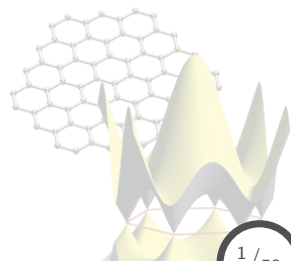


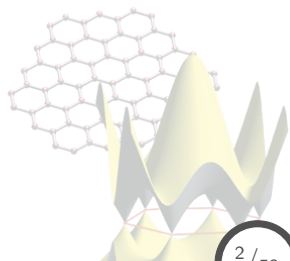
7. Semiconductores



Contenido: Tema 07

7. Semiconductores

- 7.1 Fundamentos, definiciones, y caracterización de la brecha de energía
- 7.2 Ecuaciones de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva
- 7.3 Semiconductores intrínsecos y portadores de carga
- 7.4 Semiconductores extrínsecos (dopaje), estados donores (tipo n) y aceptores (tipo p)



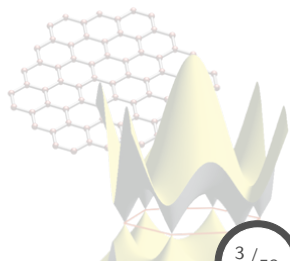
7. Semiconductores

7.1 Fundamentos, definiciones, y caracterización de la brecha de energía

7.2 Ecuaciones de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

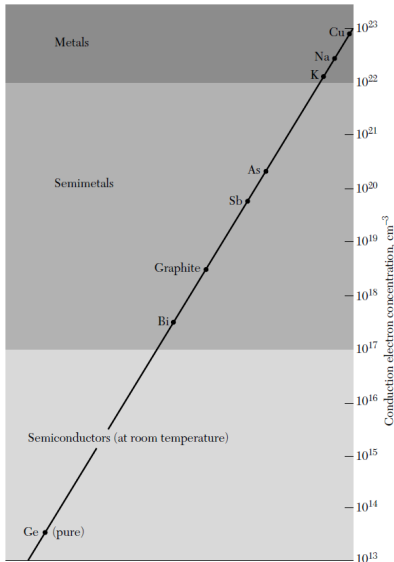
7.3 Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

7.4 Semiconductores extrínsecos (dopaje), estados donores (tipo n) y aceptores (tipo p)



Definición y caracterización de la brecha de energía

Fundamentos



Semiconductores

- Posee una **resistividad** a temp. ambiente en el rango de 10^{-12} a 10^9 ohm-cm, fuertemente dependiente de la temperatura.
- A 0 K, un monocristal perfecto y puro tendrá comp. de **aislante** (res: 10^{14} ohm-cm).
- Los compuestos semiconductores de fórmula química **AB** tienen la siguiente nomenclatura:
 - **III-V**: **A** elemento trivalente y **B** pentavalente.
 - **II-VI**: **A** elemento divalente y **B** hexavalente.
 - **IV-IV**: **Ambos** elementos son cuadrivalentes.

Definición y caracterización de la brecha de energía

Nomenclatura

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS
<http://www.kj-soft.hr/periodni/en/>

GROUP: 1 IA, 2 IIA, 13 IIIA, 14 IVA, 15 VA, 16 VIA, 17 VIIA, 18 VIIIA

PERIOD: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

RELATIVE ATOMIC MASS (A): 1.0079 (H), 6.941 (Li), 9.0122 (Be), 10.811 (B), 12.011 (C), 14.007 (N), 15.999 (O), 18.998 (F), 20.180 (Ne), 22.990 (Na), 24.305 (Mg), 26.982 (Al), 28.086 (Si), 30.974 (P), 32.065 (S), 35.453 (Cl), 39.948 (Ar), 39.098 (K), 40.078 (Ca), 44.956 (Sc), 47.867 (Ti), 50.942 (V), 51.996 (Cr), 54.938 (Mn), 55.845 (Fe), 58.933 (Co), 58.933 (Ni), 63.546 (Cu), 65.39 (Zn), 69.723 (Ga), 72.6 (Ge), 74.922 (As), 78.96 (Se), 79.904 (Br), 83.80 (Kr), 87.62 (Rb), 87.62 (Sr), 88.906 (Y), 90.907 (Zr), 90.907 (Nb), 90.907 (Mo), 90.907 (Tc), 101.07 (Ru), 101.07 (Rh), 106.42 (Pd), 106.42 (Ag), 106.42 (Cd), 112.41 (In), 112.41 (Sn), 118.71 (Sb), 127.60 (Te), 127.60 (I), 131.29 (Xe), 132.91 (Cs), 132.91 (Ba), 137.33 (La-Lu), 172.17 (Hf), 172.17 (Ta), 172.17 (W), 172.17 (Re), 172.17 (Os), 172.17 (Ir), 172.17 (Pt), 172.17 (Au), 172.17 (Hg), 172.17 (Tl), 172.17 (Pb), 172.17 (Bi), 172.17 (Po), 172.17 (At), 172.17 (Rn), 172.17 (Fr), 172.17 (Ra), 172.17 (Ac-Lr), 172.17 (Rf), 172.17 (Db), 172.17 (Sg), 172.17 (Bh), 172.17 (Hs), 172.17 (Mt), 172.17 (Uu), 172.17 (Uub), 172.17 (Uuq), 172.17 (Uuq)

ATOMIC NUMBER: 5 (B), 10.811 (C)

ELEMENT NAME: BORON

STANDARD STATE (25 °C; 101 kPa):
 Ne - gas, Fe - solid, Cs - liquid, Ti - synthetic

Legend:
 Metal (blue), Semimetal (orange), Nonmetal (green)
 1 Alkali metal, 2 Alkaline earth metal, 3 Transition metals, 4 Lanthanide, 5 Actinide
 1A Halogens element, 2A Chalcogens element, 3A Halogens element, 4A Noble gas

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS (continued):

LANTHANIDE: 57 138.91 (La), 58 140.12 (Ce), 59 140.91 (Pr), 60 144.24 (Nd), 61 145 (Pm), 62 150.36 (Sm), 63 151.96 (Eu), 64 157.25 (Gd), 65 158.93 (Tb), 66 162.50 (Dy), 67 164.93 (Ho), 68 167.26 (Er), 69 168.93 (Tm), 70 173.04 (Yb), 71 174.97 (Lu)

ACTINIDE: 89 (227) (Ac), 90 232.04 (Th), 91 231.04 (Pa), 92 238.03 (U), 93 (237) (Np), 94 (244) (Pu), 95 (243) (Am), 96 (247) (Cm), 97 (247) (Bk), 98 (251) (Cf), 99 (252) (Es), 100 (257) (Fm), 101 (258) (Md), 102 (259) (No), 103 (262) (Lr)

Copyright © 1998-2003 EdG (www.kj-soft.hr)

Editor: Aditya Vashan (adviv@rediffmail.com)

Ejemplos de compuestos III-V: InSb, GaAs.

