

## Laboratorio 8: Misura della resistività e di altri parametri elettrici di un semiconduttore per applicazioni sensoristiche

*LABORATORIO: stanza C015 - Settore Fisica della Materia, viale Berti-Pichat 6/II*

L'attività prevista è mirata a far prendere contatto gli studenti con alcune strumentazioni scientifiche per la caratterizzazione elettrica di semiconduttori utilizzate nell'ambito della ricerca applicata.

La misura che verrà eseguita dagli studenti è una caratterizzazione **TLM (transmission line method)** che permette di estrarre parametri elettrici del campione semiconduttore preso in esame.

All'interno del laboratorio di semiconduttori la tecnica di caratterizzazione TLM è al centro di una linea di ricerca nella quale si stanno studiando le proprietà di carburo di silicio (semiconduttore a larga gap) in relazione alla realizzazione di dispositivi sensoristici.

Gli studenti caratterizzeranno elettricamente i campioni (film sottili di carburo di silicio utilizzati per sensori di pressione e sistemi micro- e nano-elettromeccanici) in modo da estrarre la **resistività** e la **resistività specifica di contatto** che sono parametri determinanti a livello di ricerca applicativa nello studio della realizzazione dei dispositivi finali.

Gli studenti prenderanno coscienza dell'importanza della loro prova con una introduzione iniziale per quanto riguarda l'inserimento di essa nel **progetto di ricerca**; oltretutto tale introduzione richiamerà concetti fondamentali della **fisica di base** e guiderà gli studenti passo dopo passo in tutto lo svolgimento dell'**esperienza di laboratorio**.

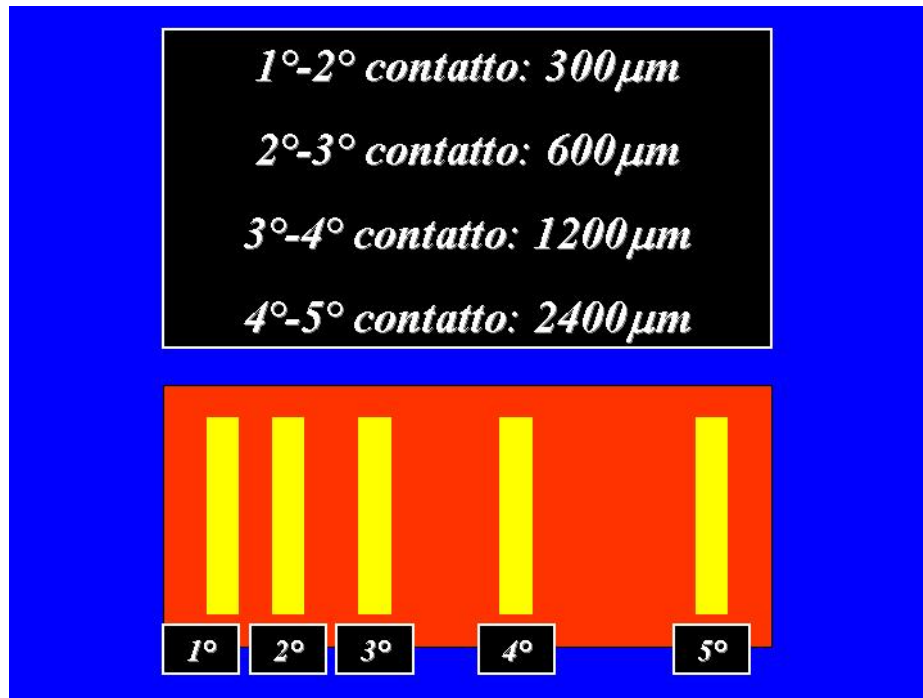
Oltretutto l'esperienza proposta è ideale per gli studenti di **scuole medie superiori** visto che si basa su conoscenze teoriche di base e presenti nei programmi di fisica previsti sui temi dell'elettromagnetismo.

La prova infatti può essere anche vista come una verifica della prima e della seconda **legge di Ohm** e quindi assume oltre che **valenza scientifica** (per i risultati che se ne ottengono) anche **valenza didattica**. Gli studenti possono eseguire ogni passo della prova agendo personalmente su strumentazioni scientifiche quali un micromanipolatore, un amperometro, un voltmetro etc.... comprendendo perfettamente la fisica che sta alla base della prova di laboratorio.

