

Dipartimento di Fisica e Astronomia –
Universita' di Bologna

Elettroni e Fotoni nei Semiconduttori: le proprietà ottiche

Daniela Cavalcoli

daniela.cavalcoli@unibo.it

Lauree Scientifiche 2020

La Luce...

La natura della luce ha affascinato l'uomo dai tempi dell'antichità. Molti filosofi e scienziati hanno proposto le loro soluzioni a questo problema. Alcuni esempi...

Empedocle (V sec. a.C.)

raggi che fuoriescono dall'occhio umano ed interagiscono con raggi emessi da una sorgente

Descartes (XVII sec. d.C.)

lo spazio è riempito di un plenum che trasmette una pressione dalla sorgente all'occhio

Einstein (XX sec. d.C.)

la luce si comporta come corpuscoli discreti (ora chiamati "fotoni"), che sono essenzialmente quanti di energia

Newton (XVII sec. d.C.)

la luce è composta da minuti corpuscoli che dalla sorgente raggiungono l'occhio

Maxwell (XIX sec. d.C.)

la luce è una perturbazione (onda) del campo elettromagnetico

Huygens (XVII sec. d.C.)

la luce è un'onda che perturba un etere che riempie lo spazio



La luce: onda o corpuscolo ?

Sino alla fine del 1800, la radiazione Elettromagnetica era considerata un fenomeno ondulatorio.

Verso la fine del XIX° secolo gli esperimenti con la radiazione emessa dai corpi riscaldati (e successivamente altri nuovi effetti) evidenziarono i limiti della teoria classica.



Fenomeni fisici spiegabili con la teoria ondulatoria della radiazione EM:

Diffrazione

- **Interferenza**
- **Polarizzazione**

Fenomeni fisici spiegabili con la teoria corpuscolare della radiazione EM:

Radiazione emessa da un corpo nero

- **effetto Fotoelettrico**
- **effetto Compton**

La luce si comporta come un'onda:

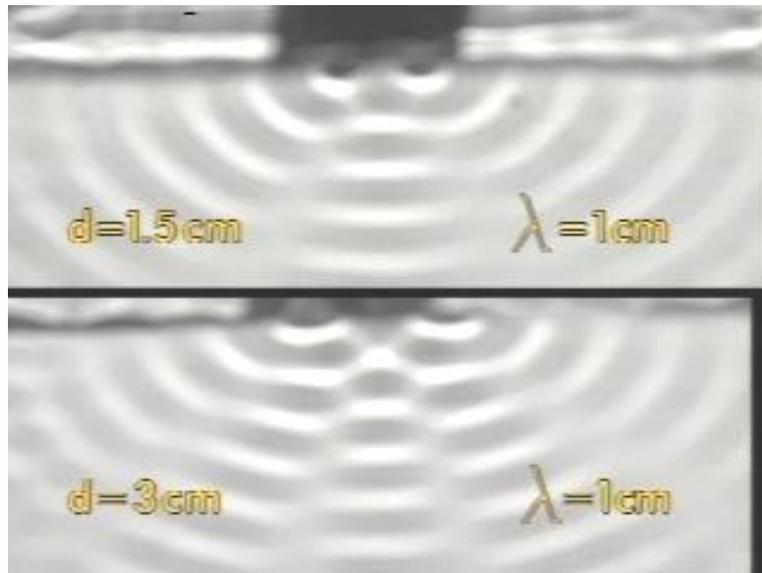


Figure di interferenza di onde
acquatiche

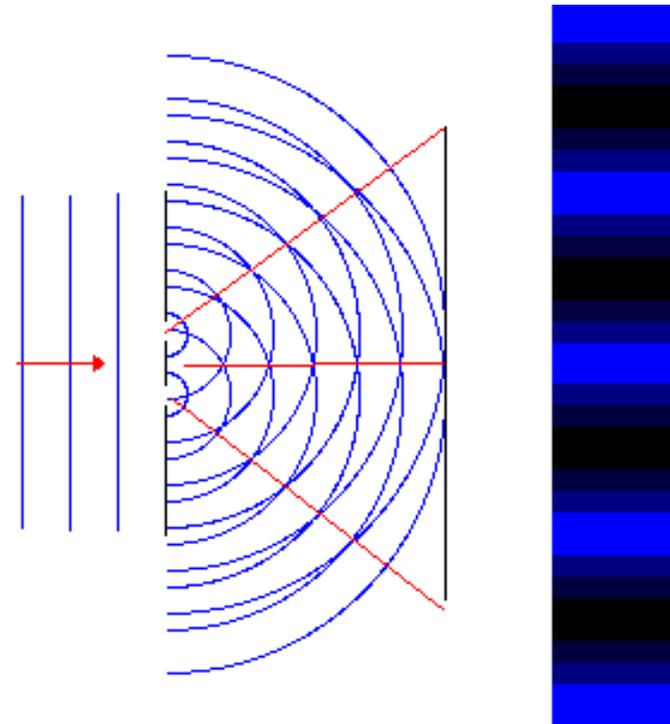
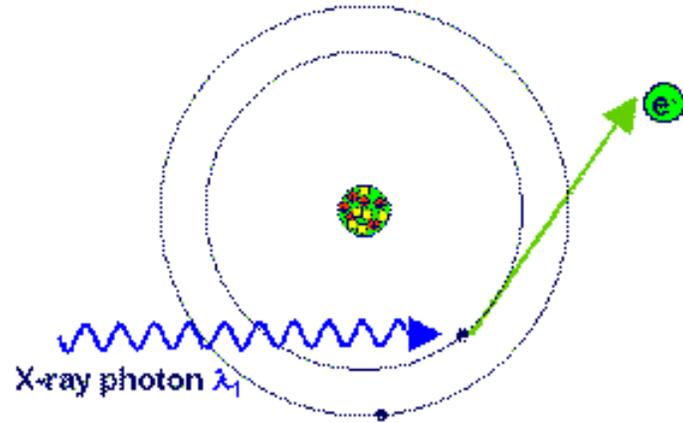
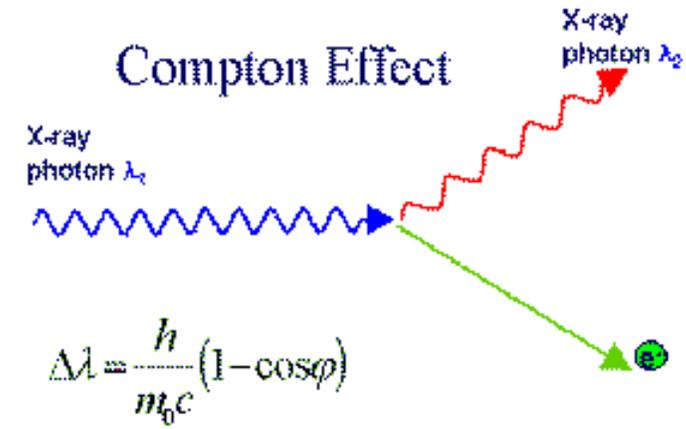


Figura di interferenza di onde
luminose

La luce si comporta come una particella:



Effetto fotoelettrico

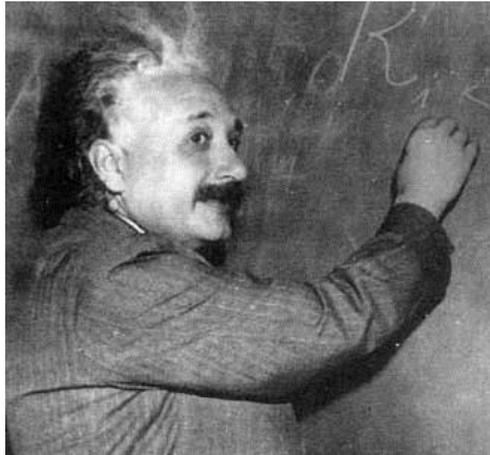


Effetto Compton

Dunque la natura della luce...

...non e` una questione molto semplice da definire. Ecco cosa ne pensano in merito due che se ne intendevano molto (ma molto) piu` di noi.

Albert Einstein, 1879 - 1955



Oggi chiunque viene da me dicendo di sapere che cos'è un fotone. Io sto studiando questo argomento da una vita ed ancora non l'ho capito.

Richard P. Feynman, 1918 - 1988



Credo di poter dire che nessuno capisca la meccanica quantistica. Evita, se puoi, di chiederti "Come mai può essere così?", perché finirai in un vicolo cieco dal quale nessuno è mai uscito



Per noi, molto operativamente

Seguiamo il consiglio di Feynman, e ci basti sapere che, a seconda delle circostanze, la luce rivela aspetti o ondulatori o corpuscolari. Allora possiamo considerare la luce come un'onda che si propaga con velocità $c=300.000.000$ m/s



λ

lunghezza d'onda della luce

Al contempo, l'onda luminosa consiste di particelle (**fotoni**) ognuno dei quali reca un'energia pari a

frequenza della luce $\nu=c/\lambda$

$$E_p=h\nu=hc/\lambda$$

h è una costante universale. $h=6.63 \times 10^{-34}$ J s = 4.14×10^{-15} eV s

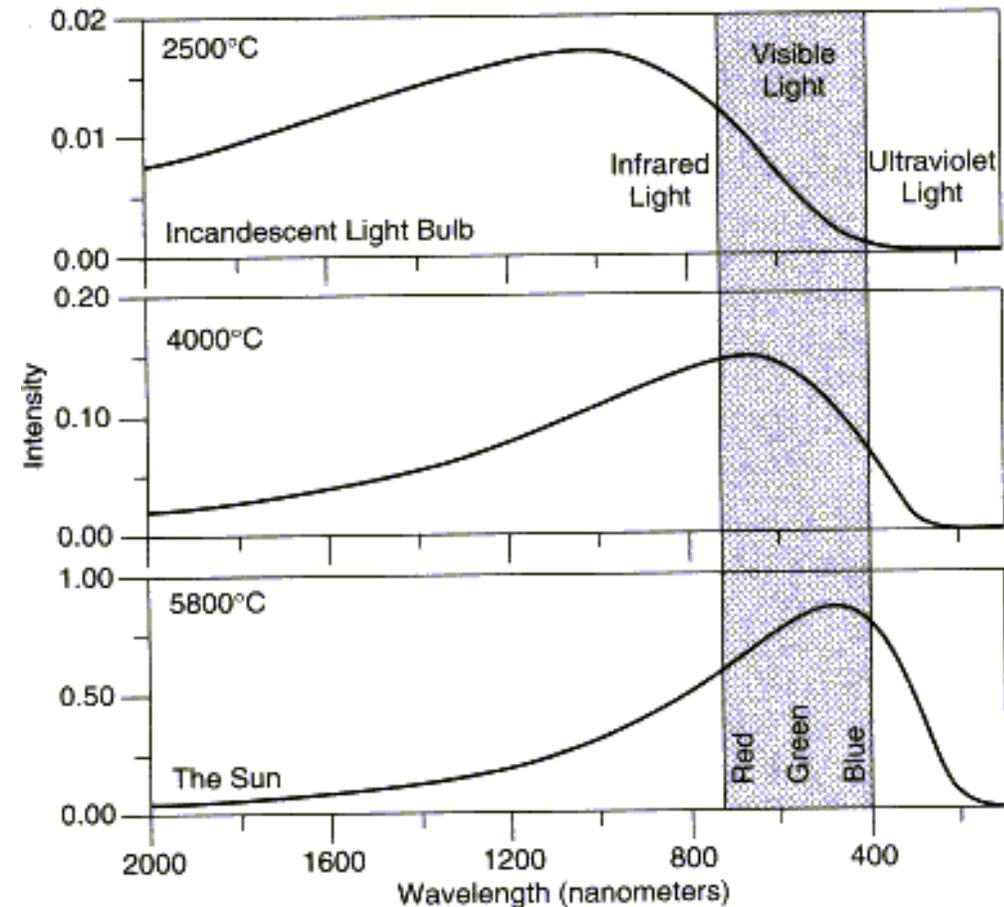
Sempre molto operativamente

Siccome il colore della luce dipende dalla lunghezza d'onda, un'onda monocromatica è data da un'onda con una singola lunghezza d'onda.

