

Estructura de bandas en semiconductores

Cedric Prieels

10 de mayo de 2016

Resumen

Esta práctica era una manera de estudiar la estructura de banda característica de todos los semiconductores, y en particular de estudiar la relación que existe entre la emisión de luz y la tensión aplicada, y la polarización en diodos de tipo LEDs. Se busca también una manera de determinar la tensión umbral necesaria para que un LED empiece a emitir luz, el valor de la longitud de onda que corresponde a la intensidad de emisión máxima y el valor del *gap* entre las bandas que forman el semiconductor del LED. Por fin, se representa en una gráfica el resultado del análisis de diferentes LEDs para verificar la relación que existe entre la tensión aplicada y la longitud de onda de emisión, y se calcula el valor de la constante de Planck con estos últimos resultados.

1. Introducción teórica

Esta práctica mezcla dos campos diferentes de la física : la parte cuántica (estudio de los niveles de energía) y la parte relativa a la física de materiales (estudio de la influencia de la posición de los átomos dentro de la red cristalina del compuesto considerado).

En el principio del siglo XX, muchos científicos como Planck y Einstein estudiaron la mecánica cuántica por primera vez para explicar algunos fenómenos que no podía explicar la mecánica clásica, como el efecto fotoeléctrico. Una explicación que Planck propuso es que, según él, la luz no es una onda que se propaga por el espacio, si no una combinación de paquetes discretos de ondas, que tienen cada uno una energía $h\nu$, siendo h la constante de Planck y ν la frecuencia del fotón, como se puede ver en la ecuación (1), donde $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

$$E_{foton} = h\nu = \hbar\omega \quad (1)$$

La emisión de luz en un diodo de tipo LED es directamente relacionada con la estructura de la materia del diodo. Un diodo es un dispositivo electrónico que deja pasar la corriente eléctrica en una dirección solamente, y que bloqua completamente la corriente que circula en la otra dirección. Están hechos de una unión de dos semiconductores dopados, de tipo p y n . Los semiconductores están caracterizados por una estructura en forma de bandas : tienen muchos niveles de energía muy cercanos que se acercan en lo que se parece a bandas. Tienen en particular dos bandas distintas : la banda de *valencia*, llena a temperatura baja, y la banda de *conducción*, en la que los electrones presentes se pueden mover libremente. En la zona de la unión, las cargas del dopado se pueden recombinar y dejar una zona casi libre de portadores de carga libres, lo que se puede usar en muchos campos de la física, como para construir detector de partículas ionizantes. Debido a este efecto, un campo eléctrico "built-in" aparece entre las dos partes de la unión.

Se estudia en este caso un tipo de diodo emisor de luz, un LED. En el caso del LED, si la corriente pasa, los electrones que circulan por el circuito electrónico devuelven energía en forma de luz, que puede tomar valores de longitud de onda muy diferentes, del infrarrojo al ultravioleta. Estos dispositivos se

caracterizan por la *curva característica*, que nos permite representar la intensidad de la luz emitida en función de la tensión aplicada. La expresión matemática de esta curva (por lo menos, de la región de "forward bias" porque en la otra región, se puede considerar que la intensidad es pequeña y constante) se puede ver en la ecuación (2), donde h representa una ausencia de electrón (*hueco*) y k_B es la constante de Boltzmann.

$$I(V) = e(J_h^{gen} + J_e^{gen}) \left(e^{\left(\frac{eV}{k_B T}\right)} - 1 \right) = -I_0 \left(e^{\left(\frac{eV}{k_B T}\right)} - 1 \right) \quad (2)$$

La emisión de luz en un LED se puede describir con diferentes ecuaciones, además de la ecuación de Planck (1). Por ejemplo, se puede usar la definición de la frecuencia, como el ratio entre la velocidad de la luz en el vacío c y la longitud de onda. También existe una relación (3) que nos da la energía de un electrón acelerado por una diferencia de potencial V , conociendo el valor de la carga fundamental del electrón e .

$$E = e \cdot V \quad (3)$$

Con estas ecuaciones, se puede determinar la energía mínima necesaria para que el LED empiece a emitir luz, cuando se supera el umbral de potencial V_{crit} (este umbral existe por la presencia de la barrera de energía debida al campo eléctrico "built-in" de la unión pn). Usando el principio de conservación de la energía, se puede obtener una nueva ecuación (4) relacionando este umbral de potencial con constantes fundamentales y con la longitud de onda que corresponde a la intensidad de luz máxima emitida (λ_{max}).

$$E = e \cdot V_{crit} = h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda_{max}} \quad (4)$$

Esta última ecuación nos va a permitir determinar el valor de la constante de Planck, representando en una gráfica el valor del umbral de tensión con respecto al inverso de λ_{max} , y calculando la pendiente.

