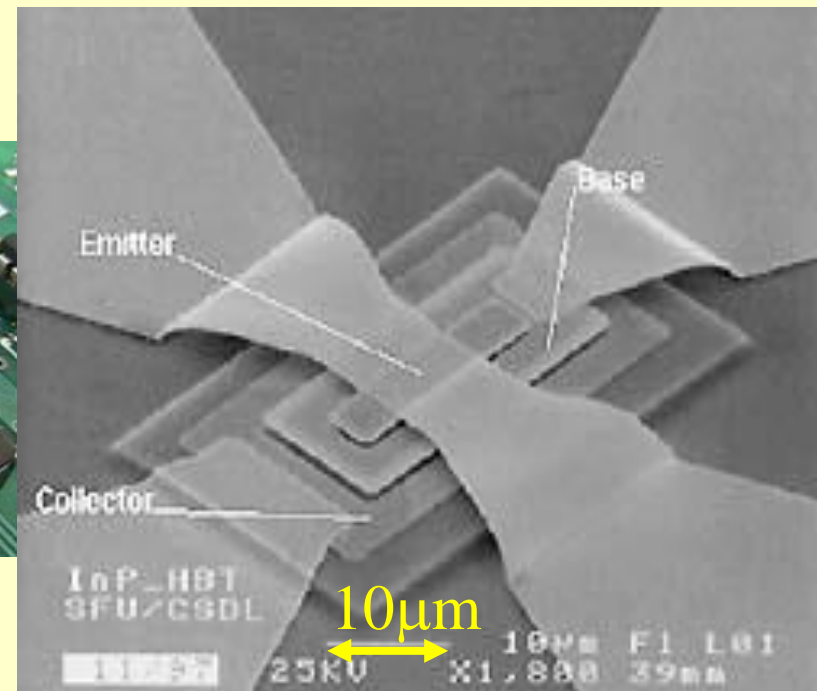
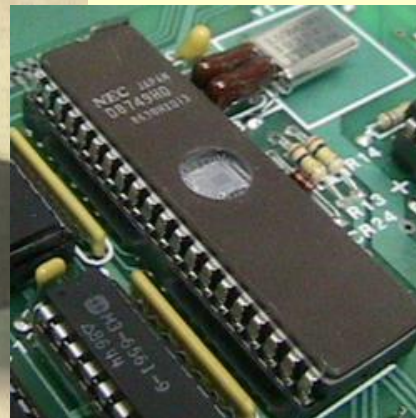
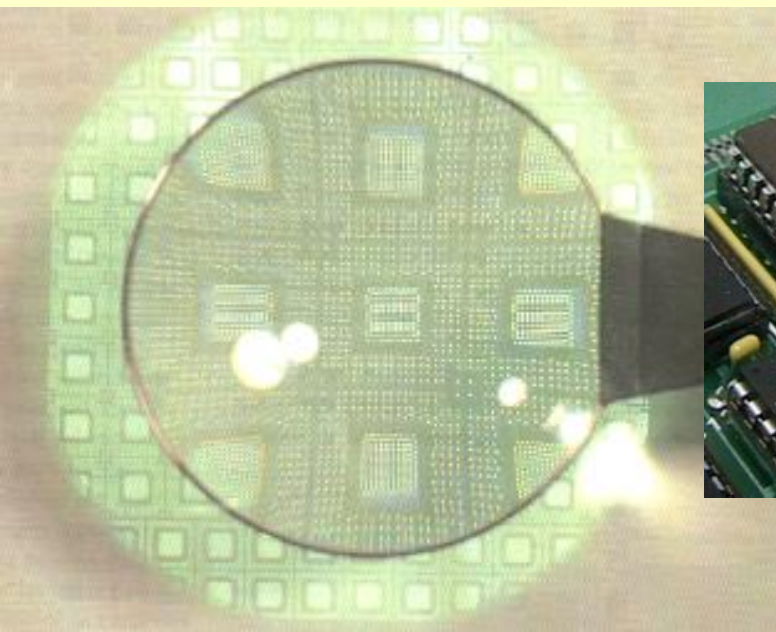


Lección 11: Propiedades eléctricas de los materiales semiconductores

- Semiconductores. Diferencias con los conductores.
- Configuración electrónica de los materiales semiconductores. Conducción Intrínseca y extrínseca. Dopado.
- Ley de acción de masas. Ley de neutralidad de cargas.
- Corrientes de desplazamiento y de difusión.



Semiconductores. Diferencias con los conductores.

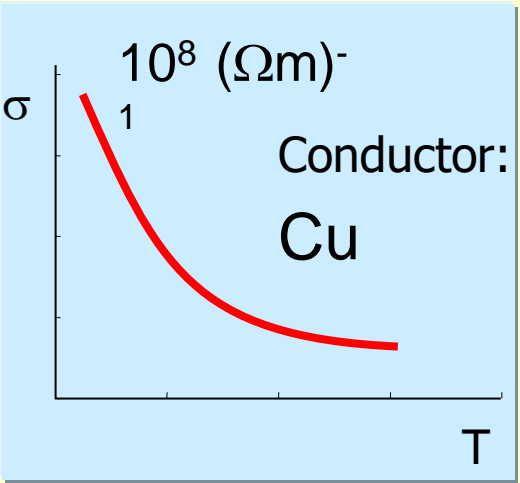
diferencias: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Cuantitativas} \rightarrow \text{Diferentes conductividades } (\sigma) \\ \text{Cualitativas} \rightarrow \text{Diferente variación de } \sigma \text{ al aportar energía.} \\ \rightarrow \text{Diferentes portadores de carga.} \end{array} \right.$

