

Assorbimento ottico nei materiali

Dipartimento di Scienza dei Materiali, Università degli Studi di Milano-Bicocca, via Cozzi 55, I-20125 Milano, Italia

e-mail:

ABSTRACT: L'esperienza si divide in tre parti, nella prima viene misurata la trasmissione di quattro diversi tipi di filtri ottici e il coefficiente di assorbimento di uno di questi, nella seconda misuriamo il coefficiente di assorbimento di tre diversi campioni di silicio, il valore dell' E_G e l'energia del fonone coinvolto nella transizione, nell'ultima parte viene misurato lo spessore di uno strato sottile di cds mediante interferometria ottica spettroscopica. Per le misure è stato utilizzato uno Spettrofotometro Jasco V-570.

Introduzione

Lo spettrofotometro è uno strumento utilizzato per studiare le proprietà ottiche dei materiali, è possibile misurare la trasmissione, la riflessione o l'assorbanza di un campione tramite un'onda elettromagnetica incidente sul materiale a frequenza nota e misurando l'intensità dell'onda trasmessa o riflessa a quella frequenza con un rivelatore.

L'esperienza si divide in tre parti, nella prima parte è stata misurata la trasmissione di alcuni filtri ottici, nella seconda l'assorbanza di campioni di silicio per individuare il meno drogato e calcolare l'energia del gap e del fonone coinvolto nella transizione, nella terza parte, tramite misure di assorbanza, è stato possibile misurare lo spessore di un film sottile depositato su due campioni.

Strumentazione sperimentale e metodo di misura

È stato utilizzato uno Spettrofotometro Jasco V-570. Lo strumento esegue misure dall'IR (2500 nm) all'UV (200 nm). Per riuscire ad eseguire misure accurate su tutto lo spettro è necessario utilizzare due differenti sorgenti, una a filamento per VIS-IR (300 – 2500 nm) e una ad arco per IR (200-300 nm). Vengono inoltre impiegati due reticoli a diffrazione uno con 1200 linee/mm per UV-VIS e uno 300 linee/mm per IR e due rivelatori, un fotomoltiplicatore per UV-VIS e uno fotodiodo per IR.

Lo strumento può essere utilizzato a singolo o doppio raggio, nella spettroscopia a doppio raggio è necessario acquisire una baseline per correggere i difetti dello strumento effettuando una misura a vuoto.

Prima di effettuare la misura è necessario impostare alcuni parametri: Modalità fotometrica, banda passante, data pitch e tempo di acquisizione.

La modalità fotometrica permette di scegliere se effettuare la misura in trasmissione (T), riflessione (R) o assorbanza (ABS).

La banda passante ($\Delta\lambda_{BP}$) indica l'intervallo di lunghezze d'onda che escono dal monocromatore.

Il data pitch ($\Delta\lambda_{DP}$) è l'intervallo di acquisizione dei dati dello strumento.

È necessario impostare questi parametri in modo tale che $\Delta\lambda_{DP} < \Delta\lambda_{BP}$, altrimenti alcune porzioni dello spettro non verranno misurate.

Il tempo di acquisizione (τ_A) è il tempo impiegato dallo strumento per acquisire un singolo punto dello spettro, in generale si imposta $\tau_A = \tau_R$.

Se $\tau_A > \tau_R$, il tempo di acquisizione è inutilmente lungo, se $\tau_A < \tau_R$, il rivelatore non è in grado di acquisire il segnale

La prima parte dell'esperienza consiste nella misura in trasmissione di 4 differenti filtri ottici, ovvero materiali in grado di assorbire o attenuare un certo range di lunghezze d'onda. I campioni utilizzati sono:

Trasparente: 0.23 ± 0.05 cm
 Verde chiaro: 0.54 ± 0.05 cm
 Verde scuro: 0.43 ± 0.05 cm
 Rosso: 0.43 ± 0.05 cm ^[1]

Per il filtro trasparente viene inoltre calcolato il coefficiente di assorbimento α .