Definición y caracterización de la brecha de energía

Nomenclatura

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

<http://www.kj-apt.hr/periodict/en/>

GROUP	1	2	III A										14	15	16	17	18	
PERIOD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1.0079 H HYDROGEN																	4.0026 He HELIUM
2	6.941 Li LITHIUM	9.0122 Be BERYLLIUM																18.998 Ne NEON
3	22.990 Na SODIUM	24.305 Mg MAGNESIUM																39.948 Ar ARGON
4	39.098 K POTASSIUM	40.078 Ca CALCIUM	44.956 Sc SCANDIUM	47.867 Ti TITANIUM	50.942 V VANADIUM	51.996 Cr CHROMIUM	54.938 Mn MANGANESE	55.845 Fe IRON	58.933 Co COBALT	58.933 Ni NICKEL	63.546 Cu COPPER	65.39 Zn ZINC	69.723 Ga GALLIUM	72.64 Ge GERMANIUM	74.922 As ARSENIC	78.96 Se SELENIUM	79.904 Br BROMINE	83.80 Kr KRYPTON
5	85.468 Rb RUBIDIUM	87.62 Sr STRONTIUM	88.906 Y YTRITIUM	90.907 Zr ZIRCONIUM	91.224 Nb NIOBIUM	92.906 Mo MOLIBDENO	95.94 Tc TECNETIUM	98.906 Ru RUTENIO	101.07 Rh RHODIO	101.07 Pd PALADIUM	106.36 Ag SILVER	107.868 Cd CADMIUM	112.41 In INDIUM	114.818 Sn ESTAN	118.710 Sb ANTIMONIO	127.46 Te TELURO	126.905 I YODO	131.29 Xe XENON
6	132.91 Cs CESIUM	137.33 Ba BARIUM	175.10 La-Lu Lanthanide	175.10 Hf HAFNIO	178.49 Ta TANTALO	180.95 W WOLFRAMO	183.84 Re RENUMIO	186.21 Os OSMIO	193.22 Ir IRIDIO	195.08 Pt PLATINO	196.967 Au ORO	200.59 Hg MERCURIO	204.38 Tl TALIO	208.98 Pb PLOMBO	208.98 Bi BISMUTO	208.98 Po POLONIO	209 At ASTATINA	222 Rn RADON
7	223 Fr FRANCIUM	226 Ra RADIO	89-103 Ac-Lr Actinide	226 Rf RUFENIO	261 Db DUBNIO	261 Sg SEABORGIUM	261 Bh BOHRIO	261 Hs HASSIUM	261 Mt MEITNERIUM	261 Uu UNUNUNIO	261 Uub UNUNBIO	261 Uuq UNUNQUADRIUM						

RELATIVE ATOMIC MASS (1)

GROUP IUPAC

ATOMIC NUMBER

SYMBOL

ELEMENT NAME

Metal
Semimetal
Nonmetal

I Alkali metal
2 Alkaline earth metal
3-10 Transition metals
11-12 Lanthanide
13-18 Actinide

13-18 Chalcogens element
17 Halogens element
18 Noble gas

STANDARD STATE (25 °C; 101 kPa)

Ne - gas
Ca - liquid
Ti - solid
H - synthesis

(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 667-683 (2001) Relative atomic mass is shown with the significant figures. For elements with no stable nucleus, the value enclosed in brackets indicates the mass number of the longest-lived isotope of the element.
 However three such elements (Tl, Pa, U) do have a characteristic terrestrial isotopic composition, and for these an atomic weight is tabulated.

LANTHANIDE

57 138.91 La LANTHANUM	58 140.12 Ce CEURIUM	59 140.91 Pr PRASEODYMIUM	60 144.24 Nd NEODYMIUM	61 (145) Pm PROMETHIUM	62 150.36 Sm SAMARIUM	63 151.96 Eu EUROPIUM	64 157.25 Gd GADOLINIUM	65 158.93 Tb TERBIUM	66 162.50 Dy DYSPROSIUM	67 164.93 Ho HOLMIUM	68 167.26 Er ERBIO	69 168.93 Tm THULIUM	70 173.04 Yb YTTERIUM	71 174.97 Lu LUTETIUM
-------------------------------------	-----------------------------------	--	-------------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

ACTINIDE

89 (227) Ac ACTINIUM	90 232.04 Th THORIUM	91 231.04 Pa PROTACTINIUM	92 238.03 U URANIUM	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMERICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERKELIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es EINSTEINIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (258) Md MENDELEVIUM	102 (260) No NOBELIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM
-----------------------------------	-----------------------------------	--	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

Editor: Aditya Vashan (adviv@ncjll.com)

Ejemplos de compuestos **II-VI**: ZnS, CdS.

Definición y caracterización de la brecha de energía

Nomenclatura

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS
<http://www.kjf-split.hr/periodic/>

RELATIVE ATOMIC MASS (1)

GROUP IUPAC

ATOMIC NUMBER

SYMBOL

ELEMENT NAME

Metal
 Semimetal
 Nonmetal
 Alkali metal
 Alkaline earth metal
 Transition metals
 Actinide
 Lanthanide
 Chalcogens element
 Halogens element
 Noble gas

STANDARD STATE (25 °C, 101 kPa)
 Ne - gas Fe - solid Ga - liquid Te - synthetic

GROUP	PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS																VIIIA		
1	IIA												IVA				VIA	VIIA	18
1	2												6				8	10	18
2	3												14				16	18	36
3	4												32				34	36	54
4	5												50				52	54	86
5	6												68				70	72	118
6	7												86				88	90	150
7	8												104				106	108	172

(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 697-683 (2001)
 Relative atomic mass is shown with five significant figures. For elements having no stable nuclides, the value enclosed in brackets indicates the mass number of the longest-lived isotope of the element.