Diferencias CUANTITATIVAS

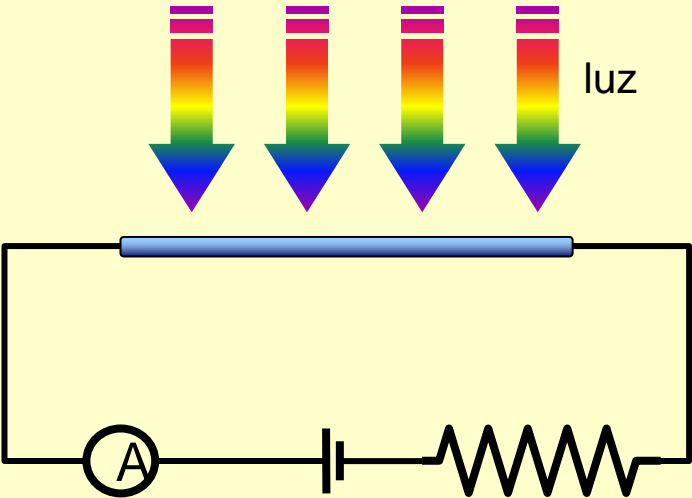
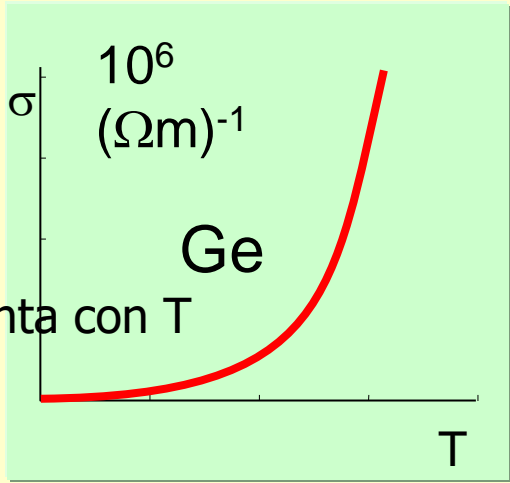
| Conductividad ($\Omega \text{ m}$) ⁻¹ | | |
|--|-----------------------------|---|
| $< 10^{-8}$ | Aislantes | Cuarzo, polímeros,.. |
| 10^{-8} | Semiconductores intrínsecos | Silicio, Germanio |
| $10^{-8} - 10^6$ | Semiconductores extrínsecos | Si o Ge dopados con impurezas de Ga, In, Sb, P, |
| $10^6 - 10^8$ | Conductores | Cobre, Plata,... |

Diferencias cualitativas conductores-semiconductores (1)

Cambios en la conductividad cuando el material es energizado..



Semiconductor: σ aumenta con T

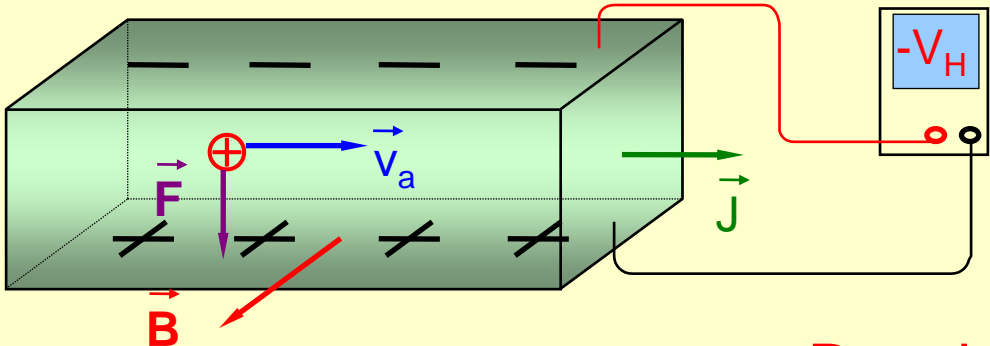
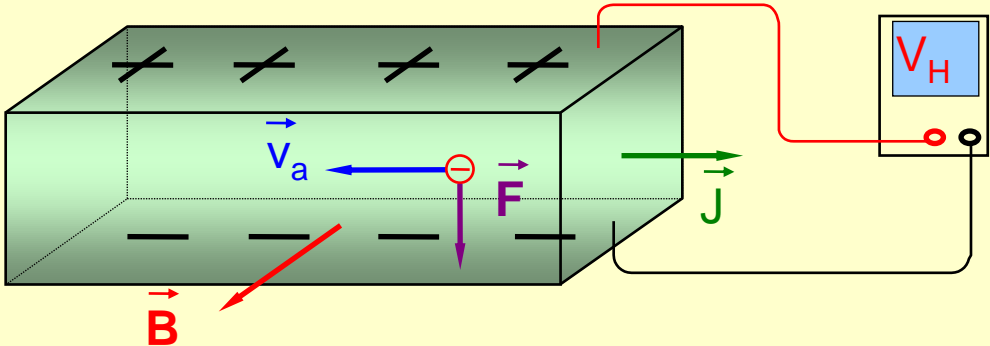


La conductividad de un semiconductor aumenta al iluminarlo

Diferencias cualitativas conductores-semiconductores (2)

Efecto Hall (ya lo hemos estudiado en Electromagnetismo)

Conductores: signo de V_H siempre es el mismo



Semiconductores: signo de V_H cambia dependiendo del material semiconductor

¡Dos tipos de portadores de carga!

