

Il diodo emettitore di luce e la costante di Planck

Scopo dell'esperimento

Indagare il doppio comportamento *corpuscolare* e *ondulatorio* della luce emessa da un LED (Light Emitting Diode) e metterli in relazione attraverso la *costante di Planck*, h .

La fisica

Il doppio aspetto, corpuscolare e ondulatorio della luce, è sintetizzato dalla *relazione di Planck*,

$$E_f = hf, \quad h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad (1)$$

dove f è la frequenza della radiazione, h è la costante di Planck ed E_f è l'energia del “quanto di luce”. L'energia della luce è infatti quantizzata, come intuito per la prima volta da Einstein nel 1905 con la sua interpretazione dell'*effetto fotoelettrico*. Partendo dalla relazione di Planck, Einstein dimostrò che l'energia della luce è portata da un numero intero di “quanti di luce”, che oggi chiamiamo *fotoni*, la cui energia E_f è data dalla (1).

La relazione lega la grandezza E_f tipica di un “corpuscolo”, cioè di un oggetto che, nelle interazioni, interviene come un qualcosa di indiviso, con la grandezza f che caratterizza un'onda, la quale scambia energia con gli oggetti con cui interagisce in modo completamente diverso. Ad esempio, in base alla (1) un fascio di luce verde scambia energia, quando interagisce, in quanti più grossi di un fascio di luce rossa, perché la frequenza del verde è maggiore di quella del rosso; se l'energia scambiata complessivamente fosse la stessa, con la luce verde il numero di fotoni coinvolti (emessi o assorbito) sarebbe minore, perché ogni fotone porta più energia.

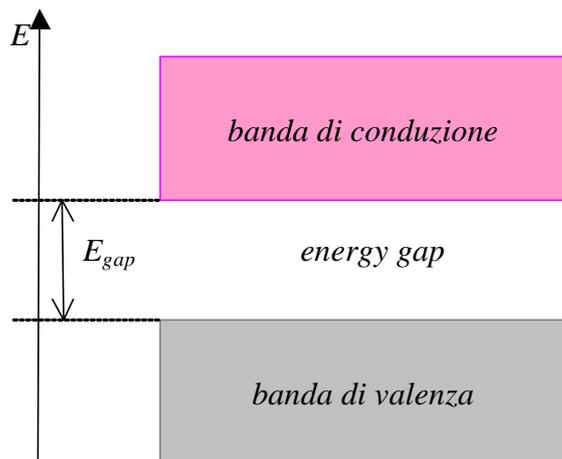
L'esperimento del diodo emettitore di luce permette di misurare separatamente, ma con lo stesso oggetto fisico, le due variabili che compaiono a destra e a sinistra della relazione di Planck e quindi di studiare contemporaneamente i due aspetti.

Il diodo

Il diodo LED, come tutti i diodi, è un “conduttore non ohmico”, perché in un diodo la relazione tensione-corrente non segue la legge di Ohm di proporzionalità diretta.

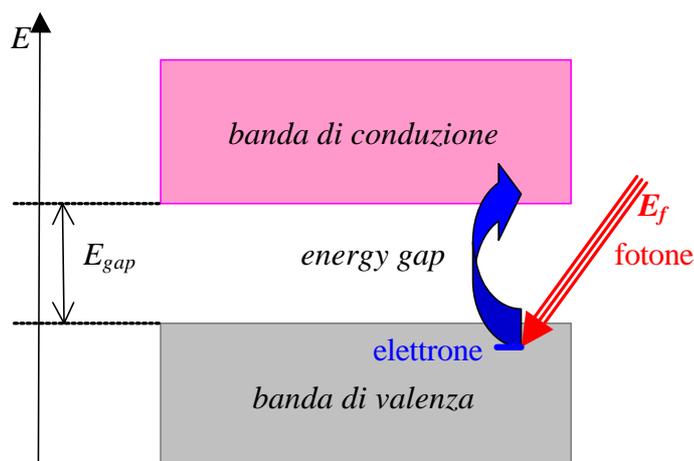
Ciò è dovuto al fatto che nel “semiconduttore” di cui il diodo è formato ci sono pochissimi *elettroni liberi* di muoversi sotto l'azione di una differenza di potenziale applicata dall'esterno, a differenza di ciò che avviene in un metallo, in cui invece gli “elettroni quasi liberi” sono abbondanti. Per “liberarsi” dal legame che lo tiene vincolato all'atomo, l'elettrone del semiconduttore deve infatti acquistare una energia sufficiente per vincere il legame; tale energia è caratteristica del materiale di cui è fatto il semiconduttore ed è molto maggiore dell'energia che può avere, a temperatura ambiente, per effetto dell'agitazione termica.

