Costante di Planck con diodi LED

Paolo Bussei - **A Scuola di Laboratorio – Modena 09 - 13 settembre 2019**

Sommario

- Motivazioni
- Un po’ di storia (una possibile introduzione)
- L’esperienza
- Misconceptions

MOTIVAZIONI

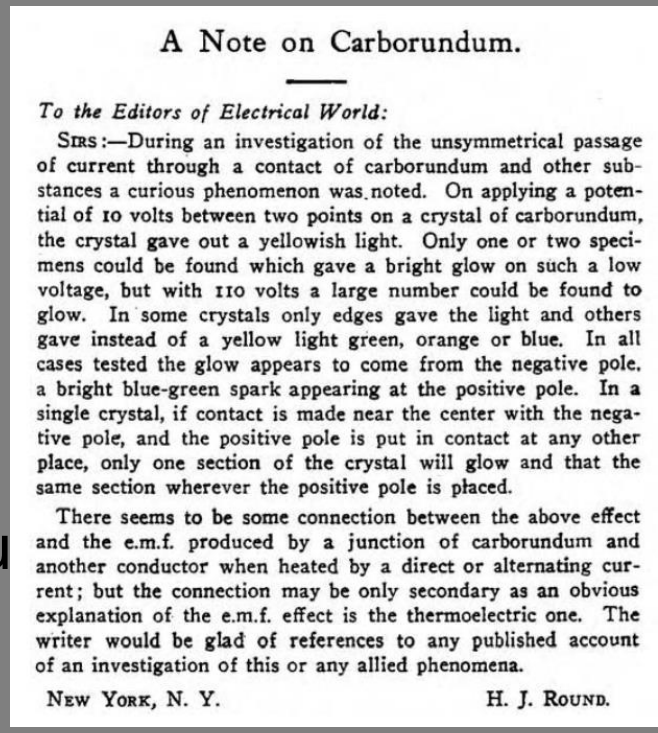
- Pretesto per introdurre un po’ di fisica dei semiconduttori (sono ovunque)
- Non servono grandi apparecchiature per misurare le costanti fondamentali
- Rendere la fisica moderna un po’ meno di «carta»

Un po’ di storia

Ovvero un possibile modo per introdurre l’argomento

- LED = acronimo per *Light Emitting Diode*
- E’ una giunzione *p-n*
- Emette luce quando sottoposto ad una tensione

1907 - **Henry Joseph Round** scopre l’elettroluminescenza del SiC (allora chiamato «carborundum»). L’articolo indica che il primo LED era in realtà u diodo Schottky invece di una giunzione p-n.



A Note on Carborundum.

To the Editors of Electrical World:

SIRS:—During an investigation of the unsymmetrical passage of current through a contact of carborundum and other substances a curious phenomenon was noted. On applying a potential of 10 volts between two points on a crystal of carborundum, the crystal gave out a yellowish light. Only one or two specimens could be found which gave a bright glow on such a low voltage, but with 110 volts a large number could be found to glow. In some crystals only edges gave the light and others gave instead of a yellow light green, orange or blue. In all cases tested the glow appears to come from the negative pole, a bright blue-green spark appearing at the positive pole. In a single crystal, if contact is made near the center with the negative pole, and the positive pole is put in contact at any other place, only one section of the crystal will glow and that the same section wherever the positive pole is placed.

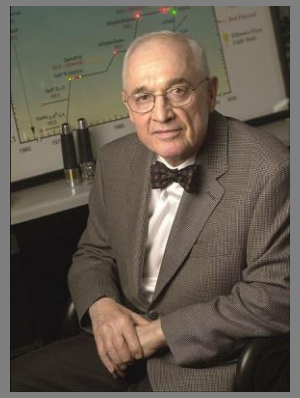
There seems to be some connection between the above effect and the e.m.f. produced by a junction of carborundum and another conductor when heated by a direct or alternating current; but the connection may be only secondary as an obvious explanation of the e.m.f. effect is the thermoelectric one. The writer would be glad of references to any published account of an investigation of this or any allied phenomena.

NEW YORK, N. Y. H. J. ROUND.

Electrical World (1907), **49**, 30

1928 - **Oleg Vladimirovich Losev** condusse dettagliate ricerche sulla luminescenza del SiC utilizzati nei circuiti radio. Concluse correttamente ch La luminescenza non era dovuta ad un fenomeno di incandescenza.

