



**Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1311

ANNO: 2014

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Marchisa

MATERIA: Scienza e Tecnologia dei Materiali Funzionali,  
Prof. Pavese

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

FUNZIONALI - 1<sup>A</sup> PARTE

MECCANICA QUANTISTICA

e FISICA dei SEMICONDUTTORI

UV - VISIBILE - INFRAROSSO

390

760 nm

Si può ottenere uno spettro di interferenza anche per gli elettroni.

La particella è simile ad un'onda quando attraversa la fenditura ma è simile a un corpuscolo quando incide sul rivelatore, in questo momento l'elettrone collassa → collasso della funzione onda.

La funzione d'onda rappresenta la probabilità di trovare l'elettrone in uno specifico punto. L'elettrone è un oggetto quantistico simile a un'onda e una particella a seconda del fenomeno che consideriamo ⇒ come la luce!

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x)$$

$$\psi = e^{i(kx - \omega t)}$$

### PRINCIPIO di INDETERMINAZIONE:

Ci sono grandezze che non possono essere misurate contemporaneamente con una precisione sopra un certo valore:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

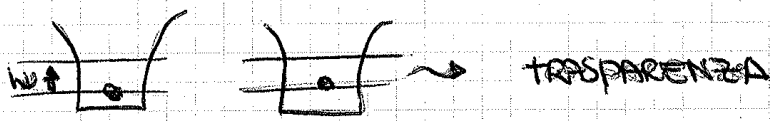
Nel moto della particella non esiste una traiettoria in senso classico.

Un oggetto quantistico o non ha posizione specifica o non ha una precisa quantità di moto.

Otteniamo informazioni solo da misure tecniche perché non possiamo determinare lo stato di un sistema.

↓  
posso forzare il passaggio mettendo una  
differenza di potenziale  $- \square +$   
in cui l'elettrone viene respinto e  
alzato verso destra, si accumula sulla  
barriera e potrebbe passare.

### TRANSIZIONI OTTICHE:



## 1.04 CLASSIFICAZIONE dei MATERIALI

- in base alle proprietà fisiche
- in base al legame chimico
- in base al campo d'uso

### IN BASE AL LEGAME CHIMICO:

→ debolmente legati

- METALLI:
  - pos di elettroni liberi → portatori liberi (conduz elettrica/termica)
  - legame metallico non direzionale (covalente in cui cambia la delocalizzazione)
  - strutture ad alto impacchettamento
  - bassa coesione →  $T_{fus}$  bassa → plastico → morbido
- COVALENTI:
  - doppietto elettronico condiviso
  - legame da orbitale ibrido → direzionale
  - struttura a basso impacchettamento con simmetria dell'ibrido
  - alta energia di legame → duro/fragile →  $T_{fus}$  alta
  - medio/alto gap di energia → semiconduttori
- METALLI di transizione:
  - metallo + covalente
  - alta energia di legame → duro →  $T_{fus}$  alta
  - elettroni liberi → conduzione
  - gli elettroni d sono facilmente allontanati e danno proprietà magnetiche
- IONICI:
  - coesione del doppietto elettronico → interazione coulombiana tra ioni
  - legami non direzionali → alto impacchettamento
  - media en. di legame → fragili
  - no elettroni liberi → isolanti
- MOLECOLARI:
  - legami dipolari di tipo Van der Waals; legame covalente nella molecola ma deboli tra le molecole
  - legami direzionali → strutture complesse
  - bassa en. di legame →  $T_{fus}$  basse → cristalli
  - molecole separate → isolanti

Per la classificazione si sfruttano due proprietà:

- energia di legame medio: profondità della buca (più è profondo, più l'elettrone è libero)
- ionicità

e si crea un triangolo.

# 1.06 I MATERIALI SEMICONDUCTORI

- Proprietà elettriche dei semiconduttori:
- Resistività elettrica intermedia
  - Coefficiente termico alla resistività negativo
  - Conduttività elettrica n o p, dipende dal drogante
  - Formazione di giunzioni elettriche p-n.

Le semiconduttori hanno una conducibilità elettrica intermedia e aumentano la conducibilità con la temperatura.

Le proprietà elettriche di conduzione dipendono dalla presenza di droganti, anche in concentrazioni molto basse (ppm).

La bipolarità elettroni-lacune permette il lavoramento di giunzioni elettriche pn.

I semiconduttori sono materiali COVALENTI: la simmetria del materiale segue la simmetria dell'ibrido  $sp^3$  (4 legami diretti ai vertici di un tetraedro  $\rightarrow$  ogni atomo è circondato da 6)

Il solido covalente galleggia sul suo fuso perché è una struttura a basso impacchettamento.

Il legame covalente è direzionale con n. di coordinazione  $\leq 4$ ; il legame è forte e dona alta T di fusione ma durezza e fragilità. Se fossero molto puri sarebbero isolanti, ma per fortuna sono facilmente drogabili.

Il gap energetico controlla il comportamento elettrico e ottico.

Cerco di utilizzare un materiale con componente ionica più bassa possibile (+ ionicità = + en. per muovere le dislocazioni).

I SEMICONDUCTORI sono formati da elementi vicini alla linea dei metalli. Sono classificabili in famiglie in base a quale colonna della tavola periodica appartengono gli elementi:

IV ; III V ; II VI ; I VII ;    IV VI ; III VI ;    I III VI<sub>2</sub>; ecc

↓                    ↓

Si, Ge            GaAs

hanno legami non leganti che catturano elettroni in più

Esistono anche SEMICONDUCTORI IONICI: ossidi pieni di difetti. Questi composti presentano un'elevata conduttività elettrica, rispetto

# cp1.07 L'ELETTRONE LIBERO

In un MONOCRISTALLO l'elettrone si comporta come in un solido periodico con una buca di atomi perché tutti gli atomi hanno una dell'unità<sup>a</sup> posizione e posso considerarlo come una grande molecola.

Si crea una struttura a bande per calcolare le mode degli elettroni e le loro interazioni con gli atomi del solido.

Il solido è come un'enorme buca di potenziale grande come il cristallo.

Il cristallo poi è costituito da celle elementari ripetitive e l'elettrone si può muovere su tutte queste.

Le bande derivano da orbitali atomici e molecolari legati e entreligati.

L'elettrone si muove libero con  $v$  costante e quantità di moto  $p = mv$ .

L'onda associata avrà  $\lambda = h/p$ .

Il vettore d'onda  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  per cui  $p = \hbar k$

L'energia cinetica sarà  $E_c = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$

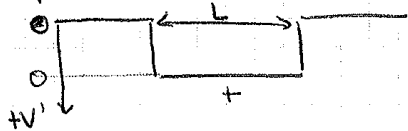
L'elettrone nel solido interagisce con tutti i nuclei, grazie alla sua massa efficace  $m^*$  diversa da quella che ha nel vuoto.

Si prende un metallo, si estraggono gli elettroni di valenza, la carica degli ioni positivi fissi genera una buca di potenziale.



I livelli energetici sono calcolabili con la buca di potenziale finita.

Se come  $L$  è grande, all'interno della buca l'elettrone si muove come un'onda piana con fase entrante e uscente uguali.  $\psi(0) = \psi(L)$



L'elettrone libero è un'onda con funzione  $\psi = e^{ikx}$  con  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = n \frac{2\pi}{L}$  con  $k_0 = \frac{2\pi}{L} \rightarrow$  quantizzazione di  $k$  vettore d'onda  $= n k_0$

La DENSITÀ degli STATI  $D(E)$  definisce il numero di stati permissi agli elettroni per unità di volume e intervallo di energia.

$$D(E) = \underbrace{2}_{\text{spin}} \frac{1}{V} \frac{\partial N}{\partial E} = \frac{2}{L^3} \frac{\partial N}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial E}$$

con  $N =$  numero degli stati possibili (non è detto che siano pieni)

In ogni stato posso mettere 2 elettroni con spin opposto.

Energia di Fermi: energia più esterna possibile.

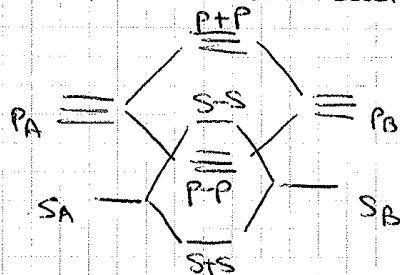


Dal centro, aumentando  $k$  arrivando al bordo zona da  $\lambda$  elettronica  
è tale da andare in diffrazione con il reticolo, e l'onda non può  
propagarsi ed è stazionaria.

Non hanno senso  $k$  fuori dalla prima zona di Brillouin

! un'onda è definita tramite il vettore d'onda  $k = 2\pi/\lambda$

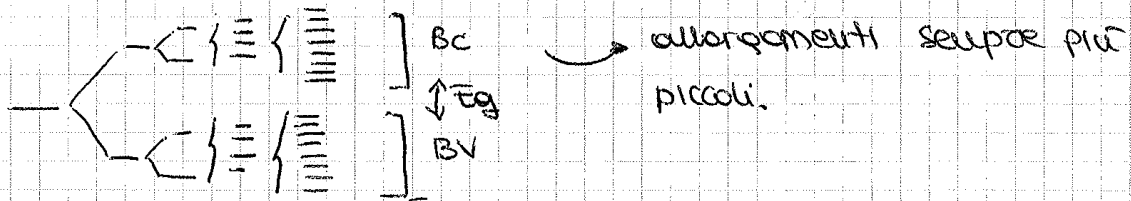
Quando gli atomi si avvicinano i potenziali si sommano e gli elettroni possono ruotare intorno a entrambi su un orbitale molecolare. L'orbitale  $S_A + S_B$  avrà energia minore degli S e quello  $S_A - S_B$  maggiore. Per i p invece sarà il contrario dato la loro forma. Si riempiranno i livelli dal basso, quindi s-s e p-p e l'energia di legame sarà quella necessaria per allontanare i due atomi e farli tornare agli orbitali atomici se p.



A e B covalenti  
orbitali dati da  $A \pm B$

In un cristallo ogni atomo risente dell'interazione con i propri vicini, ma questa diminuirà allontanandosi dall'atomo considerato.

Se si combinano gli orbitali di due atomi vicini si ottengono due orbitali bicentrici, uno legante e uno antilegante, se questi vengono combinati con altri tetracentrici si ottengono altri orbitali: i livelli si allargano in un insieme detto Bande. I singoli livelli nelle bande sono molto vicini e la distanza tra le massime di una banda e le minime dell'altra è detto GAP.



In genere l'energia  $E=0$  corrisponde all'elettrone in superficie, fuori dal cristallo, ed è relativa all'ultima banda in alto.

In un cristallo avrà - 3 bande p leganti ( $v-u-z$ )

- 4 bande s antilegante
- 3 bande p leganti
- 4 bande s legante

Le bande piene sono dette bande di valenza BV e quelle vuote bande di conduzione BC, tra queste si trova il GAP.

Il valore del GAP caratterizza i diversi tipi di solidi e le loro proprietà fisiche:

- $E_g = 0 \Rightarrow$  metalli  $\rightarrow$  gli elettroni passano liberamente alla BC e conducono.

