



# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE FÍSICA "LUIS RIVERA TERRAZAS"

**"EFECTOS DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN  
UNIAxIAL EN LEDS COMERCIALES"**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS  
(FÍSICA)**

PRESENTA:

**ROCÍO GARCÍA PUENTE**

ASESOR(ES):

**DR. ELÍAS LÓPEZ CRUZ**

**ENERO DE 2017**



## Resumen

En este trabajo se estudian dos tipos de semiconductores, ALGaInP y GaAs; el primero de ellos utilizado en la fabricación de LEDs de alto brillo en las longitudes de onda que van desde los 560 hasta 660 nm, y el segundo en LEDs que emiten en el infrarrojo (930 nm). El objetivo es variar dos parámetros externos (presión uniaxial y temperatura) en los LEDs mencionados anteriormente, y obtener una relación para  $E_g(P)$  y  $E_g(T)$  por medio de la luminiscencia emitida. Las mediciones de temperatura son de 77 a 343 K. Y las de presión uniaxial van de 0 a 1000GPa.



## ÍNDICE GENERAL

<i>Introduccion</i> . . . . .	XII
<i>1.. Perturbaciones externas en semiconductores</i> . . . . .	1
1.1. Efectos de la temperatura en la banda prohibida . . . . .	1
1.2. Efectos de la presión en la banda prohibida . . . . .	3
<i>2.. Procedimiento experimental</i> . . . . .	9
2.1. Mediciones de la variación de temperatura . . . . .	9
2.2. Mediciones de la variación de presión . . . . .	10
<i>3.. Resultados experimentales</i> . . . . .	15
3.1. Efectos de la temperatura en AlGaInP y GaAs . . . . .	15
3.1.1. LED Ámbar . . . . .	15
3.1.2. LED Rojo . . . . .	17
3.1.3. LED Infrarrojo . . . . .	20
3.2. Efectos de la presión uniaxial en AlGaInP . . . . .	21
3.2.1. LED Ámbar . . . . .	22
3.2.2. LED Rojo . . . . .	25
<i>4.. Análisis y discusión</i> . . . . .	29

<i>Conclusiones</i> . . . . .	34
<i>Apéndice</i>	35
<i>A.. Ajuste numérico: Temperatura</i> . . . . .	37
<i>B.. Ajuste numérico: Presión uniaxial</i> . . . . .	41
<i>Agradecimientos</i> . . . . .	45
<i>Bibliografía</i> . . . . .	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. InAs, InP y GaAs: Temperatura vs. <i>bandgap</i> . . . . .	3
1.2. Germanio: Dependencia del gap con la presión hidrostática. . . . .	5
1.3. GaTe: gap vs. presión. . . . .	6
1.4. Presión uniaxial. . . . .	8
1.5. GaAs: Banda de energía prohibida vs presión uniaxial. . . . .	8
2.1. Mediciones de temperatura. . . . .	10
2.2. Ensamblaje experimental: presión. . . . .	11
2.3. Medición de la presión. . . . .	12
2.4. Presión uniaxial: circuito implementado. . . . .	13
3.1. Espectro de emisión del LED Ámbar a tres diferentes temperaturas. . . . .	16
3.2. Ajuste de datos a la ecuación de Varshni para LED Ámbar. . . . .	17
3.3. Espectro de emisión del LED Rojo a tres diferentes temperaturas. . . . .	19
3.4. Ajuste de datos a la ecuación de Varshni para LED Rojo. . . . .	19
3.5. Espectro de emisión del LED Infrarrojo a tres diferentes temperaturas. . . . .	20
3.6. Ajuste de datos a la ecuación de Varshni para LED Infrarrojo. . . . .	21
3.7. Espectro de emisión de LED Ámbar a tres distintas presiones. . . . .	22
3.8. Ajuste de datos: LED Ámbar. . . . .	24

3.9. Espectro de emisión de LED Rojo a tres distintas presiones. . . . .	26
3.10. Ajuste de datos: LED Rojo. . . . .	27

## ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Valores de los parámetros en la ecuación 1.1. . . . .	2
3.1. Medición de la temperatura: LED Ámbar . . . . .	16
3.2. Medición de la temperatura: LED Rojo . . . . .	18
3.3. Medición de la temperatura: LED Infrarrojo . . . . .	20
3.4. Datos experimentales para LED Ámbar bajo presión. . . . .	23
3.5. Datos experimentales para LED Rojo bajo presión. . . . .	25



## INTRODUCCIÓN

Existen diversos factores que pueden alterar las propiedades ópticas y electrónicas de un material semiconductor, por ejemplo la introducción de impurezas, la variación en la composición de aleaciones, y la aplicación de perturbaciones externas, como la presión o la temperatura. Cuando se construyen dispositivos semiconductores, existen distorsiones propias de su estructura cristalina, y por lo tanto pueden aparecer tensiones uniaxiales internas, o biaxiales en superficies; esto puede ocurrir debido a deformaciones creadas dentro del material durante el crecimiento, y esto tiene un efecto en las propiedades electrónicas. De modo que esto es también de interés tecnológico, pues es útil para la calidad, construcción y el funcionamiento de dispositivos. Las tensiones biaxiales aparecen cuando se requieren películas de alta calidad que son crecidas en algún sustrato, ya que debido a las diferencias en la expansión térmica entre el sustrato y las películas, aparecen tensiones que son muy difíciles de medir experimentalmente en forma directa.

Uno de los dispositivos semiconductores de uso ampliamente difundido es el LED. El LED (de la sigla inglesa LED: Light-Emitting Diode: "diodo emisor de luz") es un diodo semiconductor que emite luz. Se usan como indicadores en muchos dispositivos, y cada vez con mucha más frecuencia, en iluminación. Los primeros LEDs emitían luz de baja intensidad, pero los dispositivos actuales emiten luz de alto brillo (como dos de los LEDs utilizados en este trabajo) en el espectro infrarrojo, visible y ultravioleta.

En este trabajo se aplicaron perturbaciones externas a tres diferentes LEDs, dos de alto brillo (AlGaInP): uno que emite en Rojo (629 nm) y otro que emite en Ámbar (592 nm); y uno común -que emite en el infrarrojo (933 nm) (GaAs). Estas perturbaciones externas fueron por una parte variaciones en la temperatura (de 77 a 343 K), y por otra, un aumento en la presión uniaxial a lo largo de la dirección de las capas (de 0 a 1000 KPa), las cuales se realizaron a temperatura ambiente. Al someter los LEDs a estas variaciones modificaron su espectro de emisión, mismo que fue capturado con un espectrómetro. Posteriormente haciendo uso de la conocida relación de energía y frecuencia  $E = h\nu$ , se obtuvo la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción (gap). De este modo se obtuvieron los datos que relacionan la temperatura con el gap y la presión con el gap.

Para la temperatura se utilizó la ecuación de Varshni, que es una ecuación empírica que ha demostrado ser la que mejor describe el comportamiento del gap al variar la temperatura ( $E_g(T)$ ). Y para la variación de la presión ( $E_g(P)$ ), se vió que un término cuadrático sería el mejor ajuste.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera: En el primer capítulo se abordan brevemente los aspectos teóricos de los materiales semiconductores con los que se construyen los LEDs, se detallan las características de los LEDs y su funcionamiento.

En el Capítulo 2 se presentan los aspectos conocidos, tanto teóricos, como experimentales, de los efectos que causan en la banda prohibida de los semiconductores, las perturbaciones externas tales como la temperatura, la presión hidrostática y uniaxial. Se mencionan ejemplos concretos de trabajos experimentales.

En el Capítulo 3 se describe el procedimiento experimental que se siguió. Se detallan

todas las piezas que formaron parte, así como la forma en la que se realizaron las medidas.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos en las mediciones. Se muestra además el ajuste de datos que se realizó en cada caso. El capítulo 5 está dedicado al análisis y discusión sobre los resultados obtenidos, mismo capítulo en el cual también se llega a las conclusiones finales.



# 1. PERTURBACIONES EXTERNAS EN SEMICONDUCTORES

Existen diversos factores externos que pueden modificar las propiedades de un semiconductor, como la presión, la temperatura y los campos eléctricos o magnéticos. En este capítulo se presentan los efectos causados por la presión y la temperatura, que son de interés en este trabajo.

## 1.1. Efectos de la temperatura en la banda prohibida

Conforme la temperatura de un semiconductor se incrementa, el parámetro de red se expande, y las oscilaciones de los átomos alrededor de sus puntos de equilibrio aumentan. La dilatación de la red lleva a un cambio de la energía de la banda prohibida (*gap*). El incremento del movimiento de los átomos ensancha los niveles de energía.

También existe una interacción electrón-red, la cual depende fuertemente de la temperatura. A temperaturas mucho menores que la temperatura de Debye, el gap varía con el cuadrado de la temperatura; mientras que para temperaturas muy por encima de la temperatura de Debye, el gap varía linealmente. La dependencia de la temperatura con el gap para muchos semiconductores, ha sido ajustada por la siguiente relación empírica (ecuación de Varshni):

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (1.1)$$

Sustancia	Tipo de gap	$E_g(0)$ [eV]	$\alpha$ ( $\times 10^{-4}$ ) [eV/K]	$\beta$ [K]
Diamante	$E_{gi}$	5.4125	-1.979	-1437
Si	$E_{gi}$	1.1557	7.021	1108
Ge	$E_{gi}$	0.7412	4.561	210
Ge	$E_{gd}$	0.8893	6.842	398
6HSiC	$E_{gi}$	3.024	-0.3055	-311
GaAs	$E_{gd}$	1.5216	8.871	572
InP	$E_{gd}$	1.4206	4.906	327
InAs	$E_{gd}$	0.426	3.158	93

Tab. 1.1: Valores de los parámetros en la ecuación 1.1.

donde  $E_g(0)$  es el valor del gap a 0°K y  $\alpha$  (con unidades de  $eV/K$ ) y  $\beta$  (con unidades de temperatura [K]) son constantes. En este trabajo los ajustes numéricos se realizarán con base a este modelo. En la Tabla 1.1 pueden verse los valores de algunos resultados para varios semiconductores obtenidos de [9] ( $E_{gi}$  = gap indirecto y  $E_{gd}$  = gap directo).

En la Fig. 1.1 se muestra las curvas que algunos autores [9] han obtenido a partir de la ecuación 1.1, comparadas con los puntos experimentales que se muestran. En este mismo artículo citado anteriormente, se pone en evidencia que en varios casos el parámetro  $\beta$  mantiene una correlación con la temperatura de Debye, pero en algunos casos  $\beta$  resulta negativo [10].