1961 - **James R. Biard** (sx) e **Gary Pittman** (dx) svilupparono il primo LED infrarosso (presso la Texas Instruments): il primo LED moderno

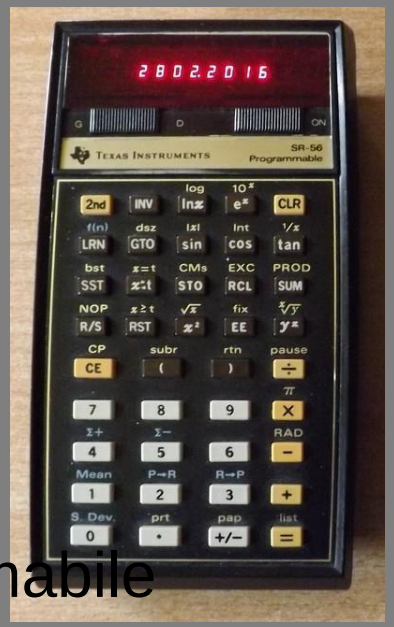


1962 – **Nick Holoniack Jr.** sviluppa il primo LED nel visibile (rosso) presso la General Electrics. Il LED era composto da GaAsP su un substrato di GaAs

1972 – **Herbert Maruska e Jacques Pankove** sviluppano un LED viola

2014 – **Isamu Akasaki** , **Hiroshi Amano** e **Shūji Nakamura**
premio Nobel per la fisica “per l'invenzione del LED blu efficiente, che ha reso possibile la produzione di sorgenti di luce bianca luminose a risparmio energetico”

1972 – **Hamilton Corporation**, primo orologio con LED



1976 – **Texas Instruments**, SR-56 calcolatrice tascabile programmabile

… illuminazione privata e pubblica, allestimenti artistici,

L’esperienza

TITOLO: misura della costante di Planck

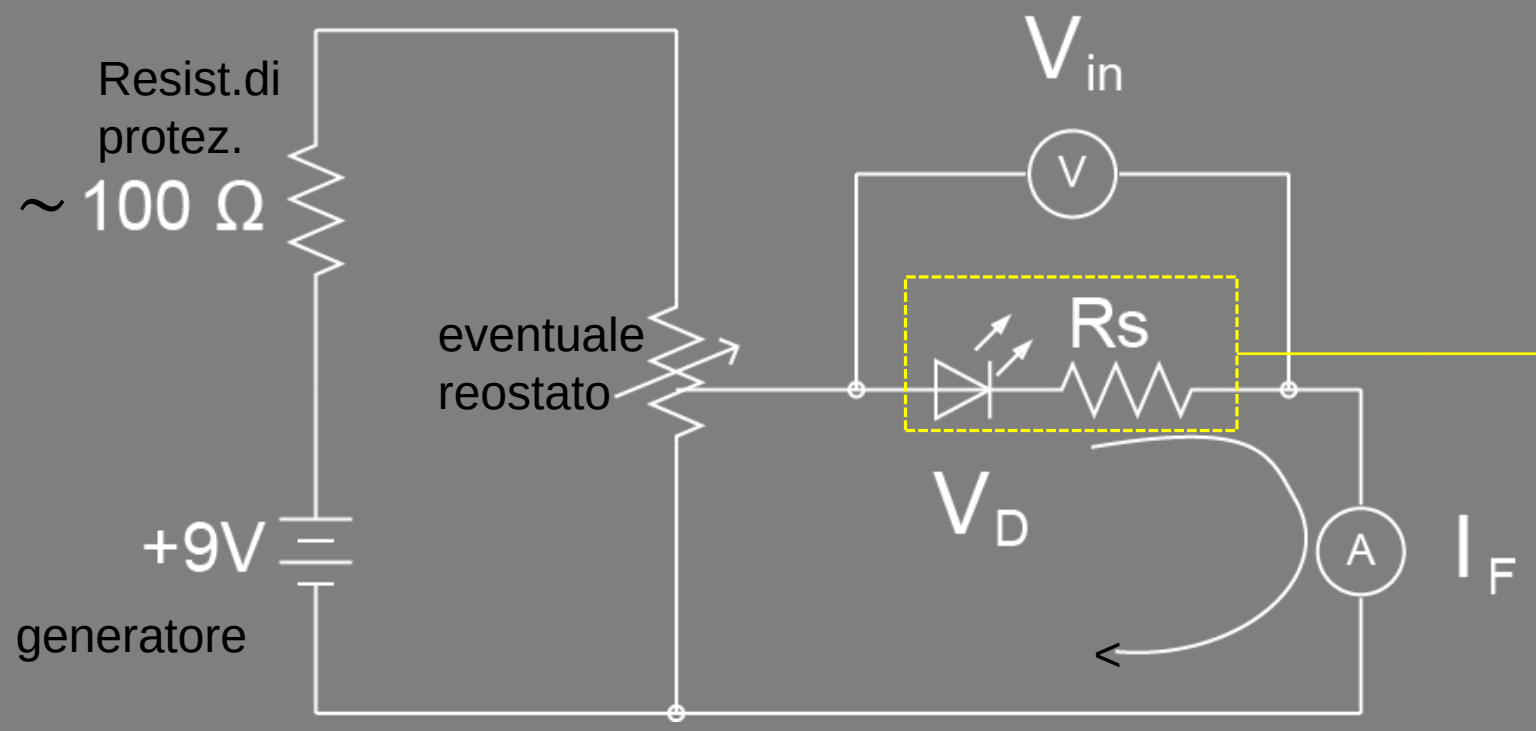
SCOPO: determinazione sperimentale della costante di Planck mediante diodi LED

