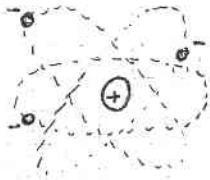


SEMICONDUCTORI

Per studiare le caratteristiche corrente-tensione dei circuiti basati su strutture a semiconduttore bisogna studiare il flusso di cariche degli elettroni che si muovono nei materiali.

↳ Gli elettroni fanno parte della struttura di un singolo atomo

• Struttura dell'atomo



Il nucleo è formato da un agglomerato di neutroni e di protoni con carica complessiva positiva attorno al quale ruotano gli elettroni con carica negativa.

L'elettrone che orbita attorno al nucleo ha una propria energia cinetica. La sua "posizione" deriva dal bilanciamento di due forze: una dovuta all'accelerazione centripeta, che allontana l'elettrone dal nucleo, l'altra è la forza coulombiana generata dalle due cariche di segno opposto che è inversamente

proporzionale al quadrato della loro distanza.

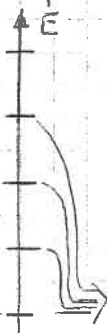
Più "veloce" l'elettrone gira attorno al nucleo più larga è la sua orbita e quindi minore è l'energia di legame con i protoni in quanto è inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

L'elettrone, oltre alle sue proprietà di materia corpuscolare (cioè ha una massa discreta che risponde alle leggi della meccanica classica), ha proprietà ondulatorie idioaltre: non tutte le orbite sono possibili e

quindi, siccome ad un'orbita l'elettrone ha una particolare energia, l'elettrone può avere solo alcuni valori di energia.

↳ l'energia è quantizzata: i livelli di energia permessi sono

- diversi per ogni tipo di atomo
- distribuiti non continuamente
- occupati al più da due elettroni (con spin opposto) ⇒ il numero di elettroni per ogni livello è finito

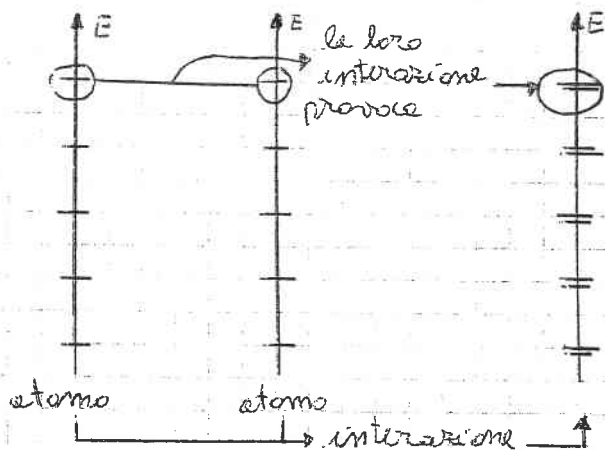


livelli di energia permessi dove tra un livello e l'altro esiste una "banda energetica" proibita

↳ per semplicità ogni livello può avere un solo elettrone.

In un sistema in quiete, non perturbato, gli elettroni tendono spontaneamente ad occupare la posizione con il livello di energia inferiore.

Un materiale è un insieme di atomi che interagiscono tra di loro cioè gli elettroni di un atomo sentono la presenza degli altri atomi attraverso la repulsione e l'attrazione. Le orbite vedranno però il bilancio delle forze è diverso (più cariche positive, nuclei e più cariche negative, elettroni) e quindi le energie si modificano. Il sistema costituito da due atomi, per esempio, ha diversi livelli energetici dei due atomi isolati.



Il numero di livelli di due atomi che interagiscono non può variare in quanto non varia il numero di elettroni, grazie soltanto la struttura. Tipicamente ad ogni livello energetico di un singolo atomo, ne corrispondono due vicini e distinti. Le proprietà rimangono uguali in particolare, l'energia è discretizzata in livelli in cui può stare un solo elettrone (coppie di spin opposti).

• Modello a bande energetiche

L'interazione di più atomi provoca l'arricchimento di rispettivi livelli \rightarrow si formeranno "gruppi" di livelli, nel quale c'è sempre un'alternanza tra regioni ricche di livelli (permesse) e regioni proibite.



Modello a bande \Rightarrow le sono intervalli in cui c'è un elevato numero di livelli tutti discreti.