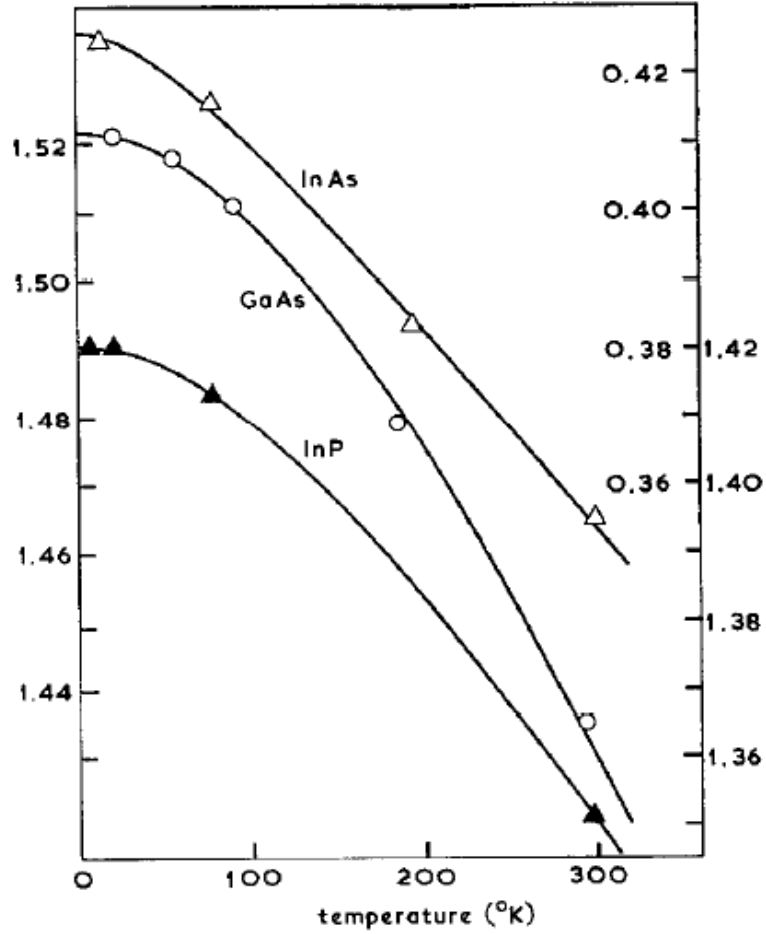


Fig. 1.1: Curvas obtenidas a partir de la ecuación 1.1 comparadas con los puntos experimentales

[9] para los materiales: GaAs, InAs e InP. Los valores para GaAs son  $E_g(0) = 1.5216$ ,  $\alpha = 8.871 \times 10^{-4}$  y  $\beta = 572$ .

### 1.2. Efectos de la presión en la banda prohibida

La presión que se ejerce sobre un semiconductor puede ser hidrostática, biaxial o uniaxial. Se empezará con una breve introducción de lo que se conoce sobre la presión hidrostática, para luego continuar con la presión uniaxial que es lo que nos ocupa en este trabajo.

La presión hidrostática desplaza a los átomos a posiciones más cercanas. Una pequeña separación atómica (mayor presión), resultará en un gap más grande (sin embargo, en algunos materiales como Te y PbSe, el gap disminuye con el incremento de la presión). Para pequeños cambios en el parámetro de red  $\Delta a$ , puede suponerse que la energía  $E$  de un nivel varía linealmente con  $\Delta a$ :

$$E = E_0 + E_1 \Delta a, \quad (1.2)$$

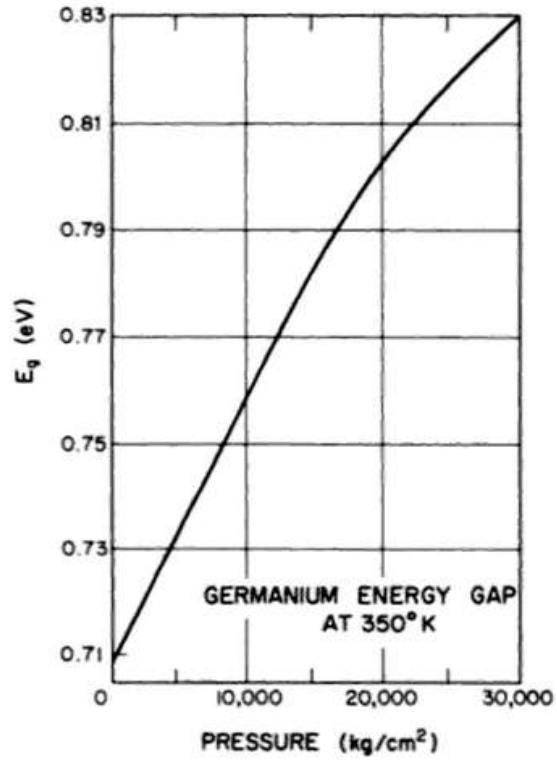
donde  $E_0$  es la energía del nivel considerado a presión cero, y  $E_1$  es un coeficiente.  $E_1$  en general será diferente para diferentes niveles. Por lo tanto, la dependencia del gap respecto a la presión será:

$$\Delta E_g = (E_{1c} + E_{1v}) \Delta a, \quad (1.3)$$

Donde  $E_{1c}$  y  $E_{1v}$  son los coeficientes de presión para los bordes de las bandas de conducción y de valencia respectivamente. La relación lineal es válida para pequeñas deformaciones en la constante de red, es decir, para presiones suficientemente pequeñas, y una forma cuadrática en la presión es con frecuencia la que mejor se ajusta al comportamiento del *gap* para presiones mayores. La dependencia de la presión con el gap para el germanio [11] se muestra en la Fig. 1.2.

Otro ejemplo de comportamiento cuadrático es el que se reporta en los resultados experimentales de Goñi et al [12] para el GaAs:  $E_g(P) = 1.43 \pm 0.01 + [(10.8 \pm 0.3) \times 10^{-2}]P - [(14 \pm 2) \times 10^{-4}]P^2$  eV, la presión está en GPa y los coeficientes están en  $eV/GPa$  y  $eV/(GPa)^2$  respectivamente.

Un ejemplo final lo tenemos con el GaTe [13] en la Fig. 1.3.



*Fig. 1.2:* Dependencia del gap con la presión hidrostática para el germanio: a presiones bajas muestra un comportamiento lineal, no siendo así para altas presiones [11].

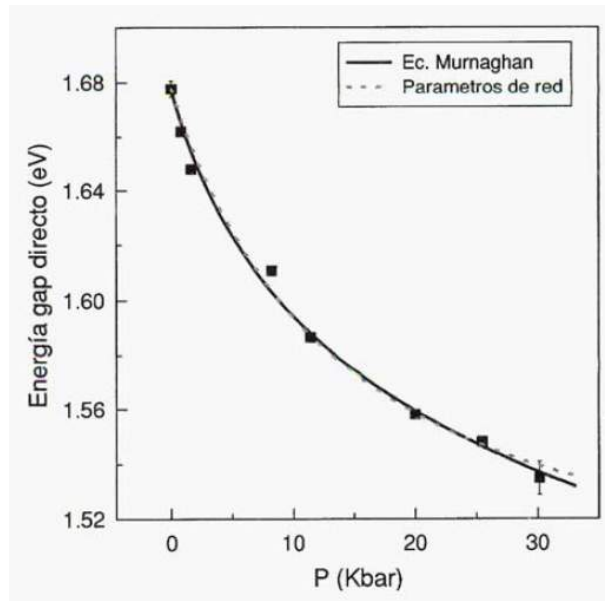


Fig. 1.3: Energía del gap directo del GaTe a temperatura ambiente respecto a la presión. La línea continua indica el ajuste con una ecuación tipo Murnaghan. La línea discontinua corresponde al ajuste de la dependencia del gap directo con la presión que se obtiene cuando se conoce la variación de los parámetros de red con la presión [13].

### *Efectos de la presión uniaxial en la banda prohibida*

Cuando se construyen dispositivos semiconductores existe algo de distorsión inherente a su estructura, esto puede ser producto de las deformaciones creadas dentro del material durante el crecimiento del mismo, y esto es de interés debido a su efecto en las propiedades electrónicas. En los casos de crecimientos de películas con tensión se puede suponer que las tensiones que resultan del desajuste de las redes con el sustrato, alteran la estructura de las bandas de películas delgadas como si fueran tensiones externas que afectan la estructura de bandas.

La aplicación externa de presión uniaxial sobre semiconductores debe producir también

un cambio en la banda de energía prohibida. Lo que diferencia a la presión uniaxial de la hidrostática, es que en este caso la perturbación no se aplica en todas las direcciones cristalográficas, y por lo tanto la deformación resulta más marcada, así que para poder suponer que el gap varía de forma lineal con la presión, las presiones aplicadas deben ser inferiores a las del caso hidrostático. Además de las investigaciones experimentales en esta área, también se encuentran modelos numéricos para entender los efectos de las presiones uniaxiales sobre semiconductores [14], que si bien son completamente ajenos al objetivo de este trabajo, se mencionan porque esto conduce a comprender mejor los efectos causados por las presiones uniaxiales sobre los materiales semiconductores.

Las tensiones uniaxiales cambian la distribución de la densidad de estados por una cantidad que es diferente en las distintas direcciones cristalográficas. En la Fig. 1.4 se ilustra la compresión de un cristal de silicio a lo largo del eje [100], ésta implica una disminución en el *gap* en la dirección de la compresión, pero debido a la dilatación simultánea en direcciones transversales, los valles de la banda de conducción tienden a desplazarse a energías más altas [3]. La redistribución de los estados, provoca un reordenamiento de los electrones que caen a los estados de baja energía disponibles por la tensión.

Finalmente un ejemplo de resultados experimentales para semiconductores sometidos a presión uniaxial, tenemos al GaAs [15].

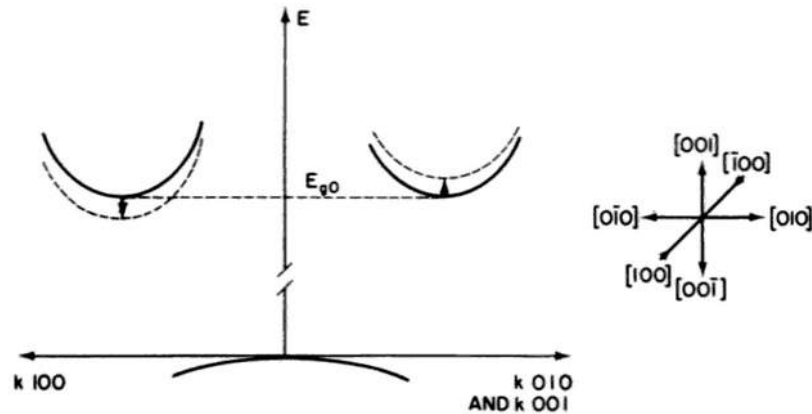


Fig. 1.4: Cambios longitudinales y transversales en la posición de los mínimos en la banda de conducción para el silicio cuando se somete a una presión uniaxial en la dirección  $[100]$ . Imagen obtenida de [3].

