

La clase pasada vimos:

Oscilaciones y frecuencia de plasma

Heteroestructuras de semiconductores

Definiciones y ejemplos

Aleaciones ternarias

En esta clase veremos:

Técnicas de crecimiento de cristales capa por capa

Ley de Vegard

Ingeniería de bandas: Regla de Anderson

Ejemplos de estructuras cuánticas

REPASO

# Oscilaciones de plasma

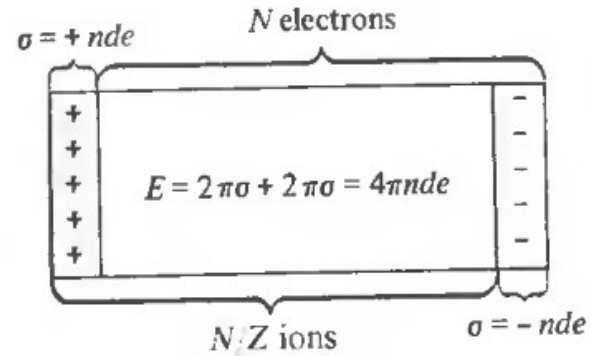
Oscilaciones de la densidad: pedimos que se anule :

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{4\pi i \sigma}{\omega}$$

Frecuencia de plasma:

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi n e^2}{m}$$

**Figure 1.5**  
Simple model of a plasma oscillation.



REPASO

# Heteroestructuras

Estructuras de semiconductores compuestas por más de un material --- normalmente en capas (layers)

¿ Qué es  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ? (arseniuro de galio-aluminio)

IV

	B	C	N	O
	RHO	HEX	complex HCP	P-cubic
	Al	Si	P	S
	FCC	DC	ORTH	ORTH
Zn	Ga	Ge	As	Se
HCP	complex F-ORTH	DC	P-RHO	complex HEX
Cd	In	Sn	Sb	Te
HCP	BCT	DT	P-RHO	complex HEX
Hg	Tl	Pb	Bi	Po
RHO	HCP	FCC	RHO	SC

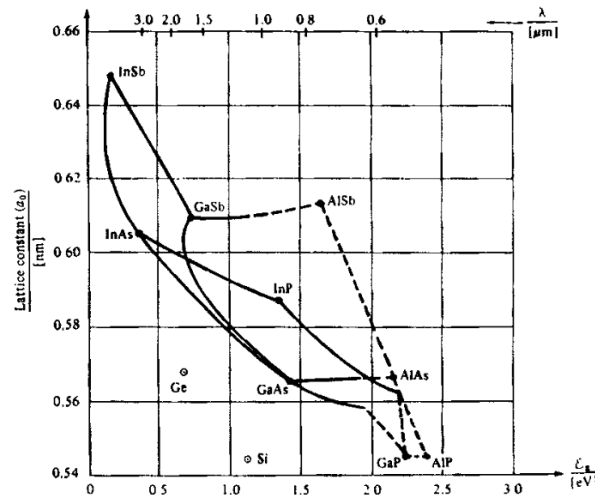
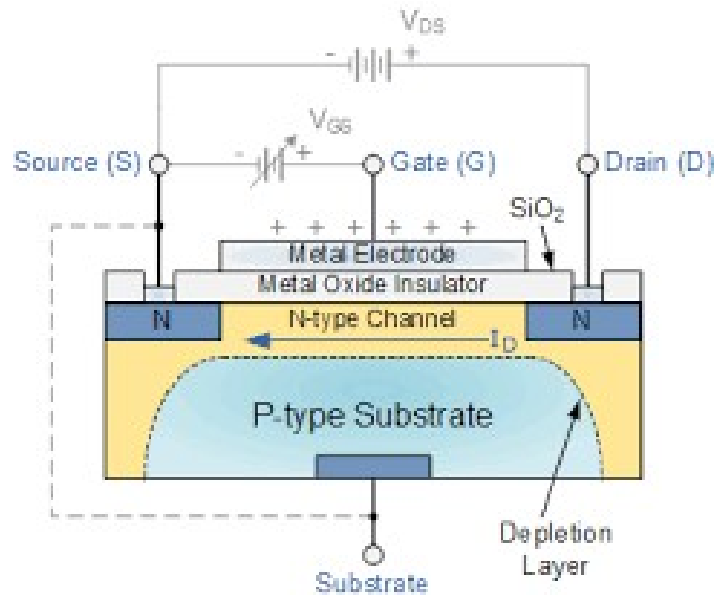


FIGURE 3.1. Plot of the lattice constant of various semiconductors against their minimum band gap  $E_g$ , expressed in eV and as a wavelength. Full lines show a direct band gap, with dashed lines for an indirect gap. [From Gowar (1993).]

