

PIETRO SCATTURIN, *ANDREA SCONZA

Liceo Scientifico Statale "U. Morin",
Mestre (Venezia)

*Dipartimento di Fisica "G. Galilei"
Università di Padova, Padova

NOTE DI LABORATORIO

Misura della costante h/e (costante di Planck/carica elementare) mediante diodi L.E.D.

(Pervenuto il 4.6.97, approvato il 19.4.98)

ABSTRACT

By means of some LEDs (Light Emitting Diodes) used as quasi-monochromatic light sources at different wavelengths and measuring their forward voltage at a fixed value of the current one can obtain the ratio of Planck's constant to elementary charge with an estimated error of the order of 6%.

Introduzione

Una determinazione sperimentale almeno dell'ordine di grandezza della costante h di Planck merita di essere fatta in ogni laboratorio didattico affinché lo studente si possa render conto della scala a cui divengono importanti nella fisica gli aspetti quantistici.

Questa misura si può fare entro un ragionevole limite di incertezza (tipicamente 10%) secondo l'ormai classico esperimento di Millikan sull'effetto fotoelettrico.

A nostro avviso l'esecuzione pratica di questo esperimento trova alcuni ostacoli certamente superabili ma non sempre in un'ottica di economicità. Infatti si deve disporre di una sorgente luminosa su almeno tre lunghezze d'onda (tipicamente una lampada al mercurio ad alta pressione colla sua impedenza di accensione)¹, e di una fotocella apposita accoppiata ad un'elettronica di misura in grado di risolvere correnti dell'ordine del nanoampere o meno, quindi di buone prestazioni. A ciò si aggiunge una dotazione minima di ottica di dispersione, o in alternativa dei filtri monocromatori di qualità sufficiente. Chi ha eseguito a scuola questo esperimento sa che la raccolta dei dati (cioè delle curve fotocorrente verso potenziale acceleratore) e la loro successiva elaborazione richiede una certa disponibilità di tempo, problema forse superabile con la messa on-line dell'apparecchiatura, che però comporta un altro costo aggiuntivo.

Ci è sembrato perciò interessante proporre un esperimento diverso in cui si ricava la costante di Planck (divisa per la carica elementare e) sfruttando le proprietà dei diodi a emissione di luce (LED). Questi sono facilmente reperibili, a basso costo, presso qualsiasi distributore di materiale elettronico: l'industria dei semiconduttori ne produce di diversi tipi con una gamma di lunghezze d'onda di emissione tra il blu e il vicino infrarosso ($\approx 400 \div 900$ nm).

Descrizione dell'esperienza

L'idea dell'esperimento con i LED è la seguente: si fa passare attraverso la giunzione una corrente diretta (elettroni dalla zona drogata N alla zona drogata P e lacune nel verso opposto): gli elettroni ricombinandosi radiativamente colte lacune in vicinanza della giunzione producono fotoni di energia $h\nu$ prossima al valore dell'*energy gap* (intervallo di energie proibite fra la banda di valenza e quella di conduzione) del materiale di cui è fatta la giunzione.

L'energia dei fotoni emessi ($h\nu$) è fornita dal lavoro fatto dal campo elettrico applicato alla giunzione (eV_{diode} , dove V_{diode} è la tensione diretta applicata al diodo) e quindi ci deve essere una relazione lineare ($h\nu = eV_{\text{diode}} + \text{cost}$) fra la frequenza della radiazione emessa e la tensione diretta V_{diode} di "accensione" del LED.

Di solito si assume per V_{diode} il valore al quale si osserva nella caratteristica diretta tensione - corrente del LED un "ginocchio" nel punto in cui il diodo comincia a condurre in maniera "apprezzabile". Un esempio di caratteristica diretta per un LED di colore arancio è riportato in figura 1.

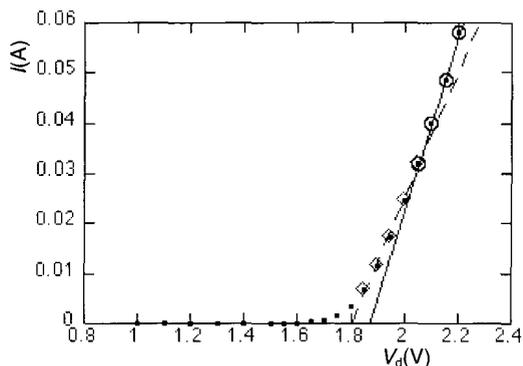


Fig. 1: caratteristica diretta di un LED arancio, con due possibili modi di definire V_{diode} .

