

Efecto fotoeléctrico

Federico Barone and Gonzalo Urribari

Laboratorio 5, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires
(Dated: 3 de mayo de 2011)

En el presente trabajo se estudió el efecto fotoeléctrico producido por un haz de luz monocromático generado por un led y un monocromador, que ingresaba a un fototubo para incidir sobre el cátodo de potasio que se encontraba a una diferencia de potencial variable respecto a un ánodo. La fotocorriente generada en el dispositivo se midió utilizando un picoamperímetro. Variando la frecuencia de la onda incidente y para cada una de ellas la diferencia de potencia dentro del fototubo se pudo determinar un valor para la constante de Planck de $h = (2,36 \pm 0,11) \times 10^{-34} Js$ como también un valor de $\Phi = (0,46 \pm 0,03)eV$ para la función trabajo asociada al cátodo. En última instancia se fue variando la intensidad de un haz de luz de $(470 \pm 10)nm$, y se verificó la independencia de esta última variable y el potencial de corte.

I. INTRODUCCIÓN

Al incidir luz monocromática sobre un material fotosensible, se libera un electrón con una energía que depende tanto del material fotosensible como de la energía del fotón incidente. El proceso se denomina emisión fotoeléctrica y el electrón liberado se lo conoce como fotoelectrón. Determinando la energía de este último se puede determinar el valor de la constante de Planck y la función de trabajo del material fotosensible.

A. Efecto fotoeléctrico

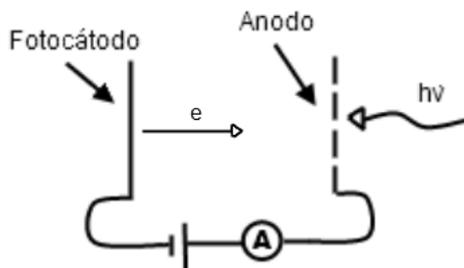


Figura 1: Diagrama esquemático del instrumento utilizado para estudiar el efecto fotoeléctrico. Se lo denomina fototubo.

El fototubo consiste en un electrodo de metal pulido llamado fotocátodo y un segundo electrodo. Entre ellos hay una diferencia de potencial de unos pocos voltios. Normalmente el segundo electrodo es positivo respecto al primero.

Al hacer incidir sobre el cátodo luz monocromática en un rango de frecuencias (ν) determinada por el material fotosensible, se registra en el amperímetro una corriente. Ésta se debe a que, en la interacción entre los fotones y los electrones del cátodo, estos últimos absorben la energía necesaria para escapar del material y, una vez libres, el potencial entre los electrodos atrae el electrón hacia el ánodo, generando un flujo de electrones.

La energía cinética del electrón depende de la energía del

fotón incidente $E = h\nu$ y de la fuerza que tiene que superar para escapar del material. Si el electrón se encuentra en la superficie del material, la energía cinética del electrón se hace máxima ya que la fuerza que éste debe superar para escapar se hace mínima al hacerse mínima la distancia a recorrer dentro del material. Se denomina *función trabajo* ϕ a la energía que necesita el electrón para escaparse de la superficie.

La energía cinética máxima del electrón esta dada por la siguiente ecuación:

$$E_{max} = h\nu - \Phi \quad (1)$$

Si uno establece un potencial de retardo entre los electrodos, los electrones deberán superar esta barrera para que haya corriente. Variando el potencial de retardo uno puede llegar al límite en el que ya no se registra corriente (ver figura 2). Es en este punto donde la energía cinética máxima E_{max} de los electrones liberados se ve equiparada por la energía asociada al *potencial de retardo límite* o *potencial de corte* V_0 .