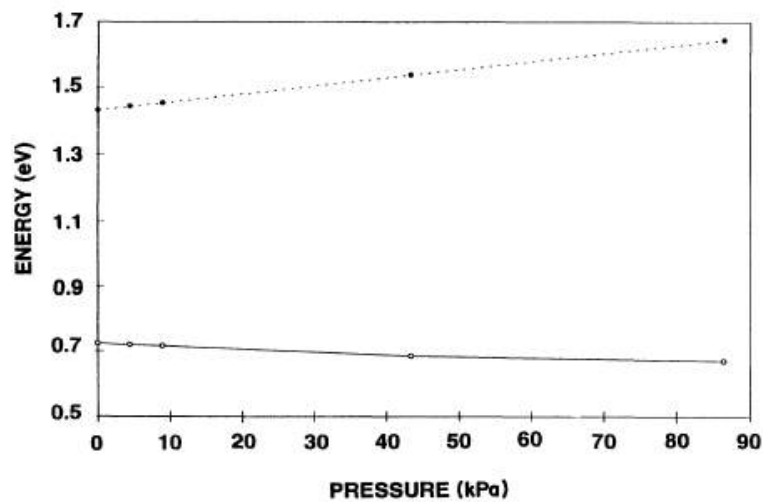


Fig. 1.5: Banda de energía prohibida vs presión uniaxial en la dirección  $[100]$  para el GaAs. La línea punteada corresponde a la dependencia con la presión para el gap de un volumen de GaAs, mientras que la línea sólida corresponde a la dependencia con la presión para el gap ideal de la superficie (001) [15].

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las muestras utilizadas fueron un LED Rojo (AlGaInP, 629 nm) y un LED Ámbar (AlGaInP, 592 nm), para someterlos a cambios de presión y temperatura, y uno Infrarrojo (GaAs, 933 nm) para someterlo a cambios de temperatura<sup>1</sup>.

### 2.1. Mediciones de la variación de temperatura

Para la medición de la variación del *gap* con la temperatura, se utilizó un termopar tipo K (con una precisión de 1 K). Dentro de un termo común se adhirieron los LEDs (Rojo, Ámbar e Infrarrojo) en el fondo. Se vertió nitrógeno líquido para bajar su temperatura hasta los 77 K. Después se hicieron mediciones con el espectrómetro de Ocean Optics en tanto los LEDs volvían a la temperatura ambiente, una vez tomado ese dato, se vertió agua caliente para elevarla a 343 K. Como la temperatura no podía ser controlada con la mejor precisión, los datos no están distribuidos uniformemente como se desearía. Sus valores se pueden encontrar en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 del siguiente capítulo. Una imagen ilustrativa de la implementación se muestra en la Fig. 2.1.

---

<sup>1</sup> En los comentarios finales del siguiente capítulo se mencionan más detalles acerca de las muestras.

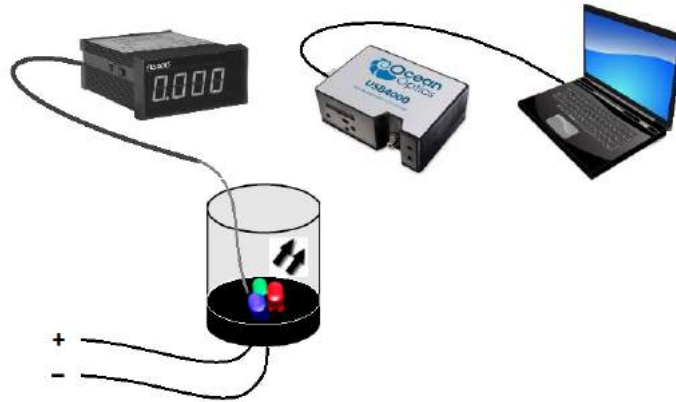
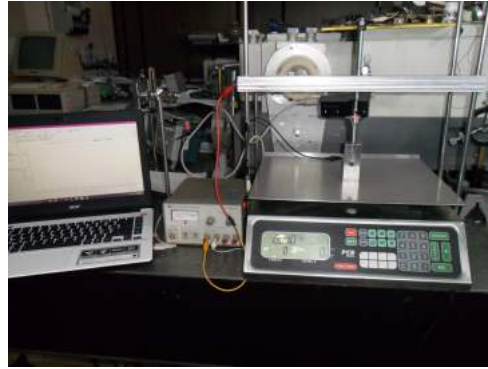


Fig. 2.1: Mediciones de temperatura: Se colocaron los LEDs en el fondo de un termo. La temperatura se midió con un termopar, y los cambios en la longitud de onda fueron obtenidos por el espectrómetro [16].

## 2.2. Mediciones de la variación de presión

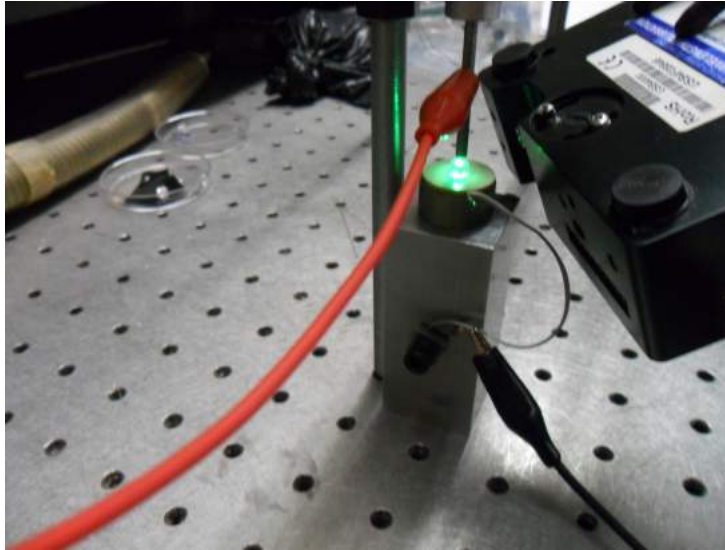
Para someter los LEDs a presión uniaxial, se fabricó una estructura metálica rectangular sujeta a la mesa de trabajo por medio de soportes, en medio de esta barra metálica se dejó un orificio. En un primer intento, por ese orificio se dejó pasar un tornillo al cual se le adhirió una terminación en punta fina; esta construcción servía para ejercer fuerza por medio de la compresión de un resorte que estaba debajo de la muestra, como puede verse en la Fig. 2.2, bajo dicha estructura se colocó una báscula comercial (cuya precisión es de 0.005 kg) para medir las masas (kg) que por la gravedad ejercerían la fuerza (N) sobre el área del semiconductor, para así obtener la presión (MPa) sobre el semiconductor (de 0.25 mm de largo). El resorte permitía controlar la presión ejercida sobre el LED, así se hicieron muchas de las primeras pruebas, sin embargo a bajas presiones no se podía dis-

tinguir un corrimiento en la longitud de onda, pero al aumentar la fuerza con este sistema para ejercer presión, los LEDs se dañaban, por lo tanto se optó por utilizar la estructura metálica para colocarle cantidades definidas de masa.



*Fig. 2.2:* Primer ensamblaje experimental para ejercer presión: Las muestras se destruyeron al ejercer una mayor presión de esta manera.

De esta manera, por el orificio de la estructura rectangular se hizo pasar un tubo metálico con terminación inferior en punta fina, y sobre su extremo superior se colocó un disco metálico para soportar las masas, las cuales consistieron en pesas circulares de metal. La muestra se colocó en una pequeña barra metálica como se puede ver en la Fig. 2.3. Dado que no fue posible obtener el semiconductor retirando la resina epoxi para su posterior extracción, se retiró la parte superior de la resina; de este modo, la barra metálica que se encontraba en la parte inferior ( $-$ ), tanto como la parte superior ( $+$ ) que ejercía la presión, formaban parte del circuito por el que circulaba la corriente ( $20 \pm 0.1$  mA) como puede verse se la Fig 2.4. La fuente de alimentación fue CD HP 6234A DUAL OUTPUT POWER SUPPLY. Y los datos se tomaron con el espectrómetro de Ocean Optics USB4000 y el Software SpectraSuite. Las mediciones de la presión se hicieron a una temperatura de



*Fig. 2.3:* Medición de la presión: Se colocaron masas sobre el tubo metálico con terminación en punta fina, el cual sostenía las pesas que ejercieron la presión sobre el material semiconductor.

300 K.

Se combinaron las distintas masas de las pesas circulares para formar 15 datos de presión. Las masas de las pesas son: 505g, 515g, 520g, 1025g, 2100g, y 2075g. La masa del disco superior que era el soporte de las pesas es de 315g. Los 15 datos, en masa, varían desde 0.315 hasta  $7.570 \pm 0.005$  kg, y en presión desde 49.4 hasta  $1187.0 \pm 0.5$  MPa. Estos datos pueden verse con mayor detalle en la Tabla 3.4 del siguiente capítulo.

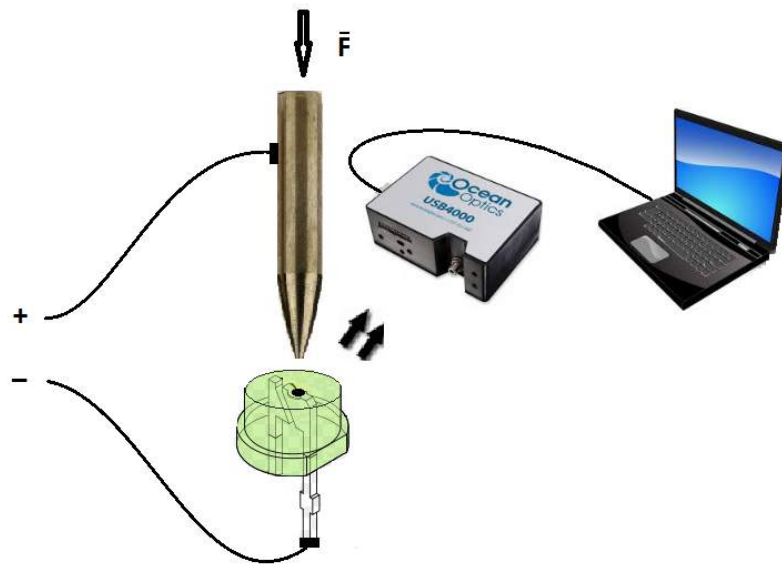


Fig. 2.4: Diseño del circuito implementado para ejercer presión sobre el LED [17].



### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.1. Efectos de la temperatura en AlGaInP y GaAs

##### 3.1.1. LED Ámbar

En estas secciones se muestran los resultados obtenidos en la medición, la información obtenida a partir de ésta, y el ajuste realizado para la variación del *gap* respecto a la temperatura. En la Tabla 3.1 se muestran los datos reportados por el espectrómetro al variar la temperatura del LED Ámbar (AlGaInP, 5920 Å), desde los 77 hasta los 343 Kelvin.

En la Fig. 3.1 se puede observar cómo varía el espectro de emisión a tres diferentes temperaturas: al aumentar la temperatura, éste se recorre hacia la derecha (donde disminuye el *gap*).

##### *Parámetros obtenidos del ajuste numérico*

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, en esta sección se presentan los ajustes haciendo uso de la ecuación empírica de Varshni:

$$E_g(T) = E_0 - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}. \quad (3.1)$$

Temperatura $\pm 0.5$ [K]	Longitud de onda $\pm 0.1$ [Å]	Energía $\pm 0.00004$ [eV]
77	5681.6	2.18372
233	5803.5	2.13784
267	5846.0	2.12231
281	5886.5	2.10770
292	5894.6	2.10481
301	5910.7	2.09907
309	5928.9	2.09263
318	5937.0	2.08978
331	5967.2	2.07919
343	5977.3	2.07569

Tab. 3.1: Medición de temperatura: LED Ámbar. Se muestra la variación de la longitud de onda y energía al variar la temperatura.

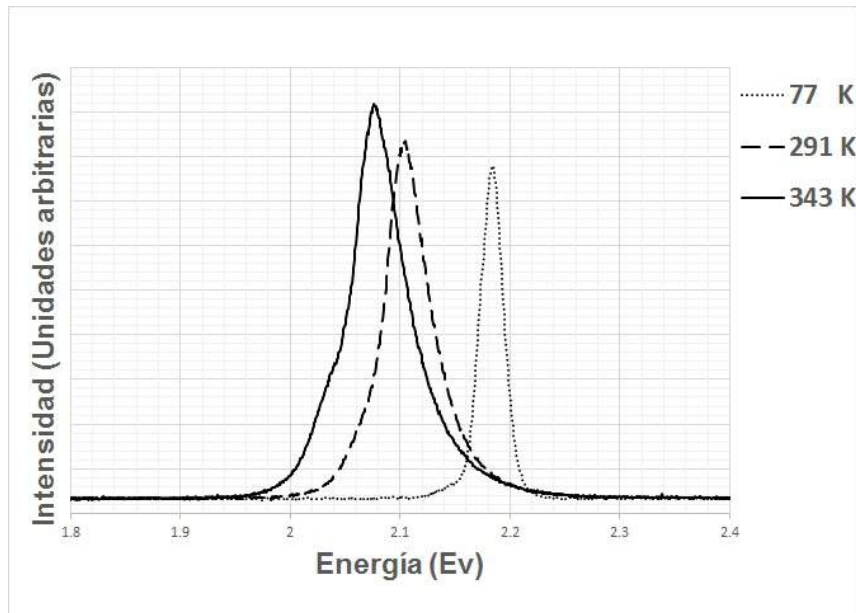


Fig. 3.1: Espectro de emisión del LED Ámbar a tres diferentes temperaturas. Al aumentar la temperatura, éste se recorre hacia la derecha (donde disminuye el *gap*).

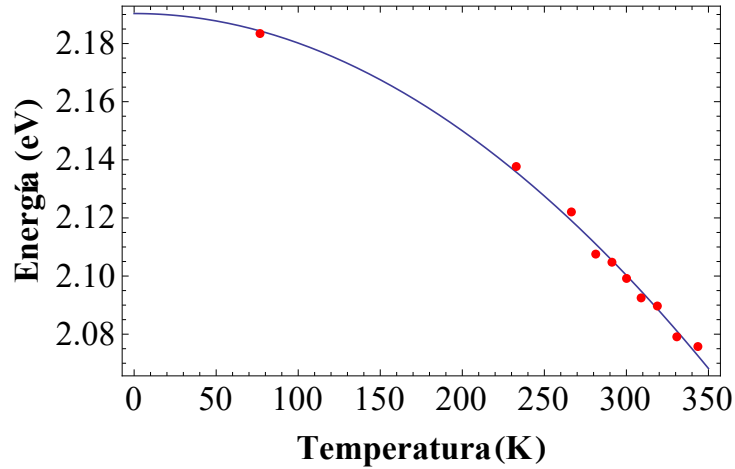


Fig. 3.2: Ajuste de datos a la ecuación de Varshni para LED Ámbar. Los puntos corresponden a los datos, y la línea al ajuste.

Los parámetros obtenidos del ajuste para el material utilizado en la fabricación de LEDs de emisión Ámbar son:  $E_0 = 2.19033$ ,  $\alpha = 0.01296$ ,  $\beta = 12646.3$ .

El ajuste mostró un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.99$ .

De forma que:

$$E_g(T) = 2.1903 - \frac{0.0130T^2}{75242.1 + T}. \quad (3.2)$$

En el apéndice A se muestra el ajuste realizado en *Mathematica Wolfram Research*. En la Fig. 3.2 se puede ver el ajuste realizado en la línea continua, mientras que los puntos pertenecen a los datos observados.

### 3.1.2. LED Rojo

Para el LED Rojo (AlGaInP, 6290 Å), los datos de la variación de la longitud de onda y la variación del *gap* respecto a la temperatura se encuentra en la Tabla 3.2.

Temperatura $\pm 0.5$ [K]	Longitud de onda $\pm 0.1$ [Å]	Energía $\pm 0.00004$ [eV]
77	6020.4	2.06083
198	6112.1	2.02991
268	6218.2	1.99527
282	6278.1	1.97623
291	6284.1	1.97435
300	6304.0	1.96812
309	6324.0	1.96189
318	6341.9	1.95635
334	6341.9	1.95635
346	6365.8	1.94901

Tab. 3.2: Medición de temperatura: LED Rojo. Se muestra la variación de la longitud de onda y energía al variar la temperatura.

En la Fig. 3.3 se puede observar cómo varía el espectro de emisión del LED rojo a tres diferentes temperaturas.

*Parámetros obtenidos del ajuste numérico*

En este caso, los parámetros obtenidos fueron:  $E_0 = 2.07139$ ,  $\alpha = 0.00121$ ,  $\beta = 794.878$ .

El ajuste mostró un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.99$ .

La ecuación por lo tanto toma la forma de:

$$E_g(T) = 2.0714 - \frac{0.001T^2}{1078.6 + T}. \quad (3.3)$$

La gráfica del ajuste se muestra en la Fig. 3.4.

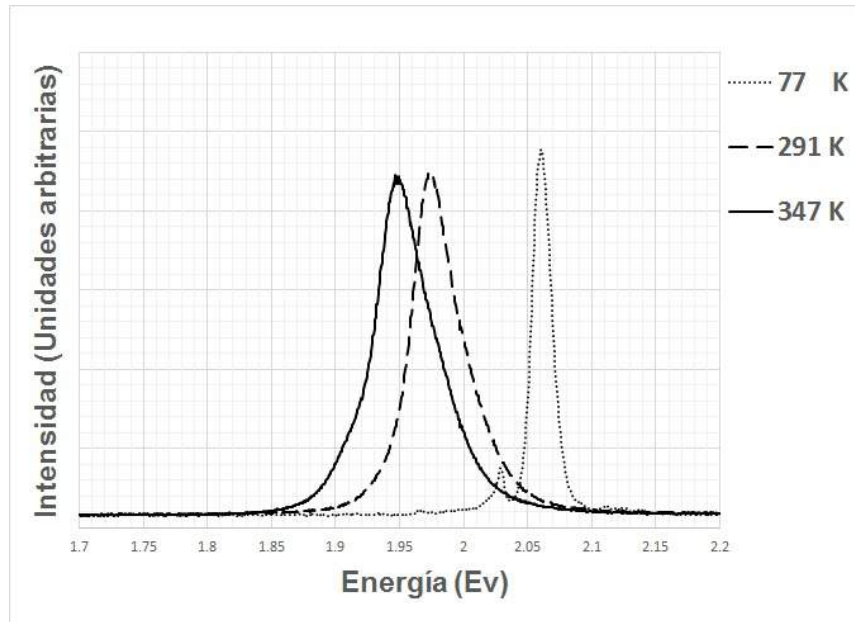


Fig. 3.3: Espectro de emisión del LED Rojo a tres diferentes temperaturas. Al aumentar la temperatura, éste se recorre hacia la derecha (donde disminuye el *gap*).

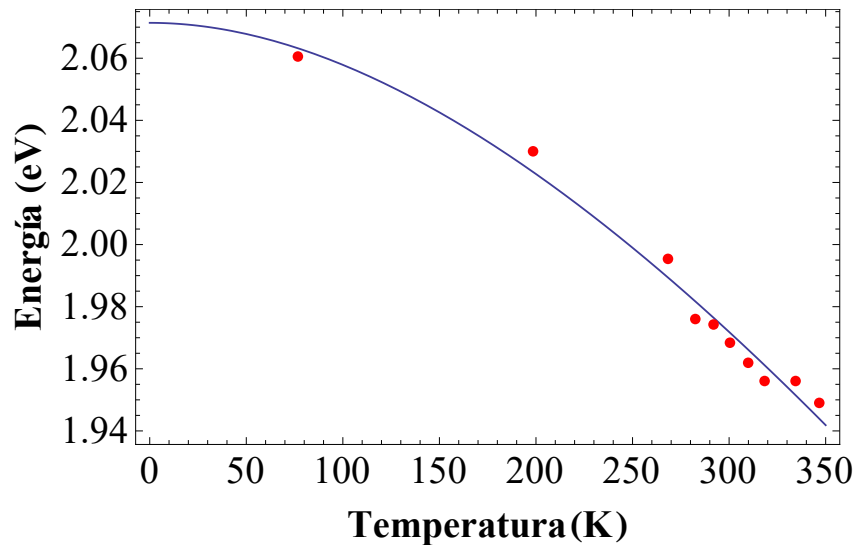


Fig. 3.4: Ajuste de datos a la ecuación de Varshni para LED Rojo. Los puntos corresponden a los datos, y la línea al ajuste.