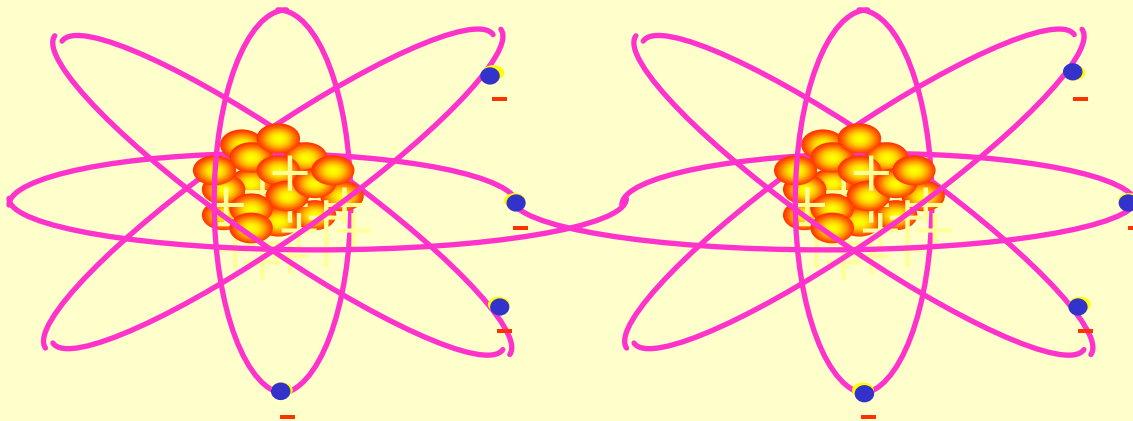
Configuración atómica

Átomos de Si o Ge aislados: 4 e⁻ en la última capa
Podemos completar la última capa hasta 8 e⁻

Tabla Periódica de los Elementos

The periodic table shows elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og). Silicon (Si) and Germanium (Ge) are highlighted in red in the original image. Below the main table are the Lanthanide and Actinide series, and a color-coded legend for element groups.

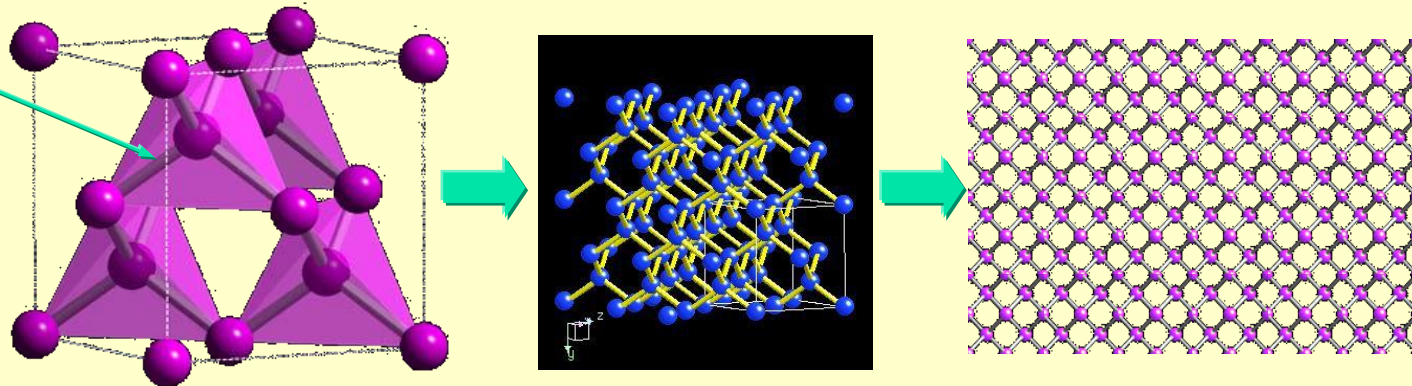
| | | | | | |
|----------|---------------------|----------------------|--|------------|-----------|
| Alcalino | Alcalinotérreos | Metales del bloque p | | Halógeno | Gas noble |
| No metal | Metal de transición | Metaloides | | Lantánidos | Actínidos |



Dos átomos de Si o Ge con un **enlace covalente**
Cada átomo comparte 1 e⁻

Enlace covalente

Estructura Cristalina de un cristal de Si o Ge



<https://www.youtube.com/watch?v=fFVU7-kfPe8>

Semiconductores intrínsecos

A temperatura ambiente, la energía térmica produce tantos e^- como huecos (h)

