INTRODUZIONE

$1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J = 1\ eV$

$Z_L = sL = j\omega L \longrightarrow \omega = 0$ corto circuito
$\omega = \infty$ ramo aperto

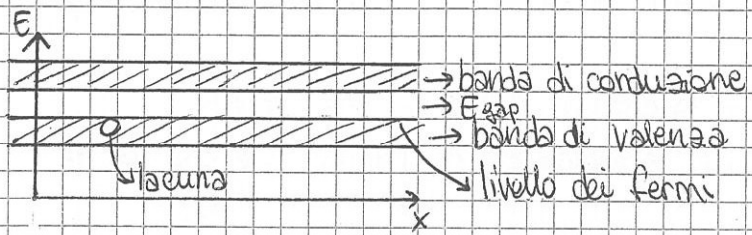
$Z_C = \frac{1}{sC} = \frac{1}{j\omega C} \longrightarrow \omega = 0$ ramo aperto
$\omega = \infty$ corto circuito

Nomenclatura
- lettera: • minuscola: correnti e tensioni variabili nel tempo
  • maiuscola: valori efficaci, valori medi, fasori, trasformate
- pedice: • minuscolo: componenti variabili nel tempo
  • maiuscolo: quantità totale o valori medi

Punto di lavoro / punto di riposo: punto nel quale variano tensione e corrente; punto intorno al quale si vuole lavorare; è presente nel dominio continuo

Linearizzare: si applica lo sviluppo di Taylor nell'intorno del punto di lavoro e si prende soltanto il termine del primo ordine

Materiali
- conduttori: $\rho < 10^{-2}\ \Omega \cdot cm$
- semiconduttori: $10^{-2}\ \Omega \cdot cm < \rho < 10^{5}\ \Omega \cdot cm$ (gap piccolo)
- isolanti: $\rho > 10^{5}\ \Omega \cdot cm$ (gap grande)



se l'elettrone si sposta lascia una lacuna, un vuoto che viene trattato come una... carica positiva

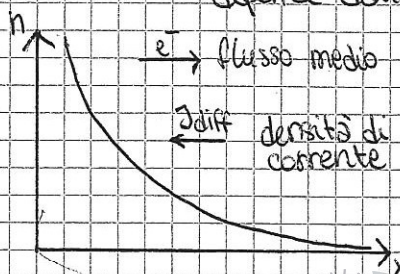
- se l'elettrone è in mezzo alla banda e basta poco ΔV per farlo salire fino alla fine della banda → conduttore
- se l'elettrone è al limite della banda → E_{gap} → piccolo: semiconduttore; grande: isolante

- drogaggio di tipo n: atomi di silicio vengono sostituiti con atomi del quinto gruppo
  se $n > p$ vuol dire che il numero di elettroni è maggiore del numero di lacune
- drogaggio di tipo p: atomi di silicio vengono sostituiti con atomi del terzo gruppo
  se $p > n$ vuol dire che il numero di lacune è maggiore del numero di elettroni

Legge di azione di massa: $np = n_i^2$

Corrente di diffusione

1) Elettroni: se la temperatura è sopra i 273 K il movimento degli elettroni è caotico è perciò la densità degli elettroni non è uniforme ma dipende dalla posizione





gli elettroni si spostano da n> a n<

$I = \frac{dq}{dt}$ $J = \frac{I}{A}$ densità di corrente

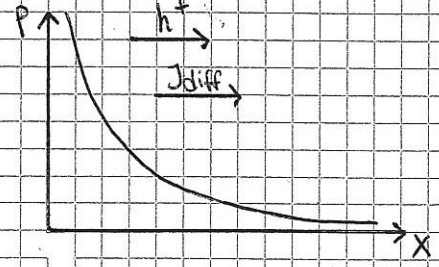
$J_{diffn} = q D_n \frac{dn}{dx}$ densità di corrente di diffusione

modello carica e⁻

D_n costante di diffusione

$\frac{dn}{dx} < 0$, $qD_n > 0 \rightarrow J < 0$

2) Lacune:



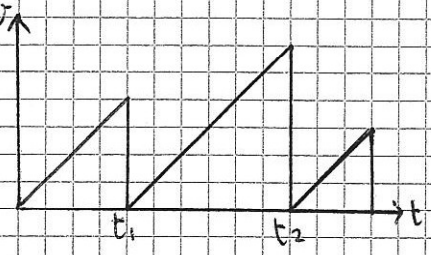
anche le lacune si spostano per diffusione, ma stavolta sono cariche positive:

$J_{diffh} = -q D_h \frac{dp}{dx}$ $J > 0$

Corrente di deriva o drift

Applico un campo elettrico, questo fa spostare le cariche e crea una corrente di drift.