Più in particolare l'esperienza si svolgerà nel seguente modo:

- Gli studenti prepareranno i campioni di carburo di silicio (SiC) sul portacampione del micromanipolatore con il quale verranno contattati gli strumenti di misura.
- Il micromanipolatore è uno strumento che permette di contattare campioni su distanze micrometriche; gli studenti utilizzeranno tale strumento e tramite un microscopio posizioneranno le punte del micromanipolatore sui 'pads' ohmici già evaporati sul campione di SiC;
- I pads ohmici hanno la geometria disegnata in figura 1 e quindi permettono di posizionare le punte in modo da eseguire le misure con diverse distanze tra i contatti (le distanze sono quelle tra i pads segnalate in figura; non ha importanza dove viene posizionata la punta del micromanipolatore perché automaticamente tutto il pad diventa una superficie equipotenziale);
- Poi gli studenti dovranno eseguire la misura della **caratteristica corrente-tensione (I-V)** al variare della distanza  $l$  tra i contatti e verificare la linearità delle curve I-V e quindi

l'ohmicità del dispositivo (la misura I-V viene schematizzata in fig.2, al variare della tensione di polarizzazione applicata al campione si misura la corrente);



**Figura 1** Geometria dei contatti ohmici (pads) sul campione di carburo di silicio.

- A questo punto per ogni caratteristica corrente-tensione (rilevata ad una diversa distanza tra i contatti) verrà calcolata la corrispondente resistenza totale che dalla formula:

$$R_{tot} = 2R_C + \left[ \frac{\rho}{wt} \right] l$$

risulta essere dipendente dalla resistenza di contatto  $R_C$ , dalla resistività  $\rho$  ed è una funzione lineare di  $l$  (distanza tra i contatti) una volta noti i parametri  $w$  (dimensione laterale dei pads) e  $t$  (spessore del campione).

- A questo punto variando la distanza tra i contatti, da un grafico come quello di fig.3 è possibile ricavare il parametro  $\rho$  del materiale e la resistenza  $R_C$  dei contatti ohmici utilizzati.

La caratterizzazione TLM sarà poi eseguita anche al variare della **temperatura** per monitorare la variazione dei parametri elettrici e per testare il materiale e i contatti ohmici a temperature ben più alte di quella ambientale. Tali temperature ricalcano un'ottima simulazione delle condizioni ambientali nelle quali i dispositivi finali devono lavorare (*es: sensori di pressione utilizzati per monitorare i livelli di idrogeno nei motori di macchine da corsa*).

Una breve relazione comprendente la **descrizione dell'esperimento** e dei **principi fisici** su cui si basa la misura, oltre che un breve cenno al **contesto di ricerca** in cui si inserisce l'esperimento, verrà consegnata agli studenti **durante la prova**.