Schematicamente, in un diagramma in cui l'asse verticale è l'energia, gli elettroni legati agli atomi hanno energie che occupano con continuità tutta una *banda* di valori possibili, detta *banda di valenza*, mentre le energie degli elettroni quasi liberi stanno in una banda di valori possibili più elevati, detta *banda di conduzione*, e l'intervallo di energia che separa le due bande è l'*intervallo di energie proibite* o “energy gap”.



LED e fotoni: aspetti "corpuscolari" della luce

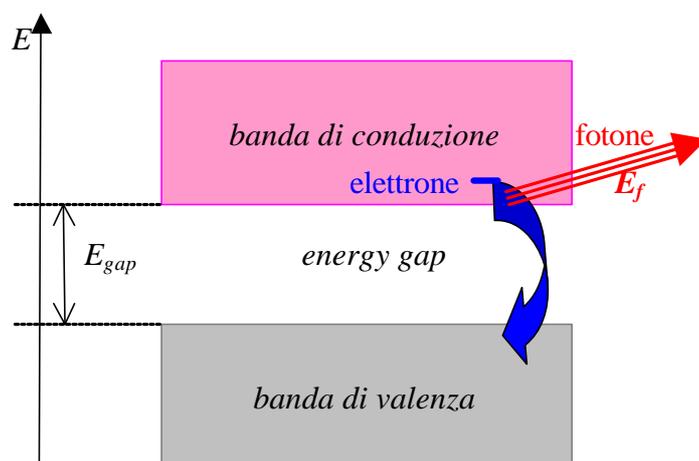
È possibile far passare un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione fornendogli energia attraverso la radiazione. È ciò che avviene in una *fotoresistenza*, in cui la resistività diminuisce drasticamente quando il dispositivo viene illuminato, proprio grazie all'energia luminosa portata dalla radiazione.



Lo schema energetico mostrato mette in evidenza il fatto che l'energia E_f portata dalla radiazione deve essere "quantizzata", cioè deve essere ceduta all'elettrone in una *singola interazione*, come avviene in un urto, affinché l'elettrone possa ricevere l'energia sufficiente per superare il gap di energie proibite: infatti, nella zona dell'energy gap non ci sono "gradini intermedi" di energia su cui l'elettrone può restare in attesa di ricevere altra energia dalla radiazione.

Noi sappiamo che l'energia della luce è appunto quantizzata, come ricordato sopra, il che significa che, per far avvenire la transizione, l'energia del fotone deve essere maggiore di E_{gap} , il che significa che la sua frequenza deve essere al di sopra di una *soglia minima*, proprio come avviene anche nell'effetto fotoelettrico.