La heteroestructura más importante es Si-SiO<sub>2</sub>

Se usa en los MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)



$$\text{mobility } \mu = e\tau/m$$

below about  $4 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$

# Técnicas de crecimiento de cristales

Las heteroestructuras de semiconductores III-V pueden tener Interfaces más perfectas y entonces mayor *mobility* , pero requieren:

### Técnicas de crecimiento de cristales capa por capa

MBE : molecular-beam epitaxy

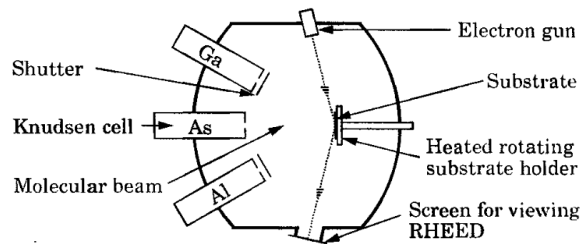


FIGURE 3.2. Highly simplified schematic diagram of an MBE machine showing three K-cells, the substrate on its rotating heated holder, and RHEED for analyzing the surface.

MOCVD : metal-organic chemical vapor deposition

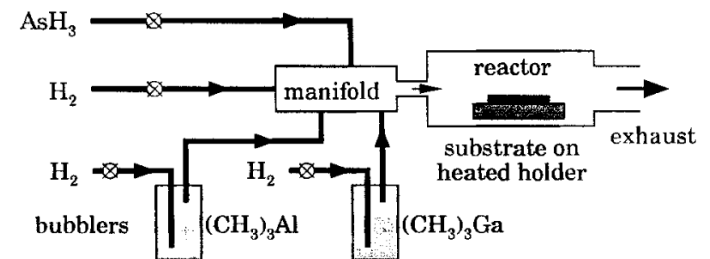


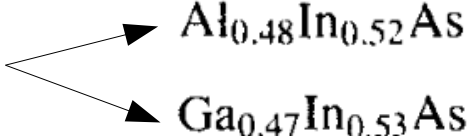
FIGURE 3.3. Simplified diagram of an MOCVD reactor.

Ley de Vegard: La **constante de red de una aleación** está dada por una combinación lineal de la de sus componentes.

Ejemplo: lattice constant of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  is given by  $xa_{\text{AlAs}} + (1 - x)a_{\text{GaAs}}$ .

Menos de 0.15% de mismatch entre AlAs y GaAs, se pueden combinar en capas con poco estrés, y también con  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .

Usando GaAs como sustrato no hay muchas otras posibilidades con buen lattice match.

Otro sustrato: InP   $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$   
 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$

Buen lattice match, usado en dispositivos electrónicos de alta velocidad

Si se abandona el lattice match, se obtienen *strained layers*, capas tensionadas.

# Ingeniería de bandas



# Ingeniería de bandas

## Objetivos:

Modificar el comportamiento de electrones y huecos.

Crear diferentes tipos de confinamiento cuántico.

Controlar la cantidad de portadores de carga.

Modificar las interacciones espín-órbita

Ingeniería del factor  $g$  de Landé (efecto Zeeman)

Aplicaciones: *electrónica, opto-electrónica, espintrónica*

# Ingeniería de bandas

Los materiales tienen distintos gaps; qué pasa cuando crecemos dos materiales juntos?  
Hay que ver que pasa con  $E_c$  y  $E_v$