2. Desarrollo experimental

Para esta medida, se usa un circuito electrónico muy sencillo, compuesto de una fuente de tensión DC, de un LED y de una resistencia. También se usa un fluorímetro, un equipo de espectrometría que puede medir la intensidad y la longitud de onda de la luz emitida por el LED, por el uso de una red de difracción. Los detalles de funcionamiento de este equipo están en los apuntes de preparación del laboratorio.

La primera parte de la práctica consistía en medir la curva característica de cada LED del grupo, que representa la intensidad de luz emitida con respecto a la tensión eléctrica aplicada al LED. Para esta medida, se aumenta poco a poco la tensión aplicada al LED hasta llegar a un valor máximo que depende de su tipo y de su color de emisión (los LEDs azules necesitan una alimentación mayor para funcionar), para no dañarlo. Después se representa la curva obtenida con KaleidaGraph y se calcula a mano el valor de tensión crítica, a partir de la cuál la intensidad sube mucho con un pequeño cambio de voltaje.

La segunda parte consistía en medir el espectro de emisión del LED considerado, es decir representar la intensidad de emisión en función de la longitud de onda. Para medir este espectro, hay que usar un dispositivo muy perfeccionado para poder aislar la longitud de onda con una precisión que nos permita tirar conclusiones de la medida, pero sin quitar toda la luz y entonces perder mucha información. Esta medida se hace a tensión de LED constante, por supuesto, y a un valor de tensión mayor que la tensión

crítica, para poder observar algo. El rango de longitudes de onda observado depende del color del LED considerado (por ejemplo, en mi caso, el LED tenía un color verde, por eso el rango estudiado empieza en 460nm y llega a 620nm).

Después de haber obtenido el valor de tensión crítica y el valor de λ_{max} , la longitud de onda que corresponde al máximo de emisión, se puede representar en un histograma la tensión crítica de cada LED, con respecto al inverso de esta longitud de onda. Usando la ecuación (4), y calculando la pendiente de la gráfica así obtenida, se puede obtener el valor de la constante de Planck para compararlo con el valor teórico aceptado y muy bien conocido hoy en día. Por fin, se calcula el error asociado a h , conociendo el valor del error sobre los dos parámetros precedentes y propagándolo.

3. Resultados obtenidos

Cada miembro del grupo tenía 2 LEDs que estudiar : un individual (el mío tenía en particular un color verde), y un en común para todo el grupo. Los resultados obtenidos para las curvas características de estos LEDs se representan en el cuadro 1 y 2 y en las figuras 1 y 2.

Voltage (V)	Intensidad de luz (cuentas/s)
0,9	1200
1,6	1500
2,0	1300
2,1	1500
2,2	1000
2,3	1500
2,4	1600
2,5	1500
2,6	1300
2,7	1000
2,8	1500
2,9	2000
3,0	12.000
3,1	50.000
3,2	$1,5 \cdot 10^5$
3,3	$2,7 \cdot 10^5$
3,4	$4,8 \cdot 10^5$

Cuadro 1: Resultados obtenidos para la curva característica del LED común al grupo.

Voltage (V)	Intensidad de luz (cuentas/s)
1,2	1700
1,5	2000
1,8	1500
2,0	2000
2,1	1600
2,2	1500
2,3	2000
2,4	2500
2,5	5000
2,6	10.000
2,7	19.000
2,8	34.000
2,9	51.000
3,0	78.000
3,1	$1,4 \cdot 10^5$

Cuadro 2: Resultados obtenidos para la curva característica de mi LED individual.

Después, se midió el espectro asociado a cada uno de estos LED (la relación que existe entre la intensidad de la luz y la longitud de onda emitida). Los resultados se presentan en las figuras 3 y 4.

Con las medidas de todos los LEDs del grupo, hemos podido representar en una gráfica el valor de la tensión crítica en función de la longitud de onda de emisión máxima de cada LED. Este resultado se enseña en la figura 5.

