

Medición de la constante de Planck utilizando LEDs

Carla Romano^{a)} y Cecilia López^{b)}

Laboratorio 5 – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

Marzo de 2001

Un diodo emisor de luz (LED) es un dispositivo que convierte energía eléctrica en lumínica: al aplicarle un voltaje superior a cierto valor, los electrones de conducción se excitan, pero, al intentar regresar al estado de equilibrio, ceden esta energía en forma de fotones. La explicación de este proceso es muy compleja, abarcando desde modelos teóricos de conducción y bandas prohibidas hasta técnicas de fabricación y diseño de sus componentes.

Exponiendo y haciendo uso de algunos de estos conceptos, en este trabajo se mide la constante de Planck mediante la relación básica $E=hf$. f se obtiene por espectrometría; mientras que E se determina analizando la relación entre el voltaje aplicado y la corriente que circula por LED, utilizando tres interpretaciones diferentes sobre ello. Los resultados presentaron en algunos casos precisión y un buen acuerdo, mientras que en otros dejaron información sobre el funcionamiento de un LED.

I. INTRODUCCIÓN

Un diodo emisor de luz (LED) produce luz de una manera bastante diferente a la que lo hace la familiar lámpara incandescente. En una lámpara incandescente, al elevarse la temperatura del filamento de tungsteno, sus átomos se excitan y transfieren su energía a fotones, irradiando luz cuya longitud de onda se encuentra en un rango de centenares de nanómetros. Los LEDs producen luz en una banda estrecha de radiación, usualmente menor a las decenas de nanómetros, con un pico característico del material luminescente¹ que lo compone. Los LEDs no requieren un aumento en la temperatura; de hecho, su eficiencia casi siempre se incrementa cuando su temperatura es disminuida. La electroluminescencia de estos dispositivos es el resultado directo de las propiedades semiconductoras del material del cual están hechos.

El objetivo de este trabajo es determinar el valor de la constante de Planck h utilizando estos diodos emisores de luz y diodos emisores infrarrojos². Para ello se medirá tanto la longitud de onda de los fotones emitidos como su energía, y luego se obtendrá h mediante la relación

$$E = hf \quad (1)$$

siendo f la frecuencia asociada a la longitud de onda medida: $f = c / \lambda$ (c es la velocidad de la luz). Para ello es necesario adentrarse en el funcionamiento de los LEDs. Esto permitirá obtener la energía E a partir de la respuesta del LED a un voltaje externo aplicado, comprender como esa energía eléctrica es convertida en energía lumínica, y saber cuál es su longitud de onda característica λ .

II. FUNCIONAMIENTO DE UN LED³

Un LED es ante todo un cristal semiconductor. Los cristales semiconductores, como cualquier otro cristal, son materiales cuyos átomos están ligados unos a otros en un arreglo tridimensional repetitivo (red). El

enlace de los átomos implica principalmente la interacción sus electrones exteriores. Estos electrones, además de mantener el cristal unido, dan al material sus características ópticas. Cada electrón tiene una energía dentro de un conjunto de valores permitidos (se dice que el electrón ocupa tal nivel de energía). Qué nivel ocupa un electrón depende de su posición en la estructura electrónica del átomo, de la temperatura, del grado de excitación externa, etc.

Agregando energía en cantidades discretas, puede hacerse que los electrones suban de un nivel a otro superior. La luminescencia resulta de la transferencia de la energía de excitación de un electrón a un fotón, cuando un electrón va de un nivel alto a uno bajo. En los cristales, los niveles de energía aparecen formando bandas de energía consistentes en niveles muy cercanos. Se dice que las bandas están vacías, parcialmente llenas o llenas dependiendo de si ninguno de los estados está ocupado por electrones, algunos de los estados están ocupados por electrones o todos los estados están ocupados, respectivamente. Las bandas están separadas unas de otras por “bandas prohibidas” de energía. Excepto bajo circunstancias especiales, los electrones del material no pueden tener energías con un valor en el rango prohibido.

Es suficiente para los propósitos de este trabajo el describir a un típico semiconductor como constituido por dos bandas de energía (ver Fig. 1). La más alta, llamada banda de conducción (BC), está separada de la más baja, llamada banda de valencia (BV), por una banda prohibida de energía con un valor E_g . El tamaño de E_g tiene un efecto controlador en las propiedades ópticas de un semiconductor.