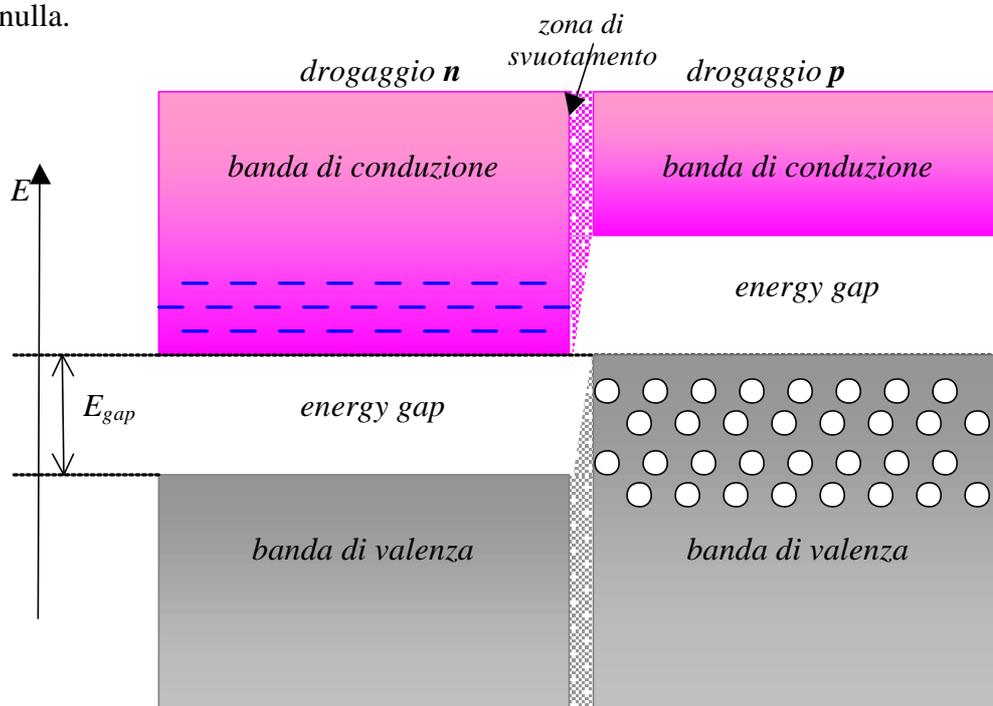
In modo simmetrico, quando un elettrone quasi libero viene catturato da un atomo che ha perso un elettrone (i "posti liberi" degli atomi che hanno perso un elettrone si chiamano *lacune*), l'elettrone non può perdere piccole quantità di energia, ma deve perdere almeno un'energia pari a E_{gap} . Un modo possibile di perderla è di "emettere un fotone" di energia $E_f = E_{gap}$. Anche in questo caso, c'è un valore minimo di energia dei fotoni emessi, perché non saranno emessi fotoni con $E_f < E_{gap}$.



Quest'ultimo fenomeno avviene appunto in un LED. Per capire come funziona un LED, bisogna capire il meccanismo con cui gli elettroni vengono portati in banda di conduzione. Esso è di tipo elettrico ed è basato su ciò che avviene “drogando” il semiconduttore. Il *drogaggio* è un meccanismo molto importante nella fisica dei semiconduttori, perché è ciò che ha reso questi materiali di altissimo interesse per le applicazioni. Il drogaggio di un semiconduttore può essere di due tipi:

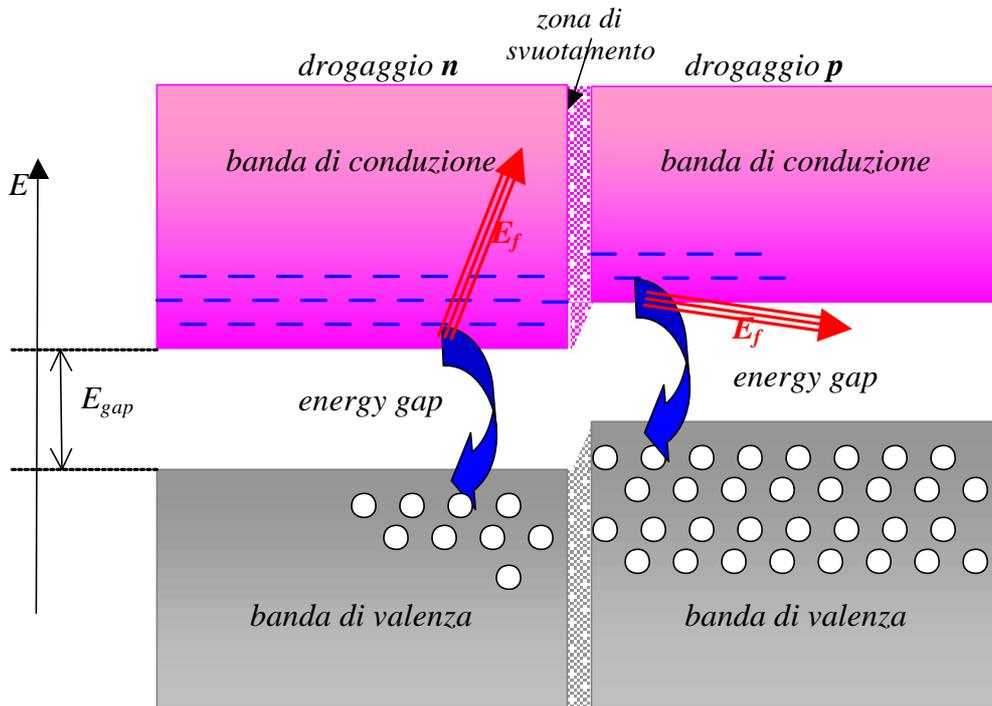
- drogaggio di tipo “**n**”: si sostituisce una piccola percentuale di atomi del semiconduttore (parti per milione o anche meno) con atomi che hanno un elettrone in più (ad esempio con fosforo pentavalente se il semiconduttore è silicio tetravalente): ciò porta molti elettroni quasi liberi in banda di conduzione, perché l'atomo drogante tende a perdere facilmente l'elettrone in più che ha rispetto alla matrice formata dagli altri atomi;
- drogaggio di tipo “**p**”: si sostituisce una piccola percentuale di atomi del semiconduttore (parti per milione o anche meno) con atomi che hanno un elettrone in meno (ad esempio con alluminio trivalente se il semiconduttore è silicio tetravalente): ciò crea molte lacune in banda di valenza, perché l'atomo drogante può ospitare facilmente un elettrone in più rispetto alla sua valenza, essendo immerso in una matrice di atomi che hanno appunto un elettrone in più.