However three such elements (Th, Pa, and U) do have a characteristic terrestrial isotopic composition, and for these an atomic weight is tabulated.

Editor: Ashya Vaseeha (advv@enr.com)

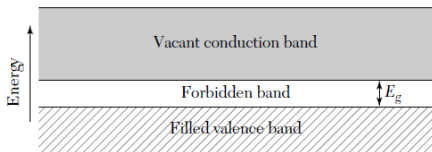
Copyright © 1996-2003 E&G (enr@split.hr)

Ejemplo de compuesto **IV-IV**: SiC.

Monovalentes **IV**, se les conoce como tipo **diamante**: Si, Ge.

Definición y caracterización de la brecha de energía

Brecha de energía (band-gap)

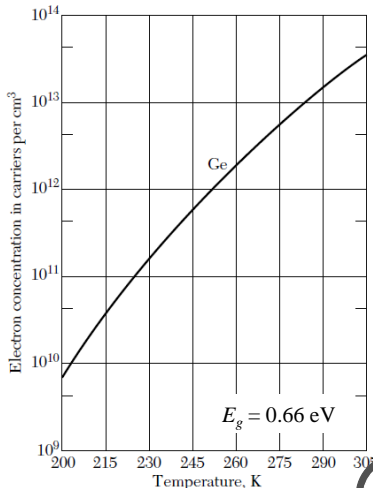


La **conductividad intrínseca** (sin impurezas) a 0 K es nula, debido a que los estados de **valencia** están ocupados, y los de **conducción** desocupados, separados por una **brecha de energía**, definida como:

$$E_g = E_c - E_v,$$

siendo la conductividad controlada fuertemente por la razón $E_g/k_B T$.

A altas T los e^- son excitados térmicamente de la banda de valencia a la de conducción.

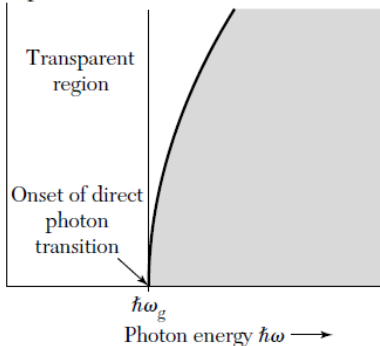


Definición y caracterización de la brecha de energía

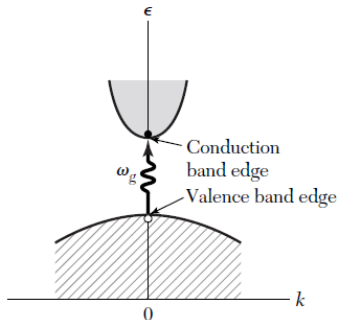
Brecha de energía (band-gap): Clasificación

Band-gap directo

Absorption



En mediciones de **absorción óptica**, la frontera de absorción continua a una frecuencia ω_g mide el **band gap** $E_g = \hbar\omega_g$.



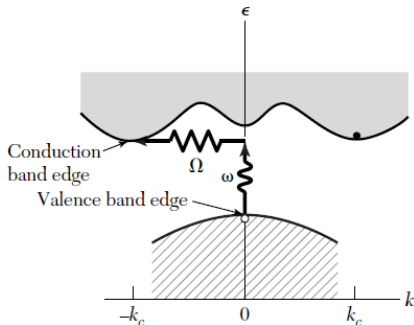
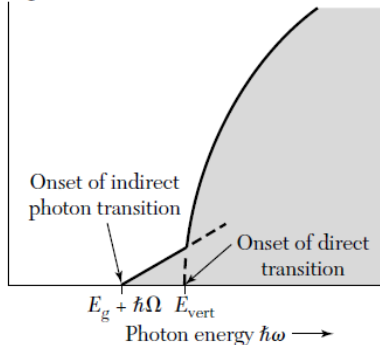
En este proceso, un fotón es absorbido por el cristal con la creación de un **par electrón-hueco**, con el mismo k .

Definición y caracterización de la brecha de energía

Brecha de energía (band-gap): Clasificación

Band-gap indirecto

Absorption



- El band gap involucra un par electrón-hueco **distanciado** por un vector de onda \mathbf{k}_c apreciable.
- Se requiere de la creación de un **fonón** $\Omega_{\mathbf{K}}$ para mantener la conservación del vector de onda,

$$\mathbf{k}_{photon} = \mathbf{k}_c + \mathbf{K} \approx 0 \quad \& \quad \hbar\omega_g = E_g + \hbar\Omega.$$

Definición y caracterización de la brecha de energía

Brecha de energía (band-gap): Ejemplos

Crystal	Gap	E_g , eV		Crystal	Gap	E_g , eV	
		0 K	300 K			0 K	300 K
Diamond	<i>i</i>	5.4		SiC(hex)	<i>i</i>	3.0	—
Si	<i>i</i>	1.17	1.11	Tc	<i>d</i>	0.33	—
Ge	<i>i</i>	0.744	0.66	HgTe ^a	<i>d</i>	-0.30	
α Sn	<i>d</i>	0.00	0.00	PbS	<i>d</i>	0.286	0.34–0.37
InSb	<i>d</i>	0.23	0.17	PbSe	<i>i</i>	0.165	0.27
InAs	<i>d</i>	0.43	0.36	PbTe	<i>i</i>	0.190	0.29
InP	<i>d</i>	1.42	1.27	CdS	<i>d</i>	2.582	2.42
GaP	<i>i</i>	2.32	2.25	CdSe	<i>d</i>	1.840	1.74
GaAs	<i>d</i>	1.52	1.43	CdTe	<i>d</i>	1.607	1.44
GaSb	<i>d</i>	0.81	0.68	SnTe	<i>d</i>	0.3	0.18
AlSb	<i>i</i>	1.65	1.6	Cu ₂ O	<i>d</i>	2.172	—

i=band gap indirecto, *d*= band gap directo.