La pendiente de este histograma vale en este caso 1222,9 y con este valor, se puede calcular el valor de la constante de Planck con la ecuación (4). El resultado obtenido es el siguiente :

$$h = 1222,9 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^8} \cdot 10^{-9} = 6,52 \cdot 10^{-34} J \cdot s \quad (5)$$

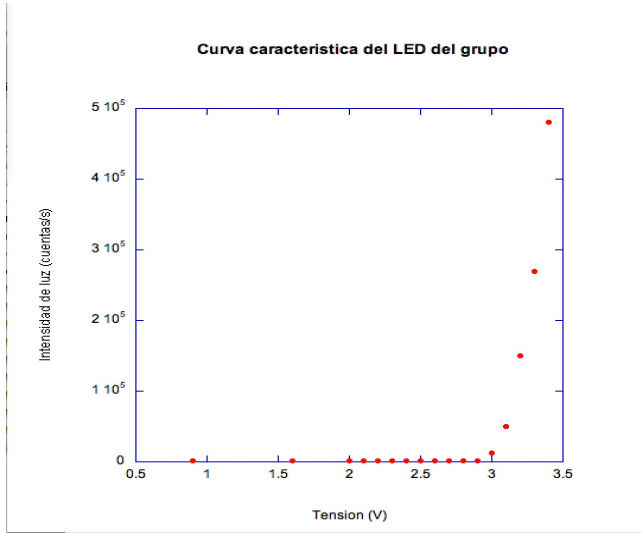


Figura 1: Curva característica del LED del grupo.

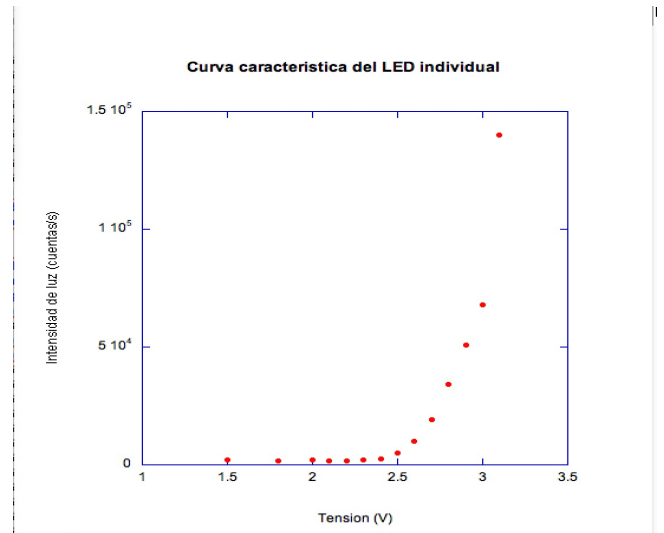


Figura 2: Curva característica de mi LED individual.

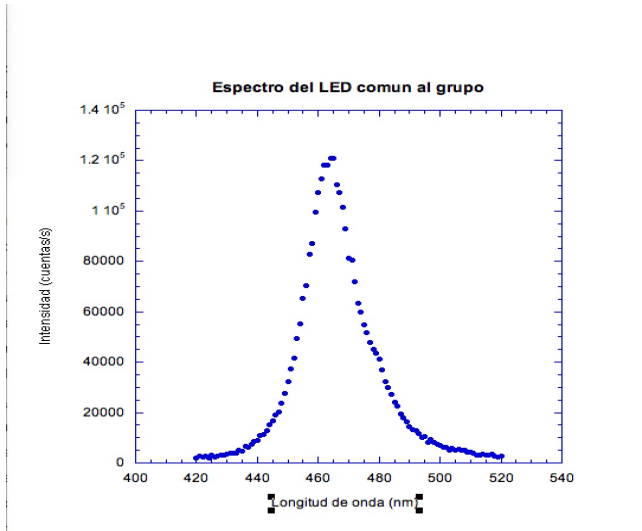


Figura 3: Espectro del LED del grupo.

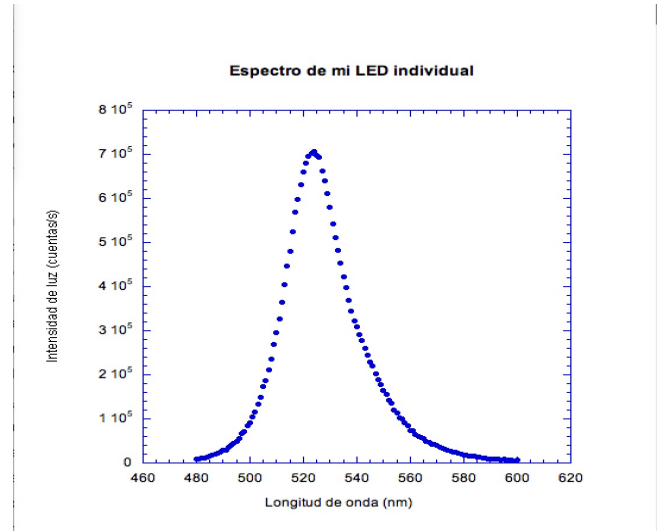


Figura 4: Espectro de mi LED individual.