La luce bianca è data dalla sovrapposizione di onde con molte lunghezze d'onda diverse.

Quindi un fascio monocromatico contiene fotoni che hanno tutti la stessa energia.

Al contrario, luce bianca contiene fotoni la cui energia è distribuita in uno spettro molto ampio





Ancor piu` operativamente

Unita` di misura:

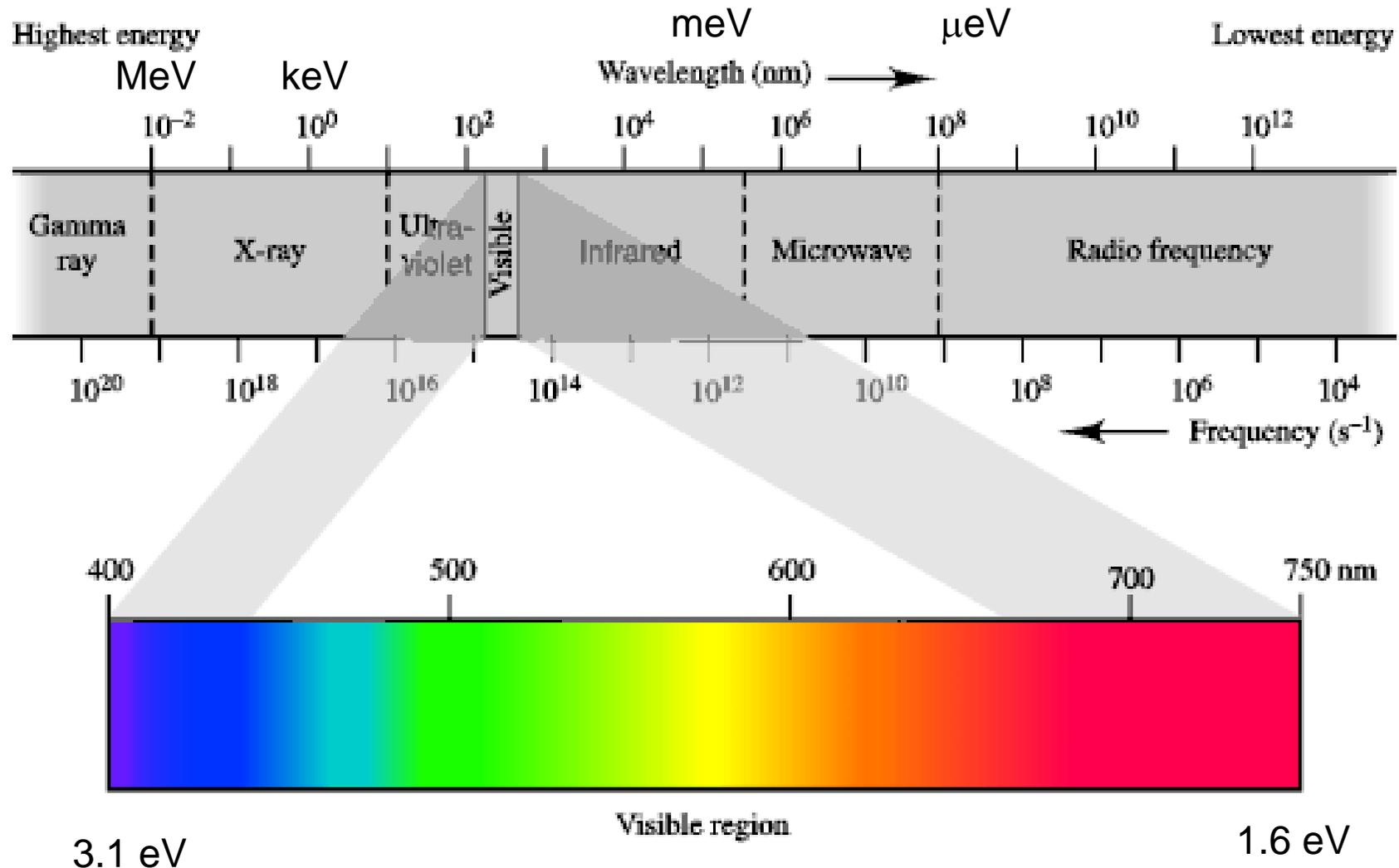
Energia: eV = 1.6×10^{-19} J

Lunghezza (d'onda): nm = 10^{-9} m
o $\mu\text{m} = 10^{-6}$ m

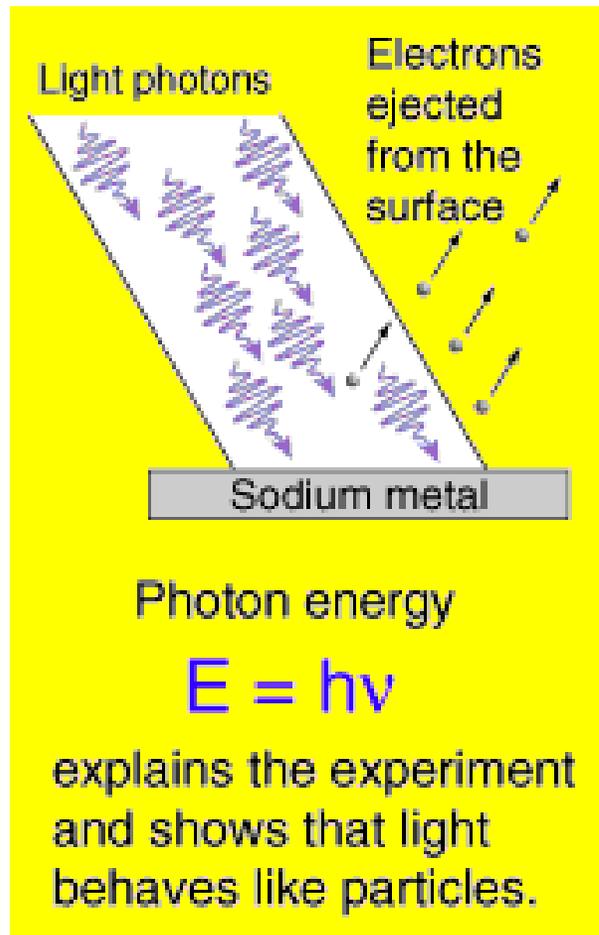
Frequenza: Hz (1 ciclo/s)
o THz = 10^{12} Hz



Lo spettro elettromagnetico



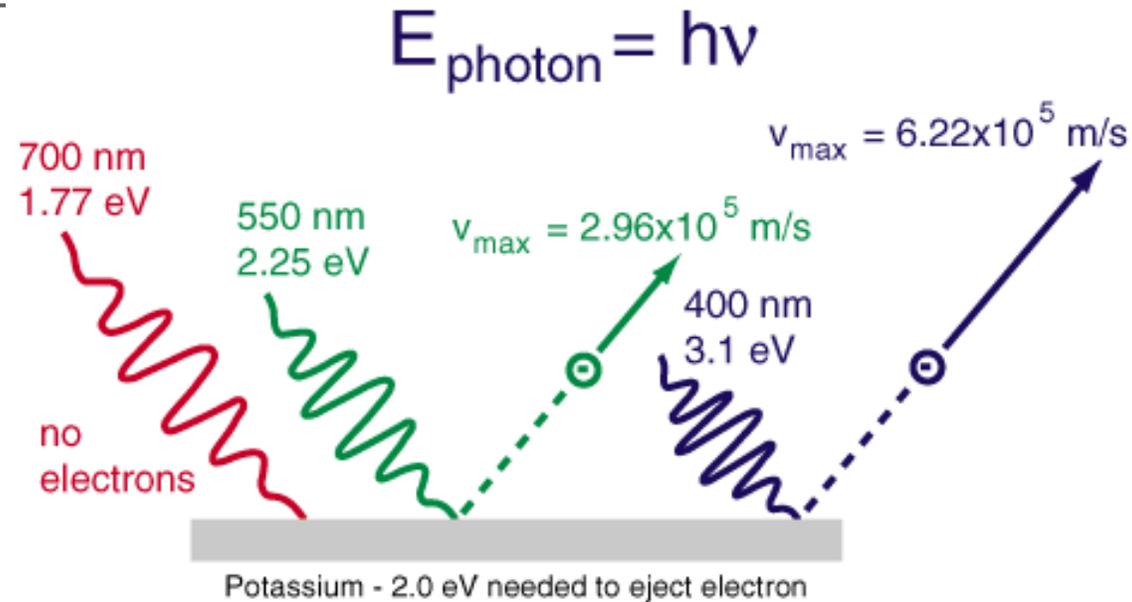
Effetto Fotoelettrico I



Non si spiega con la teoria ondulatoria!

- gli elettroni sono emessi istantaneamente
- Se aumento l'intensità della luce, cresce il numero di fotoni ma non la loro energia
- Se invio luce di lunghezza d'onda "rossa" o inferiore non accade nulla