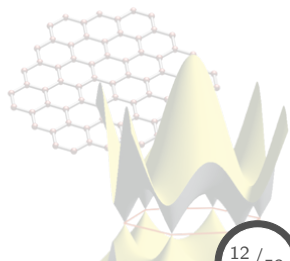
7. Semiconductores

7.1 Fundamentos, definiciones, y caracterización de la brecha de energía

7.2 Ecuaciones de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

7.3 Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

7.4 Semiconductores extrínsecos (dopaje), estados donores (tipo n) y aceptores (tipo p)



Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Ecuación de movimiento

Considerando el mov. de electrones en presencia de un campo eléctrico aplicado, cuyas funciones de onda tienen un vector de onda \mathbf{k} determinado, se tiene que:

La **velocidad de grupo** es,

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad \forall \quad \omega = \frac{\epsilon}{\hbar},$$
$$v_g = \frac{1}{\hbar} \frac{d\epsilon}{dk} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{v} = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\mathbf{k}} \epsilon(\mathbf{k}),$$

en donde $\epsilon(\mathbf{k})$ representa la **estructura de bandas** del sistema.

Calculando el trabajo realizado por un e^- en presencia del campo aplicado \mathbf{E} , en un intervalo δt :

$$\delta\epsilon = F\delta x = -(eE)(v_g\delta t),$$

pero se también se tiene:

$$\delta\epsilon = \frac{d\epsilon}{dk} \delta k = \hbar v_g \delta k,$$

comparando resultados,

$$\Rightarrow \quad \hbar \frac{dk}{dt} = -eE,$$

lo cual, expresando en términos de fuerza, queda como:

$$\hbar \frac{d\mathbf{k}}{dt} = \mathbf{F}.$$

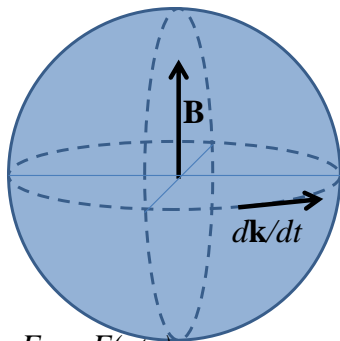
Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Ecuación de movimiento

La expresión anterior aplica aún en casos cuando se tiene un campo magnético aplicado \mathbf{B} ¹: **fuerza de Lorentz**,

$$\hbar \frac{d\mathbf{k}}{dt} = \mathbf{F} = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B} \rightarrow \frac{d\mathbf{k}}{dt} = -\frac{e}{\hbar^2} \nabla_{\mathbf{k}} \epsilon(\mathbf{k}) \times \mathbf{B} \quad \forall \quad \mathbf{v} = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\mathbf{k}} \epsilon(\mathbf{k}).$$

- El e^- se mueve en el esp. \mathbf{k} en dirección \perp a $\nabla_{\mathbf{k}} \epsilon(\mathbf{k})$ \therefore se mueve en una superficie de **energía constante**.
- $|\mathbf{k}_B| = \text{cte} \quad \forall \quad \mathbf{k}_B = \mathbf{k} \cdot \mathbf{B}$.
- El movimiento en \mathbf{k} es en un plano **normal** a \mathbf{B} , donde la órbita está definida por la **intersección** de este plano con la superficie de energía cte.



$$E_{\mathbf{k}} = E(\text{cte})$$

¹Siempre y cuando el campo aplicado no destruya la estructura de bandas.

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Portadores de carga: Huecos

Huecos: Orbitales **vacantes** en una banda **llena**.

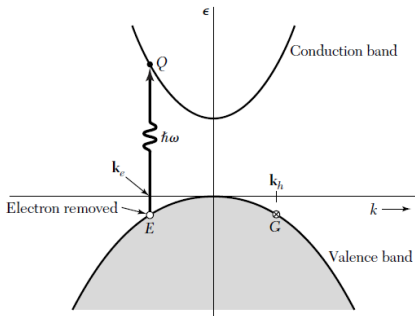
Vector de onda

El vector de onda total de una banda llena es cero,

$$\sum \mathbf{k} = 0.$$

Si un e^- con un vector \mathbf{k}_e se pierde de un orbital \Rightarrow el vector de onda total ahora es $-\mathbf{k}_e$, atribuyéndolo a un **huevo**,

$$\mathbf{k}_h = -\mathbf{k}_e.$$



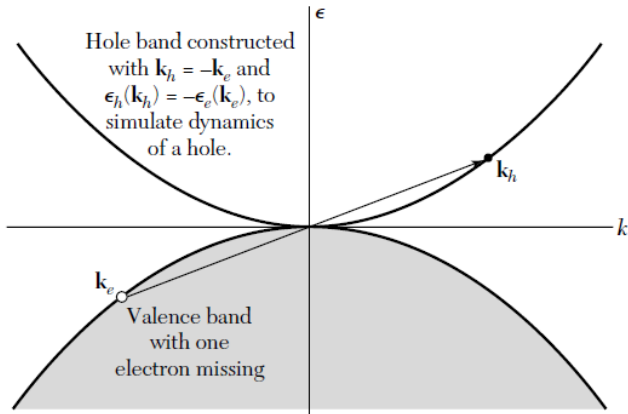
El **huevo** es una descripción alternativa de una banda con un electrón menos.

El vector de onda total es **inalterado** después de un proceso de **absorción** de un fotón y **creación** de un par electrón-huevo.