Quando un'onda elettromagnetica incide su un materiale parzialmente assorbente, una frazione dell'onda viene riflessa mentre il resto penetra all'interno del campione; dell'onda che penetra all'interno del materiale una parte verrà assorbita e una parte verrà trasmessa.

Nel caso in cui il campione fosse di dimensioni di diversi ordini di grandezza maggiore rispetto alla lunghezza d'onda del fascio incidente, è possibile utilizzare la seguente relazione:

Relazione di Laboratorio di Fisica dei Materiali – A.A. 2022/2023

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha t}}{1-R^2 e^{-2\alpha t}} \quad \text{eq. 1}$$

Per collegare l'intensità trasmessa I_T , il parametro misurato dipendente dalla forma e dalla dimensione del campione, al coefficiente di assorbimento α , una proprietà intrinseca che rappresenta l'attenuazione dell'intensità del fascio luminoso attraverso uno spessore unitario di materiale e si misura in cm^{-1} .

Dall'equazione 1 risulta che:

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln \left[\frac{-(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4T^2 R^2}}{2TR^2} \right] \quad \text{eq. 2}$$

La seconda parte dell'esperienza consiste nella misura in assorbanza di tre campioni di silicio per individuare il campione meno drogato e calcolare il valore dell'energy gap e l'energia del fonone coinvolto nella transizione.

I tre campioni hanno dimensioni:

Silicio 1 = 0.16 ± 0.05 cm

Silicio 2 = 0.30 ± 0.05 cm

Silicio 3 = 1.00 ± 0.05 cm. [1]

L'assorbanza, ABS, corrisponde all'intensità di radiazione elettromagnetica che viene assorbita da un corpo, ed è collegata alla trasmittanza tramite la relazione:

$$ABS = -\log_{10} T \quad \text{eq. 3}$$

Una volta individuato il campione meno drogato, si assume che il valore di $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ per energie molto inferiori a quelle dell' E_G (1.1 eV per Si) e si calcola il valore di R tramite la relazione:

$$R = \frac{(1-T)}{(1+T)} \quad \text{eq. 4}$$

Il silicio è un semiconduttore a gap indiretto, questo vuol dire che l'ultimo livello della banda di valenza e il primo livello della banda di conduzione, oltre a una differenza di energia che corrisponde all'energy gap, E_G , hanno una differenza di momento Δp ; per poter promuovere un elettrone dalla BV alla BC è necessario che vengano conservati entrambi.

La conservazione del momento avviene con due meccanismi differenti, tramite l'assorbimento di un fonone:

Un fotone di energia $E = E_G - \hbar\omega$ e momento $p = 0$, e un fonone di energia $E = \hbar\omega$ e momento $p = \Delta p$, vengono assorbiti, e un elettrone in BV con $E = 0$ e $P = 0$, viene promosso in BC con $E = E_G$ e $P = \Delta p$.

O attraverso l'emissione di un fonone:

Un fotone di energia $E = E_G + \hbar\omega$ e momento $p = 0$, viene assorbito, e un elettrone in BV con $E = 0$ e $P = 0$, viene promosso in BC con $E = E_G$ e $P = \Delta p$, viene emesso un fonone di energia $E = \hbar\omega$ e momento $p = -\Delta p$.

In entrambi i casi viene rispettata la conservazione dell'energia e del momento.

