

EFECTO FOTOELÉCTRICO

OBJETIVO

Determinación de la constante de Planck (h), a partir del efecto fotoeléctrico.

MATERIAL

Célula fotoeléctrica de potasio, filtros de interferencia de diferentes longitudes de onda, lámpara espectral, fuente de alimentación, placa de montaje, electrómetro con amplificador, voltímetro, cable BNC apantallado, cables de conexión.

FUNDAMENTO TEÓRICO

A finales del siglo XIX, Hertz descubrió que la descarga eléctrica entre dos electrodos resultaba más fácil cuando incide luz ultravioleta (UV) sobre uno de ellos (cátodo). Lenard, posteriormente, demostró que este fenómeno se debía a que la luz UV ocasiona la emisión de electrones de la superficie del cátodo. Desde entonces, se denomina **efecto fotoeléctrico** a la *emisión de electrones por la acción de la luz sobre una superficie metálica*, denominándose **fotoelectrones** a esos *electrones emitidos*.

Este fenómeno no pudo ser explicado mediante los conocimientos clásicos de la Física de entonces. Y no fue hasta 1905 que Einstein, aplicando las ideas cuánticas de Planck, pudo establecer un modelo explicativo adecuado, razón por la que le fue concedido el premio Nobel en 1921.

El modelo de Einstein resucita la teoría corpuscular de la luz, estableciendo la hipótesis de que la radiación electromagnética está formada por un chorro de partículas denominadas **fonones**, cada una de las cuales tiene una energía dada por la expresión hf , siendo f la frecuencia de la radiación y h la constante de Planck. Así, un fotón le cede completamente su energía a un único electrón de la placa metálica sobre la que incide. Parte de esta energía se emplea en extraer al electrón del metal. Cuando esta energía es la mínima posible se la denomina **función trabajo** W_0 , que es la *energía necesaria para arrancar los electrones más fácilmente extraíbles del metal*. Por tanto, para que se produzca el efecto fotoeléctrico la energía hf del fotón debe ser al menos igual a la función trabajo característica del metal. Y, si la energía del fotón es mayor que la función trabajo, el exceso de energía se emplea en comunicar energía cinética E_c , al fotoelectrón.

Así pues, la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico es:

$$hf = W_0 + E_c$$

siendo f la frecuencia de la radiación incidente, que está relacionada con la longitud de onda (λ) a través de la velocidad de la luz (c):

$$f\lambda = c$$

MÉTODO EXPERIMENTAL

En nuestro caso vamos a utilizar una célula fotoeléctrica provista de un fotocátodo de PbS. Las tensiones fotoeléctricas obtenidas en la fotocélula al ser irradiada con luz de longitud de onda conocida se miden directamente por medio de un voltímetro de muy alta resistencia ($R_i \geq 10^{13} \Omega$).

La figura 1 muestra un esquema del montaje experimental. Tanto la lámpara como la célula fotoeléctrica están montadas sobre unas carcasas que llevan un imán en su parte inferior, para poder fijarlas fácilmente a la placa de montaje metálica.