Normalmente, la BC casi no contiene electrones a menos que el cristal tenga impurezas “dadoras” que contribuyan a ello. La banda de valencia está casi llena con electrones. Tiene algunos estados vacíos (correspondientes a los electrones en la BC), llamados huecos, que pueden actuar como partículas cargadas positivamente. La cantidad de huecos puede

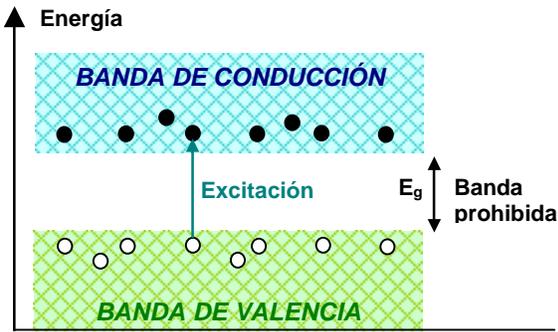


Fig. 1. Esquema energético en un cristal semiconductor. Los puntos negros representan electrones móviles, mientras que los puntos blancos representan huecos móviles (pequeñas zonas cargadas positivamente). Los electrones no pueden ocupar la banda prohibida; la energía de excitación (térmica, electromagnética) debe ser mayor a E_g .

aumentarse con la presencia de átomos “aceptores” ajenos, los cuales han aceptado algunos electrones de la banda de valencia dejando estados vacíos (huecos). Los dadores son elementos que cuentan con una cantidad de electrones de enlace mayor a la necesaria por la red, mientras que los aceptores son elementos con una cantidad de electrones de valencia menor; la adición deliberada de impurezas a un conductor se denomina *doping*. Los huecos en la banda de valencia y los electrones en la banda de conducción son los únicos portadores de carga en un semiconductor. Si hay más dadores que aceptores, la corriente en el material es conducida por los electrones (cargados negativamente) de la banda de conducción y el material se dice de tipo n. Si hay más aceptores que dadores, la corriente es conducida por los huecos (cargados positivamente) y el material es designado como de tipo p (ver Fig. 3-a). En la Tabla 1 pueden verse algunos datos referidos al doping de semiconductores. El nivel de energía mínimo de los electrones movibles otorgados por los dadores suele estar ligeramente por debajo del nivel de separación entre la BC y la banda prohibida; el nivel de energía máximo de los huecos creados por los aceptores suele estar ligeramente sobre la separación entre la banda prohibida y la BV.

Cristal semicond. (tetra valentes)	Dadores *	Energía de enlace E_d [eV]	Aceptores †	Energía de enlace E_a [eV]
$E_g=1.11$ eV	P	0.045	Al	0.057
	As	0.049	Ga	0.065
	Sb	0.039	In	0.016
$E_g=0.66$ eV	P	0.012	B	0.0104
	As	0.0127	Al	0.0102
	Sb	0.009	Ga	0.0108

Tabla 1. Datos referidos al doping de semiconductores. Los valores de E_g son a $T = 300$ K. Se observa que las energías de enlace no superan el 6% de E_g , lo cual es típico en el doping de semiconductores.

* Dadores del Grupo V (pentavalentes)

† Aceptores del Grupo III (trivalentes)

Fuente: C. KITTEL, *Introducción a la física del estado sólido*, 3° edición, Reverté, 1998, Cap. 8.

Es posible inyectar pares electrón-hueco en materiales tipo n o tipo p de diversas maneras. Estos portadores extra estarán presentes en una situación de no-equilibrio, y el cristal tiende a eliminarlos. Esta eliminación de los portadores inyectados implica la pérdida de su energía de excitación. Ya que la excitación de electrones desde la BV a la BC implica la entrega de una energía E_g , ésta es una cantidad de energía que puede cederse. Para ello el electrón “re-ocupa” el hueco inyectado en la banda de valencia en un proceso llamado recombinación hueco-electrón. Entre las formas en que la energía es cedida se encuentra la emisión de un fotón (ver Fig. 2). Este proceso ocurre con bastante eficiencia en una toda una gama de semiconductores en los que se basan los LEDs.

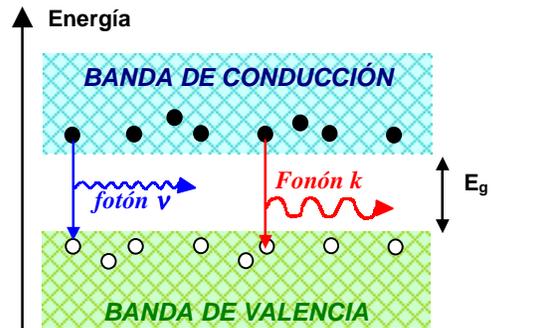


Fig. 2. Recombinación electrón-hueco. El electrón en la banda de conducción debe ceder una energía igual o mayor a E_g , lo cual sucede, por ejemplo, emitiendo fotones (cuantos de energía electromagnética, luz) o fonones (cuantos de energía vibracional mecánica, calor).