Si può notare che questo “ginocchio” della caratteristica diretta è mal definito perché varia significativamente colla scelta della parte della caratteristica che si interpola linearmente. Questo modo di procedere è quindi piuttosto arbitrario e non può portare che ad una stima dell'ordine di grandezza di h/e .

Un modo un po' più preciso di procedere potrebbe essere il seguente: se indichiamo con V_d la tensione diretta applicata alla giunzione il bilancio energetico delle particelle che trasportano la corrente si può scrivere come

$$eV_d = hv + Q \quad (1),$$

cioè il lavoro fatto dal campo esterno (eV_d) va in parte in energia del fotone (hv) ed eventualmente anche in energia (Q) dissipata in altri modi all'interno del reticolo cristallino (calore, cioè transizioni non radiative). Conviene precisare che con V_d indichiamo la d.d.p. effettivamente applicata alla giunzione PN e quindi, se R_s è la resistenza elettrica dei pezzetti di semiconduttore di cui è fatto il LED ed I_d la corrente che lo attraversa, avremo

$$V_d = V_{\text{diodo}} - R_s I_d.$$

Si fa l'ipotesi che, **quando due LED diversi conducono la stessa corrente I_d** , la parte di energia che va in calore, cioè Q , sia la stessa. È anche possibile che Q risulti essere zero e questo, come vedremo, è appunto quello che suggeriscono i dati sperimentali.

In conclusione si misurano le tensioni dirette di vari LED che conducano tutti la stessa corrente, per esempio 10 mA, e ci si aspetta, nei limiti in cui vale l'ipotesi di uguale valore di Q , che queste siano legate alla frequenza ν dei fotoni emessi dalla equazione di una retta

$$\nu = (e/h) V_s + \text{cost} \quad (1')$$

con un valore della pendenza pari ad e/h ed una intercetta negativa o nulla.

Alcune proprietà dei LED

I materiali più usati per costruire diodi elettroluminescenti sono Arseniuro di Gallio (GaAs) per l'emissione nell'infrarosso e Arseniuro-Fosforo di Gallio ($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$), dove la x dà la percentuale di Fosforo nella lega, per l'emissione nel visibile. Al crescere di x l'energy gap del materiale passa da 1.43 eV per $x = 0$ a 2.26 eV per $x = 1$; la lunghezza d'onda di picco, che è legata all'energy gap dalla relazione $\lambda(\mu\text{m}) \approx hc/E_g (eV)$ (vedi più avanti), di conseguenza passa da ≈ 850 a ≈ 550 nm (vedi rif. [1]). Anche la presenza o meno di impurità tipo Azoto influisce fortemente sia sulla lun-

ghezza d'onda di picco che sull'efficienza luminosa del dispositivo.

Per ottenere emissione nel blu si usa il Carburo di Si (SiC) oppure la lega $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ e per il rosso si ottengono LED molto luminosi con $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ drogato con Zn su substrato di GaAs^[2].

Misura del potenziale V_d

Abbiamo usato i seguenti LED della ditta Kingbright:

Infrarosso: L-53F3BT di GaAs, lunghezza d'onda di picco nominale 940 nm,

Rosso: L-53SRD-B di GaAlAs, lunghezza d'onda di picco nominale 660 nm,

Giallo: L-53YD di GaAsP su substrato di GaP, lunghezza d'onda nominale 590 nm,

Verde: L-53SGD di GaP, lunghezza d'onda di picco nominale 565 nm,

Blu: L-53BT di SiC, lunghezza d'onda di picco nominale 470 nm,

ed il LED arancione della ditta Hewlett & Packard (l'analogo della Kingbright non era disponibile): HLMPD401 di GaAsP su substrato di GaP, lunghezza d'onda nominale 600 nm.

Il circuito di misura è riportato in figura 2. Abbiamo usato un voltmetro digitale con impedenza d'ingresso di $10\text{M}\Omega$ (in modo da derivare una corrente assolutamente trascurabile rispetto a quella che attraversa il LED) e sensibilità di 1mV ed un milliamperometro con sensibilità di $10\mu\text{A}$.

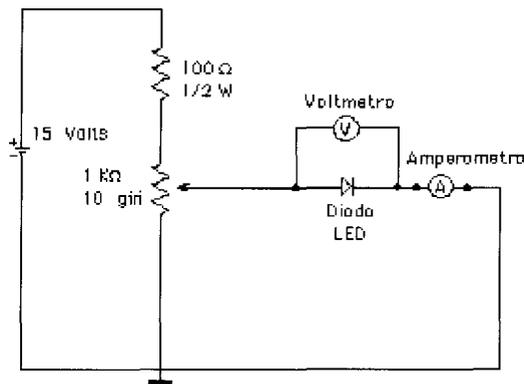


Fig. 2 - Schema del circuito di misura della caratteristica diretta dei diodi LED.

