DISPOSITIVI EL. 29 - 02 - 16

prof. Pemmelli

programma: - Fisica dello stato solido
- Comportamento fisico dei dispositivi - diodi
- transistori bipolari
- trans. FET
- Modelli circuitali dei dispositivi

materiale: SZE physics of semiconductor devices
Appunti prof. dilegenti
(Appunti libro) pemmelli : Fisica dei dispositivi elettronici
Compiti svolti sul suo sito.

esame: scritto + orale

ricevimento: dip. - dell'informazione
050 2217693
" " 672

www.mastercopy.com 050/834129 338/9837745

master COPY COPISTERIA

Identità di Green

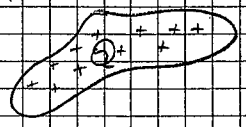
$$\int_S \vec{\mathcal{E}}\,\hat{n}\,dS = \int_V \vec{\nabla}\vec{\mathcal{E}}(x)\,dx \qquad \text{con} \quad \vec{\nabla}\vec{\mathcal{E}} = \frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{E}_z}{\partial z}$$

$$\mathcal{E}(x) = \begin{bmatrix} \mathcal{E}_x \\ \mathcal{E}_y \\ \mathcal{E}_z \end{bmatrix}$$

$$\int_S \vec{\mathcal{E}}\,\hat{n}\,dS = \int_V \vec{\nabla}\vec{\mathcal{E}}\,dx = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho(x)\,dx$$

$$\Rightarrow \vec{\nabla}\vec{\mathcal{E}} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon_0} \qquad \rightarrow \qquad \vec{\nabla}\vec{D} = \rho(x)$$

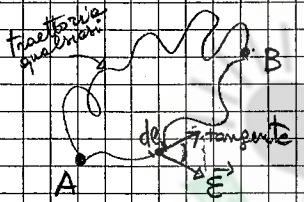
Es. $\bar{x}$ $\qquad \vec{\mathcal{E}}$?



$$\Phi = \mathcal{E}\,4\pi r^2 = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$$\mathcal{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}$$

Es. Si ha uno spazio su cui è definito un campo elettrico (e quindi l'energia)



V? corrisponde al lavoro che devono fare le forze del campo per portare la carica da A al punto B

$V_{AB} = V_A - V_B$ ATTENZIONE: all'ordine dei pedici

differenza di potenziale

$$[V_A - V_B] = \left[\frac{E}{C}\right] = \frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}}$$

$$d\mathcal{L} = \vec{\mathcal{E}}\cdot\vec{t}\,dl \rightarrow \mathcal{L}_{AB} = \int_{A\ell B} \vec{\mathcal{E}}\vec{t}\,dl$$

Campo conservativo: se il campo è indipendente dal percorso (traiettoria) scelto ma dipende dagli estremi (in questo caso A e B) es. campo elettrico

V = potenziale ← funzione scalare, conservativo

$$\vec{\mathcal{E}} = -\vec{\nabla}V$$

$$\vec{\nabla}V = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial V}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Per ogni punto dello spazio vettoriale considerato, posso trovare una funzione scalare tale che $\vec{\nabla}V = -\vec{\mathcal{E}}$

Tutti i modelli che svilupperemo saranno in una dimensione a causa della complessità delle equazioni.

CONDUTTORE: resistività elettrica $\rho = [\Omega m]$ molto bassa: $\sim 10^{-7}\ \Omega \cdot m$

conducibilità elettrica alta $\sigma_{cu} = 59 \cdot 10^6\ \Omega^{-1} m^{-1} = S\ m^{-1}$

ISOLANTE: resistività alta
conducibilità elettrica bassa
$\rho > 10^9\ \Omega \cdot m$ es. quarzo, ossido di silicio

SEMICONDUTTORI: $\rho \simeq 10^3 \rightarrow$ $0.01 \div 100\ \Omega \cdot m$ attraverso opportuni processi di drogaggio

CORRENTE I carica che attraversa una certa superficie nell'unità di tempo (Coulomb/secondo)

(sono quelle che diamo se un materiale conduce meglio o peggio)

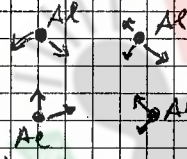
DENSITÀ DI CORRENTE $J = \frac{I}{S}$

[la concentrazione di cariche libere capaci di muoversi nel metallo e che sotto l'effetto del campo elettrico ci possiamo ridistribuire generano corrente elettrica]

n = concentrazione di elettroni mobili (liberi) = num. elettroni mobili nell'unità di volume $= \frac{\text{Nr. elettr.}}{\text{Volume}} = [n] = \frac{1}{m^3}$