Una forma de inyectar pares electrón-hueco es suministrar una corriente a una juntura p-n: cuando un cristal es en parte tipo n y en parte tipo p (diodo), la unión de las dos regiones es llamada juntura p-n⁴ (ver Fig. 3-b). Ya que una juntura p-n es una frontera que tiene cargas móviles negativas (electrones) de un lado y cargas móviles positivas (huecos) del otro, puede esperarse que el movimiento térmico usual de estas cargas se dé hacia la juntura, causando el flujo de una corriente. Realmente este proceso sucede, pero se detiene luego de que un número pequeño de huecos y electrones han alcanzado la juntura y se han recombinado, porque los huecos y electrones movibles han dejado atrás los centros fijos de las impurezas a las que pertenecen (cargados negativa y positivamente, respectivamente). El campo eléctrico que se genera debido a estas cargas fijas se opone al movimiento de los portadores y el flujo de corriente cesa. El resultado de esto es que las bandas de valencia y conducción “se doblan” (ver Fig. 3-b).

Las bandas pueden desdoblarse y puede inducirse una corriente que fluya a través de la juntura p-n aplicando un voltaje externo al cristal, de tal manera que éste se oponga al campo internamente generado. Esto se llama “conexión en directa” de un diodo. Cuando un voltaje en directa es aplicado al diodo, los electrones inyectados son inducidos a penetrar en el lado n desde el circuito exterior, y también a salir del

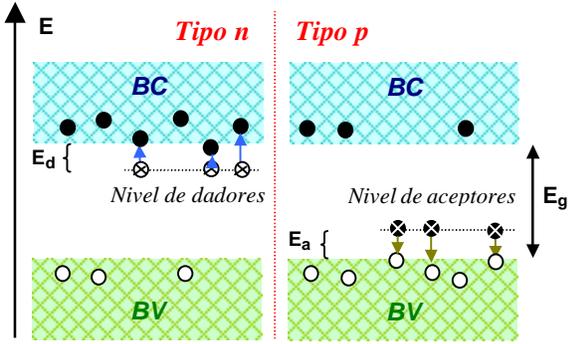


Fig. 3-a. Izq.: semiconductor dopado con impurezas dadoras para conformar un semiconductor tipo n; los puntos blancos marcados con X representan los centros de las impurezas, que constituyen cargas positivas inmóviles. Der.: semiconductor dopado con impurezasceptoras para formar un semiconductor tipo p; los puntos negros marcados con X representan los centros de las impurezas, que constituyen cargas negativas inmóviles.

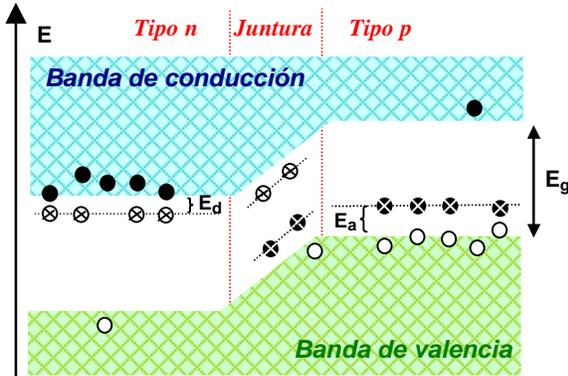


Fig. 3-b. Unión de dos semiconductores tipo p y tipo n (diodo). Se observa el doblamiento de las bandas de energía. Los centros fijos en la zona de la juntura corresponden a los huecos y electrones de impurezas que lograron recombinarse antes de que se alcanzase el equilibrio.

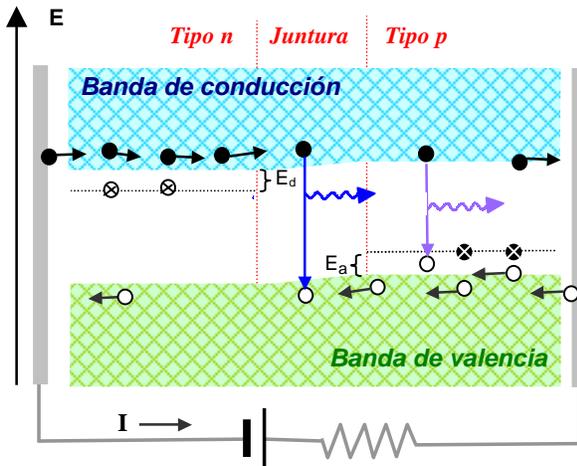


Fig. 3-c. LED alimentado en directa. Con un voltaje aplicado suficiente se desdoblan las bandas, y si luego se incrementa la corriente se produce la desexcitación de los portadores mediante una recombinación.

lado p hacia el circuito exterior. Cuando la juntura p-n es alimentada con un voltaje suficiente, las bandas se desdoblan y los electrones fluyen a través de la juntura desde la banda de conducción del lado n hacia el lado p, mientras que los huecos lo hacen en sentido contrario. Así la corriente es conducida desde el lado p hacia el n. Usualmente, uno de estos dos mecanismos predomina. El funcionamiento del LED ante la aplicación de un voltaje en directa se muestra esquemáticamente en la Fig. 3-c.