A 300 K: $1h / 10^9$
átomos, $p=10^{19} h/m^3$

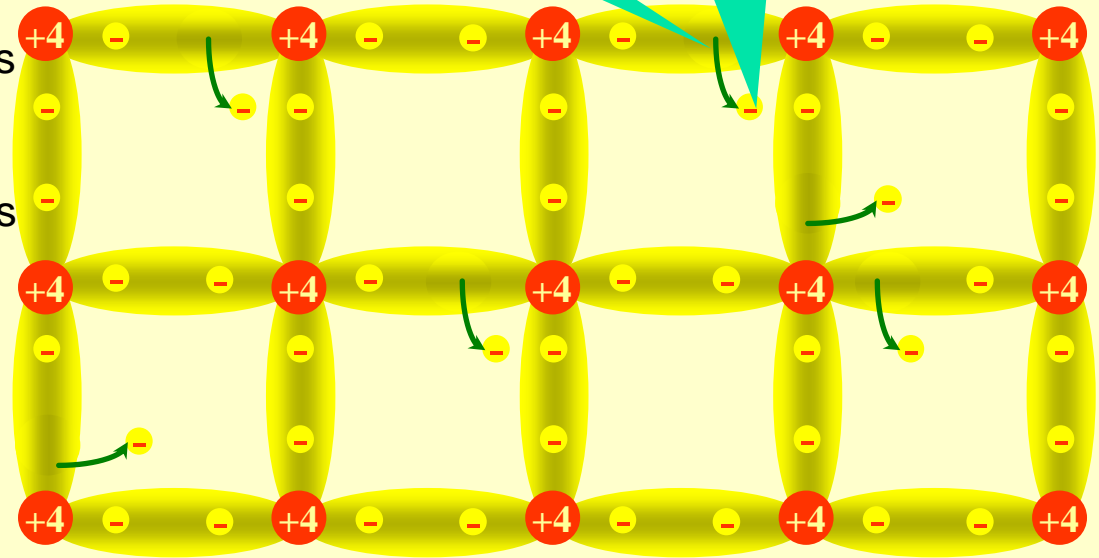
A 300 K: $1e^- / 10^9$
átomos, $n=10^{19} e^-/m^3$

Semiconductores intrínsecos: $n=p=n_i$

n : densidad intrínseca de electrones
 p : densidad intrínseca de huecos

n_i densidad intrínseca de portadores
Dependiente de la temperatura

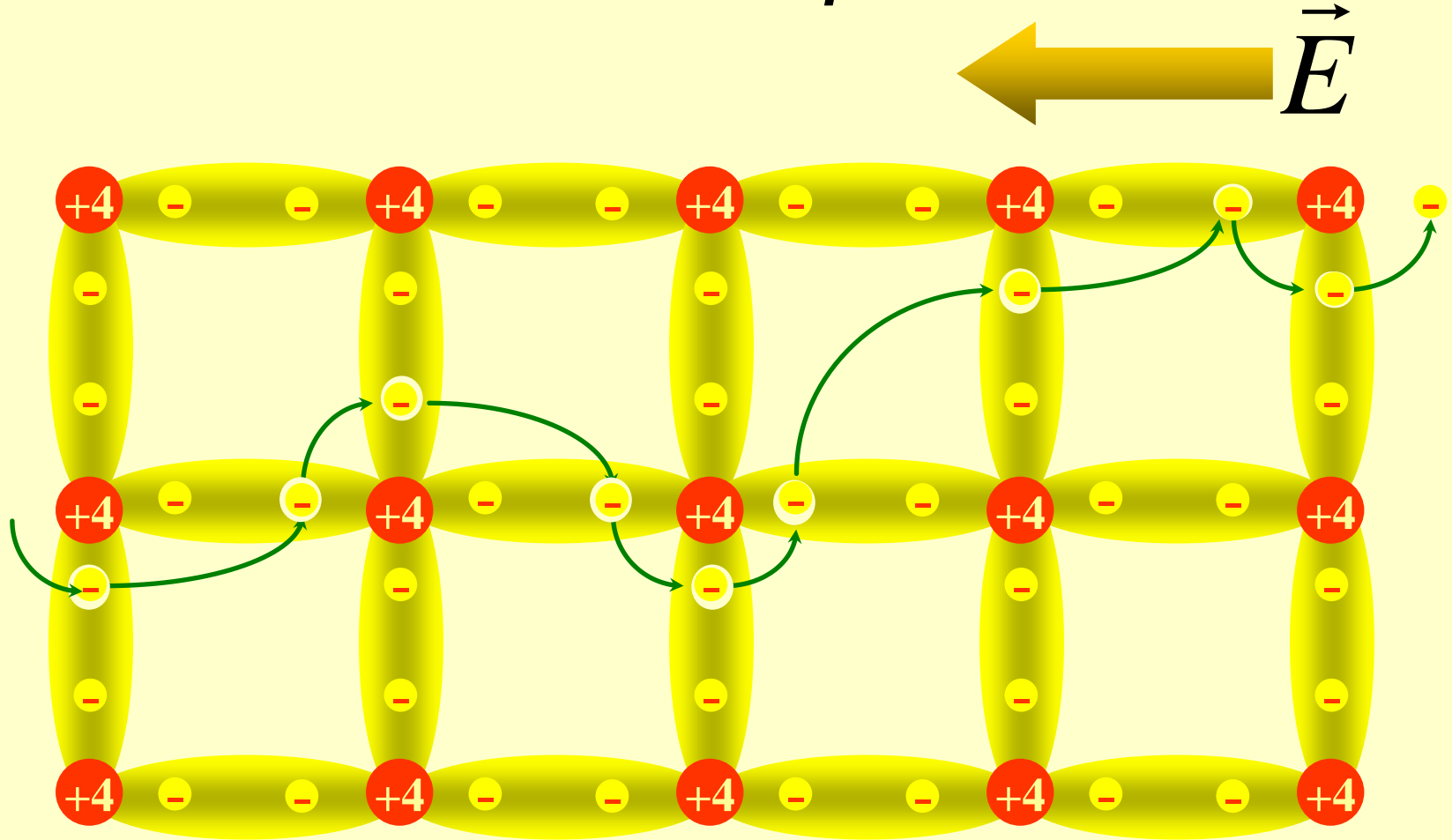
Energía de ionización:
0,7 eV Ge; 1,1 eV Si.