$\vec{F} = q\vec{E}$, se $\vec{E}$ = cost. anche $\vec{F}$ = cost. → la carica accelera linearmente all'interno del materiale ci saranno delle irregolarità che faranno variare la v dell'elettrone



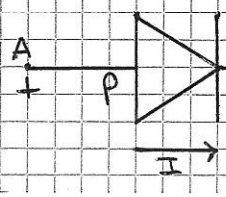
$v_{drift} = \mu E$ (μ = mobilità)

$J_{driftp} = \mu_p E \cdot pq$ $J_{drifte} = \mu_e E \cdot nq$

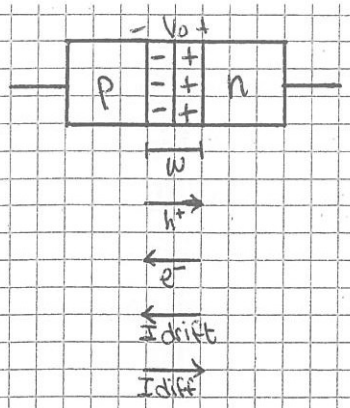
$J_{drift} = J_{driftp} + J_{drifte} = \sigma E$

DIODO

È un componente elettronico passivo non lineare formato da un semiconduttore p e da uno n. La funzione principale di un diodo è quella di controllare il flusso di corrente. La corrente può andare solo in una direzione, da + a −.



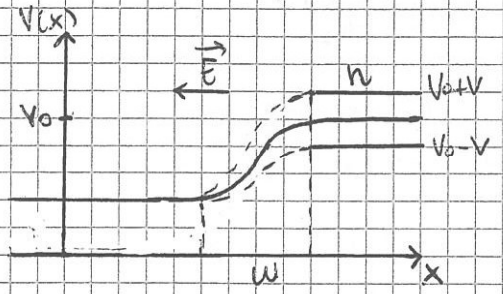
- Se $V_A > V_K$ passa I, corto circuito → polarizzazione diretta
- Se $V_A < V_K$ $I = \emptyset$, ramo aperto → polarizzazione inversa



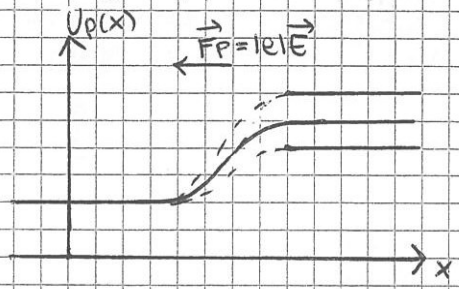
- per diffusione ci sarà uno spostamento di lacune da p verso n, in n si ricombinano con gli elettroni, avendo così l'azzeramento delle cariche mobili, rimane la carica positiva degli ioni droganti fissi
- per diffusione gli elettroni si spostano da n a p, dove si ricombinano con le lacune ed azzerano la concentrazione dei portatori mobili
- nelle prossimità della giunzione restano gli atomi droganti accettori ionizzati, che sono cariche fisse che non vengono più compensate dalle cariche mobili, la larghezza di questa zona è indicata con w ed è chiamata <u>zona di svuotamento</u> o di carica spaziale, perché si è svuotata di cariche mobili

All'equilibrio si crea una differenza di potenziale V_0 detto <u>potenziale di contatto</u> che dà luogo a una corrente di drift da + a −. All'equilibrio tante cariche si spostano da n a p quante sono le cariche che si spostano da p a n, quindi $I_{diff} = I_{drift}$ e la corrente complessiva è zero.