En la juntura o en el lado p se produce la recombinación, la cual ocurre con una pérdida de energía E en forma de un fotón⁵ (ver Fig. 3-c). Observando los valores de E_a y E_d en la tabla 1, generalmente puede considerarse E ≈ E_g (el hecho de que la igualdad no sea exacta es causante de que los LEDs emitan luz en una pequeña franja espectral).

El siguiente paso es establecer la relación entre E y magnitudes medibles como el voltaje aplicado al LED y la corriente que circula. El texto de Wert y Thomson⁶ observa el modelo anteriormente expuesto (Fig. 3-b y 3-c) y obtiene una expresión para la corriente I que circula por el diodo en función del voltaje V aplicado

$$I(V) = A e^{-\frac{E}{\eta K_B T}} \left(e^{\frac{q_e V}{\eta K_B T}} - 1 \right) \quad (2)$$

donde q_e es la carga del electrón (en valor absoluto), K_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura (ambiente), A una constante de proporcionalidad que, eventualmente, puede llegar a depender de la temperatura, y E es la energía de excitación requerida en el lado p. η es el llamado “factor de idealidad”⁷ y vale aproximadamente 1.62 para los LEDs típicos. Si todas las cargas se difunden directamente a través de la juntura, η = 1; si los electrones y huecos se recombinan en el área de la juntura, η = 2. Esta constante caracteriza la corriente en la juntura para un tipo particular de semiconductor y no debe arbitrariamente igualarse a 1.

La deducción de la ec. 2 se basa en la difusión de los electrones a través del material, obedeciendo una estadística de Fermi y observando las barreras de potencial que deben vencer los portadores (Fig. 3-b).

Trabajando con voltajes mayores a 0.9 Volt, puede despreciarse el 1 en la ec. 2, quedando la siguiente expresión para la corriente

$$I(V) = A e^{\frac{q_e V - E}{\eta K_B T}} \quad (3)$$

la cual resulta más conveniente para posteriores cálculos.

Finalmente, puede verse entonces que la medición de V e I eventualmente conduce a la determinación de E. Simultáneamente, un análisis espectrográfico de la luz emitida lleva a la determinación de λ, obteniéndose así los datos necesarios para calcular h mediante la ec. 1.

III. DETERMINACIÓN DE λ

Primeramente resulta pertinente observar que la elección de los LEDs a utilizar en este trabajo se concentró en propiciar una mejor medición de λ (para los LEDs en el visible) y proveer la información necesaria sobre λ (principalmente para los LEDs infrarrojos o IREDS).

Los LEDs en el visible (LEDs # 5 a 11) emitían haz sumamente direccional (de 4° a 23° de arco) e intenso. El ancho espectral en el que emiten es de unos 50 a 100 nm, pero con una distribución de intensidad vs. longitud de onda del tipo gaussiana, con un claro pico de emisión espectral (λ_p), el cual fue considerado como el valor de λ asociado a la energía E. El encapsulado era transparente (de 4 a 5 mm de diámetro), de tal manera que no interfería con la luz observada (puede verse en la Fig. 4).

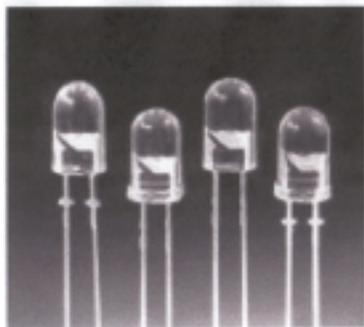


Fig. 4.
Encapsulado de los LEDs visibles.
Foto de Agilent Technologies, Inc.

Los LEDs en el infrarrojo (LEDs # 1 a 4) contaban con la información referida a la distribución de intensidad vs. longitud de onda y el valor de λ_p .

Estos datos pueden verse más adelante en la Tabla 2. La información cuantitativa estaba disponible para todos los LEDs excepto para los # 5, 7 y 9; la obtención de esta información consistió justamente en el estudio experimental de λ , el cual se explica a continuación.

Se montó un dispositivo como el de la Fig. 5: el haz emitido por la fuente de luz es concentrado (mediante un juego de lentes) en la rendija de entrada de un monocromador Czerny-Turner, al mismo tiempo que esta señal lumínica es modulada mediante un *chopper* girando a una frecuencia conocida (del orden de los 270 Hz), la cual es informada a un *lock-in amplifier*. El haz es dispersado por el monocromador de tal manera que el fotodiodo recoge la intensidad asociada a una longitud de onda dada (con una precisión de 1 nm), y esta información es enviada también al lock-in. El lock-in procede entonces a seleccionar aquella señal proveniente del fotodiodo cuya frecuencia de modulación coincide con la frecuencia del chopper, y mide su amplitud y fase. Primeramente se efectuó la calibración del monocromador, utilizando una lámpara de mercurio y observando las cuatro líneas más intensas del mercurio (435.8 nm, 546 nm, 576.9 nm, 579 nm).