Andando a rappresentare in un grafico $\sqrt{\alpha}$ in funzione dell'energia del fotone incidente $h\nu$, è possibile individuare i punti di assorbimento ed emissione del quanto di energia vibrazionale, $E_G - \hbar\omega$ e $E_G + \hbar\omega$, che corrispondono ai punti in cui è possibile osservare una variazione della pendenza della curva. Fig.1

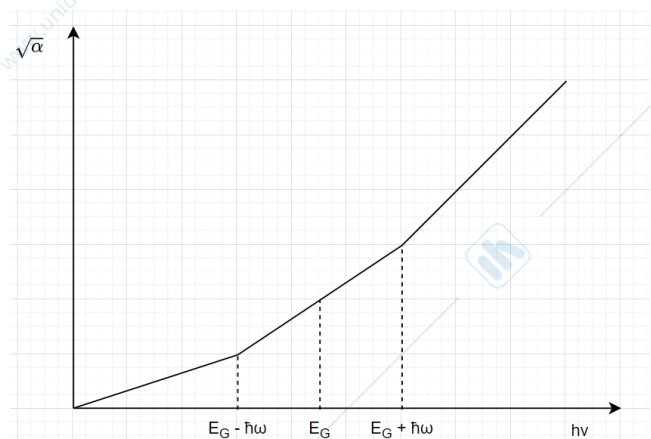


Fig.1 Schematizzazione della variazione di pendenza della curva in un grafico $\sqrt{\alpha}/h\nu$ in corrispondenza dell'assorbimento e dell'emissione del fonone.

Una volta ottenuti questi valori è possibile calcolare il valore dell' E_G tramite la relazione:

$$E_G = \frac{(E_G + \hbar\omega) - (E_G - \hbar\omega)}{2} \quad \text{eq. 5}$$

Per individuare il campione meno drogato è necessario confrontare i grafici dell' $ABS/h\nu$, a causa delle interazioni intrabanda dovute all'aggiunta di materiali droganti al silicio, che siano donori o accettori, sarà possibile misurare un valore di ABS non nullo per valori molto inferiori all' E_G .

Nella terza parte dell'esperienza verrà misurato lo spessore di un film di cds depositato su un campione di mica e di SiO_2 .

Relazione di Laboratorio di Fisica dei Materiali – A.A. 2022/2023

Quando lo spessore è di dimensioni comparabili a quelle della lunghezza d'onda incidente λ , si osservano fenomeni di interferenza, che potrà essere costruttiva o distruttiva. Fig.2

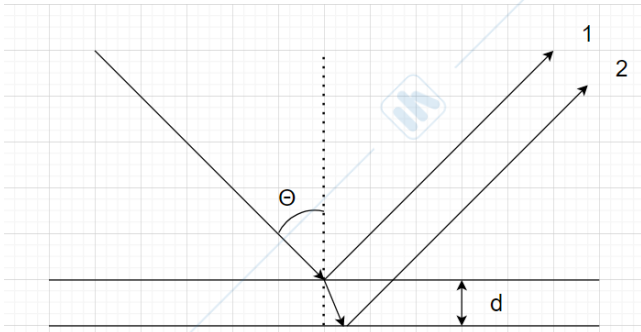


Fig.2 Rappresentazione del fenomeno di interferenza di un'onda incidente su un film sottile.

L'intensità delle onde uscenti segue la relazione:

$$2 d n \cos\theta = m \lambda \quad \text{eq.6}$$

Si avrà interferenza costruttiva quando $m = Z$, mentre si avrà interferenza distruttiva quando $m = Z + 1/2$.

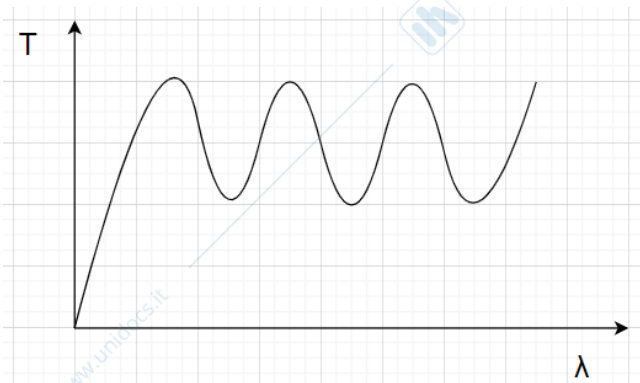


Fig.3 Schematizzazione dell'andamento dovuto alle figure di interferenza

Misurando per via grafica le frequenze corrispondenti ai massimi di interferenza, sarà possibile tramite l'equazione 6 risalire allo spessore "d" del film sottile depositato sul supporto considerando che: $\theta = 0$.