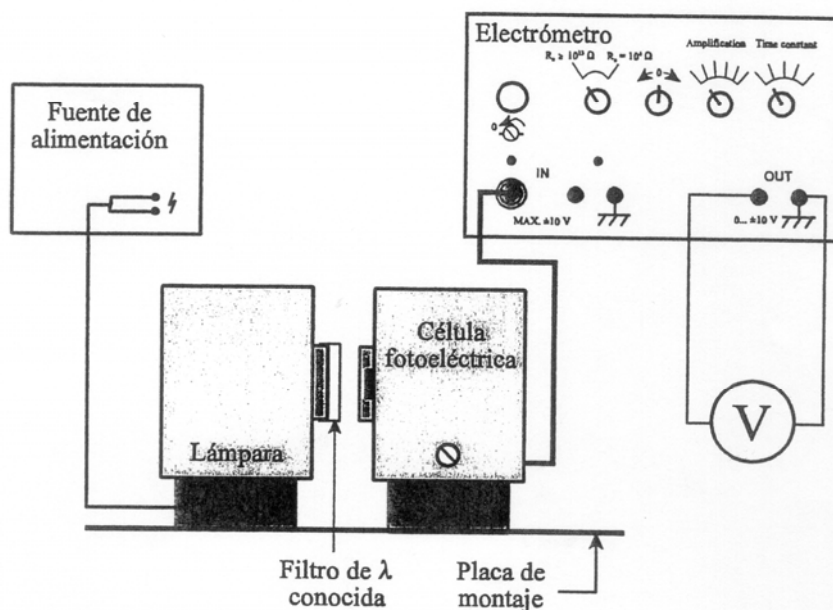


Figura 1

En primer lugar conectamos la lámpara a la fuente de alimentación.

Nota	¡La lámpara espectral debe conectarse a la fuente de alimentación al menos 15 minutos antes de realizar la primera medida!
------	---

Seguidamente se acopla, con cuidado y a presión, un filtro de longitud de onda conocida en la parte circular de la lámpara. Tenga cuidado porque la carcasa de la lámpara estará muy caliente.

Nota	¡No apriete demasiado el filtro! ¡Manipule la carcasa de la lámpara por su parte inferior para no quemarse!
------	--

En la célula fotoeléctrica existe una placa obturadora deslizante que permite abrir y cerrar el paso de la luz hacia su cátodo. Inicialmente la placa debe cerrar la abertura al paso de luz.

Se acercan, hasta tocarse, el filtro de la lámpara y la abertura de la célula fotoeléctrica y deslizamos la placa para dejar pasar la luz. El voltímetro detecta una diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo de la célula fotoeléctrica. ¿A qué se debe esto? Cuando el cátodo de la fotocélula recibe la radiación monocromática (de longitud de onda única conocida) se extraen fotoelectrones de él. Algunos de ellos irán hacia el ánodo que no está iluminado, estableciéndose una d.d.p. entre ambos que aumenta hasta un valor límite, tras un breve periodo de tiempo. A partir de entonces, sólo podrán alcanzar el ánodo los fotoelectrones de energía cinética máxima, que

serán los únicos que tendrán la suficiente energía cinética para salvar la d.d.p. entre ánodo y cátodo. Esta diferencia de potencial V_{AB} , que mediremos con el voltímetro, está relacionada con la energía cinética máxima de los fotoelectrones mediante la expresión: $E_c = e V_{AB}$, siendo e la carga elemental $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Nota	¡El voltímetro medirá en corriente continua. Recomendamos usar la escala de 2V!
-------------	--

Utilícense los siguientes valores en el electrómetro al que está conectado el voltímetro.

Control del amplificador	Ajuste
LOW DRIFT ...	$\geq 10^{13} \Omega$
TIME CONSTANT ...	0
FACTOR OF AMPLIFICATION ...	10^0

Después de medir, se cierra la abertura de la fotocélula mediante la placa obturadora deslizante y se separa la lámpara para cambiar el filtro. Se utilizan sucesivamente cada uno de los cinco filtros disponibles y se anota en una tabla los valores de longitud de onda y d.d.p. medida en el voltímetro.

Nota	1. Antes de abrir el paso de luz hacia la fotocélula, presione unos segundos el botón de cero del electrómetro para llevar el voltímetro a cero. 2. Si el voltímetro indicase valores muy variables durante cada medida, podemos estabilizarlo uniendo, mediante un cable, el tornillo lateral de la carcasa de la fotocélula con la toma de tierra libre del electrómetro.
-------------	--

La ecuación de Einstein queda, en función de la diferencia de potencial medida como:

$$hf = W_0 + eV_{AB} \quad \Rightarrow \quad \frac{hc}{\lambda} = W_0 + eV_{AB}$$

Finalmente, obtenemos la constante de Planck h mediante un ajuste por mínimos cuadrados. Para ello podemos representar la diferencia de potencial en función de la frecuencia o en función de la inversa de la longitud de onda de la radiación incidente. Recuerde anotar el error de sensibilidad del voltímetro así como calcular el error de la constante de Planck y de expresar adecuadamente el resultado final.