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Portadores de carga: Huecos

Energía



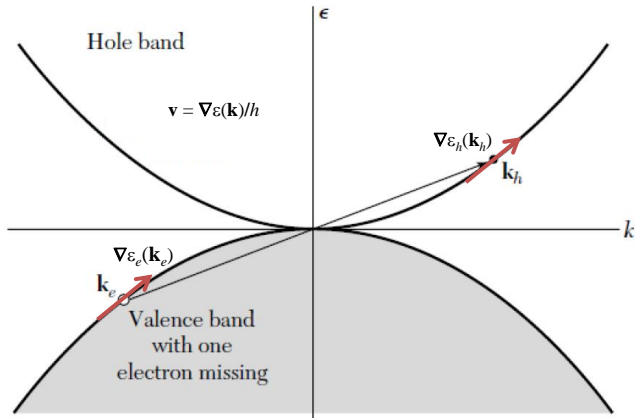
Teniendo en cuenta la simetría de **inversión** de la estructura de bandas,

$$\begin{aligned}\epsilon_e(\mathbf{k}_e) &= \epsilon_e(-\mathbf{k}_e) = -\epsilon_h(-\mathbf{k}_e) = -\epsilon_h(\mathbf{k}_h), \\ \Rightarrow \epsilon_h(\mathbf{k}_h) &= -\epsilon_e(\mathbf{k}_e).\end{aligned}$$

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Portadores de carga: Huecos

Velocidad



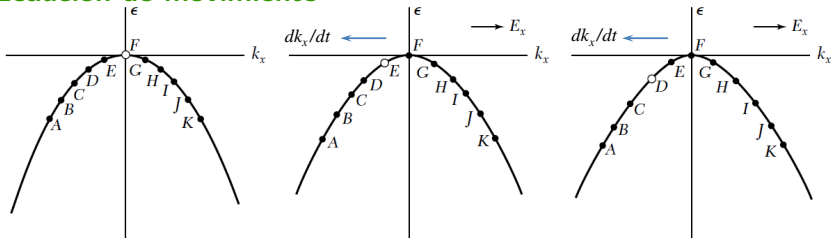
Calculando el gradiente para el electrón y hueco,

$$\begin{aligned}\nabla\epsilon_e(\mathbf{k}_e) &= \nabla\epsilon_h(\mathbf{k}_h), \\ \Rightarrow \mathbf{v}_h(\mathbf{k}_h) &= \mathbf{v}_e(\mathbf{k}_e).\end{aligned}$$

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Portadores de carga: Huecos

Ecuación de movimiento



La **ec. de movimiento** de e^- en presencia de campos electromagnéticos viene dada por,

$$\hbar d\mathbf{k}_e/dt = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}),$$

para el caso de **huecos** se tiene:

$$\mathbf{k}_h = -\mathbf{k}_e \ \& \ \mathbf{v}_h = \mathbf{v}_e \ \Rightarrow \ \hbar d\mathbf{k}_h/dt = e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_h \times \mathbf{B}),$$

es decir, la ec. de movimiento de un **hueco** será la de una partícula con **carga positiva** e^+ .

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Masa efectiva

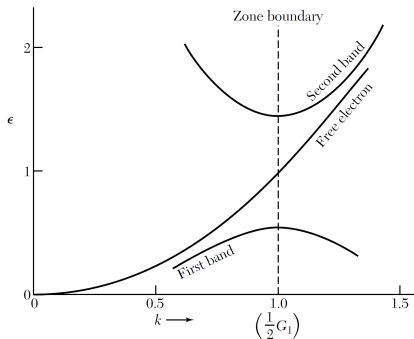
De la relación de dispersión tipo **electrón libre**,

$$\epsilon(k) = (\hbar^2/2m)k^2,$$

se observa que el coef. $\hbar^2/2m$ se relaciona con la **curvatura** de la banda, la cual es determinada por el factor $1/m$ del sistema.

Para sist. bajo un **potencial periódico**, la est. de bandas muestra un gap en la frontera de la zona, siendo su expresión alrededor de tal punto como:

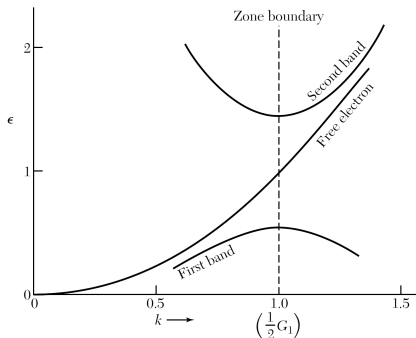
$$\epsilon_{\pm}(k) = \epsilon_{\pm} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \left(1 \pm \frac{2\lambda}{U} \right).$$



- $k = K - G/2$, coord. relativa a la frontera de la zona,
- $\lambda = \hbar^2 (G/2)^2 / 2m > U$,
- $U > 0 \rightarrow$ pot. de interacción,
- $\epsilon_{\pm} = \lambda \pm U \rightarrow$ energía en la frontera.

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Masa efectiva



La expresión para la banda de **conducción** viene dada por:

$$\epsilon_c(k) = \epsilon_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \left(1 + \frac{2\lambda}{U}\right),$$
$$\Rightarrow \epsilon_c(k) = \epsilon_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*},$$

mientras que para la de **valencia**,

$$\epsilon_v(k) = \epsilon_v + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \left(1 - \frac{2\lambda}{U}\right),$$
$$\Rightarrow \epsilon_v(k) = \epsilon_v + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*},$$

en donde se ha definido:

$$\frac{m_e^*}{m} = \frac{1}{1 + 2\lambda/U} > 0,$$

$$\frac{m_h^*}{m} = \frac{1}{1 - 2\lambda/U} < 0,$$

$\epsilon_c \rightarrow$ **mínimo** b. de conducción,

$\epsilon_v \rightarrow$ **máximo** banda de valencia.

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Masa efectiva

El resultado anterior para la descripción de las bandas de conducción y valencia,

$$\epsilon_c(k) = \epsilon_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*},$$
$$\epsilon_h(k) = \epsilon_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2|m_h^*|},$$

muestra claramente que los huecos presentan una masa **negativa** cerca del borde de la banda.

El diferente comp. dado por m_e^* y m_h^* afectará el movimiento de un portador de carga en un pot. periódico y bajo un EMF aplicado.

