CLASE 4 - martes 06/04/2021

La clase pasada vimos:

- Efecto Hall en el modelo de Drude.
- Conductividad AC (alterna u óptica) en el modelo de Drude.
- Función dieléctrica: condición de transparencia de metales
- Oscilaciones y frecuencia de plasma

En esta clase veremos:

- Oscilaciones y frecuencia de plasma
- Hetero-estructuras: Sistemas semiconductores de baja dimensionalidad

REPASO

Modelo de Drude

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}; \quad \sigma = \frac{ne^2\tau}{m}.$$

Conductividad DC o estática

$$R_H = \frac{E_y}{j_x H}. \longrightarrow R_H = -\frac{1}{nec}.$$

Coeficiente de Hall

$$\mathbf{E}(t) = \mathrm{Re}\,(\mathbf{E}(\omega)e^{-i\omega t}).$$

$$\mathbf{j}(\omega) = \sigma(\omega)\mathbf{E}(\omega),$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 - i\omega\tau}, \quad \sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m}.$$

Conductividad AC u óptica

REPASO

Modelo de Drude

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\omega^2}{c^2}\epsilon(\omega)\mathbf{E}$$

Constante/función dieléctrica

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

Relación entre conductividad y función dieléctrica!

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

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

para frecuencia alta $\omega\tau \gg 1$

$\omega < \omega_p$ ⟶ el metal es *opaco*

$\omega > \omega_p$ ⟶ el metal es *transparente*

Modelo de Drude

Oscilaciones de carga: plasmones

El gas de electrones puede tener oscilaciones de la densidad de carga

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi n e^2}{m} \qquad (1.38)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j}(\omega) = i\omega\rho(\omega).$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E}(\omega) = 4\pi\rho(\omega).$$

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, \omega) = \sigma(\omega)\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega).$$

$$\rightarrow \quad i\omega\rho(\omega) = 4\pi\sigma(\omega)\rho(\omega).$$

Pedimos que $\rho(\omega)$ no se anule

This has a solution provided that

$$1 + \frac{4\pi i\sigma(\omega)}{\omega} = 0,$$

O sea, pedimos que se anule : $\epsilon(\omega) = 1 + \frac{4\pi i\sigma}{\omega}$

análogo a la condición para pasar de opaco a transparente.

Modelo de Drude

Oscilaciones de carga: plasmones

The nature of this charge density wave, known as a plasma oscillation or plasmon, can be understood in terms of a very simple model.[23] Imagine displacing the entire electron gas, as a whole, through a distance d with respect to the fixed positive background of the ions (Figure 1.5).[24] The resulting surface charge gives rise to an electric field of magnitude $4\pi\sigma$, where σ is the charge per unit area[25] at either end of the slab.

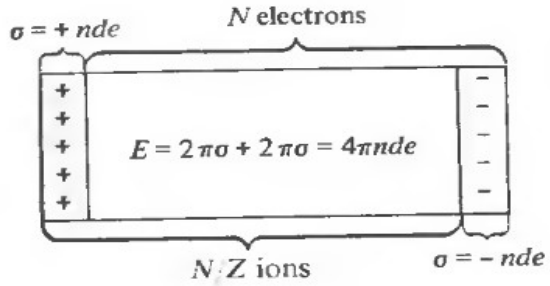


Figure 1.5
Simple model of a plasma oscillation.

Consequently the electron gas as a whole will obey the equation of motion:

$$Nm\ddot{d} = -Ne|4\pi\sigma| = -Ne(4\pi nde) = -4\pi ne^2 Nd, \qquad (1.46)$$

which leads to oscillation at the plasma frequency.

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

Few direct observations have been made of plasmons. Perhaps the most notable is the observation of energy losses in multiples of $\hbar\omega_p$ when electrons are fired through thin, metallic films.[26] Nevertheless, the possibility of their excitation in the course of other electronic processes must always be borne in mind.

[26] C. J. Powell and J. B. Swan, *Phys. Rev.* **115**, 869 (1959).

Sistemas de baja dimensionalidad

2. Sistemas de baja dimensionalidad

Propiedades generales, crecimiento y dopaje. Ingeniería de bandas de energía. Ejemplos: pozos, cables y puntos cuánticos. Aproximación de función envolvente. Gas de electrones quasi-bidimensional. Ocupación de subbandas.

THE PHYSICS OF LOW-DIMENSIONAL SEMICONDUCTORS

AN INTRODUCTION

JOHN H. DAVIES

Glasgow University

3 HETEROSTRUCTURES

Heteroestructura

Estructura de semiconductores compuesta por más de un material --- normalmente en capas (layers)

Objetivo: ingeniería de bandas (band engineering)

$GaAs–Al_xGa_{1-x}As$

gran clásico, muy estudiado,
Efecto Hall cuántico

Inicialmente se buscaron combinaciones con buen **matching** del **parámetro de red** para evitar la **tensión** en las capas sucesivas, pero cada vez se abandona más esa idea y se trabaja con capas tensionadas (strained layers).