\hookrightarrow la distribuzione NON È CONTINUA

\hookrightarrow ogni banda ha un numero finito di livelli e quindi (ricome le proprietà di un singolo atomo valgono anche) ha un numero finito di elettroni che riempiono varie bande portatrici di quelle con poca energia.

\hookrightarrow livello energetico di Fermi \Rightarrow livello limite al di sotto del quale, in assenza di perturbazione, tutti i livelli energetici sono occupati al di sopra del quale tutti i livelli energetici sono vuoti.

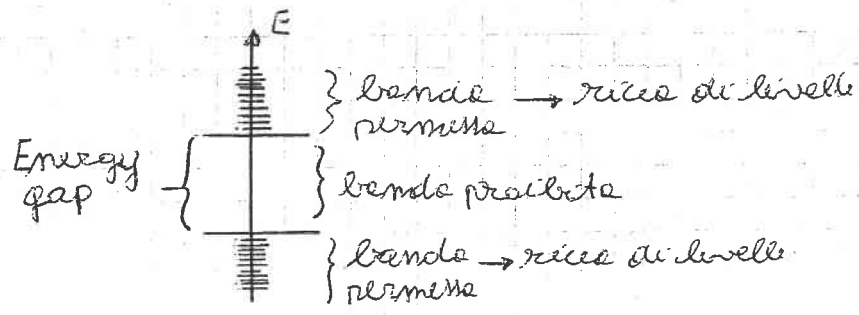
\hookrightarrow la caratteristica di un materiale dipende dalla posizione del livello energetico di Fermi.

• Tipologia di un materiale

Per indurre corrente in un materiale bisogna perturbarlo per poter accelerare gli elettroni \rightarrow la perturbazione varia le velocità degli elettroni che cambiano energia cinetica \rightarrow varia la posizione dell'elettrone che "salta" in un altro livello energetico.

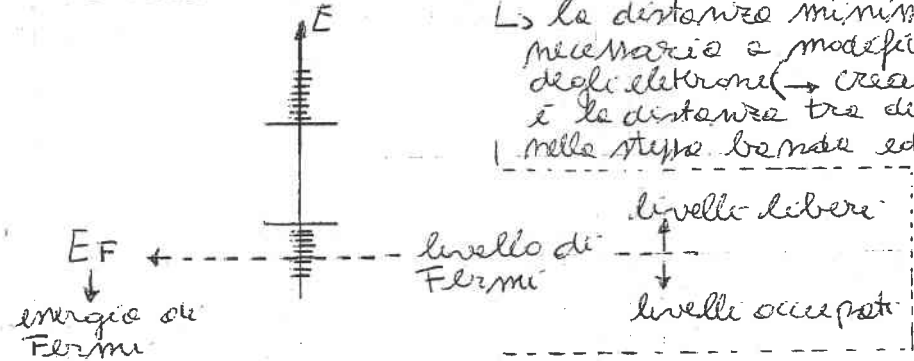
\hookrightarrow Per avere corrente, quindi, occorre che

- ① ci sia energia prodotta da una sorgente esterna.
- ② l'energia sia sufficiente a far "saltare" l'elettrone da un livello ad un altro.



↳ Materiali conduttori

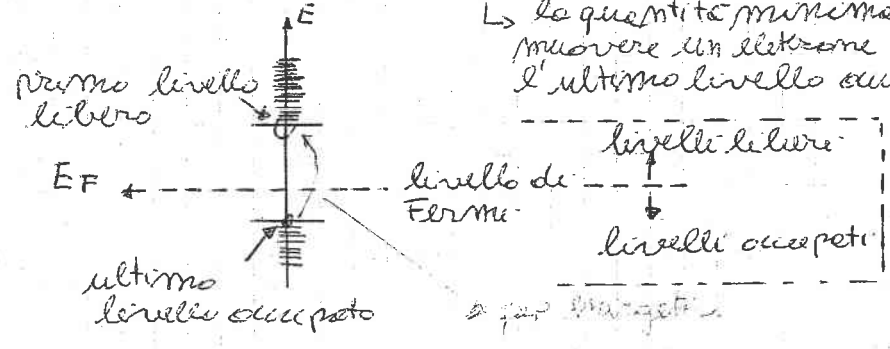
Il livello di Fermi cade in una banda permessa



