

# TEMA 2

# SEMICONDUCTORES

# CUD

FUNDAMENTOS DE  
ELECTRÓNICA

CURSO 2020-2021



**Centro Universitario**  
**de la Defensa Zaragoza**

23 de septiembre de 2020

# TEMA 2 – SEMICONDUCTORES

- Aislantes/Conductores
- Modelo covalente
- Modelo de bandas
- Conductividad



# AISLANTE/CONDUCTORES

- Los materiales sólidos se clasifican en dos grandes grupos, los que pueden conducir la corriente eléctrica (conductores) y los que no (aislantes).
- La diferencia entre los dos materiales es la existencia de una partícula cargada que se puede mover a través del material: electrones libres



- En el caso de los conductores, hay una ligera dependencia con la temperatura

# SEMICONDUCTORES

Además de aislantes y conductores, aparece otro tipo de materiales, con la siguiente descripción fenomenológica:

- $A T = 0 K$ :
  - no son conductores de la electricidad
- Conforme se aumenta la temperatura
  - Los semiconductores (intrínsecos) incrementan su conductividad **exponencialmente**
- La conductividad de los semiconductores puede controlarse de forma muy precisa mediante procesos tecnológicos (dopados o extrínsecos)

# ENLACES ENTRE ÁTOMOS

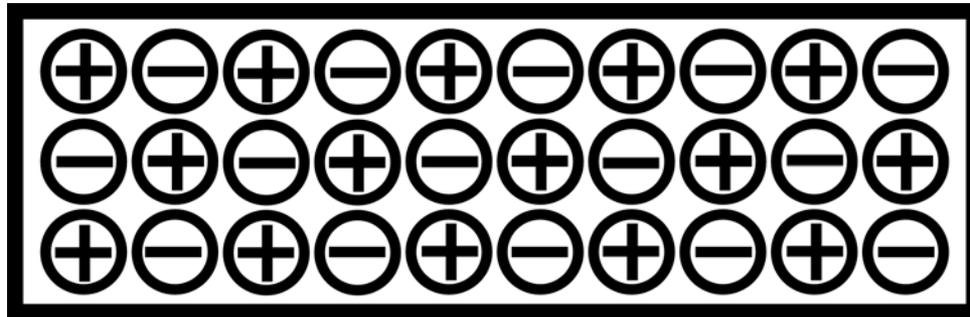
Buscamos describir el comportamiento del material (como aislante, semiconductor o conductor) según el tipo de enlace entre átomos

- Tres tipos de enlaces forman los materiales sólidos
  - Iónico
  - Metálico
  - Covalente

# ENLACE IÓNICO

## ➤ Enlace iónico

- Los átomos capturan o ceden electrones y los iones resultantes se atraen entre sí formando el sólido
- Los electrones están fuertemente ligados a los átomos: aislantes

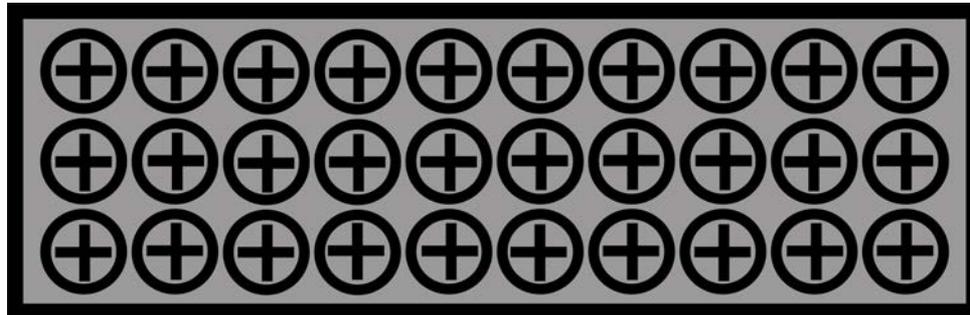


- Los iones se separan cuando se encuentran disueltos: es posible la conducción

# ENLACE METÁLICO

## ➤ Enlace metálico

- Los electrones exteriores están desligados de los átomos, formando una nube electrónica distribuida en todo el sólido y que mantiene unidos los núcleos atómicos
- Los electrones exteriores no están ligados a ningún átomo en concreto, por lo que pueden moverse libremente: conductores



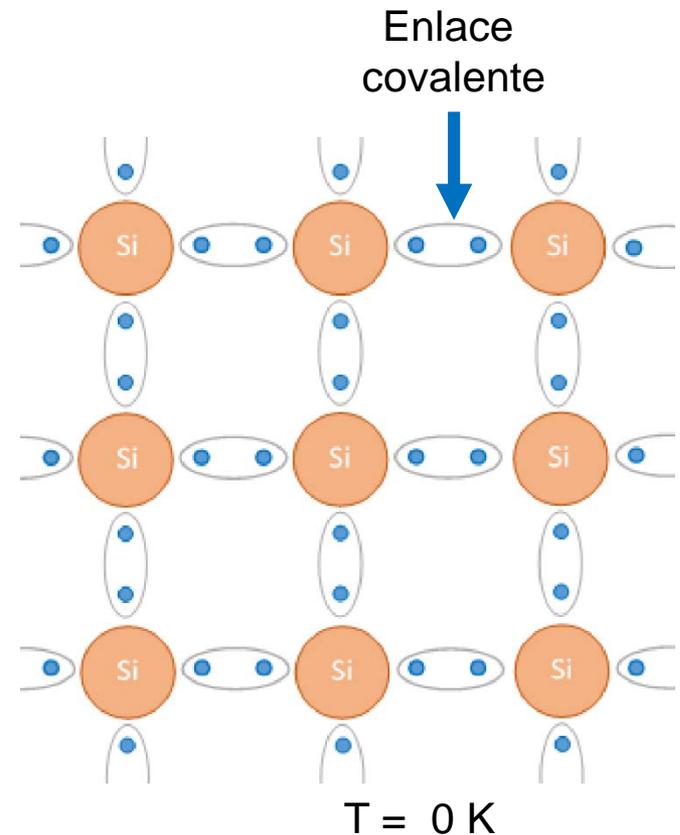
# ENLACE COVALENTE

## ➤ Enlace covalente

- Los electrones de la capa más externa de cada átomo se comparten con los átomos vecinos, formando un enlace entre ellos.
- Cada par de electrones (uno cedido por cada átomo) forma un enlace entre átomos
- Este tipo de enlace suele formar moléculas que dan lugar a gases y líquidos, pero si se forman estructuras tetravalentes (cada átomo se une a cuatro vecinos) se pueden generar materiales sólidos.

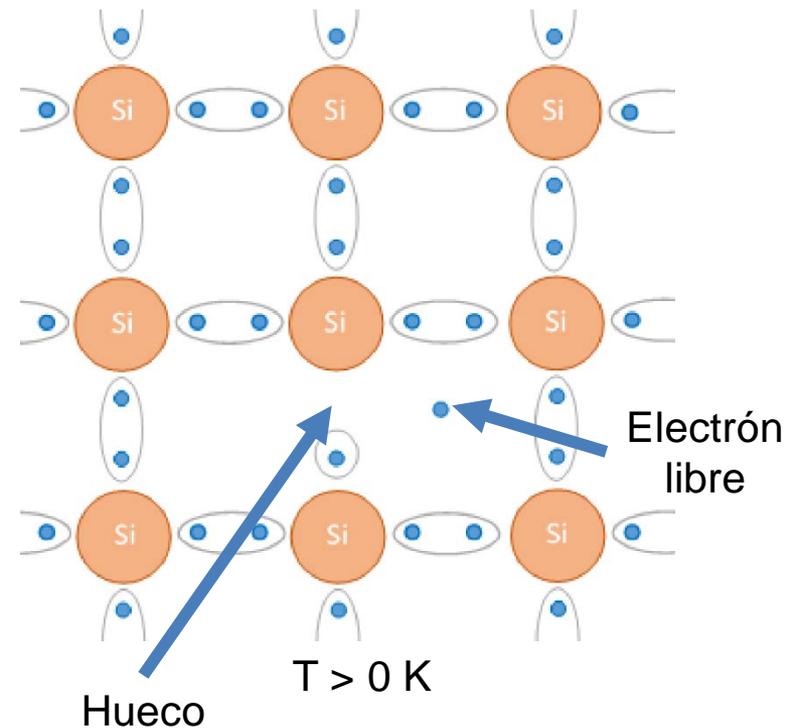
# ENLACE COVALENTE

- Por ejemplo, el silicio tiene cuatro electrones en su capa más externa: forma cuatro enlaces covalentes con otros tantos átomos de silicio.
- En principio (cierto a  $T = 0$  K), los electrones que forman el enlace se comparten entre dos átomos vecinos y no pueden desplazarse por el sólido : aislante.