Crystal Structures of Elements at STP

STP - Standard Temperature and Pressure

IV

BCC - Body-centered Cubic
FCC - Face-centered Cubic
HEX - Simple Hexagonal
HCP - Close-packed Hexagonal
DHCP - Double Close-packed Hexagonal
RHO - Rhombohedral

BCT - Body-centered Tetragonal
ORTH - Orthorhombic
DC - Diamond Cubic
DT - Diamond Tetragonal
SC - Simple Cubic
* predicted crystal structure

H HEX																	He HCP
Li BCC	Be HCP											B RHO	C HEX	N complex	O P-cubic	F cubic	Ne FCC
Na BCC	Mg HCP											Al FCC	Si DC	P ORTH	S ORTH	Cl complex ORTH	Ar FCC
K BCC	Ca FCC	Sc HCP	Ti HCP	V BCC	Cr BCC	Mn α-Mn	Fe BCC	Co HCP	Ni FCC	Cu FCC	Zn HCP	Ga complex F-ORTH	Ge DC	As P-RHO	Se complex HEX	Br complex ORTH	Kr FCC
Rb BCC	Sr FCC	Y HCP	Zr HCP	Nb BCC	Mo BCC	Tc HCP	Ru HCP	Rh FCC	Pd FCC	Ag FCC	Cd HCP	In BCT	Sn DT	Sb P-RHO	Te complex HEX	I complex ORTH	Xe FCC
Cs BCC	Ba BCC	57-71	Hf HCP	Ta BCC	W BCC	Re HCP	Os HCP	Ir FCC	Pt FCC	Au FCC	Hg RHO	Tl HCP	Pb FCC	Bi RHO	Po SC	At CC*	Rn FCC*
Fr BCC*	Ra BCC	89-103	Rf HCP*	Db BCC*	Sg BCC*	Bh HCP*	Hs HCP*	Mt FCC*	Ds BCC*	Rg BCC*	Cn HCP*	Nn HCP*	Fl FCC*	Mc UNKNOWN	Lv UNKNOWN	Ts UNKNOWN	Og FCC*

La DHCP	Ce DHCP	Pr DHCP	Nd DHCP	Pm DHCP	Sm complex RHO	Eu BCC	Gd HCP	Tb HCP	Dy HCP	Ho HCP	Er HCP	Tm HCP	Yb FCC	Lu HCP
Ac FCC	Th FCC	Pa BCT	U ORTH	Np ORTH	Pu MONO	Am DHCP	Cm DHCP	Bk DHCP	Cf DHCP	Es FCC	Fm FCC*	Md FCC*	No FCC*	Lr HCP*