BANDA PROHIBIDA DE UN SEMICONDUCTOR

OBJETIVO

Determinación de la banda prohibida del germanio.

MATERIAL

Lámina de germanio de $20 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ (incluida en una placa con posibilidad de suministro de calefacción), amperímetro, voltímetro, medidor de temperatura, fuente de alimentación, resistencia de 180Ω , cables de conexión.

FUNDAMENTO TEÓRICO

Los niveles energéticos de los átomos aislados están muy separados (por ejemplo, en el caso del hidrógeno $E_1 = -13,6 \text{ eV}$; $E_2 = -3,4 \text{ eV}$). Sin embargo, cuando dos átomos se aproximan entre sí el nivel energético de cada uno cambia por la presencia del otro. De esta forma, cada nivel energético se desdobra en dos niveles de energía ligeramente diferentes, debido al principio de exclusión de Pauli. Si aproximamos N átomos, cada nivel particular de energía de un átomo se divide en N niveles energéticos distintos pero muy próximos. Como en un sólido macroscópico N es un número extraordinariamente elevado, cada nivel energético se divide en un número muy grande de niveles, llamado **banda de energía**, de forma que los niveles están espaciados casi continuamente dentro de la banda.

Existe, de esta forma, una banda separada de niveles de energía para cada nivel energético particular del átomo aislado. Estas bandas pueden estar muy separadas en su energía o muy próximas, e incluso pueden solaparse, todo ello dependiendo del tipo de átomo y enlace del sólido.

Se denomina **banda de valencia** a la banda de energía más alta del sólido que contiene electrones, la cual puede estar completamente llena de electrones o parcialmente llena.

Se denomina **banda de conducción** a la banda de menor energía en la que hay estados no ocupados. Dependiendo de que la banda de valencia esté totalmente llena o no y de la diferencia de energía que existe entre la banda de valencia y la de conducción, podemos tener materiales conductores, aislantes o semiconductores.

Los **semiconductores** intrínsecos o puros se caracterizan por tener la banda de valencia completamente ocupada por electrones y la banda de conducción vacía, pero siendo el intervalo energético entre ambas, denominado **banda prohibida**, no muy grande (alrededor de 1 eV). Esto significa que estos materiales (entre los que se encuentra el germanio) tienen una resistividad muy elevada a bajas temperaturas, por lo que apenas pueden conducir la electricidad. Sin embargo, al elevar la temperatura puede empezar a ser significativa la fracción de electrones que pueden pasar de la banda de valencia a la de conducción, y el material será capaz de transportar cierta corriente eléctrica.

A temperaturas elevadas (aproximadamente, a partir de la temperatura ambiente) existe una relación exponencial entre la conductividad y la temperatura de un semiconductor, en la forma:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/2kT} \quad (1)$$

donde σ es la conductividad a la temperatura absoluta T , k es la constante de Boltzmann y E_g es la energía de la banda prohibida, cuya determinación corresponde al objetivo de esta práctica.

Por otro lado, la conductividad de un material está relacionado con su resistencia y su geometría de acuerdo con:

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{S}$$

siendo R su resistencia, σ su conductividad, ℓ la longitud del material y S su sección recta a través de la cual circula la corriente eléctrica. Además, podemos utilizar la ley de Ohm, porque el germanio es un material óhmico:

$$R = \frac{V}{I}$$

siendo I la intensidad de corriente y V la diferencia de potencial aplicada a los extremos de nuestra muestra de germanio.

Así pues, de las dos expresiones anteriores resulta fácil obtener la conductividad σ . Dicha expresión debe obtenerla el alumno.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Conecte la placa de germanio en serie con la resistencia de 180Ω y la fuente de alimentación en corriente continua, insertando un amperímetro para medir la intensidad de corriente que circula por la plaquita de germanio. Debe conectar también un voltímetro en paralelo con la placa de germanio para medir la diferencia de potencial entre sus extremos. Seguidamente, conecte los terminales de la resistencia calefactora a la entrada adecuada de la fuente de alimentación. Por último, no olvide conectar el termómetro a los extremos del termopar para medir la temperatura de la muestra de germanio. La figura 1 muestra un esquema orientativo del dispositivo.

