fosforo), è semplice per gli elettroni in un materiale di tipo n spostarsi nella banda di conduzione.



Semiconduttore con accettori o droganti di tipo p. Gli atomi degli accettori hanno dei legami covalenti aperti con energia E_A . Dato che E_A è prossimo a E_V , (circa 0.044 eV per il boro), è semplice per gli elettroni nella banda di valenza andare a completare i legami covalenti.

Modello a bande per un semiconduttore compensato

Tornare indietro, drogaggio opposto



Un semiconduttore compensato ha sia droganti di tipo n che di tipo p. Se $N_D > N_A$, ci sono più livelli donatori. Gli elettroni dei donatori riempiono tutti gli stati disponibili. I rimanenti $N_D - N_A$ elettroni sono disponibili per il passaggio alla banda di conduzione.

La combinazione del modello dei legami covalenti e del modello delle bande di energia sono complementari e ci aiutano a comprendere il processo di conduzione di elettroni e lacune.

Tecnica ols diffusione: Si scalda la fetta.

Atomi di boro si addensano e rimbalza a entro nel silicio.

Si crea impz. (grimpone)

Caso 2: Accelerare atom con acceleratore di particelle: per energia cinetica, atom penetra nel wafer.

IMPIANTAZ. IONICA

Per ripristinare il reticolo rovato dagli atomi, bisogna riscaldarli, mettendoli in agitazione termica e fatti tornare alla configuraz. di base.

IMPIANTAZ. A CALDO: Si espone superf. Silicio a vapori di materiali drogati che si diffondono nel materiale.

Il processo di apertura delle fincehe si chiama LITOGRAF.

Si mette la sup. di vetro n. rotazione con lo SPIN COATER e Si fa cadere gocca di polimero. Per eff. di forza centrifuga la goccia si spalma, poi si lascia in durare.

Si espone il polimero agli UV beams proiettando su di esso una maschera che rispecchia il taglio desiderato. Polimero è dello FOTOSENS.

Così si espone l'ossido di silicio. Il sottovuoto vero si un ACIDO FLUORIDICO. Si immmerge poi in un altro acido che elimina il restante polimero. Poi si dryga.

Ultimo passo serve a insilizzare le connes. metalliche: vengono aperti i contatti. Il materiale vetro può essere in un evaporatore dove uno stento metallico ricopre il materiale. Nelle parti in cui il silicio è esposto vetro raggiunto dal metallo creando contatti.

Si rimuove infine il metallo in eccesso.

(Si apre FOTO LIT. usando una maschera precisione ACIDO NITRICO)

Concentrazione dei portatori di carica per semiconduttori drogati

+ Donatori

- Se $n > p$, il materiale è di tipo n.
Se $p > n$, il materiale è di tipo p.
L, Eccesso di elettroni
- Il portatore con la concentrazione più alta è il portatore maggioritario, quello con la concentrazione più bassa è il minoritario
- N_D = concentrazione donori atomi/cm³
 N_A = concentrazione accettori atomi/cm³
- La neutralità di carica richiede $q(N_D + p - N_A - n) = 0$
P=n se non si considerano i carri
- Si può anche dimostrare che $pn = n_i^2$, anche per semiconduttori drogati in equilibrio termico.

Materiali di tipo n

- Sostituendo $p = n_i^2/n$ in $q(N_D + p - N_A - n) = 0$ si ottiene $n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2 = 0$.

- Risolvendo rispetto a n

$$n = \frac{(N_D - N_A) \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \text{e} \quad p = \frac{n_i^2}{n}$$

- Per $(N_D - N_A) \gg 2n_i$, $n \approx (N_D - N_A)$

Altamente
adattiva
degno
Droga agli mut: 10^{21}
Normalmente $10^{16}, 10^{17}$

$$10^{21} \text{ atomi/cm}^3$$

Dipendenza da temperatura viene mascherata dalla
presenza non costante



Materiali di tipo p

- Con un approccio simile a quello utilizzato per i materiali di tipo n troviamo le seguenti equazioni:

$$p = \frac{(N_A - N_D) \pm \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \text{e} \quad n = \frac{n_i^2}{p}$$