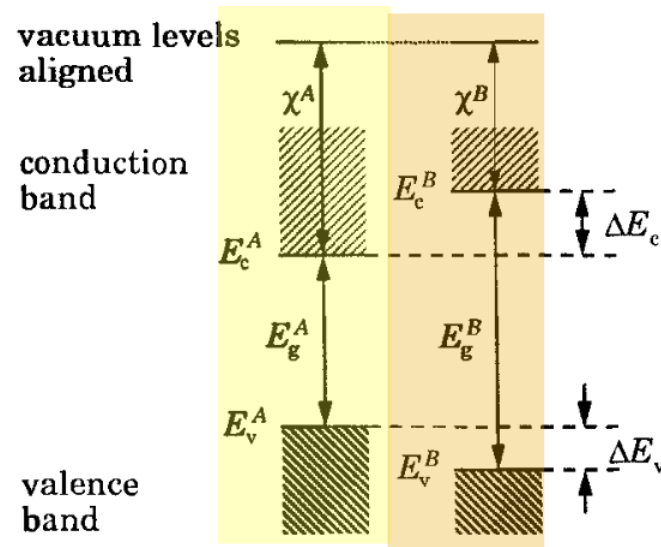
Sean materiales A y B

**Afinidad electrónica**  $\chi$  : distancia entre energía del vacío y mínimo de la banda de conducción.

**Regla de Anderson:** se alinean los niveles de vacío de ambos materiales.

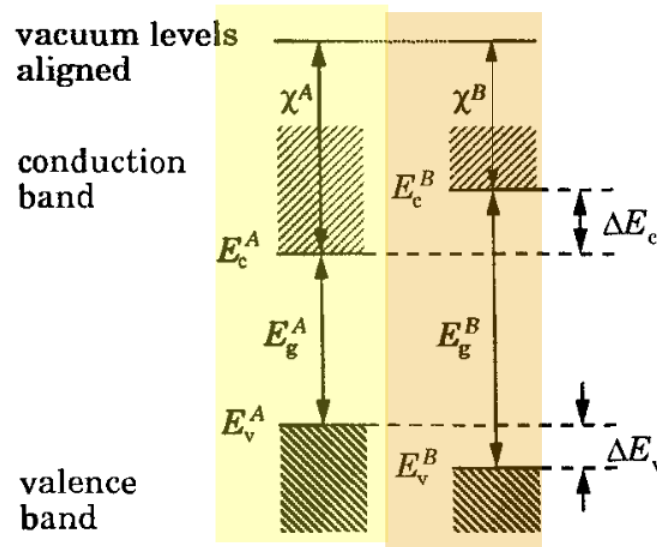


Ubica a  $E_c^A$  y  $E_c^B$



**FIGURE 3.4.** Anderson's rule for the alignment of the bands at a heterojunction between materials A and B, based on aligning the vacuum levels.

# Ingeniería de bandas



$$\Delta E_c \equiv E_c^B - E_c^A = \chi^A - \chi^B$$

$$\text{GaAs has } \chi = 4.07 \text{ eV}$$

$$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As has } \chi = 3.74 \text{ eV}$$

$$\Delta E_c = 0.33 \text{ eV}$$

$$+ \Delta E_v = 0.04 \text{ eV}$$

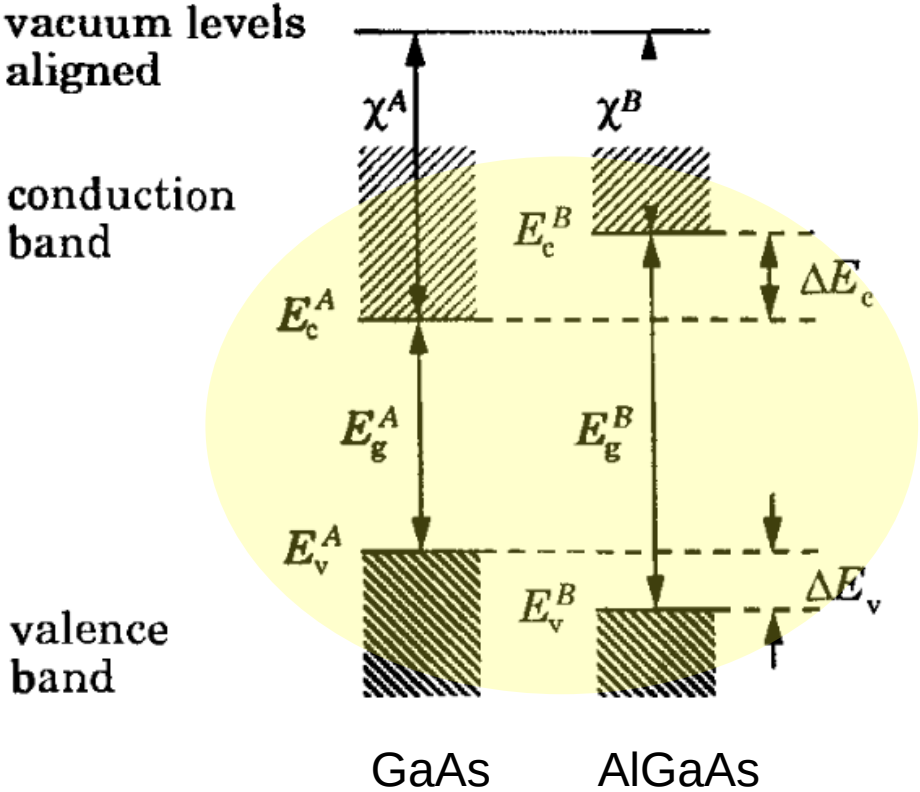
---


$$\Delta E_g = 0.37 \text{ eV}$$

**FIGURE 3.4.** Anderson's rule for the alignment of the bands at a heterojunction between materials *A* and *B*, based on aligning the vacuum levels.