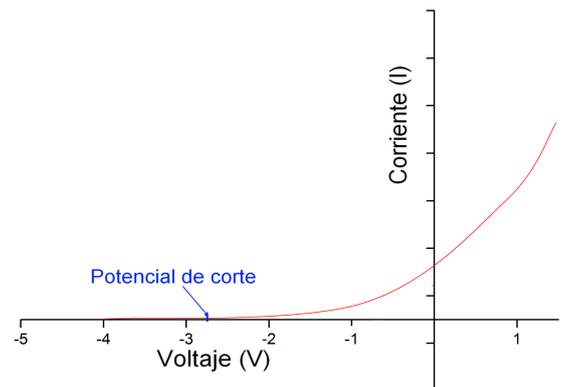


Figura 2: Figura ilustrativa de la relación entre la variación del potencial entre los electrodos y la fotocorriente. El potencial de corte indica el punto en donde se empieza a medir corriente.

Basado en (1) se deduce:

$$-eV_0 = h\nu - \Phi \quad (2)$$

Con e la carga del electrón. Estudiando la dependencia de E_{max} al variar ν se puede verificar la relación lineal propuesta en la ecuación (2). Notar que de la pendiente se puede despejar el valor de h y con la ordenada se puede despejar Φ .

Otro aspecto relevante en el estudio de la fotocorriente es su dependencia con la intensidad de la onda electromagnética incidente. La rapidez de emisión de fotoelectrones será proporcional al flujo de cuantos incidentes sobre el fotocátodo que, a su vez, es proporcional a la intensidad de la radiación electromagnética incidente [1]. Por otro lado, el valor de E_{max} es independiente de la intensidad ya que la energía transmitida al electrón depende exclusivamente de la energía del fotón, es decir, de la frecuencia de la onda. Verificar estas relaciones aportan evidencia contundente que verifica la ya afianzada teoría cuántica del efecto fotoeléctrico (ver figura 3).

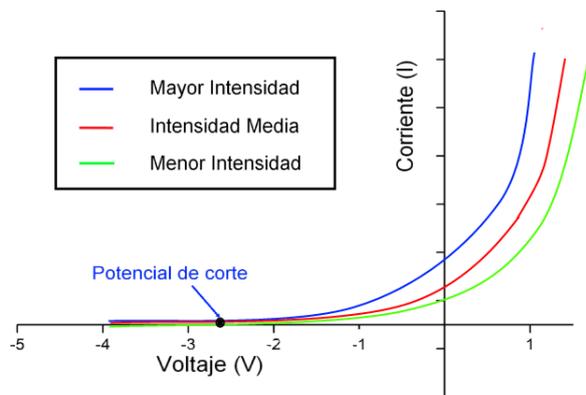


Figura 3: Figura ilustrativa de la relación entre la variación del potencial entre los electrodos y la fotocorriente. La frecuencia de la luz incidente es constante, lo que varía de curva a curva es su intensidad. Notar que el potencial de corte es el mismo para todas las curvas.

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A. Calibración del monocromador

Con el objetivo de generar luz monocromática se utilizó un monocromador de prismas Winkel-Zeiss. El mismo posee una escala en nanómetros que se calibró focalizando, mediante un visor que posee el instrumento, las líneas espectrales para diferentes fuentes de luz y comprobando lo que marcaba la escala del monocromador con los valores tabulados de las líneas [2]. Para mejorar la definición de las líneas espectrales el monocromador cuenta con dos rendijas variables, una a la entrada de la luz y otra a la salida. Lo que se buscó fue tener el mayor nivel de intensidad de luz posible y a su vez tener líneas con una separación de manera que el ojo humano las pueda resolver.

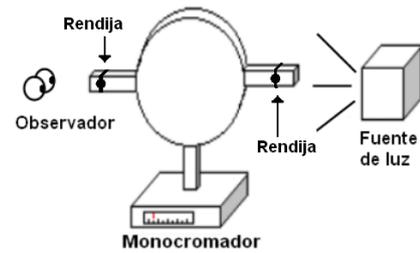


Figura 4: Montaje experimental utilizado para calibrar el monocromador Winkel-Zeiss. Se utilizaron como fuentes de luz lámparas de Hidrógeno(H_2), Helio(He) y Krypton(Kr).