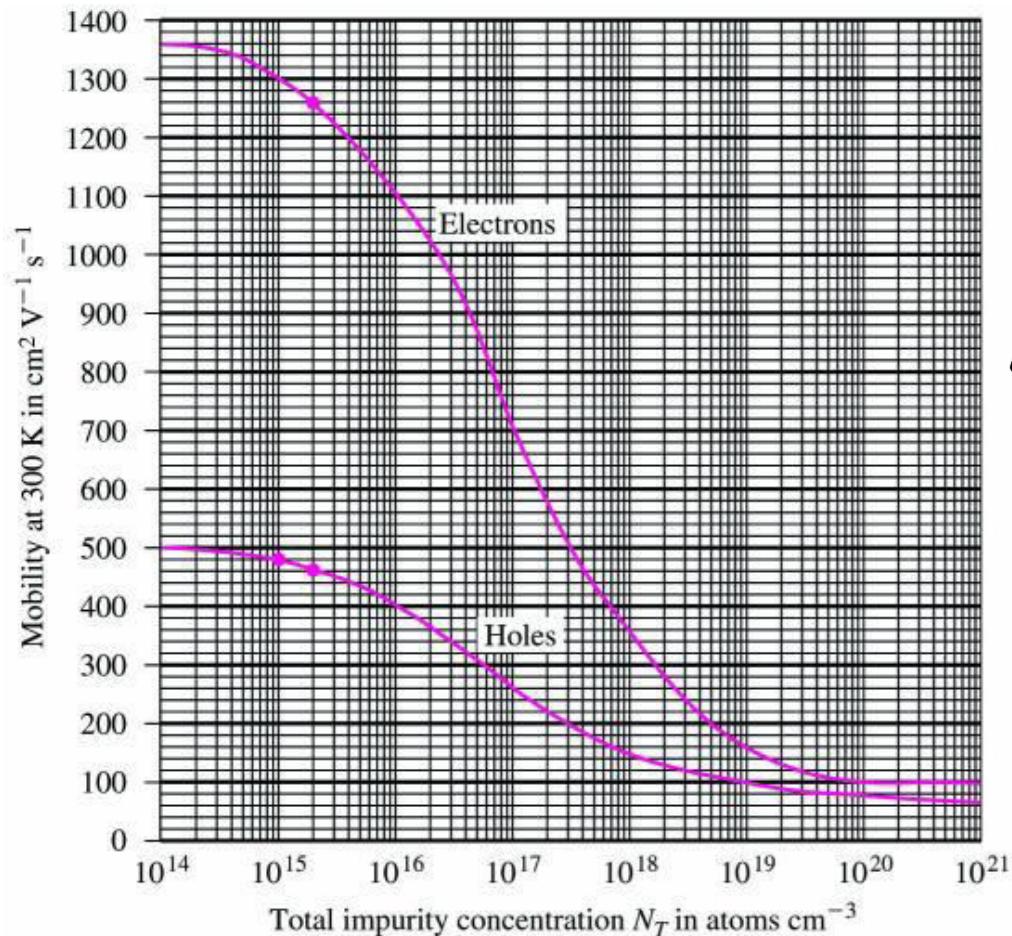
- Determiniamo la concentrazione dei portatori di maggioranza dalla neutralità di carica e determiniamo quella dei portatori di minoranza dalla relazione di equilibrio termico.
- Per $(N_A - N_D) \gg 2n_i$, $p \cong (N_A - N_D)$

Livelli di drogaggio

Tutti atomi drogati:
Sono ionizzati
(Serve poca energia)

- La concentrazione dei portatori maggioritari è determinata nella fase di realizzazione e risulta indipendente dalla temperatura (in normali intervalli di temperatura).
- Di contro la concentrazione dei portatori minoritari è proporzionale a n_i^2 , e quindi fortemente dipendente dalla temperatura.
- Per valori usuali di drogaggio, $n \approx (N_D - N_A)$ per il tipo n e $p \approx (N_A - N_D)$ per materiali di tipo p.
- Valori usuali di drogaggio vanno da $10^{14}/\text{cm}^3$ a $10^{21}/\text{cm}^3$.

Mobilità e resistività nei semiconduttori estrarinseci



$$V = M E$$

Più atomi la concentraz.
più piccole V per la
mobilità.