↳ la distanza minima di energia necessaria a modificare lo stato energetico degli elettroni (→ creazione di corrente) è la distanza tra due livelli che stanno nelle stesse bande ed essendo le bande dense di livelli l'energia necessaria è piccola

↳ Materiali isolanti

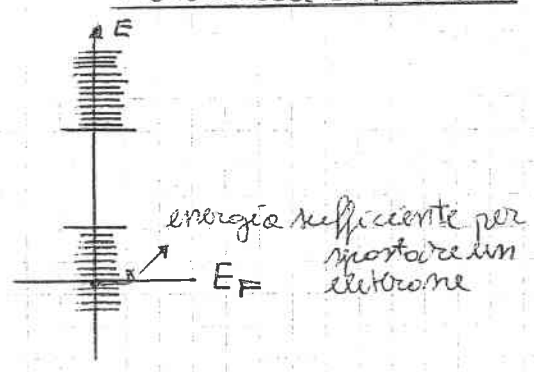
Il livello di Fermi cade in una banda proibita



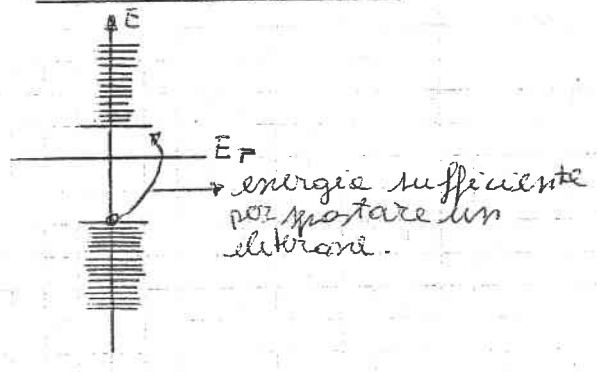
↳ la quantità minima necessaria a muovere un elettrone è la distanza tra l'ultimo livello occupato e il primo libero cioè almeno pari al gap energetico

L'energy gap è molto più grande della distanza minima tra due livelli energetici della stessa banda e per questo i materiali isolanti conducono molto più difficilmente elettroni rispetto ai materiali conduttori.

Materiali conduttori



Materiali isolanti



Purò un materiale isolante può sempre condurre elettroni ma, al contrario dei materiali conduttori, ha bisogno di più energia (pari almeno all'energy gap)

Si può notare che un elettrone per potersi muovere deve essere in una banda con alcuni livelli energetici liberi quindi una banda completamente vuota o completamente piena non dà nessun contributo alla corrente.

↳ Le bande completamente piene vengono trascurate dall'analisi delle correnti in quanto i loro elettroni hanno una remota possibilità di "saltare" in un livello energetico libero.

⇒ La situazione è come quella di una bottiglia: il liquido non può muoversi grazie ad una perturbazione se la bottiglia non è completamente vuota o piena (il liquido "è ma non ha spazio per muoversi").

↳ Vengono definite le due bande fondamentali (quelle a cavallo del livello energetico di Fermi)

• Bande di conduzione → sopra il livello di Fermi

• Bande di valenze → sotto il livello di Fermi

↳ Semiconduttore

La differenza tra i semiconduttori e gli altri materiali è la diversa interazione con il mondo esterno.

Metodi di perturbazione

↳ termica: (siccome la temperatura è diversa dallo 0 assoluto gli elettroni che compongono le molecole del vero materiale si muovono in funzione della temperatura in modo caotico)

↳ ottica (un fotone porta una certa energia che viene trasportata da una radiazione)

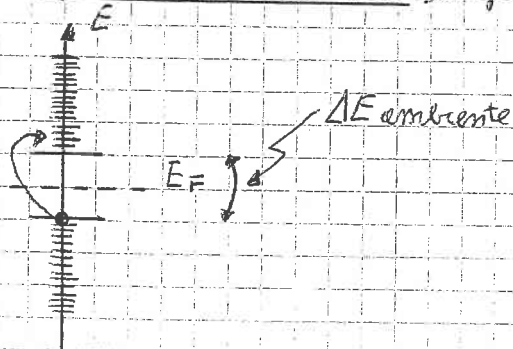
Il livello teorico di Fermi è in condizione della non perturbazione cioè allo 0 assoluto, il buio...