### 3.1.3. LED Infrarrojo

Los datos para el LED Infrarrojo (GaAs, 9330 Å) se encuentran en la Tabla 3.3.

Temperatura $\pm 0.5$ [K]	Longitud de onda $\pm 0.1$ [Å]	Energía $\pm 0.00001$ [eV]
77	8976.9	1.38210
240	9174.2	1.35238
281	9322.3	1.33089
288	9329.3	1.32990
301	9334.5	1.32916
309	9346.6	1.32744
318	9376.1	1.32326
329	9393.3	1.32084
343	9400.3	1.31985

Tab. 3.3: Medición de temperatura: LED Infrarrojo. Se muestra la variación de la longitud de onda y energía al variar la temperatura.

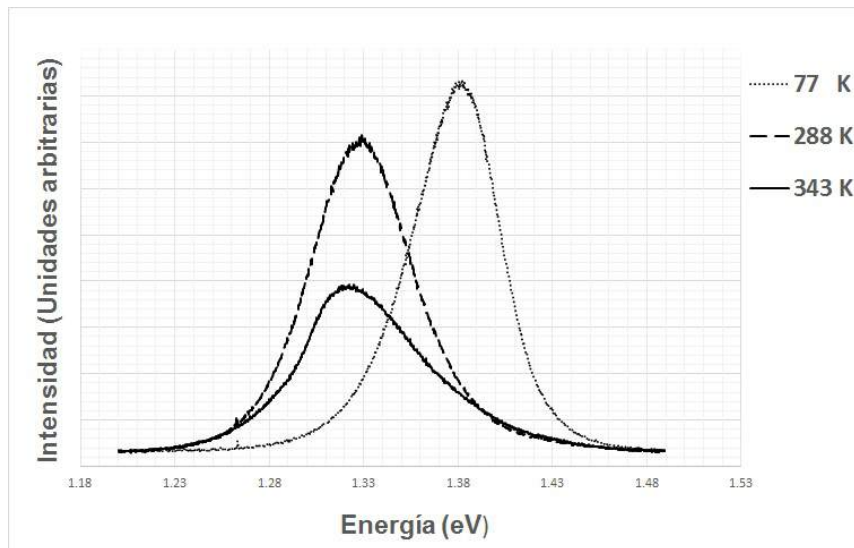


Fig. 3.5: Espectro de emisión del LED Infrarrojo a tres diferentes temperaturas. Al aumentar la temperatura, éste se recorre hacia la derecha (donde disminuye el *gap*).

El espectro de emisión del LED infrarrojo para tres distintas temperaturas se muestra en Fig. 3.5.

*Parámetros obtenidos del ajuste numérico*

Los parámetros obtenidos con este ajuste son los siguientes:  $E_0 = 1.38893$ ,  $\alpha = 0.00038$ ,  $\beta = 281.977$ .

El ajuste mostró un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.99$ .

Por lo tanto toma la forma de:

$$E_g(T) = 1.3889 - \frac{0.0004T^2}{281.977 + T}. \quad (3.4)$$

Las gráficas del ajuste se encuentran en las Fig. [3.6].

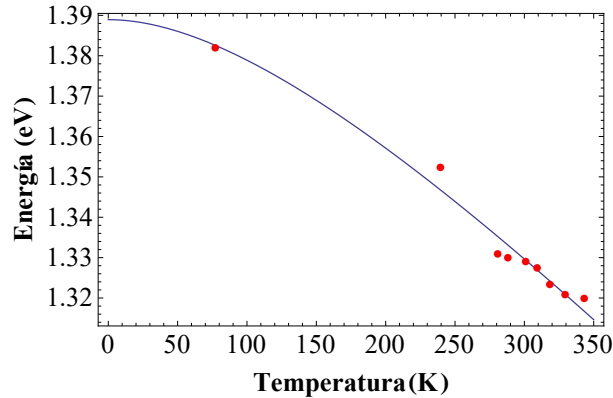


Fig. 3.6: Ajuste de datos a la ecuación de Varshni para LED Infrarrojo. Los puntos corresponden a los datos, y la línea al ajuste.

### 3.2. Efectos de la presión uniaxial en AlGaInP

En esta sección se presenta los datos obtenidos al ejercer presión uniaxial sobre los LEDs Ámbar y Rojo.

### 3.2.1. LED Ámbar

En la Tabla 3.4 se muestran los datos que se obtuvieron al ejercer presión sobre el LED Ámbar. Las masas fueron utilizadas de la forma en la que se detalló en el capítulo anterior.

En la gráfica que se muestra en la Fig. [3.7] se puede observar cómo varía el espectro de emisión a tres diferentes presiones: al aumentar la presión, éste se recorre hacia la izquierda (donde aumenta el *gap*).

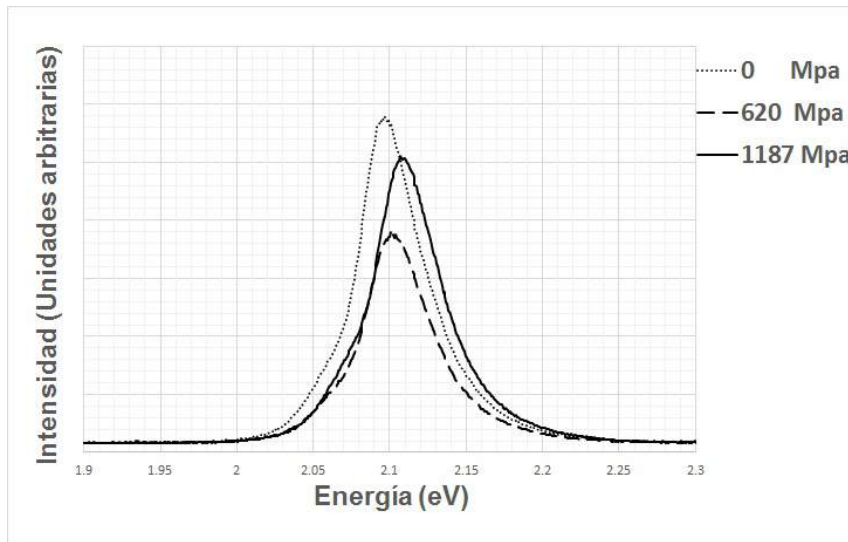


Fig. 3.7: Espectro de emisión de LED Ámbar a tres distintas presiones. Al aumentar la presión, éste se recorre hacia la izquierda (donde aumenta el *gap*).

El mejor ajuste cuadrático que se encontró es:

$$E_g(P) = 2.09997 - 4.70061 \times 10^{-6}P + 9.8173 \times 10^{-9}P^2, \quad (3.5)$$

la presión está dada en GPa,  $E_g$  en eV, los coeficientes en (eV/GPa) y  $eV/(GPa)^2$  respectivamente. Los detalles sobre el cálculo se encuentran en el apéndice B. El error

Masa [Kg]	Fuerza [N]	Presión [MPa]	Longitud de onda [Å]	Energía [eV]
$\pm 0.005$	$\pm 0.05$	$\pm 0.5$	$\pm 0.1$	$\pm 0.00004$
0.315	3.09	49.4	5918.8	2.09620
0.830	8.13	130.1	5910.7	2.09907
1.350	13.23	211.7	5900.6	2.10266
1.855	18.18	290.9	5906.7	2.10050
2.415	23.67	378.7	5898.6	2.10338
2.930	28.71	459.4	5906.7	2.10050
3.450	33.81	541.0	5906.7	2.10050
3.955	38.76	620.1	5910.7	2.09907
4.490	44.00	704.0	5910.7	2.09907
5.005	49.05	784.8	5910.7	2.09907
5.515	54.05	864.8	5906.7	2.10050
6.030	59.10	945.5	5888.5	2.10699
6.550	64.19	1027.0	5886.5	2.10770
7.055	69.14	1106.2	5884.5	2.10842
7.570	74.19	1187.0	5888.5	2.10699

*Tab. 3.4:* Datos experimentales para LED Ámbar bajo presión: Se muestran las distintas masas que ejercen las distintas presiones, y sus respectivas variaciones en las longitudes de onda y energía.

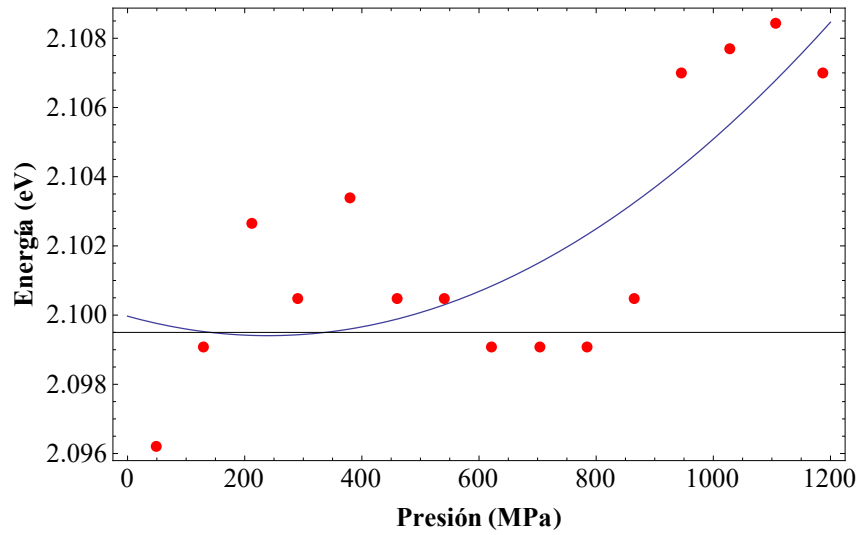


Fig. 3.8: Ajuste de datos: LED Ámbar. Los puntos corresponden a los datos, la línea al ajuste cuadrático. Los datos se tomaron a una temperatura de 300 K.

estándar para el coeficiente lineal es de  $7.9 \times 10^{-6}$ , y para el coeficiente cuadrático es  $6.2 \times 10^{-9}$ . El ajuste mostró un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.59$ .

En la gráfica que se muestra en la Fig. [3.8] se muestran los datos (puntos) y la línea continua corresponde al ajuste realizado.