ELENCO MATERIALE:

- 1 generatore in continua (0-5A / 0-30 V) con manopole per la regolazione fine della tensione
- 1 breadboard
- 1 resistore da ~ 100 Ω di protezione
- 5 LED (rosso, arancione, giallo, verde, blu, … dipende cosa trovate) e relativi datasheet
- 1 voltmetro digitale (10 MΩ di impedenza) e sensibilità 1 mV con cavetti di collegamento
- 1 amperometro (portata 0-1 A, sensibilità 10 μA / 100 μA) con cavetti di collegamento
- 1 pc con foglio di calcolo

DESCRIZIONE MATERIALE: se il caso si può richiedere di descrivere i LED se è stato affrontato a lezione (attenzione che è facile che lo studente abbia e sviluppi misconceptions! Affronterò il problema alla fine.)

DISEGNO APPARECCHIATURA: schema elettrico



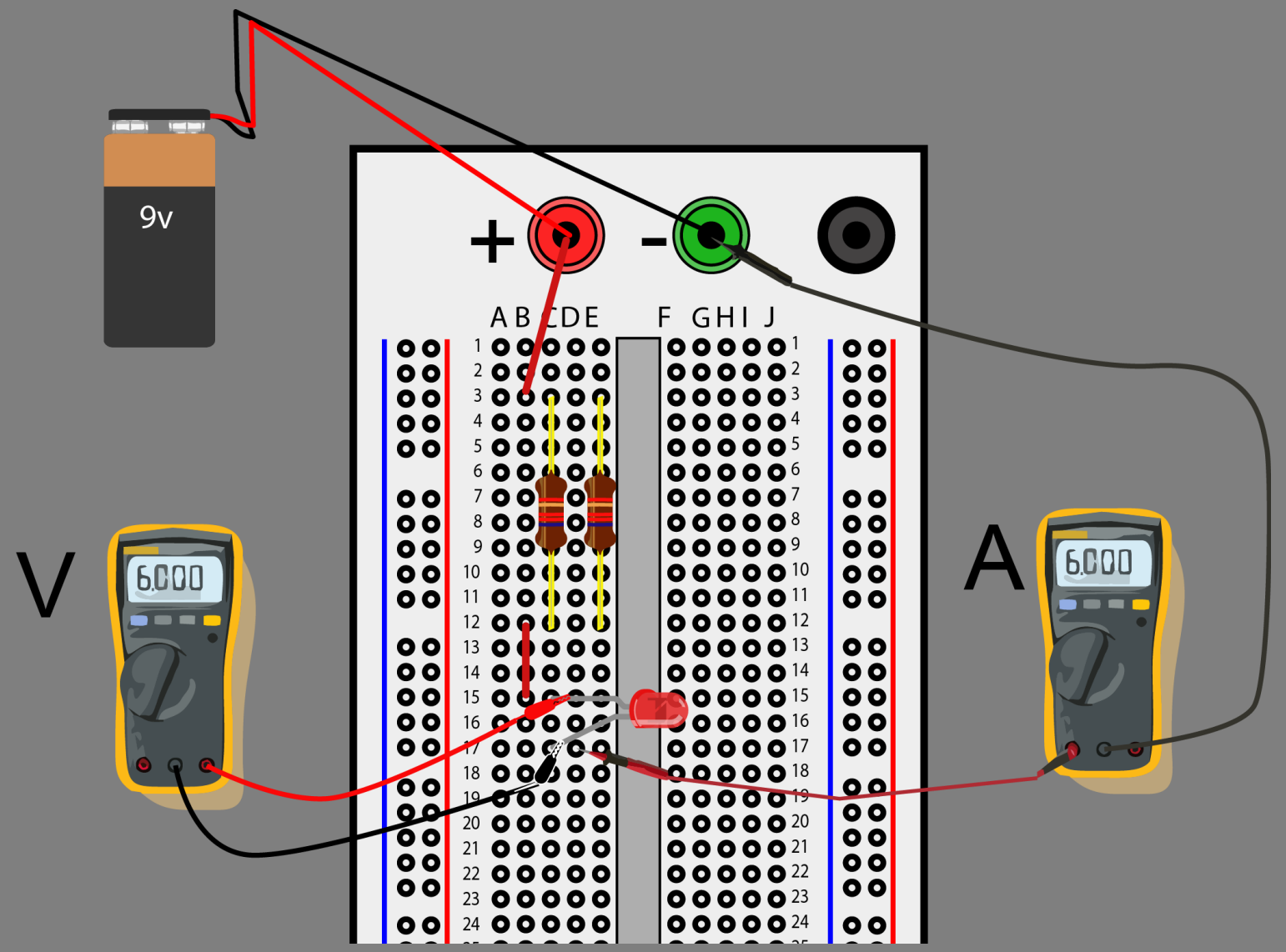
NOTA DIDATTICA:
Lasciate un po' di tempo agli studenti perché provino tutti a realizzare materialmente il circuito.
Passare a controllare il corretto assemblaggio prima di dare tensione