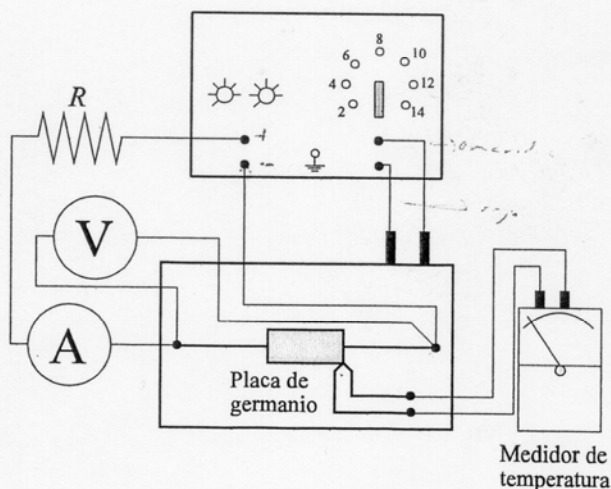


Figura 1

Nota	¡Antes de enchufar el dispositivo a la red, avise al profesor para que compruebe que las conexiones son correctas!
------	--

Seleccione una tensión media con el selector de la fuente de alimentación. Encienda el dispositivo y comience a medir. Debe hacer una tabla que incluya temperatura, intensidad y tensión. Para cada valor de temperatura anote la pareja (intensidad, tensión) correspondiente.

Empiece con el selector de calentamiento en la posición 2. Cuando note que la temperatura aumenta con cierta dificultad, cambie el selector a la posición 4, y, si fuese necesario a la posición 6.

Nota	¡No caliente la placa por encima de los 100°C!
------	--

Se le sugiere que tome los datos inicialmente a intervalos de 5°C, y como a partir de unos 55°C será necesario aumentar el ritmo de calentamiento quizá sea mejor tomar datos a intervalos de 10°C, hasta llegar al tope máximo de 95°C. A continuación, desconecte los terminales de calefacción y vuelva a tomar datos durante el proceso de enfriamiento.

Con los datos obtenidos (bien los tomados en el proceso de calentamiento, en el de enfriamiento o tomando las medias correspondientes a los dos procesos) determine la tabla ($\ln \sigma$, $1/T$), sin olvidar que la temperatura debe ser la absoluta. Represente $\ln \sigma$ en función de $1/T$ y, mediante un ajuste por mínimos cuadrados, podrá determinar el valor de la banda prohibida del germanio, para lo que debe usar la ecuación 1 y aplicar logaritmos neperianos. No olvide los cálculos correspondientes de errores.

LEY DE RADIACIÓN DE STEFAN-BOLTZMANN

OBJETIVO

Comprobación de la ley de radiación de Stefan-Boltzmann.

MATERIAL

Termómetro, 2 polímetros, amperímetro, termopila, bombilla con filamento de tungsteno, generador de corriente, amplificador de corriente, resistencia de $100\ \Omega$, cables de conexión, banco metálico con regleta y soportes.

FUNDAMENTO TEÓRICO

La radiación en forma de ondas electromagnéticas es uno de los diversos mecanismos de transmisión de calor conocidos. Josef Stefan, en 1879, obtuvo de forma experimental que la rapidez a la que un cuerpo radia energía térmica es proporcional al área del mismo y a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Boltzmann, unos pocos años más tarde dedujo teóricamente dicha relación. Por eso, a la expresión siguiente de la energía radiante emitida por unidad de tiempo se la denomina ley de Stefan-Boltzmann.

$$\frac{dQ}{dt} = A e \sigma T^4 \quad [1]$$

donde A es el área del cuerpo que está radiando, e es su emisividad y σ recibe el nombre de constante de Stefan o de Stefan-Boltzmann (¡No confundir con la constante de Boltzmann!) cuyo valor es $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8}\ \text{W/m}^2\ \text{K}^4$.