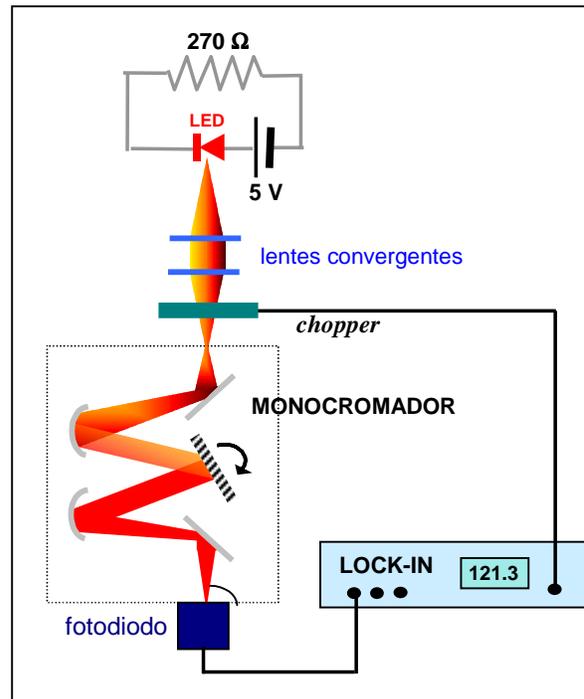


Fig. 5. Dispositivo experimental para medir λ .

Variando la longitud de onda recogida por el monocromador y notando la amplitud registrada por el lock-in, fue posible graficar amplitud relativa vs. longitud para los LEDs # 5, 7 y 9, como muestra una de las curvas en la Fig. 6 para el LED # 7. Para obtener la curva de intensidad relativa vs. longitud de onda, se tuvo en cuenta la no linealidad del fotodiodo ante distintas longitudes de onda. Como no se disponía de la curva de calibración correspondiente al equipo utilizado, se probaron varias calibraciones. El resultado fue que la no linealidad resultaba evidente sólo para longitudes de onda fuera del ancho de la mitad de la altura de la campana ($\Delta\lambda$), como puede verse en la Fig. 6. Por lo tanto se despreció la no linealidad del fotodiodo a los efectos de calcular λ_p y $\Delta\lambda$ mediante un ajuste gaussiano.

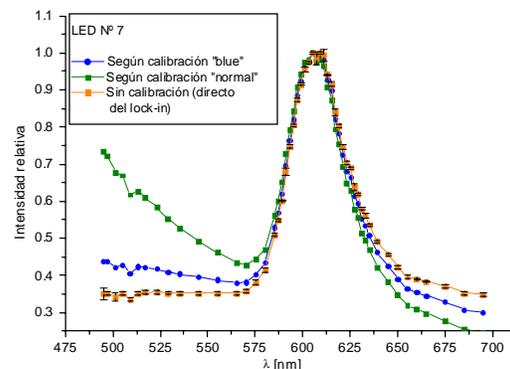


Fig. 6. Intensidad relativa vs. longitud de onda, con los datos directamente brindados por el lock-in y luego con distintas calibraciones.

#	λ_p [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	Modelo	Material	Ref.
1	940	80	TLN105A	-	c)
2	900	80	FPE700	-	c)
3	880	80	SFH480-3	AlGaAs	c)
4	800	80	SFH482-2	AlGaAs	c)
5	671	20	HB35	-	c)
6	615	17	HLMP-EH08	AlInGaP	d)
7	607	38	-	-	e)
8	592*	17	HLMP-DL16	AlInGaP II	d)
9	581	30	-	-	e)
1	505	35	HLMP-CE23	InGaN	c)
1	472	35	HLMP-CB15	InGaN	c)

Tabla 2. Datos de los LEDs. $\Delta\lambda$ es el FWHM de la campana de distribución de intensidad vs. longitud de onda.

* La producción de este modelo ha sido interrumpida (la hoja de datos no está disponible) y se ha reemplazado por el HLMP-EL16-UX000. Los datos corresponden a este último.

También se efectuó la misma experiencia con el LED # 10, con la idea de confirmar la información de la hoja de datos. La Fig. 7 muestra la curva del fabricante y los datos recogidos (luego de sustraer un fondo continuo de una intensidad relativa de 0.38). El acuerdo es muy bueno, corroborando la información previa disponible.