Risultati & discussione

Sono stati raccolti i seguenti spettri di trasmissione per i 4 filtri ottici utilizzando lo spettrofotometro a singolo raggio.

La sensibilità dello strumento è pari a:

$\pm 0.3\%$ per la trasmissione, ± 0.002 per l'assorbanza e ± 0.3 nm per la lunghezza d'onda. [2]

Le barre di errore non vengono inserite nei grafici a causa della scala utilizzata.

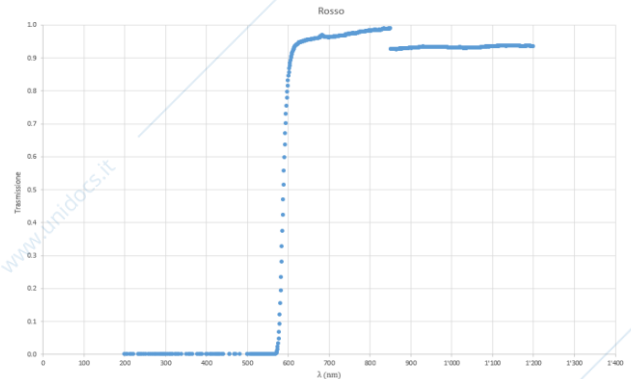


Fig.4 spettro di trasmissione del filtro rosso in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

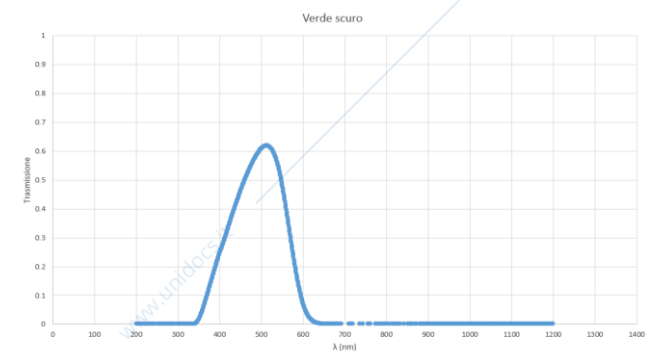


Fig.5 spettro di trasmissione del filtro verde scuro in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

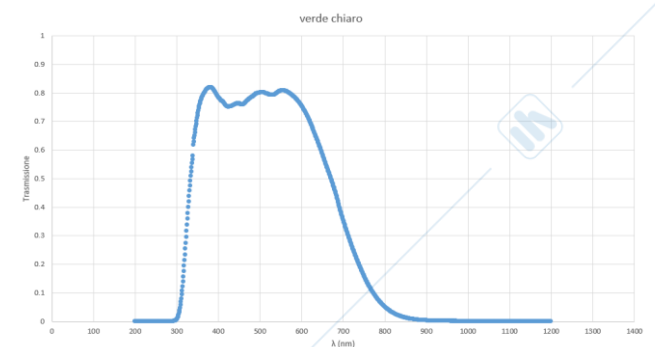


Fig.6 spettro di trasmissione del filtro verde chiaro in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

Relazione di Laboratorio di Fisica dei Materiali – A.A. 2022/2023

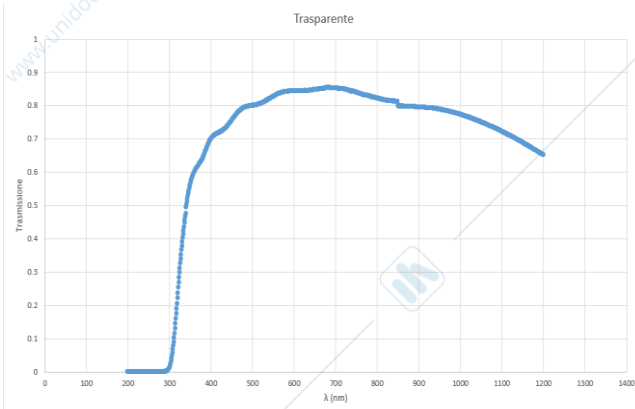


Fig.7 spettro di trasmissione del filtro trasparente in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