# ENLACE COVALENTE

- Sin embargo, al aumentar la temperatura, la agitación térmica de los átomos de silicio puede provocar la ruptura de algunos enlaces, liberándose un electrón.
- Todos los electrones que han sido liberados pueden moverse por el sólido: conductor



# SEMICONDUCTORES

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | III | IV | V |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|----|---|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | B   |    |   |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     | Si | P |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     | Ge |   |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |    |   |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |    |   |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |     |    |   |  |  |  |

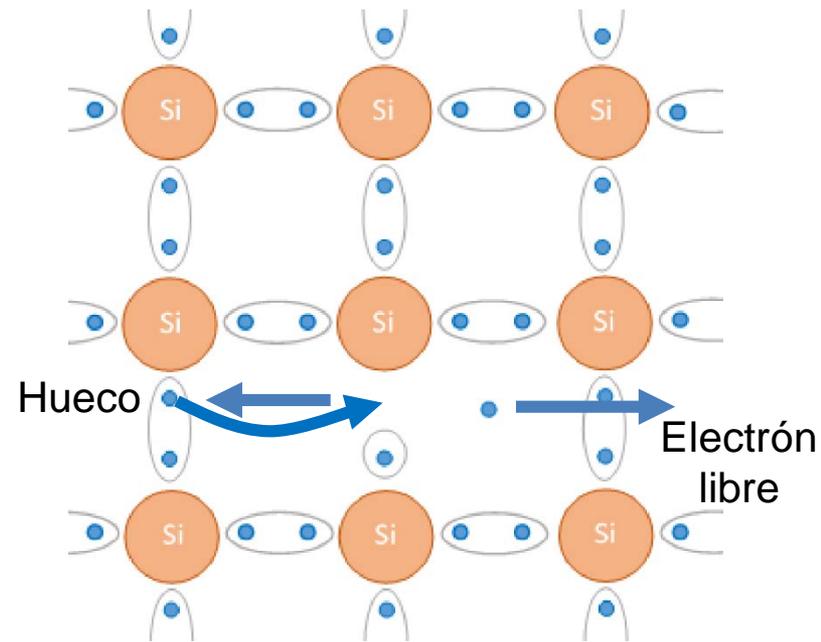
# TEMA 2 – SEMICONDUCTORES

- Aislantes/Conductores
- Modelo covalente
- Modelo de bandas
- Conductividad



# CONCEPTO DE HUECO

- La conducción se lleva a cabo de dos formas:
  - Por los electrones libres
  - Por los electrones ligados, que van ocupando sucesivamente diferentes enlaces
- El movimiento de los electrones ligados equivale al de "una partícula" (hueco) de carga positiva y que se mueve en sentido contrario



# TIPOS DE SEMICONDUCTORES

## Intrínsecos:

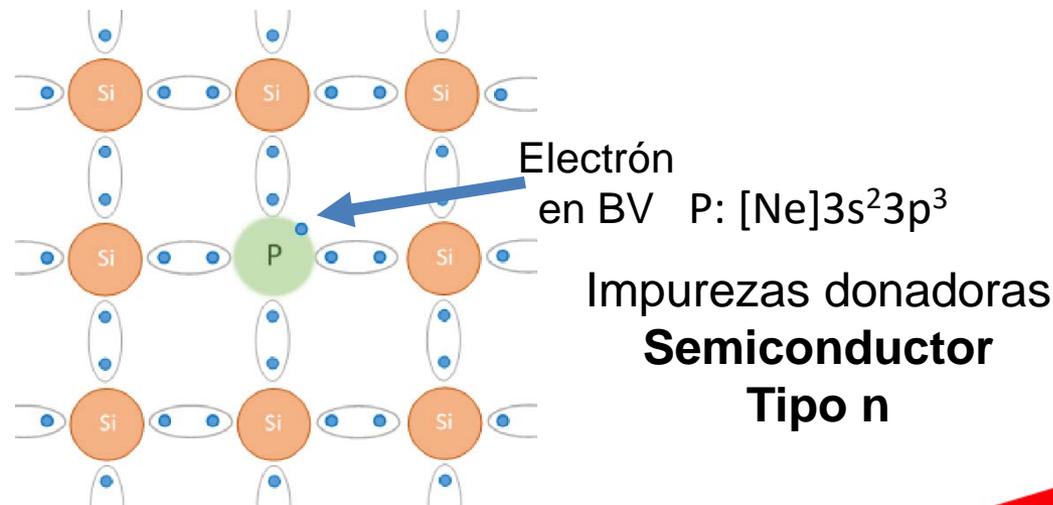
- No contienen impurezas que modifiquen la conductividad
- Los huecos y electrones libres se crean por pares mediante la ruptura de enlaces covalentes
- $n = p = n_i$  concentración intrínseca de portadores

## Extrínsecos o dopados:

- Contienen impurezas para modificar de forma controlada la conductividad
- Los átomos de las impurezas sustituyen a los átomos del semiconductor (Si, p.e.)
- En general,  $n \neq p$
- Dos tipos, N y P

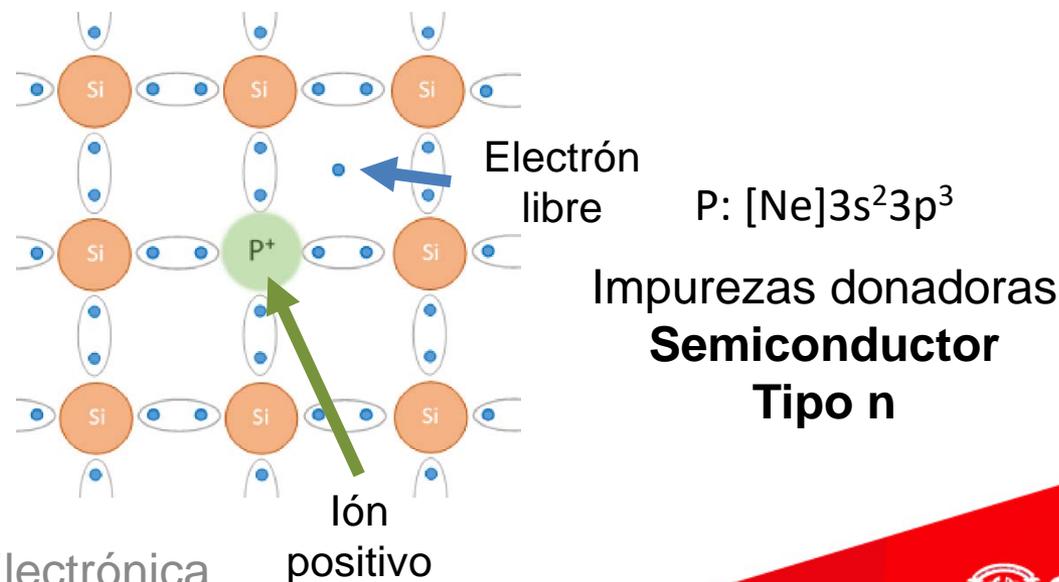
# DOPADO TIPO N

- Sustitución de un átomo de silicio por algún átomo de la columna V de la tabla periódica (impurezas donadoras)
- Cuatro electrones forman enlace covalente con los cuatro átomos de silicio vecinos
- Se requiere poca energía para liberar el quinto electrón de la impureza como electrón libre