Diodo reale: scomposto in un diodo ideale e una piccola resistenza in serie

NOTA: schema con batteria e reostato per regolare la corrente al LED
Se ho il generatore con le manopole, posso fare a meno del reostato

DISEGNO APPARECCHIATURA: schema di montaggio

NOTA: schema con batteria senza reostato: la batteria serve solo per indicare come collegare il generatore alla breadboard



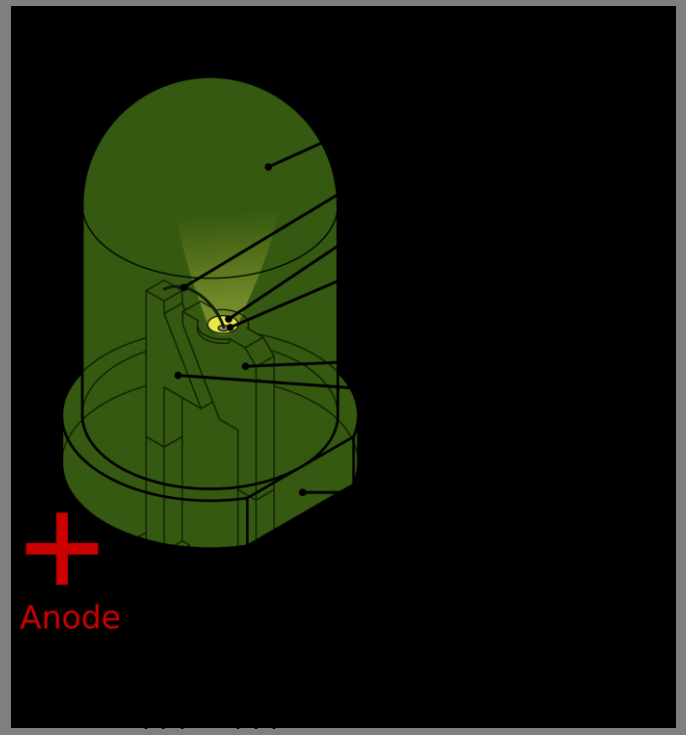
CENNI TEORICI:

I LED (light-emitting diode) sono dispositivi optoelettronici che convertono l'energia elettrica in radiazione e.m. Le applicazioni vanno dalle lampade ai displays, ecc.

La radiazione emessa può essere considerata pressoché monocromatica, con una larghezza di riga tipicamente compresa tra i 10 e i 50 nm.

I LED sono giunzioni p-n a semiconduttore che se opportunamente polarizzati (Vp > Vn, forward bias) possono emettere spontaneamente nell' UV, VIS e IR.

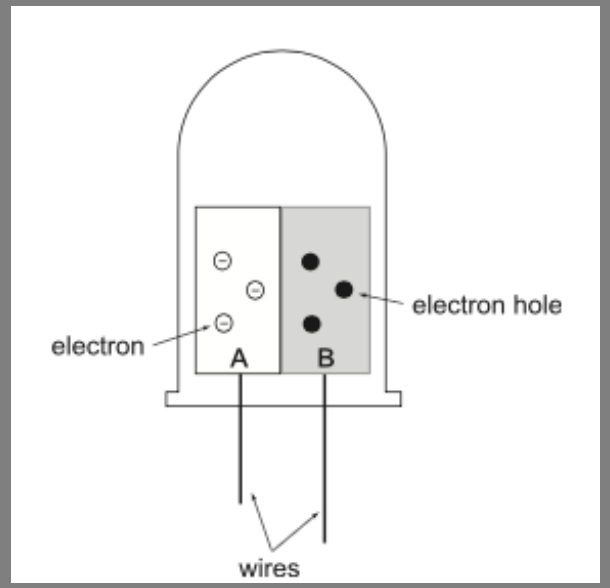
[S.M. Sze, *Physics of semiconductor devices*, 2° ed. (1981), John Wiley & Sons]

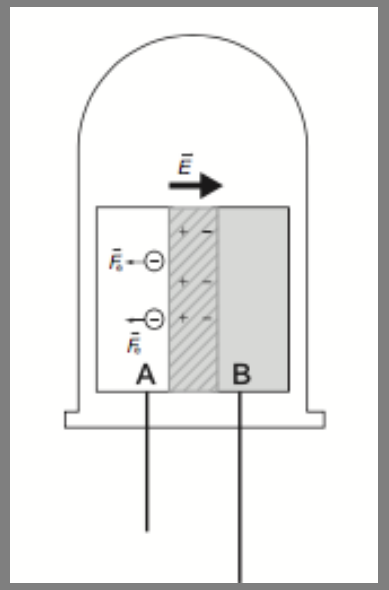


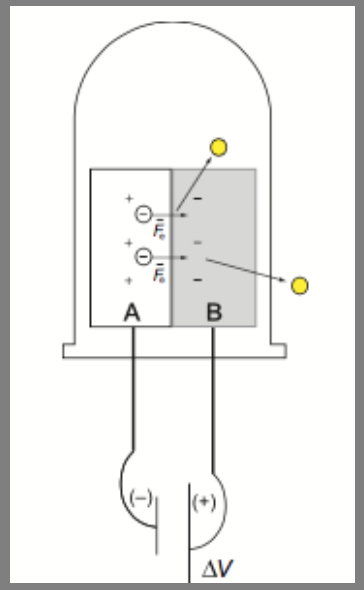
CENNI TEORICI:

Consideriamo una giunzione p-n brusca (abrupt) con una concentrazione di donori di N_D e una concentrazione di accettori di N_A. Si presume che tutti i droganti siano completamente ionizzati in modo che la concentrazione di elettroni liberi sia data da $n = N_D$ e la concentrazione di buche libere sia data da $p = N_A$. Si presume inoltre che nessuna compensazione dei droganti si verifichi per impurezze non intenzionali e difetti.

In prossimità di una giunzione p-n non polarizzata, gli elettroni provenienti dai donori sul lato di tipo n diffondono sul lato di tipo p dove incontrano molte lacune con cui si ricombinano. Un processo corrispondente si verifica per le lacune che diffondono nel lato di tipo n. Di conseguenza, una regione vicino alla giunzione p-n è impoverita di portatori liberi. Questa regione è conosciuta come la **regione di svuotamento**.







CENNI TEORICI:

In assenza di portatori liberi nella regione di svuotamento, l'unica carica in questa regione proviene da donori e accettori ionizzati. Questi droganti formano una regione di carica spaziale, vale a dire donori sul lato n e accettori sul lato p. La regione di carica spaziale produce un potenziale chiamato potenziale di diffusione, V_D.

La tensione di diffusione rappresenta la barriera che i portatori liberi devono superare per raggiungere la regione neutra di conducibilità di tipo opposto.

Questa regione è **altamente resistiva** a causa del fatto che è impoverita di portatori liberi.

Una polarizzazione esterna pertanto diminuisce o aumenta la barriera di giunzione p-n per la polarizzazione diretta o inversa, rispettivamente.

In condizioni di **polarizzazione diretta**, elettroni e lacune vengono iniettati nella regione di conduttività opposta aumentando il flusso di corrente. I portatori diffondono nelle regioni di conducibilità opposta dove alla fine si ricombineranno, emettendo in tal modo un fotone.

Si può dimostrare che in giunzioni p-n sufficientemente drogate:

$$V_D \approx \frac{E_g}{e}$$

Gli elettroni che si ricombinano con le lacune in vicinanza della giunzione producono così fotoni di energia $h\nu$ prossima al valore dell'energy gap E_g.

CENNI TEORICI:

L'energia degli elettroni iniettati viene convertita in energia ottica dopo ricombinazione elettrone-lacuna. Pertanto, la conservazione dell'energia richiede che la tensione diretta di un LED sia uguale (o maggiore) a E_g/e. Pertanto, ci si aspetterebbe che:

$$V_{in} \approx \frac{E_g}{e}$$

dove con V_{in} si è indicata la tensione di polarizzazione diretta. Esistono diversi meccanismi che rendono la tensione di pilotaggio V_{in} leggermente diversa da questo valore.

1) Innanzitutto, il diodo ha una «significativa» resistenza in serie (R_S) che implica una caduta di tensione aggiuntiva. La resistenza aggiuntiva può essere causata da
   i. *resistenza di contatto*,
   ii. *resistenze causate da eterostrutture* brusche e
   iii. *resistenza del bulk* che si verifica in particolare in materiali con basse concentrazioni di portatori o mobilità bassa.
2) L'energia dei portatori potrebbe essere perduta per iniezione non adiabatiche, ossia i portatori perdono energia trasferendola al cristallo come energia. Queste perdite sono significative per i semiconduttori che hanno larghe discontinuità di banda, come ad es. GaN ed altri materiali del terzo gruppo con N.

DESCRIZIONE ESPERIENZA:

Montare il circuito secondo lo schema elettrico, ovvero …

Assicurarsi che la manopola della corrente sia ruotata verso il massimo e quella della tensione sia a zero. Accendere l'alimentatore. Registrare i valori di corrente e tensione ai capi del LED.
Ruotare la manopola della tensione in modo che sul voltmetro sia possibile leggere una tensione di ~ 100 mV; leggere il corrispondente valore di corrente. Riportare la coppia di valori (I, V) in tabella. Procedere a step di ~ 100 mV (o anche più) fino a quando il LED non comincia ad illuminarsi. Da questo punto in poi procedere a step di ~ 50 mV fino a raggiungere i valori di corrente massima di sicurezza per ciascun LED (~30 mA).

NOTA 1: è consigliabile avere diverse (>10) coppie di valori (I, V) da quando il LED è acceso fino al valore massimo perché queste coppie serviranno per calcolare il valore della V_D del diodo.