RETICOLO CRISTALLINO: corrisponde all'ordinamento periodico degli atomi in un cristallo.

atomi di Al disposti in maniera ordinata nel cristallo che oscillano nella loro posizione di equilibrio (più è alta la temperatura più oscillano)



MODELLO DI DRUDE: modello per spiegare le proprietà di trasporto degli elettroni nei materiali, in particolare nei metalli.

Al III (valenza 3)
mette a disposizione 3 elettroni
però effettivamente 1 atomo di Al mette a disposizione per la conduzione 1 elettrone

Densità = $2,7\ g/cm^3 = 27\ t/m^3$

Peso atomico = 27 $\rightarrow$ 1 mole = 27 g

Calcoliamo la concentrazione di elettroni liberi nell'Alluminio.

in un cm^3 ci sono $\frac{2,7}{27} = 0,1$ moli di Al e quindi ($N_{AV} = 6,023 \cdot 10^{23}$ mole/molecole)

in un cm^3 di Al ci sono $0,1 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} = 6,02 \cdot 10^{22}$ atomi di Al

Concentrazione di atomi di Al $= 6,02 \cdot 10^{22}\ cm^{-3} = 6,02 \cdot 10^{28}\ m^{-3}$

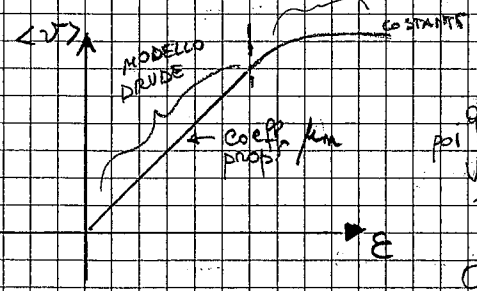
e quindi concentrazione di elettroni mobili per il calcolo della corrente $= n = 6,02 \cdot 10^{22}\ cm^{-3} = 6,02 \cdot 10^{28}\ m^{-3}$

C'è un altro parametro che caratterizza la capacità di condurre corrente in un materiale e dipende da quanto bene si muovono gli elettroni di conduzione in un mezzo.

NOBILITA' $= \mu_m = \frac{q}{m_0}\tau$ } Parametro che determina il calcolo della corrente (oltre alla concentrazione dei portatori)

$\left[\frac{m^2}{V \cdot s}\right]$ dimensionalmente

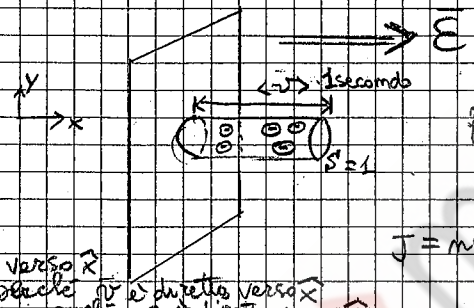
Gli elettroni si muovono in modo caotico e disordinato dovuto agli elettroni ogni τ subiscono degli urti, cambiando la loro traiettoria. Questo moto è un moto viscoso cioè applico una forza, in questo caso $\mathcal{E}$, la particella accelera poi siccome l'attrito è proporzionale alla velocità va un certo punto in poi la particella si muove con velocità costante.



OSS Per campi $\mathcal{E}$ molto grandi si ha un effetto di saturazione della velocità (COST)

$$l = \langle v_{th} \rangle \tau = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} \cdot \tau$$

CAMMINO LIBERO MEDIO cioè cammino che mediamente percorrono gli elettroni tra un urto ed il successivo.



Prendiamo una superficie S del nostro blocchetto e ci applichiamo un campo $\mathcal{E}$. Calcoliamo la corrente che attraversa la sezione S.

Prendo un cilindro con superficie unitaria e altezza uguale alla velocità media acquistata per mezzo del campo elettrico per un secondo. Questo significa che gli elettroni contenuti nel cilindro attraversano S in un secondo.