B. Determinación de la constante de Planck y la Función de Trabajo

Para determinar la constante de Planck se necesita relevar curvas como la ilustrada en la figura 2. Es decir, se necesita una fuente de luz monocromática que incida sobre el fotocátodo que a su vez se encuentra a una diferencia de potencial variable respecto al segundo electrodo. La figura 5 ilustra el montaje utilizado.

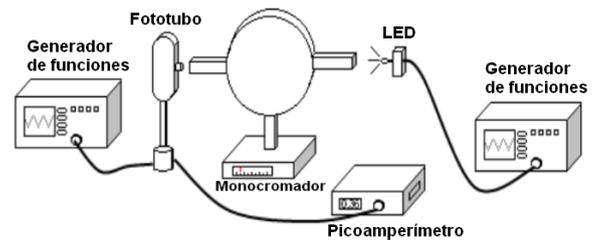


Figura 5: Montaje experimental utilizado. El generador conectado al led sirve como fuente de tensión continua y el conectado al fototubo proporciona la diferencia de potencial entre los electrodos. Del fototubo también sale un cable por el cuál circula la fotocorriente que es medida en el picoamperímetro.

Como fuente de luz se utilizó un led blanco y se seleccionó la frecuencia de onda deseada utilizando el monocromador. Los datos adquiridos por el picoamperímetro eran introducidos a la computadora manualmente.

Para relevar la dependencia de la curva de fotocorriente vs. potencial entre los cátodos con los distintos niveles de intensidad, se varió el potencial de alimentación del led incidente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Calibración

La figura 6 muestra la curva de calibración. Se realizó un ajuste lineal de los datos de la forma $y = ax + b$ con $a = 0,98 \pm 0,002$ y $b = 9 \pm 12$. El error contemplado en la escala vertical corresponde a la mínima resolución de la escala del monocromador.

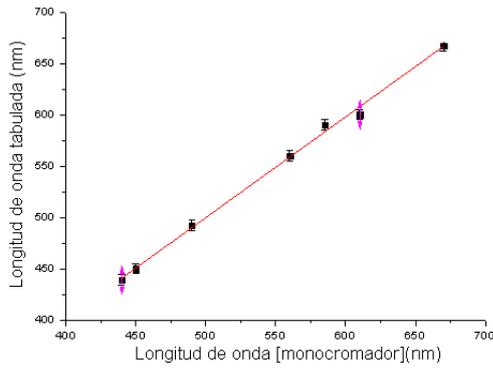


Figura 6: Calibración del monocromador. La eje vertical muestra los valores obtenidos en la escala que posee el monocromador. El eje horizontal muestra los valores tabulados de las líneas espectrales para las distintas fuentes de luz utilizadas.

Siendo el valor de R 0,996 se puede tomar el ajuste como válido. Considerando los errores, la pendiente de la recta se puede tomar como 1 y en consecuencia una primera cota inferior para el error de la escala del monocromador es la ordenada al origen de la misma. Hay que considerar también la diferencia máxima registrada entre los valores de longitud de onda medidos y los respectivos valores tabulados. Esta última alcanza los 10nm y al ser mayor que la ordenada al origen se toma como el error en la escala interna del monocromador.

B. Determinación del valor de la constante de Planck y la Función de Trabajo

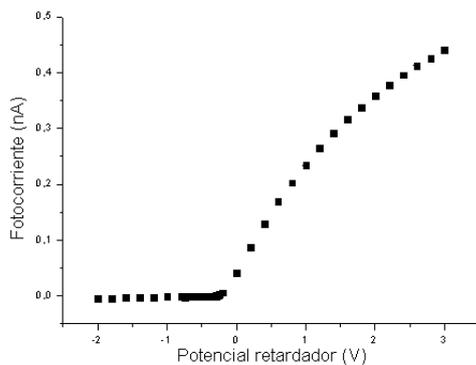


Figura 7: Curva de la fotocorriente medida e función del potencial entre el cátodo y el ánodo, para una frecuencia de $(600 \pm 10)\text{nm}$.