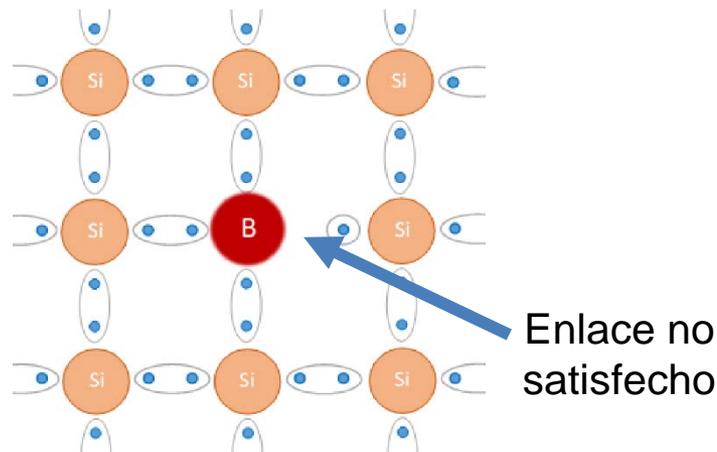
# DOPADO TIPO N

- Se queda un átomo fijo con carga positiva
- A temperatura ambiente y con una concentración de impurezas ( $N_D$ ) suficientemente alta  $n \approx N_D \gg p$ : el número de electrones libres está determinado por la concentración de impurezas donadoras, mientras que apenas se generan huecos.



# DOPADO TIPO P

- Sustitución de un átomo de silicio por algún átomo de la columna III de la tabla periódica (impurezas aceptadoras)
- Los tres electrones forman enlace con los vecinos, queda un enlace covalente no satisfecho
- Fácilmente se atrapa un electrón extra para formar el cuarto enlace, formando un hueco.

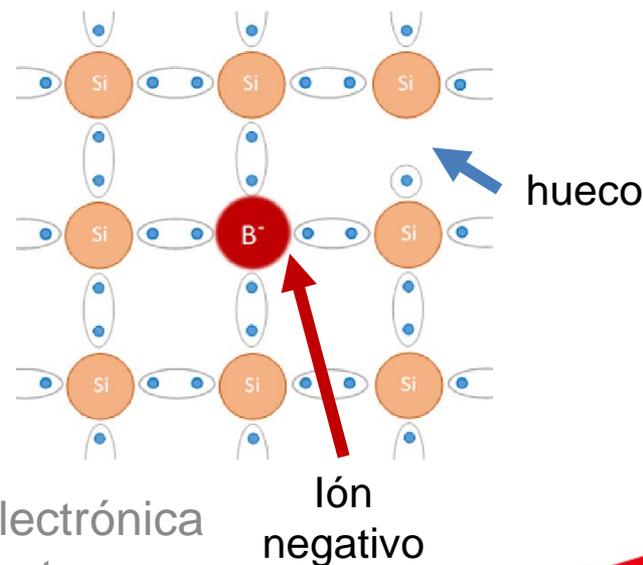


B: [He]3s<sup>2</sup>3p<sup>1</sup>

Impurezas aceptadoras  
**Semiconductor**  
**Tipo p**

# DOPADO TIPO P

- Se queda un átomo fijo con carga negativa
- A temperatura ambiente y con una concentración de impurezas ( $N_A$ ) suficientemente alta  $p \approx N_A \gg n$ : el número de huecos está determinado por la concentración de impurezas aceptadoras, mientras que apenas se generan electrones libres.



Impurezas aceptadoras  
**Semiconductor**  
**Tipo p**

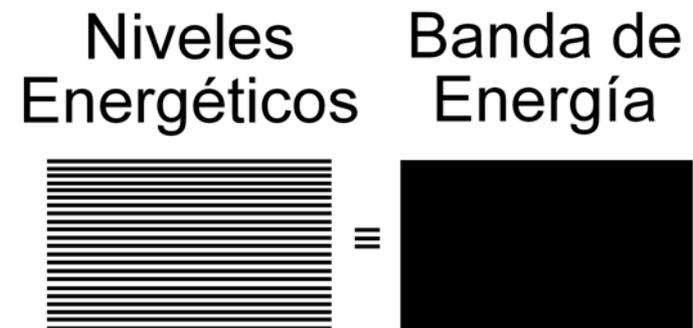
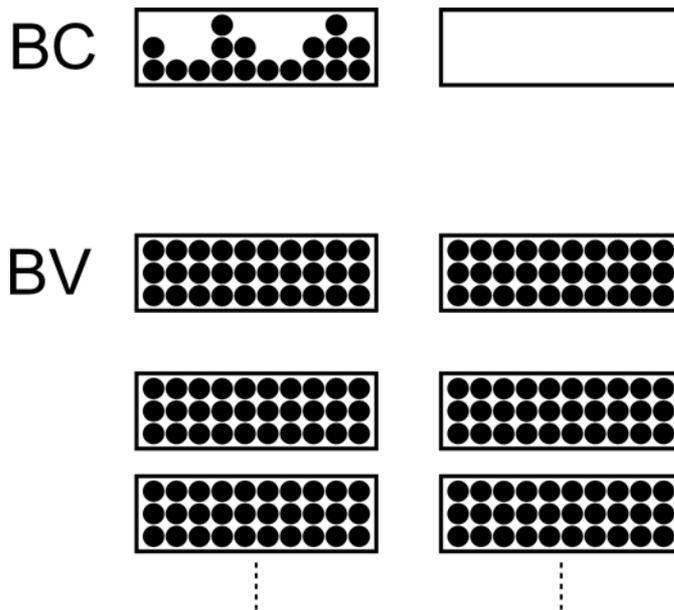
# TEMA 2 – SEMICONDUCTORES

- Aislantes/Conductores
- Modelo covalente
- **Modelo de bandas**
- Conductividad



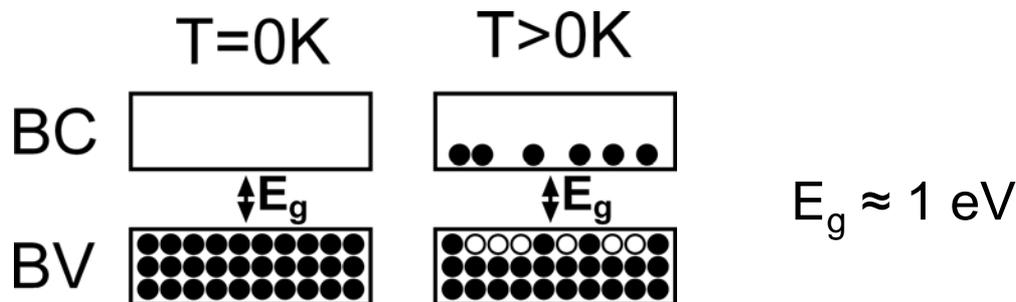
# MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA

- Las bandas están formadas por "estados" discretos, pero separados por muy poca energía: se pueden tratar de forma continua.
- El eje vertical representa la energía, creciente en sentido ascendente
- La última banda llena se denomina banda de valencia
- La siguiente (vacía o semillena) se denomina banda de conducción

