



Determinació de la constant de Planck a partir de l'electroluminiscència d'un díode

Introducció

Quan enviem llum sobre la superfície d'un metall la llum pot arrancar electrons que es poden detectar amb un circuit elèctric en forma de corrent. Aquest experiment s'anomena *efecte fotoelèctric* i va ser realitzat molt acuradament pel físic alemany d'origen eslovac Philipp Lenard al final del segle XIX. L'explicació natural de l'experiment és que la llum transmet la seva energia als electrons lligats al metall, i si l'energia és suficient aquests poden sortir a l'exterior i passar pel circuit. L'efecte fotoelèctric va resultar sorprenent pels físics de l'època, ja que només es genera corrent elèctric utilitzant llum d'una longitud d'ona menor que un determinat valor llindar, que depèn del tipus de metall estudiat. Però en l'explicació clàssica de la llum com a ona, la seva energia només depèn de l'amplitud d'oscil·lació, i no de la longitud d'ona.

El 1905, ara fa 100 anys, Albert Einstein va publicar¹ una explicació d'aquest efecte basada en la idea que l'energia de la llum s'intercanvia en paquets discrets (deu anys més tard identificats com autèntiques partícules de llum o *fotoons*) que tenen una energia proporcional a la seva freqüència (ν), essent la constant de proporcionalitat (h) la mateixa que poc abans havia introduït Max Planck per explicar l'espectre de radiació del cos negre. L'expressió de l'energia del fotó és, doncs,

$$E = h \cdot \nu \quad (1)$$

Amb la relació entre la velocitat de la llum (c), la freqüència i la longitud d'ona (λ),

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2)$$

l'energia del fotó en funció de la longitud d'ona s'escriu

$$E = h \cdot c / \lambda \quad (3)$$

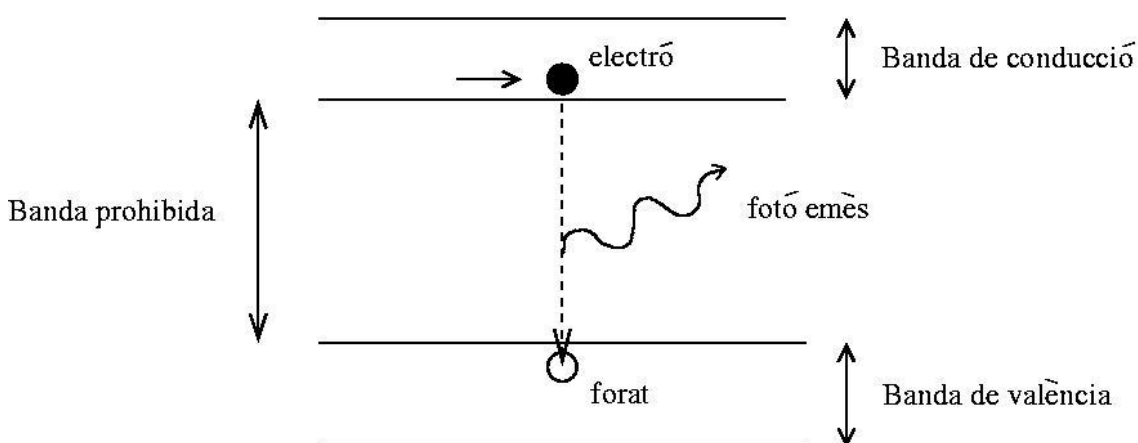
L'experiment originalment realitzat per Lenard és difícil de reproduir al laboratori, però el procés invers de l'efecte fotoelèctric es pot utilitzar per determinar, de forma molt simple, el valor de la constant de Planck. L'efecte que utilitzarem per fer la mesura és l'*electroluminiscència*, en què l'energia d'un corrent d'electrons dona lloc a l'emissió de fotoons. Aquesta és la base del funcionament dels díodes emissors de llum (LEDs) que utilitzarem en el nostre experiment.