Para comparar este resultado con el valor teórico, hay que calcular el error asociado a nuestro valor experimental. El error sobre la tensión crítica se estima por el proceso de determinación de su valor, que se ha hecho a mano. En el caso del LED del grupo, se puede ver que la tensión crítica vale $(3,0 \pm 0,1)$ (este resultado ha sido obtenido poniendo una recta tangente a la curva a mano, y calculando su intersección con el eje x).

El error sobre el valor de la longitud de onda de emisión máxima se estima como siendo igual al FWHM (Full Width at Half Maximum) de la curva obtenida en las figuras 3 y 4. En el caso del LED del grupo por ejemplo, la intensidad máximo es $1,0287 \cdot 10^5$ cps, y corresponde a una longitud de onda de 465nm. Entonces, el FWHM vale 19nm. Este error se puede propagar al valor del inverso de esta longitud de onda usando la formula de los apuntes de preparación del laboratorio (6). En este caso, el error a considerar en el cálculo de h vale entonces $9 \cdot 10^{-5}$.

$$\Delta \left(\frac{1}{\lambda} \right) = \frac{\Delta \lambda}{\lambda^2} \quad (6)$$

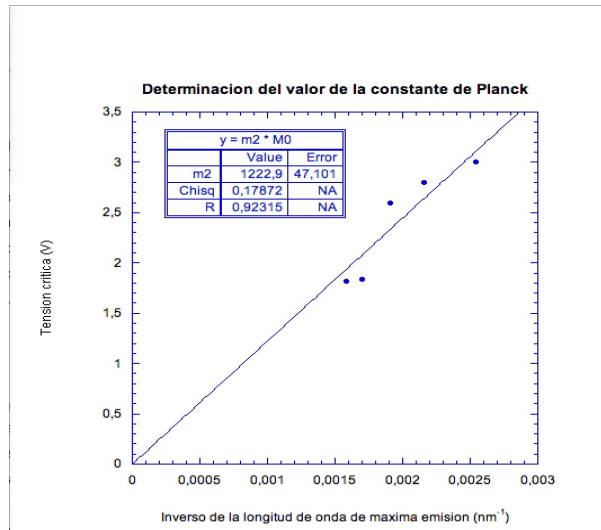


Figura 5: Determinación del valor de la constante de Planck.

Por fin, se pueden propagar los dos errores precedentes al valor de la constante de Planck con la formula usual, para todos los LEDs. El error relativo así obtenido en la pendiente vale 0,05. El valor experimental final de la constante de Planck vale entonces $(6,52 \cdot 10^{-34} \pm 0,3 \cdot 10^{-34})$, lo que corresponde perfectamente con el valor teórico de $6,62 \cdot 10^{-34} J \cdot s$.

4. Cuestiones

La mayoría de las cuestiones han sido discutidos a lo largo del informe.

4.1. Cuestión 6

El cálculo del error asociado a la constante de Planck ha sido hecho en este informe, conociendo el error asociado a la medida de la longitud de onda y a la tensión crítica. Con este error, el valor teórico y el valor experimental de h se parecen bastante y son compatibles. Para disminuir los incertidumbres asociados a nuestra medida, se podrían mejorar muchos aspectos del experimento. Por ejemplo, para representar el espectro, hemos usado un tiempo de medida muy corto para cada punto. Para tener mejores resultados, se podría aumentar este tiempo de medida (porque entonces, se puede además cerrar un poco más las rendijas, lo que permite seleccionar una única longitud de onda con más precisión). El error sobre el valor de la tensión crítica se podría mejorar calculándola con un regresión sobre los datos experimentales, y no únicamente a mano como lo hemos hecho nosotros. Lo mismo vale para la determinación de la longitud de onda de emisión máxima : le mejor sería hacer una regresión de nuestros datos experimentales usando una función conocida para determinar el máximo de la curva, sin hacerlo a mano.

Se puede estudiar el impacto de la manera de determinación de la tensión crítica sobre el resultado final obtenido. Hasta ahora, se hacía a mano, usando una recta tangente a la parte de la derecha, y calculando el intersección de esta tangente con el eje x. Una manera mejor de hacerlo sería haciendo una regresión de la curva obtenida con su ecuación teórica (2) para la región de "forward bias", y considerando la intensidad como constante (más o menos 2000 cuentas por segundos) para la región de reverse bias". El fit de tipo exponencial sobre la zona a alta tensión con Kaleidagraph nos da la expresión (7) y la figura 6.