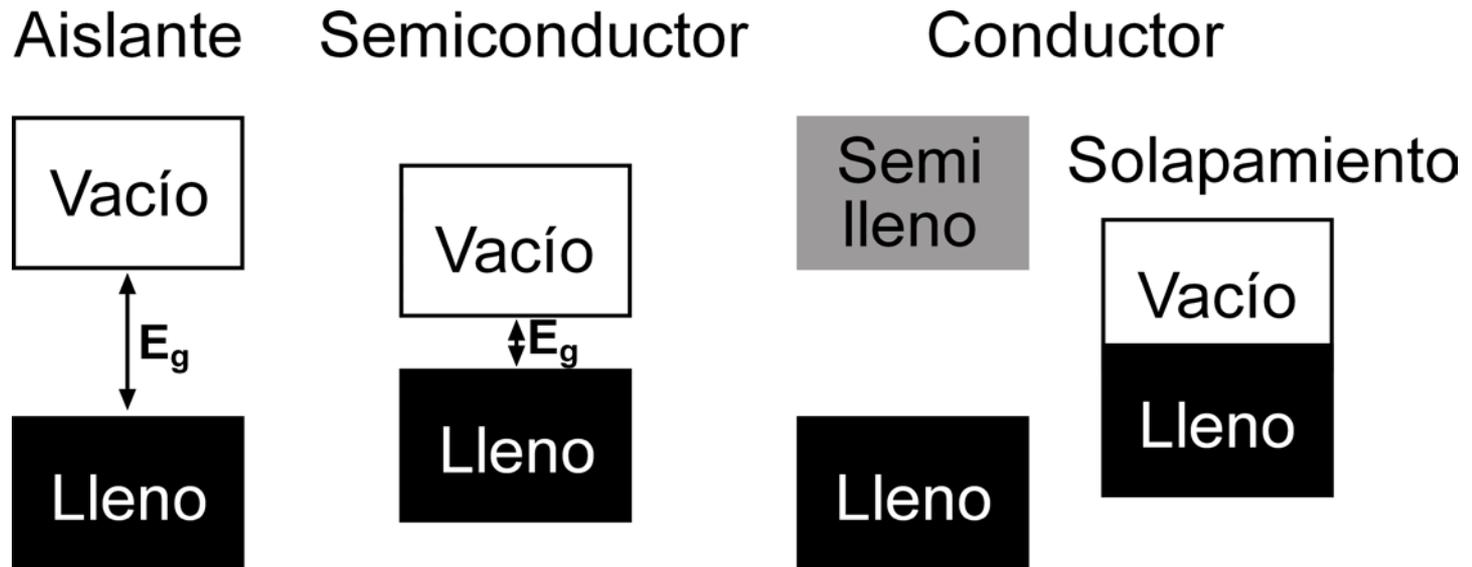


# MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA

- En un semiconductor, la distancia entre la banda de valencia y la banda de conducción ( $E_g$ ) es muy pequeña, del orden del electronvoltio (eV)
- A 0 K, la banda de valencia de un semiconductor está completa y la de conducción vacía y no puede haber conducción.
- A temperaturas  $> 0$  K, se genera conducción debido a los huecos de la banda de valencia y a los electrones en la banda de conducción, que son los únicos electrones libres del material.
- Como ya hemos mencionado antes, en un semiconductor intrínseco la única manera de generar electrones libres es generando huecos.



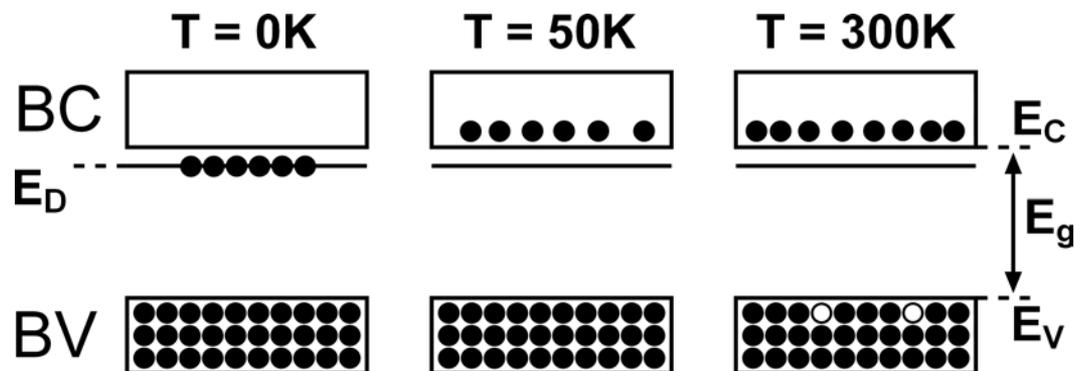
# MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA



# MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA

## Semiconductores tipo N

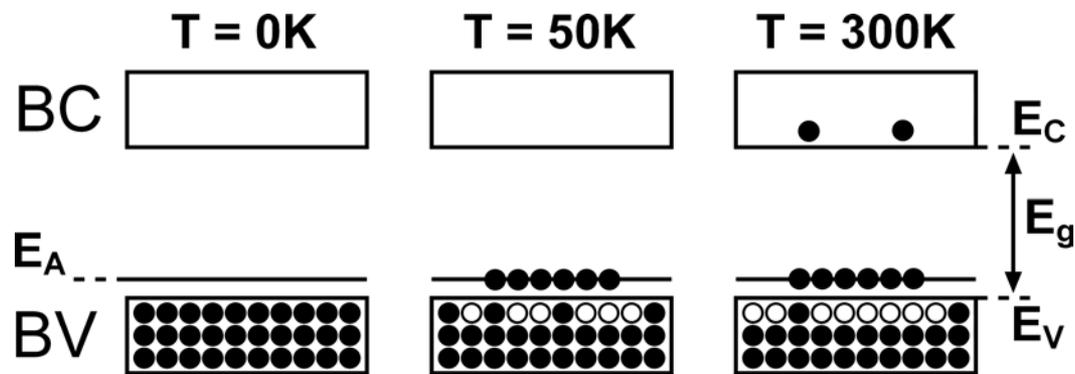
- La introducción de impurezas donadoras equivale a la presencia de un nivel energético en el interior de la banda prohibida, cercano al fondo de la banda de conducción



# MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA

## Semiconductores tipo P

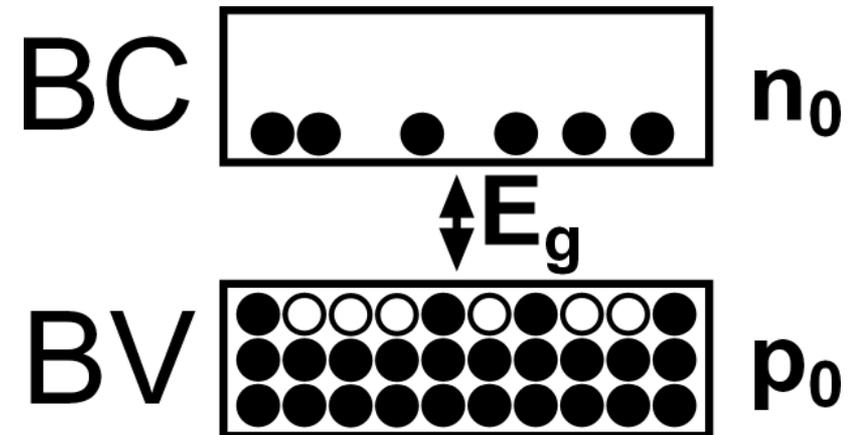
- La introducción de impurezas aceptadoras equivale a la presencia de un nivel energético en el interior de la banda prohibida, cercano a la banda de valencia



# CONCENTRACIÓN DE PORTADORES

- Buscamos las expresiones que nos permitan calcular la concentración de electrones ( $n_0$ ) y la de huecos ( $p_0$ ), en función de:
- Tipo de material semiconductor (Silicio o Germanio)
  - Dopaje (intrínseco, extrínseco N o extrínseco P)
  - En equilibrio termodinámico
    - Temperatura constante
    - Sin Luz

|                                       | Silicio              | Germanio             |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|
| $N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )            | $2.82 \cdot 10^{19}$ | $1.02 \cdot 10^{19}$ |
| $N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )            | $1.83 \cdot 10^{19}$ | $5.64 \cdot 10^{18}$ |
| $E_g$ (eV)                            | 1.12                 | 0.67                 |
| $\mu_n$ ( $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ ) | 1350                 | 3900                 |
| $\mu_p$ ( $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ ) | 500                  | 1820                 |



# LEY DE ACCIÓN DE MASAS

- En equilibrio termodinámico:

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{\frac{-E_g}{2kT}}$$

- 3 tipos de soluciones:

- Caso intrínseco:

$$n_0 = p_0 = n_i$$

- Caso extrínseco tipo N:

$$n_0 > n_i > p_0$$

- Caso extrínseco tipo P:

$$p_0 > n_i > n_0$$

# SEMICONDUCTORES TIPO N

- Ecuación de Neutralidad

$$n_0 = p_0 + N_D^+$$

- Asumimos que a las temperaturas de interés se produce ionización total de las impurezas:  $N_D^+ \approx N_D$