Els materials semiconductors utilitzats en els LEDs tenen gran quantitat d'electrons que poden ocupar un gran nombre d'*orbitals* (nivells d'energia similars als que ocupen els electrons en els àtoms). Cada orbital té una energia característica, però no totes les energies són possibles. Hi ha intervals d'energia possibles (bandes permeses) separats per intervals d'energia en què no hi ha cap orbital (banda prohibida). Els

¹«Sobre un punt de vista heurístic relatiu a la producció i transformació de la llum». Albert Einstein, *Annalen der Physik* **17** (1905), 132-148. Traduït al català a: *Einstein en català*. Edicions de la Revista de Física (Barcelona, 1998).

semiconductors tenen una banda permesa amb orbitals ocupats per electrons (banda de valència) i una banda de major energia amb orbitals buits (banda de conducció). Quan apliquem una diferència de potencial a un díode emissor de llum, un cert nombre d'electrons guanyen prou energia per assolir la banda de conducció, deixant uns *forats* en la banda de valència. Aquesta situació és inestable, ja que els electrons tendeixen a ocupar estats de menor energia, de manera que els de la banda de conducció cauen a la banda de valència, emetent energia en forma d'un fotó (figura 1). L'energia d'aquest fotó és molt similar a l'amplada de la banda prohibida del semiconductor E_G . Per determinar la constant de Planck a partir de l'electroluminiscència de díodes LED, mesurarem la longitud d'ona de la llum emesa per diferents LEDs i estimarem, independentment, el valor de l'energia de la banda prohibida. Coneguts aquests valors, determinarem h a partir de la fórmula (3), donada la velocitat de la llum $c=3 \cdot 10^8$ m/s.

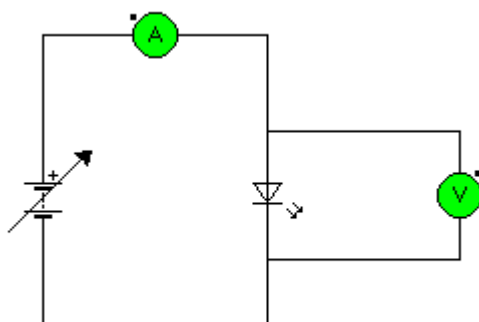
Fig. 1: Efecte fotoelèctric



Estimació de la banda prohibida de cada LED

Utilitzarem una font de tensió i dos multímetres. Caldrà muntar el circuit de la figura 2. Un cop muntat el circuit cal assegurar-se que el comandament de la font de tensió està al mínim abans connectar-la, ja que si la tensió és excessiva podríem cremar el LED. Cal seleccionar les escales dels multímetres, per mesurar fins a 3 V de tensió i fins a 100 mA de corrent, i començar a augmentar lentament la tensió. Si a una tensió de 2 V el LED no s'encén, és probable que estigui connectat en invers; caldrà canviar els seus contactes de polaritat.

Fig. 2: Muntatge experimental per determinar la característica $I(V)$ del LED



Amb el circuit funcionant correctament, cal prendre valors de corrent entre 0,1 mA i 20 mA apuntant en una taula les parelles tensió - corrent. Les tensions (V) i els corrents (I) segueixen molt aproximadament l'expressió

$$I = A \cdot e^{B \cdot V} \quad (4)$$

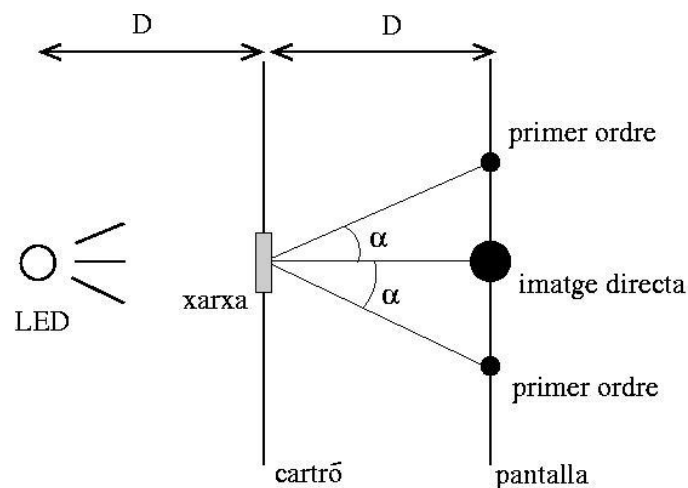
Caldrà determinar les constants A i B que millor s'ajusten als resultats experimentals, bé utilitzant una calculadora programable o un programa d'ordinador, bé dibuixant la recta que millor s'ajusta als punts experimentals en la gràfica semilogarítmica. (La tensió estarà a l'eix de les X en escala lineal, i el corrent en l'eix de les Y en escala logarítmica.)