De la velocidad de grupo, se tiene:

$$v_g = \frac{1}{\hbar} \frac{d\epsilon}{dk} \rightarrow \frac{dv_g}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2\epsilon}{dk^2 dt},$$
$$\frac{dv_g}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2\epsilon}{dk^2} \frac{dk}{dt},$$

utilizando la exp. de la fuerza,

$$F = \hbar \frac{dk}{dt} \rightarrow \frac{dv_g}{dt} = \frac{F}{\hbar^2} \frac{d^2\epsilon}{dk^2},$$
$$\Rightarrow F = \left(\frac{\hbar^2}{d^2\epsilon/dk^2} \right) \frac{dv_g}{dt},$$
$$\therefore m^* = \frac{\hbar^2}{d^2\epsilon/dk^2} \rightarrow \frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2\epsilon}{dk^2},$$

lo cual define a la **masa efectiva**.

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Masa efectiva

En semiconductores de band gap directo, la banda de conducción tiene una dispersión tipo,

$$\epsilon_c = E_g + \hbar^2 k^2 / 2m_e,$$

mientras que las bandas de valencia son **triplemente** degeneradas,

- **Heavy holes,**

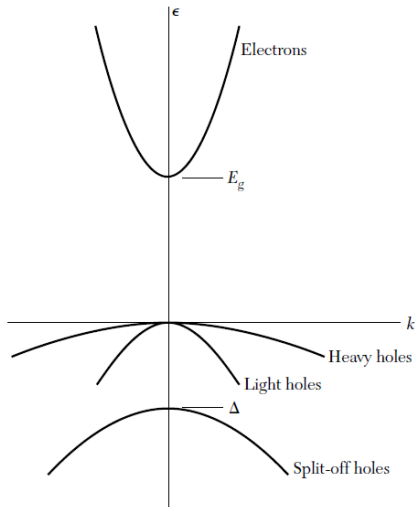
$$\epsilon_v(hh) \approx -\hbar^2 k^2 / 2m_{hh},$$

- **Light holes,**

$$\epsilon_v(lh) \approx -\hbar^2 k^2 / 2m_{lh},$$

- **Split-off holes** (SO-int.),

$$\epsilon_v(soh) \approx -\Delta - \hbar^2 k^2 / 2m_{soh}.$$



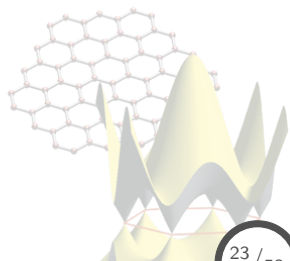
7. Semiconductores

7.1 Fundamentos, definiciones, y caracterización de la brecha de energía

7.2 Ecuaciones de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

7.3 Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

7.4 Semiconductores extrínsecos (dopaje), estados donores (tipo n) y aceptores (tipo p)



Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

Conductividad

La **conductividad** se define como,

$$\sigma = |e|\mu \quad \forall \quad \mu = -(-e)\tau/m^*,$$

en donde μ es la **movilidad** de portadores de carga y τ el **tiempo de relajación**.

Electrones

$$\begin{aligned}\sigma &= |e|\mu_n, \\ \mu_n &= -(-e)\tau/m_n^* > 0.\end{aligned}$$

Huecos

$$\begin{aligned}\sigma &= |e|\mu_p, \\ \mu_p &= -(+e)\tau/(-m_p^*) > 0.\end{aligned}$$

Es decir, ambos tipos de portadores de carga contribuyen con el **mismo** signo al flujo de corriente,

$$\sigma = |e| (n\mu_n + p\mu_p),$$

donde n y p son las **concentraciones** de **electrones** y **huecos**, respectivamente, las cuales deben de calcularse para conocer la conductividad

Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

Conductividad

Semiconductores intrínsecos

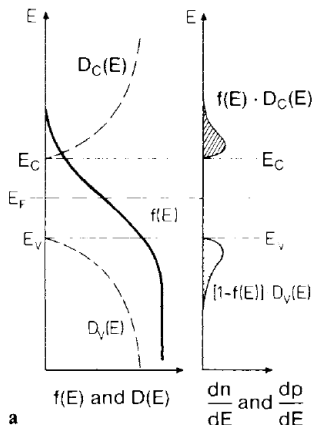
Sistemas en los cuales excitaciones electrónicas desde una banda de valencia a una banda de conducción dan lugar a la creación de un par electrón-hueco.

Calculando la concentración de portadores de carga,

$$n = \int_{\epsilon_c}^{\infty} D_c(\epsilon) f(\epsilon, T) d\epsilon,$$

$$p = \int_{-\infty}^{\epsilon_v} D_v(\epsilon) [1 - f(\epsilon, T)] d\epsilon,$$

en donde $D_c(\epsilon)$ y $D_v(\epsilon)$ son las DOS de las bandas de **conducción** y de **valencia**, respectivamente.

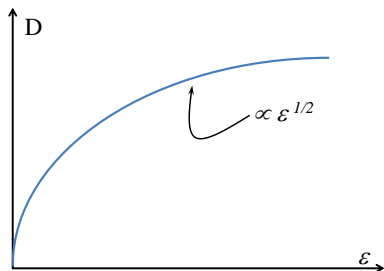


Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

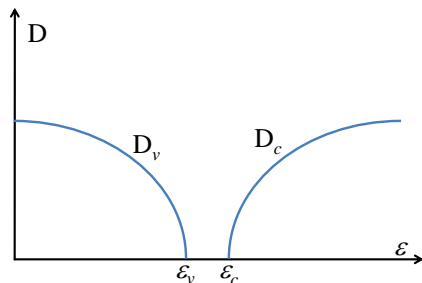
Portadores de carga

En la aproximación parabólica ($m^* = \text{cte.}$) se tiene que:

$$D(\epsilon) = \frac{(2m)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \epsilon^{1/2}.$$



Para el caso de la banda de conducción y de valencia se tiene,



$$D_c(\epsilon) = \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (\epsilon - \epsilon_c)^{1/2},$$

$$D_v(\epsilon) = \frac{(2m_p^*)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (\epsilon_v - \epsilon)^{1/2},$$