En la figura 7 se presenta la medición obtenida de la fotocorriente en función del potencial de retardo para una longitud de onda incidente de $(600 \pm 10)\text{nm}$. El paso con el que se realizaron en un primer relevamiento las mediciones fue de $0,2\text{V}$ comenzando desde un valor de -2V hasta llegar a los 3V . Luego en la región de interés, es decir la región en que la curva se despegó del eje, se utilizó un paso de $0,05\text{V}$ para obtener una mejor definición. El mismo procedimiento se

realizó para las distintas longitudes de onda de luz incidente.

En primer lugar se debe observar que para valores muy negativos del potencial de retardo previos al corte con el eje de la curva, la fotocorriente presenta valores negativos, contrastando con la expectativa teórica de que para esta región el valor de la fotocorriente sea nulo. Este efecto se puede adjudicar a restos de potasio alojados en el ánodo, los cuales al recibir luz pueden desprender electrones, los cuales incitados por el potencial viajarían hacia el cátodo, produciendo esta corriente negativa.

El primer criterio para determinar el potencial de corte V_0 consistió en referir el mismo al momento en el cual la medición de la fotocorriente pasaba a ser positiva, es decir, cuando la curva atravesaba el eje. De esta manera, tomando para cada longitud de onda el valor del potencial de retardo en la primera medición positiva de corriente se obtuvo la siguiente tabla.

Longitud de onda(nm)	Frecuencia(THz)	Potencial de Corte(V)
425 ± 10	705 ± 17	$-0,6 \pm 0,01$
450 ± 10	666 ± 15	$-0,53 \pm 0,01$
500 ± 10	599 ± 12	$-0,41 \pm 0,01$
525 ± 10	571 ± 11	$-0,38 \pm 0,01$
550 ± 10	545 ± 10	$-0,35 \pm 0,01$
575 ± 10	521 ± 9	$-0,31 \pm 0,01$
600 ± 10	499 ± 8	$-0,25 \pm 0,01$
650 ± 10	461 ± 7	$-0,23 \pm 0,01$
700 ± 10	428 ± 6	$-0,2 \pm 0,01$

Cuadro I: Valores del potencial de corte obtenido para las distintas frecuencias utilizando el criterio de la primera medición positiva.

Con los datos de la tabla I se realizó un gráfico del potencial retardador en función de la frecuencia de la luz incidente. Al mismo se le realizó una regresión lineal como muestra la figura 8, donde apreciando el valor de $R=0,98$ se puede considerar un buen ajuste de los puntos. Según la ecuación (2) de la pendiente de este ajuste se puede, sabiendo el valor de la carga de un electrón, obtener la constante de Planck. Para este caso se obtuvo $h = (2,36 \pm 0,11) \times 10^{-34}\text{Js}$. La función de trabajo se puede derivar del valor ordenado al origen del ajuste, se calculó obteniendo $\phi = (0,46 \pm 0,03)\text{eV}$.

Comparando los valores obtenidos con los tabulados para la constante de Planck $h = (6,63) \times 10^{-34}\text{Js}$ y para la función de trabajo del potasio $\phi = 2,29\text{eV}$ [4], se observa que los resultados no se solapan con los calculados. Se debe considerar igualmente que ambos resultados concuerdan en el orden de magnitud.

Considerando el acercamiento asintótico de la curva cerca del V_0 las razones de la diferencia pueden radicar principalmente en la falta de definición en el paso del potencial de retardo y en que la fotocorriente mínima que podía resolver el picoamperímetro era de 1pA . En el caso de la función de trabajo, existe la posibilidad de que impurezas en el fotocátodo varíen hagan que el valor tabulado no sea el real. Los potenciales de contacto entre ánodo y cátodo también juegan un rol fundamental y pueden inducir a diferencias en los resultados obtenidos.