La emisividad es un número adimensional que varía entre 0 y 1 representando la relación entre la razón de radiación de una superficie

dada y la de un área igual de una superficie radiante ideal, a la que se denomina *cuerpo negro*, a la misma temperatura. El valor de la emisividad suele ser mayor para superficies oscuras que para las claras. Una superficie negra opaca puede llegar a tener una emisividad cercana a la unidad, es decir se comportaría como superficie radiante ideal.

Aunque un cuerpo a cierta temperatura T está radiando, su entorno que se halla a una temperatura T_0 también lo hace, y el cuerpo absorbe parte de esa radiación. Así, si el cuerpo está en equilibrio térmico con su entorno debe radiar y absorber energía térmica con igual rapidez, por tanto, la energía absorbida por unidad de tiempo será

$$\frac{dQ}{dt} = A e \sigma T_0^4 \quad [2]$$

En definitiva, la rapidez neta de radiación de energía térmica de un cuerpo que se halla a una temperatura T en un entorno a una temperatura T_0 vendrá dada por

$$\frac{dQ}{dt} = A e \sigma (T^4 - T_0^4) \quad [3]$$

En nuestro experimento utilizaremos el filamento de una bombilla incandescente para estudiar su rapidez de emisión de energía radiante en función de la temperatura absoluta a la que se encuentra.

El filamento de la bombilla utilizada es de tungsteno, cuya resistencia es función conocida de la temperatura, según la relación

$$R(t) = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2) \quad [4]$$

donde $R(t)$ es la resistencia del filamento a la temperatura t (expresada en grados Celsius), R_0 es su resistencia a 0°C , y los valores de α y β son: $\alpha = 4,82 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = 6,76 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$.

MÉTODO EXPERIMENTAL

En primer lugar determinaremos la resistencia del filamento de tungsteno de la bombilla a temperatura ambiente (que mediremos con un termómetro). Para ello se monta el circuito de la Figura 1, utilizando un aparato de suministro de energía eléctrica como generador de corriente continua y una resistencia de 100Ω .

Nota	Tenga cuidado de conectar las clavijas en la salida de corriente CONTINUA del aparato generador. ¡Antes de enchufar el dispositivo a la red, avise al profesor para que compruebe que las conexiones son correctas!
-------------	--

Como el tungsteno es un material óhmico, cumple la ley de Ohm, es decir

$$V = IR \quad [5]$$

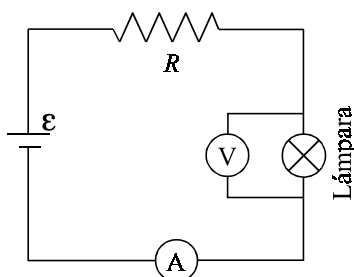


Figura 1

Obtenga una tabla de valores (V, I) variando la intensidad desde 100 mA a 200 mA. A partir de dicha tabla, determine la resistencia del filamento a temperatura ambiente realizando un ajuste por mínimos cuadrados de V en función de I .

Se eligen los valores de intensidad tan bajos para que la influencia de la temperatura sobre la resistencia sea despreciable y podamos asumir que la resistencia calculada es la que tiene el filamento a temperatura ambiente.

Utilice el valor de la resistencia antes obtenido para calcular el valor de la resistencia de tungsteno a 0°C , para lo cual deberá usar la expresión [4].

A continuación se realiza el montaje de la figura 2, de forma que los soportes de la termopila y la bombilla estén separados unos 30 cm.