NOTA 2: Assicurarsi che le misure vengano fatte tutte alla stessa temperatura. I valori di V_D diminuiscono di circa un 2% (o più) se si scaldano i LED tenendoli fra le dita della mano, cioè per un aumento di temperatura di circa 10°C.

TABELLE e VALORI (elaborazione dati):

Calcolo della tensione di diffusione (V_D)

Quando $V_{in} > V_D$, la barriera è praticamente azzerata e il diodo segue la legge di Ohm perché la corrente è limitata dalla resistenza serie del diodo. Questa è proprio la resistenza serie di cui si ha bisogno. Si assume, quindi, che la R_S sia data dalla pendenza del tratto lineare della caratteristica I-V:

$$R_S = \frac{\Delta V_{in}}{\Delta I}$$

Per calcolare R_S e la relativa incertezza, si sfruttino le capacità di analisi del foglio di calcolo (qui ad esempio MS Excel®) attraverso la funzione:

PENDENZA (y_nota; x_nota)

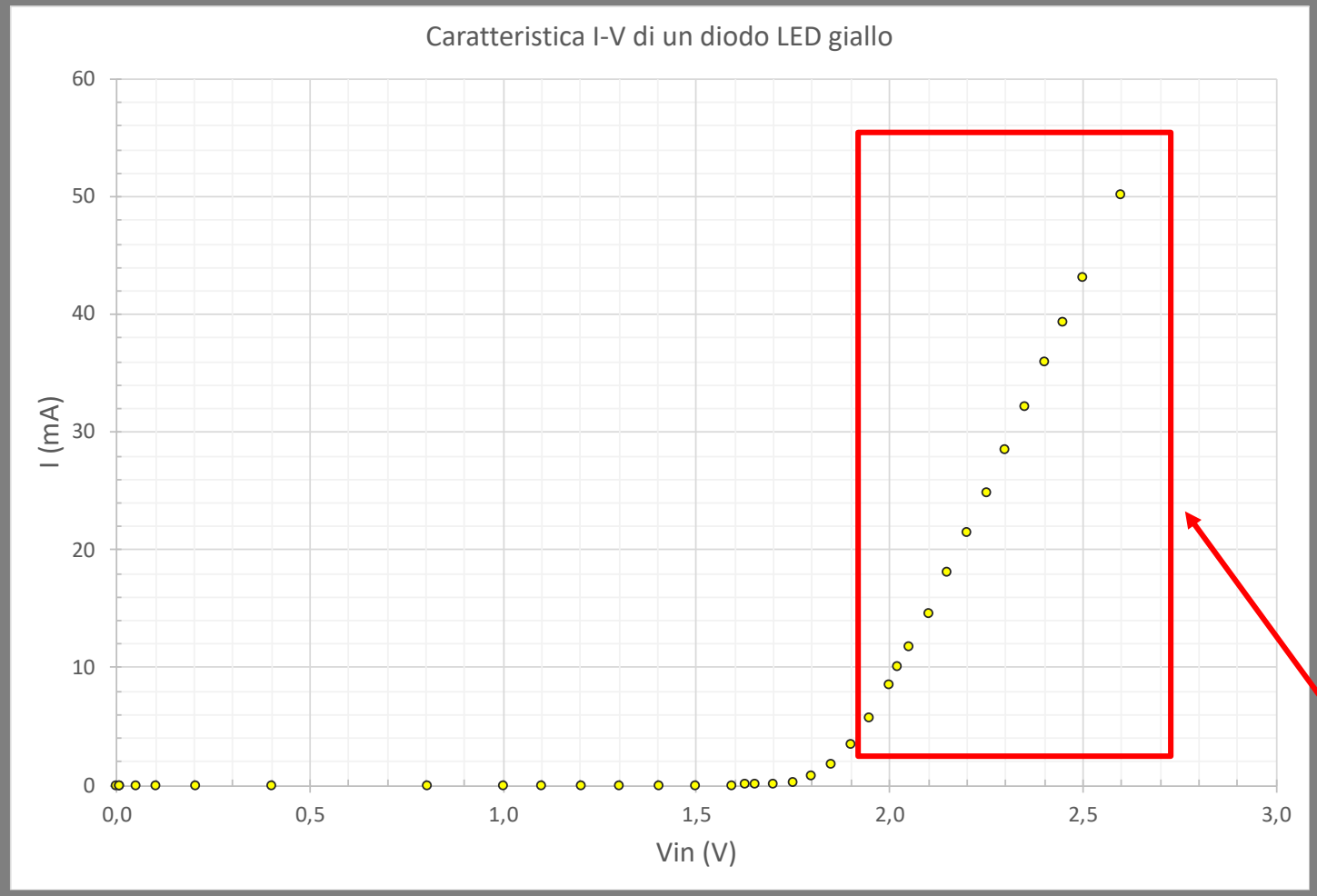
dei soli dati del tratto obliquo

NOTA: Attenzione alle unità di misura (specialmente per la corrente, se espressa in mA) e a quale variabile è in ascissa e quale in ordinata: se V in ascissa e I in ordinata la pendenza vi da' 1/R