Mobility approximations

$$\mu_n = 92 + \frac{1270}{1 + \left(\frac{N_T}{1.3 \times 10^{17}} \right)^{0.91}}$$

$$\mu_p = 48 + \frac{447}{1 + \left(\frac{N_T}{6.3 \times 10^{16}} \right)^{0.76}}$$

Intuitivo: ci sono più
ostacoli per il moto delle
particelle

AUMENTA RESISTENZA

Non danna (eff. di E eff)

Corrente di diffusione

- Nei semiconduttori di uso comune, è abbastanza frequente ottenere i gradienti di concentrazione dei portatori variando la concentrazione del drogante e/o il tipo di drogante all'interno di una parte del semiconduttore
- In questo modo si da origine ad una corrente di diffusione provocata dalla naturale tendenza dei portatori a spostarsi dalle zone a più alta concentrazione verso quelle a bassa concentrazione.
- La corrente di diffusione è simile ad un gas che si propaga in una stanza diffondendosi in tutto il volume.

Se ho un gradiente di concentraz., un variaz. dell'agilità. Tornica, le cariche si spostano da zone a concentraz. magg. a quelle a concentraz. minore.

Finché non c'è raggiungimento dell'equilibrio ha un flusso netto di carica, ciò è una CORRENTE DI DIFFUSIONE

GRADIENTE DI CONCENTRAZ. induce uno spostamento di cariche dalle zone a più alta concentraz. a quelle a più bassa. FLUSSONE TTO esiste con gradiente;

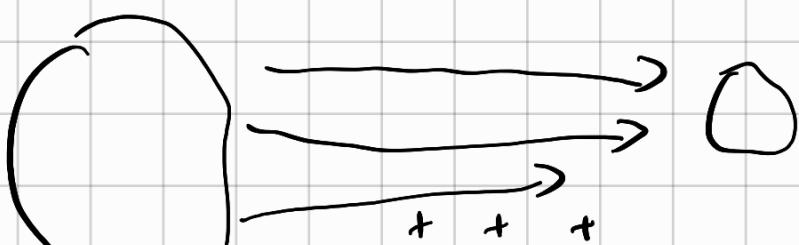
C'è questo fenomeno

GRADIENTE: Derivata spaz. $\neq 0$ di concentraz.

Corrente deve essere proporzionale alla carica e al gradiente.

c'è un coeff. di proporzionalità.

Meno perché la corrente va nella direz. del gradiente



Direz. del gradiente

Cariche si spostano seguendo il gradiente, prima no perché avevamo

$$F = qE$$

Il segno ci è dato dal segn. della carica.

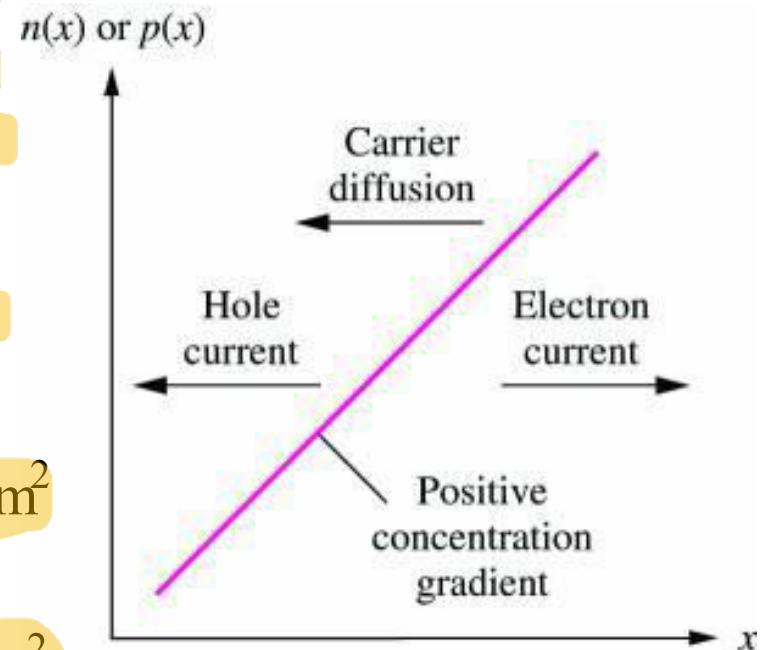
Convenzione del -: Zona attiva consentimmo. a basso

Corrente di diffusione (cont.)

- I portatori si muovono verso regioni con concentrazioni più basse, in questo modo le correnti di diffusione sono proporzionali alla derivata spaziale della concentrazione dei portatori cambiata di segno.

$$j_p^{diff} = (+q)D_p \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) = -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \text{ A/cm}^2$$

$$j_n^{diff} = (-q)D_n \left(-\frac{\partial n}{\partial x} \right) = +qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \text{ A/cm}^2$$



Equazioni che descrivono la corrente di diffusione

Corrente di diffusione in presenza di un gradiente di concentrazione.