Abbiamo usato una campionatura di 5 pezzi per ogni tipo di LED ed i valori riportati in tabella sono le medie sui 5 componenti di ciascun gruppo. Le deviazioni standard ΔV_{diodo} , anch'esse riportate in tabella, sono piccole (tranne che per il LED blu) purchè le misure vengano fatte tutte alla stessa temperatura. Invece i valori di V_d diminuiscono apprezzabilmente (di $\approx 2\%$) se si riscaldano i LED tenendoli fra le dita della mano, cioè per un aumento di temperatura di ≈ 10 gradi.

Le nostre misure di V_{diodo} per $I_d = 10$ mA sono riportate in tabella 1

Tipo led	$\lambda_{\text{nominale}}$ (mm)	V_{diodo} $\pm \Delta V_{\text{diodo}}$ (V)
Infrarosso	940	1.185 ± 0.010
Rosso	660	1.746 ± 0.005
Arancio	600	1.883 ± 0.008
Giallo	590	1.985 ± 0.011
Verde	565	2.044 ± 0.005
Blu	470	2.986 ± 0.025

Tabella 1 - Le tensioni dirette osservate per il valore di corrente $I = 10$ mA

Misura della resistenza serie dei LED

Per valutare correttamente la d.d.p. applicata alla giunzione occorre conoscere la resistenza serie dei vari LED. La caratteristica corrente-tensione di un qualsiasi diodo, come è noto, ha inizialmente un andamento esponenziale dovuto all'abbassamento della barriera di potenziale alla giunzione P-N provocato dalla tensione di polarizzazione diretta. Oltre ad un certo valore di questa tensione la barriera è praticamente annullata e quindi continuando ad aumentare la polarizzazione diretta la corrente continua a crescere non più con legge esponenziale ma con legge lineare perché è limitata dalla resistenza ohmica dei pezzetti di semiconduttore che costituiscono il diodo. Questa è appunto la resistenza serie R_s di cui abbiamo bisogno per passare da V_{diodo} a V_d . Assumeremo perciò come resistenza serie la pendenza di questa parte lineare della caratteristica:

$$R_s = \Delta V_d / \Delta I$$

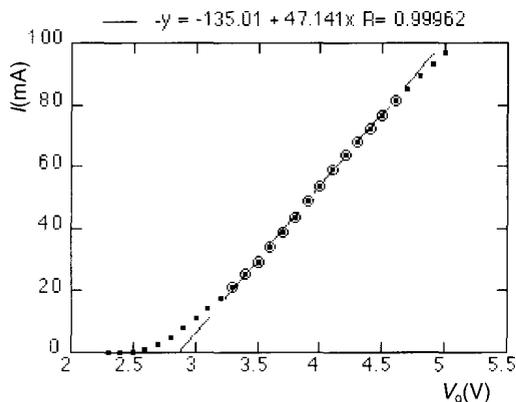


Fig. 3 - Caratteristica diretta di un LED blu

Una caratteristica diretta tipica (LED blu) ha l'aspetto di figura 3. Da ≈ 20 a ≈ 80 mA si ha un an-

damento con buona approssimazione lineare con una pendenza $R_s = (21.2 \pm 0.5) \Omega$. Si noti che oltre gli 80 mA circa la pendenza della caratteristica tende a diminuire a causa dell'autoriscaldamento del LED. L'incertezza sul valore della resistenza serie è stata stimata dell'ordine di qualche per cento perché il valore trovato dipende dalla scelta del tratto di caratteristica che si considera lineare.

Le resistenze serie dei diversi LED usati in questa misura, ottenute col metodo appena descritto sono presentate in tabella 2.

Tipo LED	$R_s \pm \Delta R_s$ (Ω)	$V_d \pm \Delta V_d$ (V)
Infrarosso	1.5 ± 0.1	1.170 ± 0.010
Rosso	4.7 ± 0.1	1.699 ± 0.006
Arancio	5.1 ± 0.1	1.832 ± 0.009
Giallo	9.4 ± 0.2	1.891 ± 0.013
Verde	14.4 ± 0.3	1.900 ± 0.008
Blu	21.0 ± 0.5	2.776 ± 0.030

Tabella 2 - resistenza serie e tensione ai capi della giunzione dei vari LED

Misura dello spettro di emissione

Lo spettro di emissione dei LED ha il picco ad una lunghezza d'onda λ determinata dell'energy gap del materiale di cui è fatto il LED secondo la relazione

$$\lambda(\mu\text{m}) \approx hc/E_g \approx 1.24/E_g(\text{eV}),$$

che si ricava uguagliando l'energia resa disponibile dalla ricombinazione elettrone-lacuna, cioè E_g , con l'energia $h\nu$ del fotone.