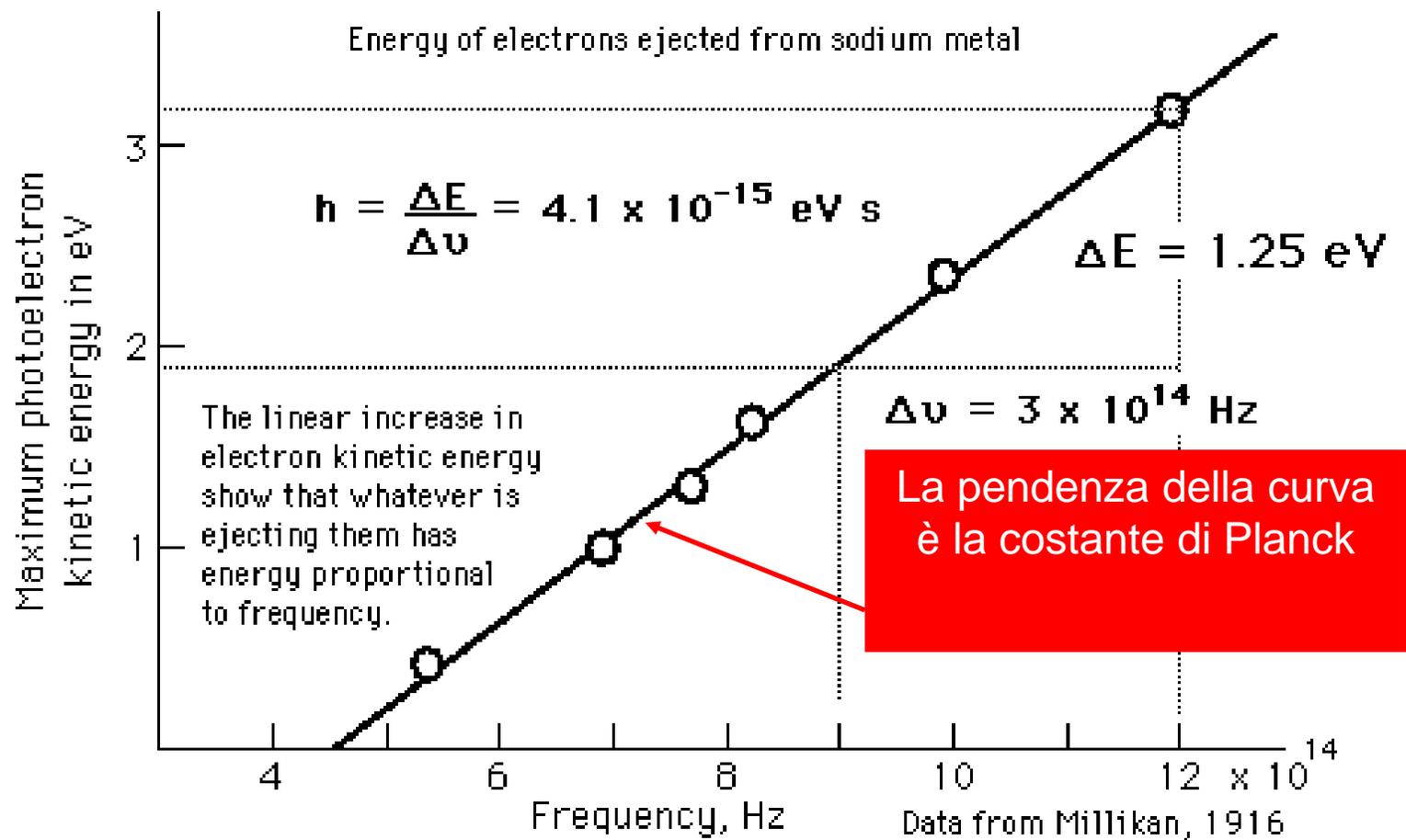
Effetto Fotoelettrico II



Photoelectric effect

I fotoni “rossi” non possiedono energia sufficiente per strappare un elettrone

Primi dati sperimentali da Millikan





Effetto Fotoelettrico II

Tutto si spiega se adottiamo la teoria dei quanti di Einstein:

- l'interazione è come quella fra due particelle, dove quella incidente cede tutta la sua energia all'elettrone
- La luce allora deve essere composta di particelle!
- Le particelle sono “pacchetti” che hanno una energia uguale alla frequenza dell'onda \longrightarrow **FOTONI**

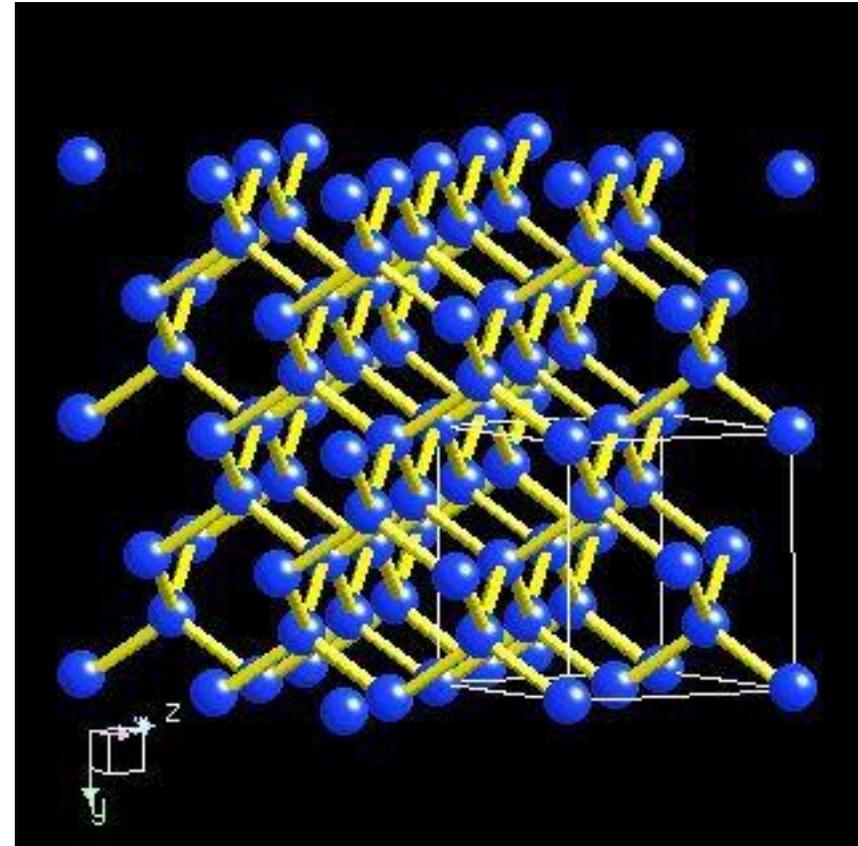
Un solido cristallino

Le proprietà di un materiale semiconduttore si possono capire tramite il modello del solido cristallino.

In tale solido N atomi con n elettroni ciascuno si dispongono in una struttura ordinata e periodica.

Gli elettroni più interni restano ben legati al nucleo dell'atomo, mentre quelli esterni sentono una forza risultante da TUTTI gli atomi del reticolo.

Gli elettroni esterni non sono localizzati sul loro atomo, ma sono distribuiti su tutto il reticolo.

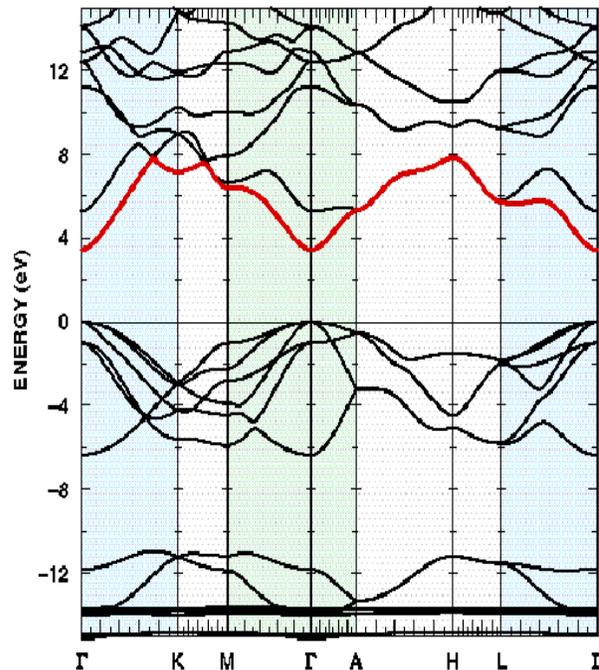


Le bande energetiche

La natura periodica delle forze nel solido cristallino forza gli elettroni a distribuirsi nelle cosiddette “bande energetiche”.



ENERGY BANDS IN WZ GaN



v97-0801/5

Se una banda (che ha un numero di “posti” fissato) è **piena**, non dà luogo a conduzione elettrica.

Nemmeno se una banda è **vuota** dà luogo a conduzione elettrica.

Pero` se una banda è “mezza piena” o “mezza vuota”, essa dà luogo a conduzione elettrica.

Energy Gap

Un isolante ed un
semiconduttore (non-
metalli) hanno sempre:

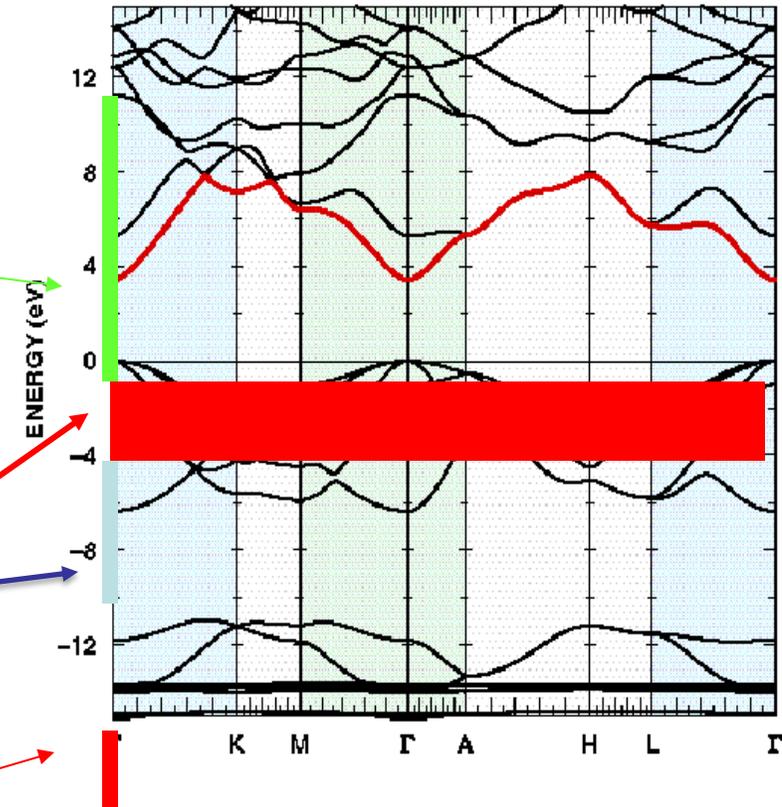
una banda vuota, detta “di
conduzione”, ad energia ancora
maggiore

una banda piena ad energia
maggiore, detta “banda di
valenza”.

n bande piene a bassa energia

E_g

ENERGY BANDS IN WZ GaN





Isolanti e Semiconduttori

$E_g > 4 \text{ eV}$

es.

| | |
|-------------------------|--------|
| SiO_2 | 9 eV |
| Si_3N_4 | 5 eV |
| C diamante | 5.6 eV |

etc.

$E_g < 4 \text{ eV}$

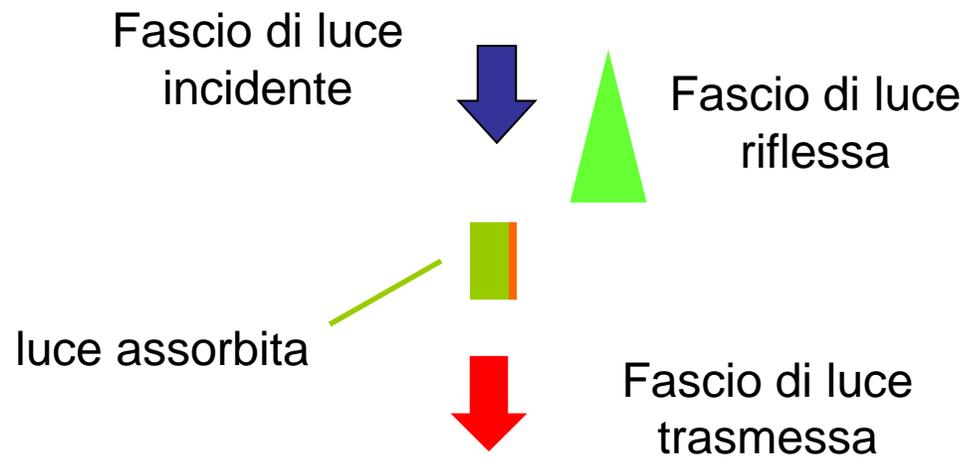
es.

| | |
|--------|---------|
| Si | 1.1 eV |
| Ge | 0.7 eV |
| SiC 4H | 3.1 eV |
| GaN W | 3.48 eV |

etc.