# CP-1.09 LE BANDE DI ENERGIA NEI SEMICONDUCTORI

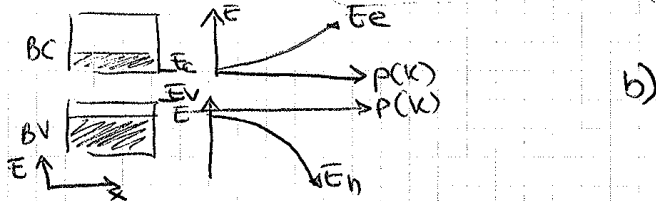
Un elettrone in BC è libero in presenza di un campo elettrico

acquista una quantità di moto  $p$ .  $E_{cin} = p^2/2m^*$   $E_e = E_{BC} + p^2/2m^*$

l'elettrone interagisce con il reticolo, quindi non sarà totalmente libero quindi me diventa  $m^*$  massa efficace elettronica.

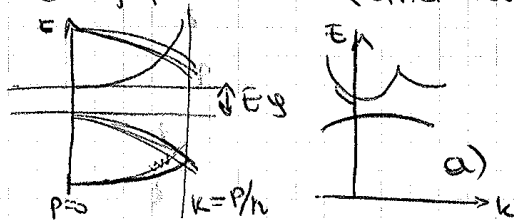
Se BV non è completa, si avrà moto delle lacune:  $E_{cin} = -p^2/2m_h^*$ ,

$E_h = E_{BV} - p^2/2m_h^*$  con  $p = h/\lambda = \hbar \cdot k$  e  $k = 2\pi/\lambda$



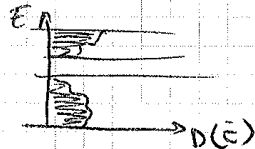
Per un semiconduttore le bande s'curvano curvatura positiva, quelle p negativa e le tze p a loro volta, curvatura massa efficace diversa.

In prossimità del gap si avrà quindi una deriva delle energie all'aumentare di  $k(p)$

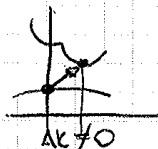
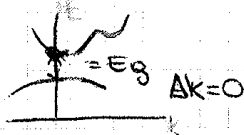


Esistono 3 modi per rappresentare la struttura a bande:

- a)  $E(k)$  - dispersione dell'energia in funzione di  $k$  ( $\uparrow$ )
- b)  $E(x)$  - andamento dell'energia nello spazio ( $\uparrow$ )
- c)  $D(E)$  - rappresenta il numero di stati possibili in un intervallo di energia



Il massimo della banda di valenza si ha sempre per  $k=0$ ; il minimo delle bande di conduzione si ha a  $k=0$  nei semiconduttori a gap diretto e a  $k \neq 0 = \pi/a$  per i semiconduttori a gap indiretto.



Solo con  $\Delta k=0$  sono permesse le transizioni ottiche poiché il fotone emesso o assorbito avrà  $E = E_g$

La presenza di minimi secondari porta a uno strano comportamento della velocità sotto campo elettrico applicato.

La presenza di un campo elettrico in china le bande con  $E = -eV$  e l'elettrone accelera fino a quando interagisce con il reticolo e cade sul fondo e poi ricomincia il suo moto. L'elettrone può

2<sup>a</sup> PARTE

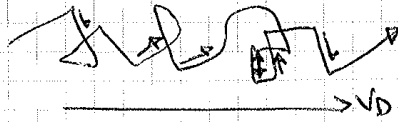
PROPRIETÀ dei MATERIALI  
FUNZIONALI

e LORO  
CARATTERIZZAZIONE

così si ha conduzione /

Se l'energia prodotta da un campo elettrico è sufficiente ad eccitare molti elettroni si parla di alta conducibilità.

La mobilità degli elettroni è definita dalla VELOCITÀ di DRIFT. Se applico un campo elettrico, l'elettore si muoverà prevalentemente in quella direzione ma con un movimento casuale.



Il fatto che l'elettore si sposti è conseguenza della mobilità: più si sposta più è alta la velocità.

In realtà l'elettore viaggia alla velocità della luce, ma mediamente si percepisce come cm/s.

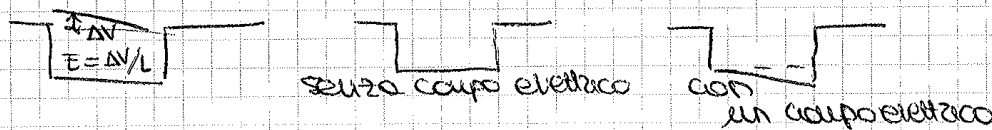
La forza che agisce sull'elettore è  $F = ma = -eE$

Nella realtà l'elettore non viaggia ~~sempre~~ seguendo un moto invariato a causa dei difetti cristallini, delle vibrazioni degli atomi, delle collisioni ecc, perdendo energia.

$v_D$  = velocità di spostamento medio dell'elettore calcolata sulla posizione medio e non su tutti i punti.

$$v_D = \underbrace{\mu_e}_{\text{mobilità elettronica}} \cdot E$$

L'elettore sta comunque in un campo di potenziale e le linee di potenziale non sono parallele perché c'è una differenza di potenziale.



La conducibilità elettrica è proporzionale al numero di elettroni liberi e alla loro mobilità:

$$\sigma = \underbrace{N_e}_{\text{Numero di e}^- \text{ liberi}} \underbrace{e}_{\text{carica elettrica}} \mu_e$$

$$N_e = \frac{N_{\text{avogadro}} \cdot \rho}{A_T}$$

Più va veloce l'elettore, più va veloce il dispositivo (frequenza massima del dispositivo) quindi la  $v_D$  è molto importante nei semiconduttori.

Le imperfezioni aumentano la resistività e possono essere:

- bordi di grano
- dislocazioni

Uno ione può muoversi per occupare una vacanza, quindi la conduzione può avvenire solo se il materiale presenta dei difetti (di Schottky o di Frenkel.)

**DIELETRICI:** con un campo elettrico polarizza il materiale. Al campo elettrico di base si sovrappone un campo elettrico di polarizzazione opposto (P).

$$n^2 = \epsilon_r = (1 + \chi)$$

carica per unità di area

$$\sigma = \epsilon_0 E \text{ nel vuoto}$$

$$\sigma = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi E = \epsilon_0 (1 + \chi) E$$

$$= \epsilon_0 \epsilon_r E$$

permittività nel vuoto relative

Polarizzazione

suscettività elettrica

$E = \frac{\sigma - P}{\epsilon_0}$   $P \propto E \rightarrow$  Per ottenere lo stesso campo E devo avere più carica, cioè  $\sigma$  deve essere maggiore.

Un dipolo elettrico può ruotare per seguire il campo elettrico e la rotazione si definisce come polarità (P) che dice quanto si polarizza il materiale in un campo E.

Questo avviene solo negli isolanti perché in un conduttore o un semiconduttore il modello di prima non va bene perché gli elettroni che si muovono annullerebbero le cariche.

In un isolante, con applicazione di un campo elettrico, le specie positive ruotano verso l'elettrodo negativo e quelle ~~positive~~ <sup>negative</sup> verso l'elettrodo positivo creando un dipolo il cui momento è definito dalla

**POLARIZZABILITÀ (P)** POLARITÀ - ANGOLO POLARIZZABILITÀ - MOMENTO del DIPOLO

La polarizzabilità può avvenire sui: elettroni, molecole o ioni.

$P \propto E$   $P = \alpha E$   $\alpha$  è un coefficiente che tiene conto di tutte le percentuali di polarizzabilità elettronico, ionico, dipolare e di spazio. <sup>orientamento molecole</sup> <sup>spazio</sup> <sup>carica</sup>

Il riordinamento dei dipoli è caratterizzato da un tempo  $\tau$  di rilassamento che dipende dai vari contributi di polarizzabilità.

l'allineamento dei dipoli può venir disturbato dal movimento termico che tende a mischiare le orientazioni dei dipoli.

La polarizzabilità della molecola è dipendente dalla frequenza.

La frequenza mostra la funzione complessa composta da un termine reale e da uno immaginario che corrispondono rispettivamente alla componente in fase e a quella non in fase della <sup>risposta alla</sup> <sup>frequenza</sup> nel mezzo. La prima indica la dispersione e la seconda l'assorbimento.

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega)$$

Quando il tempo di rilassamento è più veloce della frequenza del campo elettrico, la polarizzazione avviene istantaneamente.

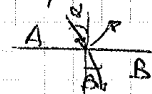
## MP2.03 PROPRIETÀ OTTICHE

Aumentando  $E = h\nu$  si passa da una polarizzazione statica, a vibrazioni reticolari, a transizioni tra livelli atomici molecolari, all'elettone che subisce una transizione di banda e infine che viaggia libero per poi diventare plasma.

A basse energie le fotone può interagire con la materia e con i fononi. Alla frequenza di plasma i metalli incominciano ad essere trasparenti all'ultravioletto.

COSTANTE DIELETTRICA: dipende dalla polarizzazione.  $\epsilon$   
Può essere elettrico, ionico o metallico.

INDICE DI RIFRAZIONE:  $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r}$   
dove l'elettone va più lento, e l'elettone sarà meno polarizzato

$$n_A \sin \alpha = n_B \sin \beta$$


COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO: non è assoluto e dipende dalle transizioni elettroniche.

$$\alpha \propto E \propto JDS$$

prob. di transizione      numero di transizioni possibili

RIFLETTIVITÀ:  $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \Rightarrow$  riflessione ad ogni interfaccia nel caso di più interfacce

DISPERSIONE:  $\lambda = \frac{hc}{E}$        $D = \frac{dn}{d\lambda} < 0$       

BIRIFRANGENZA: ?

4 colori dipendono dagli elettroni 3D, cioè dagli elementi di transizione.

- metalli  $\rightarrow$  riflettenti (e) colorati)
- ionici  $\rightarrow$  trasparenti o colorati (se ci sono d)
- covalenti  $\rightarrow$  riflettenti - colorati - trasparenti dipende dall' $E_g$
- molecolare  $\rightarrow$  colore della molecola.

TRASPARENTE: la deviazione della luce è costante in tutti i punti.

BIANCO: luce rimessa completamente = trasparenza + scattering.

4e colore è una percezione.

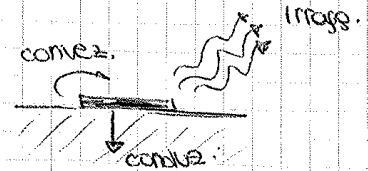
La presenza di legami direzionali come negli ioni di transizione crea un fenomeno di SPLITTING e l'energia degli



## MP 2.04 PROPRIETÀ TERMICHE

Lo scambio del calore avviene per:

- convezione
- conduzione
- irraggiamento



Nei solidi avviene principalmente per conduzione.

L'asportazione di calore richiede materiali con buona conducibilità termica.

**CONDUZIONE:** è il flusso di calore in un solido, è analogo al trasporto di elettroni, ma con forza spingente  $T$  e non  $V$ .

**IRRAGGIAMENTO:** è la perdita di energia tramite emissione di radiazione elettromagnetica.

**CONVEZIONE:** è il trasporto di calore lontano dal materiale tramite liquidi o gas.

### PROPRIETÀ TERMICHE:

#### ● CALORE SPECIFICO

Il calore specifico è la quantità di calore contenuto nel materiale ed è una grandezza termodinamica.

$$C_p - C_v = nR \quad \text{per gas ideali}$$

$$C_p - C_v = T \alpha^2 / \beta \rho \quad \text{per solidi}$$

Tutti i materiali termici solidi hanno la stessa capacità termica per la legge di DULONG-PETIT:  $C_v = \frac{C_p}{\rho} = 3R \sim 25 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$

Questa legge vale solo <sup>sopra</sup> ~~sotto~~ la temperatura di Debye, cioè quando  $C_v \sim 96\%$  di  $3R$ .

