

# Caracterización Óptica de Materiales Semiconductores Cuaternarios III-V y de Baja Dimensionalidad II-VI

**Director**

**PH.D Carlos Vargas Hernández**

Universidad Nacional de Colombia

**Co-Director**

**Hernando Ariza Calderón**

Universidad del Quindío

**Diego Germán Espinosa Arbeláez**

Universidad del Quindío

Facultad de Ciencias Básicas y Tecnológicas

Maestría en Ciencias de los Materiales

Instituto Interdisciplinario de las Ciencias

# Contenido

## ● Justificación

- Técnica de caracterización
- Materiales estudiados
  - Pozos Cuánticos ZnSe/CdSe
  - Cuaternario GaInAsSb

## ● Mediciones, cálculos y resultados experimentales

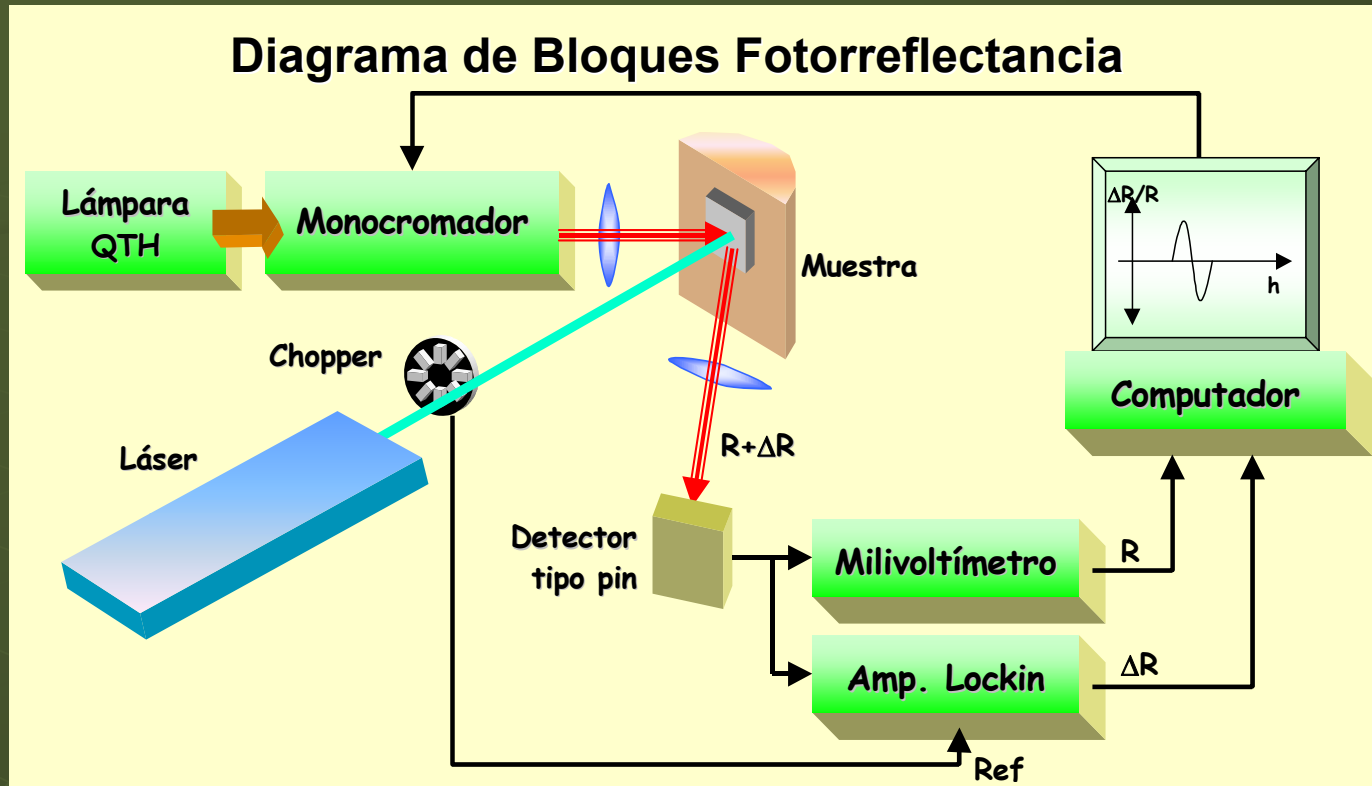
## ● Conclusiones

## ● Perspectivas

## ● Producción bibliográfica y participación en eventos

## ● Referencias

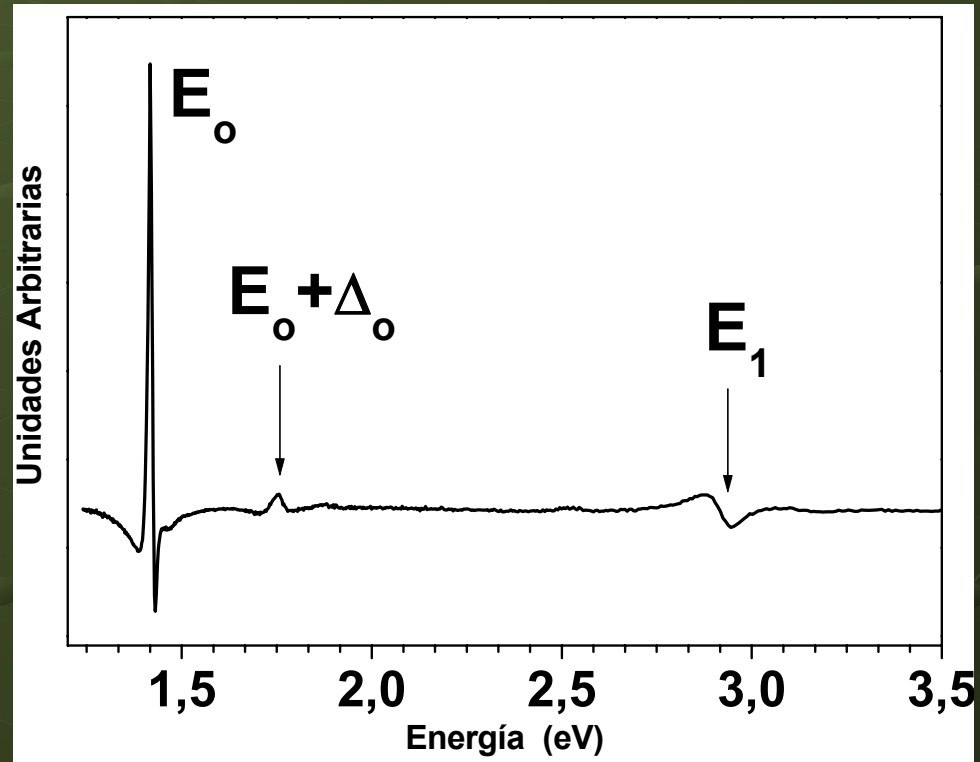
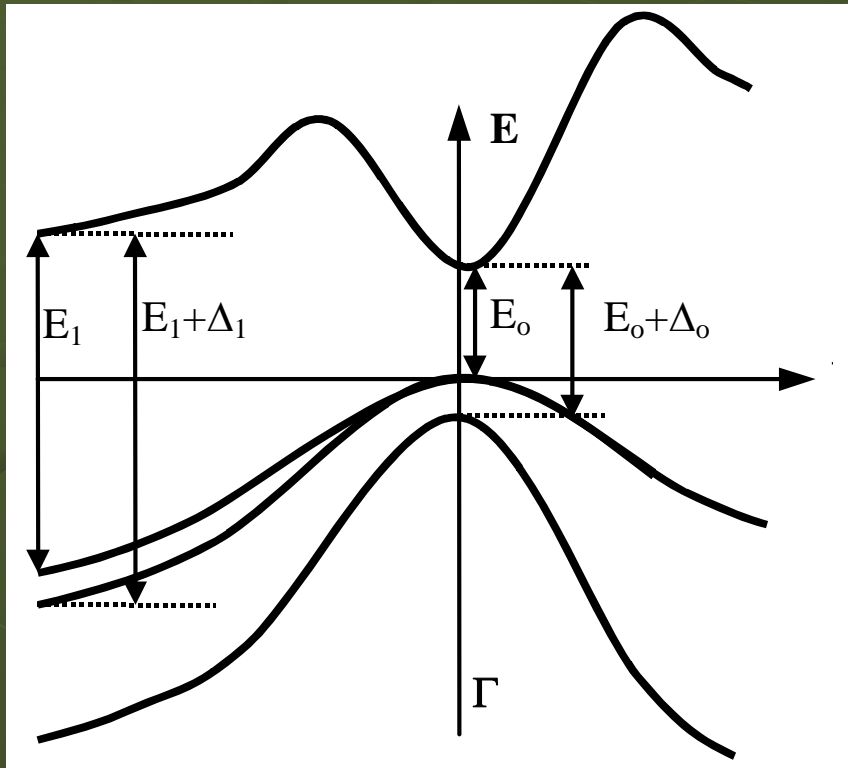
# Justificación



## Importancia de la técnica

- Potencialidad en materiales semiconductores: Películas, cristales, heteroestructuras
- Información e interpretación
  - Alta resolución (Puntos Críticos)

# Puntos Críticos



# Expresiones de ajuste

## Transiciones excitónicas

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{A_i \cos(\theta_i + \phi_i)}{\Delta E_i^2 + \Gamma_i^2}$$

$$\phi_i = -2 \tan^{-1} \left( \frac{\Gamma_i}{\Delta E_i} \right)$$

## Transición interbanda

$$\frac{\Delta R}{R} = A_o (\Upsilon_1 - \Upsilon_2 + \Upsilon_3)$$

$$M = \left[ (E - E_o)^2 + \Gamma_o^2 \right]^{1/2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\Gamma_o}{E - E_o} \right)$$

$$\Upsilon_1 = M^{-5/2} \cos \left( \frac{3\pi}{4} - \frac{5}{2} \phi + \theta_o \right) \quad 1D$$

$$\Upsilon_2 = \frac{4}{E} M^{-3/2} \cos \left( \frac{3\pi}{4} - \frac{3}{2} \phi + \theta_o \right) \quad 2D$$

$$\Upsilon_3 = \frac{8}{E^2} M^{-1/2} \cos \left( \frac{3\pi}{4} - \frac{1}{2} \phi + \theta_o \right) \quad 3D$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{A_1 \cos(\theta_1 + \phi_1)}{\Delta E_1^2 + \Gamma_1^2} + \frac{A_2 \cos(\theta_2 + \phi_2)}{\Delta E_2^2 + \Gamma_2^2} + A_o (\Upsilon_1 - \Upsilon_2 + \Upsilon_3)$$

# Semiconductores Estudiados

## ● Cuaternario Grupo III-V, EFL [1]

### Parámetros:

- Concentración de la solución precursora
- Ataque químico
- Superficie
- Estequiometría

## ● UQW Grupo II-VI, MBE [2]

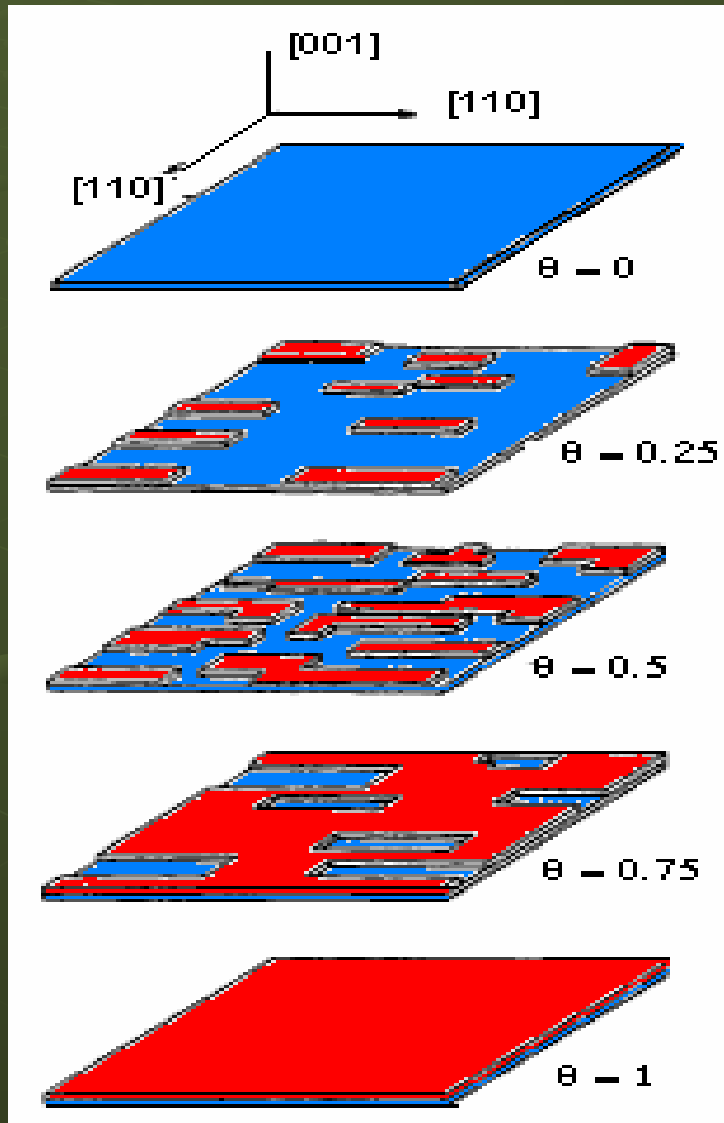
### Parámetros:

- Temperatura de crecimiento del sustrato
- Ancho de confinamiento ( $a$ )

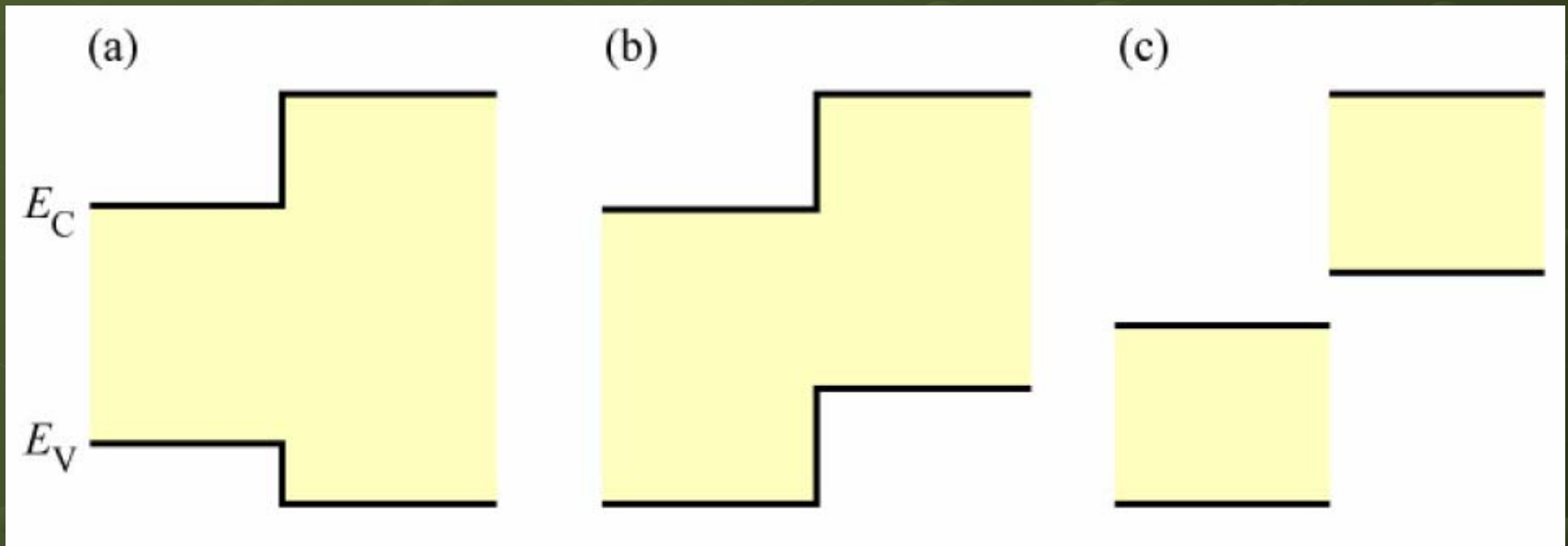
[1] Laboratorio de Optoelectrónica Universidad del Quindío

[2] Laboratorio de Nanoestructuras semiconductoras CINVESTAV México

# Pozos Cuánticos Ultradelgados ZnSe/CdSe

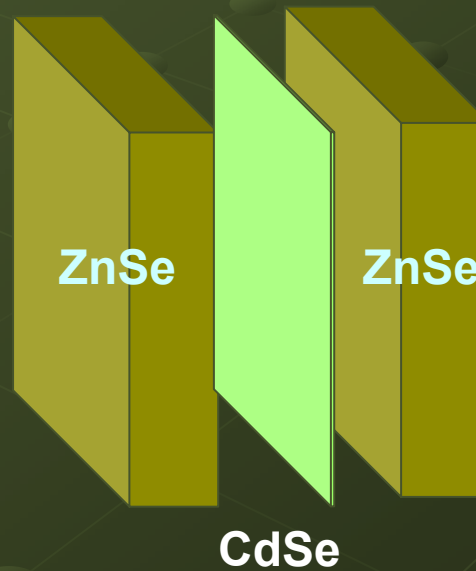
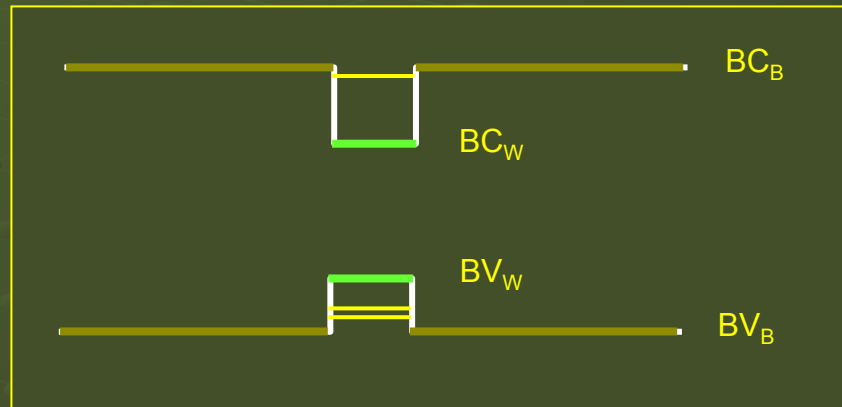


# Bandas en Heteroestructuras y Niveles Permitidos de Energía



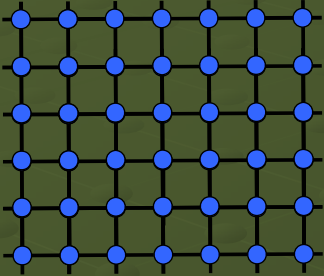


# Estructura de bandas y niveles permitidos de energía

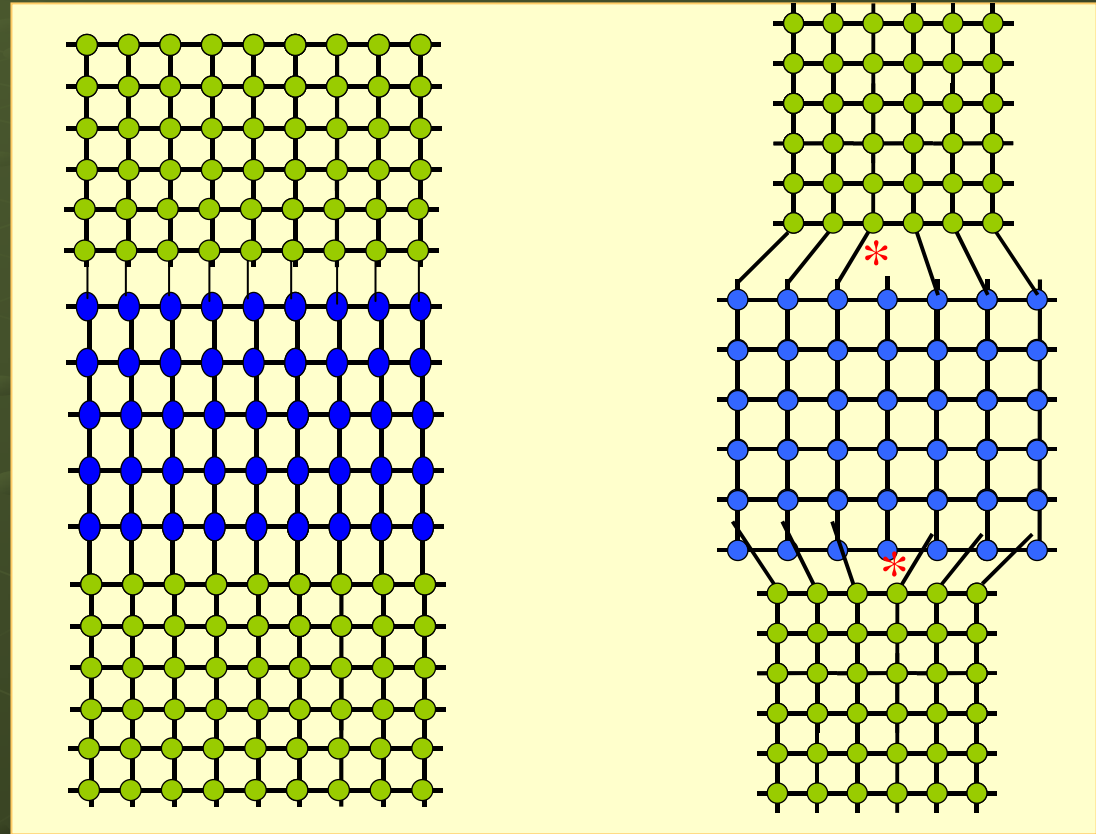
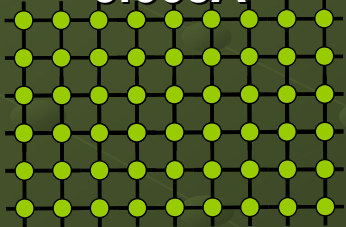