Corrente di diffusione (cont.)

- D_p e D_n rappresentano la diffusività di elettroni e lacune in cm^2/s . La diffusività e la mobilità sono legate dalla relazione di Einstein:

dipende da temperatura

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T = \text{Tensione termica}$$

è un rapporto costante che dipende da T

$$D_n = \mu_n V_T, D_p = \mu_p V_T$$

- La tensione termica, $V_T = kT/q$, è approssimativamente 25 mV a temperatura ambiente.

Dipende solo da T.

Corrente totale in un semiconduttore

- La corrente totale è la somma delle correnti di deriva e di diffusione:

$$j_n^T = q\mu_n n E + qD_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$j_p^T = q\mu_p p E - qD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

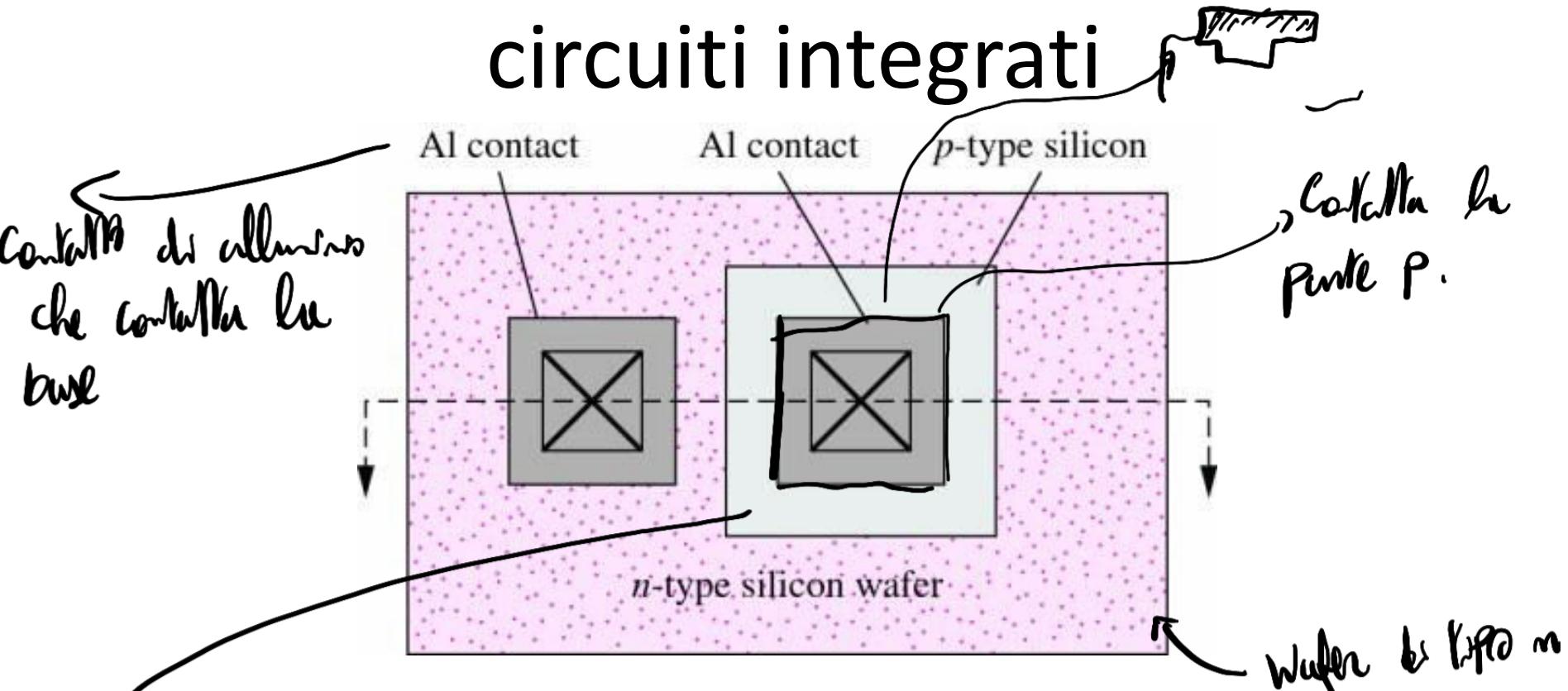
Riscrivendole utilizzando la relazione di Einstein ($D_p = \mu_n V_T$)

$$j_n^T = q\mu_n n \left(E + V_T \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \right)$$

$$j_p^T = q\mu_p p \left(E - V_T \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