Solid state at STP

Liquid state at STP

Gaseous state at STP

Estructuras cristalinas: FCC, diamante y zincblende

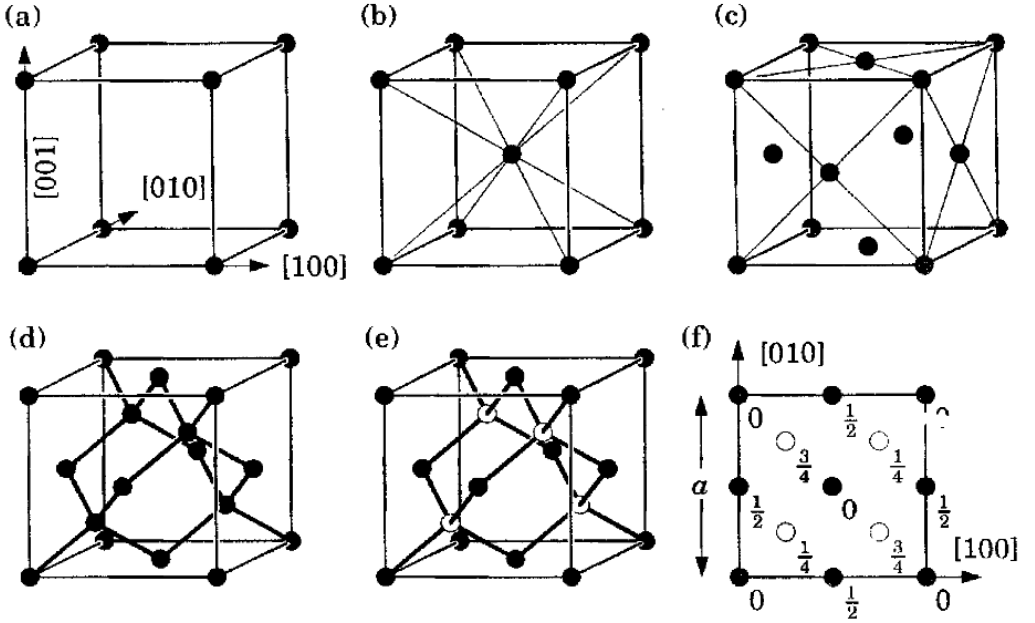


FIGURE 2.11. Cubic crystal structures: (a) simple, (b) body-centred, and (c) face-centred cubic lattices. The structures of the common semiconductors are (d) diamond for elements and (e) zinc blende for compounds. The plan (f) shows the height of the atoms in units of the lattice constant for the zinc-blende structure.

Estructuras cristalinas: FCC, diamante y zincblende

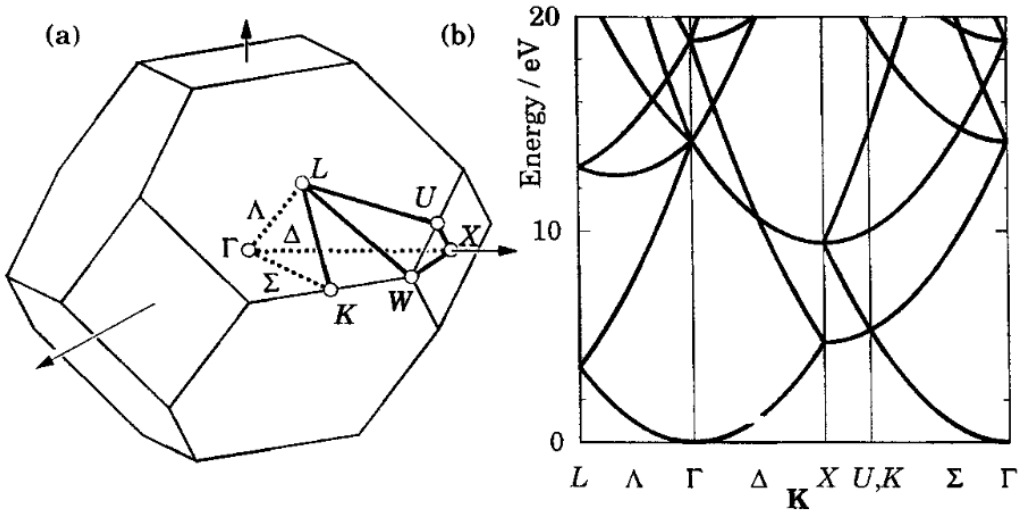


FIGURE 2.15. (a) Brillouin zone for a face-centred cubic crystal, showing the notation for special points and directions. Solid lines are on the surface with broken lines inside the zone. (b) Band structure in the free-electron model, showing the effect of folding back the parabola into the reduced zone.

Aleaciones ternarias de semiconductores

¿ Qué es $Al_xGa_{1-x}As$? (arseniuro de galio-aluminio)