# Efecto de la Tensión

CdSe  
6.057Å



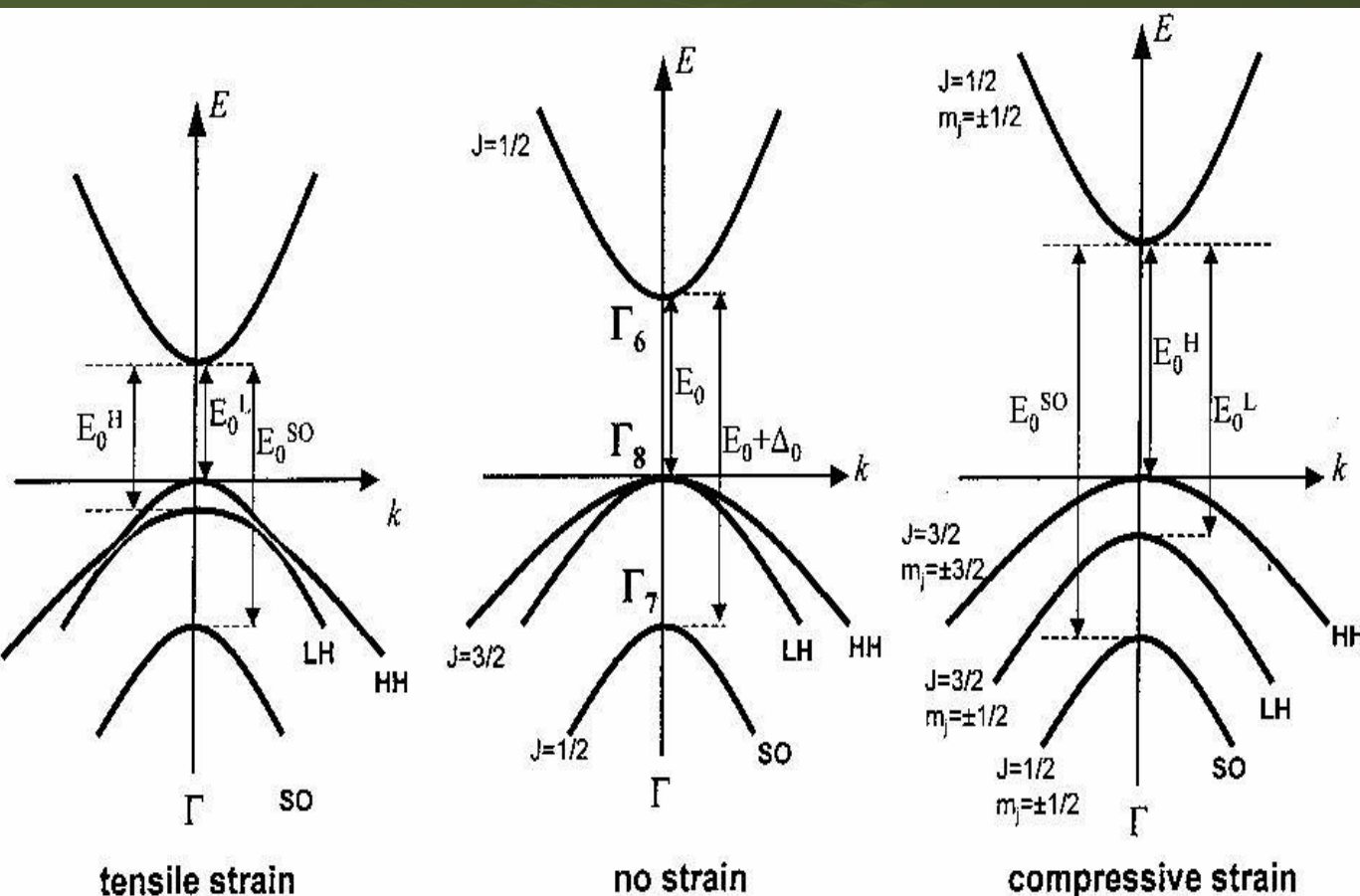
ZnSe  
5.668Å



Película comprimida

Película relajada

# Efectos de la Deformación en la Estructura de Bandas

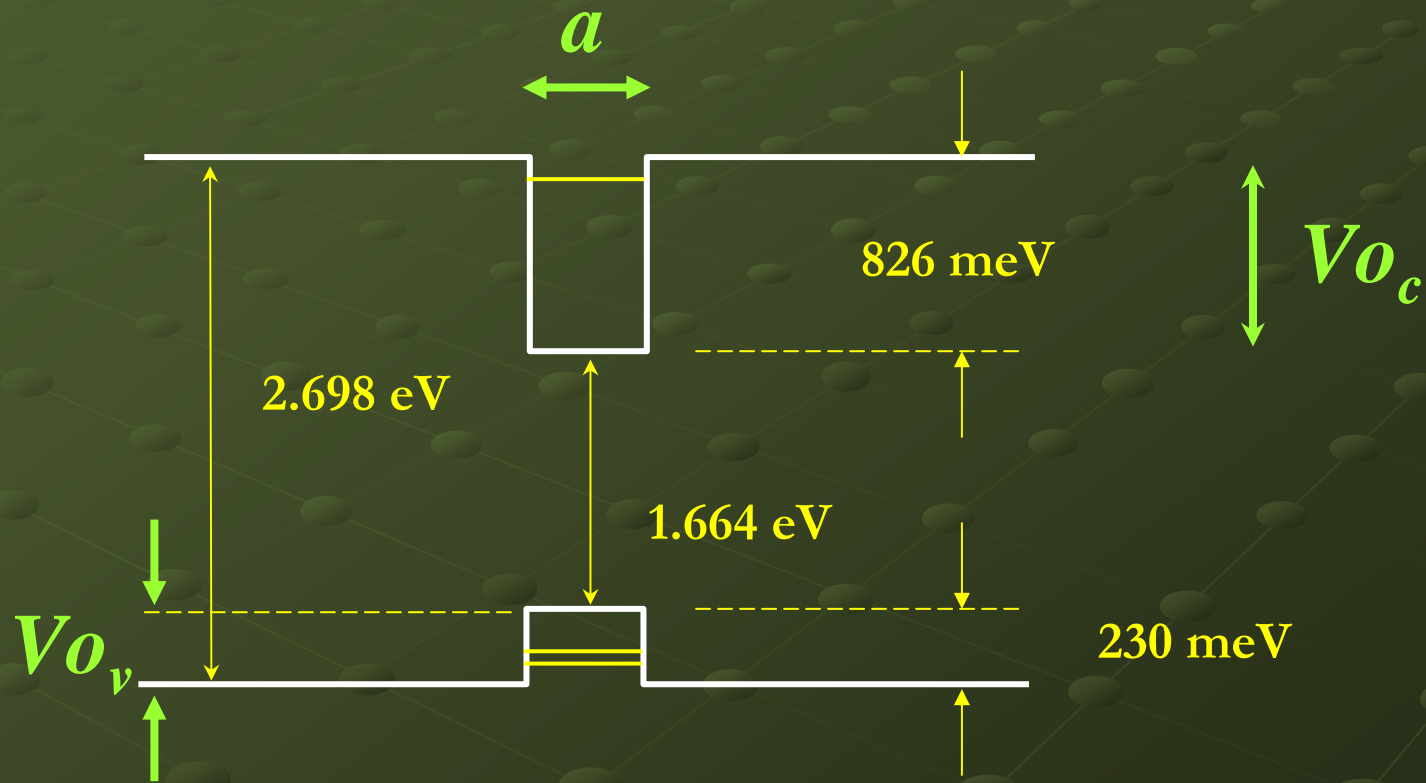


Debido a la tensión, se altera la parabolicidad de la estructura de bandas, cambiando la  $m_e$ ,  $m_{LH}$ ,  $m_{HH}$ . Incrementándose a mas de dos veces su valor inicial\*.

I. Hernández-Calderón, II-VI Semiconductors Materials and thier Applications, ed. OPA

\* N. Shildermans, M. Hayne, and V.V. Moshchalkov, Phys Rev B **72**, 115312 (2005)

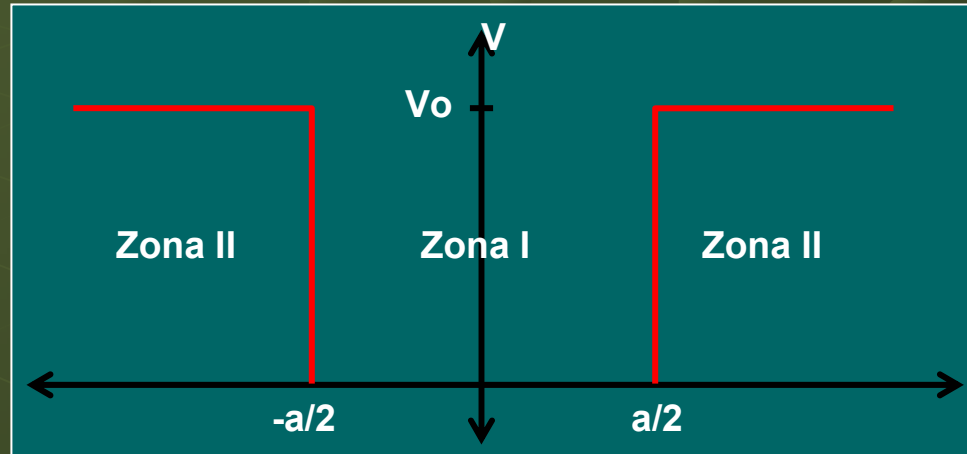
# Niveles Permitidos de Energía



# Cálculo de los Niveles Permitidos

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} + V(x)\varphi(x) = E\varphi(x)$$

Ecuación de Schrödinger independiente del tiempo



Solución zona I

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} - E\varphi(x) = 0$$

Solución para la zona II

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} + (V_0 - E)\varphi(x) = 0$$

# Cálculo de los Niveles Permitidos

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} + V(x)\varphi(x) = E\varphi(x)$$

$$\sqrt{\frac{a^2 m E}{2\hbar^2}} \tan\left(\sqrt{\frac{a^2 m E}{2\hbar^2}}\right) = \sqrt{\frac{a^2 m V_o}{2\hbar^2} - \frac{a^2 m E}{2\hbar^2}}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{a^2 m E}{2\hbar^2}}$$

$$\varepsilon \tan(\varepsilon) = \sqrt{\frac{a^2 m_2 V_o}{2\hbar^2} - \frac{m_2}{m_1} \varepsilon^2}$$

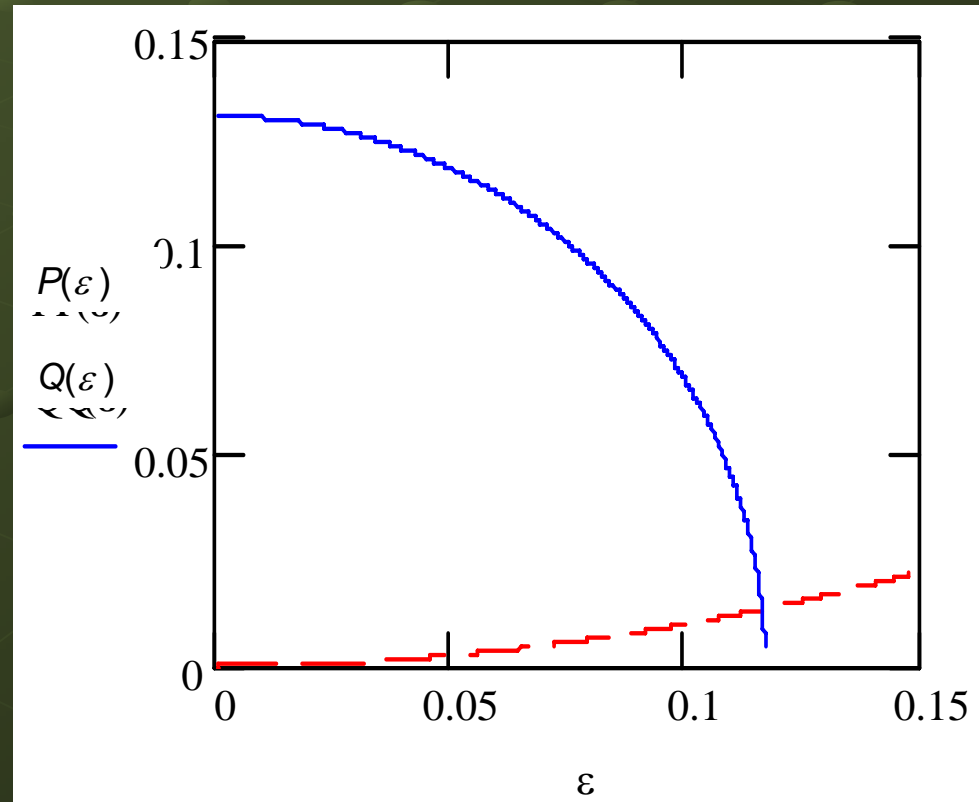
# Cálculo de los Niveles Permitidos

$$\varepsilon \tan(\varepsilon) = \sqrt{\frac{a^2 m_2 V_o}{2\hbar^2} - \frac{m_2}{m_1} \varepsilon^2}$$

$$P(\varepsilon) = \varepsilon \tan(\varepsilon)$$

$$Q(\varepsilon) = \sqrt{\frac{a^2 m_2 V_o}{2\hbar^2} - \frac{m_2}{m_1} \varepsilon^2}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{a^2 m E}{2\hbar^2}}$$