Come si fa DIODO

Cenni sulla fabbricazione dei circuiti integrati



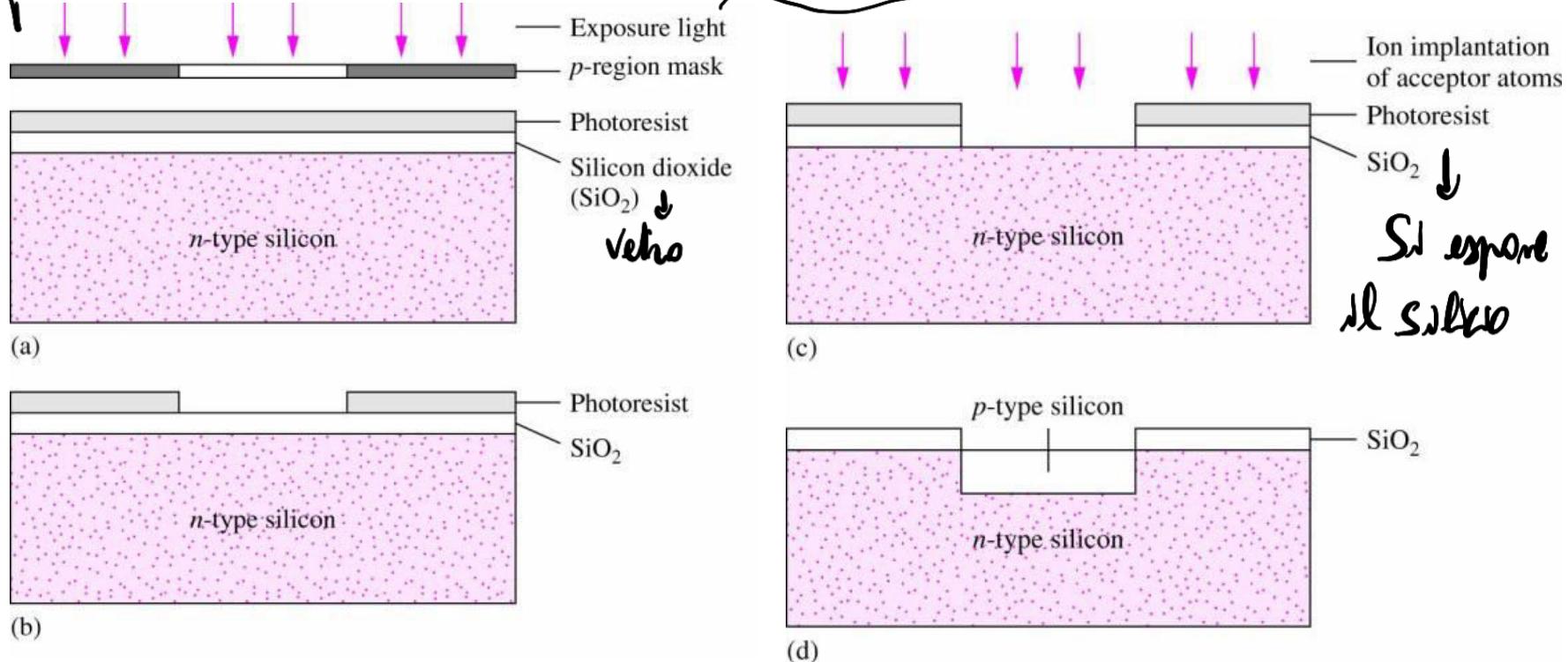
Vista dall'alto di un diodo a giunzione pn.

Creata con foto
lavoro: Si apre finestra bianca e si filtra droghante p; Punto è n e poi
dovuta p.

Cenni sulla fabbricazione dei circuiti integrati (cont.)

Servono a proteggere
il fotoresist

protezione



- (a) Prima esposizione, (b) dopo l'esposizione e lo sviluppo del photoresist, (c) dopo l'attacco dell'ossido di silicio, e (d) dopo l'impiantazione o diffusione di impurità di tipo accettore.

Maschera ha regione buona. Photoresist si polymerizza
nella stessa maniera.

Con un altro bagno che scioglie il Photoresist si ha accesso
all' n-type silicio. Possiamo ottenere solo quel pezzo.