Questo succede perché possiamo considerare il materiale come costituito da atomi che si comportano da oscillatori armonici, vibrando nel loro reticolo, con  $E = kT$  e calcolata l'energia in modo tridimensionale per una mole:  $E = 3NkT$

$$C_v = \frac{dE}{dT} = 3Nk = 3R = 24,9 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \Rightarrow \text{non dipende da } T$$

Ma questo non è completamente giusto.

Einstein individua i fononi: la vibrazione e la sua energia sono quantizzate. Tramite la quantizzazione si possono emettere  $n$  vibrazioni che aumentano all'aumentare della  $T$ .

Le onde generate possono essere longitudinali ( $\rightarrow$ ) o trasversali ( $\uparrow$ ), ottiche ( $\uparrow\uparrow$ ) o acustiche ( $\text{W}\uparrow - \rightarrow\rightarrow\rightarrow$ ).

All'aumentare della  $T$ , aumentano i fononi, non la loro energia come succedeva per gli elettroni



- Per aumentare la conducibilità:
- fornire più elettroni perché conducono meglio il calore rispetto ai fononi
  - avere grani cristallini perché le posizioni irregolari degli atomi generano scattering e perdita di energia
  - no bordi grano che generano scattering\*
  - no pori perché l'aria non è un conduttore

Metalli - ceramici - Polimeri → -  $\alpha$

### • DIFFUSIVITÀ TERMICA

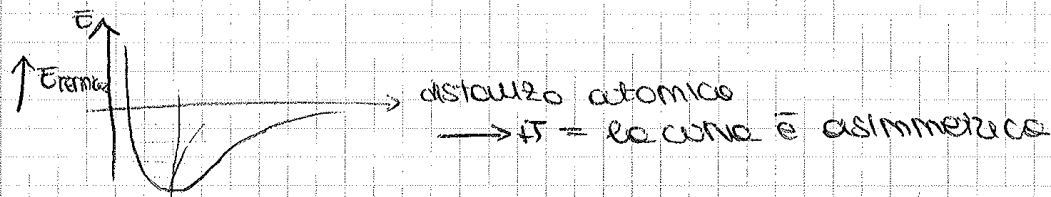
La diffusività termica è una misura della velocità di trasmissione del calore in un solido (da una parte all'altra)

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \frac{m^2}{s}$$

Si può misurare tramite flash.

### • ESPANSIONE TERMICA

La maggior parte dei materiali si espande all'aumentare della  $T$ , perché vibrando, gli atomi si muovono e si allontanano tra loro



$$\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T} \frac{1}{L} \frac{1}{K}$$

Polimeri - Metalluri - ceramici → -  $\alpha$

- INVAR è la più bassa espansione termica.  $\alpha = 95 - 2 \cdot 10^{-6} / K$
- espansione termica negativa per le fibre.

### • TEMPERATURA di FUSIONE

Non si può usare il materiale sopra la sua  $T_{fus}$

### • RESISTENZA AGLI SHOCK TERMICI

$$R_T = \frac{k \sigma_T (1 - \nu)}{\alpha E}$$

- Dipende da:
- stress termico di espansione / contrazione del d.o
  - gradienti di temperatura che inducono variazioni di dimensioni
  - riscaldamento / raffreddamento non uniforme

### • COMPATIBILITÀ alle INTERFACCIE

Alle interfacce di due materiali diversi, con diversa espansione

## MP 2.05 PROPRIETÀ MAGNETICHE

Un DIPOLO MAGNETICO interagisce con il campo magnetico e tende a ruotare secondo la sua direzione.

### CAMPO MAGNETICO: $B$

la densità delle linee <sup>di flusso (campo)</sup> determina la forza dei poli magnetici e ne indica la direzione:  $B = \Phi/A$  maggiore è la densità, maggiore è la forza.

Dentro un materiale possono esserci dei dipoli magnetici che possono organizzarsi o meno portando ad avere un momento MAGNETICO  $m$  dell'intero detto magnetizzante. Un dipolo magnetico in un campo magnetico genera un momento torcente  $T = mB \sin \theta$

Materiali con un momento magnetico dell'intero sono magnetizzati. la magnetizzazione è il momento magnetico per unità di volume. e dipende dal numero di dipoli magnetici, la loro magnetizzazione e organizzazione.

Se non c'è risposta magnetica il materiale è diamagnetico e il materiale non perturba le linee di campo.

Materiali magnetici concentrano (schiacciano) le linee di flusso.  
 I superconduttori espellono le linee di flusso.

La densità di flusso <sup>all'interno</sup> del materiale è determinata da:

- geometria del materiale

$$B = \mu_0 (H + M) \text{ Tesla} \quad B \neq \text{campo magnetico applicato}$$

$$= \mu_0 \mu_r H$$

$$\mu_r \text{ permeabilità relativa} = 1 + M/H = 1 + \chi$$

$H$  forza del campo magnetico (campo magnetizzante)

$M$  = magnetizzazione

suscettività magnetica

Materiali sono considerati  $\chi$  diversi, se  $\chi < 10^{-3}$  allora non sono magnetici.

Materiali diamagnetici non sono magnetizzabili.

Materiali paramagnetici non sono ordinabili.

Materiali ferromagnetici si orientano e i momenti sono tutti paralleli lungo la direzione del campo magnetico.

## MP 2.06 SUPERCONDUTTIVITÀ

Un materiale superconduttore ha resistenza nulla: per una tensione minima ha una corrente infinita.

I materiali superconduttori sono ricavati da tratti alterati di, di cui quello di  $\text{CuO}$  è quello superconduttore.

?

Si può anche avere una sostituzione isoelettronica creando uno gap a gap intermedio ( $D^N$ )

Azoto e ossigeno sono troppo elettonegativi per essere usati come dopanti sostituzionali.

La CONDUCIBILITÀ ELETTRICA dipende dalla concentrazione di portatori liberi e dalla loro mobilità:  $\sigma = qn\mu = q^2 n \tau / m^*$

carica      n° di elettroni      tempo di rilassamento tra due urti

I portatori (elettroni liberi di massa  $m^*$ ) muovo nel loro moto urtano casualmente contro centri di scattering nel cristallo a distanza di un tempo  $\tau$ . Applicando un campo elettrico  $a = qE/m^*$  e  $\langle v \rangle = qE/m^* = \mu E$

Il flusso di corrente  $J = \sigma E = qn\mu E$

Regola di Matthiessen:  $1/\tau_{tot} = \sum_i 1/\tau_i \rightarrow$  velocità in parallelo.

Modello cinetico:  $1/\tau = S V_D C$

sezione d'urto       $V_D$       concentrazione centri di scattering  
 ↓  
 v. degli elettroni.  $V_D = \langle v \rangle$  non è media!

Lo scattering può derivare da:

- + impurezze ionizzate: presenza di ioni estranei (crea attrazione/repulsione)
- + fononi ottici: atomi che si muovono per effetto termico ( $+T = +$  influenza delle impurezze)
- impurezze neutre ( $+T = +$  portatori)
- difetti strutturali
- fononi acustici
- piezoelettrico
- elettrone contro elettrone

La velocità dei portatori cambia in funzione del materiale e del campo elettrico applicato.

Se si considera la conducibilità elettrica come dovuta ad un gas di portatori liberi si può applicare la teoria cinetica del gas.

$$\mu = \frac{q}{m^* S V_D C} \quad V_D \propto \sqrt{kT} \quad C \propto T \quad \mu_p \propto n T^{3/2}$$

La mobilità dei portatori  $\mu = \frac{q}{m^* E}$  è funzione della temperatura e della concentrazione di loro presenti.

Più è alta la % di drogante, più ci saranno centri di scattering e la mobilità diminuirà. Quindi la mobilità sarà maggiore a bassa  $T$  e a basso drogaggio.

La misura elettrica più comune è la misura della resistività diretta o indiretta (a 4 pinne), si misura quindi la conducibilità  $\sigma = qn\mu$

## 2.08 GIUNZIONE Pn

Una giunzione è un contatto tra un semiconduttore n con una p. All'interfaccia elettronica le lacune (p) si annichilano formando da una zona di svuotamento di cariche mobili, scoprendo le cariche fisse dei dopanti. Nella zona n ci sarà una zona positiva e in quella p una negativa che tendono a ricombinarsi  $e^- + h^+ \rightarrow 0$  creando un dipolo. ~~Il campo elettrico generato impedirà l'ulteriore diffusione di elettroni verso la zona p e di lacune verso la zona n.~~

La parte n avrà il livello di Fermi negli strati bassi di BC, mentre quella p negli strati alti della BV, la loro differenza è circa uguale all' $E_g$  e significa che il materiale non è in equilibrio, le due parti si uniranno in modo da ~~mantenere costante  $E_F$~~ . Gli elettroni n si spostano in p caricando negativamente l'interfaccia e positivamente nella n creando un potenziale elettrostatico che sposta verso potenziali positivi la zona n e negativi la zona p.



La struttura a bande lontano dall'interfaccia è piana ma a due livelli diversi, nella zona n è più positivo (più basso) e nella zona p più negativo, il raddoppio all'interfaccia è parabolico.

All'interfaccia tra la zona n e la zona p si forma una zona di svuotamento a causa della diffusione ed annichilazione degli elettroni con le lacune.

Nella zona n c'è una carica positiva a concentrazione  $[q] = en$  e in quella p  $[q] = ep$ . Per la neutralità si deve avere  $n \cdot n_A = p \cdot p_A$

La carica elettrica genera un campo elettrico  $\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon}$   $\left\{ \begin{array}{l} E = en \cdot x / \epsilon \\ E = e(n \cdot n_A - p \cdot p_A) / \epsilon \end{array} \right.$   
 Il campo elettrico alla giunzione genera un potenziale:

$$- \frac{dV}{dx} = E \quad \left\{ \begin{array}{l} -V = enx^2 / 2\epsilon \\ -V = -V_p - epz^2 / 2\epsilon \end{array} \right.$$

La larghezza di svuotamento è inversamente proporzionale alla concentrazione dei portatori liberi (doping)

Avendo cariche separate, la giunzione avrà anche una capacità.

Si ha la conduttore libera degli elettroni.

~~Barriera~~ ~~inversamente~~ aumenta la barriera e non possono più elettroni

CONTATTO OHMICO: processo di formazione della lega metallica  
resistenza

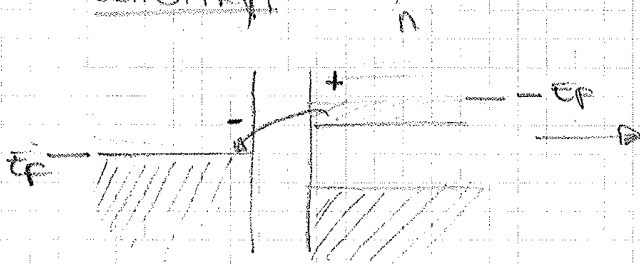
◦ Semiconduttore a piccolo  $E_g$  e fortemente drogato

a) Si crea una barriera di potenziale triangolare attraverso cui gli elettroni possono passare per effetto tunnel.

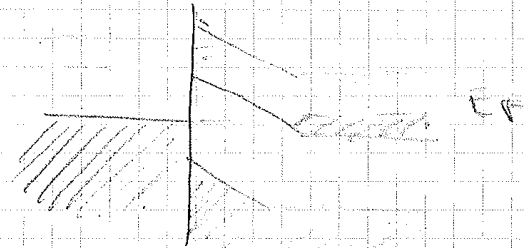
◦ Se il metallo e il semiconduttore interagiscono formando composti intermetallici, la struttura a

b) bande viene deformata. Se lo spessore della zona resistiva è maggiore di quello della zona di svuotamento il contatto sarà resistivo.