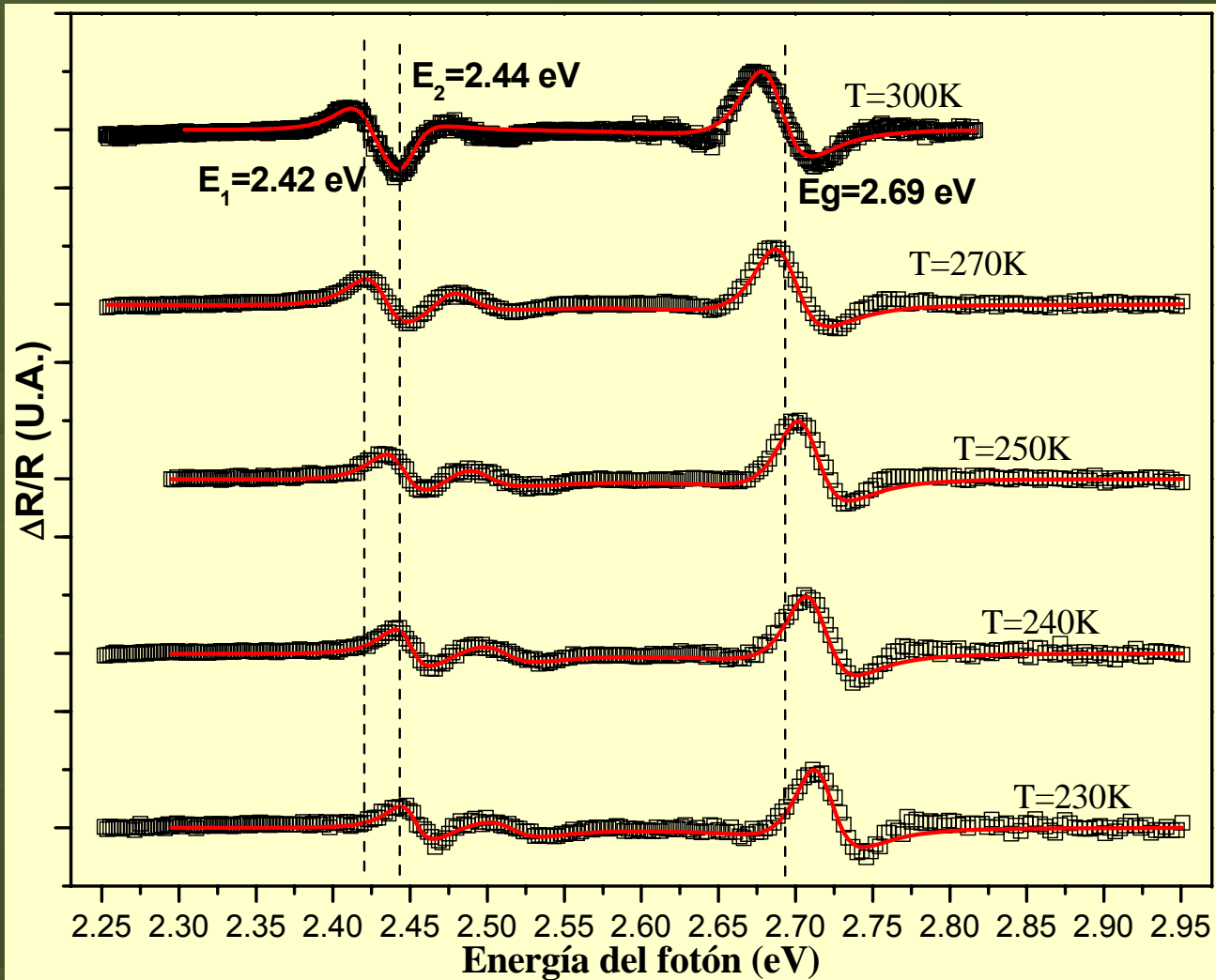


# Cálculo de los Niveles Permitidos

Niveles permitidos en el pozo Teórico ( $eV$ )		
Espesor ( $ML$ )	$E_{T1}$	$E_{T2}$
0.5	2.673	2.675
1	2.640	2.647
2	2.532	2.558
4	2.277	2.335



# Mediciones Experimentales



● P361

■ 2 ML

● E. P. critico

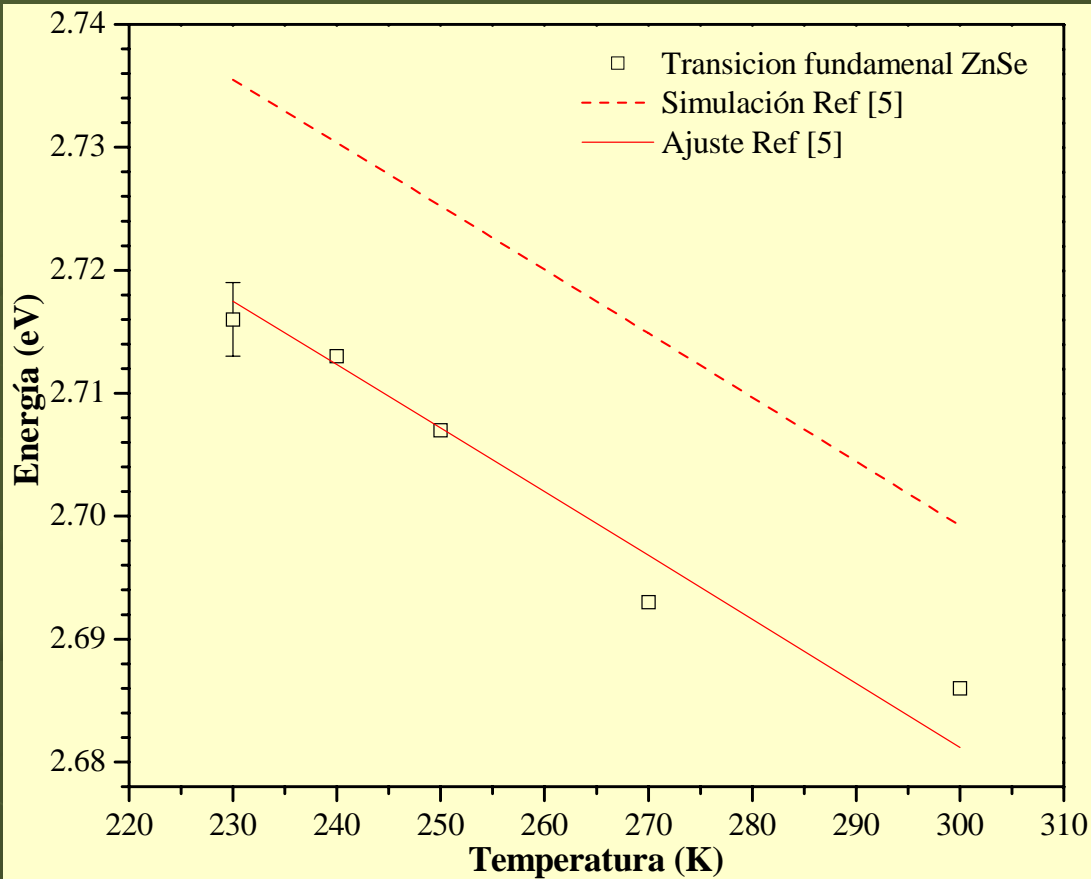
■ Barrera

■ Pozo

●  $E_{PC}$  Vs  $T$

●  $Int.$  Vs  $T$

# Mediciones Experimentales



$$E_g(T) = E_g(0) - S\overline{\hbar\omega} \left[ \coth\left(\frac{\overline{\hbar\omega}}{2k_B T}\right) - 1 \right]$$

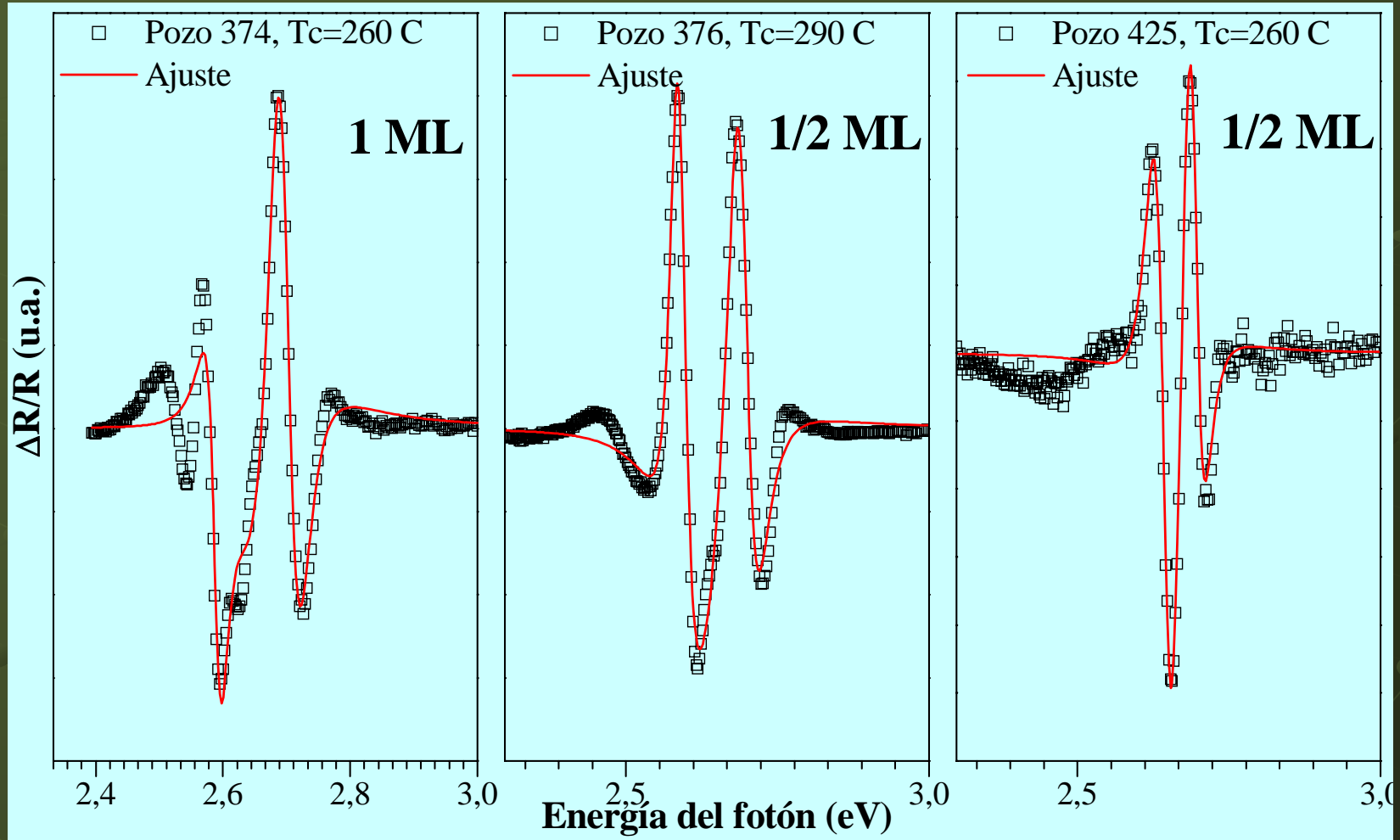
O'Donnell y Chen (1991)

[1] Tesis Doctoral, University of Strathclyde, UK, 1991

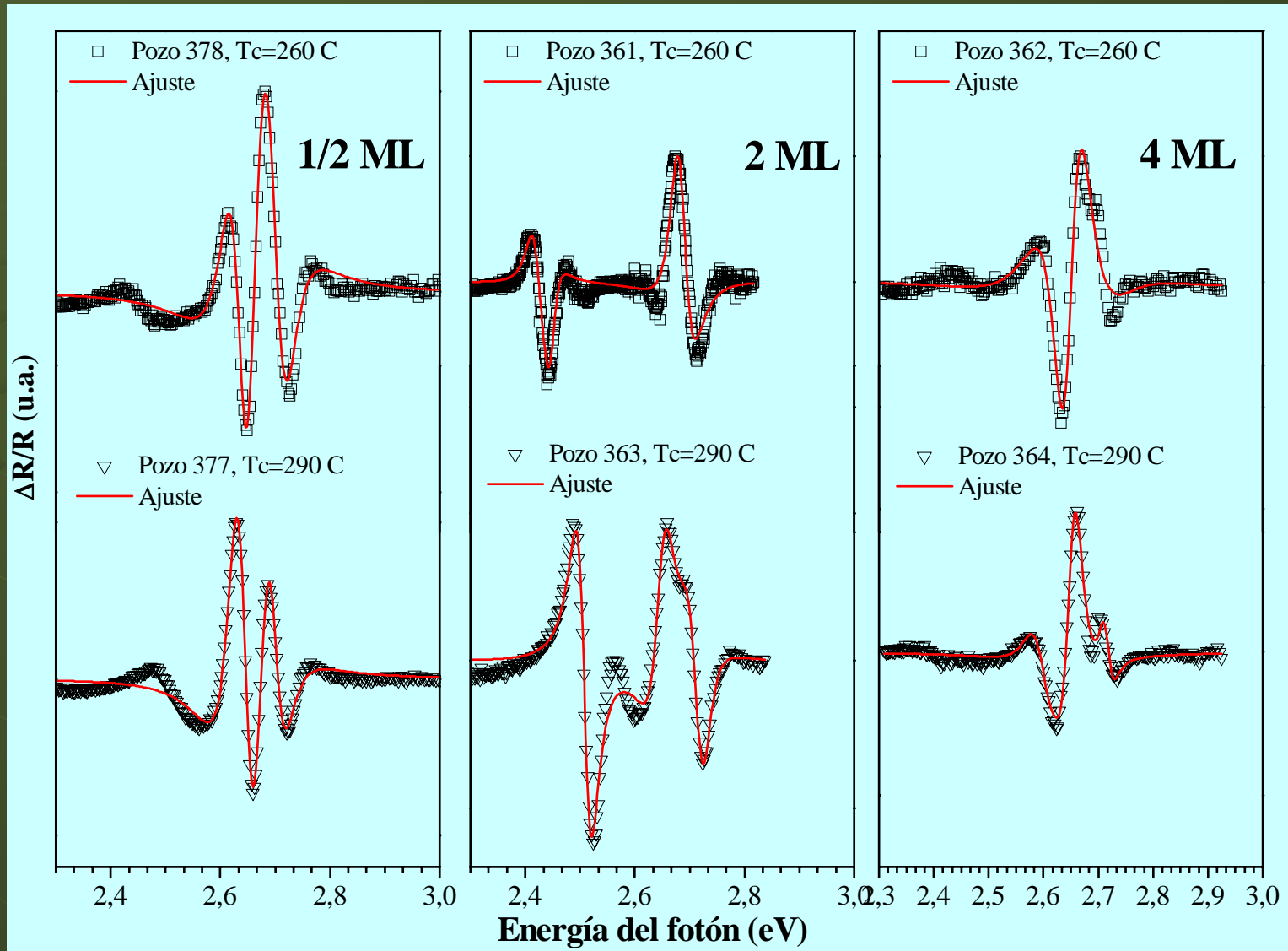
[2] Phys. Rev. B, 50 1994

Compuesto (Estructura cúbica)	$E_g(0)$ (eV)	$\overline{\hbar\omega}$ (meV)	$S$	$E_g(300)$ (eV)	Desviación (meV)	Excitón $E_B$ (meV)	Ref.
ZnSe	2.818	15.1	3.12	2.698	0.97	21	[1]
<i>P361</i>	2.800	15.1	3.12	2.681	1.4		
CdSe	1.764	18.9	2.83	1.664	1.60	15	[2]