- En la mayoría de casos  $N_D \gg n_i \Rightarrow n_0 \gg p_0$   $\begin{cases} n_0 \cong N_D \\ p_0 \cong \frac{n_i^2}{N_D} \end{cases}$

- Si no se cumple  $N_D \gg n_i$ , sistema de ecuaciones:

$$n_0 = p_0 + N_D \quad n_0 p_0 = n_i^2$$

# SEMICONDUCTORES TIPO P

- Ecuación de Neutralidad

$$p_0 = n_0 + N_A^-$$

- Asumimos que a las temperaturas de interés se produce ionización total de las impurezas:  $N_A^- \approx N_A$

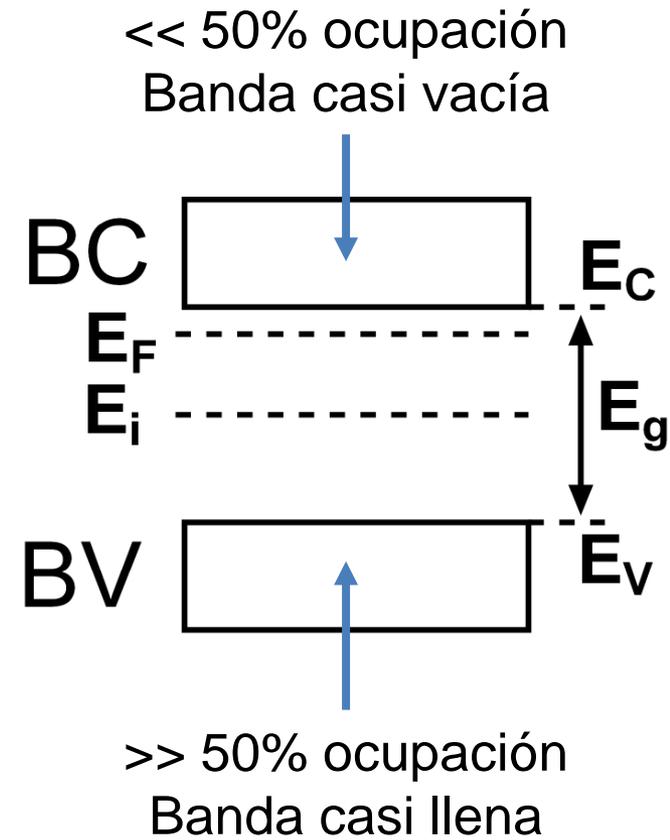
- En la mayoría de casos:  $N_A \gg n_i \Rightarrow p_0 \gg n_0$   $\begin{cases} p_0 \cong N_A \\ n_0 \cong \frac{n_i^2}{N_A} \end{cases}$

- Si no se cumple  $N_A \gg n_i$ , sistema de ecuaciones:

$$p_0 = n_0 + N_A \quad n_0 p_0 = n_i^2$$

# NIVEL DE FERMI

- Por definición, es el nivel energético al cual la probabilidad de ocupación de electrones estaría al 50%:
  - Por encima, el porcentaje de ocupación cae rápidamente.
  - Por debajo, el porcentaje de ocupación sube rápidamente.
- Siempre se encontrará dentro del gap entre BC y BV
- Por simetría, para el caso intrínseco está aproximadamente equidistante entre BC y BV



# CALCULO DEL NIVEL DE FERMI

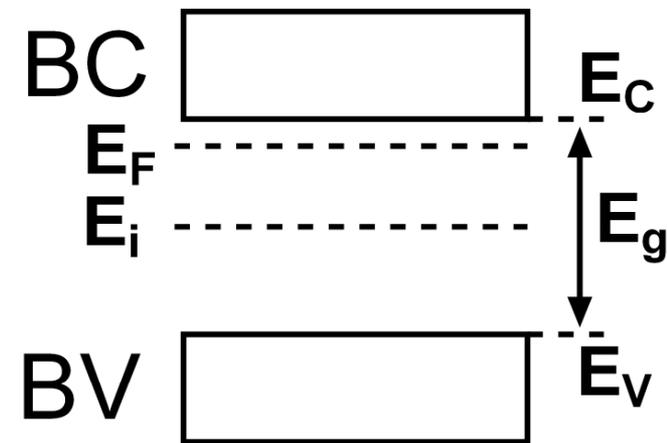
- Conocidas las concentraciones de electrones y/o huecos, el nivel de Fermi se puede calcular según una de las siguientes expresiones:

$$n_0 = N_c e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}} \quad n_0 = n_i e^{\frac{E_f - E_i}{kT}}$$

$$p_0 = N_v e^{\frac{E_v - E_f}{kT}} \quad p_0 = n_i e^{\frac{E_i - E_f}{kT}}$$

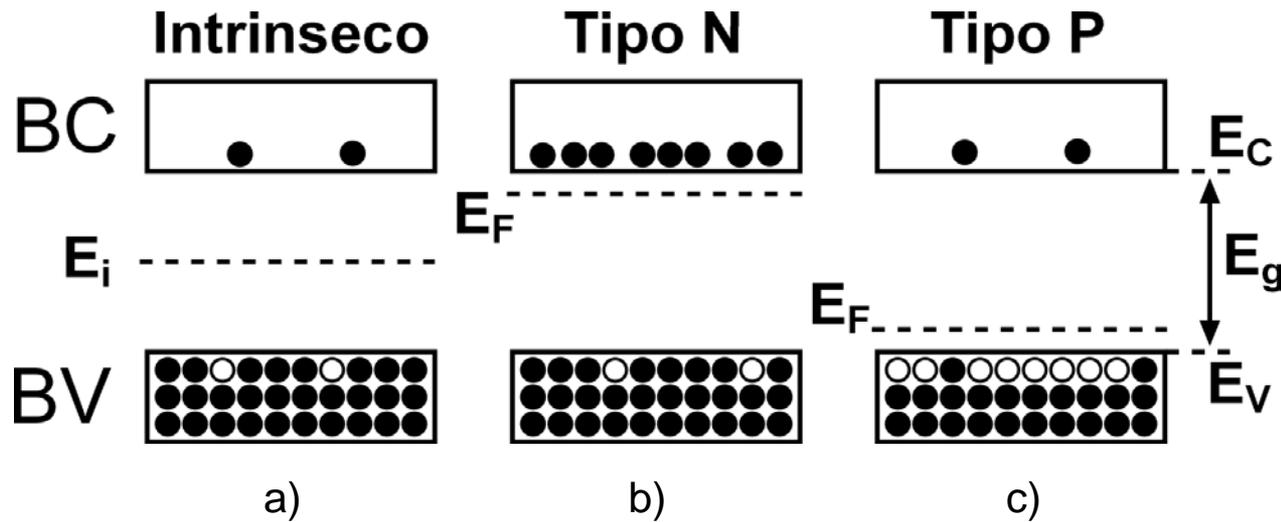
- Se suele trabajar con origen de energías en BV:

$$E_v = 0 \quad E_c = E_g \quad E_i \approx \frac{E_g}{2}$$



# NIVEL DE FERMI vs DOPAJE

- a) En un semiconductor intrínseco, el nivel de Fermi está aproximadamente en la mitad de la banda prohibida
- b) En un semiconductor extrínseco tipo N,  $E_F$  está más cerca de la banda de conducción que de la de valencia
- c) En un semiconductor extrínseco tipo P,  $E_F$  está más próximo a la banda de valencia que a la de conducción



# TEST 1

Los semiconductores a 0K:

- Conducen
- Semiconducen
- No conducen

El enlace que forma semiconductores es:

- Iónico
- Metálico
- Covalente

Los semiconductores dopados se basan en:

- Silicio
- Boro
- Fósforo

En los tipo N, se cumple:

- $n_0 > p_0$
- $n_0 = p_0$
- $n_0 < p_0$

¿Cuántas bandas de energía permitida tienen los materiales?:

- Una
- Dos
- Más de dos

Para Silicio ( $E_g = 1,12$  eV), si  $E_F = 0,82$  eV, el material es:

- Intrínseco
- Tipo N
- Tipo P

En un material dopado tipo P, lo más abundante es:

- Impurezas
- Huecos
- Electrones libres
- Material base
- Electrones de valencia