Continuamente se produce generación y recombinación de pares electrón-hueco

Conducción intrínseca

- *Pares electrón-hueco. Si se aplica un E *




La conducción intrínseca se debe tanto a electrones como a huecos.

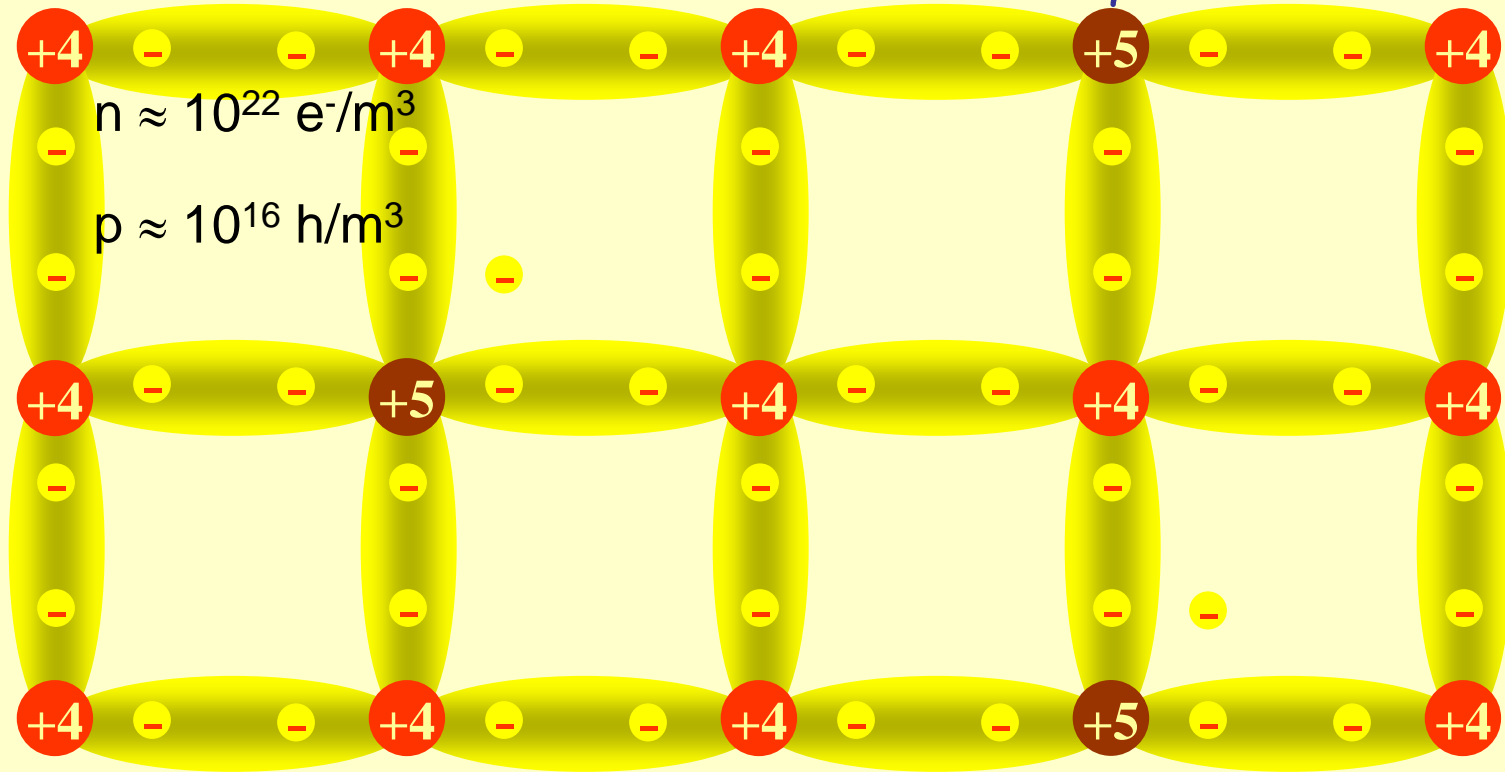
Semiconductores extrínsecos:

El Si o el Ge se dopan con impurezas **donadoras** o **aceptoras** (átomos con 5 o 3 e⁻ en la última capa). Entonces, n≠p.