Utilizzando l'equazione 2 è stata calcolato il coefficiente di assorbimento del filtro trasparente utilizzando un valore di $R = 0.05$ [3]

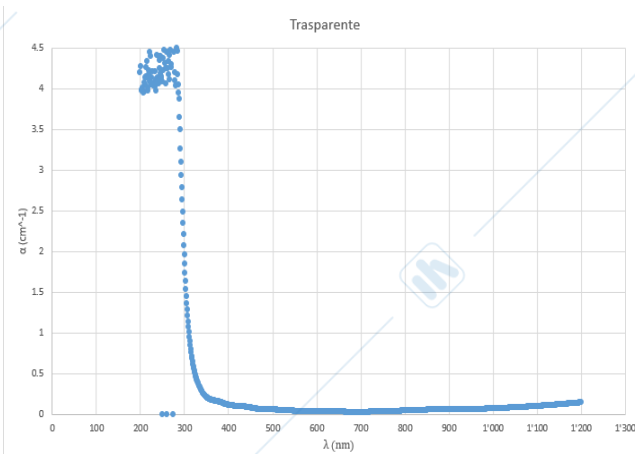


Fig.8 coefficiente di assorbimento del filtro trasparente in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente

Nella seconda parte dell'esperienza sono stati raccolti gli spettri in assorbanza di 3 differenti campioni di silicio per individuare il campione meno drogato utilizzando lo spettrofotometro a doppio raggio.

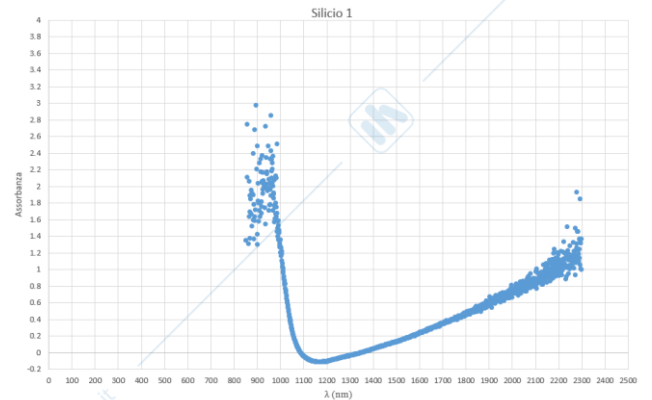


Fig.9 spettro dell'assorbanza del campione di silicio 1 in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

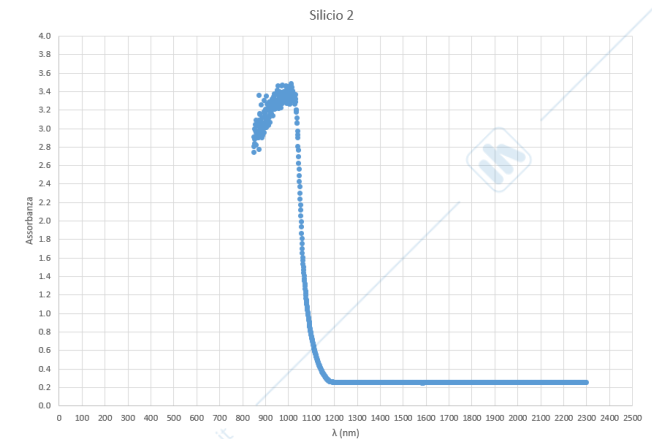


Fig.10 spettro dell'assorbanza del campione di silicio 2 in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