# EJERCICIO 1

**Ejemplo. Semiconductor intrínseco. Sea una muestra de silicio.**

$$\begin{aligned} N_c &= 2,82 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3} & N_v &= 1,83 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3} \\ k &= 86,2 \cdot 10^{-6} \text{eV/K} & E_g &= 1,12 \text{eV} \end{aligned}$$

**a) Calcule la densidad de portadores a 300K y 350K.**

$$n_{0,300K} = p_{0,300K} = n_{i,300K} =$$

$$n_{0,350K} = p_{0,350K} = n_{i,350K} =$$

**b) Calcule la posición del nivel de Fermi intrínseco en cada caso, según la aproximación**

$$E_{i,300K} =$$

$$E_{i,350K} =$$

# EJERCICIO 2

**Ejemplo. Semiconductor extrínseco. Sea una muestra de silicio.**

**a) Calcule la densidad de portadores intrínsecos a 300K y 350K.**

$$n_{i,300K} =$$

$$n_{i,350K} =$$

**b) Calcule la densidad de electrones y huecos si se dopa con fósforo (donadoras) en una concentración de  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  para ambas temperaturas.**

$$n_{0,300K} =$$

$$n_{0,350K} =$$

$$p_{0,300K} =$$

$$p_{0,350K} =$$

**c) Calcule la posición del nivel de Fermi extrínseco para ambas temperaturas.**

$$E_{F,300K} =$$

$$E_{F,350K} =$$

# SEMICONDUCTORES COMPENSADOS

- Dopaje mixto con los dos tipos de impurezas:

$$p_0 + N_D^+ = n_0 + N_A^-$$

- Asumimos que a las temperaturas de interés se produce ionización total de las impurezas:  $N_D^+ \approx N_D$  y  $N_A^- \approx N_A$

Si  $N_D > N_A$ : tipo N

$$N_D - N_A \gg n_i \begin{cases} n_0 \cong N_D - N_A \\ p_0 \cong \frac{n_i^2}{N_D - N_A} \end{cases}$$

Si  $N_A > N_D$ : tipo P

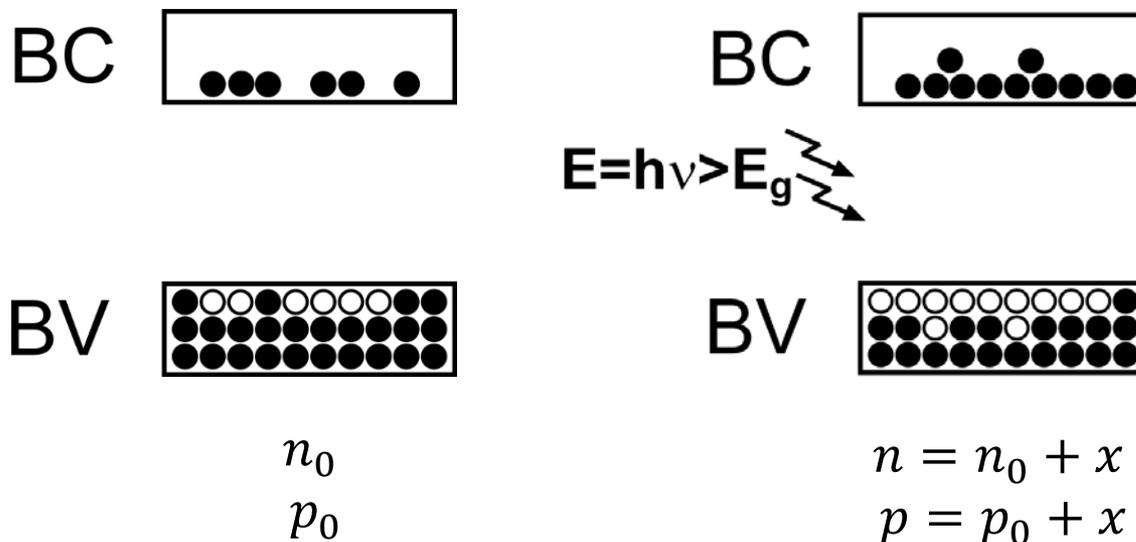
$$N_A - N_D \gg n_i \begin{cases} p_0 \cong N_A - N_D \\ n_0 \cong \frac{n_i^2}{N_A - N_D} \end{cases}$$

Si  $N_D = N_A$ : “intrínseco”

$$n_0 \cong p_0 \cong n_i$$

# DESEQUILIBRIO TERMODINÁMICO

- Bajo una acción exterior (para nosotros, luz) deja de cumplirse la ley de acción de masas, por lo que la solución la hallaremos usando:
  - Los electrones y huecos generados por la luz tienen que ser iguales, debido a la ecuación de neutralidad.
  - Una condición extra que me especificará el enunciado.



# EJERCICIO 3

**Ejemplo. Semiconductor intrínseco iluminado. Sea una muestra de silicio a 300K. Calcule la densidad de portadores si la iluminación provoca que el número de electrones se duplique respecto del caso no iluminado:**

**Sin iluminación:**

$$n_0 = p_0 = n_i \cong 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

**Con iluminación, calculamos los electrones generados (x):**

$$n =$$

**Calculamos el nuevo número de huecos, que también cambia:**

$$p =$$

**Podemos comprobar como la ecuación de neutralidad se cumple y la ley de acción de masas no:**

$$n = p \quad np \neq n_i^2$$

# EJERCICIO 4

**Ejemplo. Semiconductor extrínseco iluminado. Sea una muestra de silicio a 300K. Calcule la densidad de electrones y huecos si la iluminación provoca que el número de electrones se duplique respecto del caso no iluminado con un dopado con fósforo en una concentración de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  :**

**Sin iluminación:**

$$n_0 \cong N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad p_0 \cong 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

**Con iluminación, calculamos los electrones generados (x):**

$$n =$$

**Calculamos el nuevo número de huecos, que también cambia:**

$$p =$$

**Podemos comprobar como la ecuación de neutralidad se cumple y la ley de acción de masas no:**

$$n - p = N_D \quad np \neq n_i^2$$

# TEMA 2 – SEMICONDUCTORES

- Aislantes/Conductores
- Modelo covalente
- Modelo de bandas
- Conductividad



# CONDUCTIVIDAD

➤ La conductividad viene dada por:

$$\sigma = q\mu_n n + q\mu_p p \text{ [}(\Omega\text{cm})^{-1}\text{]}$$

donde:

$n$ : concentración de electrones libres

$p$ : concentración de huecos

$\mu_n$ : movilidad de los electrones libres

$\mu_p$ : movilidad de los huecos

$q$ : valor absoluto de la carga del electrón

Las movilidades dependen del material semiconductor y, casi siempre,

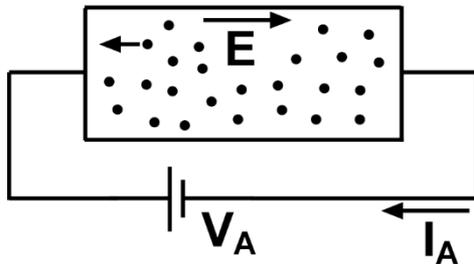
$$\mu_n > \mu_p$$

# CONDUCTIVIDAD

- La fuente  $V_A$ , genera un campo eléctrico  $E$  en el material semiconductor, el cual fuerza el movimiento de los portadores (huecos en la dirección del campo eléctrico y electrones en sentido opuesto), lo que conlleva que aparezca una corriente  $I_A$  en el circuito, cuya dirección solo depende de  $V_A$ , no del tipo de semiconductor.