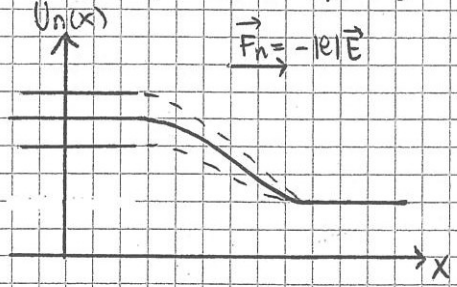
Andamento del potenziale:

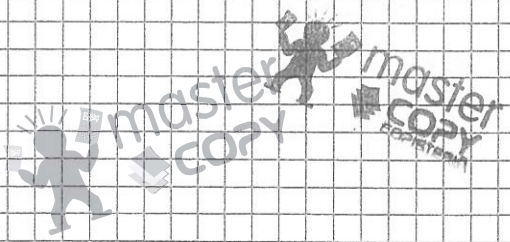


Energia potenziale per le lacune:

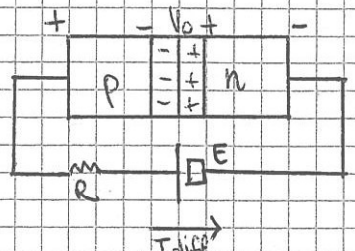


Energia potenziale per gli elettroni:



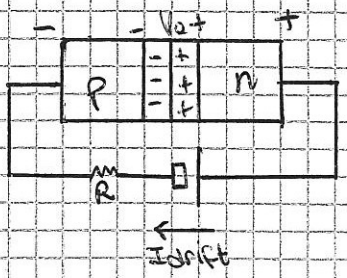


Polarizzazione diretta



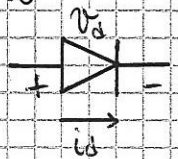
Applichiamo una batteria E, il polo negativo della batteria è in grado di fornire elettroni alla regione di tipo n, il polo positivo li riceve dalla regione di tipo p, questo fornisce lacune alla zona p. La batteria E riduce la barriera di potenziale interna alla giunzione e consente la circolazione di cariche maggioritarie. E deve essere maggiore di 0,7V, una volta superata, la corrente cresce esponenzialmente.

Polarizzazione inversa



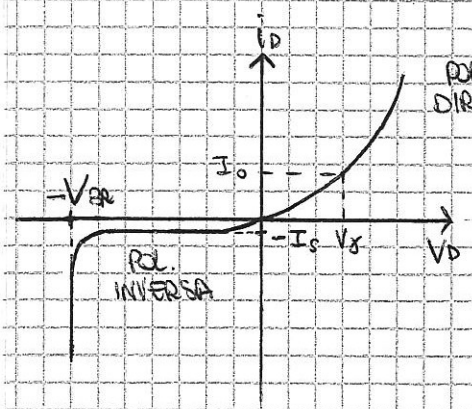
Applichiamo una batteria E che attrae elettroni dalla giunzione n sul polo positivo e le lacune p sul polo negativo, la zona di svuotamento si allarga e ed aumenta la barriera di potenziale fino ad equilibrare la ddp della batteria. A causa dell'agitazione termica, in ogni regione sono presenti le cariche minoritarie. L'elettrone minoritario in p sente la repulsione della batteria e attraversa la giunzione, poi giunto in n continua il suo moto risentendo del polo positivo. Analogamente avviene per la lacuna. Si crea così una leggerissima corrente elettrica, al suo aumentare aumenta anche l'agitazione termica e quindi la corrente inversa, chiamata <u>corrente di saturazione.</u>

Legge di Shockley



$$i_d = I_S\left(e^{\frac{v_D}{\eta V_T}} - 1\right)$$

- i_d: corrente nel diodo
- v_d: tensione nel diodo
- $V_T = \frac{K_B T}{q}$: tensione termica
  - K_B: costante di Boltzmann
  - T: temperatura assoluta
- η: coefficiente di non idealità
- I_S: corrente di saturazione inversa



Quando si raggiunge una tensione $-V_{BR}$, detta <u>tensione di break-down</u>, la corrente aumenta in modo asintotico, la tensione inversa ai capi del diodo si mantiene circa costante a questo valore V_{BR} e si prende come riferimento una corrente I_K, chiamata <u>corrente di ginocchio</u>, se la corrente inversa nel diodo supera questa corrente di riferimento I_K allora si entra nella zona di break-down.