Per il calcolo di V_D si può utilizzare la funzione INTERCETTA(y_nota; x_nota) dei soli dati del tratto obliquo

TABELLE e VALORI (elaborazione dati):

I (mA)	Vin (V)
0	0,000
0	0,007
0	0,010
0	0,050
0	0,100
0	0,203
0	0,400
0	0,804
0	1,000
0	1,100
0	1,202
0	1,301
0	1,405
0	1,498
0,006	1,592
0,015	1,625
0,031	1,652
0,094	1,701
0,269	1,751
0,731	1,800
1,765	1,850
3,5	1,900
5,77	1,949
8,46	2,00
10,00	2,02
11,71	2,05
14,58	2,10
18,1	2,15
21,5	2,20
24,8	2,25
28,5	2,30
32,1	2,35
35,9	2,40
39,3	2,45
43,1	2,50
50,1	2,60



NOTA DIDATTICA:
Si noti che il grafico è stato costruito riportando *I* in ordinata e V_{in} in ascissa. Prestare attenzione quando si istruisce il foglio elettronico nell'eseguire il grafico (altrimenti dare l'indicazione di costruire la tabella riportando prima la tensione e poi la corrente).

PENDENZA(y_nota; x_nota)

INTERCETTA(y_nota; x_nota)

NOTA DIDATTICA:
Si può anche far trovare V_D agli studenti per via grafica: o su foglio di carta mm o stampando il grafico del foglio di calcolo con però una griglia fine

TABELLE e VALORI (elaborazione dati):

Calcolo di *h*

Avendo ottenuto V_D, si può a questo punto calcolare *h*:

$$h = \frac{e}{c} V_D \lambda$$

con λ ottenuto dal datasheet del corrispondente LED

NOTA: il valore di *h* può essere ottenuto anche per via grafica, riportando i vari valori di V_D in funzione di $1/\lambda$ di ogni LED:

$$V_D = \frac{hc}{e} \frac{1}{\lambda}$$

Il coefficiente angolare della retta è così legato ad *h* dalla relazione:

$$m = \frac{hc}{e}$$

NOTA DIDATTICA:

Normalmente il metodo grafico del calcolo di h non fornisce dei buoni valori

TABELLE e VALORI (elaborazione dati):

Calcolo degli errori:

$$h = \frac{e}{c} V_D \lambda$$

$$\delta h = h \left[\frac{\delta V_D}{V_D} + \frac{\delta \lambda}{\lambda} \right]$$

NOTA DIDATTICA:
Per questa parte sono molto (ma non del tutto) d'accordo con quanto affermato da E. Fabri in La Fisica nella Scuola **28** (1995), 119

Secondo me un po' di propagazione degli errori va fatta: abitua anche a capire dove è ragionevole intervenire per migliorare una misura.

CONCLUSIONI:

Osservando gli errori relativi si nota che il contributo maggiore proviene proprio da λ (qualche %). Come si può migliorare?
Potrebbe venire in mente di eseguire una misura (ripetuta) della λ di ogni LED, ma si è certi di ottenere un significativo miglioramento?

La cosa migliore è ispezionare il grafico di V_D in funzione di $1/\lambda$:

- Il coefficiente angolare della linea di tendenza è «vicino» al valore atteso?
  Se no, come mai? Come dovrebbero modificarsi i dati per migliorare l'accordo?
- Il valore dell'intercetta è compatibile con l'idea di diretta proporzionalità?
  Se no, come mai? Come dovrebbero modificarsi i dati per migliorare l'accordo?

NOTA DIDATTICA:

Per questa parte sono completamente d'accordo con quanto affermato da E. Fabri in La Fisica nella Scuola **28** (1995), 119:

«Un esperimento non è mai finito»

CONCLUSIONI:

… Lascio a voi trarre le conclusioni in base al percorso che avete seguito e in base agli obiettivi che vi siete prefissati con l’esperienza …

Una sorgente d’errore è il fatto che i LED non emettono una singola frequenza, una riga; piuttosto essi emettono in una banda di ~ 40/60 nm di larghezza, mentre il valore in grafico si riferisce al centro della banda.

MISCONCEPTIONS:

Come promesso alcuni fraintendimenti (misconceptions) riscontrati in letteratura sugli studenti che si approcciano allo studio dei semiconduttori e dei diodi in particolare.

K.G. Nelson et al. *«Students' Misconceptions about Semiconductors and Use of Knowledge in Simulations»,* J.Eng.Educ. 106, 2, (2017), 218-244.

Y. Chen et al. *«Correcting Misconceptions on Electronics: Effects of a simulation-based learning environment backed by a conceptual change model»,* Educ.Techn. & Soc. 16, 2, (2013), 212-227.