Congiungendo due barre drogate una **n** e l'altra **p** si forma una *giunzione diodo*: dopo un breve transitorio in cui degli elettroni passano dal lato **n** a quello **p**, si crea una situazione di livellamento dei livelli energetici per cui il fondo della banda di conduzione è a un livello più alto dal lato **p** rispetto al lato **n**, il che impedisce agli elettroni di continuare a passare dal lato **n** al lato **p** e si ottiene equilibrio: fra i due lati della giunzione si crea una “zona di svuotamento”, in cui non ci sono elettroni liberi né lacune, cessa il flusso di corrente, la differenza di potenziale ai capi del diodo è nulla.



In queste condizioni il diodo non emette, perché dal lato **p** ci sono lacune in abbondanza ma non ci sono elettroni che possono combinarsi con le lacune, e, viceversa, dal lato **n** non ci sono lacune con cui gli elettroni presenti in abbondanza possano ricombinarsi.

Se si applica dall'esterno una differenza di potenziale elettrico favorevole, cioè positiva dal lato **p** rispetto al lato **n**, la barriera fra i due lati della giunzione si riduce e gli elettroni possono iniziare a passare dal lato **n** al lato **p**, con ritmo crescente man mano che aumenta la differenza di potenziale esterna e diminuisce il dislivello fra i due lati. La corrente perciò aumenta e il diodo comincia ad emettere, perché da entrambi i lati cominciano a esserci sia elettroni che lacune. L'energia E_f di questi fotoni è circa uguale in entrambi i lati a E_{gap} , per i motivi sopra spiegati.