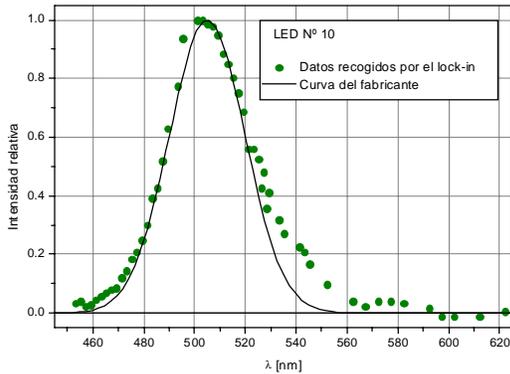


Fig. 7. Intensidad relativa vs. longitud de onda para el LED N° 10: datos recogidos y curva del fabricante.

IV. DETERMINACIÓN DE E

Para determinar E se montó un circuito en el cual se midió I y V_D de la ec. 3, es decir, la corriente circulante y el voltaje aplicado sobre cada LED. Esto se efectuó con los 11 LEDs. El circuito se muestra en la Fig. 8. Ya que era necesario variar el voltaje aplicado, resultó conveniente alimentar al circuito con una señal alterna triangular y recoger los datos con una PC a través de una plaqueta conversora (MPLI). Se realizó un análisis de la respuesta de un LED dado a distintas frecuencias, encontrándose un mejor comportamiento a bajas frecuencias (a frecuencias superiores a 5 Hz, con una frecuencia de muestreo máxima, la curva I vs. V registrada presentaba pequeñas oscilaciones relevantes para esta experiencia).

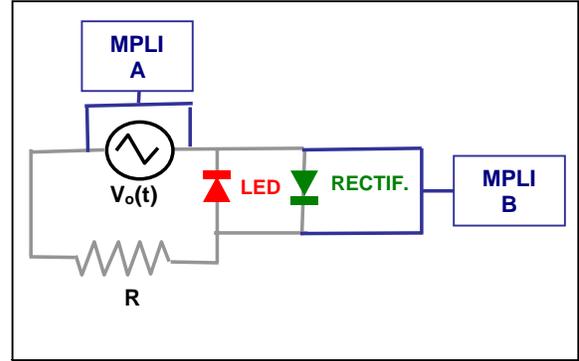


Fig. 8. Circuito para obtener las curvas I-V. R variaba de 50-270 Ω ; $|V_o| \leq 12$ Volts.

Como precaución, en el caso de los LEDs más sensibles, se agregó un diodo rectificador (1N4002) en paralelo y en sentido inverso (ver Fig. 8), de tal manera que al invertirse el sentido del voltaje aplicado, toda la corriente circulara por el rectificador sin que el LED alcance el voltaje de ruptura.

Las curvas obtenidas para los distintos LEDs pueden verse en la Fig. 9. A continuación se determinó E por tres formas distintas.

i. E mediante el voltaje “de arranque” V_A .

En la Fig. 9 puede verse que la corriente empieza a ser no nula para un cierto voltaje V_A . Asumiendo que este voltaje es de alguna manera proporcional al voltaje de barrera V_B que desdobra las bandas de energía y excita a los electrones que luego se recombinan, puede proponerse que $E \propto q_e V_B \propto q_e V_A$.

ii. E mediante la tangente de I(V)

Propuesto por P. O'Connor y L. O'Connor⁸ el potencial de barrera puede determinarse proyectando una recta tangente a I(V) en la zona lineal de la curva (en esta experiencia: 40-100 mA) y tomando como valor de V_B el resultante de la intersección de la recta tangente con el eje de las abscisas.

iii. E mediante la ec. 3.

Tomando logaritmo a ambos lados de la ec. 3, se obtiene una expresión lineal en V:

$$\ln(I) = m V + b \quad (4)$$

siendo $b = \ln(A) - E/\eta KT$ y $m = q_e/\eta KT$. Ajustando los datos registrados mediante una recta, pueden obtenerse m y b. De la pendiente puede calcularse η . Por otro lado, puede calcularse la cantidad

$$-\frac{b}{m} \frac{q_e}{K} = E - \ln(A) \eta KT \quad (5)$$

la cual es proporcional a E. Trabajando a una misma temperatura y asumiendo que η no varía significativamente de un LED a otro, la cantidad dada por la ec. 5 resulta únicamente proporcional a E. Es relevante comentar aquí que el ajuste de $\ln(I)$ se realizó en un rango de 0.1 a 2 mA, donde el voltaje aplicado es lo suficientemente alto como para que sea válida la ec. 3 y la corriente lo suficientemente baja

como para que los efectos de una posible resistencia interna del LED no sean apreciables⁹.