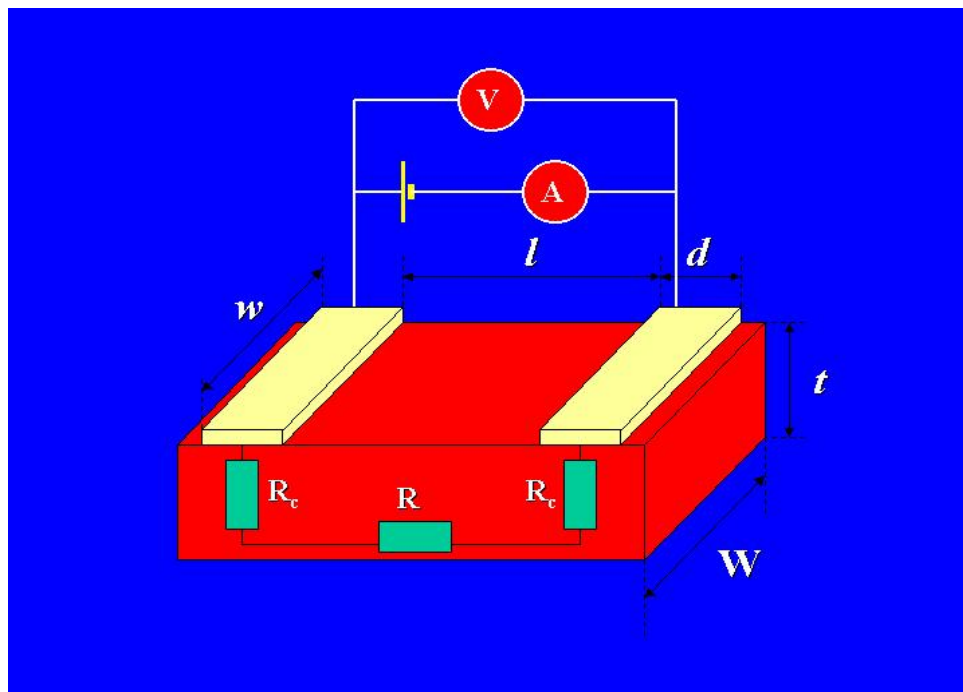


Fig. 2 Set-up sperimentale per la caratterizzazione TLM.

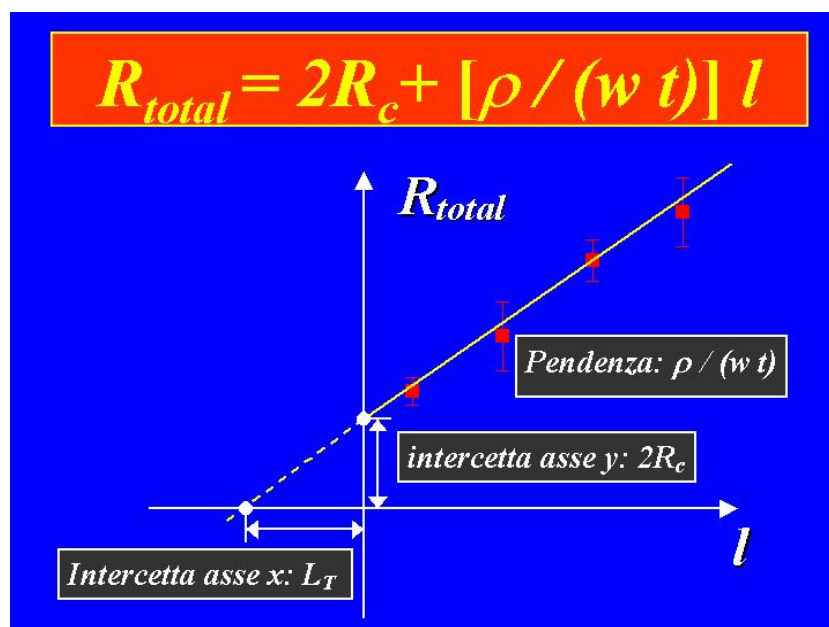


Fig. 3 esempio di analisi dati.

## Laboratorio 9: Interazione tra fotoni ed elettroni nei semiconduttori

Laboratorio didattico di Fisica della Materia, via Irnerio 46, Piano Terra.

Questa esperienza proposta mira a mettere gli studenti a contatto con due tecniche spettroscopiche di fondamentale importanza nella scienza dei materiali e nella fisica dello stato solido, cioè **le misure di trasmissione ed assorbimento della luce da parte di materiali semiconduttori**.

Dopo un breve seminario introduttivo sulle interazioni tra fotoni ed elettroni, volto a chiarire in maniera semi-quantitativa i tipi di fenomeni che stanno alla base della misura, gli studenti avranno occasione di svolgere l'esperimento.

Nei semiconduttori gli elettroni, possiedono un'energia distribuita in diversi livelli, detti anche bande energetiche. Generalmente sono considerate le bande di valenza, nella quale gli elettroni non contribuiscono alla corrente, e la banda di conduzione – ad energia maggiore – in cui invece gli elettroni possono contribuire al trasporto di corrente. La distanza energetica tra le due bande è detta **“gap energetico”** ed è una delle grandezze fondamentali che caratterizzano un semiconduttore.

Nell'**effetto fotoelettrico interno** un fotone – quanto elementare di radiazione luminosa – che abbia un'energia maggiore o uguale del gap energetico può essere assorbito da un elettrone in banda di valenza: questo elettrone acquisisce dal fotone un'energia sufficiente a promuoverlo in banda di conduzione (ciò che viene detto *transizione interbanda*), dove esso potrà contribuire alla corrente elettrica. La presenza di elettroni in banda di conduzione rende quindi il campione più conduttivo (fotoconducibilità). Nessuna transizione può essere invece indotta da fotoni con energia minore del gap (Fig.1).