Nella realtà ci sono continui scambi di energia

↳ in un isolante l'energia media scambiata non è sufficiente a far "saltare" un elettrone dalla banda di valenze a quella di conduzione

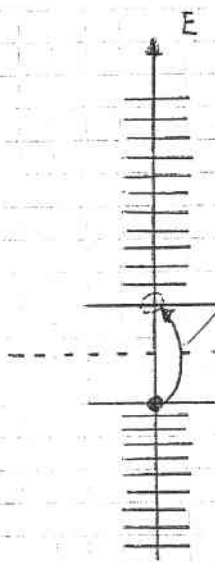
↳ in un semiconduttore il gap energetico è paragonabile

all'energia scambiata con l'ambiente per un semplice effetto termico.



↳ Caratteristiche del semiconduttore

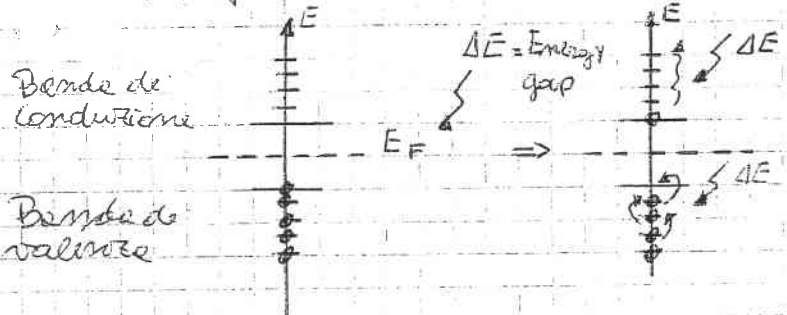
- ① il livello energetico di Fermi cade nella banda proibita
- ② l'energy gap è paragonabile all'energia media scambiata con l'ambiente interno.



la probabilità dell'elettrone che riceve un'energia pari ad kT per e è elevata in un conduttore a temperatura ambiente.

↳ in questo fenomeno corrente in quanto
 ③ l'elettrone (che si trova in un livello energetico più alto e ha quindi una maggiore energia cinetica → maggiore velocità) si trova in una banda con molti livelli energetici vicini, non è così difficile per farlo saltare in un altro livello energetico (per questo la banda si chiama di conduzione → si comporta come un conduttore)

② la banda di valenza diventa parzialmente occupata in cui si può creare un moto di elettroni con piccola energia



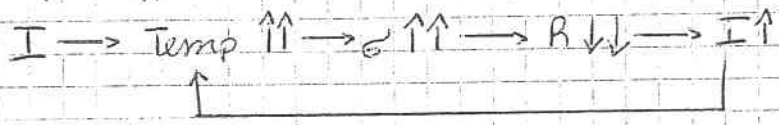
Differenze tra un conduttore e un semiconduttore

- In un conduttore esiste solo una banda parzialmente occupata che costituisce il trasporto di corrente
- In un semiconduttore necessariamente esistono due bande entrambe parzialmente occupate ⇒ questo provoca le caratteristiche non lineari.

Ommevazione

La quantità di elettroni presenti nelle bande di conduzione dipende dalla temperatura → la conducibilità elettrica aumenta all'aumentare della temperatura (in quanto aumenta il no di elettroni che possono "saltare" nelle bande di conduzione)
 ↳ questo effetto è utilizzato per i sensori di temperatura in quanto σ è funzione della temperatura.

↳ questo effetto può essere pericoloso perché la corrente produce calore per effetto Joule → il componente si auto-riscalda



↳ è un meccanismo instabile che può provocare la rottura di un dispositivo (problema dell'elettronica di potenza)

MECCANISMO DI CONDUZIONE NEI SEMICONDUCTORI

I materiali semiconduttori sono prevalentemente delle quattro colonne p della tavola periodica degli elementi.