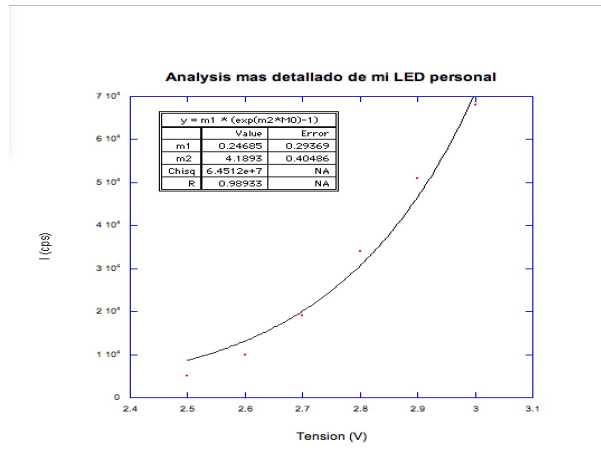


Figura 6: Analysis más detalle de mi LED personal.

$$I(V) = 0,24 \cdot (e^{4,18V} - 1) \simeq 0,24 \cdot (e^{4,18V}) \simeq 2000 \quad (7)$$

Igualando la expresión de las dos zonas (en la zona de baja tensión, suponemos un valor de intensidad constante de 2000 cps), nos sale que $V_{crit} = 2,09V$ y no 2,50V (valor obtenido usando el otro método, menos preciso). En la figura 5, se puede ver que el tercer punto (que corresponde a mi LED) quedaría probablemente mejor con este valor de tensión crítica. Para mejorar el valor final de la constante de Planck, habría que repetir este proceso con todos los puntos experimentales.

4.2. Cuestión 7

En el caso de usar un átomo aislado y no un LED, la principal diferencia en el espectro de emisión es que no tendríamos un único pico, con un máximo a una longitud de onda fija. Lo que tendríamos serían muchas diferentes líneas de emisión, que corresponden a todos los cambios de niveles de energía posibles dentro del átomo considerado. Una otra diferencia es que el diodo LED está hecho de semiconductores, y entonces emite luz en una banda mucha más ancha que en el caso del átomo aislado.

4.3. Cuestión 8

Los principios de conservación generales de la física se aplican en este caso también : por ejemplo, la energía y el momento total tienen que ser conservados durante el proceso de emisión de luz del LED. Un semiconductor puede emitir luz solamente si es de tipo *directo*, lo que significa que el mínimo de energía de su banda de conducción tiene que tener el mismo valor de momento \vec{k} que el máximo de energía de su banda de valencia. Esto se puede explicar por la ley de conservación del momento y porque el momento de un fotón visible es muy pequeño con respecto al momento del cristal.

4.4. Cuestión 9

Esta pregunta ha sido discutida un poco en la introducción teórica del informe. Sin impurezas, el diodo no podría emitir luz. Es la existencia de la union entre un semiconductor de tipo *p* (con impurezas que tienen menos electrones que el material considerado) y de otro semiconductor de tipo *n* que permite el proceso de creación de luz. Los portadores libres se pueden recombinar entonces en la zona de la unión, lo que deja una zona de "vacío", sin portadores de carga libres. Este proceso crea también un campo eléctrico "built-in", que aparece como una barrera de potencial entre las dos

zonas del semiconductor. Si un electrón tiene una energía suficiente para superar este potencial (con el ayuda de una tensión externa por ejemplo), entonces se puede producir una recombinación entre este electrón y un hueco que proviene del dopado p . Este proceso permite la aparición de luz en forma de fotones.

5. Conclusión

Esta práctica nos ha permitido entender un poco más lo que es un semiconductor, y el principio de funcionamiento de los diodos (en particular, de los diodos emisores de luz de tipo LED), así que de todas las ecuaciones asociadas. La práctica consistía primero en medir la curva característica (intensidad en función del voltaje aplicado) de un LED en común con todo el grupo, y de cada uno su LED individual. Después, en la segunda parte, medimos el espectro de emisión de los LED para determinar el valor de la longitud de onda de máxima emisión en cada caso.

Con todos estos valores así obtenidos, pudimos crear una gráfica de la tensión crítica en función del inverso de la longitud de onda de máxima emisión. Usando la ecuación (4) y calculando la pendiente de la recta así obtenida, hemos podido medir experimentalmente el valor de la constante de Planck $h = (6,52 \cdot 10^{-34} \pm 0,3 \cdot 10^{-34})$, valor que queda perfectamente bien con el valor teórico de $6,62 \cdot 10^{-34}$.