$J = n_{elettroni\ nel\ cilindro}(-q)$

$J = \underbrace{\langle v \rangle \cdot 1\,sec \cdot 1 \cdot n}_{\text{Volume} = \text{altezza} \cdot S} \cdot (-q)$

OSS. La velocità media ha stessa direzione di $\mathcal{E}$ ma verso opposto perché sono elettroni (carica negativa).

$$\langle v \rangle = -\mu_n \mathcal{E} \rightarrow J = -\mu_n \mathcal{E} n(-q) = nq\mu_n \mathcal{E}$$

DENSITÀ DI CORRENTE DI TRASCINAMENTO (DRIFT)

$$\bar{J} = q\mu_n n \bar{\mathcal{E}}$$

MA $\sigma = q\mu_n n$ ($\Omega^{-1} m^{-1}$) $\Rightarrow$ $\bar{J} = \sigma \bar{\mathcal{E}}$

σ: Conducibilità elettrica

es. Nell'Alluminio: $Al \rightarrow n = 0{,}02 \cdot 10^{22}\ cm^{-3}$ $\sigma = 35{,}46 \cdot 10^6\ \Omega^{-1} m^{-1}$ a $T = 300k$

$$\mu_m = \frac{q}{m_0}\tau \qquad \mu_m = 0{,}003658\ \frac{m^2}{Vs}$$

e quindi possiamo stimare il tempo medio degli urti $\tau = \frac{m_0}{q}\mu_m = 2{,}1 \cdot 10^{-14}\ s$

OSS. Variando la temperatura varia il tempo medio tra gli urti

Se scaldo il metallo, la velocità aumenta aumentano gli urti e quindi τ diminuisce e in generale la conducibilità del metallo diminuisce cioè aumenta la sua resistenza.

Come vedremo, τ è il tempo che limita la frequenza massima del funzionamento dei dispositivi elettronici.

equazione di S. indipendente dal tempo

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(x)+U(x)\psi(x)=E\psi(x)$$

$|\psi(x)|^2$ = densità di probabilità

una dimensione $-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi}{dx^2}+U(x)\psi=E\psi$

con $U=-qV(x)$

Supponiamo $U(x)=0$ cioè si è preso un potenziale di riferimento costante

$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi}{dx^2}-E\psi=0$ → eq. differenziale 2° ordine → $\psi(x)=Ae^{\alpha_1 x}+Be^{\alpha_2 x}$

$-\frac{\hbar^2}{2m}\alpha^2=E \rightarrow \alpha^2=-\frac{2mE}{\hbar^2} \rightarrow \alpha_{1,2}=\pm i\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$

Pongo $K=\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$ (dimensionalmente $\frac{1}{\text{lunghezza}}$) Allora $\psi(x)=Ae^{+ikx}+Be^{-ikx}$ (A, B da determinare con le cond. al contorno)

Questa combinazione di esponenziali complessi supponiamo scriverle come

$\psi(x)=C\sin(Kx+\Theta)$ ← monodimensionale (un'onda)

C da determinare con le cond. iniziali

VETTORE D'ONDA $K_x=\frac{2\pi}{\lambda}$ ← lunghezza d'onda che descrive la probabilità di trovare un elettrone

$K=\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$ → esplicito l'energia

$E=\frac{\hbar^2k^2}{2m}$

energia cinetica fisica classica $E=\frac{1}{2}mv^2=\frac{p^2}{2m}$

$p=mv \rightarrow p=\hbar k$

$E_{class}=E_{class} \Rightarrow \frac{p^2}{2m}=\frac{\hbar^2k^2}{2m}$

$\hbar=\frac{h}{2\pi}$

$p=\frac{h}{2\pi}\frac{2\pi}{\lambda}=\frac{h}{\lambda}$

$p=\frac{h}{\lambda}$ Cioè la lunghezza d'onda dell'elettrone è inversamente proporzionale alla sua quantità di moto. Quanto più p è elevata tanto più la sua lunghezza d'onda è piccola. Questa è una relazione fondamentale che permette di trovare, data la sua energia, la sua quantità di moto.

ELETTRONVOLT: è l'energia che acquista un elettrone o in generale una particella quando si è sposta tra due punti la cui differenza di potenziale è 1 Volt.

In altre parole se tra A e B c'è 1 Volt allora le forze del campo fanno un lavoro di un Joule per spostare un coulomb da A a B.

$V_{AB}=1V$

$1eV=1V\cdot q=1V\cdot 1{,}602\cdot 10^{-19}\ J$ ← è l'unità di misura dell'energia