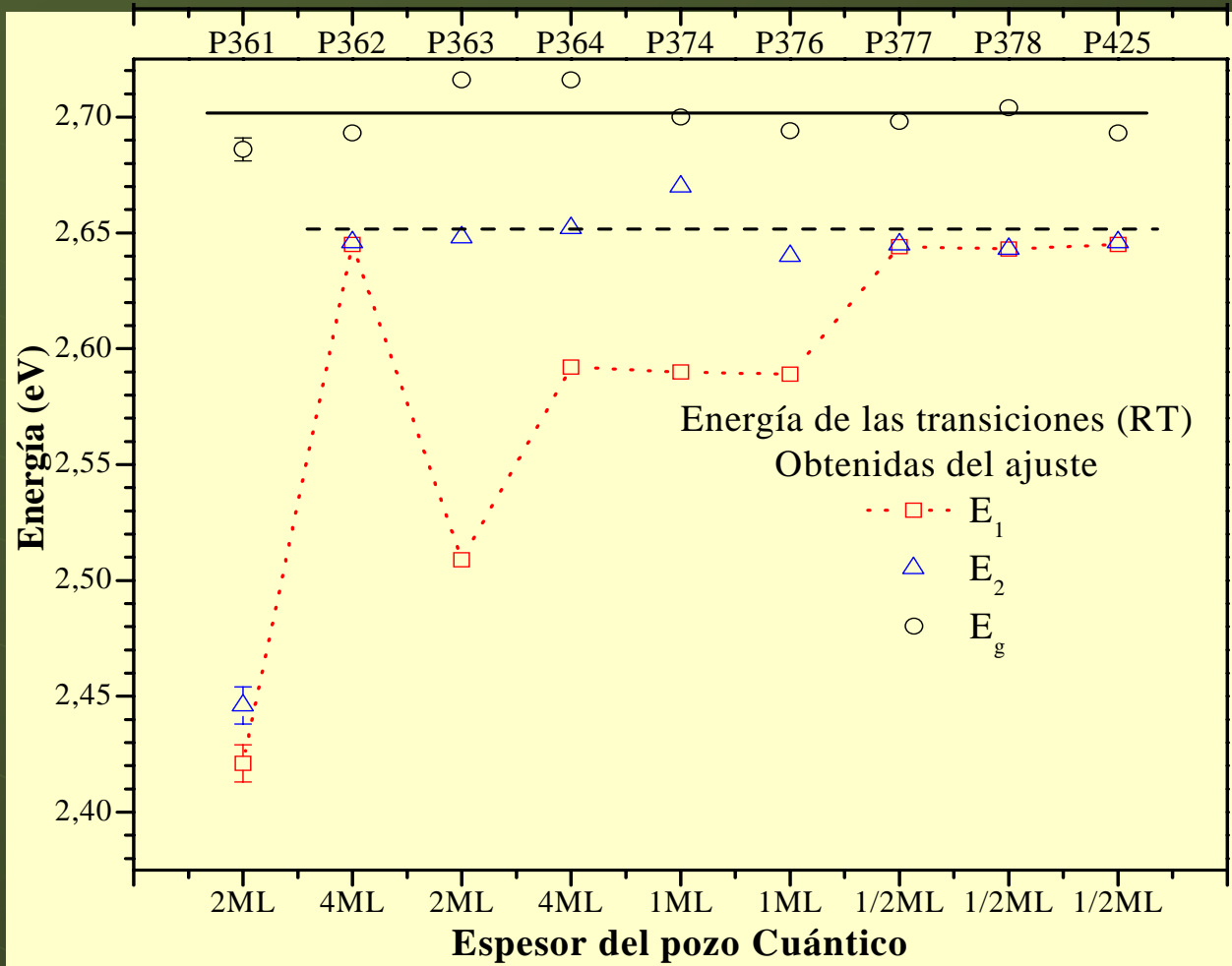
# Mediciones Experimentales



# Mediciones Experimentales



# Mediciones Experimentales



● P361 y P363

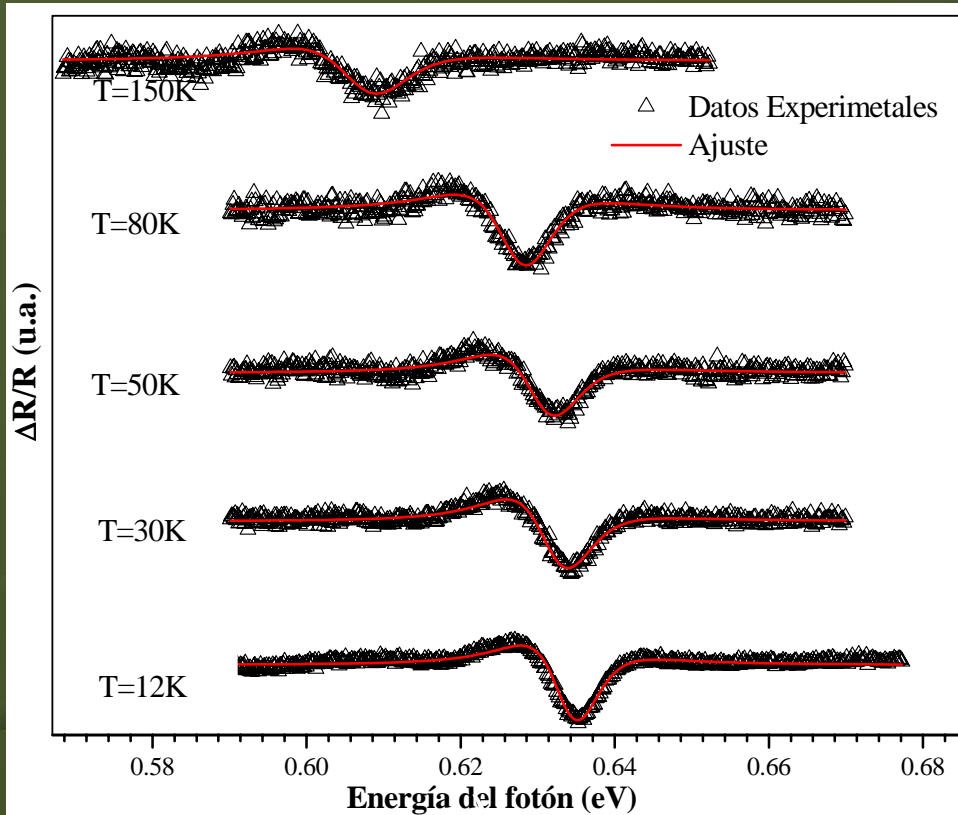
# Resultados Experimentales

Espesor ( <i>ML</i> )	Niveles permitidos en el pozo Experimental ( <i>eV</i> )		Niveles permitidos en el pozo Teórico ( <i>eV</i> )	
	$E_1$	$E_2$	$E_{T1}$	$E_{T2}$
0.5	2.589	2.640	2.673	2.675
	2.645	2.646		
	2.644	2.645		
	2.643	2.643		
1	2.590	2.670	2.640	2.647
2	2.421	2.447	2.532	2.558
	2.509	2.648		
4	2.645	2.646	2.277	2.335
	2.592	2.652		

# Conclusiones

- Los espectros experimentales se ajustaron empleando tres contribuciones, dos debidas a recombinación excitónica atribuidas a las transiciones en el pozo, y una atribuida a la recombinación banda-banda.
- Se determinaron experimentalmente los niveles de energía permitidos en los pozos
- Los fenómenos que contribuyen a la recombinación radiativa poseen una fuerte dependencia con la temperatura. Este comportamiento puede ser ocasionado por la activación térmica de trampas.
- Se encontró que la respuesta óptica de los pozos cuánticos es muy sensible a la temperatura del sustrato durante el proceso de crecimiento, cambiando los valores de las energías permitidas en los pozos.
- La tensión presente en la heteroestructura levanta la degeneración de la banda de valencia, permitiendo la aparición de excitones ligados a hueco ligero y hueco pesado.
- Al fabricar pozos con anchos mayores al espesor crítico, se produce defectos estructurales que alteran los valores de energía de los niveles permitidos.

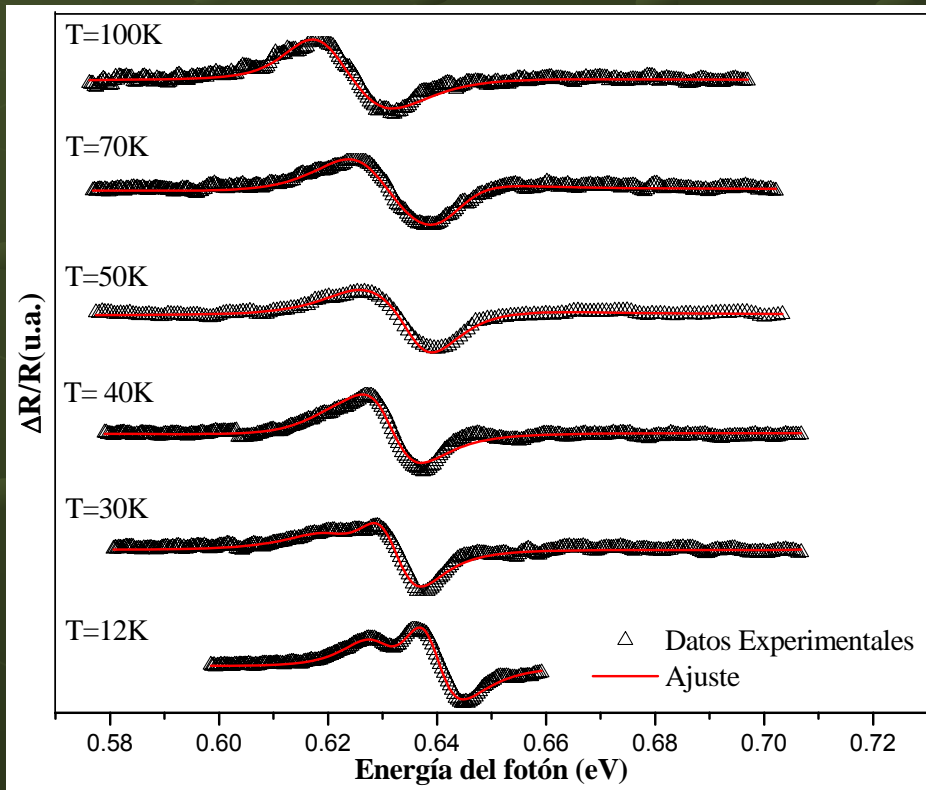
# Mediciones Experimentales GaInAsSb



a)

Ajuste de los datos experimentales para las muestras a) AS12 y b) M46

b)