Implantaz. (acceleratore) anche senza togliere Photoresist

Mettiamo p' file da comparsa la m e la andiamo p'.

Layer di Photoresist va rimosso. (Polimero = Photoresist)
Lo abbiamo messo apposta per fare il drogaggio.

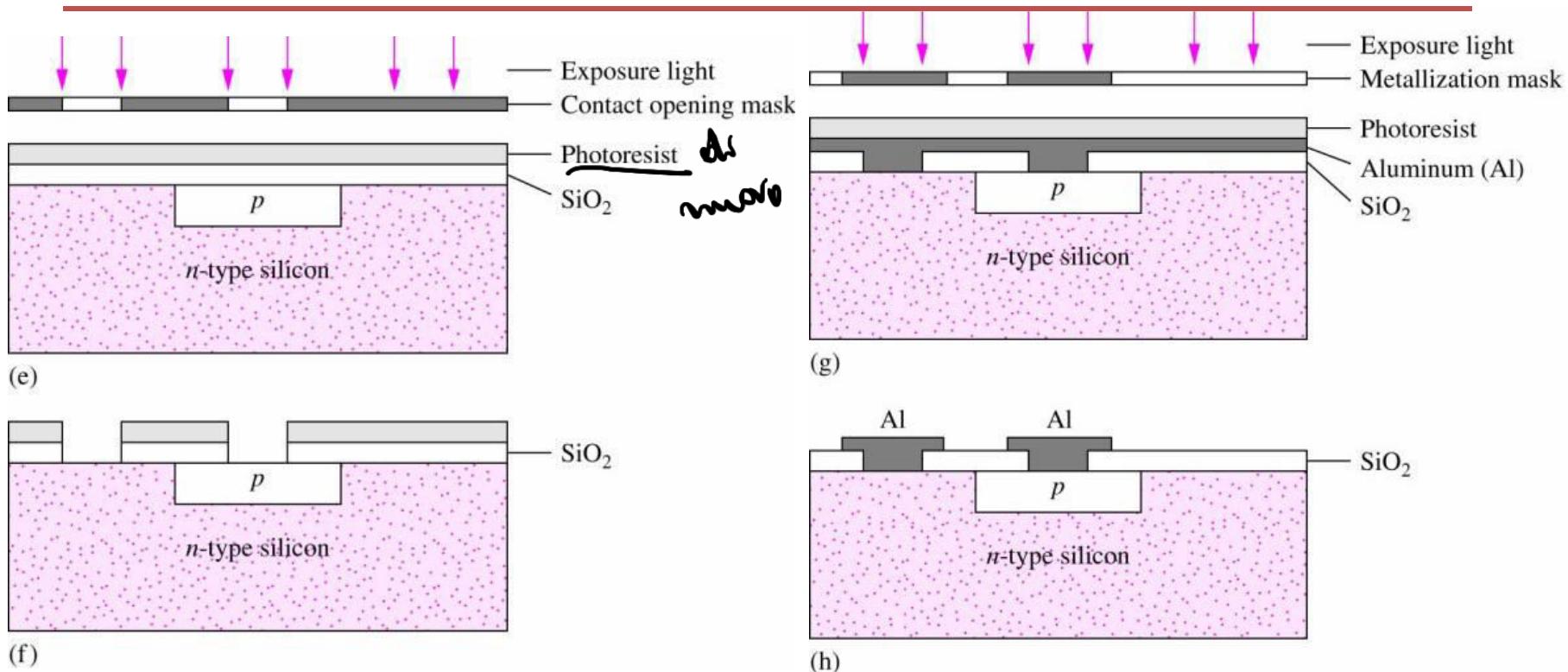
Andò Flavio che scioglie il vetro.

Rimuovendo vetro, rimosso, rimetto polimero, ma magari diverso,
creo buchi e avvio al silicio,
Tutta la fetta viene coperta di alluminio, che penetra nei buchi.
Per togliere alluminio rifaccio processo e tolgo alluminio n- eccesso.

Il processo di alluminio viene fatto su tutta la fetta
perché non è che lo fai una volta per
1 millesimo di volta



Cenni sulla fabbricazione dei circuiti integrati (cont.)



(e) Esposizione della maschera delle finestre dei contatti, (f) sviluppo del photoresist e attacco dell'ossido delle finestre dei contatti, (g) esposizione della maschera delle metallizzazioni, e (h) struttura finale dopo l'attacco dell'alluminio e la rimozione del fotoresist.

Alla fine del video come slide precedente