## 3.2.2. LED Rojo

Los datos para el LED rojo se muestran en la siguiente Tabla:

Masa [Kg]	Fuerza [N]	Presión [MPa]	Longitud de onda [Å]	Energía [eV]
$\pm 0.005$	$\pm 0.05$	$\pm 0.5$	$\pm 0.1$	$\pm 0.00003$
0.315	3.09	49.4	6292.1	1.97183
0.830	8.13	130.1	6276.1	1.97686
1.350	13.23	211.7	6276.1	1.97686
1.855	18.18	290.9	6266.1	1.98001
2.415	23.67	378.7	6242.2	1.98760
2.930	28.71	459.4	6274.1	1.97749
3.450	33.81	541.0	6274.1	1.97749
3.955	38.76	620.1	6266.1	1.98001
4.490	44.00	704.0	6242.2	1.98760
5.005	49.05	784.8	6250.2	1.98505
5.515	54.05	864.8	6234.2	1.99015
6.030	59.10	945.5	6226.2	1.99270
6.550	64.19	1027.0	6226.2	1.99270
7.055	69.14	1106.2	6226.2	1.99270
7.570	74.19	1187.0	6234.2	1.99015

Tab. 3.5: Datos experimentales para LED Rojo bajo presión: Se muestran las distintas masas que ejercen las distintas presiones, y sus respectivas variaciones en las longitudes de onda y energía.

El mejor ajuste cuadrático que se encontró es:

$$E_g(P) = 1.97307 + 1.8 \times 10^{-5}P - 1.4 \times 10^{-9}P^2, \quad (3.6)$$

la presión está en GPa,  $E_g$  en eV; los coeficientes en (eV/GPa) y  $eV/(GPa)^2$  respectivamente. Los detalles sobre el cálculo se encuentran en el apéndice B. El error estándar

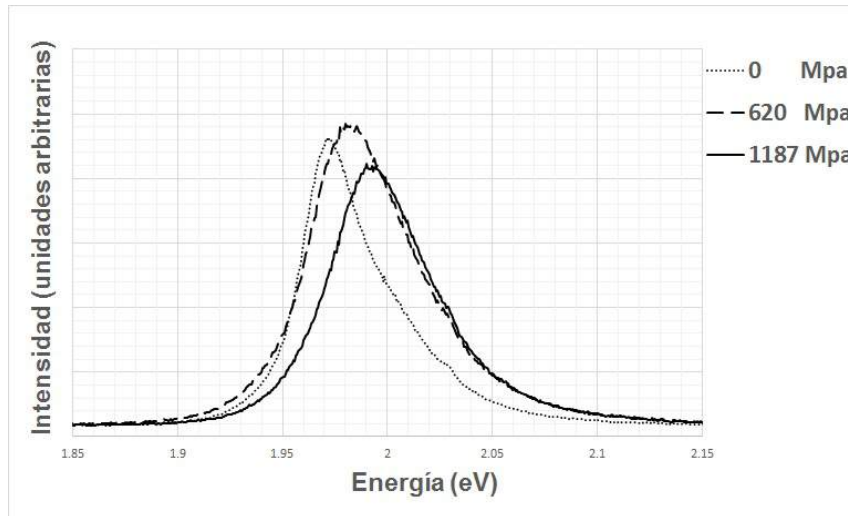


Fig. 3.9: Espectro de emisión de LED Rojo a tres distintas presiones. Al aumentar la presión, éste se recorre hacia la izquierda (donde aumenta el *gap*).

para el término lineal es  $1.1 \times 10^{-5}$ , y para el cuadrático es de  $8.7 \times 10^{-9}$ . El ajuste mostró un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.76$ .

En la gráfica de la Fig. [3.10] se muestran los datos (puntos) y la línea continua corresponde al ajuste realizado.

### *Comentarios sobre los resultados*

Existen algunos comentarios que añadir a este capítulo. El primero de ellos es que al comienzo del proyecto se trabajó con LEDs comunes de distintas longitudes de onda, pero dada su poca capacidad de emisión de luz, no fue posible continuar aumentando la presión sin que ésta afectara su intensidad a tal grado que el espectrómetro sólo parecía captar ruido. Por esto se decidió hacerlo con LEDs de alto brillo -tantos como fueron posibles- ya que por su diseño y construcción, los LEDs de distintas longitudes de onda no permitían

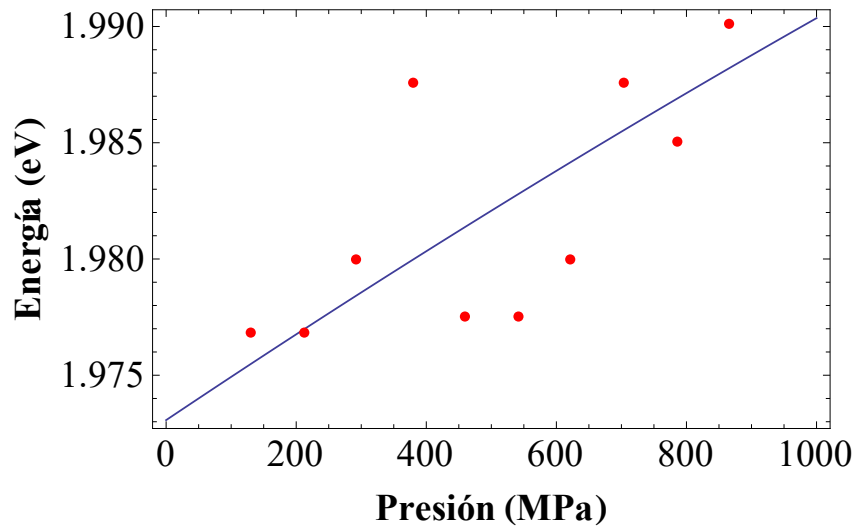


Fig. 3.10: Ajuste de datos: LED Rojo. Los puntos corresponden a los datos, la línea al ajuste cuadrático. Los datos se tomaron a una temperatura de 300 K.

aplicarle la presión uniaxial de la forma en la que se hizo con estas muestras (como se detalla en el capítulo anterior).

Por otra parte, para la medición de la temperatura no fue posible tomar más datos por las limitadas condiciones del desarrollo experimental, ya que sólo se pudo disponer de nitrógeno líquido y un termopar para medir la temperatura (como se menciona en el capítulo de procedimiento experimental). De manera que las muestras restantes con las que se trabajó (LEDs de las longitudes de onda: 518 nm, combinaciones de 448 y 650 nm y 452 y 546 nm) mostraron una dispersión demasiado grande como para ser consideradas, y por esto fueron excluidas.



## 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Abordando primero los resultados obtenidos al variar la temperatura, se puede notar que los tres ajustes (correspondientes a los LED Rojo, Infrarrojo y Ámbar) arrojaron un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.99$ , lo cual indica que la calidad del modelo de Varshni es muy bueno, ya que ajusta con muy buena precisión la variación del gap de los materiales semiconductores utilizados en este trabajo, al someterlos a variaciones de temperatura.

A los parámetros obtenidos con el ajuste mostrado en el apéndice A para el LED infrarrojo (GaAs, 933 nm), se le puede comparar con los resultados reportados en la literatura, este material mostró el siguiente comportamiento:

$$E_g(T) = 1.3889 - \frac{0.0004T^2}{281.977 + T}, \quad (4.1)$$

los parámetros obtenidos fueron:

$$\begin{aligned} E_g(0) &= 1.389, \\ \alpha &= 4 \times 10^{-4}, \\ \beta &= 281.977. \end{aligned}$$

con un coeficiente de determinación:  $R^2 = 0.99$ .

Comparándolos con los encontrados en la literatura [9]:

$$E_g(0) = 1.5216,$$

$$\alpha = 8.871 \times 10^{-4},$$

$$\beta = 572.$$

Como puede observarse, el valor para  $\alpha$  tiene el mismo orden de magnitud. Sin embargo existe una gran diferencia con  $\beta$  en este caso. Pero en general, siendo las condiciones experimentales algo limitadas, podría decirse que obtener un  $R^2 = 0.99$  es un resultado con bastante precisión. Obviamente no se pretende mejorar la precisión de los resultados reportados en la literatura, sino obtener los mejores resultados posibles dadas las condiciones experimentales. La falta de precisión en los instrumentos de medición, la ausencia de un mayor control para obtener más datos, en menores intervalos y el error humano al tomar las mediciones debe considerarse.

Para el LED que emite en Ámbar (AlGaInP, 592 nm):

$$E_g(T) = 2.190 - \frac{0.01T^2}{12646.3 + T}, \quad (4.2)$$

los parámetros obtenidos fueron:

$$E_g(0) = 2.190,$$

$$\alpha = 0.01,$$

$$\beta = 12646.3.$$

El ajuste es nuevamente igual de confiable que el anterior, pero en este caso no es posible compararlo con resultados publicados.

En el caso del LED Rojo:

$$E_g(T) = 2.071 - \frac{0.01T^2}{794.878 + T}, \quad (4.3)$$

los parámetros obtenidos fueron:

$$E_g(0) = 2.071,$$

$$\alpha = 0.001,$$

$$\beta = 794.878.$$

Al aplicar presiones más grandes que las discutidas en el capítulo 2 con el ejemplo del GaAs [15] (de hasta 90 KPa), debemos considerar que así como sucede en el caso de la presión hidrostática, el ajuste lineal ya no será el más adecuado para describir la variación del *gap* respecto a la presión, en este caso un término cuadrático será el más conveniente. Además se debe considerar que a diferencia de la presión hidrostática en la que esta presión se distribuye en todas las direcciones cristalográficas, este tipo de presión con la que se trabajó está siendo aplicada en una dirección y por lo tanto para suponer que el *gap* varía linealmente con la presión, ésta debe ser inferior al caso hidrostático.

Para el LED Rojo, se obtuvo la siguiente expresión:

$$E_g(P) = 1.97307 + 1.8 \times 10^{-5}P - 1.4 \times 10^{-9}P^2. \quad (4.4)$$

El ajuste como puede observarse es muy inferior al caso en el que medimos la variación del *gap* con la temperatura, ya que se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.77$ .

Para el LED Ámbar, se obtuvo el ajuste:

$$E_g(P) = 2.09997 - 4.70061 \times 10^{-6}P + 9.8173 \times 10^{-9}P^2. \quad (4.5)$$

Para este material la dispersión en el ajuste es aún mayor, el coeficiente de determinación es  $R^2 = 0.59$ .

En este caso en particular, más que con la temperatura, la precisión para ejercer la presión pudo ser la que afectara el resultado obtenido, ya que el ajuste resulta tener un coeficiente de determinación muy lejos de 1. Es posible incluso que, por la forma de la realización, podría no haberse ejercido presión sobre toda la superficie del LED. Además, como se puede observar en el Apéndice B, el ajuste lineal mostraría un ajuste aún menos adecuado que el cuadrático, arrojando un coeficiente de determinación menor.