Fósforo, Arsénico, Antimonio

Semiconductores Tipo n: Dopado con impurezas donadoras (P,As,Sb): n>p

Energía de ionización: 0,03-0,1 eV →  Átomo donador



n: densidad de portadores mayoritarios
p: densidad de portadores minoritarios

Continuamente se está produciendo generación y recombinación de pares electrón-hueco

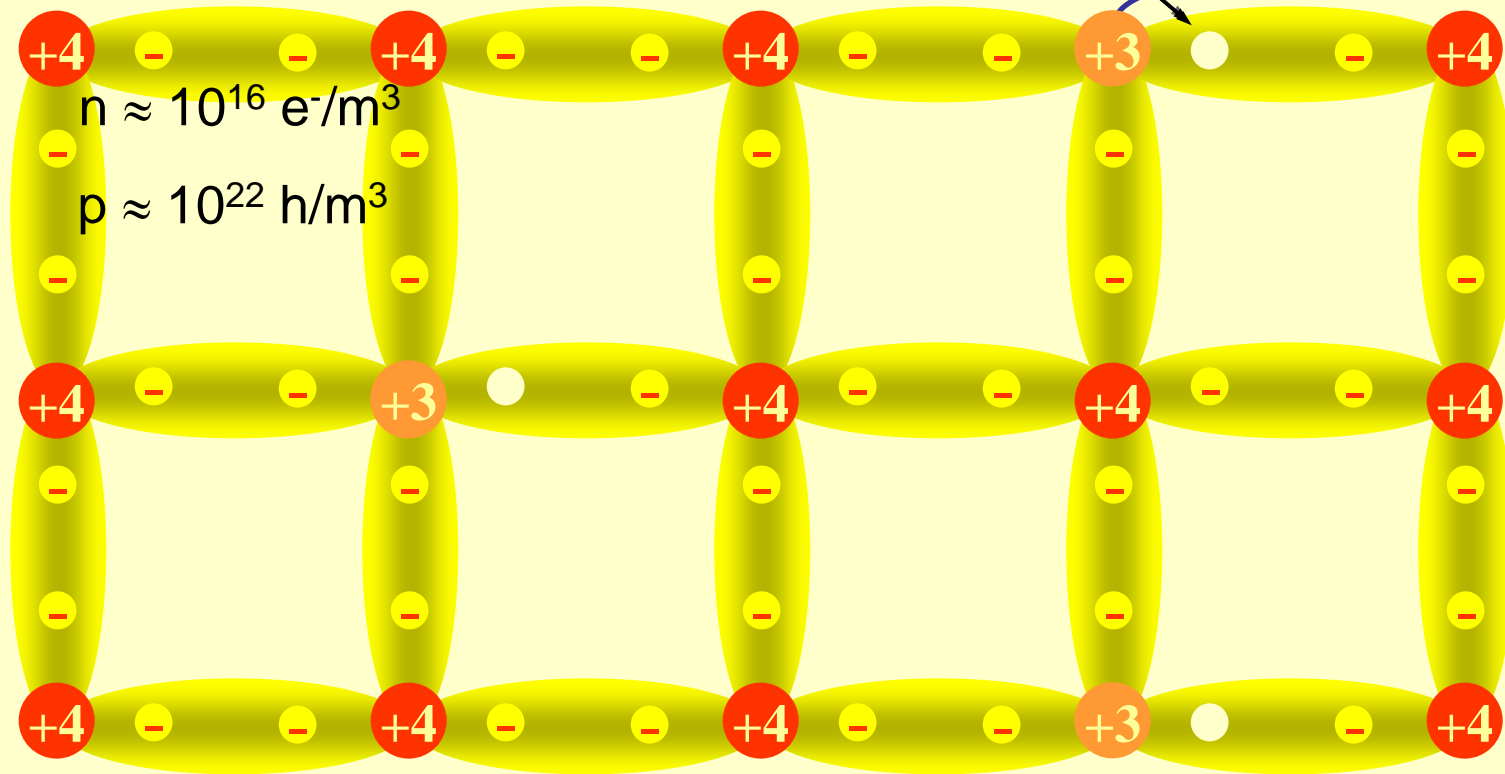
Semiconductores extrínsecos:

Boro, Aluminio, Galio, Indio

Semiconductores tipo p: Dopado con impurezas aceptoras (B, Al, Ga, In): $p > n$

Energía de ionización: 0,04-0,12 eV

Átomo aceptor



n : densidad de portadores minoritarios
 p : densidad de portadores mayoritarios

Continuamente se está produciendo generación y recombinación de pares electrón-hueco