La luce emessa non è monocromatica se non altro per via dell'energia di agitazione termica $\frac{3}{2}kT$ dei portatori di carica, per cui a temperatura ambiente ci si aspetta una larghezza dello spettro $\Delta\lambda/\lambda_{\text{max}} \approx 3/2 kT/E_g$ dell'ordine di qualche per cento ($3/2 kT/E_g \approx .040/1.0 = 4\%$).

Per una stima di prima approssimazione del valore della costante di Planck (vedi il paragrafo finale di questo lavoro) è sufficiente usare le lunghezze d'onda di picco dichiarate dalla casa costruttrice dei LED, ma per una misura più accurata di h/e conviene misurare lo spettro di emissione in modo da verificare le lunghezze d'onda di massima emissione e valutarne sperimentalmente l'incertezza.

Allo scopo, si è fatto uso di un reticolo di diffrazione in riflessione, di passo 1200 linee/mm, (dimensioni 25 x 25 mm, della Edmund Scientific Corp.³ costo: ~ 100 \$) montato come in figura 4, in modo del tutto analogo a quanto già descritto (a proposito di misure di fotoconducibilità di Ge e Si) su questa rivista [3].

La lunghezza d'onda si varia ruotando il reticolo di diffrazione e si calcola colla formula (spettro del 1° ordine, vedi in Appendice):

$$\lambda = 2 a \cos \psi \operatorname{sen} R \quad (2)$$

dove a è il passo del reticolo, 2ψ l'angolo (fisso) fra la direzione di incidenza e quella di osservazione della luce ed R l'angolo di rotazione del reticolo.

La bassa intensità luminosa dei LED (che peraltro vengono alimentati a $\approx 100 \text{ mA}^4$) richiede di lavorare in una stanza semioscurata. Come trasduttore di intensità luminosa conviene usare un fotodiodo con polarizzazione nulla perché, in questa condizione, la sua corrente inversa I_d è proporzionale alla intensità della luce incidente. Questa corrente viene trasformata in una tensione $V_0 = R_F I_d$ mediante il circuito di figura 5.

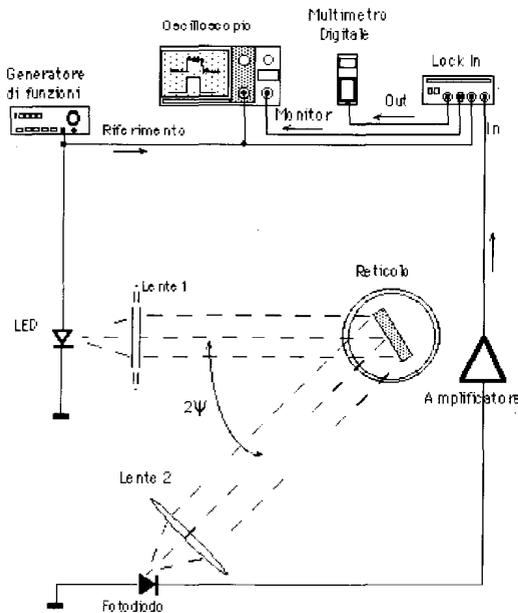


Fig. 4 - Schema a blocchi dell'esperimento di misura degli spettri di emissione

Si tratta essenzialmente di un convertitore corrente-tensione (OP1) la cui uscita è collegata all'ingresso di un amplificatore in configurazione invertente (OP2) e con possibilità di variare il guadagno tra 1 e 100. C'è inoltre la possibilità di variare il fattore di conversione corrente-tensione del primo stadio, cambiando il valore della resistenza di controreazione R_F , per cui si riesce ad avere un segnale misurabile anche per le intensità di emissione più basse dei LED usati.

Per far buone misure, indipendenti dalla residua luce ambiente, ed eliminare il rumore a frequenza di rete conviene usare un rivelatore a sensibilità di fase (rivelatore "lock-in", vedi rif. citato in precedenza [4]). In questo caso il LED in esame, in serie con una piccola resistenza di protezione di $\approx 33\Omega$, va alimentato mediante un generatore di onda quadra operante ad una frequenza di qualche

decina di Hz (ampiezza massima $\approx 20V$, corrente nel LED $\approx 100\text{mA}$).