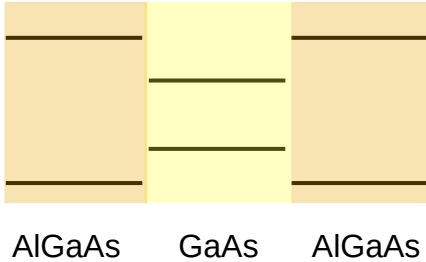
$Q = \Delta E_c / \Delta E_g \approx 0.85$  was long used for  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , but the smaller value  $Q = 0.62$  is now firmly established for  $x < 0.45$  where the gap remains direct.

# Ingeniería de bandas



Arreglo de las bandas Tipo I o *straddling*, a caballo

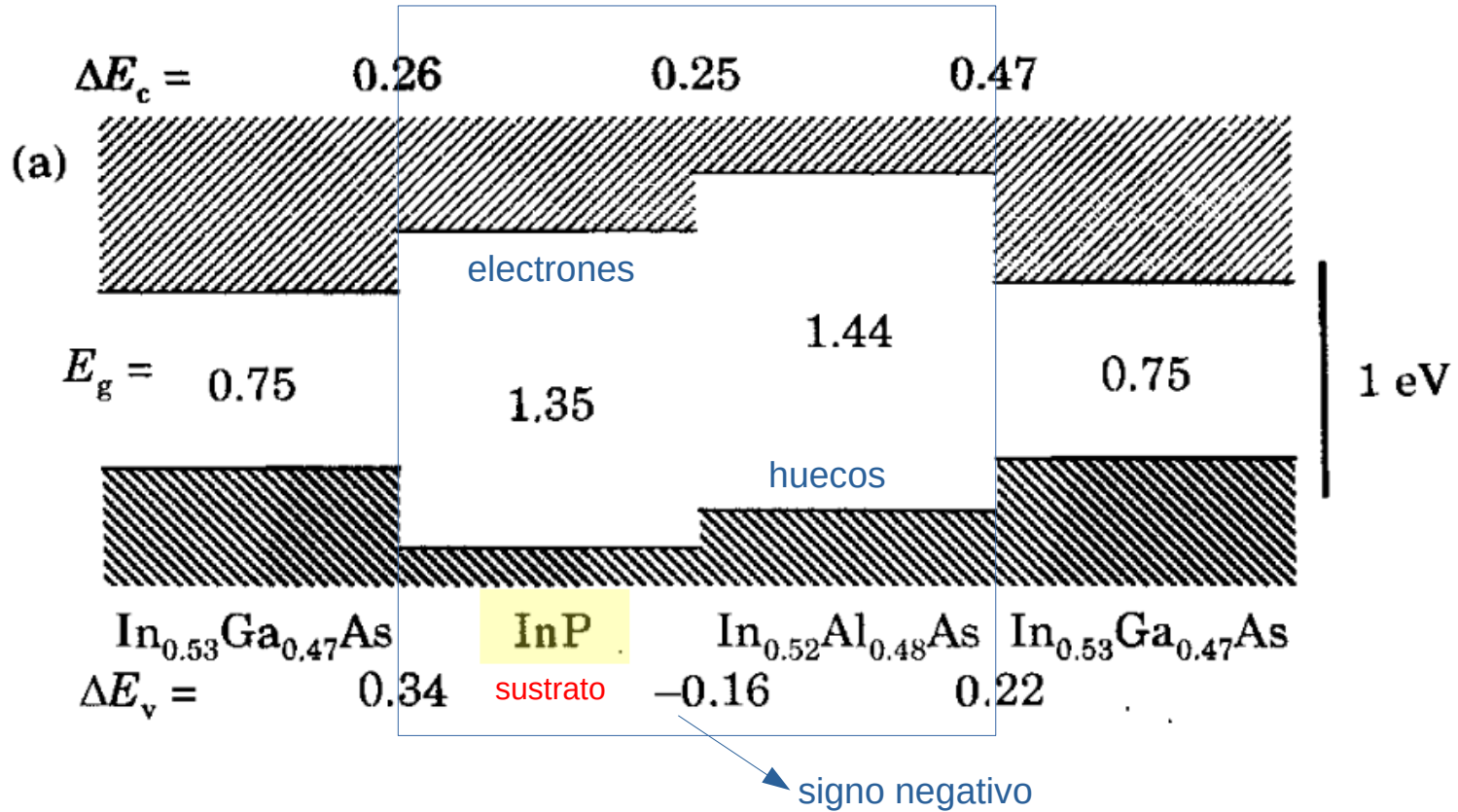
En un sandwich BAB se confinan en A tanto electrones como huecos



