

EFFECTO FOTOELÉCTRICO

Sebastian Fortin
IAFE-CONICET-UBA

Resumen: En este trabajo se estudia el efecto fotoeléctrico midiendo, mediante el uso de un amplificador Lock-in, el valor del potencial de frenado para distintas frecuencias de luz que incide en el cátodo. El análisis de los datos obtenidos permite estimar un valor de la constante de Planck y la función trabajo del material del cátodo. El resultado que se obtiene es del orden de magnitud encontrado en la bibliografía.

INTRODUCCIÓN

El efecto fotoeléctrico¹ fue descubierto por Hertz en 1887, cuando observó que una descarga eléctrica entre dos electrodos se produce más fácilmente si sobre uno de ellos incide luz ultravioleta. Poco después se descubrió que la luz ultravioleta facilita la descarga porque provoca la emisión de electrones desde la superficie del cátodo. En 1905 Einstein² explicó que cuando un fotón de luz monocromática (con energía $h\nu$) incide sobre un cátodo de material fotosensible puede ser completamente absorbido por un electrón, ganando suficiente energía cinética como para escapar del material y que ésta depende de la longitud de onda de la luz incidente y del tipo de material del cátodo. Se denomina a este fenómeno emisión fotoeléctrica, y los electrones emitidos son llamados fotoelectrones.

DESARROLLO TEÓRICO.

La Figura 1 muestra el esquema de un experimento para estudiar el efecto fotoeléctrico:

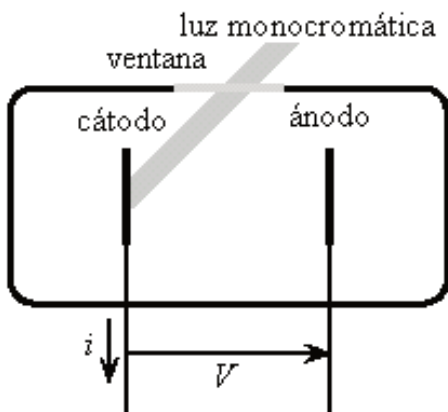


Figura 1. Experimento para estudiar el efecto fotoeléctrico. El dispositivo está bajo vacío, el voltaje V entre el cátodo y el ánodo se puede variar de forma continua, y se mide la corriente i .

Sobre el cátodo inciden fotones cuya energía es $h\nu$. Cuando un electrón ligado al material es emitido por el fotocátodo, su energía cinética es entonces:

$$T = h\nu - w \quad (1)$$

donde w es el trabajo necesario para extraer el electrón del metal. Este trabajo toma en cuenta el efecto de los campos eléctricos atractivos debidos a los átomos de la superficie y las pérdidas de energía cinética del electrón causadas por las colisiones que sufre hasta que sale de la superficie. Algunos electrones están ligados más fuertemente que otros, o soportan más colisiones en el trayecto. Por lo tanto es lógico suponer que hay una energía cinética máxima con la cual un fotoelectrón puede ser emitido, que se tiene cuando la energía de unión del electrón es la mínima posible y cuando éste no pierde energía cinética por colisiones. Esta energía cinética máxima es:

$$T_{\max} = h\nu - \phi \quad (2)$$

donde ϕ , que se denomina la función trabajo, es la energía mínima necesaria para extraer un electrón del metal y es una propiedad del metal del cátodo. Como entre el ánodo y el cátodo hay una diferencia de potencial V , las placas generan un campo eléctrico que frena o acelera los electrones. Cuando V es positivo los electrones son acelerados, para V suficientemente grande, i alcanza un valor límite, o de saturación, para el cual todos los electrones emitidos por el cátodo son colectados por el ánodo. Si V se hace negativo los electrones son frenados, la corriente no cae de inmediato a cero debido a que algunos de los electrones son emitidos con suficiente energía cinética como para alcanzar el otro electrodo a pesar de que el campo eléctrico se opone a su movimiento. Sin embargo, existe un potencial V_0 , llamado potencial de frenado, tal que si $V < V_0$ el electrón no llega al ánodo y la corriente fotoeléctrica se anula., en este caso la energía cinética máxima de los electrones es

entonces eV_0 , que igualada a la ecuación (2) da la relación:

$$eV_0 = hv - \phi \quad (3)$$

ARREGLO EXPERIMENTAL

Para realizar esta experiencia se usó un dispositivo como el que se muestra a continuación en la Figura 2:

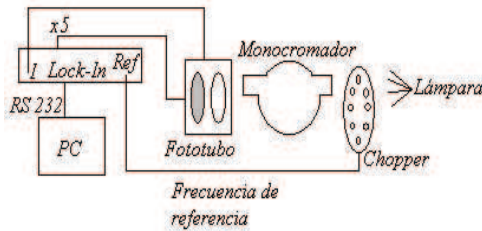


Figura 2: Se muestra la disposición de los instrumentos usados. La luz emitida por la lámpara pasaba por el chopper y luego ingresaba al monocromador, de donde salía modulada con una frecuencia determinada. Luego ingresaba al fototubo donde incidía en el cátodo extrayendo electrones y por lo tanto generando una corriente, medida y amplificada en el Lock-In. Éste usaba la frecuencia de referencia proveniente del chopper. Luego la señal era enviada a la PC a través de una terminal RS-232, desde donde se controlaba los distintos parámetros.