Break-down a valanga

Si ha quando $V_{BR} > 7V$, si crea una forte differenza di potenziale e predomina la corrente di drift. Il campo trascina i portatori da dove sono minoritari a dove sono maggioritari. Nella parte p, un elettrone viene accelerato dal campo e urta un atomo del reticolo; se la sua energia cinetica lo permette, esso rompe il legame covalente liberando un altro elettrone, a loro volta libereranno altri elettroni e così via, la corrente aumenta sempre di più.

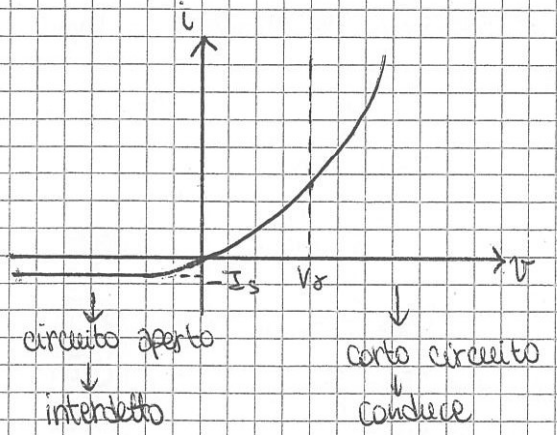
Se si aumenta la temperatura il break-down a valanga viene sfavorito perché aumentando la temperatura gli atomi vibrano, gli urti aumentano ma diminuisce il tempo tra un urto e l'altro quindi l'elettrone non ha tempo di recuperare abbastanza energia cinetica e non riesce a rompere i legami covalenti.

Diodo zener

È un diodo fabbricato per lavorare sulla caratteristica inversa nella zona di break-down, domina per $V_{ZK} < 5V$. Stiamo applicando un potenziale elevato che può direttamente fornire agli elettroni un'energia sufficiente per rompere il legame covalente, quindi è un meccanismo diretto. Se la temperatura aumenta, gli elettroni hanno più energia cinetica ed è favorito il fatto che si rompa il legame covalente.

Se il diodo zener viene polarizzato direttamente, il suo comportamento è del tutto identico a quello di un diodo convenzionale. Se invece viene polarizzato inversamente, lo zener si comporta da isolante, finché la tensione ai suoi capi è inferiore a V_{ZK}, ovvero la <u>tensione di ginocchio</u>. Se si supera V_{ZK}, il dispositivo entra in break-down, la corrente lo attraversa dal catodo all'anodo e la tensione ai suoi capi si mantiene costante.

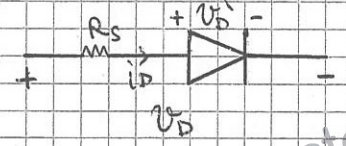
Caratteristica del diodo



V_γ è detta <u>tensione di soglia</u> e varia a seconda del materiale.

$V_{\gamma Si} = 0,7\ V$

Nella realtà oltre al diodo c'è in serie una resistenza R_S dovuta alla resistenza della zona n, p, barriera ecc..



$v_D = v_D' + R_S i_D$

Dipendenza dalla temperatura

- Cosa succede a I_S quando aumento la temperatura:

I_S aumenta del 7,2% per ogni grado in più di temperatura

$$dI_S = I_S(T)\, 0,072\, dT \longrightarrow \frac{dI_S}{I_S} = 0,072\, dT$$

$$\int_{T_0}^{T_1} \frac{dI_S}{I_S} = \int_{T_0}^{T_1} 0,072\, dT = 0,072 \int_{T_0}^{T_1} dT \longrightarrow \left[\ln(I_S)\right]_{T_0}^{T_1} = 0,072\,(T_1 - T_0)$$

$$\ln \frac{I_S(T_1)}{I_S(T_0)} = 0,072\,(T_1 - T_0)$$

$$I_S(T_1) = I_S(T_0)\, e^{0,072\,(T_1 - T_0)}$$

$e^{0,072} \approx 2^{0,1}$

$$I_S(T_1) \approx I_S(T_0)\, 2^{\frac{T_1 - T_0}{10}}$$

per aumento di T di 10°C I_S raddoppia