Interazione radiazione materia: Assorbimento Trasmissione e Riflessione



Cristalli isolanti: (quarzo, salgemma) sono trasparenti alla luce visibile

Vetri colorati: sono trasparenti per certi colori (ν di luce visibile) e ne assorbono altri

Metalli: sono riflettenti e opachi

$$I(z) = I_0 \times \exp(-\alpha z)$$

L'intensità del fascio incidente cala al crescere dello spessore di materiale attraversato

Fascio di luce incidente

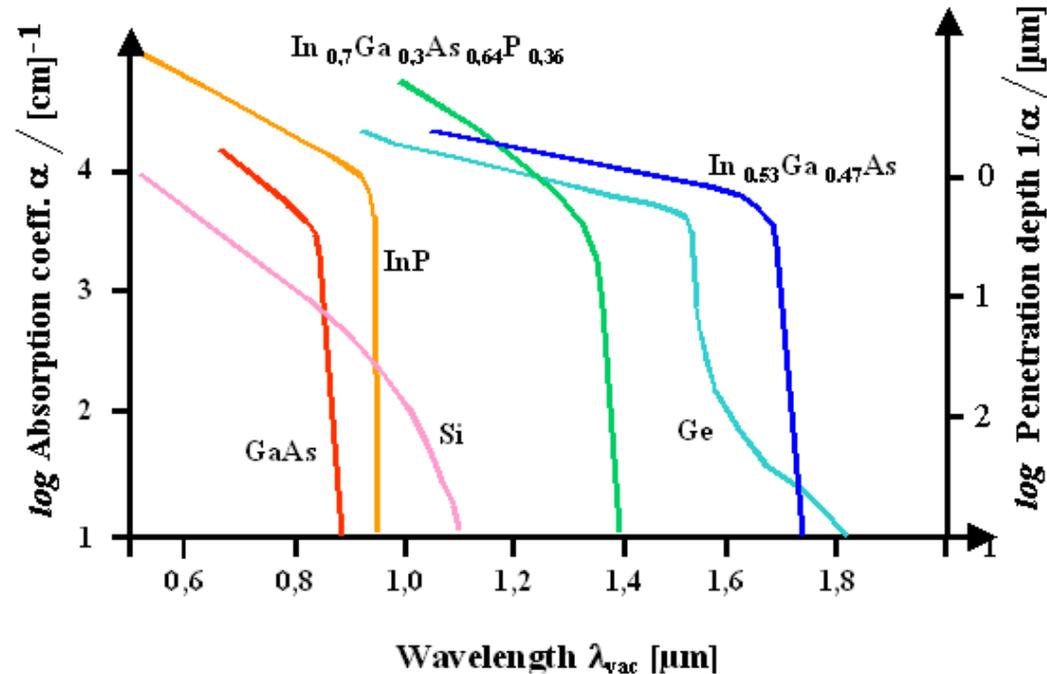


Fascio di luce trasmessa

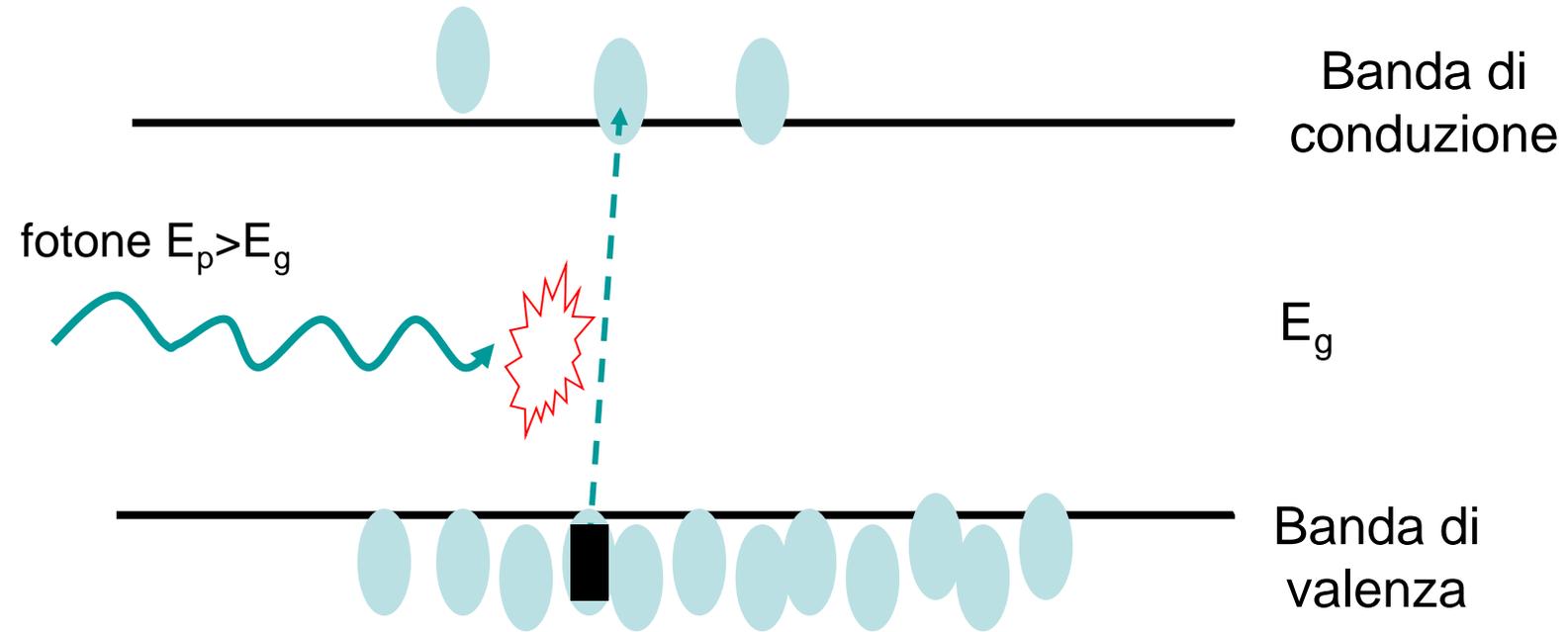


Dov'è finita la luce incidente sparita?

E' stata assorbita mediante un processo di conversione fotone - elettrone



Ecco dunque l'effetto fotoelettrico interno



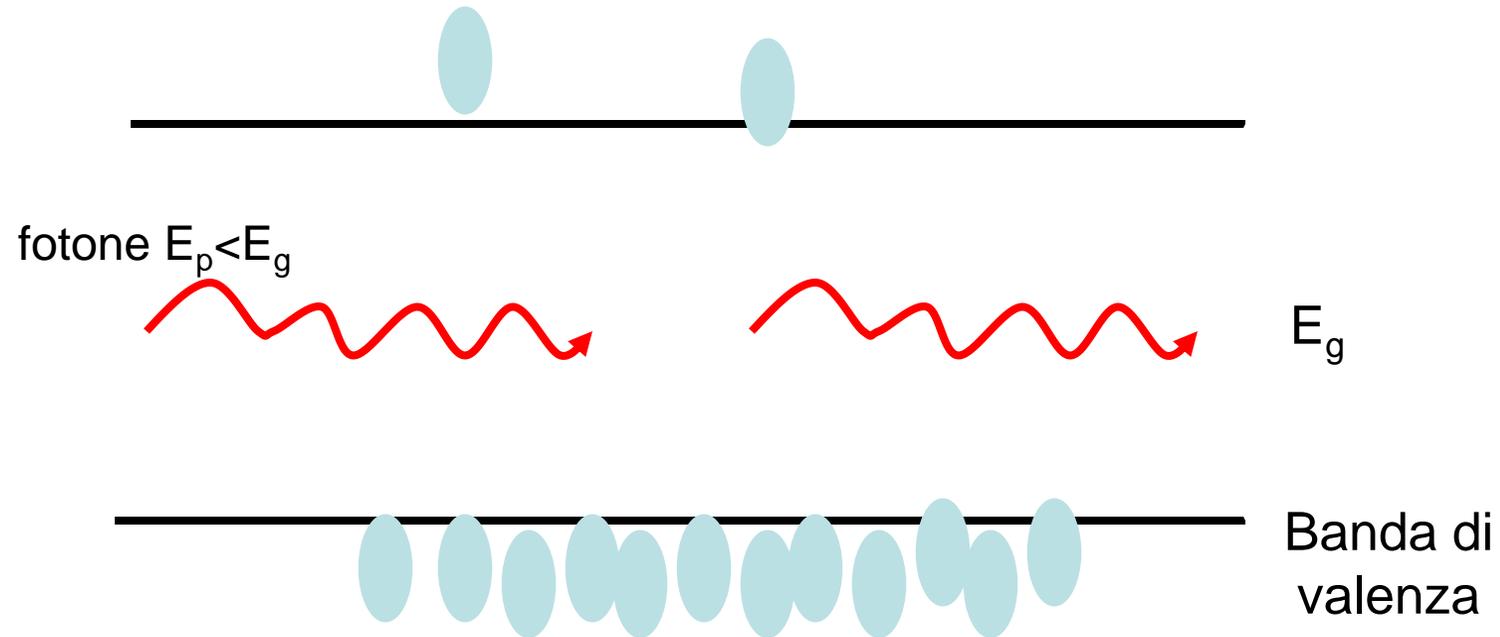
transizione di un elettrone da banda di valenza a banda di conduzione tramite l'assorbimento di un fotone



Dubbio atroce



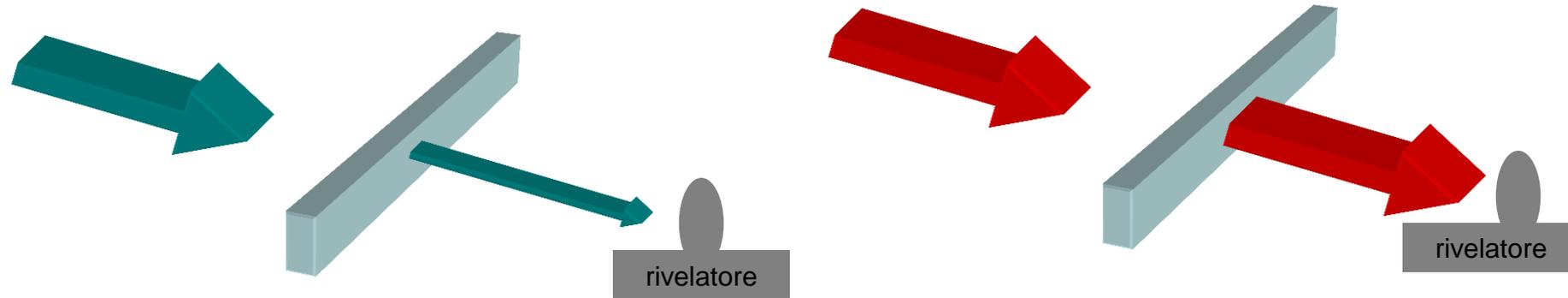
Cosa succede se l'energia del fotone E_p e' inferiore all'energy gap E_g ???



Nessuna transizione e' possibile, ed il fotone passa senza essere assorbito.

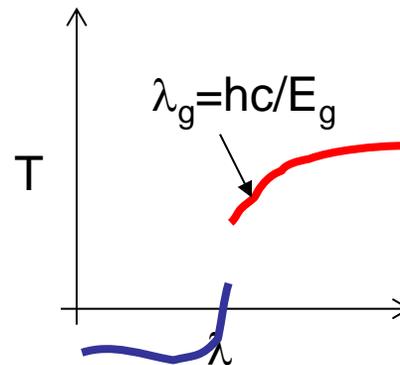
Se quindi dispongo di un fascio monocromatico

e di un campione di semiconduttore di un certo spessore, posso fare la seguente osservazione.