Una lámpara emitía luz la cual pasaba por el chopper y luego ingresaba al monocromador. En este instrumento se seleccionaba una de las frecuencias de la radiación emitida (entre 400 y 800 nm de longitud de onda) y a la salida el haz ingresaba en el fototubo. En éste se encontraba un circuito como el que se esquematiza de forma simplificada en la figura 3:

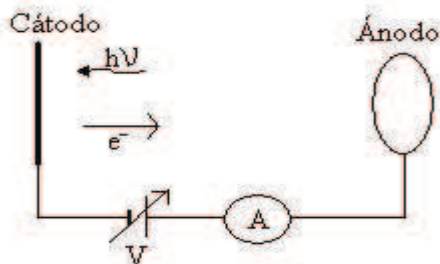


Figura 3: Se esquematiza el fototubo. Este contenía un cátodo y un ánodo (cable en forma de aro) los cuales estaban conectados por un cable, con un amperímetro (en realidad era el lock-in) y una fuente de tensión variable (controlada por la PC). Si los fotones tenían suficiente energía arrancaban electrones del cátodo (venciendo el potencial de

frenado) y así se generaba una corriente en el circuito.

Entonces, cuando el haz monocromático ingresaba en el fototubo incidía sobre el cátodo, y si tenía la suficiente energía arrancaba electrones (venciendo el potencial de frenado), los cuales al pasar por el aro (ánodo) generaban un flujo magnético variable y se inducía una corriente en el circuito (proporcional a la cantidad de electrones desprendidos), la cual era medida y amplificada por el Lock-In. Éste utilizaba la frecuencia de referencia del chopper para filtrar cualquier ruido y hacer la señal más clara. Al mismo tiempo, el Lock-In, a través de su salida x5 controlaba el voltaje en el fototubo y a través de la interface RS-232, era posible desde la PC controlar este voltaje y además la sensibilidad, tiempo de muestreo, y tiempo de integración del Lock-In.

Una precaución importante a tener en cuenta fue que la fase del Lock-In fuera la correcta. Para esto se usó una dicroica y se fijó al monocromador en 550 nm (la cual es aproximadamente la longitud de onda correspondiente a la mayor intensidad de la dicroica). En la PC se utilizó un software especial para la práctica, el cual calculaba mediante la opción de "autophase" la fase correcta.

Antes de empezar a tomar cualquier medición, hubo que calibrar la escala del monocromador. Para esto se colocó una lámpara de mercurio (con la precaución de cubrirla con una caja para que no dañe la vista) la cual tiene tres frecuencias de emisión bien definidas y un láser rojo, el cual obviamente también emite en una frecuencia determinada. Para cada una de estas frecuencias se vio la frecuencia que marcaba el monocromador³ y se realizó el siguiente gráfico:

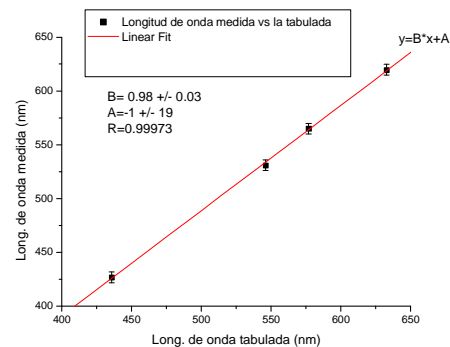


Figura 4: Gráfico de las longitudes de onda medidas en el monocromador versus las tabuladas. Se ve una relación lineal con ordenada de origen nula.

Los errores en la longitud de onda representan la mínima división del monocromador, la cual es de 5nm. La aproximación lineal realizada

correlaciona los datos de los ejes de manera satisfactoria, lo cual queda expresado en el parámetro $R = 0.99973$. La ordenada al origen puede ser despreciada debido a que teniendo en cuenta su incerteza pasa por el cero. De esta manera se obtuvo la calibración de la escala del monocromador.

MEDICIÓN Y RESULTADOS

A continuación se obtuvieron gráficos de la corriente en función del voltaje a frecuencias fijas. Para esto se colocó la dícroica nuevamente y mediante la PC se programó que el voltaje hiciera una rampa de $-1V$ a $0.8V$, con un tiempo de muestreo de 300 seg., un tiempo de integración de 3 seg. (de modo de disminuir el ruido a corrientes casi nulas) y una sensibilidad del Lock-In de $100 \mu V$.

Algunas de las mediciones se ven en la siguiente figura:

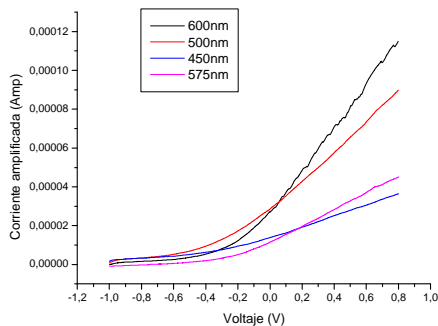


Figura 5: Gráfico de la corriente (Amp) en función del voltaje(V) para distintas longitudes de onda: 600nm(negro), 575nm(violeta),500nm(rojo) y 450nm(azul).