L'esperimento (Fig. 2 e 3) consiste nel far incidere su un campione semiconduttore un fascio di

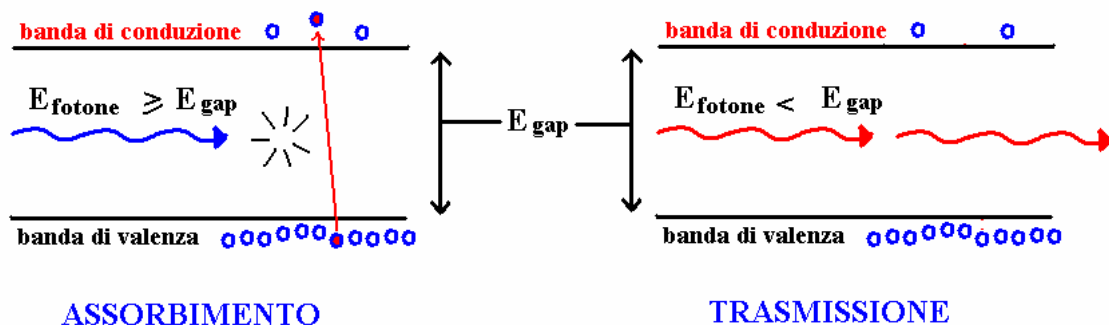


Figura 1 Interazione tra elettroni in un semiconduttore e fotone incidente di diversa energia

luce monocromatica e nel misurare, in funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$  della luce incidente, sia la variazione di resistenza del campione (fotoconducibilità) sia l'intensità della luce da esso trasmessa.

La lampada ha uno spettro d'emissione che va dal visibile al vicino infrarosso. La prima lente è posizionata sul cammino della luce in modo da rendere parallelo il fascio di luce che incide sul reticolo a riflessione. Il fascio emergente viene focalizzato sul campione da una seconda lente.

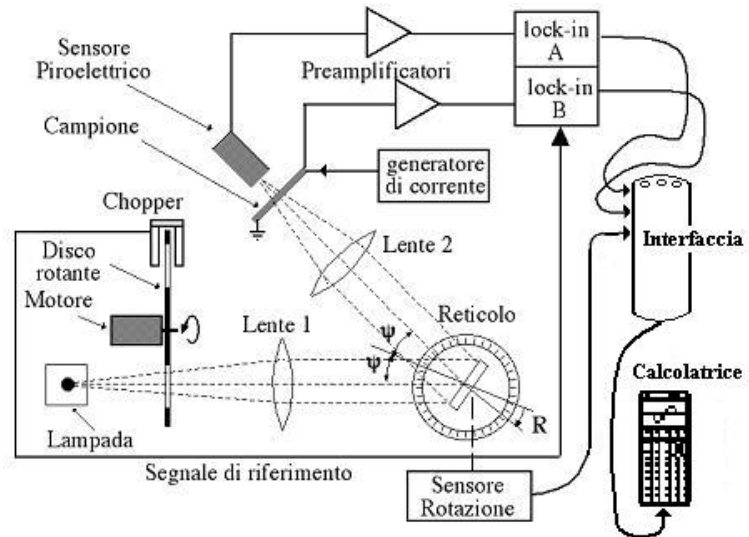
Facendo ruotare il reticolo con un motoriduttore, al variare dell'angolo  $R$  varia la lunghezza d' onda della luce che incide sul campione. La variazione dell'angolo è rilevata da un  **sensore angolare**  che misura la rotazione relativa alla posizione iniziale.

Il campione ha spessore di qualche decimo di millimetro per permettere la trasmissione di un fascio sufficientemente intenso e la sua resistenza dipende dalla densità di portatori di carica elettrica: la tensione ai suoi capi viene modulata quindi dalla luce incidente ( **sensore fotoconduttivo** ).

Il  **sensore piroelettrico**  è invece posto dietro al campione, e misura l' intensità di luce trasmessa.

Entrambi i segnali, di luce trasmessa e di fotoconduttività, vengono preamplificati mediante un apposito filtro, detto  *lock-in* .

L'interfaccia, collegata a PC o a Calcolatrice Grafica tramite porta seriale, permette l'acquisizione diretta dei segnali prodotti dai  **3 sensori** .