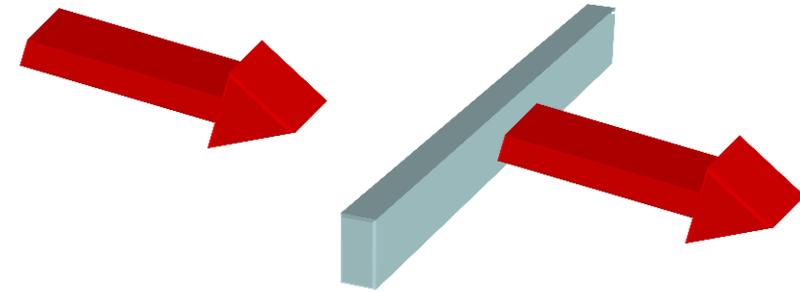
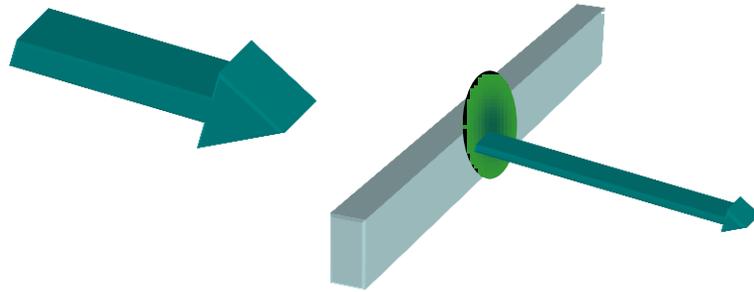
Animazione
[assorbimento](#)

per λ bassa, $E_p > E_g$
la luce viene fortemente
assorbita

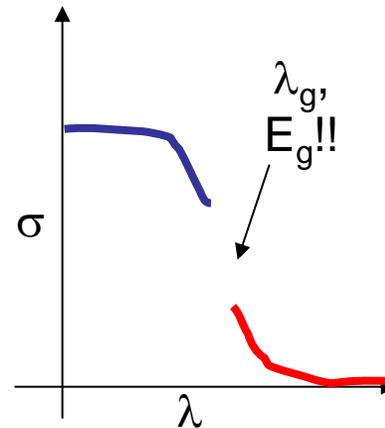


per λ alta, $E_p < E_g$
la luce passa senza
assorbimento

Fotocorrente I

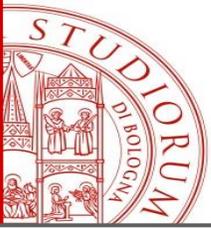


per λ bassa, $E_p > E_g$
la luce genera fotoelettroni, che
aumentano la conduttività del
campione



per λ alta, $E_p < E_g$
la luce non genera fotoelettroni,
e la conduttività del campione
rimane più bassa

[animazione fotocorrente](#)



Fotocorrente II

Con un opportuno circuito di rivelazione posso misurare allora la fotocorrente indotta dal fascio di luce (che deve avere un'energia maggiore dell'Energy gap del materiale!)

Misura del gap energetico in semiconduttori

Misura di EG

Scopo

Lo scopo di questa esperienza è la determinazione della misura dell'energy gap di due campioni di semiconduttori (Silicio e Germanio) per mezzo dell'effetto fotoelettrico interno.

L'effetto fotoelettrico interno, è un processo “a soglia” perché l'energia del fotone incidente non può essere ceduta ad un elettrone se essa è inferiore al valore di soglia, ovvero per $\lambda > \lambda_s$.

$$\lambda_s = \frac{hc}{E_g}$$



aumento della densità di portatori liberi



diminuzione della resistenza del semiconduttore
diminuzione dell'intensità della luce da esso trasmessa.



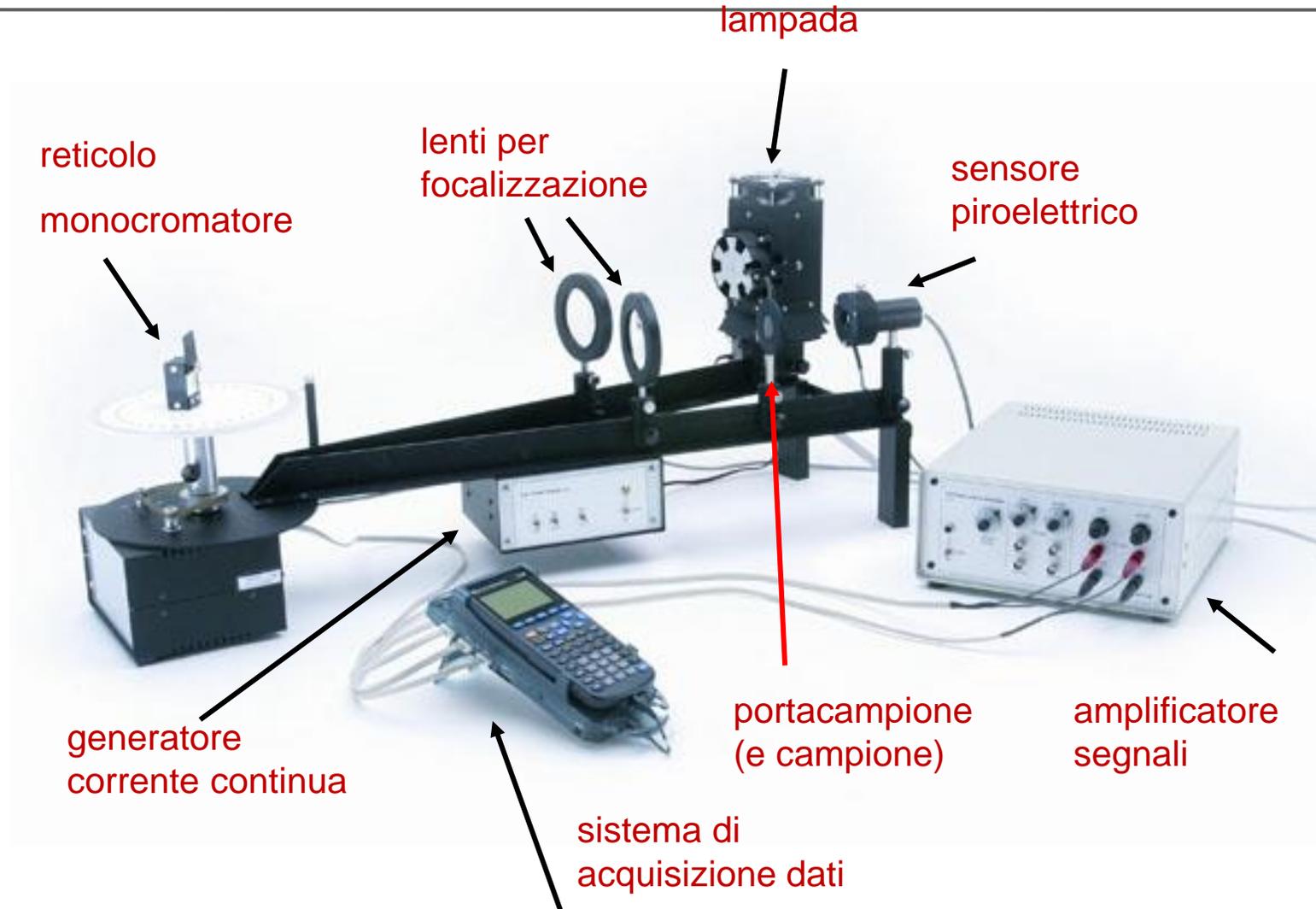
Misura di E_G

L'osservazione simultanea dei sopracitati processi permette di enfatizzare l'aspetto quantistico del fenomeno e di meglio comprendere il processo fisico dell'assorbimento di radiazione elettromagnetica da parte di un solido

L'esperimento consiste nel far incidere su un campione semiconduttore un fascio di luce monocromatica e nel misurare, in funzione della lunghezza d'onda λ della luce incidente, sia la variazione di resistenza del campione sia l'intensità della luce da esso trasmessa.

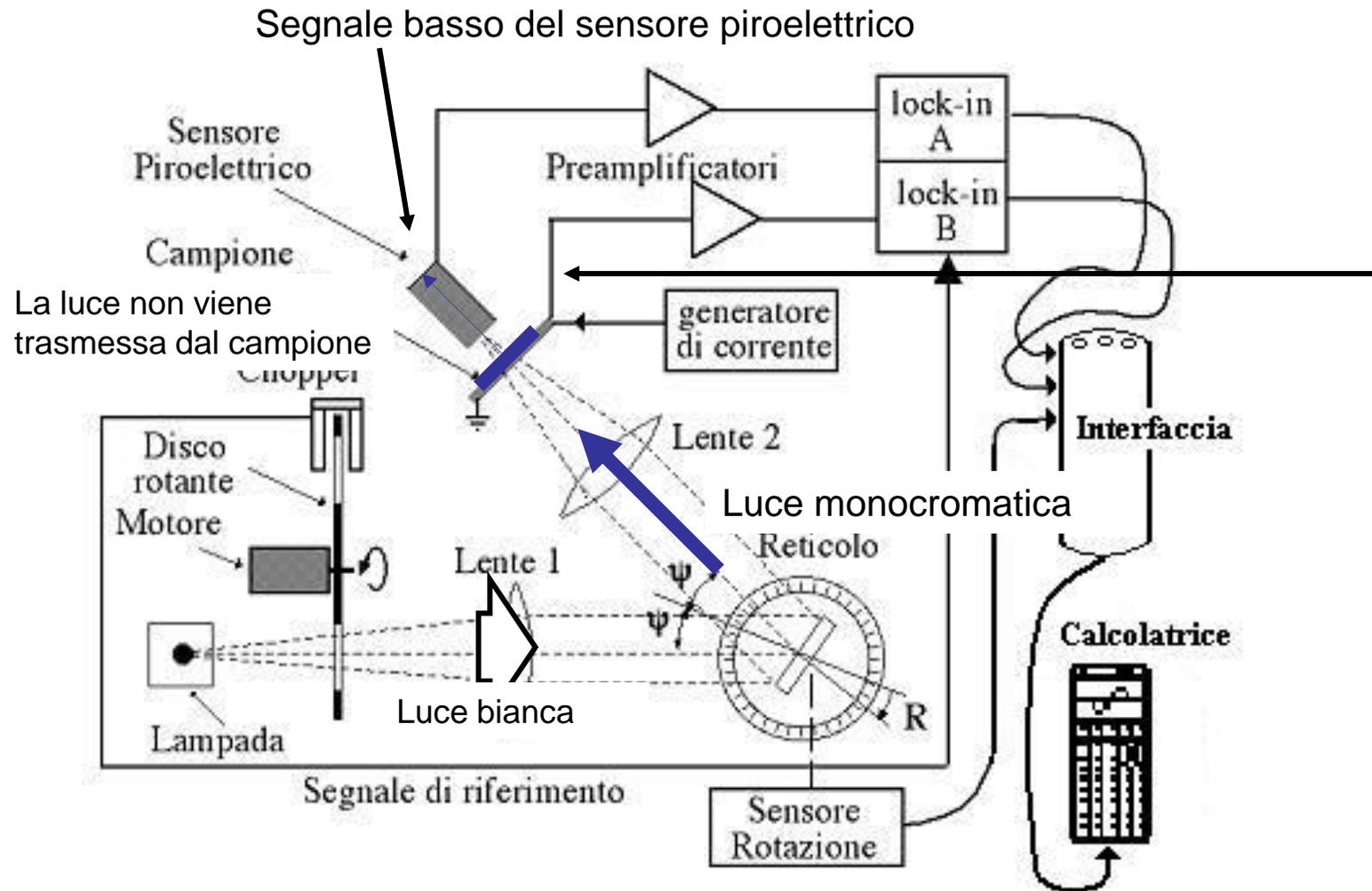
La variazione di resistenza, poiché il cristallo viene alimentato da un generatore a corrente costante, si traduce in una variazione della differenza di potenziale ai suoi capi (segnale fotoconduttivo o di assorbimento), mentre il segnale di trasmissione si rileva con un sensore di luce posizionato dietro al campione.