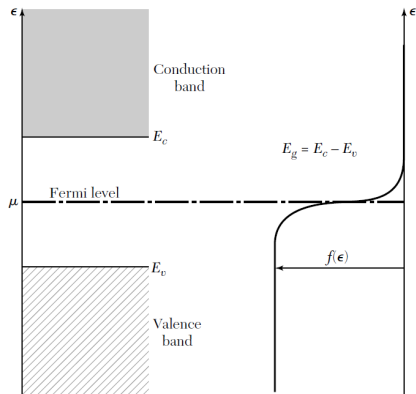
en donde $D(\epsilon) = 0 \quad \forall \quad \epsilon_v < \epsilon < \epsilon_c.$

Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

Portadores de carga

Dado que el *width* de la función de distribución de Fermi ($2k_B T$) es **mucho menor** que el band gap típico (1 eV), entonces se puede aproximar $f(\epsilon, T)$,

$$f(\epsilon, T) = \frac{1}{\exp[(\epsilon - \epsilon_F)/k_B T] + 1},$$
$$\approx \exp\left[-\frac{\epsilon - \epsilon_F}{k_B T}\right] \ll 1,$$
$$\forall \epsilon - \epsilon_F \gg 2k_B T.$$



Siendo también,

$$1 - f(\epsilon, T) = 1 - \frac{1}{\exp[(\epsilon - \epsilon_F)/k_B T] + 1} = \frac{1}{1 + \exp[-(\epsilon - \epsilon_F)/k_B T]},$$
$$\approx \exp\left[\frac{\epsilon - \epsilon_F}{k_B T}\right].$$

Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

Portadores de carga: Electrones

Para el caso de **electrones**, se tiene:

$$n = \int_{\epsilon_c}^{\infty} D_c(\epsilon) f(\epsilon, T) d\epsilon,$$

$$\forall D_c(\epsilon) = \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} (\epsilon - \epsilon_c)^{1/2} \quad \& \quad f(\epsilon, T) \approx \exp\left[-\frac{\epsilon - \epsilon_F}{k_B T}\right],$$

$$\Rightarrow n = \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} e^{\epsilon_F/k_B T} \int_{\epsilon_c}^{\infty} (\epsilon - \epsilon_c)^{1/2} e^{-\epsilon/k_B T} d\epsilon,$$

realizando el siguiente cambio de variable: $x_c = (\epsilon - \epsilon_c)/k_B T$, se llega a lo siguiente,

$$n = \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} (k_B T)^{3/2} \exp\left[-\frac{\epsilon_c - \epsilon_F}{k_B T}\right] \int_0^{\infty} x_c^{1/2} e^{-x_c} dx_c,$$

$$\therefore n = 2 \left(\frac{m_n^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{\epsilon_c - \epsilon_F}{k_B T}\right] \quad \forall \quad \epsilon_c > \epsilon_F.^2$$

²Aplicando la integral de Gauss: $\int_0^{\infty} x_c^{1/2} e^{-x_c} dx_c = \sqrt{\pi}/2$.

Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

Portadores de carga: Huecos

Para **huecos**, de manera similar:

$$p = \int_{-\infty}^{\epsilon_v} D_v(\epsilon) [1 - f(\epsilon, T)] d\epsilon,$$

$$\forall D_v(\epsilon) = \frac{(2m_p^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} (\epsilon_v - \epsilon)^{1/2} \quad \& \quad 1 - f(\epsilon, T) \approx \exp\left[\frac{\epsilon - \epsilon_F}{k_B T}\right],$$

$$\Rightarrow p = \frac{(2m_p^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} e^{\epsilon_F/k_B T} \int_{\epsilon_c}^{\infty} (\epsilon_v - \epsilon)^{1/2} e^{-\epsilon/k_B T} d\epsilon,$$

proponiendo, de igual manera, un cambio de variable: $x_v = (\epsilon_v - \epsilon) / k_B T$,

$$p = \frac{(2m_p^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} (k_B T)^{3/2} \exp\left[-\frac{\epsilon_F - \epsilon_v}{k_B T}\right] \int_0^{\infty} x_v^{1/2} e^{-x_v} dx_v,$$

$$\therefore p = 2 \left(\frac{m_p^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{\epsilon_F - \epsilon_v}{k_B T}\right] \quad \forall \quad \epsilon_v < \epsilon_F.$$

Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

Portadores de carga

De los resultados para la concentración de portadores de carga,

$$n = 2 \left(\frac{m_n^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{\epsilon_c - \epsilon_F}{k_B T} \right],$$
$$p = 2 \left(\frac{m_p^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{\epsilon_F - \epsilon_v}{k_B T} \right],$$

se observa que tanto en n como en p es necesario conocer ϵ_F , sin embargo, si se calcula el producto np :

$$np = 4 \left(\frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^3 (m_n^* m_p^*)^{3/2} e^{-\epsilon_g/k_B T} \quad \forall \quad \epsilon_g \equiv \epsilon_c - \epsilon_v,$$

se obtiene una función **independiente** del nivel de Fermi.

Además, se observa que al ser el semiconductor caracterizado por ϵ_g , m_n^* , y m_p^* , se puede conocer la **variación** de np en función de T .

Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

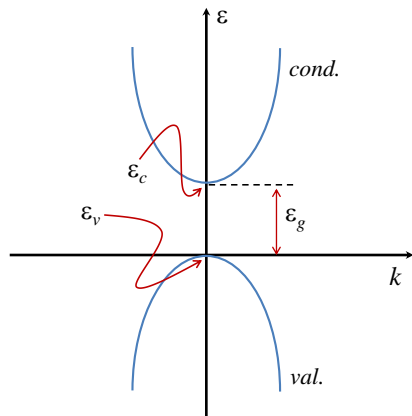
Nivel de Fermi

Para el caso de semiconductores **intrínsecos** $n = p$, debido a que los electrones excitados se originan de la banda de valencia:

$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \times (m_n^* m_p^*)^{3/4} e^{-\epsilon_g/2k_B T}.$$

Si se conoce n_i , p_i , es posible calcular ϵ_F a una temp. dada, tal que se mantenga la **neutralidad de carga** ($n_i = p_i$):

$$\epsilon_F = \frac{\epsilon_g}{2} + \frac{3k_B T}{4} \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right).$$