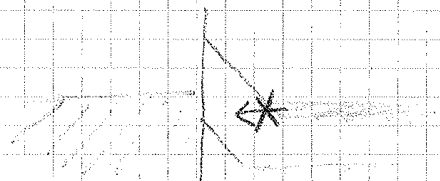
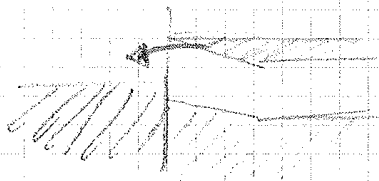
SCHOTTKY:



polarizz. diretta ↓ ↑

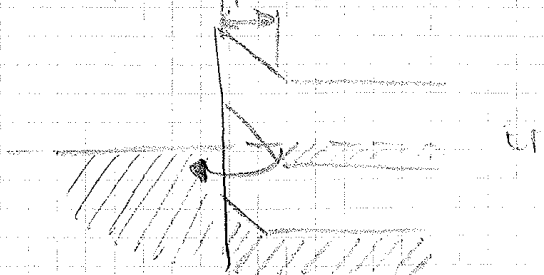


polarizz. inversa ↑ ↓



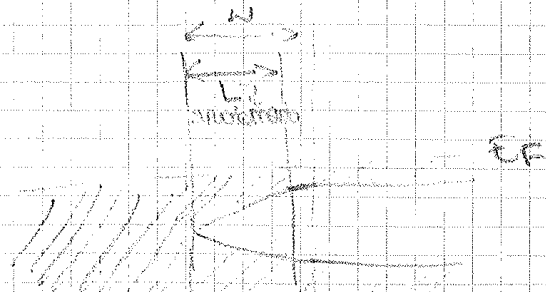
OHMICO:

piccolo = molto drogato



si con polarizz. diretta che inversa

a)



interm. reag.  $h\nu$

b)



equilibrio nelle bande, ma in disequilibrio tra le due bande.

Il portatore tra le due bande tendono a ritornare in equilibrio ricombinandosi ed emettono.  
 Il tempo dipende dal gap.

La fosforescenza è legata a questo meccanismo: i fotoni hanno eccitato ad altri livelli più elettroni, ma questi hanno bisogno di tempo per scendere emettendo luce.

Sono possibili diverse transizioni:

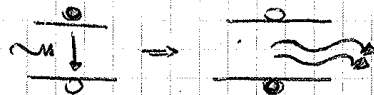
- **ASSORBIMENTO**: un fotone eccita un elettrone e lo fa passare in BC



- **EMISSIONE SPONTANEA**: un elettrone eccitato decade emettendo un fotone.

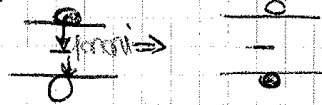


- **EMISSIONE STIMOLATA**: quando passa un fotone e l'elettrone decade, e decade copiando il fotone che l'ha eccitato, ottenendo due fotoni indistinguibili (per questo la luce laser è stimolata)

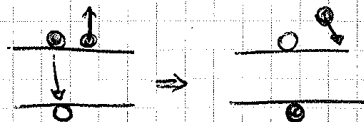


- **RICOMBINAZIONE DI TRAPPOLE**: se c'è un livello dentro il gap, l'elettrone si ferma nel gap e la lacuna si ricombina. queste transizioni non sono ottiche ma termiche (fononiche).

È una ricombinazione non radiativa tramite trappole: dipende tutto dalla quantità di trappole e di portatori.



- **RICOMBINAZIONE AUGER**: un elettrone eccitato si ricombina con una lacuna in BV, l'energia non viene emessa ma trasmessa e utilizzata da un altro elettrone in BC.



Il fotone può far saltar su o giù l'elettrone, dipende dalla quantità di elettroni nelle bande: se più elettroni sono maggiori in BC scendono, se sono maggiori in BV scenderanno.

L'emissione stimolata non può avvenire in un sistema in equilibrio termodinamico: questo prevede  $E_{BV} > E_{BC}$ .

Dato che tutta la luce emessa deve essere coerente, parte della luce deve rimanere dentro il dispositivo in modo che sia sempre lo stesso fotone a indurre l'emissione stimolata  $\rightarrow$  riflessione tramite specchi.

Il laser è una struttura epitassiale composta da una giunzione pn separata da uno strato di attivo, sopra un substrato.

Nel materiale attivo debb'essere confinamento elettronico per non far perdere gli elettroni da p a n e le lacune da n a p.

p fornirà gli elettroni e n le lacune, questi si fermeranno nello strato attivo ricombinandosi ed emettendo.

Il materiale attivo ha gap più piccolo rispetto agli altri, in base al suo energy gap emette un certo colore.

Il materiale attivo giunge da bocca non drapata, non ha portatori suoi.

Il diodo è polarizzato direttamente ed emette parallelamente al lato lungo delle due facce opposte. L'inversione di <sup>popolazione</sup> polarizzazione è ottenuta dall'iniezione di corrente che incrementa la concentrazione di elettroni e lacune nell'attivo.

A basse correnti il diodo emetterà in modo spontaneo funzionando come LED, oltre una corrente di soglia inizierà l'emissione laser. L'indice di rifrazione è inversamente proporzionale all' $E_g$  quindi l'eterogiunzione funziona anche da confinamento ottico: l'attivo essendo circondato da  $E_g$  maggiori funziona da guida ottica.

~~Lo strato attivo è anche un confinamento elettrico e permette di raggiungere l'inversione di <sup>popolazione</sup> polarizzazione quando i propri livelli di Fermi delle bande sono separati da una energia maggiore di quella del gap dell'attivo.~~

### RIELETTORI PIN:

Un fotone di energia poco maggiore al gap viene assorbito dal semiconduttore. I portatori si termalizzano, diffondono si ricombinano generando fotoni non in fase che si trasformano in calore.

### RIELETTORE APD: diodo pn fortemente polarizzato inversamente.

Un fotone assorbito genera un elettrone e una lacuna nella zona di svuotamento, questi vengono accelerati dal campo elettrico e urtando possono ionizzare le reticoli.



L'eteroconfinazione è spesso usata come barriera di confinamento elettrico per la diffusione del portatore.

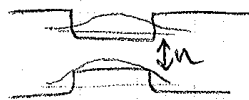
~~elettroni~~

~~lacune~~

I salti tra le due BC o le due BV sono detti spike, ed essendo molto piccoli, se il materiale è fortemente drogato, lasciano passare attraverso gli elettroni.

Gli elettroni confinati in uno spike sotto l' $E_F$  in BC si comportano come un gas bidimensionale estremamente mobile.

Se un semiconduttore a gap piccolo è inserito tra due semiconduttori a gap più ampio, le discontinuità di banda formano delle buche di potenziale, e le energie degli elettroni saranno quindi quantizzate. Si dice quindi che il materiale origina una buca quantistica detta quantum well, una buca di potenziale



$$h < \lambda$$

Si può sfruttare questa proprietà nei laser, per avere una efficienza più alta, soglie più basse e sentire meno dell'aumento di  $T$  siccome il QW è molto sottile in confronto alla lunghezza d'onda della luce viaggiante nello stato attivo, il confinamento ottico su di esso è estremamente piccolo.

Aumentando la buca di potenziale i livelli aumentano e la loro distanza diminuisce.

I portatori nel QW si possono muovere solo su due dimensioni: lungo  $x$  e lungo  $y$ ; la densità degli stati sarà quindi diversa dai semiconduttori massivi, seguirà una funzione a gradini in cui le prime sono nullo.

Un elettrone in BC si ~~com~~ e una lacuna in BV si auteggiano fino a ricombinarsi; prima però si notano inteso formando uno pseudo-attino tipo idrogenoide detto eccitone. Normalmente gli eccitoni in un materiale massivo vivono un tempo piccolissimo e sono visibili solo a  $T$  basse. Nel QW ho fatto una dimensione e quindi riesco a vedere l'eccitone anche a  $T$  amb, poiché la buca di potenziale confina i portatori e rende più difficile la loro dissociazione.

## 2.11 PROPRIETÀ CRISTALLOGRAFICHE

• **SIMMETRIA:** facendo una qualsiasi operazione sul materiale ottenuto sempre la stessa sezione cristallina.

Sono possibili diverse simmetrie: tetraedrica, cuboicentrica, rotazionale, ecc.

Tipi di simmetrie:

- traslazionale: le immagini sono sovrapponibili
- a specchio: i due oggetti non sono congruenti e quindi non sono sovrapponibili, neanche con possibili rotazioni del piano.

Nella simmetria traslazionale ogni punto del reticolo è raggiungibile con un numero di passi  $\tau_1$  e  $\tau_2$  (verticale e orizzontale)

Esistono 5 modi per creare un reticolo in due dimensioni:

- reticolo con sola simmetria traslazionale
- reticolo rettangolare
- reticolo rombico = rettangolo centrato ( $a=b$ )
- triangolare ( $a=b; \theta=60^\circ$ )
- quadrato

passo ricorrendo tutti al primo cambiando solo l'origine degli assi.

Sono in presenza di simmetria rotazionale quando noto l'oggetto di certi angoli e non mi accorgo di averlo fatto  $\alpha = \frac{2\pi}{n}$

Solo alcuni punti sono compatibili sia con la rotazione sia con la traslazione.

Esiste un numero ben preciso di rotazioni che vengono dette identificate:

- $360^\circ$
- $180^\circ$  di due
- $120^\circ$  tripla
- $90^\circ$  tetrapla
- $60^\circ$  esagonale esapla

Alcune operazioni di simmetria sono compatibili con la traslazione (specchio - 2/3/4/6 rotazione - traslazione), altre no

Nella simmetria a specchio c'è un piano sul quale l'oggetto rimane invariato.

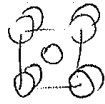
Traslando un elemento simmetrico genero un ulteriore piano di simmetria a specchio e quindi un ulteriore tipo di simmetria. Esiste una trattazione matematica della simmetria, cambiando operatore di simmetria posso generarne altri.  $\square$

Nella cella primitiva vengono definiti i parametri reticolari: le direzioni e i piani cristallini sono indicate dagli indici di Miller. Si può anche definire uno spazio interplare costante per ogni reticolo la distanza interplare dipende dai seni e coseni direttori. Associate alle famiglie di piani cristallini abbiamo le direzioni cristallografiche (perpendicolari alla famiglia di piani).

La base quindi è un numero minimo di atomi che può venire ripetuto per traslazione sul reticolo.

I principali metalli hanno sia CCC che CFC che FC.

CCC: numero di coordinazione 8



CFC: numero di coordinazione 12



FC: numero di coordinazione 12

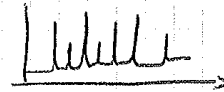


Un reticolo reciproco è un'automato di vedere un reticolo cristallino ed è usato per studiare la diffrazione.

10HE

Tipi di spettri raggi x:

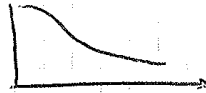
- solido cristallino: - periodicità
- interferenza cristallina



- liquido o solido amorfo:



- gas monoatomico:



più atomi si ordinano

La teoria della diffrazione è una teoria cinematica: è una approssimazione perché non tiene conto degli scambi di energia. La teoria cinematica classica è valida solo per cristalli di piccole dimensioni.

Il reticolo reciproco nota esattamente come il cristallo.  
La sfera di Ewald ci aiuta a visualizzare l'esperimento di diffrazione.

Il reticolo reciproco spiega meglio la diffrazione, per questo scelgo di sostituirlo a quello reale.