## CONCLUSIONES

En conclusión, se pudo observar que hubo un cambio notable en el gap de los LEDs sometidos a cambios de temperatura: al aumentar la temperatura de los LEDs, el gap disminuyó. Y esto por supuesto, está de acuerdo con lo que se sabe acerca del comportamiento de los semiconductores sometidos a variaciones de temperatura, tal como lo describe la ecuación empírica de Varshni. Además, algunos de los parámetros que se calcularon coinciden con el orden de magnitud de materiales que ya han sido medidos con anterioridad, esto a pesar de las condiciones de las pruebas realizadas.

También se observó que conforme se ejercía presión uniaxial sobre los LEDs, éstos mostraban un incremento en el gap. Esto también concuerda con lo que sabemos sobre los efectos de presión uniaxial en semiconductores. Aunque existen algunos materiales, como se comentó anteriormente, en los cuales el gap disminuye. Sin embargo los resultados que se obtuvieron en el ajuste en este caso, son menos satisfactorios que en el caso de las mediciones de temperatura, ya que para el caso de la presión se encontraron ajustes con dispersiones grandes.



## Apéndice



## A. AJUSTE NUMÉRICO : TEMPERATURA

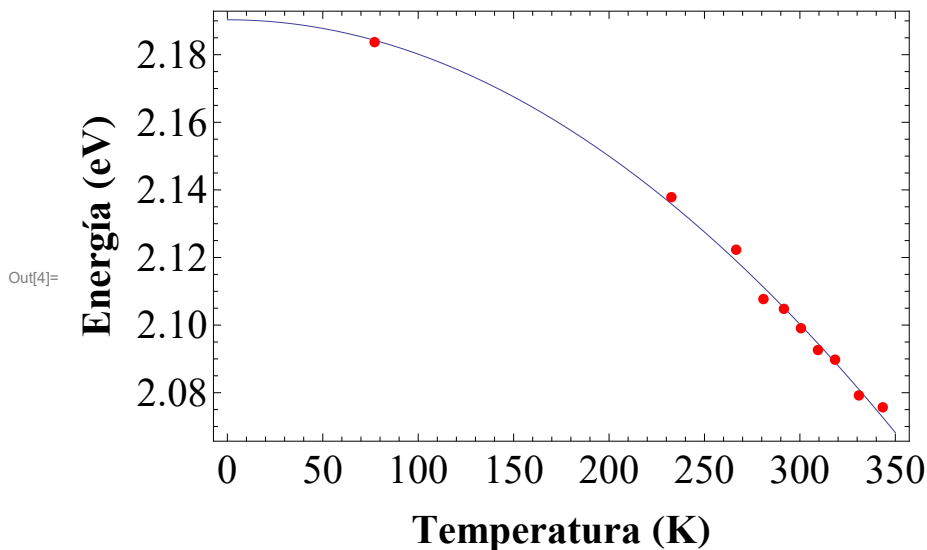
### LED Ámbar

```
In[1]:= datos = {{77.15, 2.18371585468882}, {232.668058946774, 2.13784785043508},  
              {266.605054022338, 2.12230585015395}, {280.894315106785, 2.10770406863162},  
              {291.611260920121, 2.10480779018084}, {300.542049097901, 2.09907455969682},  
              {309.472837275681, 2.09263101081145}, {318.403625453461, 2.08977598113525},  
              {330.906728902353, 2.07919962461456}, {343.409832351244, 2.07568634667827}};
```

```
In[2]:= modelo = E0 - (( $\alpha * T^2$ ) / ( $\beta + T$ ));
```

```
In[3]:= Modelo = NonlinearModelFit[datos, modelo, {E0,  $\alpha$ ,  $\beta$ }, T];
```

```
In[4]:= Show[Plot[Modelo[T], {T, 0, 350}, Frame  $\rightarrow$  True,  
             FrameLabel  $\rightarrow$  {Style["Temperatura (K)", Bold], Style["Energía (eV)", Bold]},  
             LabelStyle  $\rightarrow$  (FontSize  $\rightarrow$  21)],  
          ListPlot[datos, PlotStyle  $\rightarrow$  {Red, PointSize[0.015]}]]
```



```
In[5]:= Modelo["RSquared"]
```

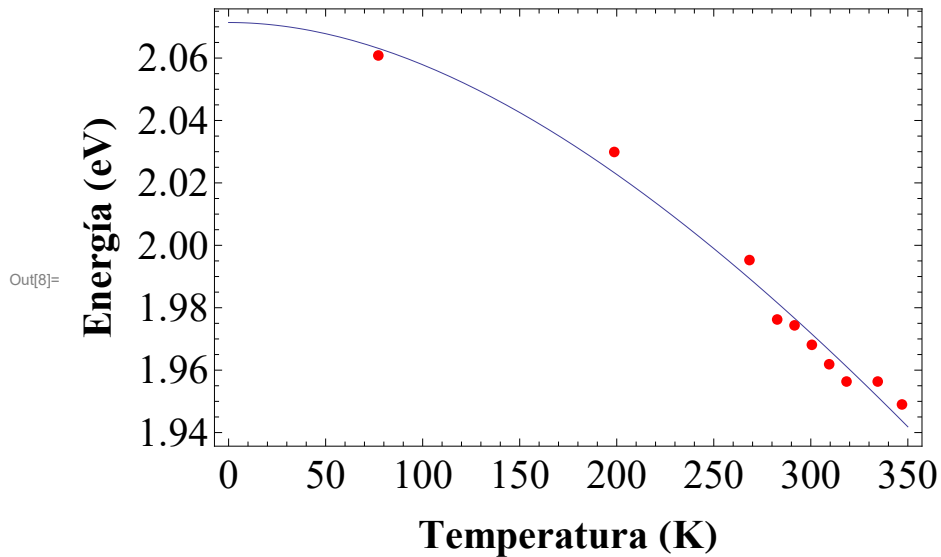
Out[5]= 0.999999

### LED ROJO

```
In[6]:= datos2 = {{77.15, 2.06082652315461}, {198.731063871211, 2.02990788763273},  
                {268.391211657894, 1.99527194364929}, {282.680472742341, 1.97623484812284},  
                {291.611260920121, 1.97434795754364}, {300.542049097901, 1.9681154822335},  
                {309.472837275681, 1.96189120809614}, {318.403625453461, 1.95635377410555},  
                {334.479044173464, 1.95635377410555}, {346.982147622356, 1.94900876559113}};
```

```
In[7]:= Modelo2 = NonlinearModelFit[datos2, modelo, {E0,  $\alpha$ ,  $\beta$ }, T];
```

```
In[8]:= Show[Plot[Modelo2[T], {T, 0, 350}, PlotRange -> All, Frame -> True,
  FrameLabel -> {Style["Temperatura (K)", Bold], Style["Energía (eV)", Bold]},
  LabelStyle -> (FontSize -> 21)],
  ListPlot[datos2, PlotStyle -> {Red, PointSize[0.015]}]]
```



```
In[9]:= Modelo2["RSquared"]
```

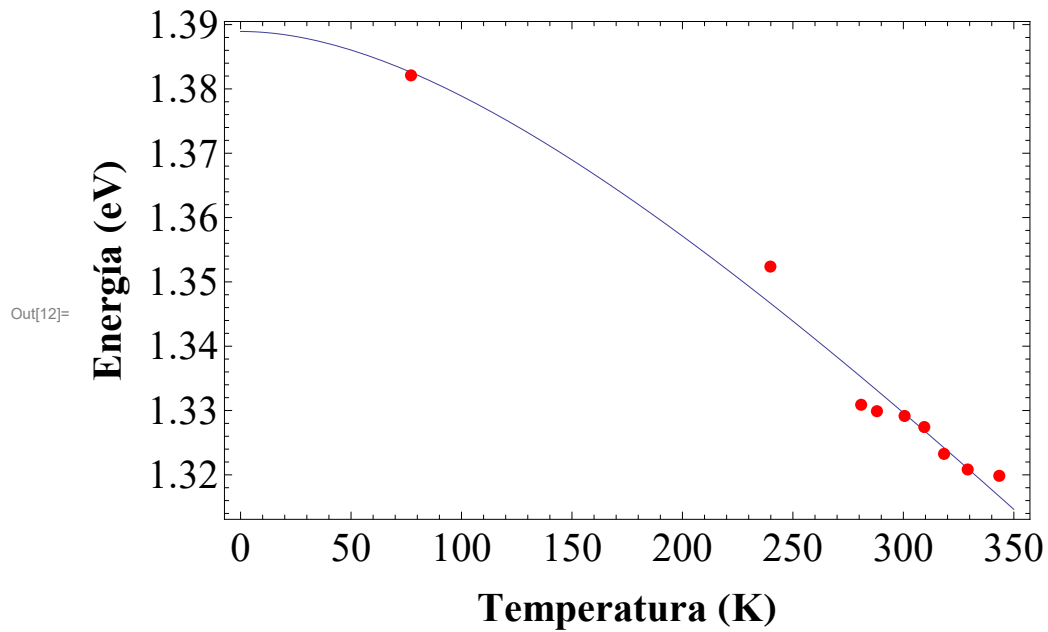
```
Out[9]= 0.999994
```

## LED Infrarrojo

```
In[10]:= datos3 = {{77.15, 1.38210295313527},
  {239.812689488998, 1.35237949902989}, {280.894315106785, 1.33089473627753},
  {288.038945649009, 1.32989613368634}, {300.542049097901, 1.32915528416091},
  {309.472837275681, 1.32743457513962}, {318.403625453461, 1.323258071053},
  {329.120571266797, 1.32083506328979}, {343.409832351244, 1.31985149410125}};
```

```
In[11]:= Modelo3 = NonlinearModelFit[datos3, modelo, {E0,  $\alpha$ ,  $\beta$ }, T];
```

```
In[12]:= Show[Plot[Modelo3[T], {T, 0, 350}, Frame → True,  
  FrameLabel → {Style["Temperatura (K)", Bold], Style["Energía (eV)", Bold]},  
  LabelStyle → {FontSize → 21}],  
  ListPlot[datos3, PlotStyle → {Red, PointSize[0.015]}]]
```



```
In[13]:= Modelo3["RSquared"]
```

Out[13]= 0.999995



## B. AJUSTE NUMÉRICO : PRESIÓN UNIAXIAL

### LED Rojo

```
In[1]= datos = {{49.392, 1.97183770124442},
  {130.144, 1.97686461337455}, {211.68, 1.97686461337455},
  {290.864, 1.98001946984568}, {378.672, 1.98760052545577},
  {459.424, 1.97749478012783}, {540.96, 1.97749478012783},
  {620.144, 1.98001946984568}, {704.032, 1.98760052545577},
  {784.784, 1.9850564781927}, {864.752, 1.99015110198582},
  {945.504, 1.99270823295108}, {1027.04, 1.99270823295108},
  {1106.224, 1.99270823295108}, {1186.976, 1.99015110198582}};
```