Nota	Tenga cuidado de conectar las clavijas en la salida de corriente ALTERNA del aparato generador. ¡Antes de enchufar el dispositivo a la red, avise al profesor para que compruebe que las conexiones son correctas!
-------------	---

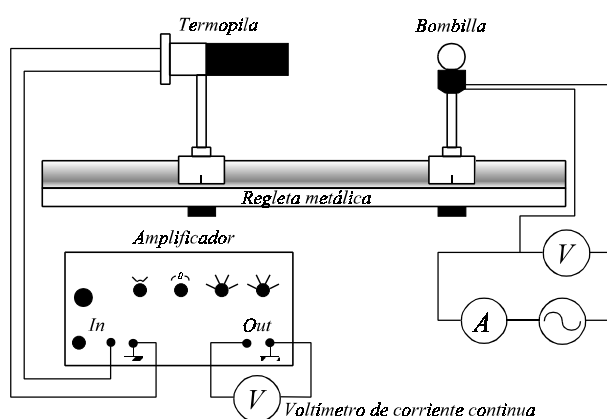


Figura 2

En el amplificador los controles se ajustan de la forma siguiente:

Control del amplificador	Ajuste
LOW DRIFT ...	$10^4 \Omega$
TIME CONSTANT ...	1 s
FACTOR OF AMPLIFICATION ...	10^3
Y realizar el correspondiente ajuste de cero antes de colocar el soporte con la bombilla.	

Comenzaremos por aumentar la tensión en el generador de corriente alterna hasta unos 2 V. La bombilla debe girarse sobre el eje de su soporte hasta que el voltímetro conectado al amplificador, que mide la f.e.m. generada en la termopila, muestre un máximo. Lo normal es que esto se consiga cuando el eje del filamento de tungsteno quede perpendicular al eje longitudinal de la regleta. De todas formas realice dicho ajuste ahora y ya no vuelva a tocar más el soporte de la bombilla.

Espere a que se estabilice la lectura en el voltímetro conectado al amplificador, que puede tardar aproximadamente 1 min y tome nota de dicho valor y de la intensidad de corriente que pasa por la bombilla, además de la tensión suministrada por el generador.

Siga tomando datos aumentando la tensión del generador hasta cerca de 8 V, a intervalos aproximados de 1 V.

Nota	Procure tomar los datos con rapidez, porque la bombilla no debe soportar una tensión superior a 6 V durante un tiempo demasiado prolongado.
-------------	--

Al finalizar la toma de datos tendrá una tabla de valores (V, I, V_T) , siendo V e I la tensión entre los extremos de la bombilla y la intensidad de corriente que pasa por ella, respectivamente y V_T la d.d.p. amplificada obtenida en la termopila.

A partir de cada pareja de datos V, I , obtenemos la resistencia correspondiente del filamento de tungsteno, y mediante la ecuación [4] calculamos su temperatura, que habrá que pasar a Kelvin sumando 273 a la temperatura en grados Celsius. Así, conseguimos una tabla de temperaturas.

La d.d.p. obtenida en la termopila, que hemos tenido que amplificar para poder medirla con suficiente precisión, es directamente proporcional a la potencia radiante proveniente de la bombilla menos la potencia que radia la termopila por hallarse a temperatura ambiente (ecuación [3]). Es decir,

$$V_T \propto \frac{dQ}{dt} \propto (T^4 - T_0^4) \quad [7]$$

Pero como la temperatura ambiente es muy pequeña en comparación con la temperatura de la bombilla, es decir $T^4 - T_0^4 \approx T^4$, concluimos que podemos utilizar la expresión dada por la ecuación [1]. Por tanto, finalmente llegamos a:

$$V_T \propto T^4 \Rightarrow V_T = K T^4 \quad [8]$$

siendo K la constante de proporcionalidad.

La ecuación [8] puede linealizarse fácilmente aplicando logaritmos neperianos (o logaritmos decimales). Así, obtenemos

$$\ln V_T = \ln K + 4 \ln T \quad [9]$$

Para culminar el objetivo de esta práctica, realizaremos el ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación [9] y comprobaremos si la

pendiente de la recta obtenida es efectivamente 4, tal como predice la ecuación [8] que es una forma de expresar la ley de radiación de Stefan-Boltzmann.

CUESTIONES

1.- Determine el error aproximado que se comete al despreciar el valor de la temperatura ambiente en la ecuación [3].