↳ Silicio, Germanio

o anche da leghe di materiali delle 3^a e 5^a colonne p

↳ GaAs, arseniuro di gallio

InP, solfuro di indio

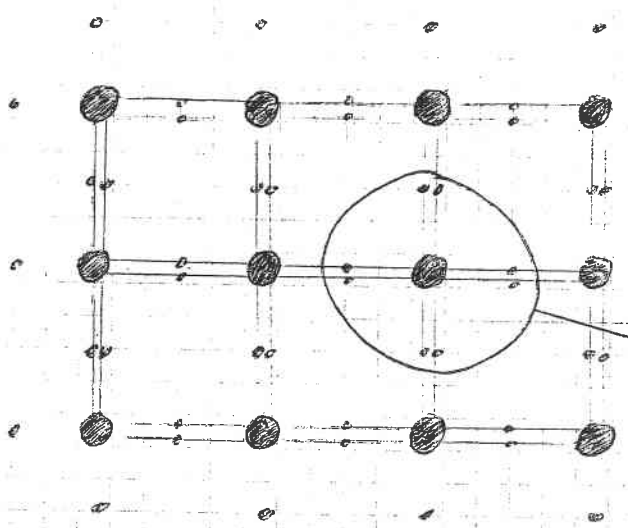
Il silicio è il materiale più diffuso in natura. Per poterlo utilizzare bisogna lavorarlo in maniera complessa

↳ Il numero atomico è 14

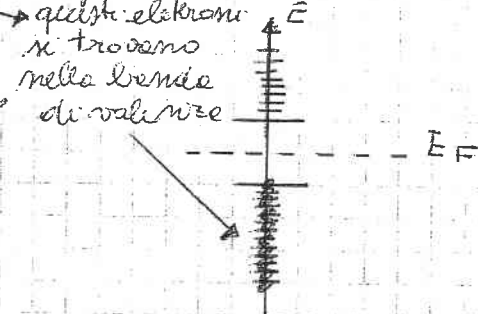
↳ Gli atomi di silicio si legano tra di loro formando un reticolo regolare. Gli elettroni di valenza (quelli esterni) formano un legame covalente cioè gli atomi condividono una coppia di elettroni costituendo un legame forte.

↳ Il silicio ha 4 elettroni di valenza disponibili a stabilire un legame formando una struttura cristallina (reticolo cubico)

Cogni nucleo ha 4 legami covalenti



Gli elettroni di legame sono quelli più lontani dal nucleo e quindi con una maggiore energia cinetica ed una minore energia di legame
↳ sono nelle bande di valenza (occupate dagli elettroni di valenza che formano i legami con gli altri atomi)