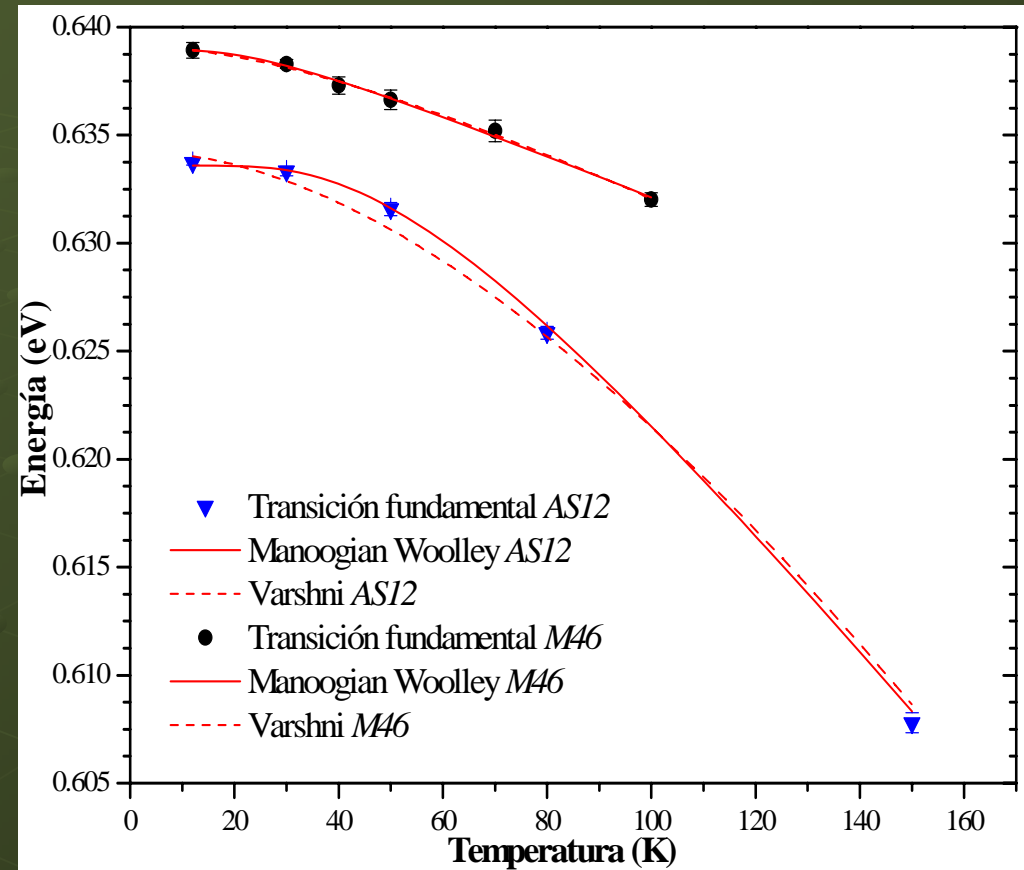




# Análisis Experimental

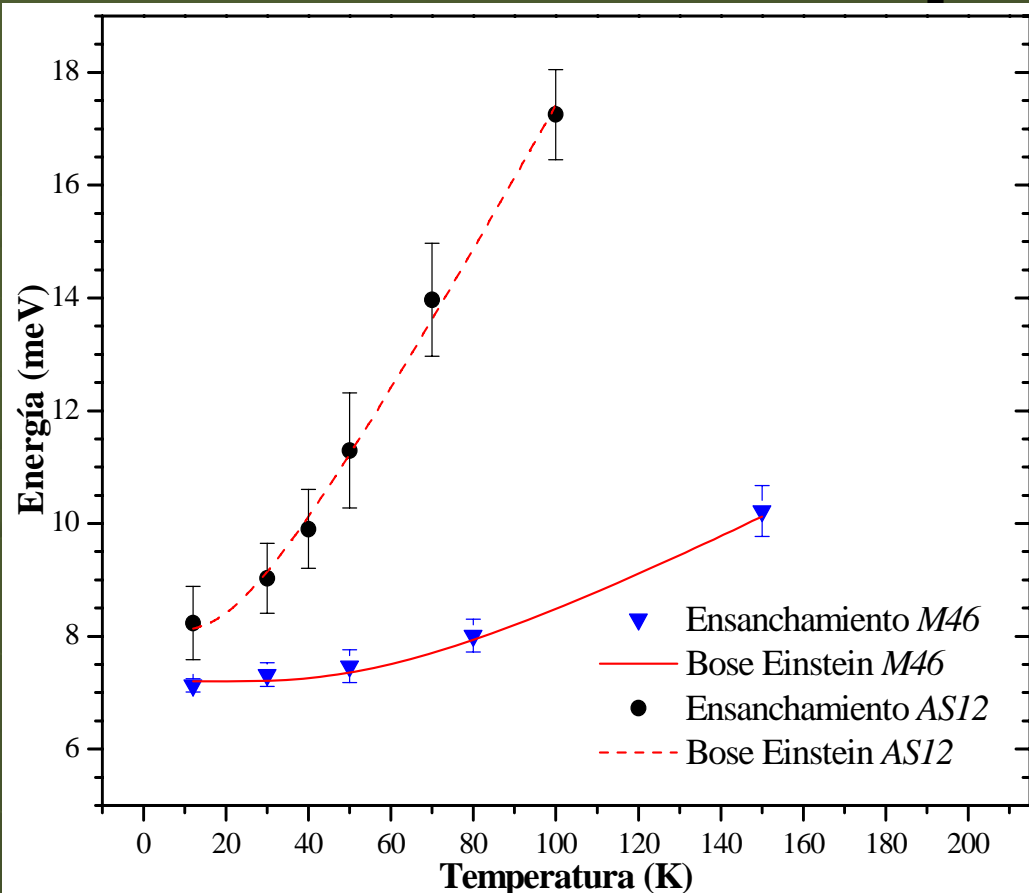
$$E_0(T) = E_0(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}$$

$$E_0(T) = E_0(0) - \frac{2\alpha_B}{\exp(\Theta_B/T) - 1}$$



Concentración solución líquida

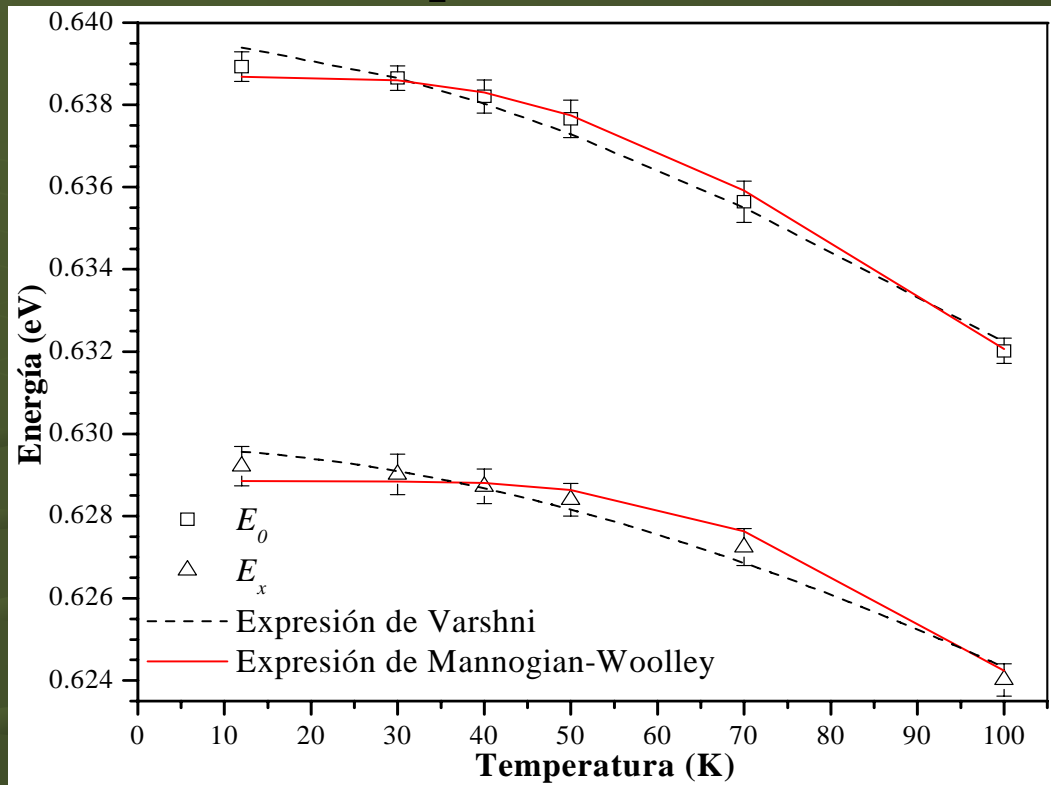
# Análisis Experimental



$$\Gamma_0(T) = \Gamma_0(0) + \frac{\Gamma_{LO}}{\exp(\Theta_{LO}/T) - 1}$$

Ensanchamiento, procesos  
dispersivos

# Estequiometría



$$E_0 = [0.812(1-x) + 0.346x - 0.75x(1-x)]$$

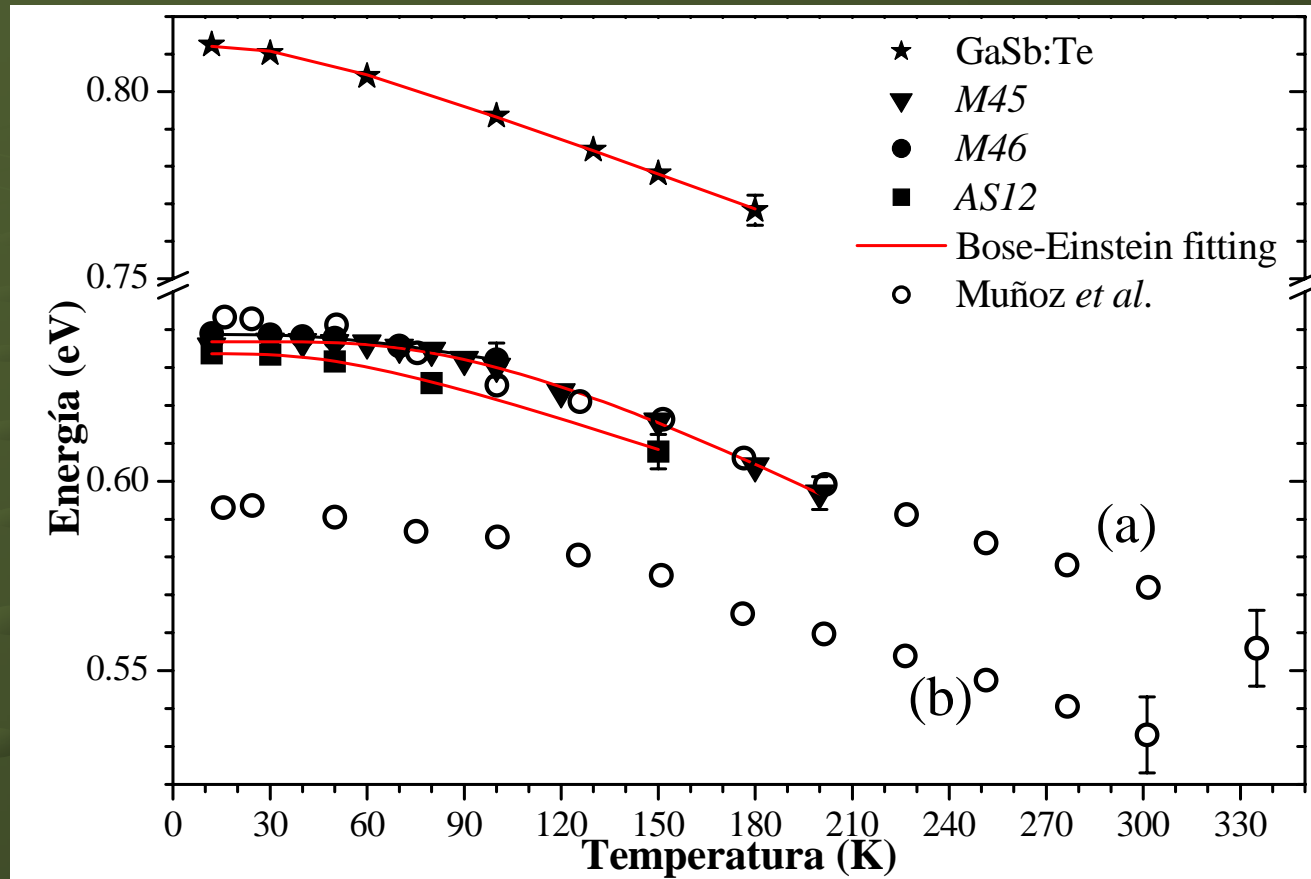
$$E_0 = [0.727(1-x) + 0.283x - 0.75x(1-x)]$$