Determinació de la longitud d'ona de la llum emesa per cada LED

Haureu d'utilitzar la xarxa de difracció amb una separació entre línies, d . Poseu aquesta xarxa sobre un petit forat en un full de cartró negre. Poseu aquest full a una distància D d'uns 20 cm del LED de forma que el feix de llum incideixi perpendicularment sobre la xarxa. A l'altre costat del cartró, i a la mateixa distància D que el LED, poseu una pantalla blanca. Observareu la imatge directa de la llum del LED sobre la pantalla (segueix una recta) i la imatge d'interferència de primer ordre. Mesurant l'angle (α) entre els feixos de llum que van de la xarxa a la imatge directa i de la xarxa a la imatge de primer ordre (figura 3) podeu determinar la longitud d'ona a partir de:

$$\lambda = d \cdot \sin(\alpha) \quad (5)$$

Fig. 3: Muntatge experimental per determinar la longitud d'ona del LED



Per exemple, suposem que tenim una xarxa de difracció amb 500 línies per cada mil·límetre, i la distància de la xarxa a la pantalla és de $D=50$ cm. Si el màxim de llum corresponent al primer ordre d'interferència està a 18 cm del màxim central, tindrem:

$$\text{tg } \alpha = 18 / 50 = 0,36 \Rightarrow \alpha = 0,3456 \text{ rad} = 19,8^\circ \Rightarrow \sin \alpha = 0,3387$$

Per tant, usant l'equació (5) trobem que la longitud d'ona del LED serà:

$$\lambda = (1/500) \cdot 0,3387 \text{ mm} = 0,677 \cdot 10^{-3} \text{ mm} = 677 \text{ nm}$$

que es correspon a una llum de color vermell.

Determinació de la constant de Planck

L'energia de la banda prohibida E_G es pot estimar a partir de l'energia que donem als electrons per a corrent intens. Com que un corrent massa intens podria causar danys al LED, utilitzareu l'expressió (4) amb els valors de A i B determinats per a cada LED per calcular la tensió V_G que ens donaria aquest corrent intens d'uns 200 mA. L'energia de la banda prohibida (E_G) serà:

$$E_G = V_G \cdot q,$$

on q és el valor absolut de la càrrega de l'electró ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

La constant de Planck la determinarem a partir de l'expressió (3) per a cada un dels LEDs, prenent com a E l'energia de la banda prohibida i utilitzant la longitud d'ona de la llum (λ) mesurada amb la xarxa de difracció.

Com enviar els resultats

Caldrà enviar un document (preferiblement PDF, però també pot ser un document de Word o PostScript) on s'identifiqui el grup que ha realitzat l'experiment (alumnes que hi han pres part, professor que ha dirigit l'experiment, aula i col·legi d'on provenen) i amb una taula amb les següents dades obtingudes per cada LED utilitzat:

Nombre de línies per mil·límetre de la xarxa de difracció
Distància entre la xarxa de difracció i la pantalla, D
Color del LED
Angle de difracció, α
Longitud d'ona, λ
Constants de l'ajust a l'equació (4), A i B
Amplada de la banda prohibida, E_G , V_G
Valor de la constant de Planck, h

Caldrà indicar també el valor mitjà i l'error estadístic d' h trobat a partir de les mesures amb tots els LEDs. És important indicar clarament les unitats de cada magnitud.

Finalment, s'adjuntarà una fotografia de l'equip (alumnes i professor) que ha realitzat l'experiment on s'observi també el sistema experimental utilitzat.

Responsables de l'experiència i adreça per a consultes tècniques:
Jordi Andreu i Josep Maria Valls: sirap@eresmas.net