Al: aluminio
Ga: galio
As: arsénico

AlAs

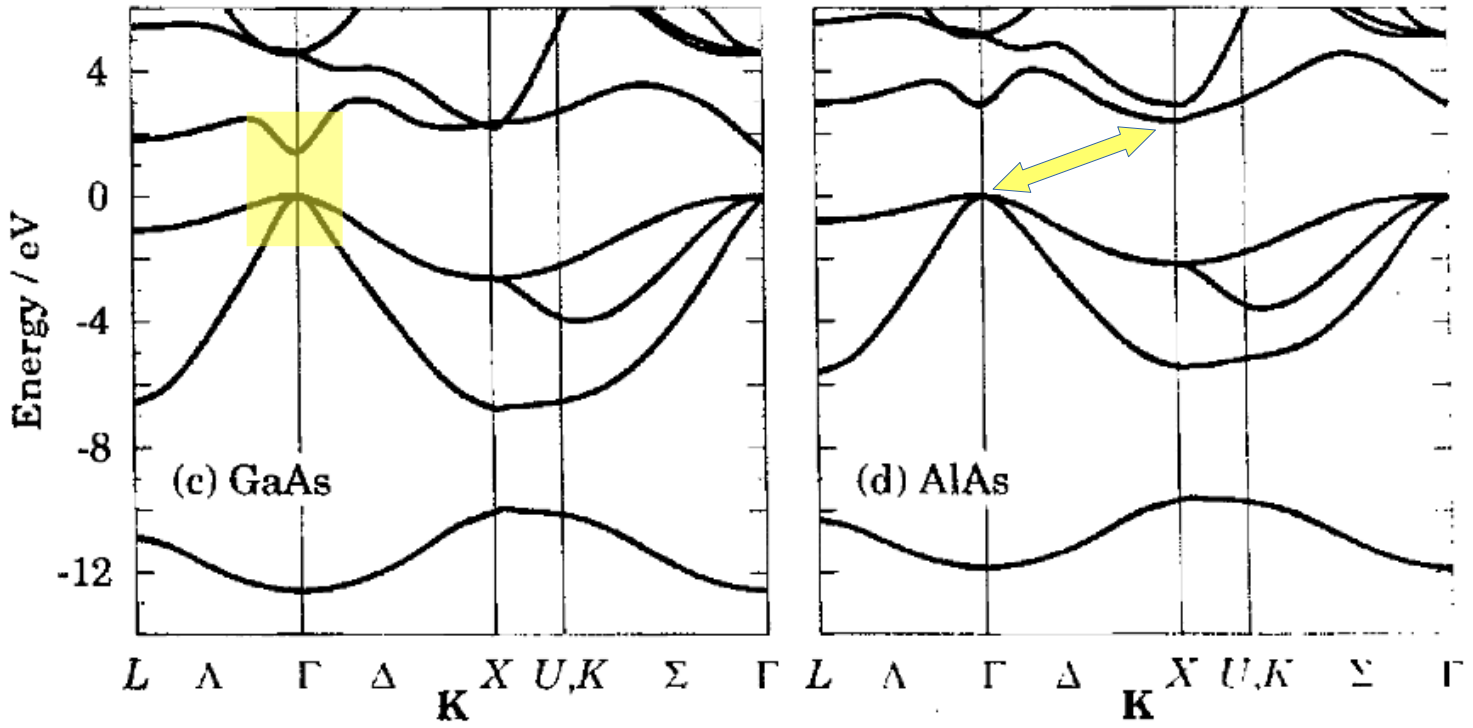
GaAs

Los iones de Al y Ga se pueden intercambiar y se forma una aleación sustitucional de tres elementos.
Se pierde la periodicidad de la red: “aproximación de cristal virtual” (eufemismo)

$0 < x < 1$ proporción de Al

AlGaAs : abreviación genérica

¿ Qué es $Al_xGa_{1-x}As$?



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

Matching the semiconductores para heteroestructuras

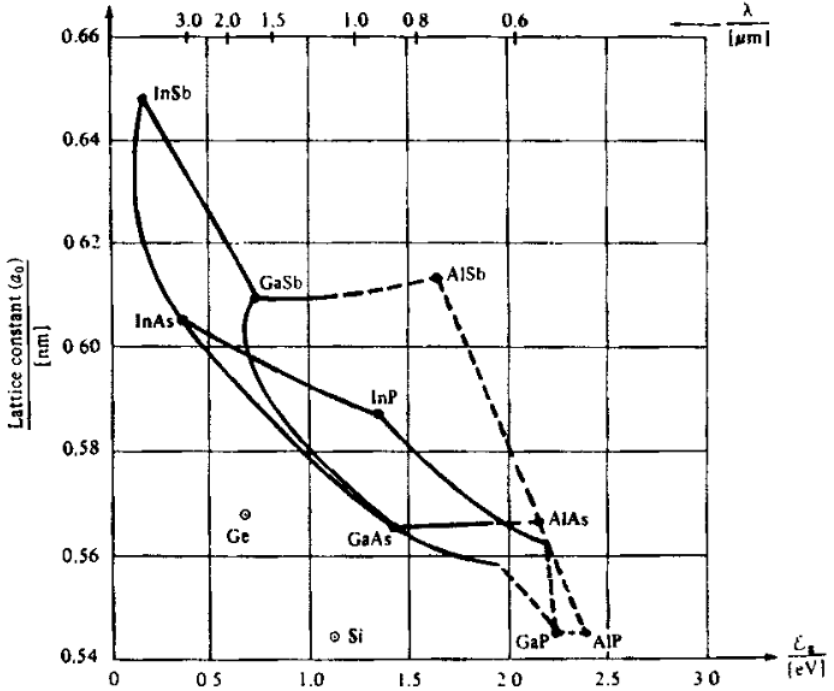


FIGURE 3.1. Plot of the lattice constant of various semiconductors against their minimum band gap E_g, expressed in eV and as a wavelength. Full lines show a direct band gap, with dashed lines for an indirect gap. [From Gowar (1993).]

Resumen de la clase 4

Oscilaciones de plasma en el modelo de Drude

Heteroestructuras de semiconductores

- Definiciones y ejemplos
- Aleaciones ternarias