$$y = \frac{0.867x}{(1-0.048x)}$$

*M46*

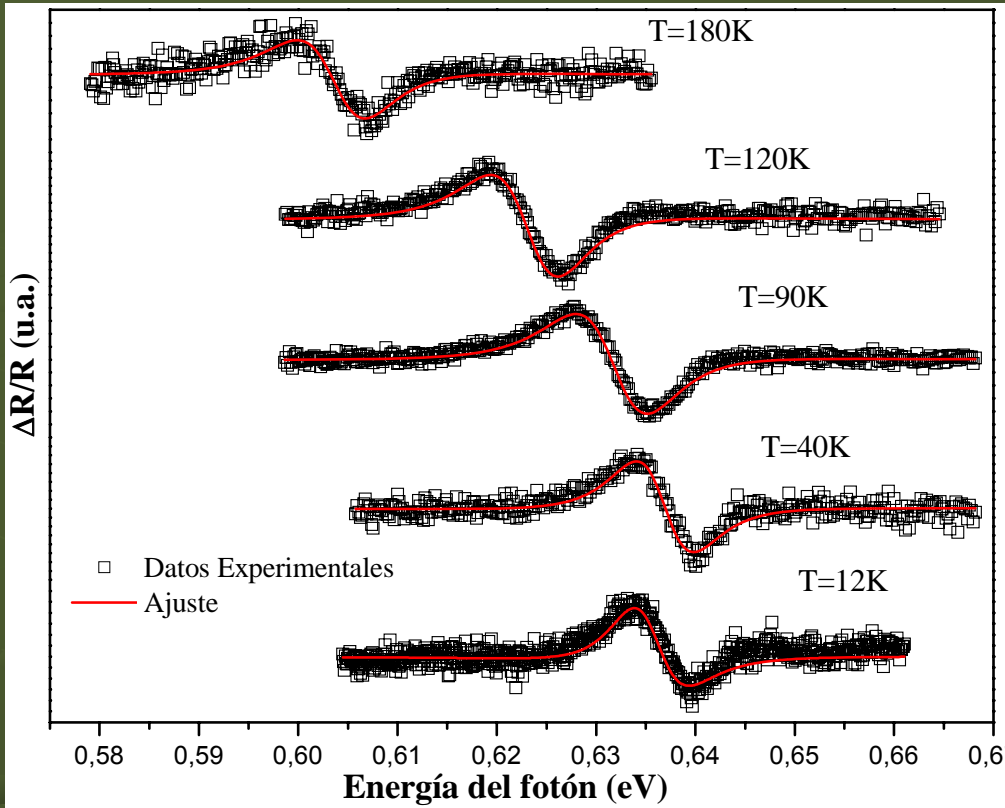
$$x=0.14, y=0.12$$

# Estequiometría



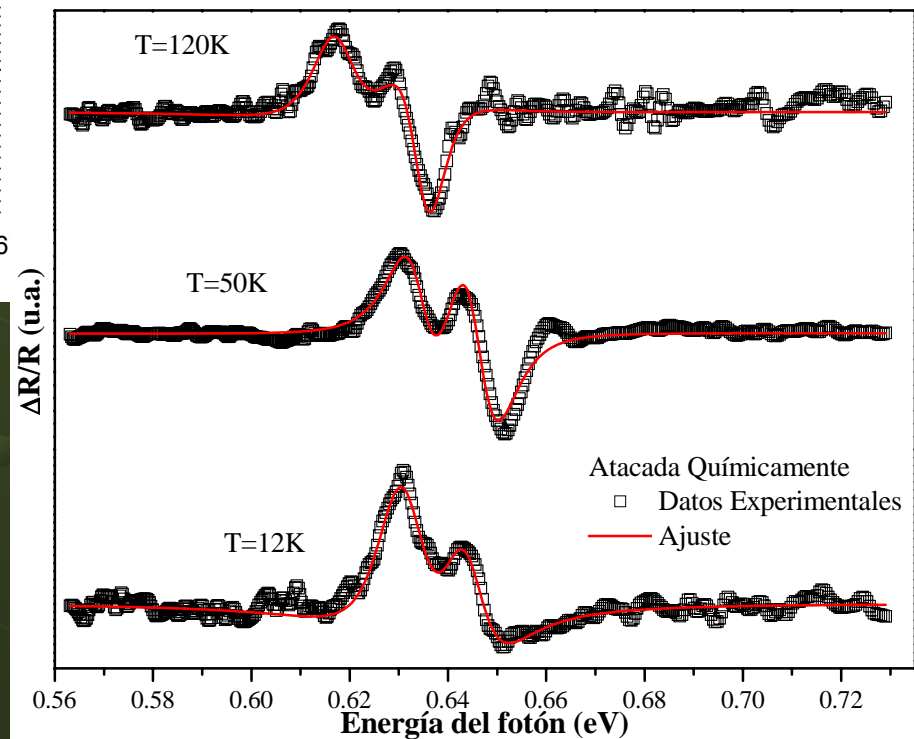
$M46, Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$   
 $x=0.14, y=0.12$

# Ataque Químico



Espectros antes y después del ataque químico.