Il lock-in usa questo stesso segnale ad onda quadra come segnale di riferimento e funziona essenzialmente come un amplificatore agganciato alla frequenza del segnale da rivelare, cioè con una banda passante molto stretta centrata sulla frequenza del segnale di riferimento, e quindi è in grado di estrarre il segnale dalle componenti di rumore a qualsiasi frequenza.

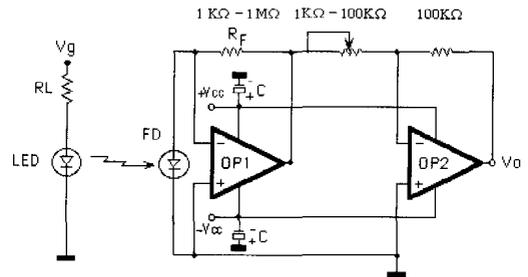


Fig. 5 - Circuito del fotodiodo: FD fotodiodo OSD1T (Centronics); $\pm V_{cc}$ = alimentazioni (9V); OP1 = LF356N; OP2 = OP07; C = 10 μF capacità di filtro; R_L = resistenza limitatrice (33Ω); V_g = tensione dal generatore di funzioni (20V da picco a picco); V_0 = tensione di uscita.

Riportiamo in figura 6 lo spettro di emissione ottenuto nel modo appena descritto con un LED infrarosso. Poiché il fotodiodo non ha la stessa sensibilità a tutte le lunghezze d'onda occorrerebbe correggere lo spettro su riportato dividendo ogni valore per quello della sensibilità relativa a quella lunghezza d'onda.

La misura della sensibilità spettrale del fotodiodo si può fare come segue: si divide il segnale prodotto dal fotodiodo ad una determinata lunghezza d'onda per quello dato, alla stessa lunghezza d'onda, da un sensore termico cioè a risposta indipendente da λ . Noi abbiamo usato un sensore piroelettrico ELTEC 400 (il cui uso è spiegato ad esempio in [4]).

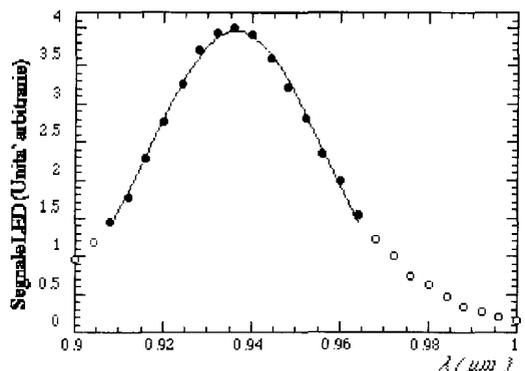


Fig. 6 - spettro di emissione del LED infrarosso. La curva gaussiana che fitta il picco è $A * \exp(-0.5 * ((\lambda - \lambda_0) / \Delta\lambda)^2)$ con $\lambda_0 = 0.9362 \pm 0.0002 \mu\text{m}$ e $\Delta\lambda = 0.0196 \pm 0.0002 \mu\text{m}$.

La sensibilità spettrale misurata per il nostro fotodiiodo (OSD1T della ditta Centronics⁵) è riportata in figura 7.

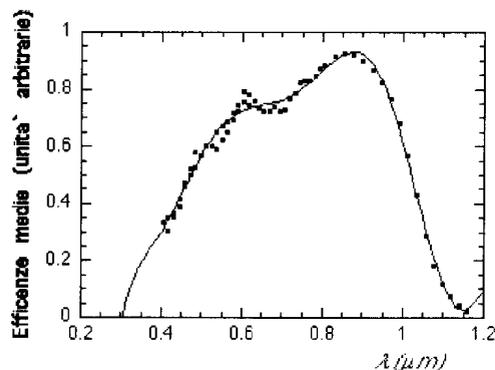


Fig. 7 - Curva di sensibilità del fotodiiodo interpolata per comodità dei calcoli successivi con un polinomio di ottavo grado.