# Ingeniería de bandas

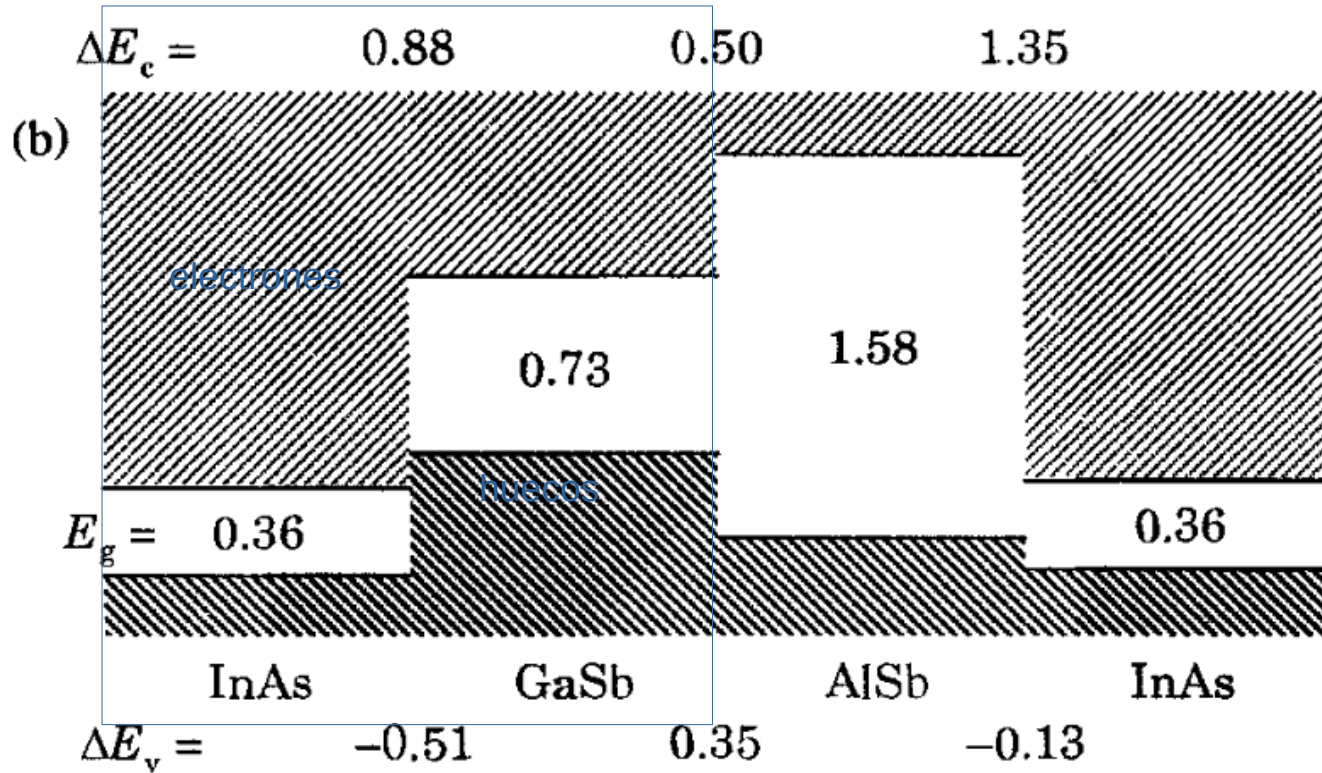
Conjunto de materiales con un buen lattice match