Il reticolo reciproco spiega meglio alcune cose allo stato solido per i semiconduttori.

Se nessun nodo interseca la sfera, non c'è diffrazione, quando un nodo interseca la sfera ha interferenza costruttiva.

La soluzione dell'equazione di Bragg avviene in un intervallo perché il nodo ha una sua locura, non è puntiforme.

Non meno che il campione nota attorno al punto di incidenza, la sfera interseca i punti.

Ogni punto di incidenza disegnerebbe un picco sullo spettro.

La sfera ha raggio  $k = 1/\lambda$

Nel cristallo si trovano delle onde di densità elettronica dovute agli atomi.

Si utilizza il reticolo reciproco per visualizzare la densità elettronica all'interno del cristallo da trasformata di Fourier.

Prevede di convertire il reticolo diretto nel suo reciproco.

Quando un nodo del reticolo reciproco interseca la sfera c'è diffrazione. La sfera di Ewald è la risoluzione spaziale della legge di Bragg. Il nodo è un punto! Tiene conto dei difetti reticolari dei diversi piani in quel punto; quindi l'intersezione della sfera avviene in un intervallo.

Lo spettro di una diffrazione a raggi X può essere interpretato come la mappa del reticolo reciproco del cristallo.

Lo spettro ha dei picchi negli angoli in cui il reticolo ha intersecato la sfera.

L'angolo di diffrazione è dato in modo preciso, ma non ho informazioni sull'intensità del picco che dipende da molti fattori (es. scattering degli elettroni; tipo di cella; struttura; polarizzazione; forza di Lorentz;  $T$ , ecc.)

Le dislocazioni possono essere a spigolo (edge) o a vite (screw)

Le dislocazioni a spigolo hanno un maggior numero di celle superiori alla ~~linea~~ di dislocazione e un minor numero di celle inferiori, se la dislocazione è positiva, al contrario se è negativa.

In una configurazione 3D la linea di dislocazione si propaga all'interno. Il vettore di Burger è normale alla dislocazione e me la caratterizza in quanto è un fattore di chiusura attorno ad una zona difettiva.

Le dislocazioni hanno attorno a sé due zone di deformazione: una di compressione e una di tensione.

Le dislocazioni a spigolo seguono la regola della mano destra; il vettore di Burger sarà parallelo alla linea di dislocazione.

Si possono anche verificare dislocazioni miste, perturbando una zona intera. In questo caso il vettore di Burger si divide in componente vite e componente spigolo.

Le dislocazioni hanno bisogno di energia sia per nascere, sia per attivarsi e muoversi.

La presenza di dislocazioni distorce i legami e costa energia al cristallo.

Le dislocazioni possono formare delle combinazioni, si possono chiudere ad anello (loop) creando dei gruppi di dislocazioni.

Il movimento delle dislocazioni è graduale, un punto alla volta. Il moto può essere conservativo o non conservativo: (su un piano; salita di piani). Il moto non conservativo è molto importante per i dispositivi opto-elettronici: questi dispositivi sono a più strati e la dislocazione può salire fino ad intercettare lo strato attivo, coprendone le gap e formando dei centri di ricombinazione non radiativi.

l'energia viene dimezzata se spacco in due la dislocazione creando dislocazioni parziali.

Le dislocazioni si possono mettere a piccolo gruppo impilandosi.

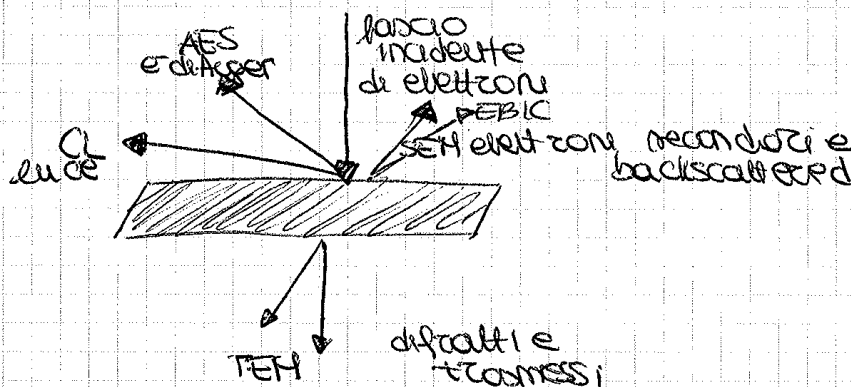
Si possono formare quando ci sono parecchie dislocazioni messe in movimento, questo impilamento crea la poligonizzazione creando un difetto visivo nel materiale.

## 2.18 CARATTERIZZAZIONE dei DIFETTI STRUTTURALI

**CATODOLUMINESCENZA:** analisi non distruttiva delle impurità e dei difetti e la loro distribuzione nei semiconduttori e nei materiali a risoluzione laterale che genera luminescenza (gap diretto)

**EBIC:** solo per i semiconduttori.

Applicando un voltaggio si genera una coppia elettrone-lacuna, che genera una corrente e quindi un segnale che compone un'immagine che mostra difetti e dislocazioni.



Nell'EBIC se ho difetti auto, un cambiamento del campo. Utilizza i processi del SEM.

Il TEM permette: - diretta osservazione delle dislocazioni  
- raccogliere differenti intensità dei raggi X scatterati nelle zone con difetti.

I raggi X permettono un'osservazione diretta delle dislocazioni nel cristallo. Il contrasto è ottenuto mettendo un detector in una posizione fissa che riceve gli elettroni scatterati dai difetti.

- alta risoluzione
- solo con raggi X
- determina vettore di Burgers



intropolati nelle pareti

e) perdite reali per orecchie o saldature

f) perdite virtuali: c'è un difetto che accumula atomi di gas.

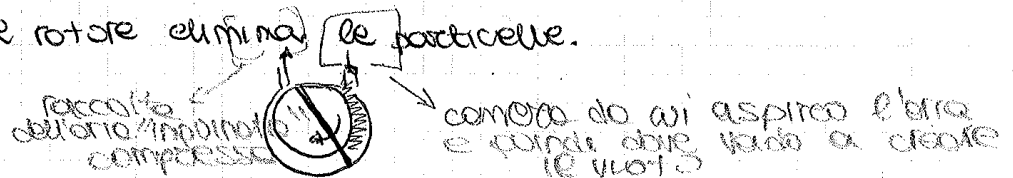
Ad alta pressione c'è un effetto di pompaggio, poi ad alto vuoto inizia a prevalere il rilancio significativo delle pareti, più gli aurore e le pareti dei contenitori lasciano passare del gas.

Certe pressioni non si riescono a raggiungere perché ci vorrebbero tempi infiniti.

Molto spesso i sistemi di vuoto hanno due o tre pompe (Roughing - HV - UHV pumps)

### POMPE RUGH!

- **POMPA ROTATIVA**: è composta da un rotore dentro uno statore, girando <sup>condotte</sup> <sup>inquinata la camera</sup> il rotore elimina le particelle.



- **POMPA ROOTS**: è una pompa rotativa che funziona con il rotore <sup>senza olio</sup> simultaneo di due meccanismi a 8 → c'è spazio tra le pareti (no contatto) → minore efficienza.
- **POMPA SORPTION**: il gas viene lanciato in una struttura porosa che cattura le molecole.

### POMPE PER ALTO VUOTO: necessitano una rotazione prima

- **POMPA A DIFFUSIONE**: il vapore molecolare è accelerato, le molecole <sup>SVANTAGGIO: presenza di olio che contaminano i gas</sup> trasferiscono il loro momento, e si fermano e sono rimosse dal sistema.
  - **POMPA TURBOMOLECOLARE**: formata da rotore + statore
  - **POMPA IONICA**: si applica un alto voltaggio e un campo magnetico per ionizzare il gas e lo si incanala verso un catodo di Titanio dove va a scattersi e ad attaccarsi. → i gas vengono fatti condensare e poi eliminati.
  - **CRIO-POMPA**: composta da membrane semipermeabili, è simile alla sorption.
- GAUGES**: composte da: barometri, termocoppia e ionizzatore. vanno bene per tutti i vuoti.

Per le perdite filtrate si possono creare accorgimenti per il pompaggio come un pompaggio differenziale o delle chiusure ventilate, giunzioni. Se un materiale è permeabile l'unica soluzione è cambiare materiale.



Viene utilizzato per osservare i difetti superficiali e la contaminazione, è utile in campo biologico per osservare celle viventi.  
 Ci possono essere più angoli di illuminazione: ~~da sopra~~ <sup>dal lato</sup>, in obliquo, in un capo lato; il secondo metodo è il migliore per le condizionate.

Per caratterizzare i materiali posso utilizzare diverse tecniche:

- SEM/TEM - elettroni in entrata e in uscita
- MRI - campo magnetico
- FIM - campo elettrico
- SIMS - IONI in entrata e in uscita
- AM - sonic waves
- EDX/WDX/XRF/XPS - fotoni (raggi x) in entrata e uscita

La microscopia elettronica sfrutta il fenomeno di interferenza costruttiva/distruttiva e permette di visualizzare dettagli molto più piccoli rispetto al microscopio ottico.

Gli elettroni sono facili da creare, da vari materiali; posso accelerarli con un campo elettrico, deviarli e focalizzarli.

### SEM: Scanning Electron Microscope

Per analizzare le materiale sbatto contro con degli elettroni e misuro ~~il~~ ~~che~~ ~~si~~ ~~emette~~ ~~più~~ ~~è~~ ~~emessi~~. Ho bisogno di un sistema di vuoto perché gli elettroni non vadano a colpire contro gli atomi di gas.

Il SEM ha un ingrandimento molto maggiore del MO ( $3 \cdot 10^6 \times$ ) e anche una maggiore risoluzione ( $\sim 10$  nm); inoltre ha una grande profondità di fuoco (da 4 mm a  $0,4 \mu\text{m}$ ) che permette di vedere un largo numero di esempi.

Gli elettroni incidenti vengono riflessi (backscattered) e ricevuti da un sensore. Ho un'emissione per effetto termico da un filamento. Nella colonna genero, accelero e focalizzo il fascio di elettroni e poi utilizzo le lenti magnetiche in modo da deviare l'elettrone.

Uso l'ESSEM per le cellule organiche per evitare il vuoto.

Il vantaggio nell'utilizzo del SEM non è solo l'ingrandimento ma anche la profondità di fuoco ( $\sim \text{mm}$ ): di solito man mano che aumento l'ingrandimento la profondità di fuoco diminuisce, qui la focalizzazione elettronica è più efficiente e questo non succede.

Utilizzo un filamento di tungsteno per generare elettroni. □  
 Fattori meccaniche e di riscaldamento rovinano le tungsteno.

che non escono caricano ripetutamente le molecole.

La perdita va in al variare del materiale.

Più è alto il peso molecolare del materiale, più ci sono elettroni che possono essere rimbalzati e quindi con una sfera piccola.

Se riduco la tensione, riduco l'energia e quindi la dimensione della zona. La maggior parte degli elettroni saranno secondari, possiamo accelerarli per fare l'immagine topologica (chiaro o scuro).

I retrodiffusi sono quelli che durante il loro percorso vengono spinti via: riflessi dal nucleo soprattutto se il numero Z dell'atomo è molto elevato, e noi lo vediamo chiaro nell'immagine i più il numero atomico sarà alto più lo vediamo chiaro (fanno un percorso nella zona e poi escono).

A seconda del dislivello della superficie vengono emessi più o meno elettroni.

I retrodiffusi escono dai bordi della zona, i secondari dalla superficie.