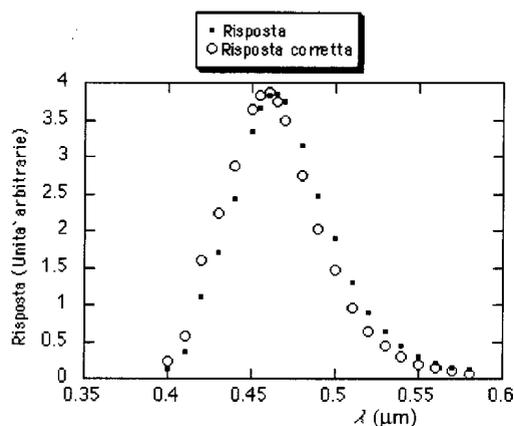


Fig. 8 - Spettro corretto e non corretto per un LED blu

Poiché questa curva di efficienza non è troppo piccola la correzione agli spettri misurati non è molto importante: ad esempio in figura 8 sono riportati sia lo spettro corretto che quello non corretto per un LED blu (è il caso in cui la correzione è maggiore) e si vede che lo spostamento del

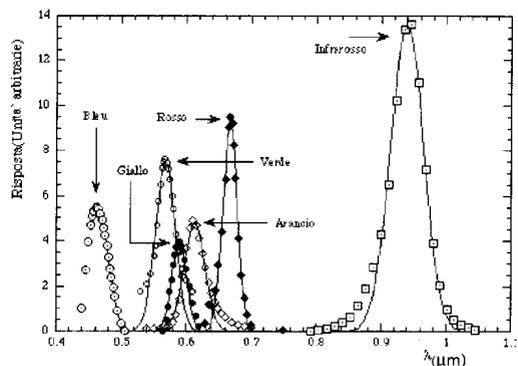


Fig. 9 - Spettri di emissione corretti dei LED usati; sono riportati i valori misurati e alcune delle curve gaussiane di fit; la risposta in ordinata è in unità arbitrarie, e dà un'idea delle intensità relative dei vari LED.

picco è di pochi nm. Ad ogni modo riportiamo in figura 9 gli spettri ottenuti per i vari LED corretti per la sensibilità spettrale. Tutti sono stati fittati con una gaussiana, trascurando le code alle alte e alle basse lunghezze d'onda.

Nella tabella 3 sono riportate le lunghezze d'onda di picco (massimo della gaussiana corretta) e la semilarghezza a metà altezza.

Come si può vedere confrontando le tabelle 1 e 3 le differenze fra le lunghezze d'onda nominali e quelle misurate non superano mai il 2%, talvolta in più e talvolta in meno. Tuttavia anche questi piccoli spostamenti e soprattutto la conoscenza dell'errore da attribuire alle lunghezze d'onda consentono una miglior stima di h , come vedremo nel paragrafo successivo.

Misura della costante di Planck e conclusioni

Presentiamo in figura 10 la relazione fra la frequenza di picco **nominale** della luce emessa e la tensione diretta necessaria a far passare la corrente di 10 mA in ciascun LED.

In base alla (1') ed ai valori noti di e e di h ci si aspetta un andamento rettilineo con pendenza

$$e/h = 2.418 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}\text{V}^{-1}.$$

Tipo LED	λ_{max} (nm)	$\Delta\lambda/2$ (nm)	f ($\times 10^{14}$ Hz)	$\Delta f/2$ ($\times 10^{14}$ Hz)
Infrarosso	938.9	23.8	3.195	0.081
Rosso	667.6	11.8	4.494	0.080
Arancio	612.4	18.4	4.899	0.147
Giallo	590.0	14.7	5.085	0.127
Verde	568.1	16.1	5.281	0.150
Blu	460.2	29.4	6.519	0.416

Tabella 3: lunghezze d'onda di picco corrette e semilarghezze a metà altezza.

Come si vede c'è una correlazione lineare evidente e la pendenza della retta che interpola meglio i punti sperimentali risulta

$$(1.95 \pm 0.26) \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}\text{V}^{-1}$$

cioè circa il 20% in meno del valore atteso.

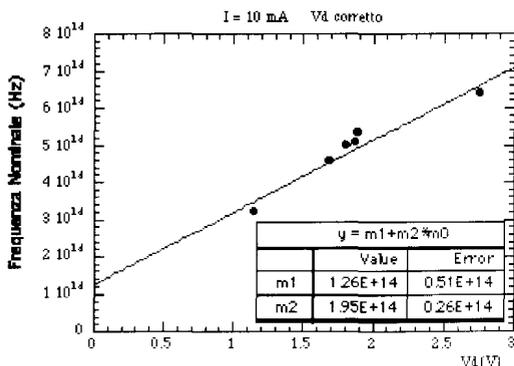


Fig. 10 - Analisi con le lunghezze d'onda nominali.

Si deve inoltre notare che l'intercetta di questa retta, che dovrebbe dare $-Q/h$ cioè una quantità necessariamente negativa o nulla, risulta invece positiva (al limite di 2.5 deviazioni standard).