Tipo II, escalonado o alternado

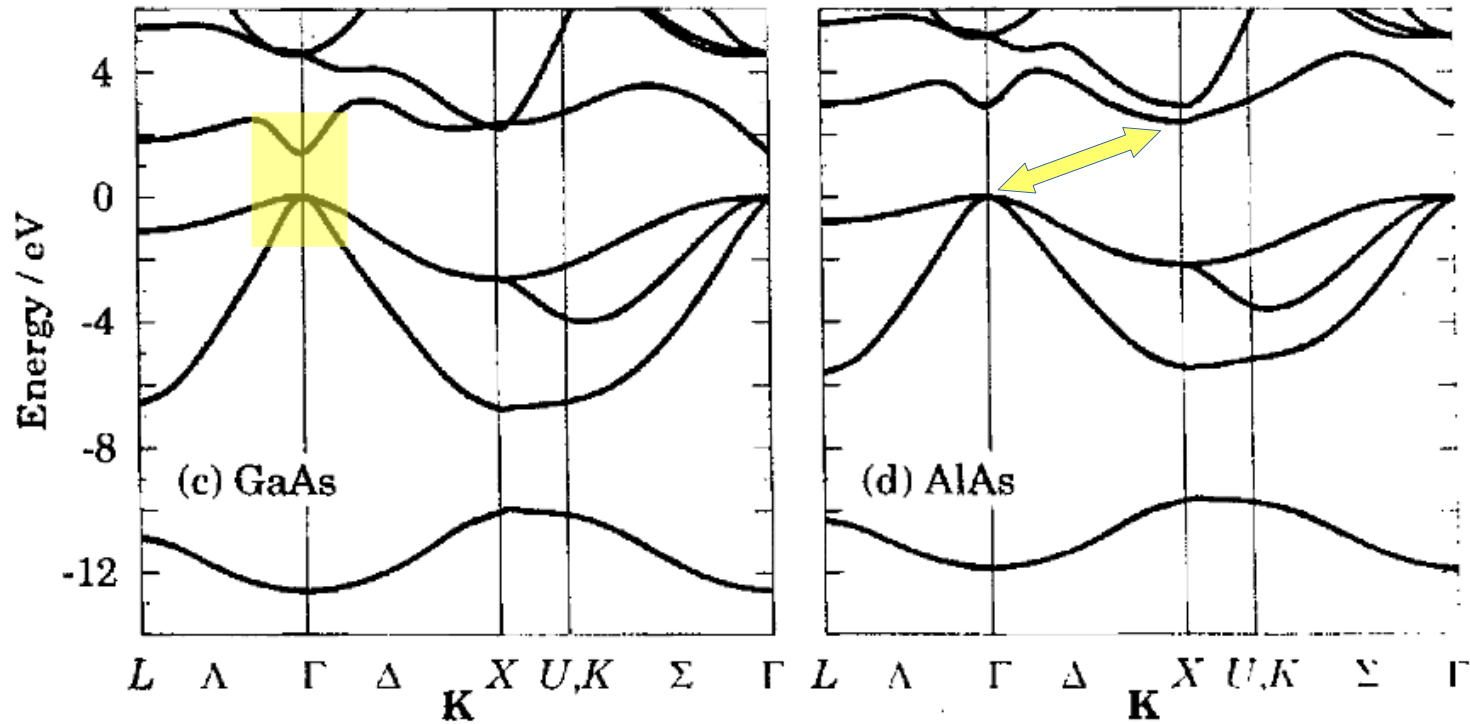


# Ingeniería de bandas

Tipo III, o gap roto

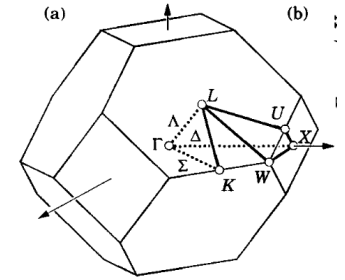
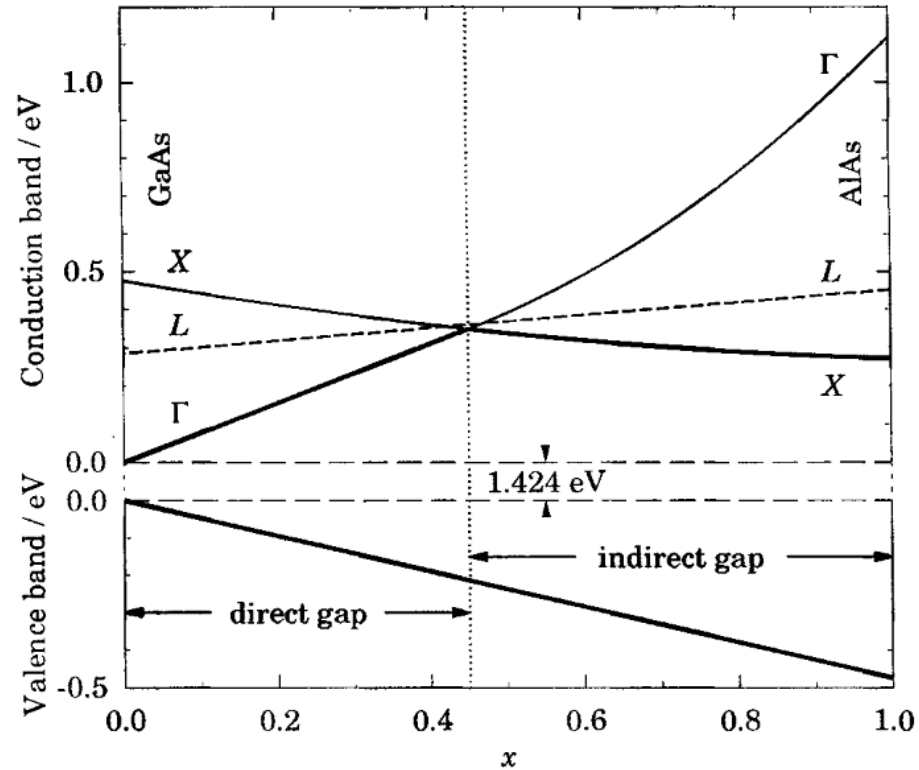