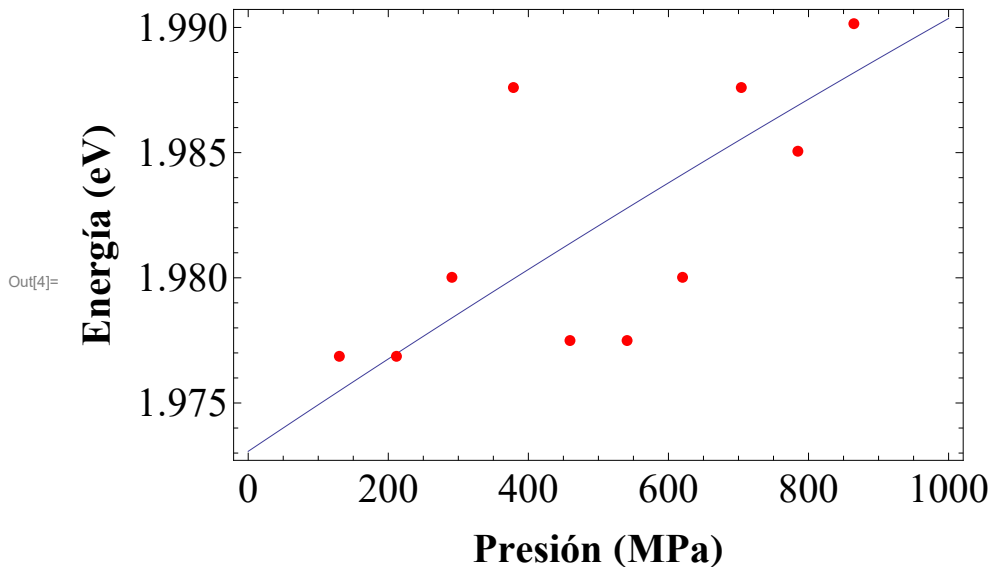
#### Ajuste Cuadrático :

```
In[2]= Modelo = LinearModelFit[datos, {P, P^2}, P];
```

```
In[3]= Modelo["BestFit"]
```

```
Out[3]= 1.97307 + 0.0000187364 P - 1.44624 × 10-9 P2
```

```
In[4]= Show[Plot[Modelo[x], {x, 0, 1000}, Frame → True,
  FrameLabel → {Style["Presión (MPa)", Bold], Style["Energía (eV)", Bold]},
  LabelStyle → (FontSize → 21)],
  ListPlot[datos, PlotStyle → {Red, PointSize[0.015]}, PlotRange → All]]
```



```
In[5]= Modelo["RSquared"]
```

```
Out[5]= 0.765651
```

#### Ajuste Lineal :

```
In[6]= ModeloL = LinearModelFit[datos, {1, P}, P];
```

```
In[7]:= ModeloL["BestFit"]
```

```
Out[7]= 1.97344 + 0.0000169485 P
```

```
In[8]:= ModeloL["RSquared"]
```

```
Out[8]= 0.76511
```

## LED Ámbar

```
In[9]:= datos2 = {{49.392, 2.09620193282422},
  {130.144, 2.09907455969682}, {211.68, 2.10266752533641},
  {290.864, 2.10049604686204}, {378.672, 2.10338046316075},
  {459.424, 2.10049604686204}, {540.96, 2.10049604686204},
  {620.144, 2.09907455969682}, {704.032, 2.09907455969682},
  {784.784, 2.09907455969682}, {864.752, 2.10049604686204},
  {945.504, 2.10698819733379}, {1027.04, 2.10770406863162},
  {1106.224, 2.10842042654431}, {1186.976, 2.10698819733379}};
```

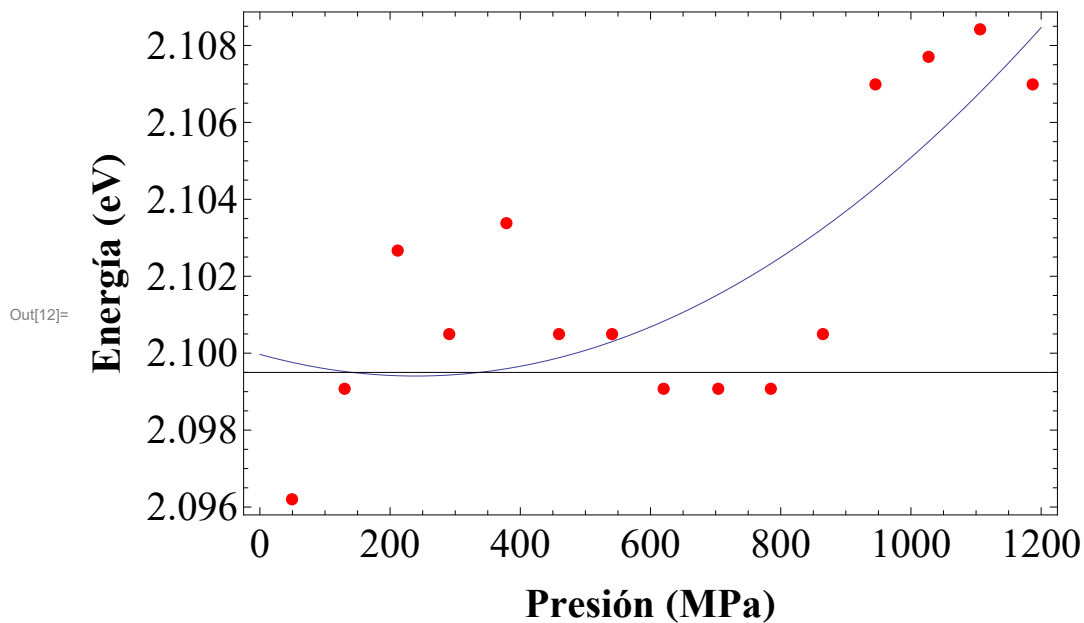
### Ajuste Cuadrático :

```
In[10]:= Modelo2 = LinearModelFit[datos2, {P, P^2}, P];
```

```
In[11]:= Modelo2["BestFit"]
```

```
Out[11]= 2.09997 - 4.70061 × 10-6 P + 9.8173 × 10-9 P2
```

```
In[12]:= Show[Plot[Modelo2[x], {x, 0, 1200}, PlotRange → All, Frame → True,
  FrameLabel → {Style["Presión (MPa)", Bold], Style["Energía (eV)", Bold]},
  LabelStyle → (FontSize → 21)],
  ListPlot[datos2, PlotStyle → {Red, PointSize[0.015]}, PlotRange → All]]
```



```
In[13]:= Modelo2["RSquared"]
```

```
Out[13]= 0.591434
```

### Ajuste Lineal :

```
In[14]:= Modelo2L = LinearModelFit[datos2, {1, P}, P];
```

```
In[15]:= Modelo2["BestFit"]
```

```
Out[15]=  $2.09997 - 4.70061 \times 10^{-6} P + 9.8173 \times 10^{-9} P^2$ 
```

```
In[16]:= Modelo2L["RSquared"]
```

```
Out[16]= 0.505775
```



## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado bajo la beca de CONACYT 2014-2016.

Estoy muy agradecida con mi asesor, el Dr. Elías López Cruz por toda la orientación y la ayuda brindada durante el proyecto. Por su paciencia, profesionalismo y actitud siempre afable.

Gracias a Alejandro Castillo por las útiles conversaciones, y por toda su valiosa colaboración durante este trabajo.

También agradezco a mi familia por su incondicional apoyo y amor.



## Bibliografía

- [1] M. ARRAYÁS & J. L. TRUEBA, *Electromagnetismo, circuitos y semiconductores*, DYKINSON, 2007.
- [2] *Brecha de energía*, Recuperado de: <http://bigbang.nucleares.unam.mx/~jimenez/home/FAMC/Semiconductores.pdf>.
- [3] J. I. PANKOVE, *Optical Processes in Semiconductors*, Dover Publications, Inc., 1975.
- [4] R. SZWEDA, *Gallium Nitride & Related Wide Bandgap Materials & Devices*, Elsevier Advanced Technology, 2000.
- [5] W. BLUDAU, A. ONTON AND W. HEINKE, *J. Appl. Phys.* **45**, 1846 (1974).
- [6] *Características de un LED*, Recuperado de: [http://www.prodisei.es/wp/wp-content/uploads/2015/03/led\\_caracteristicas\\_web.jpg](http://www.prodisei.es/wp/wp-content/uploads/2015/03/led_caracteristicas_web.jpg).
- [7] E. FRED SHUBERT, *Light-Emitting Diodes*, Second Edition, Cambridge University Press, 2006.
- [8] S. ADACHI AND K. OE, *Chemical etching characteristics of (001) GaAs* *J. Electrochem. Soc.* **130**, 2427 (1983).

- [9] Y. P. VARSHNI, *Physica* (Utrecht), **34**, 149, (1967).
- [10] E. LÓPEZ, , *Revista Mexicana de Física*, Vol. 37, No.3, pp 495-502, 1991.
- [11] W. PAUL & H. BROOKS, *Phys. Rev.* **94**, 1128 (1954).
- [12] A. R. GOÑI, K. STROSSNER, M. CARDONA, *Phys. Rev. B* (USA) vol. 36, p. 1581 (1987)
- [13] F. J. MANJÓN, A. SEGURA, ET AL, *Medidas ópticas bajo altas presiones en celda de diamantes: frente de absorción del Telururo de Galio*, *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio*, **36** [2-3], 1997.
- [14] J. LEE & M. O. VASSELL, *Effects of uniaxial stress on hole subbands in semiconductor quantum wells. I. Theory*, *Phys. Rev. B* **37**, 8855, 1988.
- [15] J. G. PING & H. E. RUDA, *Influence of pressure on (001) GaAs surfaces*, *Physical Review*, **B** vol. 47, 1993.
- [16] Imagen recuperada de: <http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/usb4000-960x960.jpg> y [https://pixabay.com/p-33521/?no\\_redirect](https://pixabay.com/p-33521/?no_redirect).
- [17] Imagen recuperada de: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3c/LED,\\_5mm,\\_green\\_\(unlabelled\).svg/250px-LED,\\_5mm,\\_green\\_\(unlabelled\).svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3c/LED,_5mm,_green_(unlabelled).svg/250px-LED,_5mm,_green_(unlabelled).svg.png).