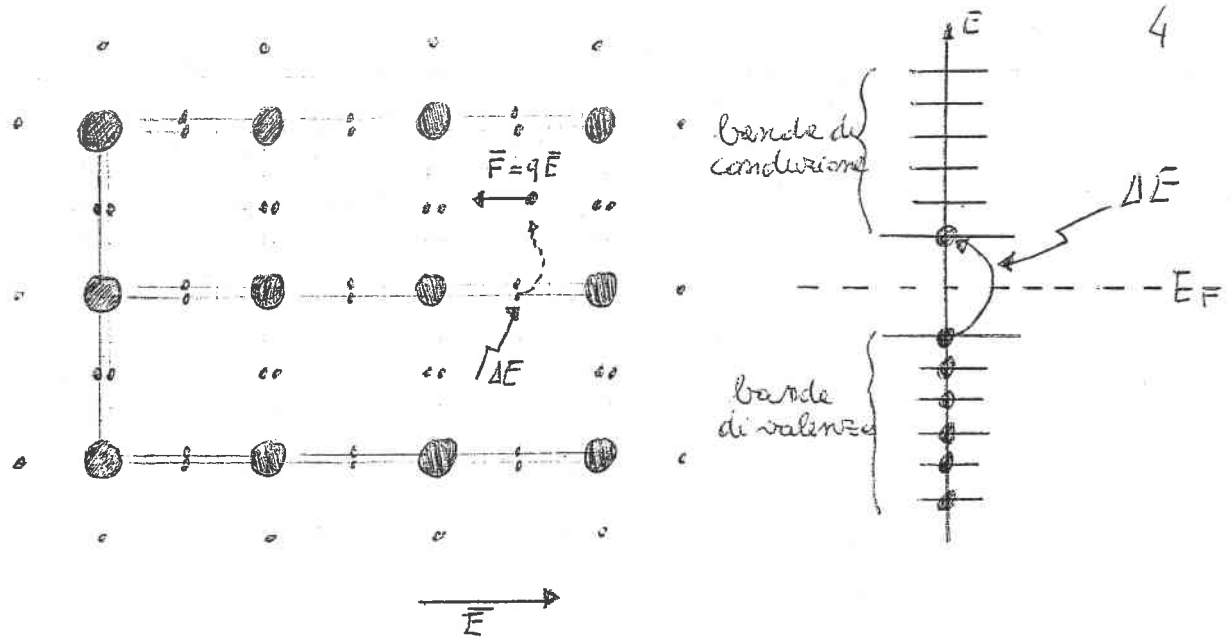


questi elettroni si trovano nelle bande di valenze

In condizione di perturbazione (termica o ottica) un elettrone può ricevere energia saltando nella banda di conduzione → entra in un livello energetico superiore e quindi ha un'orbita più grande e un minor legame con il nucleo → ha bisogno di un'ulteriore piccola energia per cambiare il suo nuovo stato orbitale

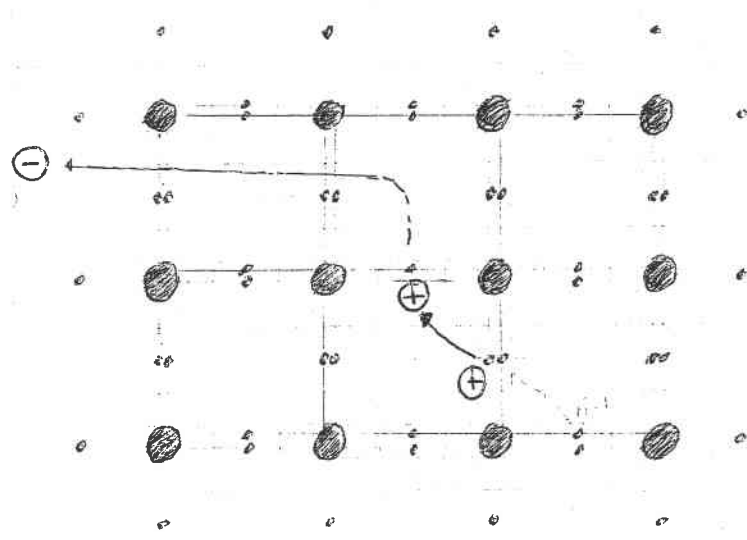
In presenza di un campo elettrico esterno ($\vec{F} = q\vec{E}$) l'elettrone tende ad allontanarsi dall'atomo

Il moto dell'elettrone è ostacolato dal reticolo cristallino.

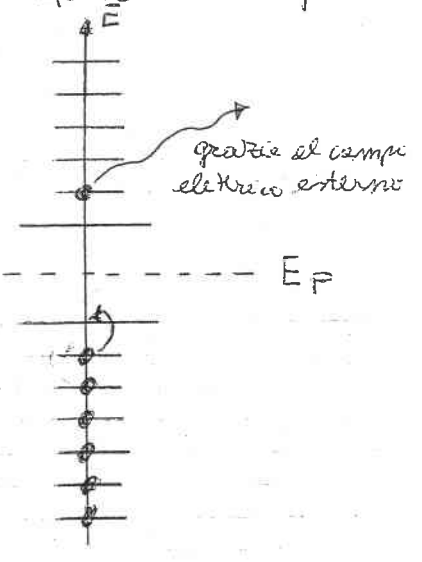


⇒ L'elettrone che dalla banda di valenza entra nella banda di conduzione è debolmente legato al suo nucleo e solo ad una forza esterna (campo elettrico) può facilmente cambiare il suo stato di moto ⇒ elettrone libero → può contribuire alla corrente.

↳ Per il principio di conservazione della carica quando l'elettrone si allontana globalmente la carica totale è equilibrata ma localmente no → l'assenza di un elettrone comporta uno sbilanciamento di carica positiva



↳ il legame regante è il livello legato libero dell'elettrone che è andato nella banda di conduzione.
 ↳ questo livello libero può essere facilmente riempito e spin di una nuova energia



Macroscopicamente accade che

- ① un elettrone si muove in banda di conduzione
- ② tanti elettrone si muovono in piccoli scatti (nella banda di valenza) provocando un apparente spostamento di una carica positiva nella direzione opposta della carica negativa in banda di conduzione