Otras complicaciones: cambios en los mínimos de las bandas (gap directo o indirecto), masas efectivas, degeneración de valles (valley degeneracy)



El ancho del gap oscila entre 1.42 eV (GaAs) y 2.16 eV (AlAs). Para  $x < 0.4$  es un semiconductor directo.

# Ingeniería de bandas



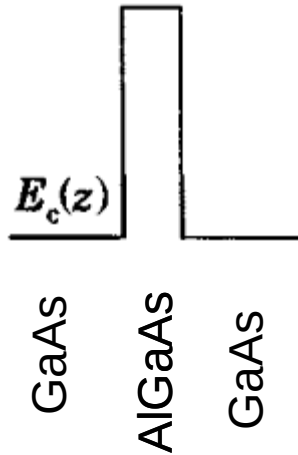
**FIGURE 3.6.** Energies of the bottoms of the three lowest conduction bands and the top of the valence band in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  as a function of the composition  $x$ . [Redrawn from Yu, McCaldin, and McGill (1992) and Adachi (1985).]



## Ejemplos de estructuras cuánticas

# Ejemplos de estructuras en capas: barreras y pozos cuánticos

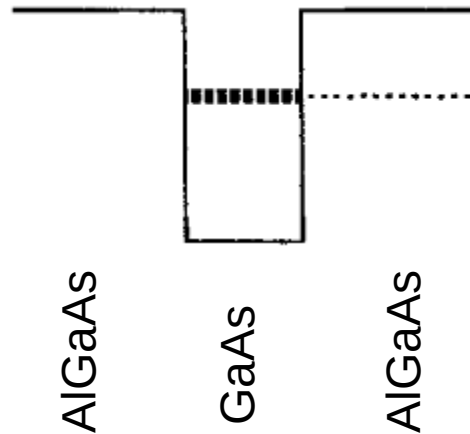
Barrera túnel



Una aplicación: válvula de control de inyección de electrones en transistores de "hot electrons", gracias a la fuerte dependencia del coeficiente de transmisión con la energía

Mínimo de la banda de conducción que varía en el espacio

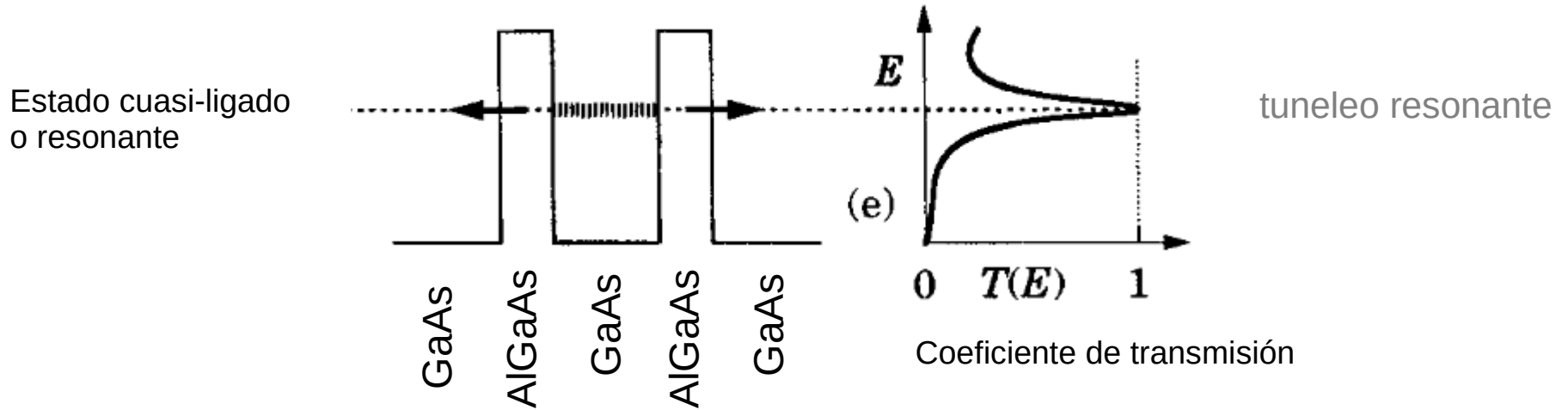
Pozo cuántico



Estado ligado (en una dirección,  $z$ , dirección del crecimiento del cristal)

# Ejemplos de estructuras en capas: doble barrera

double-barrier structure provides the active region of a *resonant-tunnelling diode* and is a close analogue of an optical Fabry–Pérot etalon.