Esesor del decapado

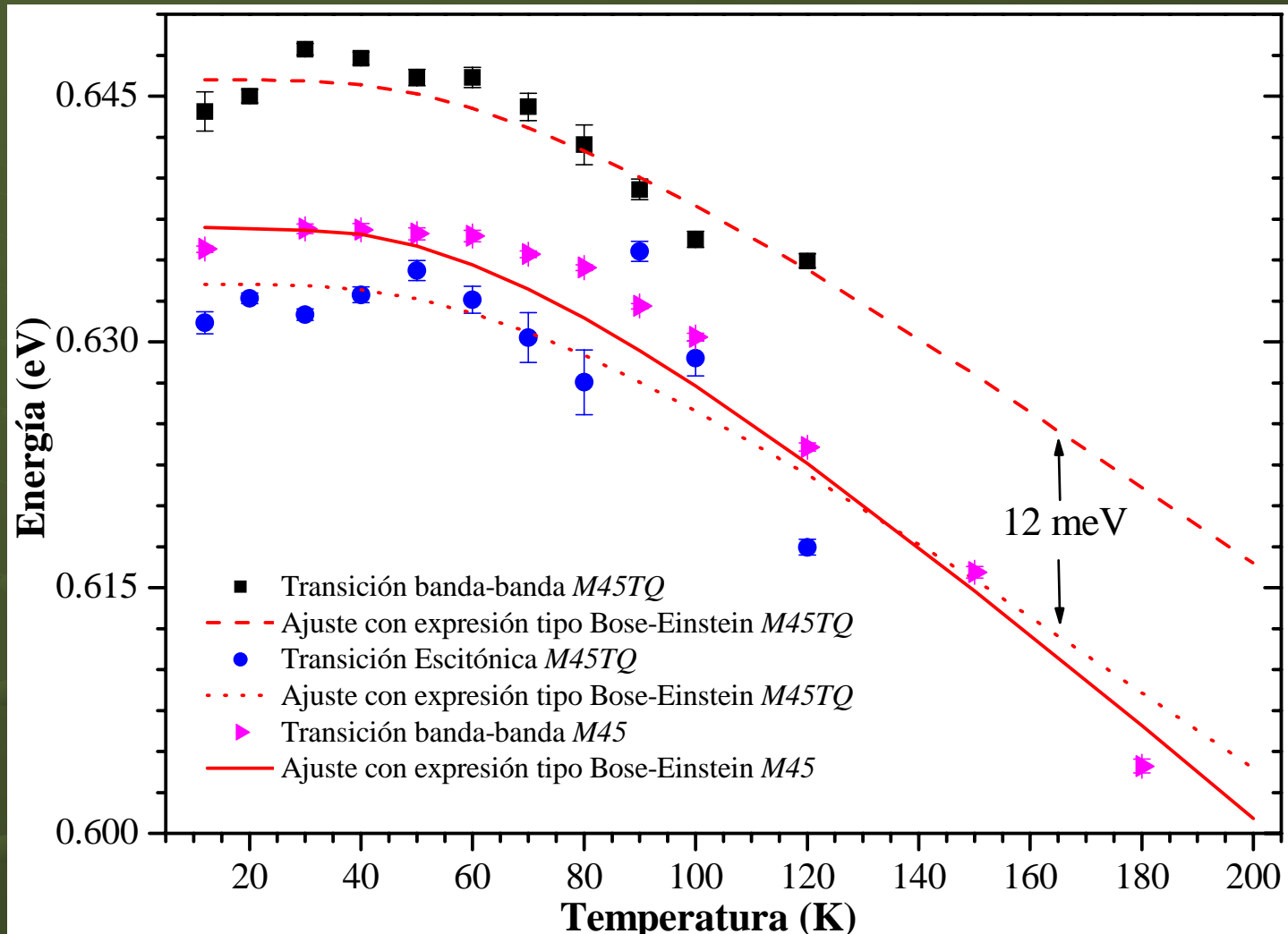


Atacada Químicamente

□ Datos Experimentales

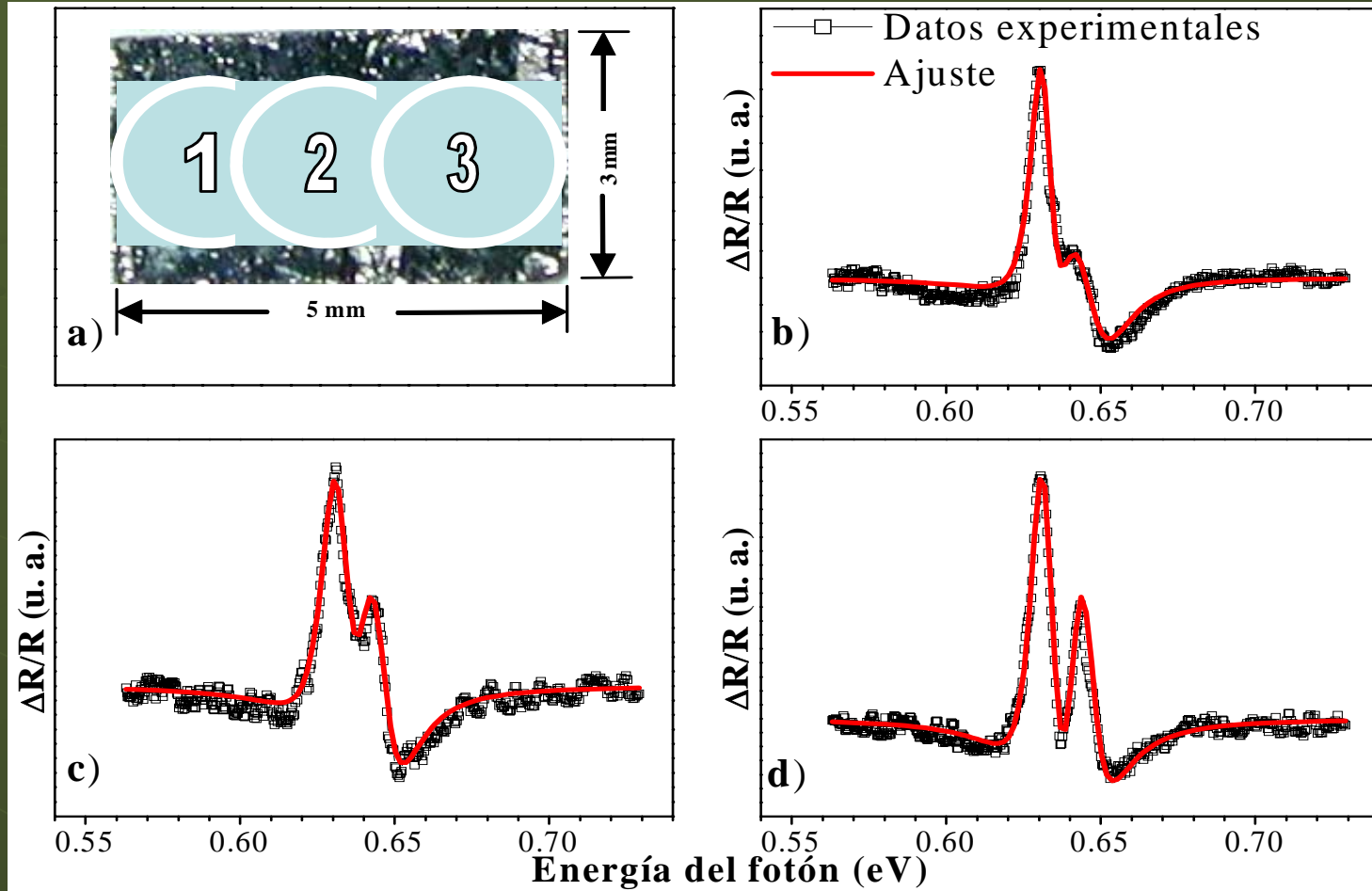
— Ajuste

# Ataque Químico



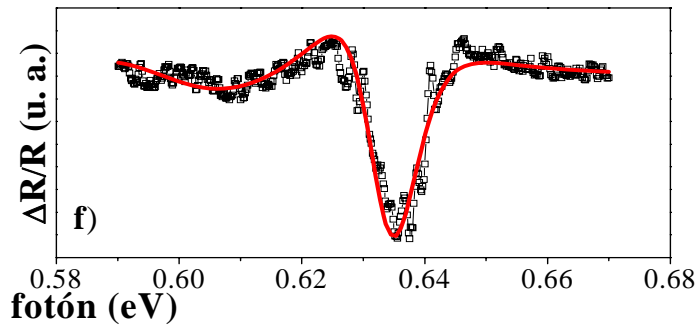
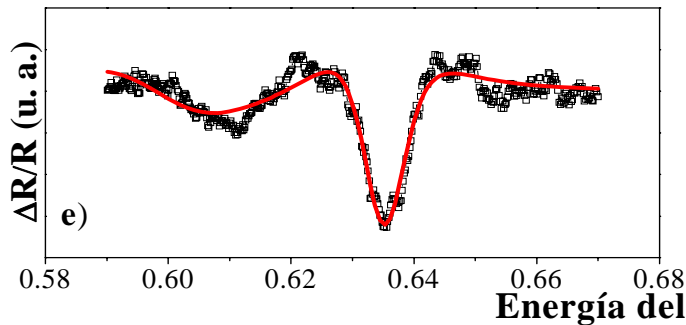
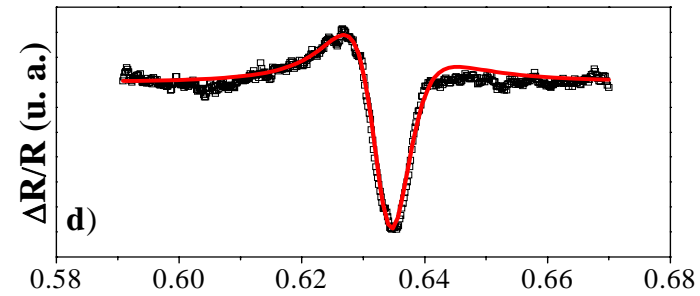
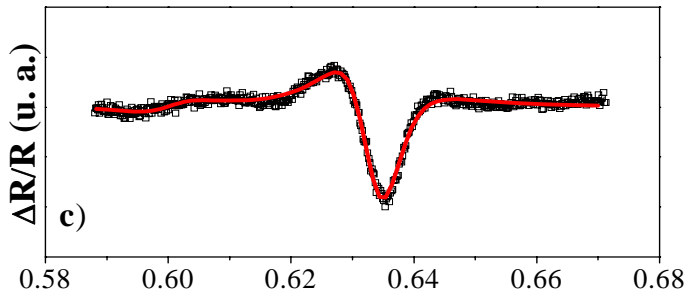
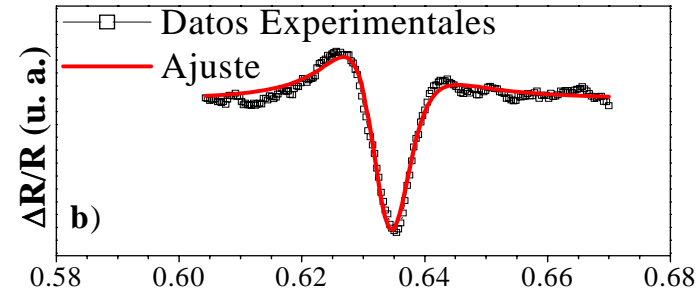
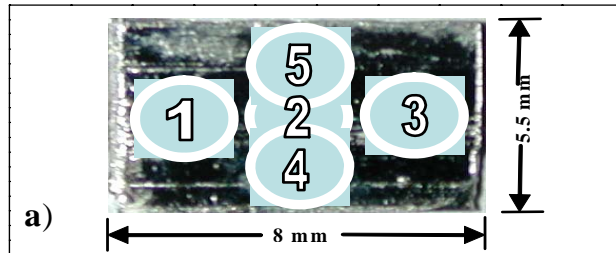
$\Delta E = 12\text{meV}$ , valor reportado por Iyer *et al* (2000).

# Estudio por Regiones



M45TQ  
FR a  $T=12\text{K}$

# Estudio por Regiones



AS12

FR a T=12K



# Conclusiones

- Los espectros experimentales de fotorreflectancia de  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  se ajustaron utilizando formas de línea lorentzianas que consideran una transición banda-banda y una transición excitónica.
- Las dependencias de las energías de transición con la temperatura fueron descritas mediante expresiones de Varshni y de Manoogian-Woolley, siendo esta última la que reproduce mejor los datos experimentales a baja temperatura, tal como ha sido reportada para otros materiales semiconductores.
- Encontramos que la energía de la transición excitónica se encuentra entre 9 meV y 12 meV, valor que concuerda con lo reportado por Iyer.
- La dependencia del parámetro de ensanchamiento con la temperatura puede ser descrita utilizando relaciones del tipo Bose-Einstein, lo cual sugiere que el proceso dispersivo principal en la muestra se encuentra relacionado con la interacción electrón-fonón.

# Conclusiones

- Por medio de la técnica de fotorreflectancia en el infrarrojo, se estudió una muestra tratada químicamente de  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/GaSb$ , se encontró que los parámetros  $E_0(T)$  y  $\Gamma(T)$  se ven fuertemente influenciados por el decapado de la superficie.
- Se resaltó una contribución excitónica en los espectros de fotorreflectancia después del ataque químico indicando un mejoramiento principalmente en la superficie de la película.
- Realizamos un estudio por regiones tomando espectros de FR-IR en dos películas de  $GaInAsSb/GaSb$ . Se lograron identificar las regiones en las cuales las muestras presentan una alta densidad de defectos.
- Se determinó cualitativamente que la muestra AS12 presenta una mayor densidad de defectos que la M45TQ y que la presencia de excitones en estos espectros indican una alta calidad cristalina.

# Perspectivas

- Tomar espectros de Fotorreflectancia Diferencial PRD aprovechando que permite medir a diferentes profundidades, con el fin de resaltar las estructuras debidas al confinamiento cuántico.
- Realizar recocidos a atmósfera controla y determinar si cambia la respuesta óptica de los pozos cuánticos.
- Realizar un estudio comparativo entre la estequiometría obtenida a partir de la respuesta óptica y otras técnicas que permitan el análisis de la composición.

# Publicaciones

- G. A. Álvarez, J. J. Prías-Barragán, D. G. Espinosa-Arbeláez, L. Tirado-Mejía y H. Ariza-Calderón, **FOTORREFLECTANCIA A BAJA TEMPERATURA EN GaInAsSb/GaSb** Revista colombiana de física, Vol. 37 -1 2005.
- J. J. Prías-Barragán, D. G. Espinosa-Arbeláez, G. A. Álvarez, L. Tirado-Mejía y H. Ariza-Calderón, **CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE GaSb Y  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ /GaSb POR MEDIO DE FOTORREFLECTANCIA EN EL INFRARROJO CERCANO**, Revista colombiana de física Vol. 37 -1 de 2005.
- D. G. Espinosa Arbeláez, J. J. Prías-Barragán, G. A. Álvarez. L. Tirado Mejía y H. Ariza-Calderón, **INFLUENCIA DEL ATAQUE QUÍMICO EN LAS PROPIEDADES ÓPTICAS DE PELÍCULAS EPITAXIALES DE GaInAsSb** Revista colombiana de física Vol. 37-1 de 2005.
- C. Vargas-Hernández, J. J. Agudelo, D. G. Espinosa, **ESTUDIOS POR FOTOLUMINISCENCIA Y FOTORREFLECTANCIA DE SUBSTRATOS DE GaAs CON Y SIN TRATAMIENTO QUÍMICO**, Revista colombiana de física, Vol. 36-1 2004
- D. G. Espinosa-Arbeláez, J. J. Prías-Barragán, G. A. Álvarez, L. Torres, G. Fonthal y H. Ariza-Calderón, **DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA DE LA ENERGÍA DE LA TRANSICIÓN FUNDAMENTAL Y EL PARÁMETRO DE ENSANCHAMIENTO EN MUESTRAS GaInAsSb DETERMINADA POR FOTORREFLECTANCIA**
- J. J. Prías-Barragán, D. G. Espinosa-Arbeláez, G. A. Álvarez, G. Fonthal, L. Tirado-Mejía y H. Ariza-Calderón, **ESTUDIO ZONAL DE PELÍCULAS DE GaInAsSb/GaSb POR FOTORREFLECTANCIA**
- J. Segura, L. Tirado-Mejía, C. Ortiz, D. G. Espinosa, A. Villada, D. F. Gutiérrez, P. Prieto, H. Ariza-Calderón, **CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DE  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$**



# Trabajos en Eventos

- **XXI Congreso Nacional de Física.** Barranquilla: 2005
  - *“Dependencia de la temperatura de la energía de la transición fundamental en muestras GaInAsSb determinada por fotorreflectancia”*
  - *“Estudio de la variación espacial de los espectros de fotorreflectancia en GaInAsSb/GaSb”*
- **VI Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada.** Medellín: 2004
  - *“Caracterización óptica de GaSb y GaInAsSb/GaSb por medio de fotorreflectancia en el infrarrojo”*
  - *“Estudio de heteroestructuras de CdTe/GaAs (100) por medio de fotorreflectancia a temperatura variable In: VI Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada”*
  - *“Fotorreflectancia a baja temperatura en GaInAsSb/GaSb”*
  - *“Influencia del ataque químico en las propiedades ópticas de películas epitaxiales de GaInAsSb”*
- **XX Congreso Nacional de Física.** Armenia: 2003
  - *“Fotorreflectancia diferencial en Películas de CdTe crecidas por MBE”*
  - *“Inhomogeneidad de esfuerzos en películas de Zn Se crecidas sobre substratos de GaAs”*
- **VIII Encuentro nacional de óptica.** Popayán: 2002
  - *“Evolución de la energía de los puntos críticos de  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  en el rango del visible”*

# Referencias

- [1]. L. H. Kuo, K. Kimura, T. Yasuda, S. Miwa, C. G. Jin, K. Tanaka, and
- [2] O. de Melo. C. Vargas-Hernández and I. Hernández Calderón, Appl. Phys. Lett, 86-1, 43-45, 2003.
- [3] E. Kurtz, B. Dal Don, M. Schmidt, H.Kalt, C. Klingshirn, D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Gerthsen, Thin Solid Films 412 (2002) 89.
- [4] H.Preis, K. Fuchs, W. Gebhardt, Phys. Stat. Sol. (b) 224 (2001) 527
- [5] C. Vargas-Hernández, O. de Melo, I. Hernández Calderón, Phys. Stat. Sol. b, 230, 2002.
- [6] K.G. Chinyama, I.V. Bradley, K.P. O'Donnell, P.I. Kuznetsov, A. P. Chernushich, v. Luzanov, J. Crystal Growth, 184 (1998) 298.
- [7] K.P. O'Donnell and P.G. Middleton, properties of Wide bandgap II-VI semiconductors, ed Rameshwar Bhargava (Nanocrystals technology. USA)
- [8] K.P. O'Donnell, X. Chen, Appl. Phys. Lett. Vol 58, 25 1991
- [9] X. Chen, Photoluminescence Studies of II-VI Compound strained layer superlattices, tesis Doctoral, university of Strathclyde, UK, 1991
- [10] W. Shan, J. J. Song, H. Luo, J. K. Furdyna, Phys. Rev. B, 50 1994
- [11] R. Eisberg and R. Resnick, Física cuántica átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas.
- [12] Physics of optoelectronic devices by Shun Lien Chuang ed. John Wiley and Sons, Inc. 1995. pag. 91
- [13] Vargas Hernandez, Carlos, Crecimiento y caracterización de materiales semiconductores, Tesis Doctoral.
- [14] G. A. Álvarez, J. J. Prías-Barragán, D. G. Espinosa-Arbeláez, L. Tirado-Mejía y H. Ariza-Calderón. Rev. Col. Fís. 37, 138 (2005).
- [15] S. Iyer, S. Hegde, Ali Abul-Fadl y W. Mitchel. Phys. Rev. B. 47, 1329 (1993).
- [16] Marín Muñoz, Fred H. Pollak, M.B. Zakia, N.B. Patel, J.L. Herrera Perez, Phys. Rev. B, 62, 16600 (2000).
- [17] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys. 89, 5815 (2001).
- [18] D.E. Aspnes, Surf. Sci, 37, 418 (1978).
- [18] M.Muñoz, K.Wei And Fred H. Pollak, J. Appl. Phys, 87, 1780 (2000).
- [19] S. Iyer, S. Hegde, K.K. Bajaj, Ali Abul Fadl, W. Mitchel, J. Appl. Phys, 73, 3958 (2000).
- [20] S. Iyer. S. Hedge. Ali Abul-Fadl. y W. Mitchel. Phys. Rev. B. 47, 1329 (1993).