Está claro que había una conducta repetitiva: la corriente era casi nula hasta que empezaba a incrementarse de forma casi constante. Es llamativo que en todos los casos se vio que la corriente al principio (entre $-1V$ y $-0.6V$ aprox.) iba aumentando muy de a poco (comparado con lo que pasaba en los voltajes positivos). Determinar el V_0 exacto para el cual los electrones lograban alcanzar el ánodo no es sencillo, justamente por esto último, ya que sería más simple si la corriente hubiera sido constante hasta que en algún momento empezara a aumentar. El criterio que se usó para determinar V_0 en cada curva fue el siguiente: como se quería ver un aumento repentino de la corriente se buscó el punto donde la pendiente aumentaba más rápidamente que en el resto del gráfico, es decir, se buscó un máximo en la derivada segunda. El Origin 6.0 fue el software usado para realizar esto, pero éste necesitaba

que la función a derivar tuviera el eje x equiespaciado, por lo tanto primero se aproximó cada curva con un polinomio de grado 9 y luego a éste se le calculó la derivada segunda. El mismo programa identifica máximos, por lo tanto el procedimiento fue muy directo. Lamentablemente algunos máximos no estaban muy marcados, lo que forzó a tomar como error en cada V_0 al ancho en la mitad del pico, de modo que si un pico no era muy pronunciado, su error era grande. Esto puede quedar más claro viendo la figura 6:

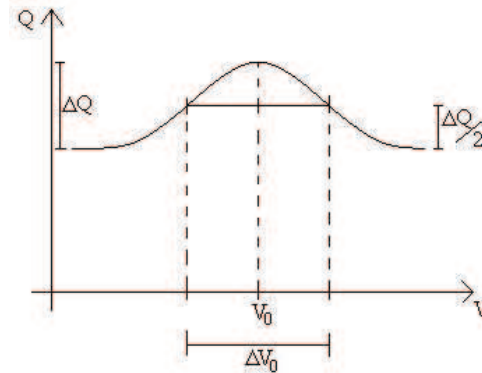


Figura 6: esquema de la determinación del error de V_0 . Q representa la derivada segunda de la corriente con respecto al voltaje.

La figura 7 muestra los resultados obtenidos (se eliminaron 2 valores de V_0 que al considerar su error incluían al potencial nulo, por no ser esto compatible con la teoría):

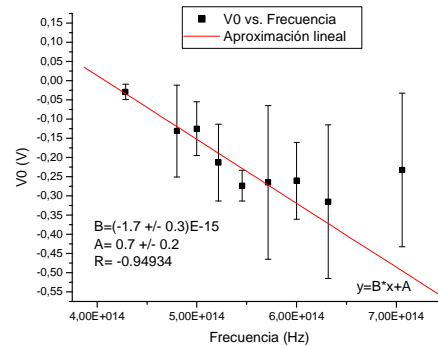


Figura 7: gráfico del potencial de frenado en función de las frecuencias. Se realizó una aproximación lineal ponderando los errores. $B = (-1.7 \pm 0.3)10^{-15}$ y $A = 0.7 \pm 0.2$. $R = -0.94934$.

Si bien el ajuste realizado no es óptimo, se usaron estos valores para estimar h y ϕ usando la ecuación (3). Se obtuvo $h = (2.7 \pm 0.5)10^{-34} J \cdot seg$ y $\phi = (1.1 \pm 0.3)10^{-19} J$. El valor de h tabulado es de $6.63 \times 10^{-34} J \cdot seg$ el cual no entra en el

rango del valor obtenido, pero si es del orden del mismo. El valor tabulado de la función trabajo de un cátodo de Potasio (el usado) es de $3 \times 10^{-19} J$.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estimó con el valor de la constante de Planck. Si bien el resultado obtenido es del orden de magnitud correcto, no coincide con el valor tabulado.

Una mejora que se podría hacer a esta experiencia sería conseguir una fuente luminosa de intensidad constante en un rango de frecuencias coincidente con el del monocromador y de esta manera se podría graficar la corriente (proporcional a la intensidad de la fuente luminosa) en función de la frecuencia y se debería ver que a partir de una frecuencia empieza a circular una corriente. Esa

frecuencia mínima cumple con $V_{\text{mín}} = \phi/h$.

Esto permitiría verificar si los resultados obtenidos son coherentes entre sí.

REFERENCIAS

[1] Julio Gratton - Introducción a la Mecánica Cuántica – FCEyN, UBA (2003). Cap. 4, en especial p. 23-27.

[2] Laboratorio 5 – Efecto fotoeléctrico - FCEyN, UBA (2005).

[3] El monocromador marcaba en realidad longitudes de onda, pero mediante la relación $c = \lambda V$ (donde c es la velocidad de la luz, λ la longitud de onda y V la frecuencia) se ve que es equivalente hablar de longitud de onda o frecuencia.