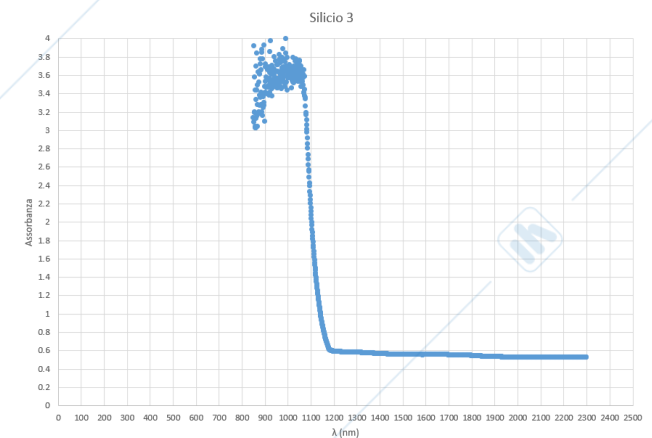


Fig.11 spettro dell'assorbanza del campione di silicio 3 in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

Relazione di Laboratorio di Fisica dei Materiali – A.A. 2022/2023

È possibile notare come il campione di silicio 1 presenti un'assorbanza elevata per energie molto inferiori rispetto a quelle dell' E_G , è quindi il campione più drogato.

Il campione di silicio 2 è invece quello con ABS più bassa tra i 3 campioni, è quindi il campione meno drogato.

Questo campione è stato utilizzato per calcolare il coefficiente di riflessione R utilizzando la relazione 4.

Il valore risulta essere: $R = 0.273 \pm 0.005$, questo valore è stato utilizzato per calcolare i coefficienti di assorbimento α per tutti i campioni.

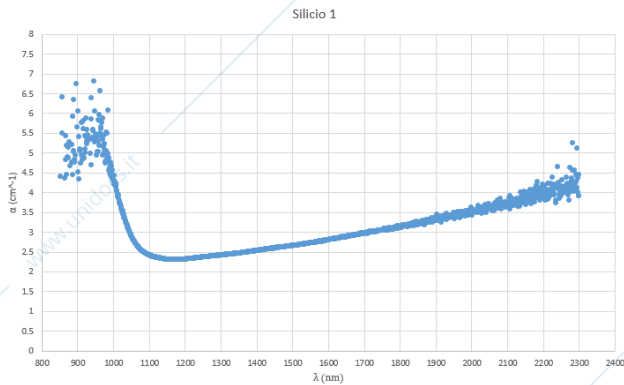


Fig.12 spettro del coefficiente di assorbimento del campione Silicio 1 in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

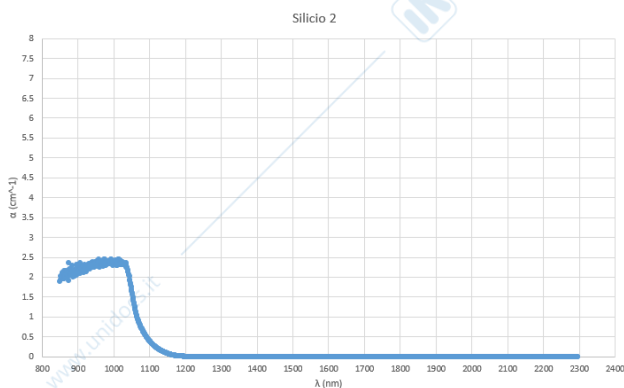


Fig.13 spettro del coefficiente di assorbimento del campione Silicio 2 in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

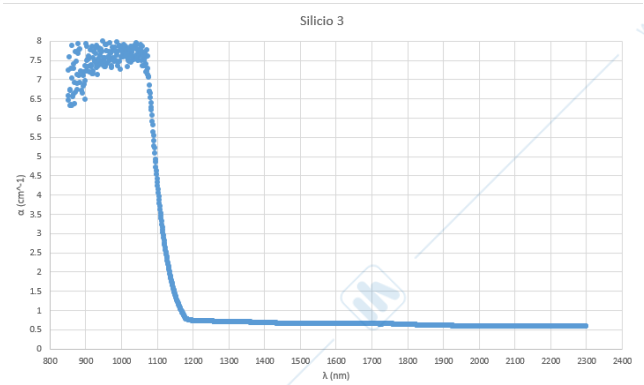


Fig.14 spettro del coefficiente di assorbimento del campione Silicio 3 in funzione della lunghezza d'onda del fotone incidente.