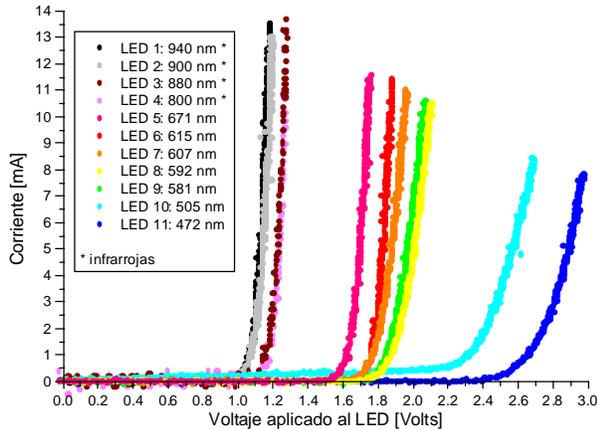


Fig. 10. Curvas corriente vs. voltaje aplicado al diodo para los distintos LEDs.

En la Tabla 3 pueden verse los valores de E obtenidos para cada método. También se consignan los valores de η calculados a partir de la pendiente m en el método *iii*.

LED #	E_i ± 0.05 [eV]	E_{ii} [eV]	ΔE_{ii} [eV]	E_{iii} [eV]	ΔE_{iii} [eV]	η	$\Delta \eta$
1	1.07	1.1	0.3	1.32	0.07	1.53	0.05
2	1.07	1.13	0.04	1.38	0.05	1.69	0.04
3	1.16	1.20	0.01	1.47	0.08	1.75	0.05
4	1.12	1.26	0.03	1.5	0.2	1.7	0.2
5	1.30	1.64	0.05	1.92	0.05	1.63	0.02
6	1.40	1.79	0.06	1.9	0.1	1.43	0.03
7	1.35	1.79	0.04	2.13	0.06	2.00	0.02
8	1.38	1.92	0.03	2.3	0.2	2.35	0.05
9	1.71	1.87	0.05	2.24	0.06	2.15	0.03
10	1.41	2.37	0.03	3.46	0.08	6.25	0.05
11	2.08	2.73	0.05	3.5	0.1	4.49	0.04

Tabla 3. Valores de E y η obtenidos. Los errores en los casos *ii* e *iii* son por propagación de los errores en los ajustes por rectas. El error en el método *i* es de apreciación visual.

V. RESULTADOS

Usando los valores de λ y E hallados para los 11 LEDs, y para cada forma de calcular E , se ajustó la ec. 1 por cuadrados mínimos y se obtuvo h .

Los resultados pueden verse en la Tabla 3. Representativamente, se ha incluido uno de los gráficos respectivos (Fig. 10). Puede verse que los LEDs # 10 y 11 se apartan considerablemente de la recta y contribuyen a aumentar el valor de h (esto sucede en los tres casos). Observando a su vez la Fig. 9, puede verse también que la curva I-V para estos LEDs difiere de lo esperado, ya que la subida no es abrupta sino gradual. Esto puede explicarse suponiendo la presencia de una resistencia interna lo suficientemente grande como para ser relevante en el rango de corriente en el

cual se trabajó en el caso *iii*, y por supuesto afecta la determinación de V_A y el ajuste del caso *ii*. Eliminando los LEDs # 10 y 11 del ajuste, el valor de h mejora sustancialmente (ver Tabla 4).

Método para determinar E	h	Δh	h	Δh
	‡	‡	§	§
	[10^{-34} J seg]			
<i>i</i>	7.1	0.3	6.3	0.3
<i>ii</i>	7.5	0.1	6.7	0.2
<i>iii</i>	10	0.4	7.3	0.5

Tabla 4. Valores de h resultantes del ajuste por cuadrados mínimos ponderados en E de la ec. 1.

‡ Ajustando los datos de las 11 LEDs.

§ No incluyendo en el ajuste a las LEDs # 10 y 11.

Como se mencionó anteriormente, con el método *iii*, también fue posible calcular η (Tabla 3). Nuevamente, los LEDs # 10 y 11 se apartan notablemente de lo esperado ($1 \leq \eta \leq 2$).

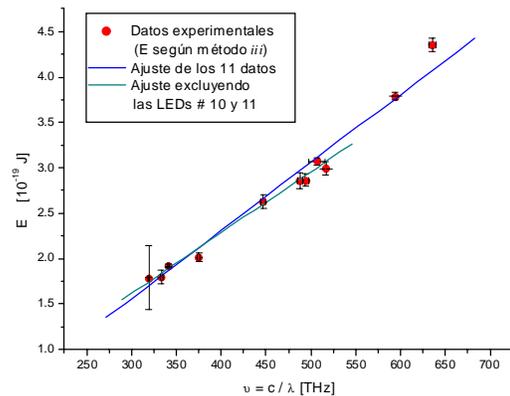


Fig. 10. Ajuste de los datos para obtener la constante de Planck.