L' apparato sperimentale



L' esperimento - 1

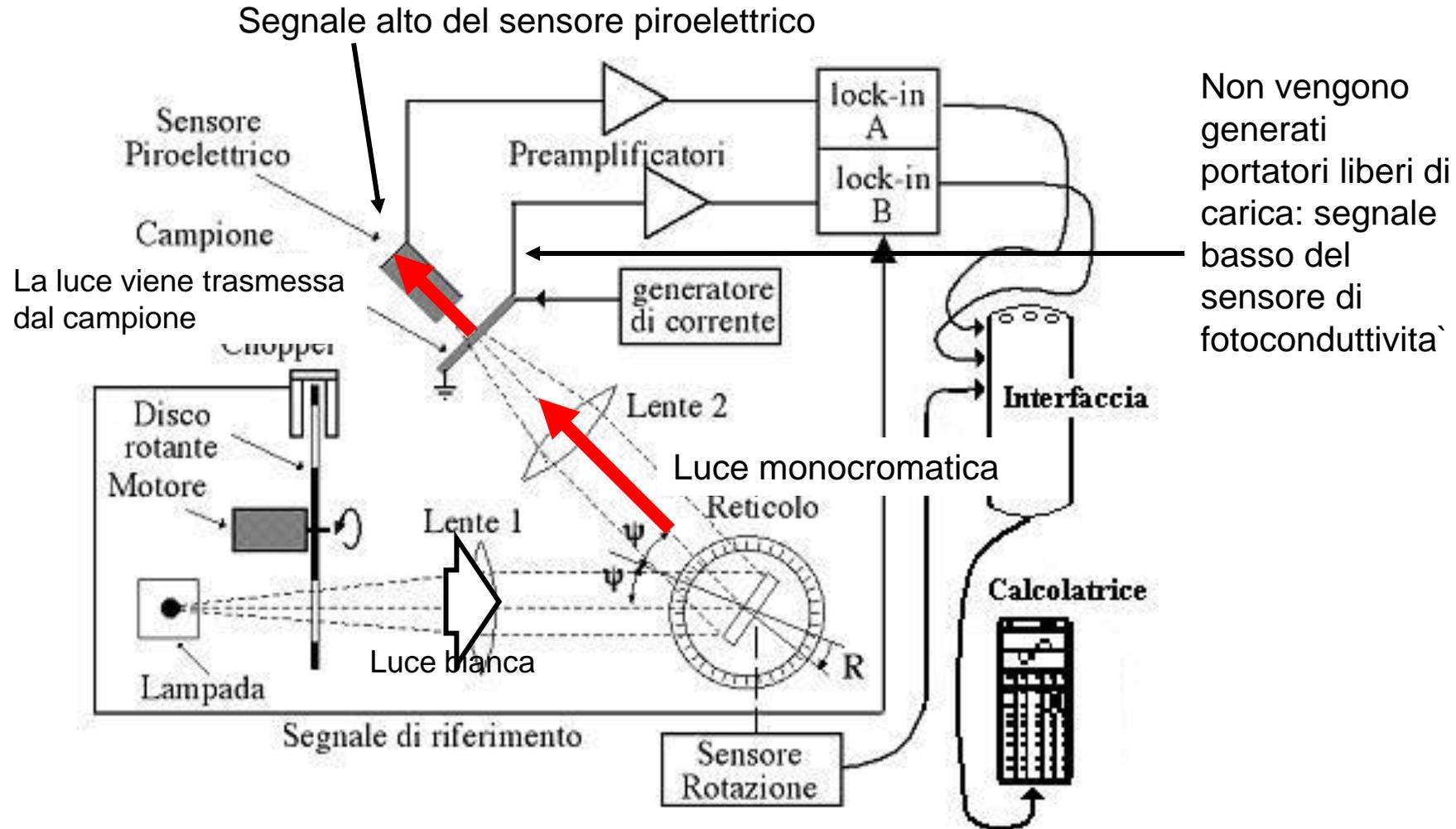
Illuminazione con fotoni di energia superiore al gap ($\lambda < hc/E_{\text{gap}}$)



Vengono generati portatori liberi di carica: segnale alto del sensore di fotoconduttività

L' esperimento -2

Illuminazione con fotoni di energia inferiore al gap ($\lambda > hc/E_{\text{gap}}$)

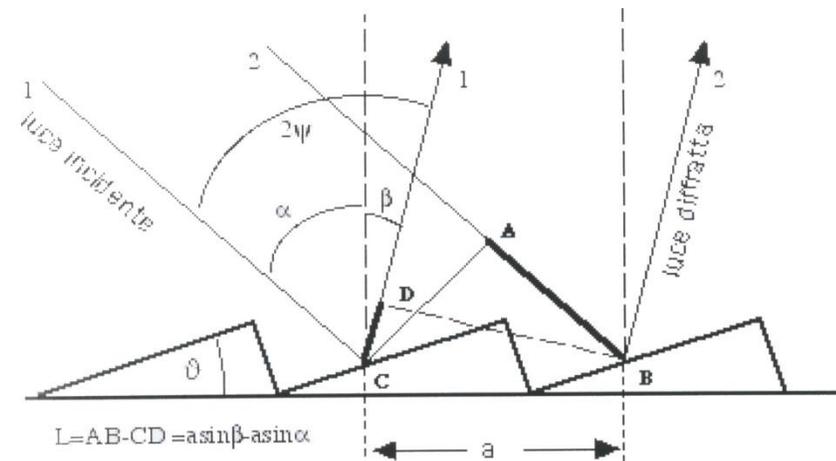


Strumentazione

Reticolo di diffrazione in riflessione

Il reticolo di diffrazione è un **elemento ottico dispersivo**. Esso è una superficie riflettente che presenta una successione di gradini paralleli incisi ad una distanza **a** , detta passo del reticolo. L'angolo ψ formato dai gradini con la superficie (blazing angle) è in genere di pochi gradi e la normale ad essa è detta normale del reticolo.

Il reticolo (in questo apparato con $a = 1.667$ mm) è **fissato su di un goniometro mosso da una cinghia**, collegata ad un sensore di rotazione ed azionata da un motore c.c. e motoriduttore, con verso e velocità di rotazione controllabili da deviatori posti sulla scatola sotto il vertice del banco ottico.





Strumentazione

Sensore piroelettrico

I sensori piroelettrici permettono la misurazione della luce trasmessa con una risposta piatta ovvero proporzionale all'intensità luminosa ma *indipendente dalla lunghezza d'onda*

Il sensore è composto da un sottile strato di LiTa (Tantalato di Litio presenta una polarizzazione dielettrica spontanea che varia con la temperatura e che si annulla al di sopra di una temperatura critica detta temperatura di Curie a circa 600°C) con due elettrodi metallici depositati sulle due facce..

Quando la temperatura del sensore varia (nel caso di questo esperimento perchè esso è alternativamente illuminato e oscurato dalla luce modulata dal chopper) anche la polarizzazione e quindi la carica del condensatore varia. Si ha, quindi, un passaggio di corrente attraverso il circuito di amplificazione a cui il sensore va collegato.

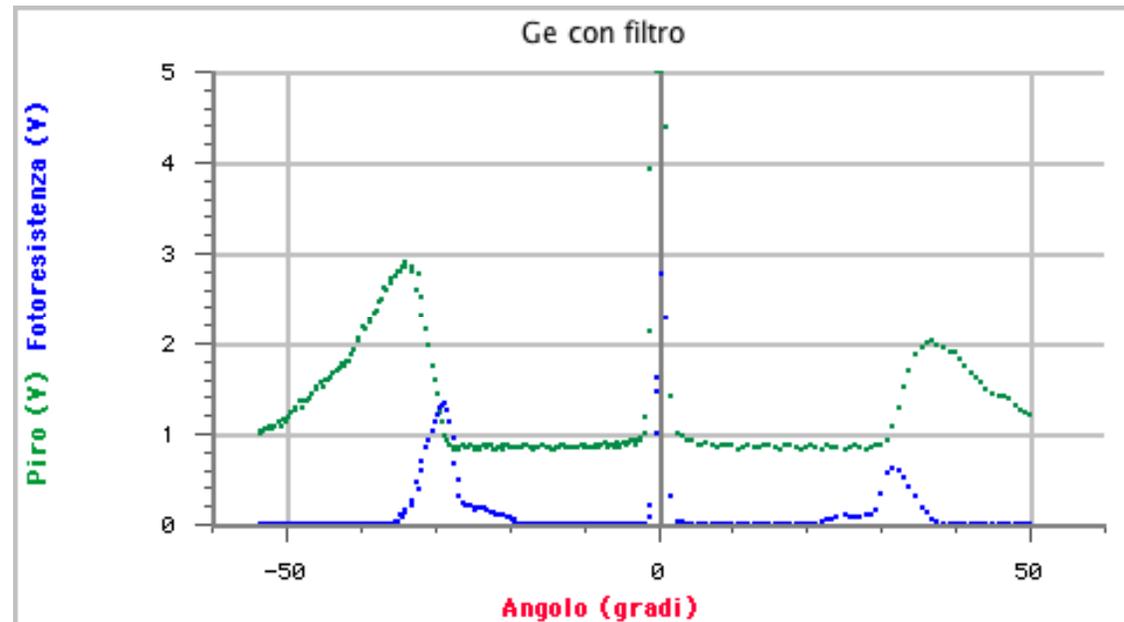
Questo tipo di sensore è pertanto sensibile solo alle variazioni di illuminamento, e non alle condizioni di illuminamento statico.

Procedura sperimentale

Campioni di semiconduttore

I campioni utilizzati sono di Silicio e di Germanio di spessore di qualche decimo di millimetro per permettere la trasmissione di un fascio di luce sufficientemente intenso.

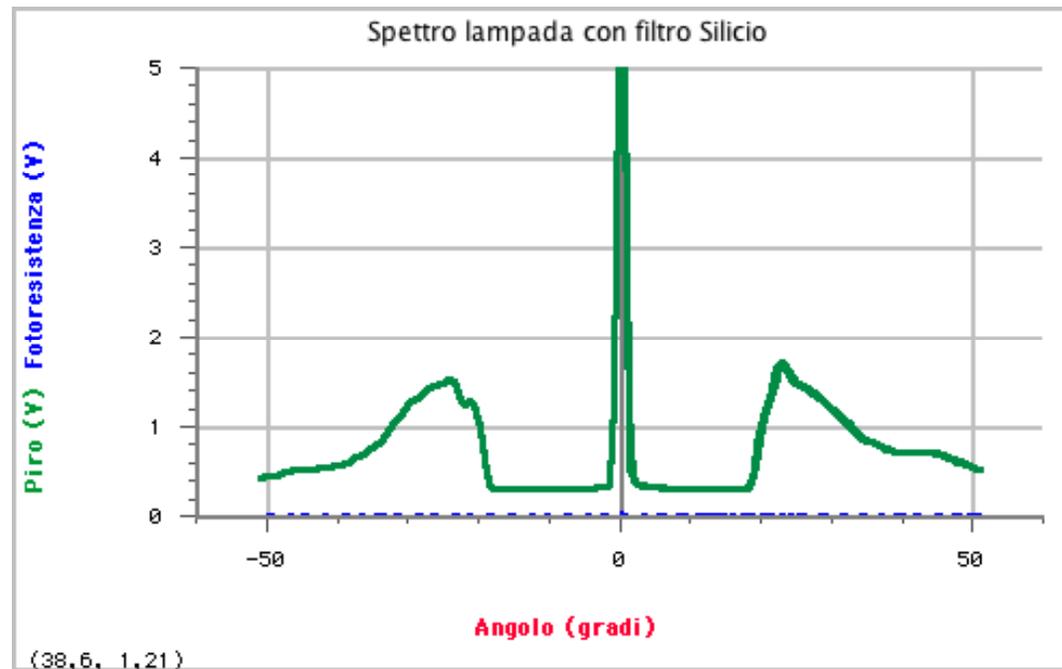
Al ruotare del goniometro varia la lunghezza d'onda incidente sul campione e viene acquisito uno spettro, ovvero un grafico dell'intensità trasmessa e della resistenza ai capi del campione in funzione dell'angolo (=lunghezza d'onda)



Procedura sperimentale

Elaborazione dati

Si preleva una spettro della sola emissione della lampada che serve per normalizzare lo spettro ottenuto dal campione illuminato dalla medesima lampada.