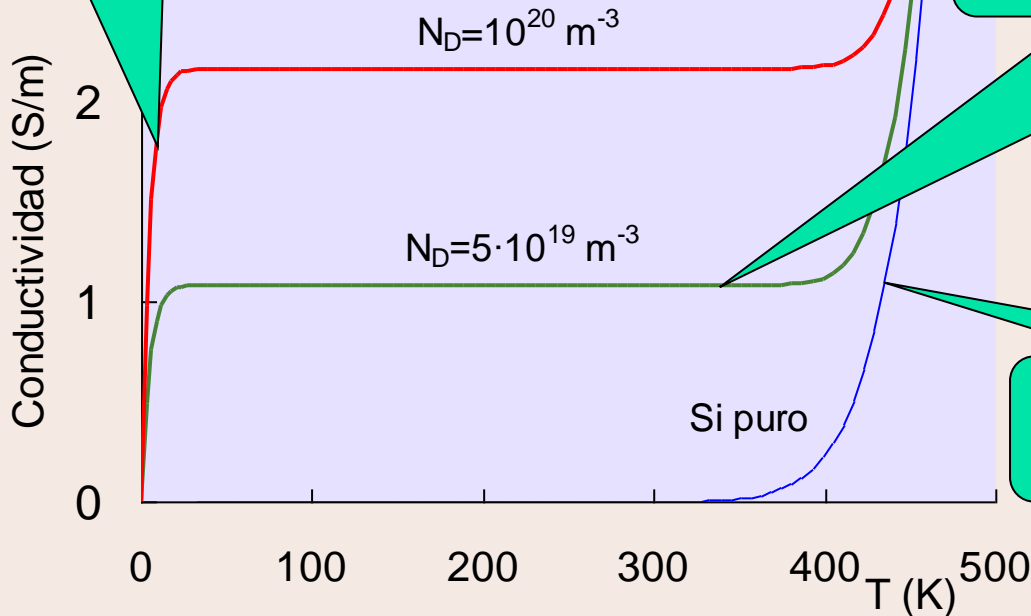
Conducción extrínseca

- ***Si se aplica un E a un semiconductor extrínseco....***
 - Tanto electrones como huecos son portadores de carga, pero la corriente en un semiconductor es **principalmente debida a los portadores mayoritarios:**
 - Electrones en un semiconductor tipo n
 - Huecos en un semiconductor tipo p

Conductividad en semiconductores

A bajas temperaturas, las impurezas se ionizan rápidamente

Semiconductor extrínseco



Semiconductor intrínseco



Los portadores de las impurezas, ya ionizados, no aumentan

A altas temperaturas, la conducción intrínseca crece.

Ley de acción de masas

Es válida tanto para semiconductores intrínsecos como extrínsecos:

$$n \cdot p = n_i^2$$

n: densidad de electrones (por unidad de volumen)

p: densidad de huecos (por unidad de volumen)

n_i : densidad intrínseca de portadores

$$n_i(\text{Ge}, 300 \text{ K}) = 2,4 \cdot 10^{19} \text{ portadores/m}^3$$

$$n_i(\text{Si}, 300 \text{ K}) = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ portadores/m}^3$$

n_i depende de la temperatura $n_i = f(t) = AT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$

Ley de neutralidad de carga

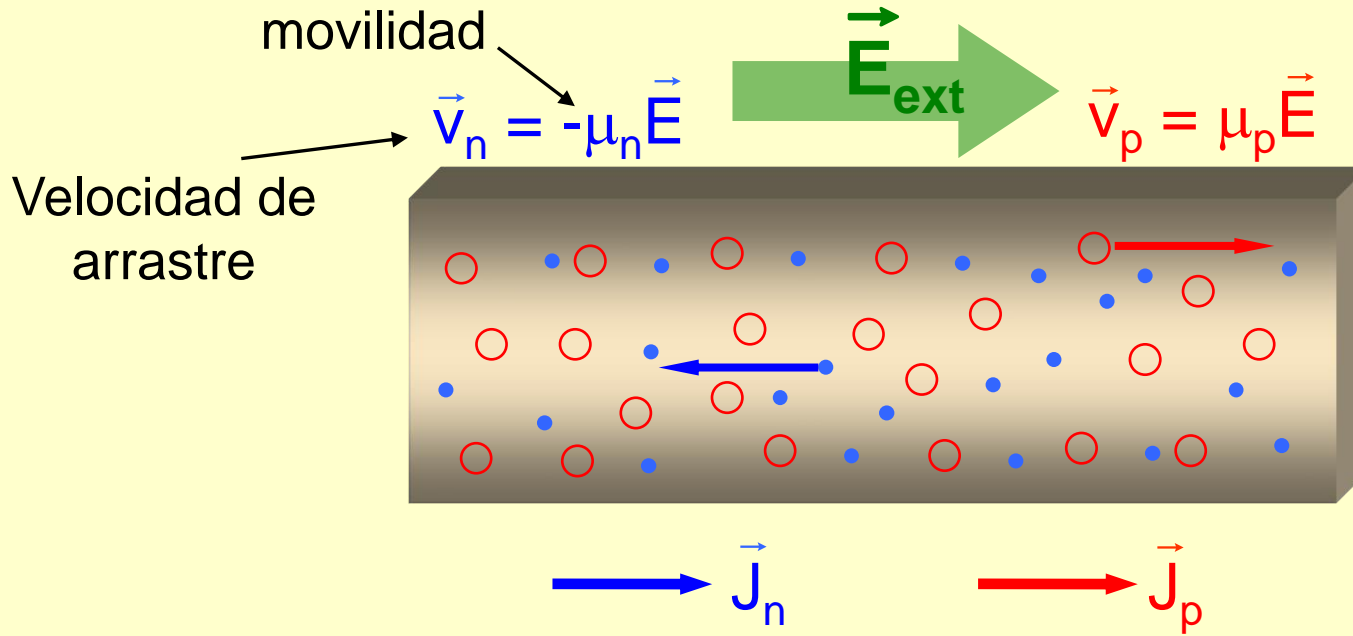
N_D Densidad de donadores
 N_A Densidad de aceptores

$$N_A + n = N_D + p$$

- Intrínsecos $\rightarrow N_A = N_D = 0 \rightarrow p = n = n_i$
- Tipo **n** $\rightarrow N_A = 0$; If $N_D \gg \gg n_i \rightarrow n \approx N_D \rightarrow p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$
- Tipo **p** $\rightarrow N_D = 0$; If $N_A \gg \gg n_i \rightarrow p \approx N_A \rightarrow n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$