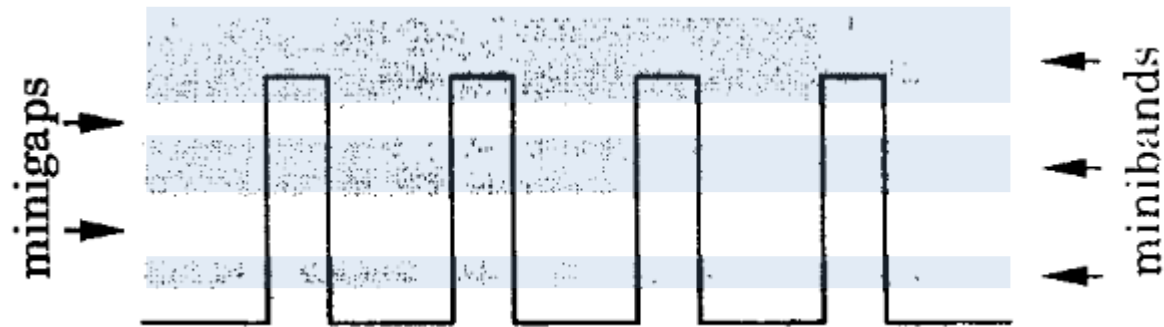


Cálculo en la Sección 5.5, libro de Davies

$T \approx T_L T_R$ . Fuera de resonancia

Pero  $T = 1$  en la resonancia para barreras iguales

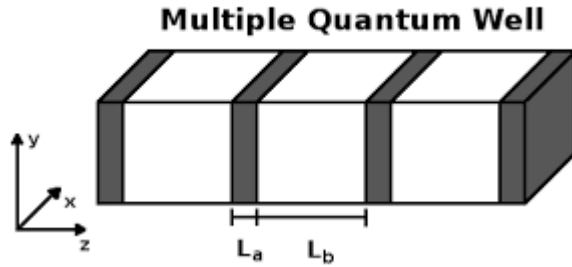
## Ejemplos de estructuras en capas: superlattice



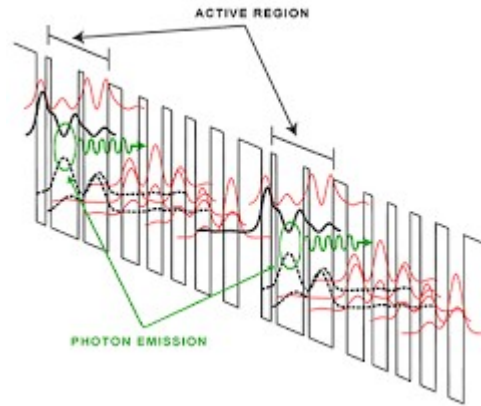
Hay periodicidad, se aplica de nuevo el teorema de Bloch: *bandas de energía*

**name of minibands. The band structure can be tuned by varying the composition and thickness of the layers. Superlattices have been used to filter the energy of electrons, allowing only those within the minibands to pass or reflecting those in the minigaps, and absorption between the minibands can be used to detect infrared radiation.**

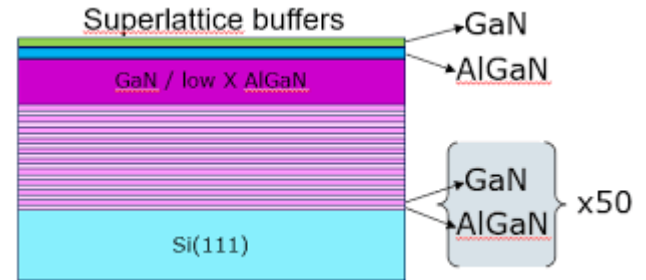
# Ejemplos de estructuras en capas: superlattices



Cuando las barreras son anchas



Quantum cascade laser



Mejoran la pureza de la estructura, atrapan impurezas

# Resumen de la clase 5

## Heteroestructuras de semiconductores

Técnicas de crecimiento de cristales capa por capa

Ley de Vegard

Ingeniería de bandas:

Regla de Anderson

Tipos de alineación de bandas

Ejemplos de estructuras cuánticas

Barrera, pozo, doble barrera, superlattice