È stato calcolato il valore dell' E_G per via grafica utilizzando la relazione 5 per il campione meno drogato.

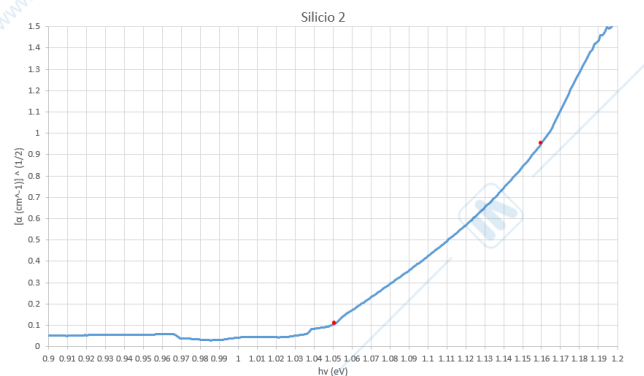


Fig.15 andamento di $\sqrt{\alpha}$ in funzione dell'energia del fotone incidente per il campione 2, in rosso i punti stimati di variazione di pendenza.

I valori stimati sono: $E_G - \hbar\omega = 1.05 \pm 0.01$ eV, e $E_G + \hbar\omega = 1.16 \pm 0.01$ eV.

Possiamo quindi calcolare il valore dell' $E_G = 1.10 \pm 0.01$ eV e l'energia del fonone $E_F = 0.05 \pm 0.01$ eV.

I valori sono stati identificati per via grafica, l'errore è stato stimato.

Relazione di Laboratorio di Fisica dei Materiali – A.A. 2022/2023

Nella terza parte dell'esperienza sono stati raccolti gli spettri in assorbanza di un campione di cds su mica e cds su ossido di silicio.

Per il campione su mica:

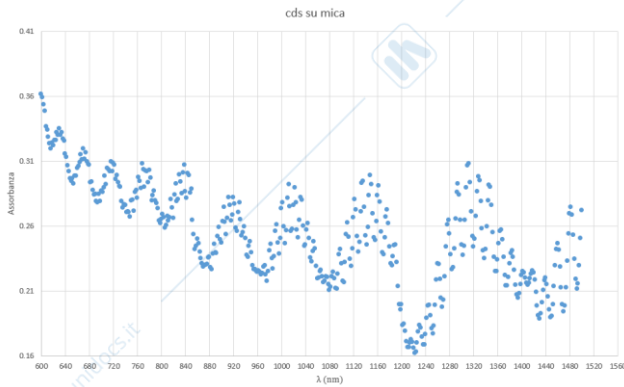


Fig.16 spettro in assorbanza del campione di cds su mica in funzione della lunghezza d'onda.

Sono stati raccolti 9 massimi di interferenza ed è stato costruito un grafico inserendo il reciproco della lunghezza d'onda in funzione del numero "m" assegnato ad ogni picco.

Utilizzando la relazione 6 è stato calcolato lo spessore utilizzando come valore di B il coefficiente angolare della retta e come n il valore di 2.5 [3].