Se invece usiamo per le frequenze di picco i valori misurati e teniamo conto delle diverse larghezze degli spettri di emissione si trova (figura 11) una retta con coefficiente angolare

$$e/h = (2.51 \pm 0.14) \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}\text{V}^{-1}$$

più vicino al valore noto di e/h e con un errore stimato del 6%. Inoltre l'intercetta di questa retta è compatibile con zero entro una deviazione standard, indicando che l'energia fornita dal campo elettrico va integralmente in energia luminosa.

A posteriori la dissipazione d'energia entro il reticolo cristallino, una volta depurata la tensione

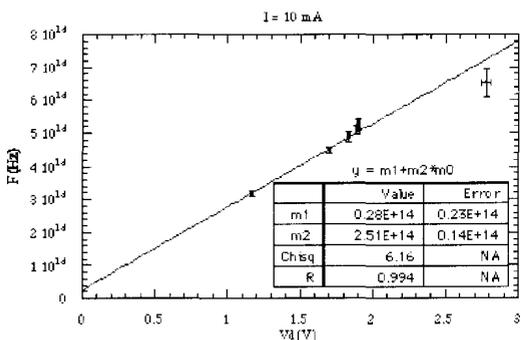


Fig. 11 - Analisi colle lunghezze d'onda misurate ed i loro errori.

diretta V_d del contributo ohmico, sembra quindi essere zero per tutti i diversi LED usati (a parte forse il LED blu).

Abbiamo anche verificato che il risultato non dipende in maniera apprezzabile dalla scelta del valore della corrente diretta nel range da 5 a 20 mA.

Il valore stimato per h/e risulta quindi

$$h/e = (3.99 \pm 0.22) \cdot 10^{-15} \text{ V s}$$

e per la costante di Planck, noto il valore della carica elementare, $e = 1.6021 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, si ottiene:

$$h = (6.39 \pm 0.35) \cdot 10^{-34} \text{ J s.}$$

Un altro metodo per definire la tensione diretta di soglia consiste (vedi ad es. L. Nieves, G. Spavieri, B Fernandez e R.A. Guevara *Measuring the Planck constant with LED's* The Physics Teacher 35, 108 1997) nel porre V_d uguale all'intercetta ad $I = 0$ della parte lineare della caratteristica diretta. Anche se non ci risulta chiara la giustificazione di questo modo di procedere abbiamo provato anche questo tipo di analisi trovando i valori di V_d presentati in tabella 4.

Infrarosso	Rosso	Arancio	Giallo	Verde	Blu
1.225	1.725	1.895	1.905	1.910	2.860
0.012	0.010	0.015	0.010	0.020	0.040

Tabella 4: le intercette ad $I = 0$ delle parti lineari delle caratteristiche dirette

Da questi dati si ottiene il grafico di figura 12 dal quale si ricava

$$e/h = (2.57 \pm 0.15) \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}\text{V}^{-1}$$

anch'esso in accordo col valore noto ed un'intercetta praticamente zero.

In conclusione questo esperimento dà valori di h in ragionevole accordo con il valore noto già

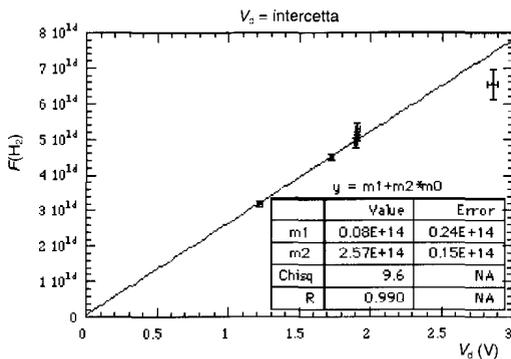


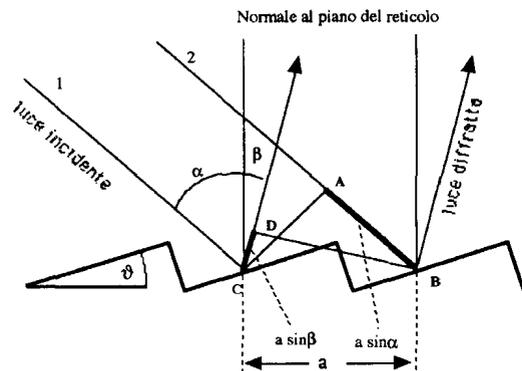
Fig. 12 - Analisi coll'intercetta ad $I = 0$ della parte lineare della caratteristica diretta.

usando le lunghezze d'onda nominali dei diversi LED mentre l'accordo diventa decisamente buono se si assume come errore delle frequenze di picco la semilarghezza dei diversi spettri di emissione e si fa il fit tenendo conto che gli errori sono diversi da punto a punto.