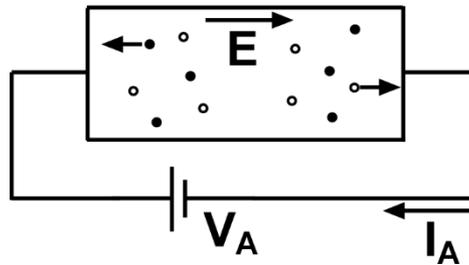
## TIPO N

$$\sigma = q\mu_n N_D$$



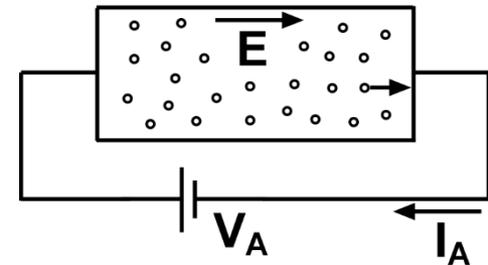
## INTRÍNSECO

$$\sigma = q(\mu_n + \mu_p)n_i$$



## TIPO P

$$\sigma = q\mu_p N_A$$

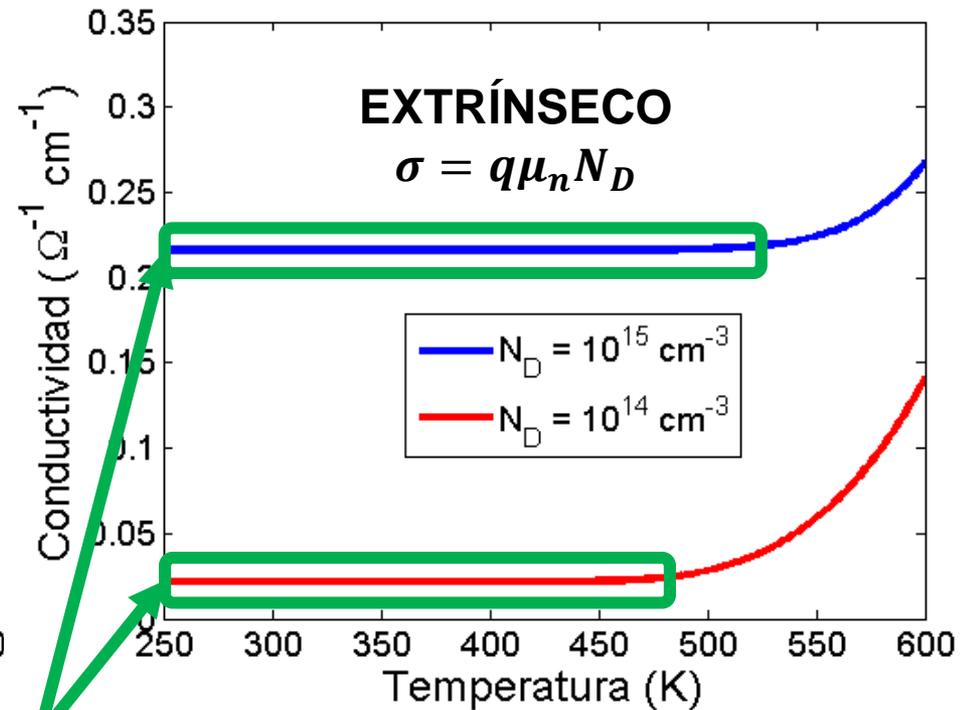
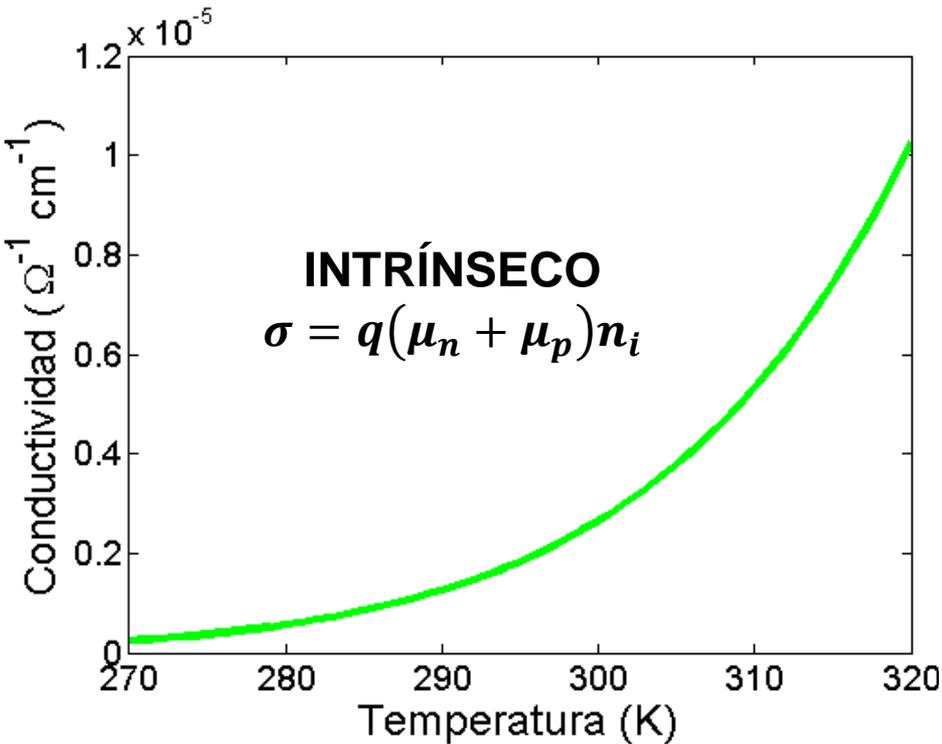


- La resistencia del material depende de sus dimensiones (longitud y sección) y la conductividad:

$$I_A = \frac{V_A}{R} \leftrightarrow R = \frac{L}{A\sigma}$$

# CONDUCTIVIDAD

- Su dependencia con la temperatura cambia según el tipo de material semiconductor (datos del silicio):

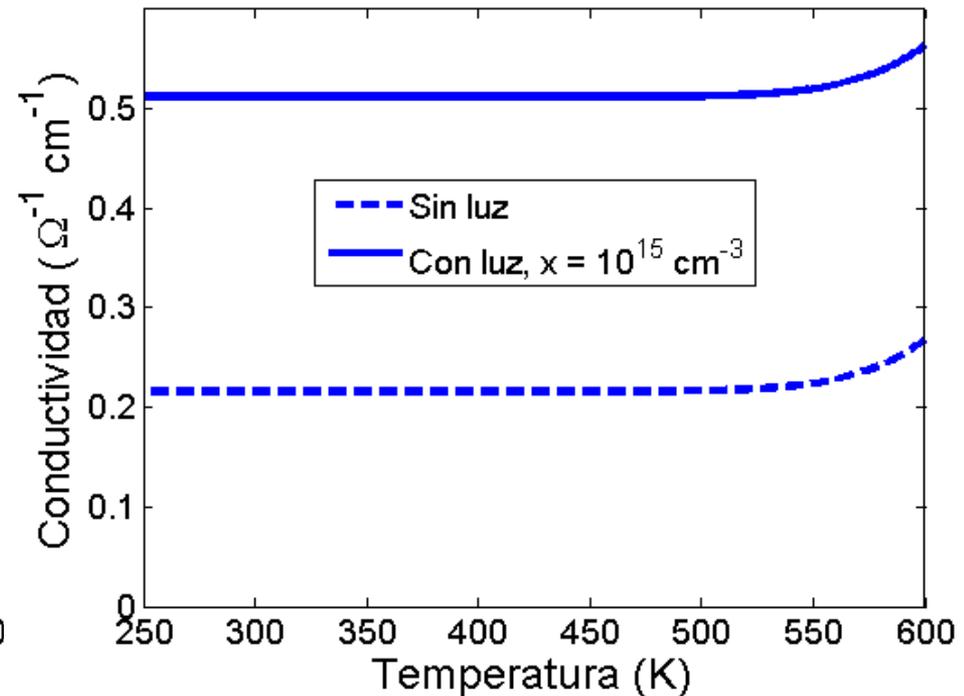
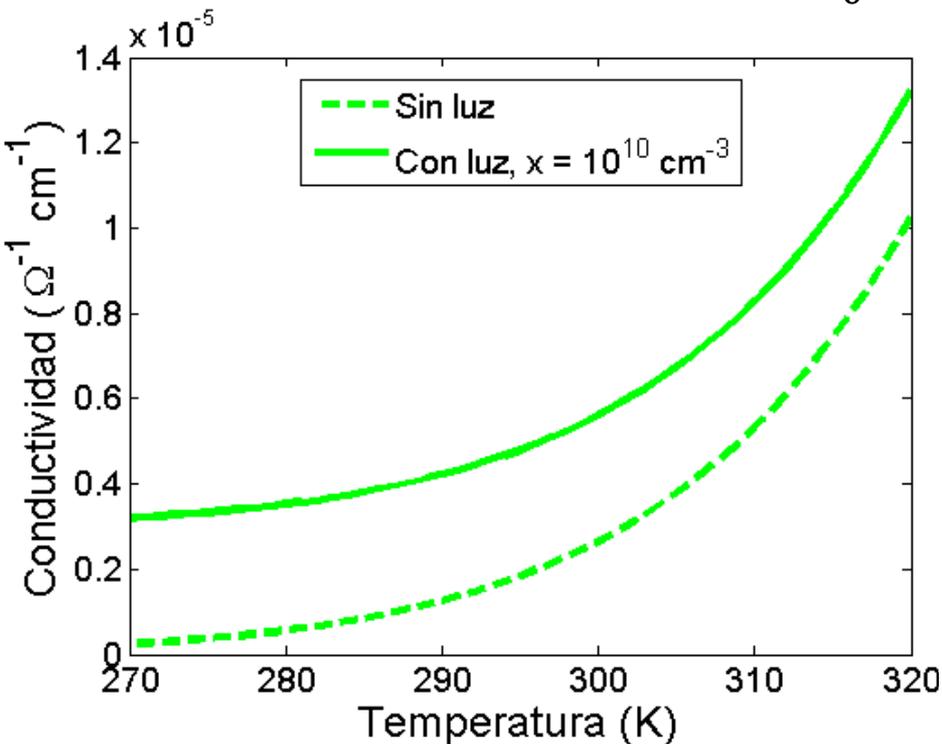