**Figura 2** Setup sperimentale per le misure di trasmissione ed assorbimento della luce da parte di un materiale semiconduttore



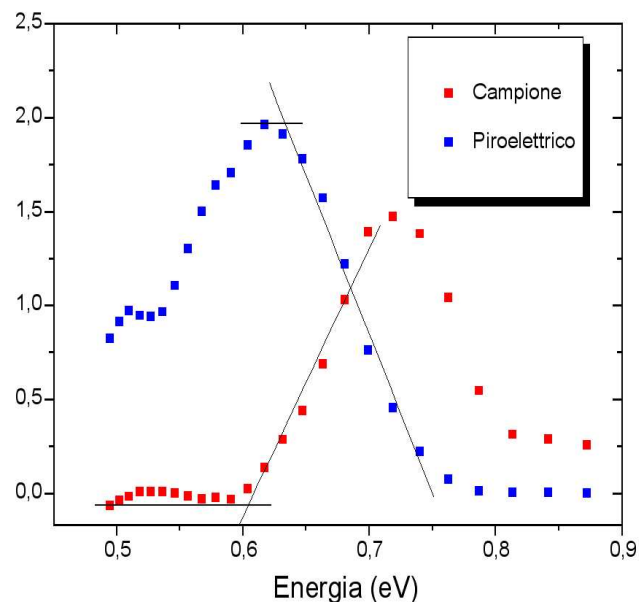
**Figura 3** Apparato sperimentale

maggiori) ed interpolando con due rette i fronti di salita e discesa; le intersezioni delle rette inclinate con quelle orizzontali forniscono i due valori di soglia, cioè l'energia minima a cui inizia l'effetto fotoelettrico.

E' semplice a questo punto convertire i valori di lunghezze d'onda in valori di energia del fotone:  $E=hc / \lambda$  dove  $h$  è una costante universale (di Planck) e  $c$  rappresenta la velocità della luce.

Il grafico riportato qui sotto (Fig.3) mostra il segnale fotoconduttivo (in blu) ed il segnale proporzionale all'intensita' della luce trasmessa (in rosso): i valori dell'energy gap si ottengono individuando con due rette orizzontali il fondo dei segnali nella zona ad energie minori ( $\lambda$

L'esperimento può essere ripetuto per diversi materiali (Si, Ge, GaAs...) in modo da evidenziarne le differenze, nonché per offrire ad un numero maggiore di studenti la possibilità di eseguire *personalmente* l'esperienza. Gli studenti potranno quindi rapidamente stimare, analizzando gli spettri raccolti, la **larghezza del gap energetico fra banda di conduzione e banda di valenza**.



**Figura 4** Esempio di spettri di assorbimento (rosso) e trasmissione (blu) di un semiconduttore

Le misure spettroscopiche di assorbimento e trasmissione della luce rivestono tuttora un ruolo fondamentale nella caratterizzazione dei nuovi materiali semiconduttori. Recenti ricerche condotte sul composto ternario  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  hanno messo in luce che il gap di questo materiale, sotto opportune condizioni di crescita, può variare da 3.39 eV a 0.7 eV. Questo può avere importanti ricadute applicative, perché renderebbe possibile la produzione di celle fotovoltaiche (dette “celle a multigiunzione”) in grado di sfruttare l'intero spettro della radiazione solare, a differenza delle comuni celle in silicio.

Per una più approfondita descrizione dell'esperimento, si veda [http://www.padova.infm.it/torzo/Photocon\\_AJP.doc](http://www.padova.infm.it/torzo/Photocon_AJP.doc)

Per l'attuale ricerca sul bandgap del composto  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , si veda per esempio [http://www.lbl.gov/msd/Pis/Walukiewicz/02/02\\_8\\_Full\\_Solar\\_Spectrum.html](http://www.lbl.gov/msd/Pis/Walukiewicz/02/02_8_Full_Solar_Spectrum.html)

*Per ulteriori informazioni per i laboratori 8 e 9 rivolgersi a:  
dott.sa Daniela Cavalcoli (tel. 051-20-95116, cavalcoli@bo.infn.it), dott.sa Beatrice Fraboni (tel. 051-20-95806)  
dott. Marco Rossi (tel. 051-20-95806), dott. Lorenzo Rigutti (tel. 051-20-95106)*