APPENDICE:

Il reticolo di diffrazione per riflessione

È costituito da una successione di gradini paralleli incisi ad una distanza a (passo del reticolo) su una superficie riflettente. La normale a questa superficie è detta normale del reticolo. L'angolo ϑ formato dai gradini con questa superficie è in genere di pochi gradi. Consideriamo due raggi incidenti all'angolo α rispetto alla normale del reticolo sui due gradini adiacenti in B e C (vedi figura).



Ogni gradino diventa una sorgente secondaria che riemette luce a tutti gli angoli. I raggi di luce riemessi all'angolo β da due gradini adiacenti interferiranno costruttivamente se la differenza di cammino ottico $AB-CD$ è un multiplo intero della lunghezza d'onda λ . Questo corrisponde alla condizione:

$$a (\sin \alpha - \sin \beta) = n \lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

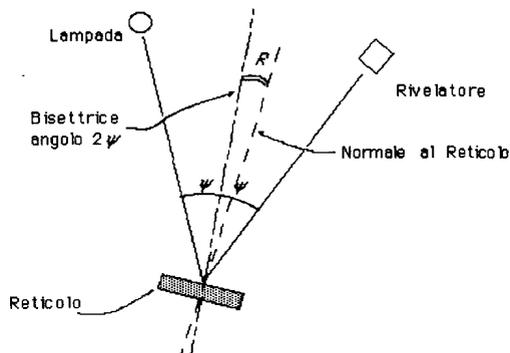
(il segno di β si considera positivo quando α e β stanno da parti opposte rispetto alla normale ed n è il numero d'ordine dello spettro di diffrazione).

Dal momento che per variare la lunghezza d'onda si ruota il reticolo mantenendo fisse la direzione di incidenza della luce e quella di osservazione si ha $\alpha + \beta = \text{costante}$. Posto $2\psi = \alpha + \beta$ e $2R = \alpha - \beta$ la equazione precedente si trasforma nella:

$$2a \cos \psi \sin R = n \lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

In sostanza l'angolo ψ è fisso e la lunghezza d'onda nella direzione fissa di osservazione varia proporzionalmente al seno dell'angolo R indicato nella figura sottostante.

Si ha $R = 0$ quando la normale al reticolo coincide con la bisettrice dell'angolo 2ψ formato dalla direzione di incidenza e da quella di osservazione e in questa condizione si ha interferenza costruttiva per tutte le λ (spettro di ordine $n = 0$, cioè nella direzione di osservazione si ha luce bianca).



Bibliografia

- [1] M.A. KARIM, *Electro-Optical Devices and Systems* PWS-KENT Publishing Company, pag 126.
- [2] D. WOOD, *Optoelectronic Semiconductor Devices*, pag. 75 e seg. Prentice - Hall (1994).
- [3] I. FERRARI, A. SCONZA: *Esperimenti didattici sulla fisica dei Semiconduttori*. Scheda didattica, LFNS XVII, n. 4, pag. XX (1985).
- [4] A. SCONZA, G. TORZO: "Spectroscopic measurement of the energy gap of Semiconductors", *Am. J. Phys.* **62**, 732-737 (1994).

Note

¹ A meno di non usare una lampada fluorescente compatta (di quelle cosiddette a basso consumo) (nota del revisore).

² In realtà la relazione corretta sarebbe $h\nu = E_g - (E_a + E_d) + q^2/4\pi\epsilon r$ dove E_a ed E_d sono le energie di legame degli accettori e dei donori introdotti nel materiale di substrato e l'ultimo termine tiene conto dell'interazione Coulombiana fra gli stessi (vedi E. Redondo et al. *A laboratory experiment with blue light-emitting diodes* *AJP* **65**, 371 (1997)).

³ Edmund Scientific Co. 101 Gloucester Pike, Barrington, NJ 08007 - 1380 Phone: 1-609-573-6263 Fax 1-609-573-6882 (USA).

⁴ Abbiamo scelto di alimentare i LED con una corrente così elevata per avere una intensità luminosa sufficiente per il nostro spettrometro. Con ciò si è trascurata la debole dipendenza della lunghezza d'onda di picco dall'intensità di corrente. Una misura di controllo eseguita sul LED infrarosso ci ha dato uno spostamento del massimo da 938.9 nm per $I = 100$ mA a 935.0 nm per $I = 10$ mA.

⁵ Distribuito dalla RS Components S.p.A. Via Cadorna 66 20090 Milano tel 02/274251, fax 02/27425426.