Posso attirare gli elettroni che escono per contatti nel detector: il detector backscatter non devia gli elettroni ma si mette sul loro percorso, lo SE, li attira con un campo. quindi analizzo solo quelli ad alta e a bassa energia, gli altri sbattono sulle pareti.

BIANCO = le tracce di elettroni o con elettroni backscatter, forti

NERO = pochi elettroni, angoli di scattering molto bassi.

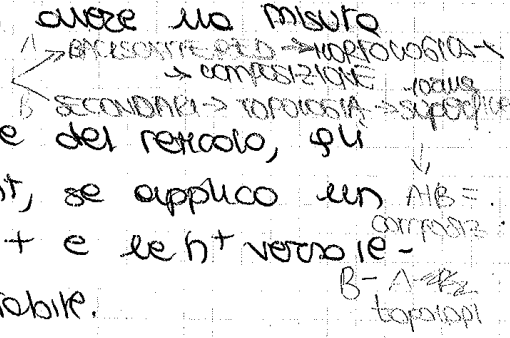
L'elettrone backscatter non viene deviato dalla griglia perché ha molta energia, invece gli elettroni secondari vengono deviati dallo scattering perché hanno energia più bassa.

Sommando i risultati di più detector possiamo avere una misura solo topologica, solo morfologica, o entrambe.

Quando l'elettrone incide con un elettrone del reticolo, gli fornisce energia creando un  $e^-$  e un  $h^+$ , se applico un forte campo elettrico, gli  $e^-$  vanno verso il + e le  $h^+$  verso il - generando una corrente elettrica misurabile.

Nel detector l'elettrone viene accelerato e moltiplicato in un moltiplicatore dove un elettrone ne genera altri tramite materiali fotoproliferanti, in modo da ottenere correnti rilevabili.

L'INGRANDIMENTO è il rapporto tra la dimensione reale dell'oggetto e la dimensione dello schermo. È diverso dalla risoluzione: se inquadro molto e ho bassa risoluzione avrò



d'assorbimento di raggi-x crea una ionizzazione simile a quella dello scintillatore. <sup>un fotore che produce coppie (e<sup>-</sup> e h<sup>+</sup>) giuste dallo ordine a una coppia indotta ogni elettroni percorrendo percorso di corrente. Tutto ciò consente, ricorrendo la coppia fot indotta ogni elettroni e quindi indistinguibile</sup>

**EDS: Wavelength Dispersive Spectroscopy** l'on. del fotone x.

Analizza la lunghezza d'onda delle radiazioni riflesse.

Ottempo dei picchi ben definiti ma è difficile dare la forma ai campioni <sup>utilizza un fascio monodirezionale</sup> <sup>studio in fenomeno della diffrazione di Bragg</sup>

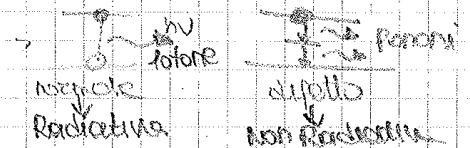
L'analisi raggi x permette di quantizzare il peso atomico, l'assorbimento e la fluorescenza (ZAF), quindi per quantizzare le percentuali degli elementi presenti in un campione.

### CATODOLUMINESCENZA: TCL

Analisi non distruttiva di impurità e difetti, e della loro distribuzione nei semiconduttori e della luminescenza nei materiali a risoluzione laterale

serve per i semiconduttori.

Ha una risoluzione laterale non eccezionale.



Arriva un fascio di elettroni sul campione semiconduttore eccitando una lacuna in BV e un elettrone in BC, che ricombinandosi generano un fotone; se c'è un difetto, questa ricombinazione non sarà diretta ma avrà dissipazione con emissione di fononi.

La ricombinazione può essere radiativa o non (se è presente un difetto).

L'immagine della catodoluminescenza ci fa vedere un sacco di difetti.

Quando il fascio di elettroni incontra il difetto, non avrà emissione di radiazione perché ha dissipato l'energia in fononi, quindi

individua il difetto come zona scura.

Questa è un'analisi solo per i materiali a gap diretto perché nel caso di materiali a gap indiretto non riesce a far effettuare il salto energetico al materiale, non lo riesce ad eccitare.

Ottempo l'immagine di maggior difetti rispetto a un SEM

### EBIC: Electron Beam Induced Current

Applicabile solo ai semiconduttori.

Si applica un voltaggio e la coppia elettrone-lacuna genera una corrente che viene poi amplificata.

Dona un'immagine dei difetti e delle dislocazioni.

È come un SEM specifico per i semiconduttori.

Si manda il fascio di elettroni su un conduttore e si guarda se

Con le SEM non riesco a vedere gli atomi, con le TEM ad alta risoluzione si!

più la camera deve stare in alto vuoto, più sarà piccolo. L'apparechiato è tutto metallico per evitare perdite di vuoto. La camera può essere ad un vuoto un po' più basso perché tra colonna che aspira e camera c'è un forellino.

Possò vedere: - atomi

- interfacce
- dislocazioni

Nei TEM a più basso ingrandimento le dislocazioni si vedono come linee nere.

Si studia per vedere come crescono due materiali a contatto

Nel TEM può anche verificarsi la diffrazione: un fascio di elettroni sparte sul materiale e essendo l'elettrone anche un'onda può creare diffrazione secondo la legge di Bragg.

Per una certa distanza interplanare l'angolo deve essere molto piccolo per avere diffrazione: si va in diffrazione solo su piani con angoli molto piccoli rispetto al fascio di elettroni.

Cosa vedo? - elettroni diffusi = amallo

- anelli chiari = policristallino

- punti = monocristallino

Ottengo quindi un'informazione sulla cristallografia, e anche sui piani cristallografici.

Le TEM quindi è - molto complicato per via del vuoto e delle alte tensioni

- complicato per via dei campioni molto sottili

- ci dà una risoluzione atomica

- ci dà misure cristallografiche (misura delle distanze e i parametri cristallini)

SPM: Scanning Probe Microscopy

È una famiglia di tecniche in cui varia la sonda

Ha un sottile sensore detto probe che passa sulla superficie e ne misura le rugosità, può sentire addirittura un atomo singolo!

Muovo un eozet per misurare la posizione lungo z

Con dei piezoelettrici posso muovere le cavigliere lungo x e y molto precisamente: si muove le piovino e non le probe.

Ha tre modi di funzionamento ; - a contatto : giocano un ruolo importante le forze di attrito locale  
- non a contatto : poca risoluzione  
- Tapping : contatto intermittente per eliminare l'attrito

Dono un profilo tridimensionale, e i campioni non necessitano trattamenti speciali, non necessita del vuoto e quindi è utilizzato per studiare molecole biologiche e organismi viventi. Ha una risoluzione migliore del SEM, quasi come le STM e le TEM.

**RBS** : Rutherford Backscattering Spectrometry in UHV

è una tecnica di scattering ionico usata per l'analisi degli strati superficiali di un solido.

È simile al SEM, anche se diverso.

Non è distruttiva, ha una buona risoluzione (alcuni nm) ed è molto sensibile agli elementi pesanti.

Analizza le energie degli ioni che vengono retrodiffusi, dopo che ho mandato un fascio di ioni monoenergetici

**ELETTRONE AUGER** : un elettrone del fascio primario penetra nel materiale e crea una vacanza nel core. Un elettrone cade da uno stato alto per riempirla emettendo un fotone X, oppure utilizzando quest'energia per elevare un elettrone da un'orbita superiore  
↓  
L'energia dipende dai livelli atomici → informazione composizione  
↓  
arrivano da profondità < 10 nm X basso per energie

**ELETTRONI RETRODIFFUSI / BACKSCATTERING** : un pochissima porzione del raggio incidente  
- derivano da profondità di 0,5 - 1 μm → bassa risoluzione topografica → MORFOLOGIA

**ELETTRONI SECONDARI** : provengono da profondità di qualche lunghezza d'onda dell'elettrone  
un elettrone che genera elettroni secondari può venir fuori come retrodiffuso  
→ TOPOGRAFIA



## ASSORBIMENTO SUPERFICIALE:

- fisico tramite interazioni di Van der Waals (legame vero)
- chimico

La distinzione è fatta in base al legame delle molecole in superficie.

Nell'assorbimento fisico abbiamo solo legami di Van der Waals, non che quindi un'elevata distribuzione di densità elettronica.

Nell'assorbimento chimico si instaura un legame chimico che conduce a un riarrangiamento della densità elettronica tra il substrato e l'adsorbato.

Cosa succede alle interfacce?

- mancano atomi: ho difetti e buche
- atomi extra: adsorbimento superficiale
- dangling bonds: cambiano le proprietà elettroniche
- cambi dimensionali: cambio del reticolo.

Tra le variabili così, tutti i materiali sono ossidati in superficie, dopo di che l'acqua si può legare chimicamente.

Una superficie molto polare assorbe  $H_2O$ , una apolare assorbe idrocarburi.

## TECNICHE DI CARATTERIZZAZIONE DELLE SUPERFICI:

- sono molte:
- |                      |          |
|----------------------|----------|
| - Microscopio Ottico | - XPS    |
| - SEM                | - FTIR   |
| - AFM                | - GAP    |
| - AES                | - Diner  |
| - SIMS               | - ecc... |

Esistono comunque dei limiti visibili fisici con quali tecniche, oltre i quali non si può andare.

## AES: Auger Electrons

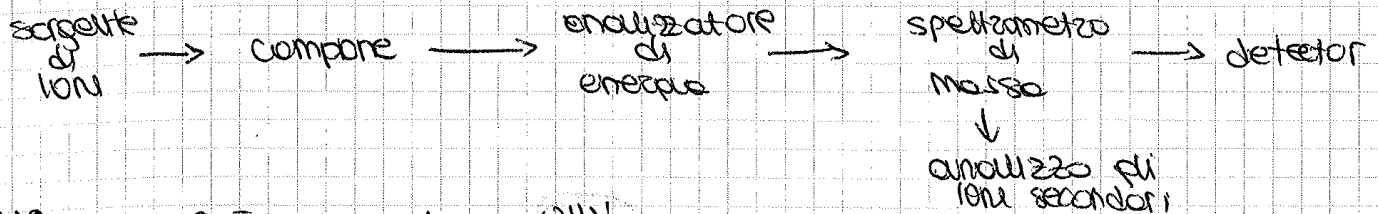
Gli elettroni Auger sono quelli che escono dalla superficie dello stesso pero, con  $4-50 \text{ \AA}$ ,  $50-2k \text{ eV}$  e basso numero atomico ( $>3$ )

Possiamo così misurare concentrazioni di un elemento minime dell'1%.

Gli elettroni Auger sono quelli ecessi per conservare l'energia.

L'emissione di elettroni Auger diminuisce all'aumentare del numero atomico ed è inversamente proporzionale all'emissione di fotoni raggi X.

È una tecnica distruttiva



Me campione è preparato in UV.

da però che si genera è molto meno profonda rispetto a quella dell'elettrone perché lo ione è più pesante.

Se non è trasferito in ioni, gli atomi non sono facilmente rilevabili; usciranno ioni diversi dal mio materiale, tutto quindi tutto una serie di segnali generati da un solo tipo di atomi e genero uno spettro di massa (Compositore Complesso).

Gli ioni che si creano possono essere positivi o negativi.

Mi servono un sistema per distinguere gli ioni che mi interessano si generano due spettri: uno positivo e uno negativo e questi sono complementari.

Le sorgenti di ioni possono essere:

- Plasma (Ar/O)
- Ioni Cesio
- Ioni Ga con forte campo elettrico
- ...