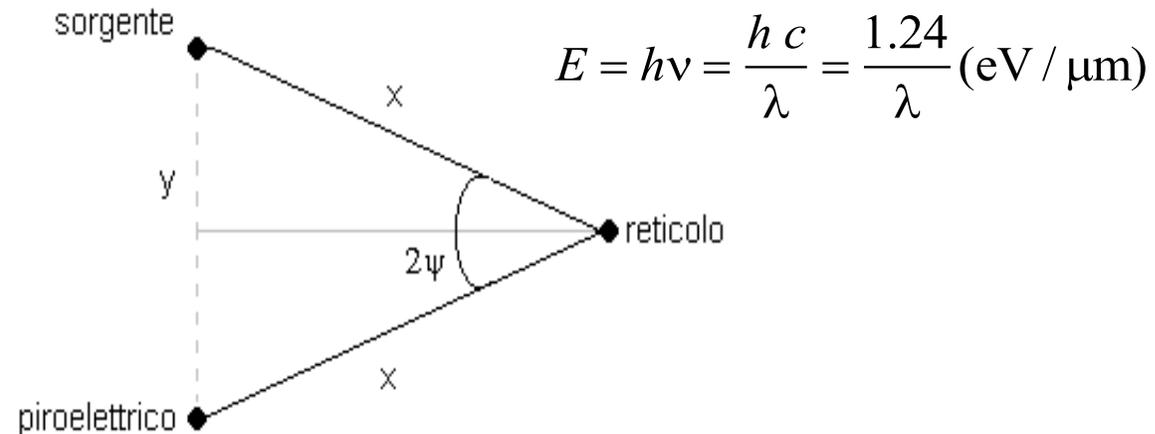
Procedura sperimentale

Elaborazione dati

Si converte l'angolo di rotazione del goniometro in lunghezza d'onda attraverso considerazioni geometriche. Si calcola il valore della **lunghezza d'onda** (in μm) corrispondente alla rotazione R (in gradi) tramite la relazione

$$\lambda = 2 a \cos \psi \sin R$$

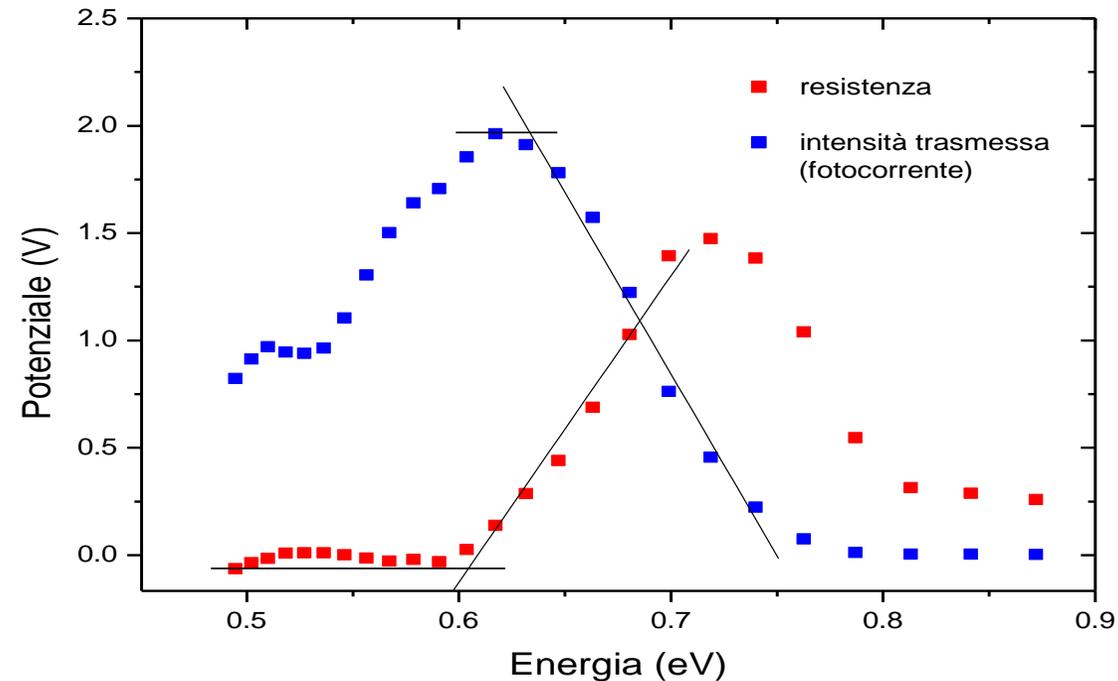
che può essere poi convertita in energia



Procedura sperimentale

Calcolo dell'Energy gap

I valori dell'energy gap si ottengono individuando con due rette orizzontali il fondo dei segnali nella zona ad energie minori (λ maggiori) ed interpolando con due rette i fronti di salita e discesa; le intersezioni delle rette inclinate con quella orizzontali forniscono i due valori di soglia, cioè l'energia minima in cui inizia l'effetto fotoelettrico





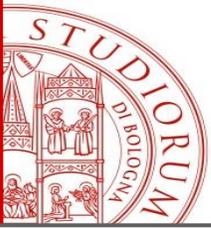
Procedura sperimentale

Ottenuti quattro valori di E_g (2 per le misure di resistenza e due per la misure di trasmissione, in senso orario e antiorario), si possono ricavare i valori finali facendone la media e come errore considerare lo scarto quadratico medio.

Si possono infine confrontare i risultati ottenuti con i valori tabulati in letteratura a temperatura ambiente:

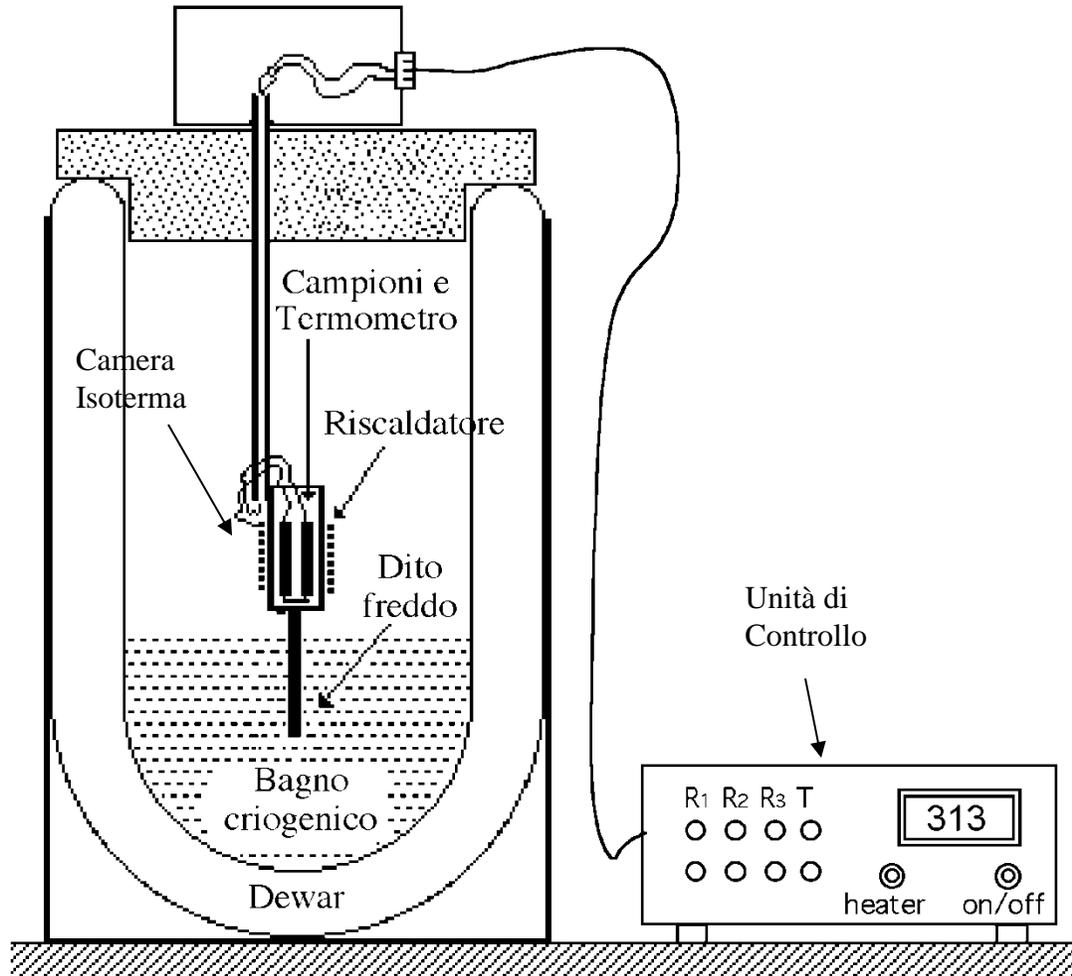
Germanio 0.66eV

Silicio 1.12eV



Misura delle proprietà elettriche di metalli e semiconduttori

Apparato Sperimentale



L'apparato sperimentale è composto da:

Un *dewar* d'acciaio per isolare il sistema dall'ambiente esterno

Una *camera isoterma* in cui sono posti i campioni

Un *termometro a diodo* per misurare la temperatura

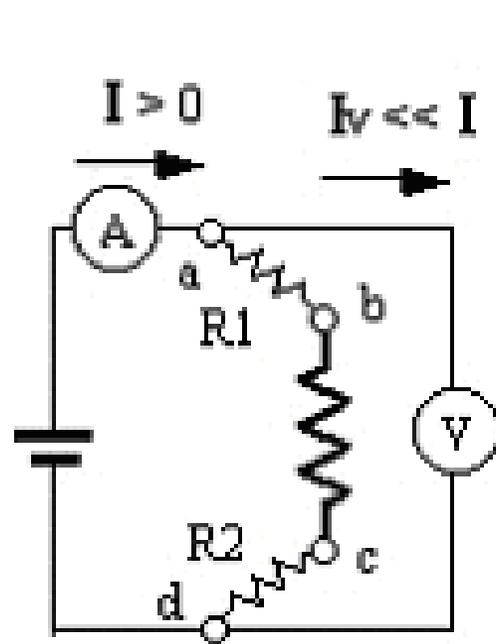
Un *riscaldatore ad effetto Joule* e un *dito freddo* per fare variare la temperatura all'interno della camera