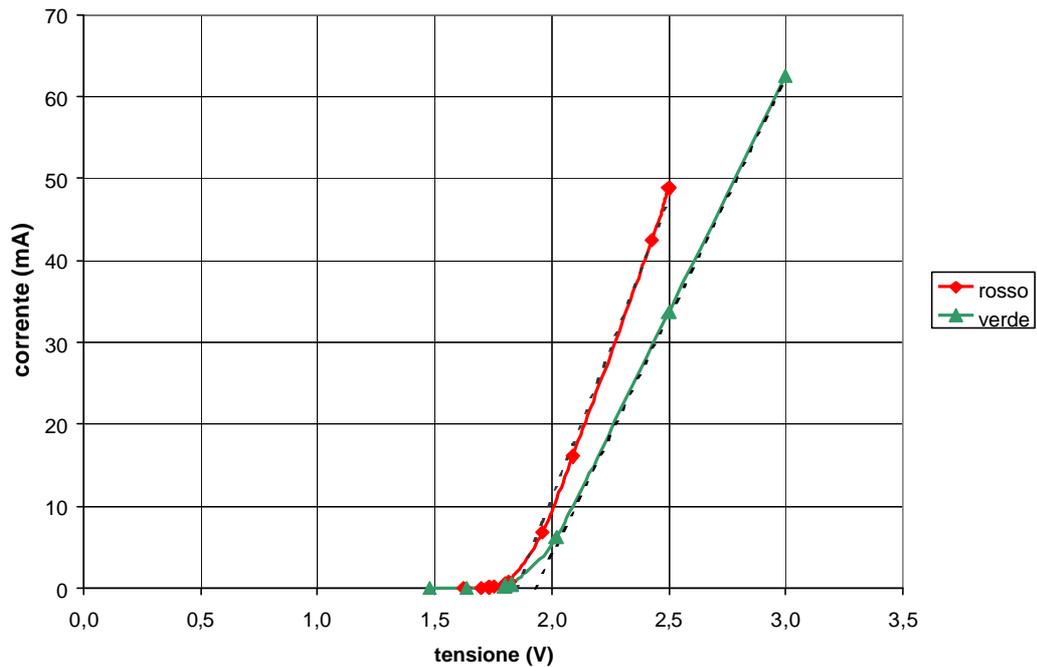


Va anche notato che la corrente non aumenta in modo proporzionale alla tensione, come ci si aspetta dalla legge di Ohm, ma in modo *esponenziale* ed è questo il motivo per cui il conduttore viene chiamato “non ohmico”. Nei conduttori ohmici infatti l’aumento di corrente con la tensione è dovuto all’aumento della velocità media di deriva degli elettroni, dato che è cresciuto il campo elettrico, in questo caso invece si ha in più un aumento del numero di elettroni che passano dal lato **n** al lato **p** della giunzione, che cresce rapidamente al diminuire del dislivello.

Quando la differenza di potenziale applicata dall'esterno è tale da livellare le bande nei due lati della giunzione, cioè $eV = E_{gap}$, dove e è la carica dell’elettrone, la luminosità diventa molto intensa e di lì in poi la relazione tensione-corrente diventa circa lineare: il diodo si sta cioè comportando come un conduttore ohmico normale, in cui non c’è nessuna differenza fra il passaggio della corrente in un senso o nell’altro.

Nella figura si vedono le caratteristiche tensione-corrente di due LED che emettono uno nel rosso (rombi) e l’altro nel verde (triangoli): si vede per entrambi un andamento esponenziale fino a una certa tensione e un andamento lineare al di sopra. La tensione a cui ciò avviene è decisamente più alta per il diodo verde che per il diodo rosso, il che indica che, corrispondentemente, l’energia del “fotone verde” è maggiore.

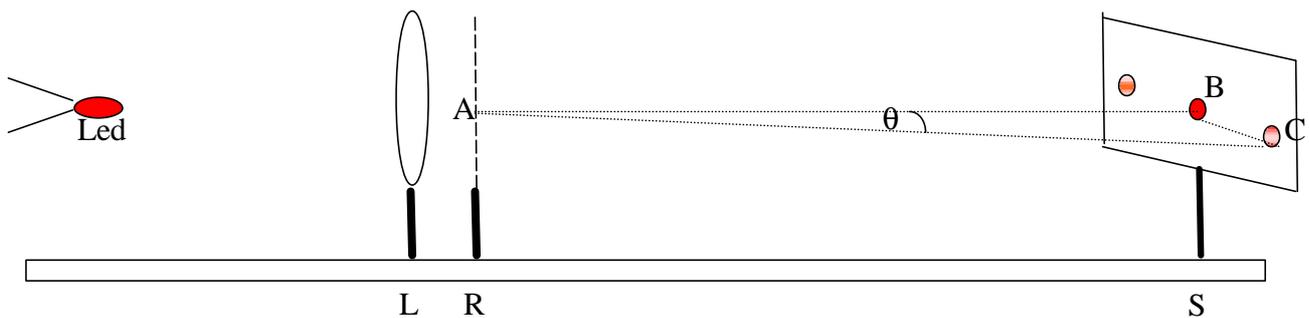
Estrapolando a un valore nullo della corrente il tratto di caratteristica lineare, si ottengono circa 1,8 V per il LED rosso e circa 1,95 V per il LED verde: ciò indica che i due diodi hanno effettivamente diversi valori di E_{gap} , e quindi, proprio in base a questi valori diversi, emettono fotoni di energia diversa e, conseguentemente, di *colore* diverso.



Il LED e l'aspetto ondulatorio della luce

Per controllare la relazione (1) di Planck, occorre misurare la lunghezza d'onda della luce emessa e, per fare ciò, sfruttiamo l'aspetto ondulatorio della luce, cioè si esegue il tipico esperimento di misura della lunghezza d'onda usando un reticolo di diffrazione.

Poiché la luce dei LED è molto debole l'esperienza va condotta al buio. Si dispone una lente e lo schermo in modo che l'immagine della luce emessa dai LED risulti a fuoco sullo schermo. Tra la lente e lo schermo si frappone il reticolo e si ottiene sullo schermo una figura di diffrazione in cui sono riconoscibili il massimo principale affiancato da 2 massimi secondari (del 1° ordine) meno intensi.