L'analisi di massa è condotta da:

- analisi magnetica
- quadrupolo
- tempo di volo

Il detector sono:

- coppia di Faraday → aperture per focalizzare le borse + coppia di Faraday
- moltiplicatore (scintillatore)

L'identificazione del tipo di ioni si basa su 3 principi:

- a seconda della massa; accelerando uno ione, questo ci metterà più o meno ad arrivare in un punto
- la forza di Lorentz prepa la traiettoria della particella quindi utilizzo un oggetto che localizza fino al detector solo la porzione in base al rapporto  $m/a$  per applicazione di un campo elettrico
- quelli che ~~non~~ arrivano al fondo del quadrupolo vengono lanciati via, arrivano solo quelli con un certo valore di  $m/a$

Bisogna tener conto degli isotopi!

in un analizzatore magnetico gli ioni vengono selezionati prima del rivelatore

Si utilizza Argon per eliminare i contaminanti; calore e ossigeno possono rimuovere gli idrocarburi.

Posso riconoscere anche vari ossidi superficiali grazie all'energia superficiale. Il rumore nel segnale deriva dalla collisione di elettroni con altri elettroni, portando a una diminuzione di energia.

Misuro l'energia di un elettrone:

$$E_{bv} = E_{BE} + E_{KE} + \phi$$

di legame      cinetica      strumento

è  $\downarrow$  perché che voglio conoscere, perché ogni elemento ne ha uno specifico.

**FTIR:** Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Sulle sup sono adsorbite molecole che reagiscono con l'infrarosso, generando una misura specifica e il riflesso da parte di molecole situate

Misuro la lunghezza d'onda infrarossa creando uno spettro.

Sono le molecole che assorbono gli infrarossi.

Ogni tipo di vibrazione ha una frequenza specifica, quindi l'assorbimento di un determinato fotone provoca una vibrazione. Se sono presenti molte frequenze, il segnale risultante diventa molto complicato.

Utilizzando le trasformate di Fourier si è in grado di ottenere delle linee specifiche per l'elemento nello spettro.

Il campione deve essere trasparente, se è opaco viene sottoposto a lavorazioni.

La frequenza emessa è determinata da una specifica vibrazione, la quale è determinata dall'energia specifica di un fotone che fa saltare la molecola ad un livello eccitato, ritornando allo stato fondamentale rilascia una frequenza specifica che viene rilevata.

Le molecole con legami covalenti possono assorbire la radiazione IR, l'assorbimento sarà frantumato perché solo alcune frequenze possono essere assorbite.

Lo spettro consiste in una serie di linee.

La frequenza dipende dalle dimensioni, vicinanza del legame, ecc... Posso vedere molecole o gruppi di molecole adsorbite sulla superficie.

**GAP:** Gas Adsorption porosimetry

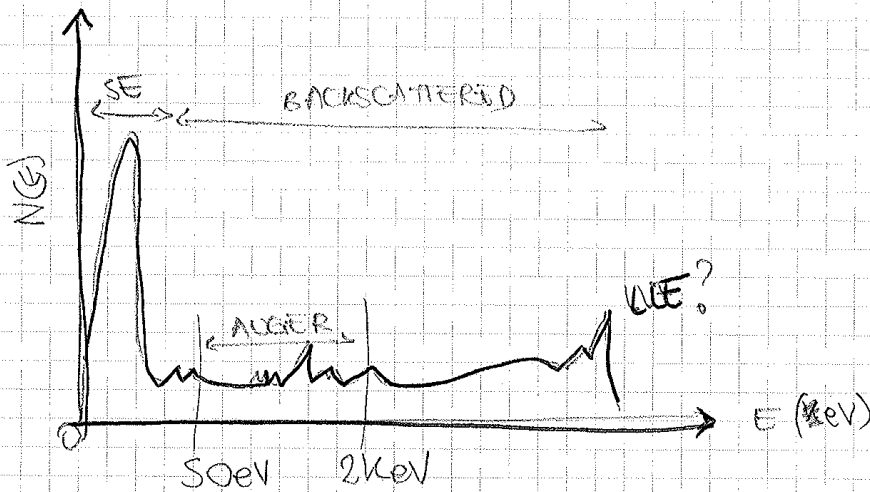
Se ho una superficie pulita e ci mando una molecola sonda e la assorbe, posso ricoprire tutta la superficie con un monostato di



### 3<sup>a</sup> PARTE

## I PROCESSI

# TECNOLOGICI



- FASE MATECCABE: la fase madre è un gas a pressione bassissima in modo da eliminare gli urti tra le molecole.

Il moto del fluido e gli scambi di calore della fase madre sono descrivibili accoppiando le equazioni della fluidodinamica con le condizioni al contorno.

C'è sempre un pari di trasporto.

Il vapore è controllato dalla pressione e dalla distanza atomica.

Nel flusso turbolento, il fluido subisce un continuo rimescolamento durante il moto.

La natura del flusso è prevedibile tramite numeri adimensionali: il numero di Reynolds ( $N_{Re}$ ) che indica la stabilità dinamica e il numero di Rayleigh <sup>( $N_{Rl}$ )</sup> che indica la stabilità all'instabilità dei moti convettivi generati da gradienti termici o di concentrazione.

### STRATO STAZIONARIO:

Quando un fluido a velocità unificata incontra un substrato, questo viene rallentato e si sviluppa una zona dove la velocità ha un gradiente, detta zona viscosa, fino a raggiungere velocità nulla.

La dinamica del fluido è descritta dall'equazione di Navier-Stokes.

Si determina quindi un profilo di velocità:



### STRATO DI DIFFUSIONE:

Il materiale attivo viene sequestrato dallo strato in crescita, depauperando in prossimità della superficie del substrato, altre molecole vengono richiamate per diffusione dalla zona a concentrazione maggiore. La zona interessata da questo flusso di diffusione verso il substrato è la zona di diffusione.

Le leggi che descrivono il moto diffusivo sono le due leggi di Fick. Lo spessore dello strato di diffusione <sup>( $\delta$ )</sup> è costante.

La velocità di crescita diminuisce dal bordo verso l'interno del substrato e non è necessario cambiare la geometria per rendere lo strato di diffusione costante.

### STRATO DI ASSORBIMENTO:

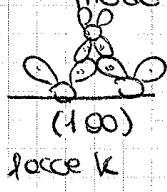
Normalmente per evitare inquinamenti e reazioni parassite, nell'epitassia in fase gassosa, solo il substrato viene scaldato, mentre le reattive e i gas sono freddi generando dei profili di temperatura soprattutto all'interfaccia che delimitano una zona a gradiente termico.

e l'inversione di tendenza. Se non avessi tensione superficiale, il raggio critico sarebbe 0.

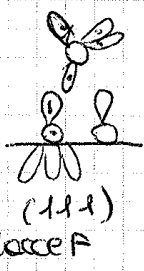
La tensione superficiale di un materiale è interpretabile come l'energia associata ai legami superficiali non saturati.

Normalmente le superfici si ricostituiscono da un punto di vista cristallino e chimico in modo da minimizzare l'energia superficiale.

Esempio:



ogni atomo in superficie avrà due legami disponibili, l'atomo che arriva si unisce o due saturandone i legami ma lasciandone due suoi liberi. In totale non si ha aumento di dangling bond quindi non aumenta l'energia superficiale.



In questo caso l'atomo che arriva ne satura 1 ma ne produce tre, si ha quindi un aumento dell'energia superficiale  $\rightarrow$  + difficile da crescere così  $\times k$  ha bisogno di alta energia.

Le superfici cristallologiche possono quindi presentare tensioni superficiali diverse. La tensione superficiale è proporzionale al numero di DB per atomo sulla superficie, quindi aumenta allungando atomi che generano maggiori legami liberi.

La nucleazione sulle facce F presenta una barriera energetica ed è legata alla concentrazione di centri di nucleazione.

Ci sono 3 principali fonti di centri di nucleazione:

- se la superficie è composta da gradini, i bordi dei gradini funzionano da centri di nucleazione
- le dislocazioni a vite emergenti da una superficie appaiono come gradini monoatomici a spirale
- sulla superficie si formano nuclei sovratattici intorno ai quali si possono incorporare atomi.

L'abito cristallino è la forma esterna del cristallo, cioè l'insieme di facce cristalline di interfacce solido-esterno. Ogni faccia ha la sua velocità di crescita e le facce a velocità maggiore prima o poi spariranno così che l'abito cristallino rimane formato solo dalle facce a più lenta velocità di crescita.

La velocità di crescita è inversamente proporzionale alla tensione superficiale.

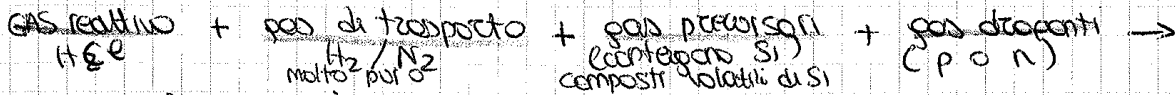
Un liquido sottoraffreddato in raffreddamento raggiungerà prima una  $T_c$  in cui sarà

### CP 3.02: TECNICHE di CRESCITA EPITASSIALE

**VPE:** Vapor Phase Epitaxy

La tecnica migliore per creare substrati di silicio.

È possibile crescere epitassialmente del silicio su substrati di zaffiro artificiale ( $Al_2O_3$  monocristallino) in modo da ridurre le componenti elettriche parassite e creare quindi le SOS (Si on sapphire).



faccio poi fluire i gas in un tubo (l'altro capo è molto preadato perché è riducente, quindi cede elettroni ai sistemi portando via le molecole d'acqua ad opera di elementi fortemente ossidanti, senza quindi la formazione di ossidi). Mentre cresco posso drogare inserendo il drogante in fase gassosa.

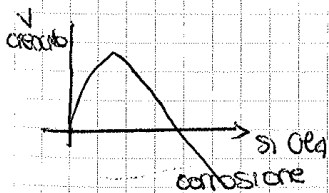
Il sistema deve essere corretto dal punto di vista fluidodinamico: flusso laminare e non turbolento.

Dopo di che utilizzo un abbattitore con doccia d'acqua ottenendo ossidi.

Esistono diversi tipi di Reattori adatti a questo processo, composti da sistema di controllo ed immissione dei gas e camera di deposizione.

Nella camera i substrati sono posizionati su un suscitatore e scaldati a RF ed è possibile crescere più substrati alla volta.

costo scaldano solo alcune zone e lascio fredde le pareti



Le condizioni tipiche di crescita sono di circa  $1 \mu m/min$ .

Si ha occasione per alte concentrazioni di  $SiCl_4$  (precursore)

ma questo può essere usato in modo lottaggioso:

può portare via le materiale superficiale che può magari

essere ossidato, posso pulire questa parte e poi <sup>diminuire</sup> la concentrazione per ridurre la corrosione.

### CVD:

Si utilizzano forni a più zone per creare zone piatte.

Esistono camere per caricare e togliere il materiale senza toccare

il flusso di gas e in queste camere faccio il vuoto

**MBE:** molecular beam Epitaxy

La fase madre è portata a bassa pressione in condizioni di flusso molecolare

Crescita di meno di un micron all'ora.

la camera deve essere in alto vuoto, ottenuto con pompe orogene, ioniche

desorbimento di ossidi dal substrato che precede la crescita.

• SPETTROMETRO RHEED / DIFFRACTIONOMETRO:

tramite l'immagine di diffrazione elettronica con raggio radente è possibile valutare la qualità cristallina della superficie del substrato e della superficie degli strati che crescono.