**REGIÓN EXTRÍNSECA ( $N_D \gg n_i$ )**

# CONDUCTIVIDAD

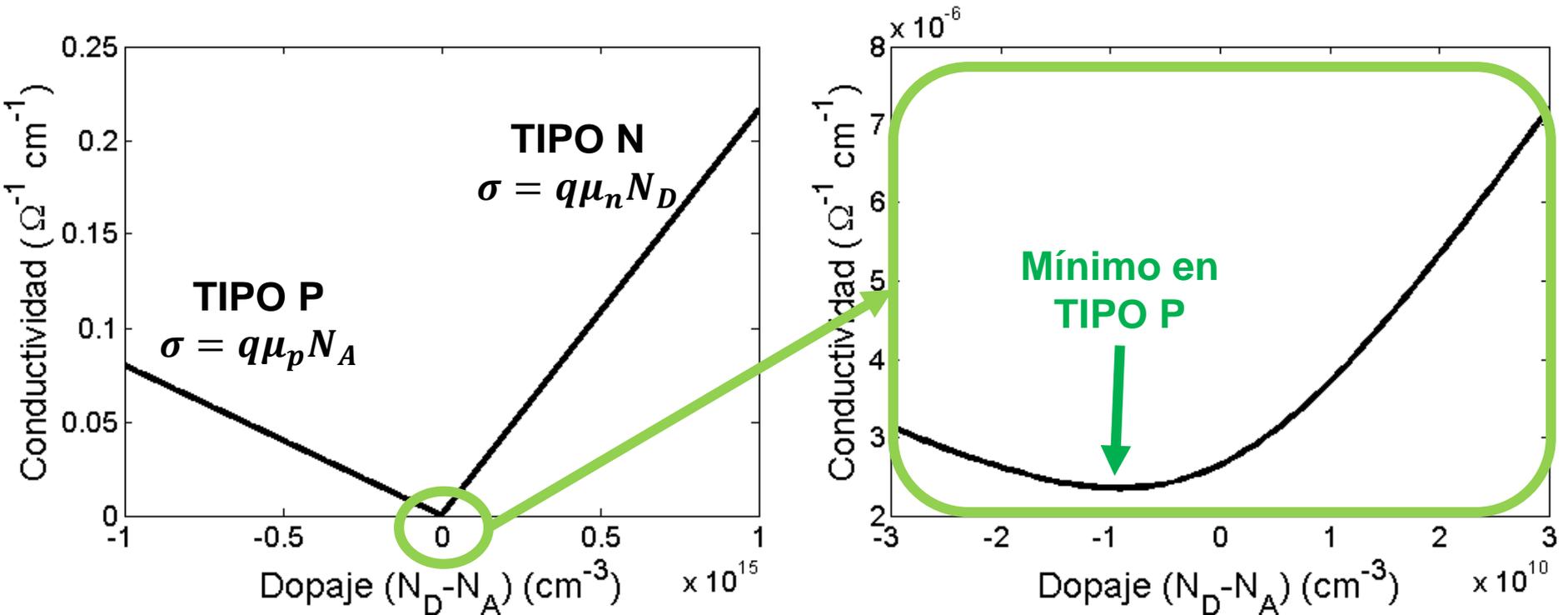
- Al introducir luz, la conductividad aumenta en ambos casos (x representa electrones generados por luz):

$$n = n_0 + x \quad p = p_0 + x$$



# CONDUCTIVIDAD

- Para una temperatura constante (300K), la conductividad puede modificarse cambiando el dopaje (datos del silicio):



# APLICACIONES

- Ya que la conductividad de un material semiconductor depende múltiples factores, se pueden usar de:
  - Sensor de temperatura (sonda NTC)
  - Sensor de luz (LDR)
  - Sensor magnético (Sonda Hall)
- Además, son la base para formar los dispositivos electrónicos:
  - Diodos
  - Transistores
- Los cuales dan lugar a los componentes básicos:
  - Analógica: amplificadores
  - Digital: puertas lógicas

# TEST 2

La máxima conductividad se alcanza para Silicio si ( $x \gg n_i$ ):

- Tipo N,  $N_D = x$
- Tipo P,  $N_A = x$
- Mixto,  $N_A = N_D = x$

En un material dopado tipo N, se reduce la conductividad si:

- Se calienta
- Se incluyen impurezas aceptadoras
- Se ilumina
- Se incluyen impurezas donadoras

# EJERCICIO 5

**Semiconductor basado en silicio a 290K.**

$$\begin{aligned} N_c &= 2,82 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3} & N_v &= 1,83 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3} \\ k &= 86,2 \cdot 10^{-6} \text{eV/K} & E_g &= 1,12 \text{eV} \\ q &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} & \mu_n &= 1350 \text{cm/Vs} & \mu_p &= 500 \text{cm/Vs} \end{aligned}$$

**Calcule la concentración de portadores, el nivel de Fermi y la conductividad para:**

**a) El caso intrínseco**

**b) Tipo P con  $N_A = 10^{15} \text{cm}^{-3}$**

**c) Dopaje mixto con  $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_A = 8 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$**

**Calcule la concentración de portadores y la conductividad para todos los casos, si por iluminación se generan  $10^{15} \text{electrones cm}^{-3}$ .**

# CUESTIÓN

Semiconductor basado en silicio a T<sup>a</sup> ambiente con impurezas donadoras N<sub>D</sub>.

$$E_g = 1.12 \text{ eV}$$

Justifique cual de estas soluciones es la única válida:

$$\begin{aligned}n_0 &= 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\p_0 &= 7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3} \\E_F &= 0.9 \text{ eV} \\\sigma &= 0.648 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}n_0 &= 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\p_0 &= 7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3} \\E_F &= 0.2 \text{ eV} \\\sigma &= 0.648 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}n_0 &= 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\p_0 &= 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\E_F &= 0.9 \text{ eV} \\\sigma &= 0.648 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}n_0 &= 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\p_0 &= 7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3} \\E_F &= 1.5 \text{ eV} \\\sigma &= 0.648 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}n_0 &= 3 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3} \\p_0 &= 7 \cdot 10^5 \text{ m}^{-3} \\E_F &= 0.9 \text{ eV} \\\sigma &= 0.648 \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}n_0 &= 3 \cdot 10^{15} \\p_0 &= 7 \cdot 10^5 \\E_F &= 0.9 \\\sigma &= 0.648\end{aligned}$$