Corrientes de desplazamiento en un semiconductor

Las corrientes de desplazamiento se deben a campos eléctricos



$$\vec{J}_n = nq\vec{v}_n = n(-q_e)(-\mu_n \vec{E}) = nq_e \mu_n \vec{E}$$

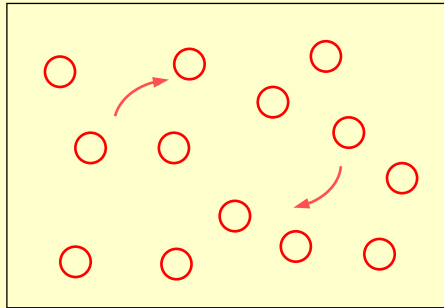
$$\vec{J}_p = pq\vec{v}_p = pq_e \mu_p \vec{E}$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_p + \mathbf{J}_n = q_e(n\mu_n + p\mu_p)\mathbf{E} = \sigma\mathbf{E}$$

$$\text{Conductividad: } \sigma = q_e(n\mu_n + p\mu_p)$$

Corrientes de difusión en un semiconductor

Las corrientes de difusión se deben a densidades no uniformes de portadores de carga. Entonces se dice que existe un gradiente de portadores (∇n o ∇p). El gradiente es un vector en el sentido de las densidades crecientes.

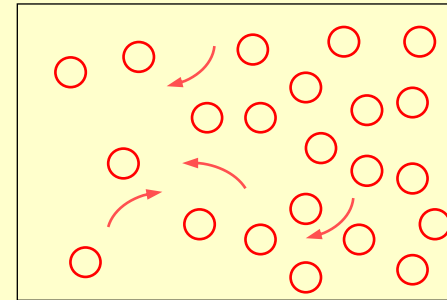


$$\nabla n = 0$$

electrones

Ley de Fick

$$J_{\text{difn}} = qD_n \nabla n$$



$$\nabla n \neq 0$$

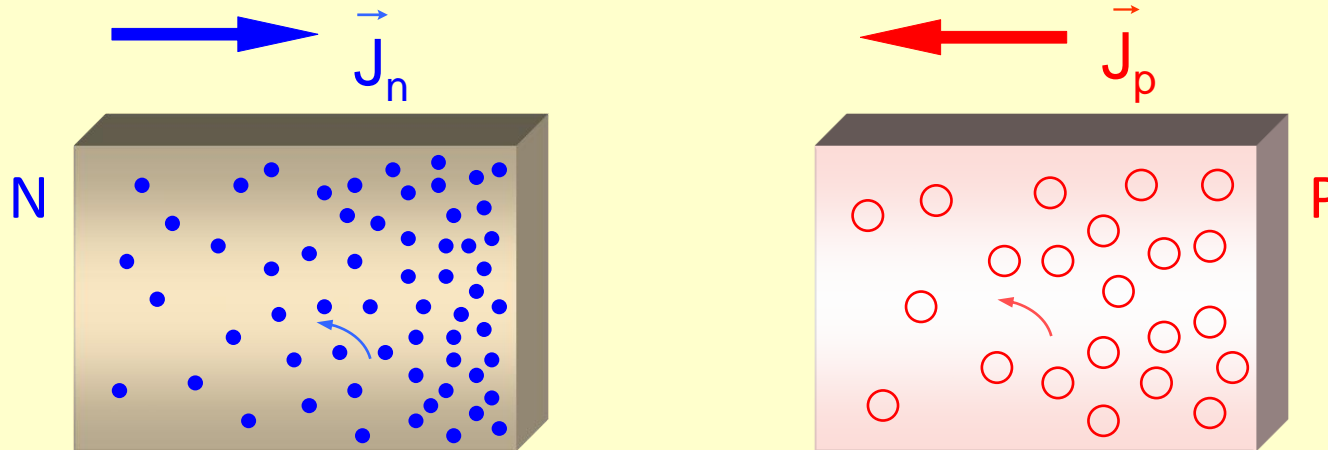
huecos

$$J_{\text{difp}} = -qD_p \nabla p$$

D_n Difusividad de electrones ($D_n \text{ Si} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

D_p Difusividad de huecos ($D_p \text{ Si} = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

Corrientes de difusión en un semiconductor



$$J_n = q_e D_n \nabla n$$

$$J_p = -q_e D_p \nabla p$$

La corriente de difusión en un semiconductor es la suma de las corrientes de difusión de electrones y de huecos, teniendo en cuenta el sentido del movimiento y el tipo de portador de carga.

Intensidad de corriente en un semiconductor

La intensidad de corriente total en un semiconductor es la suma de las corrientes de desplazamiento y de difusión de electrones y de huecos.

La corriente total consta de cuatro términos:

- Corriente de desplazamiento de electrones
- Corriente de desplazamiento de huecos
- Corriente de difusión de electrones
- Corriente de difusión de huecos

$$J = J_{ndespl} + J_{pdespl} + J_{ndif} + J_{pdif} = q_e n \mu_n E + q_e p \mu_p E + q_e D_n \nabla n - q_e D_p \nabla p$$