Misurando l'angolo θ e applicando la legge del reticolo, per cui

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (2)$$

dove d è il passo del reticolo, si calcola la lunghezza d'onda della luce emessa dal LED.

Unendo il valore di λ misurato con il reticolo a quello di $E_f = eV_o$, misurato dalla "tensione di soglia" della estrapolazione della parte lineare della caratteristica del diodo, si può determinare la costante di Planck:

$$h = eV_o \lambda / c \quad (3)$$

dove c è la velocità della luce, pari a $3 \cdot 10^8$ m/s.

Le misure sperimentali

Materiali

- LED di tre colori diversi, rosso, giallo, verde
- alimentatore di corrente continua (5V, 1A)
- 1 voltmetro e 1 amperometro
- lente convergente (lunghezza focale 15 cm)
- reticolo di diffrazione (600 linee/mm)
- termoresistenza (per la verifica del comportamento anomalo della resistenza di un semiconduttore al variare della temperatura)
- fotoresistenza (per la verifica del comportamento della resistenza di un semiconduttore in presenza di luce)

Misure preliminari

- Misure con la termoresistenza. Riscaldare con una lampada un oggetto metallico; misurare contemporaneamente la temperatura usando un altro termometro e la resistenza elettrica della termoresistenza. Riportare i dati della resistenza elettrica in un grafico: in ascisse la temperatura e in ordinate la resistenza. Si noter  una diminuzione. La dipendenza   esponenziale in funzione dell'inverso della temperatura assoluta:

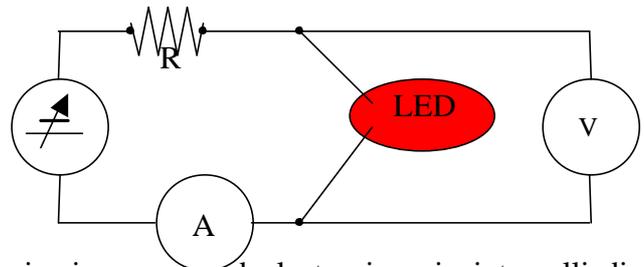
$$R = R_0 e^{-E_0 / k_B T}$$

dove E_0   una costante, che ha le dimensioni di una energia, caratteristica del materiale, che   dell'ordine dell'*energy gap* del semiconduttore, T   la temperatura assoluta e k_B   la costante di Boltzmann, pari a ... 10^{-24} J

- Misure con la fotoresistenza. Misurare al buio la resistenza elettrica della fotoresistenza e poi rimisurarla esponendola alla luce. Il valore dell'illuminamento, espresso in lux, per queste fotoresistenze   circa pari a 300 diviso per il quadrato della resistenza elettrica espressa in $k\Omega$.

Misura della caratteristica tensione-corrente del LED e della lunghezza d'onda della luce emessa

Collegare il LED all'alimentatore di corrente (il piedino pi  lungo va collegato alla tensione positiva). Collegare il voltmetro ai capi del LED e mettere in serie, come indicato in figura, l'amperometro e una resistenza R di circa 300Ω (impedisce che la corrente salga a valori troppo alti quando il diodo entra in conduzione).



Iniziare con una tensione inferiore a 1V e proseguire incrementando la tensione in intervalli di 0,2V, registrando ogni volta tensione e corrente, fino a quando il LED inizia ad accendersi e la corrente a diventare dell'ordine del mA.

Infittire i punti, proseguendo con intervalli di 0,1 A, ma non superare i 5 o 6 mA di corrente.

Riportare i dati in un grafico, in ascisse le tensioni, in ordinate le correnti. Individuata la parte lineare della caratteristica, estrapolare a zero corrente, ottenendo cos  il valore di V_0 .

Per la misura della lunghezza d'onda λ alimentare il LED in modo che emetta una luce brillante, senza tuttavia forzarlo, posizionarlo di fronte alla lente e al reticolo, in modo da focalizzare l'immagine sullo schermo con la disposizione illustrata nella figura di pagina 5 (si consiglia una distanza dalla lente un po' minore della distanza focale); misurare la distanza schermo-reticolo e la distanza dallo spot centrale del primo massimo di diffrazione (fare la media fra le distanze dei due massimi) e calcolare la lunghezza d'onda λ dall'equazione (2).

Dai valore di λ e di V_0 calcolare la costante di Planck con la relazione (3).

Ripetere la misura con un LED di colore diverso.