L'*unità di controllo* che amplifica e consente la raccolta dei dati

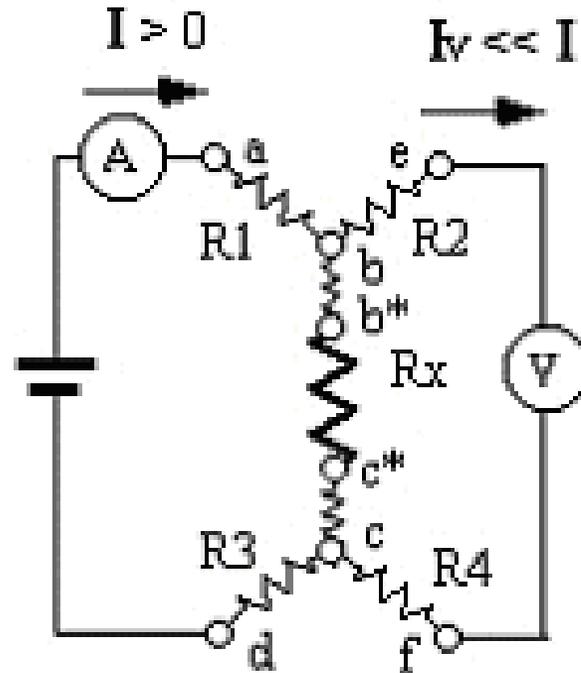
Apparato Sperimentale



Misure voltamperometriche



Ohmetro



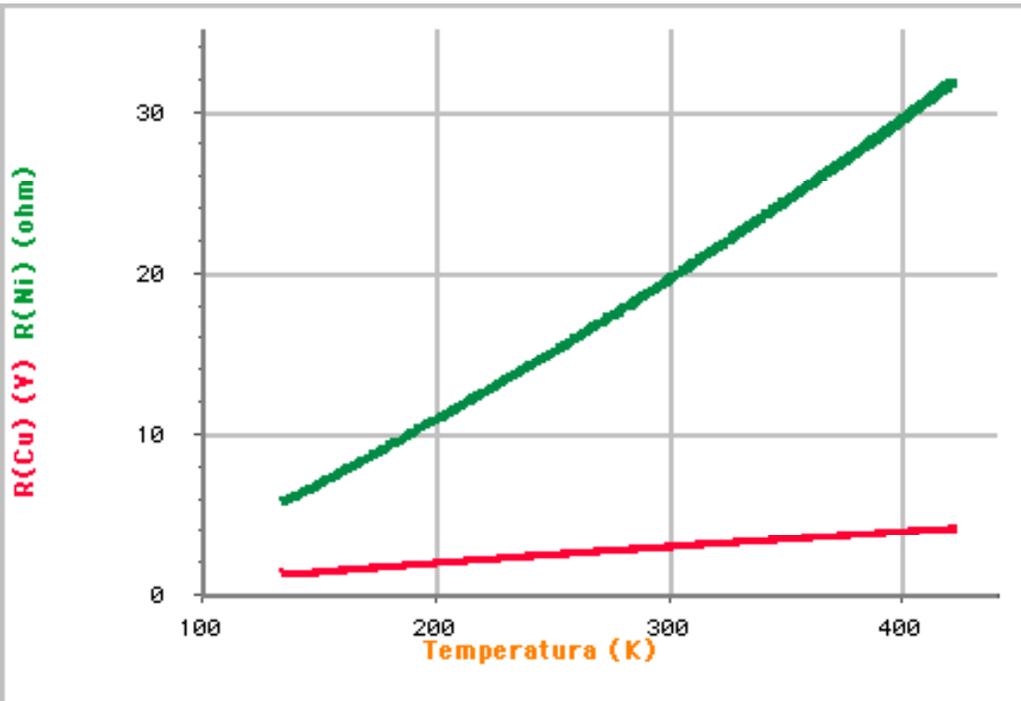
Misura a 4 terminali

il *metodo voltamperometrico a quattro terminali*: per ogni campione sono collegati quattro fili, di cui due servono per fornire una corrente costante e i restanti due per misurare la differenza di potenziale, quindi la resistenza è ricavata tramite la legge di Ohm

il *metodo voltamperometrico a due terminali (ohmetro)*: per ogni campione sono collegati due fili, che servono sia a fornire corrente costante che per misurare la differenza di potenziale, quindi la resistenza è ricavata tramite la legge di Ohm



Comportamento e analisi dati dei metalli



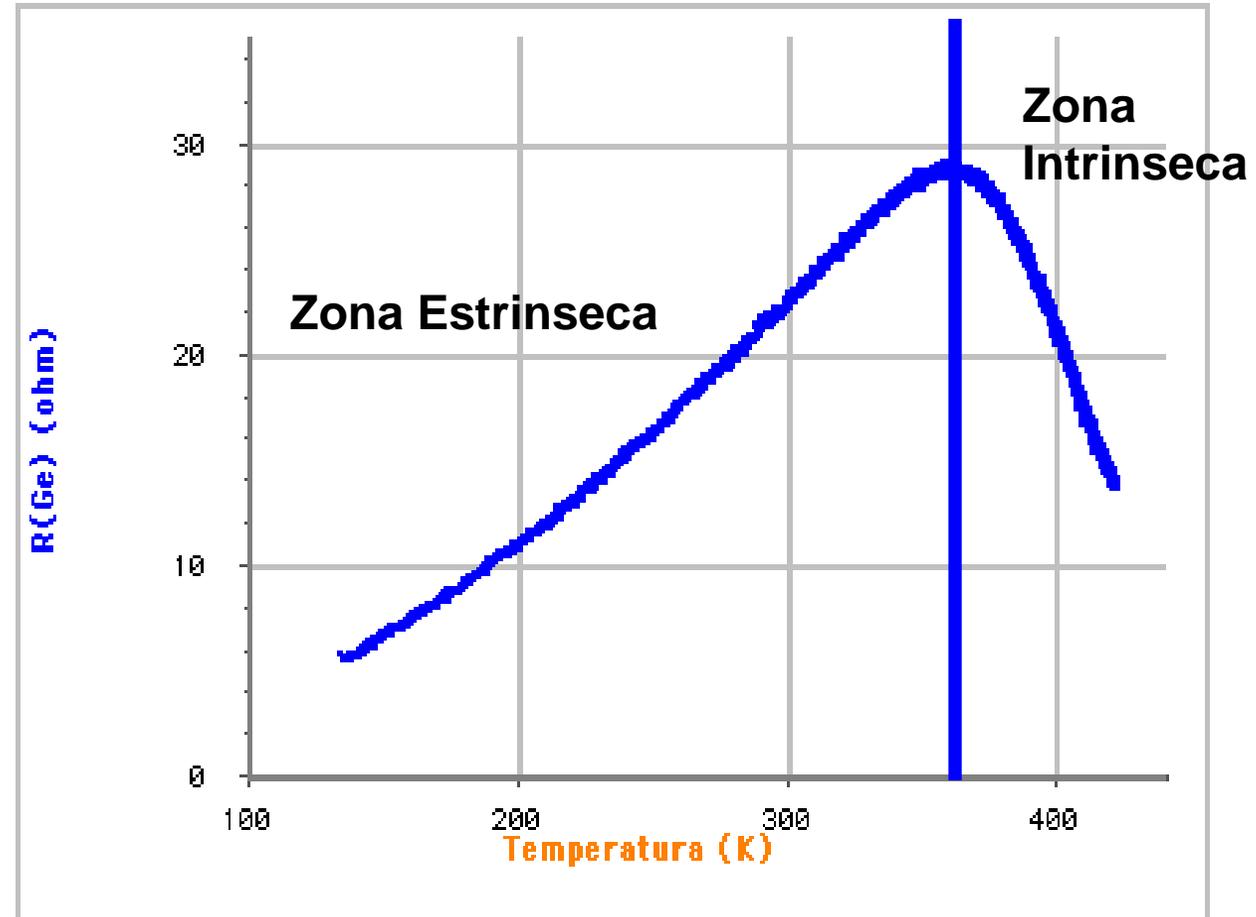
La resistenza elettrica nei metalli aumenta all'aumentare della temperatura che equivale alla crescita dell'ampiezza dei moti vibratori degli ioni reticolari, quindi una maggiore probabilità che gli elettroni vengano disturbati nel loro moto

Nell'analisi dati dei campioni metallici si calcolerà la resistività di Rame e Nickel, conoscendo i parametri geometrici dei campioni e si confronterà il comportamento di questa grandezza nei due diversi materiali

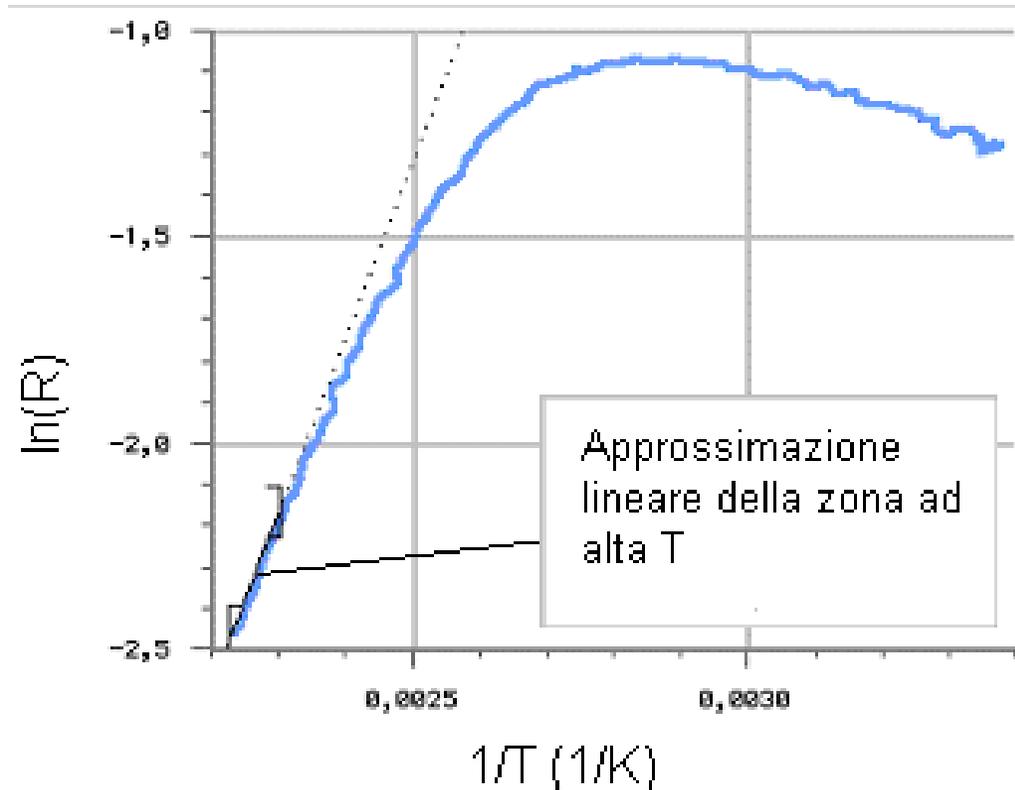
Comportamento dei semiconduttori

L'aumento di temperatura provoca la rottura dei legami chimici (eccitazione termica), trasformando gli elettroni di valenza in elettroni di conduzione. Questo comportamento è detto **intrinseco**.

A temperature basse (regime **estrinseco**) la resistività è determinata essenzialmente dai portatori dovuti al drogante.



Analisi dati del campione semiconduttore



Ad alte temperature, nel regime intrinseco, l'andamento della resistenza in funzione della temperatura, rielaborate in maniera appropriata, permette di ricavare il valore del **band gap** ossia la distanza energetica che intercorre tra banda di valenza e banda di conduzione per il campione di germanio.