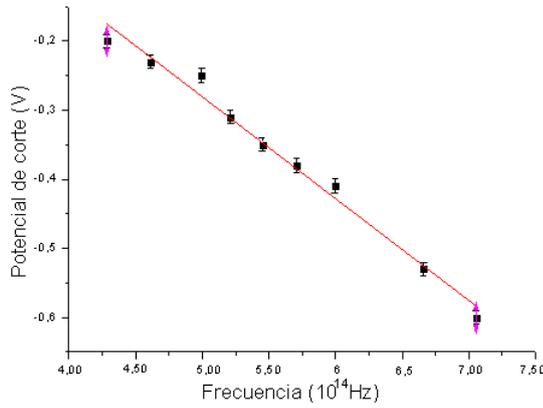


Figura 8: Curva del potencial de corte vs. la frecuencia de la onda incidente. La fuente de alimentación del led se mantuvo constante a 4,5V. Los errores son los mostrados en la tabla I.

Para descartar este último factor hay que hacer un análisis cerca de la frecuencia mínima para la que existe fotocorriente [3].

Otro criterio utilizado fue ajustar una regresión lineal sobre los primeros puntos considerablemente despegados del eje, con el objetivo de encontrar el corte de la recta con el mismo y utilizar este punto como potencial de corte. Luego de observar el comportamiento asintótico que posee la función cuando se aproxima al eje (véase figura 2) se descartó esta posibilidad ya que al utilizar este criterio se desplazaba sistemáticamente el punto de corte hacia valores mayores de voltaje. Se ilustra un ejemplo de lo sucedido en la figura 9. En el gráfico se señalan los puntos donde indudablemente ya estamos en presencia de efecto fotoeléctrico, y el punto donde interceptaría la recta del ajuste al eje desplazado hacia la derecha. La diferencia entre la primer medición positiva y la intersección es de 0,1V.

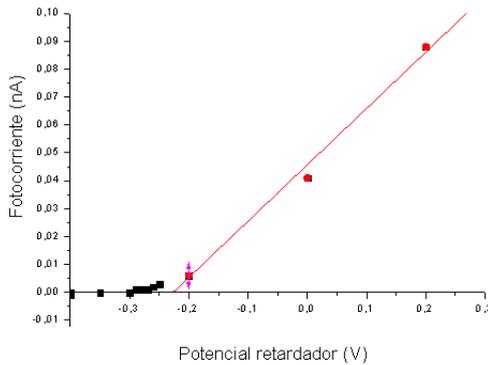


Figura 9: Curva de la fotocorriente en función del potencial entre el cátodo y el ánodo, para las distintas frecuencias utilizadas. La línea roja indica el ajuste lineal, los puntos rojos son los puntos utilizados en el ajuste y los puntos negros son los puntos relevados.

Por último en la figura 10 se presentan las curvas de la fotocorriente en función del potencial retardador para diferentes valores de intensidad de la luz. Se le aplicaron a un mismo led diferentes valores de tensión, de esta manera se fue variando

la intensidad lumínica con la que emitía. Para todas las mediciones se mantuvo siempre seleccionada en el monocromador una longitud de onda de $(470 \pm 10)nm$. Nótese que a pesar de presentar pendientes notablemente diferentes, todas las curvas intersectan al eje en valores similares del potencial de retardo.

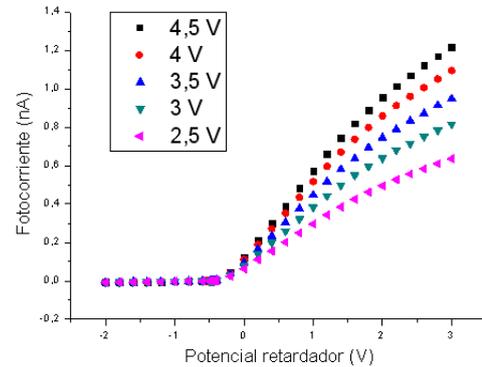


Figura 10: Curva de fotocorriente en función del potencial entre el cátodo y el ánodo para distintas intensidades del led. La frecuencia del haz incidente se mantuvo constante a $(470 \pm 10)nm$