Se observa que los valores calculados de h tienen un error relativo que no supera el 5%. Sin embargo, sólo dos de ellos contienen al valor tabulado de $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J seg. El resto de los valores no difiere de h en más de un 13%, excepto el valor 10×10^{-34} J seg.

Se concluye que esta experiencia permite calcular h con una buena precisión, aunque un claro conocimiento de los LEDs utilizados es imprescindible. La presencia de resistencias internas, filtros en el encapsulado, mecanismos diferentes de emitir la luz (existen LEDs con “trampas” de electrones que no pueden ser utilizados aquí), juntas heterogéneas (en las que el valor E_g del lado p y del lado n difieren), etc., pueden alterar significativamente el resultado del experimento.

El método para determinar λ funciona bien; se sugiere en experiencias futuras el estudio de la distribución de intensidad vs. frecuencia a distintos voltajes fijos; de acuerdo a la información disponible, el valor de λ_p no varía apreciablemente, pero esto no fue comprobado aquí por falta de tiempo. Asimismo,

por la misma razón no se pudo corroborar la λ_p del LED # 8 (ver inscripción de la Tabla 2).

En cuanto al método para determinar E, resulta sorprendente que aquel basado en la teoría de junturas p-n (ecs. 2 y 3, método *iii*) sea el que brinde peores resultados. Los otros, esencialmente cualitativos, resultaron los más indicados.

^{a)} E-mail: carlar@sinectis.com.ar

^{b)} E-mail: ceciliaclopez@infovia.com.ar

^{c)} GM Electrónica. Tte. Gral. J. D. Perón 2131 – Cap. Fed. Tel.: 4953-0417. <http://gmelectronica.com.ar>

^{d)} ELKO Componentes electrónicos. Av. Belgrano 1661 – Cap. Fed. Tel.: 4371-5281. <http://www.elkonet.com>

^{e)} Radio Aceto. Uruguay 356 – Cap. Fed. Tel. 4371-8652. <http://www.radioaceto.com.ar>

¹ Luminescencia: emisión de un fotón. Electroluminescencia: conversión de energía eléctrica –excitación de electrones– en fotones.

² A lo largo de este trabajo, el acrónimo LED se referirá tanto a los diodos emisores de luz como a los diodos emisores infrarrojos, los cuales también suelen denominarse IRED.

³ Basado en F. MOREHEAD JR., *Light emitting semiconductors*, Sci. Am. **216**, 5, 109-122 (1967), y M. PANISH e I. HAYASHI, *A new class of diode lasers*, Sci. Am. **225**, 1, 32-40 (1971).

⁴ La juntura p-n es un material semiconductor dopado de tal manera que de un lado es tipo p y del otro tipo n. Por ejemplo, con una elección apropiada de impurezas se alcanza una eficiencia respetable con el fosforo de galio (GaP),

emitiendo en el rojo. No todos los semiconductores pueden convertirse en tipo p y tipo n: el seleniuro de zinc (ZnSe) puede ser un tipo p altamente conductor, pero el tipo n tiene una resistencia muy alta; el sulfuro de zinc (ZnS) puede sólo hacerse del tipo p y muy dificultosamente. La explicación de este comportamiento es compleja; la causa principal reside en un fenómeno llamado auto-compensación. Los elementos del Grupo IV (silicio, germanio) y los compuestos Grupo III-Grupo V virtualmente no exhiben auto-compensación y pueden ser utilizados en formas altamente conductoras tanto con dadores como con aceptores.

⁵ Se mencionó que esta no es la única forma en la que la energía es cedida. Efectivamente, pueden también emitirse fonones, como se observa en la Fig. 2. Sin embargo en los materiales de interés aquí este proceso es poco probable; la emisión de fonones se da por ejemplo en silicio, germanio y seleniuro de plomo (PbSe).

⁶ C. WERT y R. THOMSON, *Física de los sólidos*, McGraw-Hill Book Co., Madrid, 1967, Cap. 13. El trabajo responde a un diodo rectificador, pero el modelo descrito coincide con el propuesto aquí para un LED, salvo en la especificación de que E es cedida en forma de fotones.

⁷ El factor de idealidad fue agregado en la ec. 2 en base a la nota de R. MOREHOUSE, *Answer to Question # 53*, Am. J. Phys. **66**, 1 (1998), p. 12. En el texto de Wert y Thomson, $\eta = 1$ (diodo rectificador).

⁸ P. O'CONNOR y L. O'CONNOR, *Measuring Planck's constant using a light emitting diode*, Phys. Teach. **12**, 423-425 (1974).

⁹ De acuerdo a R. MOREHOUSE, op. cit., p. 12, las resistencias internas de los LEDs varían desde 9Ω para un LED verde a 0.7Ω para un IRED de 940 nm.