MISCONCEPTIONS:

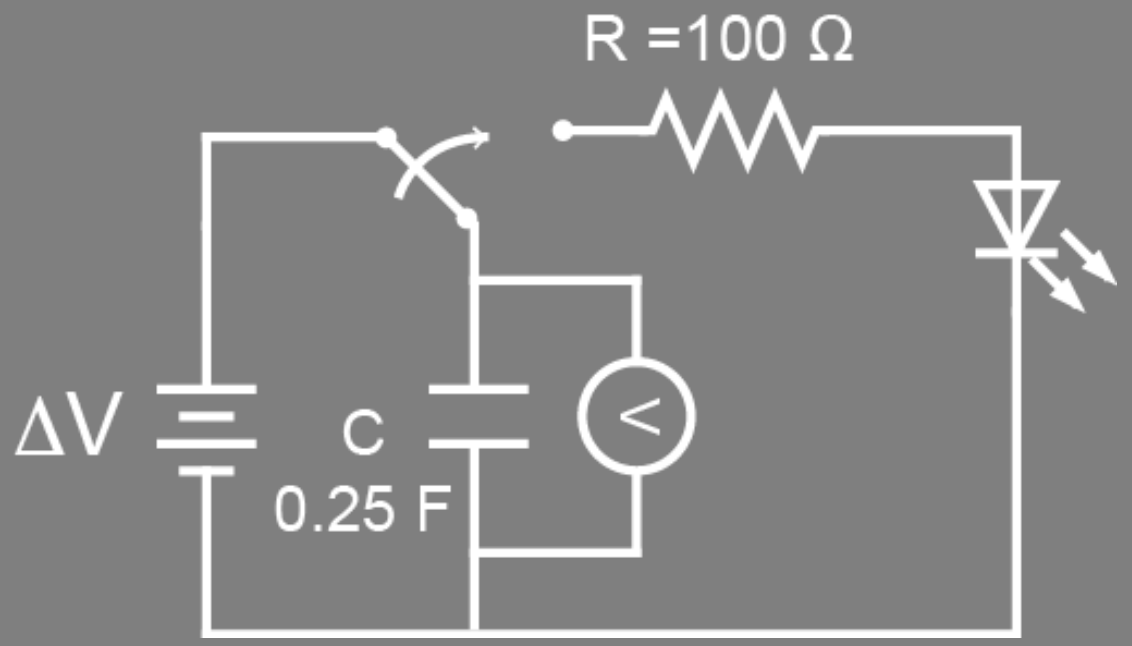
Table 1. Probable misconceptions of a student who learns about diodes

Conceptual Content	Misconception Designation	Misconception
Semiconductor Concept of a Diode	M1	Confusion about the diode symbol.
	M2	Holes are the majority carriers of an N-type semiconductor.
	M3	The depletion region narrows when reverse bias is applied to a diode.
	M4	A diode's depletion region is caused by minority carriers in the P- and N-type semiconductors.
	M5	Confusion about the drift and diffusion of carriers.
	M6	No current flows through a non-conducting diode when forward or reverse bias is applied.
	M7	Reverse saturation current is affected only by temperature.
Feature of Diode Bias	M8	A diode conducts with no resistance when forward bias is applied.
	M9	Confusion about the status of a diode when forward or reverse bias is applied.
	~~M10~~	~~Confusion about the status of a zener diode when forward or reverse~~ bias is applied.
	~~M11~~	~~A zener diode will irreversible breakdown whenever a reverse bias is~~ applied.
Simplified Model of a Diode	M12	Disregarding internal resistance in the linear model.
	M13	No current in the parallel resistance when a diode is conducting.
	M14	Disregarding barrier voltage in the linear model.
	M15	Disregarding barrier voltage in the constant-voltage-drop model.
	M16	The barrier voltage and internal resistance are included in the constant-voltage-drop model of a diode.
	M17	The internal resistance is included in the ideal diode model.
	M18	The barrier voltage is included in the ideal diode model.

Possibili varianti:

Esiste un altro modo per determinare la costante di Planck, sempre con i LED e sempre in modo abbastanza semplice (anche se il circuito è un po' più complesso).

Si tratta di misurare la caduta di tensione ai capi di un condensatore in serie al LED (e a un resistore di protezione) durante la fase di scarica, in funzione del tempo: la tensione tende ad un valore costante non nullo che rappresenta V_D … non l'ho ancora provato



Bibliografia (breve)

Jewett Jr., John W, *Get the LED out* , The Physics Teacher, (1991), 11, p. 530-534

Pietro Scatturin and Andrea Sconza, *Misura della costante h/e (costante di Planck/carica elementare) mediante L.E.D.*, La Fisica nella Scuola, (1998), XXXI, 3, p. 162-169

Jitlada Sunnu, et. al., *Experimental Set for Measuring the Planck's Constant using LED*, The 15th International Conference of International Academy of Physical Sciences Dec 9 - 13, 2012, Pathumthani, Thailand