L'incertezza è stata calcolata con il metodo dei minimi quadrati. [4]

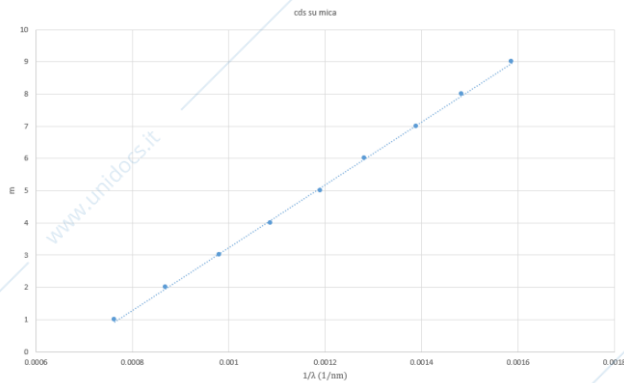


Fig.17 "m" in funzione del reciproco della lunghezza d'onda per il campione di cds su mica.

È stato calcolato uno spessore: $d = 1950 \pm 20$ nm per il campione di cds su mica.

Utilizzando lo stesso procedimento calcoliamo lo spessore di uno strato di cds su un campione di silicio:

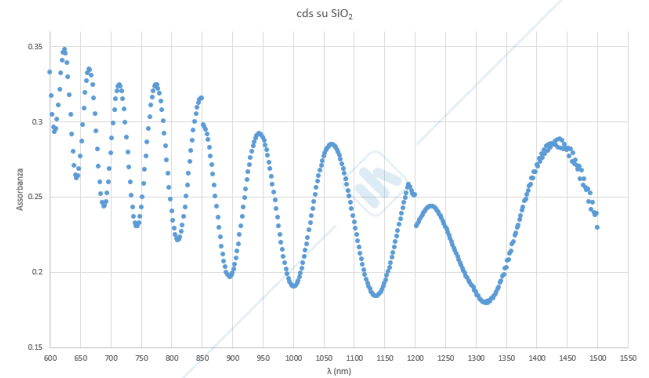


Fig.18 spettro in assorbanza del campione di cds su SiO_2 in funzione della lunghezza d'onda.

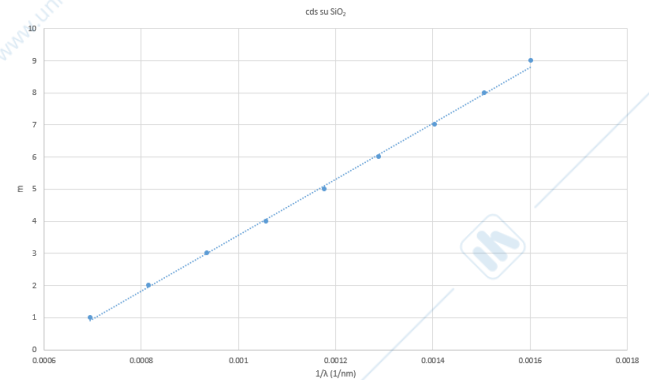


Fig.19 "m" in funzione del reciproco della lunghezza d'onda per il campione di cds su SiO_2 .

Lo spessore calcolato è: $d = 1745 \pm 30$ nm.

Conclusioni

Gli spettri di trasmissione ottenuti nella prima parte dell'esperienza sono quelli attesi per i colori dei filtri utilizzati, inoltre l'assorbimento del filtro trasparente è nullo nel range del visibile (400 – 700 nm).

Il valore dell' E_G del silicio calcolato nella seconda parte dell'esperienza corrisponde al valore tabulato di $E_G = 1.11$ eV [5].

Analizzando i picchi di interferenza dello spettro in assorbanza dei campioni, è stato possibile determinare lo spessore dello strato sottile depositato su un substrato di mica e di SiO_2 .

Relazione di Laboratorio di Fisica dei Materiali – A.A. 2022/2023

Riferimenti bibliografici

[1] Dato misurato in laboratorio con calibro.

[2] Jasco V-570 Hardware/Function Manual pg.15.

[3] Dispense fornite dal docente.

[4] Introduzione all'analisi degli errori, John R. Taylor, Cap. 8.

[5] Solid State Electronic Devices, seventh edition, Ben G. Streetman Sanjay Kumar Banerjee, Appendix III.