Según el criterio utilizado, la intersección de las diferentes curvas con el eje se presentan en la tabla II. Teóricamente el valor del potencial de corte debería ser exactamente el mismo para las distintas intensidades, esta discrepancia puede deberse a restos de potasio alojados en el ánodo, que como ya se explicó previamente, generan un efecto fotoeléctrico de menor magnitud en sentido opuesto al deseado. De estar sucediendo esto, al variar la intensidad de luz del diodo cambia el valor de la corriente negativa solapada a la positiva, y por ende cambia el valor del potencial de corte. Otra causa puede ser que el criterio de tomar el primer valor de corriente mayor a cero como indicador del comienzo del efecto fotoeléctrico, no sea lo suficientemente preciso. De cualquier manera, los potenciales de corte de las diferentes intensidades se encuentran todos en un rango de 0,04V, es decir no presentan una diferencia sustancial en su valor considerando que inicialmente en la determinación del V_0 se tiene un error de $\pm 0,01V$.

Voltaje del led(V)	Voltaje de corte(V)
$4,5 \pm 0,1$	$-0,48 \pm 0,01$
$4,0 \pm 0,1$	$-0,48 \pm 0,01$
$3,5 \pm 0,1$	$-0,45 \pm 0,01$
$3,0 \pm 0,1$	$-0,44 \pm 0,01$
$2,5 \pm 0,1$	$-0,44 \pm 0,01$

Cuadro II: Valores del potencial de corte obtenido para las distintas intensidades del led que funcionaba como fuente de luz.

IV. CONCLUSIONES

Con referencia a la calibración del monocromador, se obtuvo una pendiente de aproximadamente 1 y se tomó como

error $10nm$, la máxima distancia de una medición a la recta. De esta manera se pudo utilizar como valor de la longitud de onda al valor del visor del monocromador.

Luego para calcular el potencial de corte se consideró más adecuado el criterio del primer valor positivo de fotocorriente. Relevando este para diferentes frecuencias se pudo realizar una buena regresión lineal con un $R=0,98$ y calcular en base a esta la constante de Planck y la función de trabajo del Potasio. El valor de la constante de Planck obtenido coincide en orden de magnitud pero difiere en valor con los tabulados. Esto se puede adjudicar a restos de potasio alojados en el ánodo, fenómeno previamente explicado. Este efecto fotoeléctrico en sentido contrario, no solo alteró la medición de fotocorriente, sino que también dificultó la determinación del potencial de corte y es probable que el criterio utilizado para encontrarlo no sea lo suficientemente preciso considerando la precisión tanto del picoamperímetro como el del generador de funciones (si hubiésemos podido definir pasos más pequeños de potencial retardador y resolver corrientes más pequeñas el resultado sería más acertado).

Por otro lado, el valor de la función de trabajo del potasio tampoco coincidió con el tabulado. En este caso no solo pueden estar afectando las impurezas del material, sino también el potencial de contacto generado por la interacción de diferentes metales en las uniones del circuito con el cátodo y el ánodo del fotodetector.

Finalmente se recomienda para mejorar las experiencias realizadas la utilización de un equipo adecuado el cual pueda realizar automáticamente el barrido en voltaje, de esta manera se podría invertir más tiempo en relevar diferentes frecuencias e intensidades de luz, así como también definir con un paso más chico las regiones de interés.

En el caso de utilizar un lock-in, se podría mejorar además la precisión de medición de la fotocorriente. Ya que durante el trabajo, se utilizó un pico amperímetro el cual estaba en el límite de su resolución y el valor de su última cifra tenía un tiempo para estabilizarse muy grande y aún así oscilaba ocasionalmente durante la medición.

En el caso de la función trabajo se podría trabajar con la frecuencia mínima para la cual existe fotocorriente [3].

[1] Eisberg, Robert M. *Fundamentals of Modern Physics*, Wiley Sons, Inc., 1961
 [2] *Spectrum Tubes*, Electro-Technic Products, Inc., Chicago, USA.

[3] Cátedra de Laboratorio 5 *Efecto Fotoeléctrico*, FCEyN, UBA.
 [4] http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/w_e.fe.pdf