Dalla ricostruzione in diffrazione possiamo ricavare le condizioni ottimali per la crescita epitassiale.

Permette di controllare la deposizione strato atomico per strato atomico tramite lo studio dell'oscillazione nel tempo dell'intensità dei riflessi di diffrazione. L'intensità del riflesso è massima quando il grado di ricoprimento della superficie è 1 ed è minima quando sono presenti numerose isole.

Se l'elettone trova un gradino viene assorbito: una superficie molto rugosa dà una riflessione molto debole.

MOCVD: Metal Organic chemical Vapor deposition

Utilizzo come fase madre un flusso di gas di trasporto a  $P_{amb}$  o a bassa pressione in cui sono inserite le specie attive anche se tossiche.

Per elementi dei gruppi 3-5/2-6 devo usare precursori perché altrimenti avrei T di decomposizione troppo diverse.

Il caricamento è fatto da due linee: una in cui ci sono gli idruri (c'è bisogno di un controllo di flusso) e una in cui ci sono i metalli organici (necessitano di gorgogliamento).

Se voglio cambiare composizione creo altre linee. Nella linea preparo un flusso e poi a seconda di quale materiale voglio crescere attivo una certa linea e mando allo scarico le altre.

Durante la crescita non si deve interrompere il flusso perché fermare la crescita della superficie e avere reazioni con le gas presenti nella camera. Questo comportamento può essere utilizzato per "spionare" la superficie di accrescimento.

Il substrato è montato su un suscettore e riscaldato a RF in modo da tenerlo freddo le pareti del reattore e la fase gassosa in modo da ridurre le reazioni parassite.

Gli alchil-metallo sono liquidi ad alta tensione di vapore quindi faccio gorgogliare un gas di trasporto ( $H_2$ ) che si sottrae del metallo organico e va poi a mescolarsi nel reattore con un flusso laminare.

(es. GaAs pg 20 - 3.02)

## N° 323 CLEAN ROOM e SITI PRODUTTIVI

Posso danneggiare l'intero dispositivo, localmente posso creare dei danni che ne alterano il comportamento

### CONTAMINAZIONE

Un singolo componente può portare al malfunzionamento di tutto il dispositivo.

Una frazione di polvere nanometrica può rovinare l'intero processo. Riducendo le dimensioni del mio componente avrò sempre maggior bisogno di pulizia.

La polvere contiene frazioni organiche e inorganiche (contenenti silice), pollini, sali (di origine naturale); oppure può essere di origine industriale (fumi, oli, ecc) o determinata dalla persona.

Le contaminanti sono: particelle (organiche e inorganiche), film superficiali (residui o ossidi), contaminanti atomici (atomi o ioni adsorbiti).

Le noceuti sono: umore, dovute all'azione delle macchine, materiali, processi.

Anche le attrezzature possono venire avvelenate.

Certe contaminazioni possono dare problemi di salute.

Si crea anche polvere maneggiando le cartucce, ad esempio rigando o con il grasso della pelle.

Bastano pochi ioni che si depositano a cambiare la conducibilità.

Problemi della contaminazione: movimento degli ioni negli ossidi (cambiano il campo elettrico), impurezze nei Si (agiscono come centri di ricombinazione  $e^-h^+$ ), particelle in superficie (rendono difficile la litografia), film tra strati (creando spaccature aperti o chiusi e impediscono l'adesione).

Più è grosso l'oggetto più è facile trovarlo statisticamente un difetto.

La richiesta della camera pulita riguarda anche la quantità e la dimensione delle particelle.

Normalmente per analizzare il numero di particelle utilizzo dei laser e quando molte volte c'è scattering.

Esistono diverse classi per classificare una camera pulita.

La vibrazione è un movimento meccanico che crea polvere.

C'è una sovrappressione nella camera per evitare che la polvere entri. Si cerca di evitare le turbolenze creando un flusso laminare dall'alto tramite griglie sopra e sotto. I flussi direzionali circolano



## 3.04 CRESCITA di MONOCRISTALLI di SILICIO

l'epitassia è un processo che permette di ricoprire microscopicamente lo strato sottostante.

I substrati sono detti bulk e vengono ottenuti da pezzi di dimensioni maggiori. Per realizzare i monocristalli si parte dai precursori:

materiale precursore

↓  
semiconduttore policristallino per distillazione e riduzione

↓  
monocristallo + lavorazioni meccaniche.

↓  
wafer: dischi di vari diametri di spessore 95 cm circa.

I substrati possono essere di silicio o di materiali III-V

Solo una piccola porzione del silicio prodotto va a finire nella microelettronica.

Il silicio ha la struttura del diamante e un reticolo CFC.

Per ottenere il silicio si parte dalla sabbia, un particolare tipo che deve essere più abbastanza pura: sabbia di tipo industriale, per ottenere poi un prodotto ad elevata purezza.

Il processo di riduzione del silicio utilizza forni elettrici industriali in cui si inseriscono sabbia + carbon coke e si ottiene un silicio puro al 98%. Questo processo è fortemente energivoro, non ottengo quindi un silicio puro al 100% ma un silicio metallurgico.

Esistono varie strade di reazione all'interno della formula

Per utilizzare i droganti N o P devo utilizzare materiali che sono già presenti, ma questi non agiscono a causa di tutte le altre impurezze presenti. Vengo un silicio di grado elettronico partendo da silicio metallurgico che presenti un processo accettabile di lavorazione.

Si aggiunge acido cloridrico <sup>in uscita dal reattore</sup> gassoso per eliminare le impurezze in un reattore. Il tricluro silano (g) è un elemento precursore del silicio elettronico ma contiene ancora impurezze quindi bisogna fare un'operazione di raffinazione.

A seconda delle varie temperature nel processo di raffinazione si eliminano le impurezze depositandoli su appositi piani nelle torri di distillazione. Ottengo tetracloruro di silicio e tricluro silano.

Non otteniamo silicio monocristallino dal processo!

Da tricluro silano si fa una riduzione con idrogeno e otteniamo un silicio 9N (99,999999999%). Il processo viene chiamato SIEMENS e



Il drogaggio è in parte ed è posto dentro un drogiolo di grafite che lo sostiene; va a contenere la carica ma parte del drogiolo fonde dissolvendo ossigeno.

Durante l'uscita del monocristallo dal bagno abbiamo dispersioni termiche; nel fuso non ho distribuzione uniforme di temperatura, inoltre ci saranno molti difetti.

Parti del ingotto: - Seme: determina l'orientazione cristallina

- Collo: rimuove le dislocazioni generate per shock termico

- Cerpo

- Fine

! ISOTERME del C2 !

I substrati li voglio già legati.

Utilizzo il coefficiente di ripartizione  $k_0$ :

$$k_0 = \frac{\text{droganti nel S}}{\text{droganti nel L}}$$

A seconda del valore di  $k_0$  mi dice se il drogante preferisce stare nel liquido o nel solido.

Il drogaggio viene messo in fine di drogiolo.

Se il drogaggio tende a stare nel solido, non meno che tiro su il monocristallo dal liquido rimarrà sempre più puro e il monocristallo avrà diverse compattezza e arricchimento preferenziale superficiale. Viceversa, nel caso in cui preferirebbe stare nel liquido.

Non si può aggiungere drogante durante il processo!

La distribuzione di impurezze nella crescita del cristallo si può calcolare matematicamente.

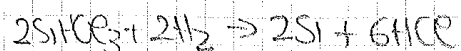
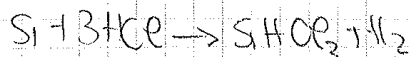
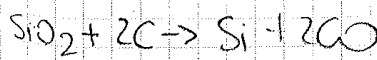
Non meno che solidifica, a seconda della coppia drogante-fase posso vedere quali è la concentrazione del drogante nel materiale tramite grafici.

Il coefficiente di ripartizione effettivo è una funzione della percentuale di solidificazione, lo spessore, il coefficiente di diffusione, la velocità di rotazione e la velocità di crescita.

L'ossigeno aumenta la resistenza meccanica del silicio e precipita come impurità inclusionsi.

Un altro metodo di crescita è il float zone prezzo più elevato si riscalda il silicio policristallino in wafer a RF e si fa avvenire ricristallizzazione

Sabbia → riduzione → Si 98% → HCl → Triclorosilano → Semicon → Si 9N



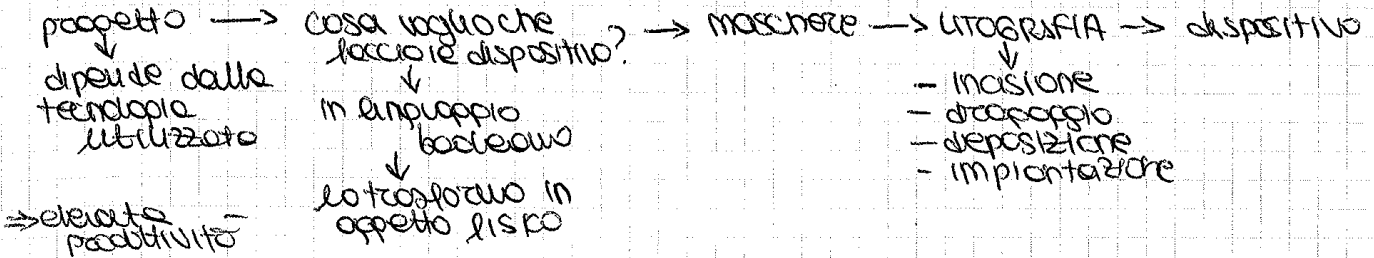
si potremmo poi farne delle mappe.

Esistono impianti di simulazione

però per le dette e minimizzazione le dislocazioni e gli stress termici  
esiste un'altra tecnica: CZ magnetica. In questo utilizzo un campo  
magnetico: se applico forti campi magnetici al polver nel metodo CZ miglioro  
i moti convettivi del fuso

# 3.07 TECNICHE LITOGRAFICHE

Con la LITOGRAFIA <sup>OTTICA</sup> faccio delle operazioni che mi permettono di disegnare un circuito; è una procedura che mi permette di selezionare determinate dimensioni della superficie. ⇒ trasferisce le geometrie dalla maschera al resist.



Devo selezionare una zona particolare sul materiale su cui poter lavorare.

- stendo le fotoresist per spinning sul substrato (bassa viscosità e alta  $\nu$  di rotaz.)
- la Resist è una resina che va polimerizzata, reticolata per cottura.
- si selezionano le zone tramite maschere trasparenti all'UV su cui si creano dei disegni opachi all'UV.
- impressiono una parte tramite gli UV, trasferendo le resist
- lo modo ~~tra~~ per in un solvente per portare via le zone impressionate.
- faccio un ulteriore cottura per far sì che le resist si stabilizzino nel caso abbia una funzione nel prodotto finito, oppure lo tolgo.
- la Resist ricopre il substrato e impedisce le operazioni sul silicio
- la Resist eliminata esposta ai raggi UV <sup>se</sup> diventa più solubile con gli UV perché si depolimerizza ~~si~~ viene detto POSITIVO, ~~se~~ ~~si~~ si polimerizza diventando meno solubile ~~si~~ viene detto NEGATIVO.
- da litografia quindi seleziono delle zone su cui con dei raggi UV scopro il mio silicio, togliendo le resist



la maschera non va a lavorare, ma seleziona solo le zone di resist da modificare.

Potrei avere un'operazione di ossidazione a caldo che potrebbe rovinare le resist, quindi prima ricopro il silicio di ossido poi metto le resist e poi la maschera, in questo modo quando elimino le resist rimane l'ossido di silicio scoperto e posso usare un acido per abbassarlo chimicamente.