Cuando las bandas de conducción y valencia son **idénticas** $\Rightarrow m_p^* = m_n^*$:

$$\therefore \epsilon_F = \epsilon_g/2.$$

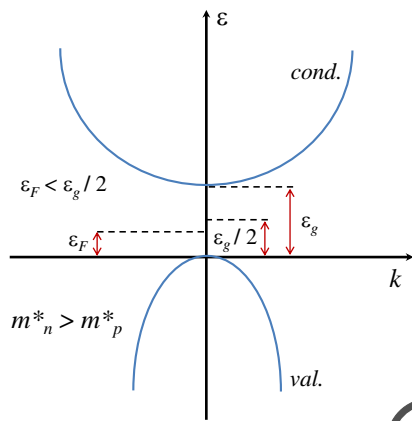
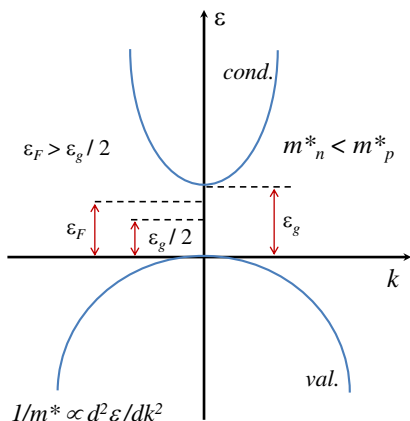
Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

Nivel de Fermi

Para bandas diferentes ($m_p^* \neq m_n^*$), ϵ_F tenderá a alguna banda:

$$\epsilon_F = \epsilon_g/2 + (3k_B T/4) \ln(m_p^*/m_n^*).$$

dependiendo de la relación entre las **masas efectivas**.



Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

Movilidad

Con el cálculo de las **concentraciones** de portadores de carga, es posible calcular la conductividad:

$$\sigma = |e|(n\mu_n + p\mu_p) \quad \forall \quad \mu = e\tau/m^*,$$

donde los efectos de la temperatura vendrán de los factores n y p :

$$n, p \propto \exp[-\epsilon_g/2k_B T].$$

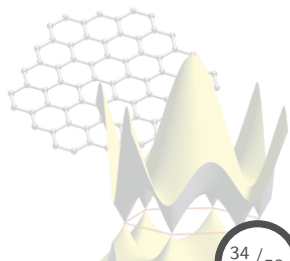
Movilidad

Crystal	Electrons	Holes	Crystal	Electrons	Holes
Diamond	1800	1200	GaAs	8000	300
Si	1350	480	GaSb	5000	1000
Ge	3600	1800	PbS	550	600
InSb	800	450	PbSe	1020	930
InAs	30000	450	PbTe	2500	1000
InP	4500	100	AgCl	50	—
AlAs	280	—	KBr (100 K)	100	—
AlSb	900	400	SiC	100	10–20

cm²/V-s

7. Semiconductores

- 7.1 Fundamentos, definiciones, y caracterización de la brecha de energía
- 7.2 Ecuaciones de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva
- 7.3 Semiconductores intrínsecos y portadores de carga
- 7.4 Semiconductores extrínsecos (dopaje), estados donores (tipo n) y aceptores (tipo p)



Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Dopaje de semiconductores

Portadores de carga en GaAs (300K)

- Concentración **intrínseca**: $n_i = 5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$.
- **Dopaje residual** (muestra pura): $n_e = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Semiconductores extrínsecos

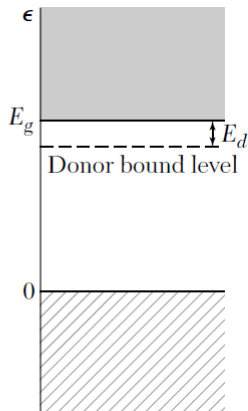
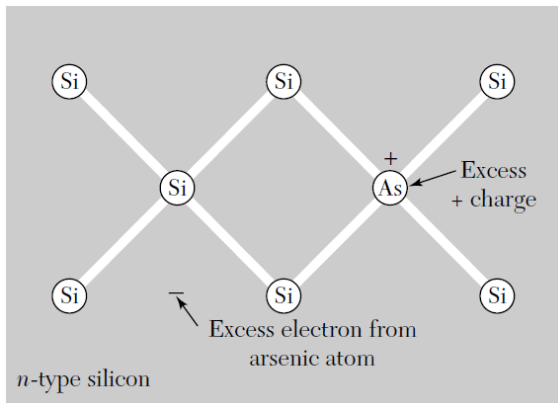
Sistemas en los cuales las **impurezas** eléctricamente activas incrementan la concentración de electrones o huecos libres, **donando** electrones a la banda de conducción, o huecos a la banda de valencia.

Impurezas

- **Donores**: Otorgan un electrón adicional a la nube electrónica, el cual está débilmente ligado al ión donador. Estos sistemas generan un dopaje tipo *n*.
- **Aceptores**: Ganan un electrón de la banda de valencia, dejando en los enlaces existentes un hueco. Generan un dopaje tipo *p*.

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Dopaje de semiconductores: Donores



- Si(4): matriz; As(5): impureza **donora**.
- El electrón adicional disociado (pseudo-libre) será excitado desde la impureza hasta la banda de **conducción** del sistema.

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Dopaje de semiconductores: Donores

La impureza **donora** se puede considerar como un centro **hidrogenoide**, en el cual la atracción Coulómbica entre electrones de valencia y de core es apantallada por los Si en la vecindad: $e^2/\epsilon r$.

Estimando la **energía de ionización** ϵ_D de la impureza donora, mediante el espectro de H:

$$\epsilon_n^H = \frac{e^4 m_e}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar^2)^2} \frac{1}{n^2},$$

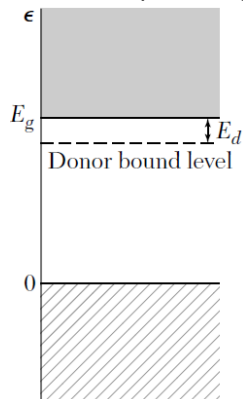
para el caso del **Si** como host:

$$m_e \rightarrow m_n^* = 0.2m_e \quad \& \quad e^2 \rightarrow e^2/\epsilon_{Si},$$

y para el est. base ($n = 1$):

$$\epsilon_D = \frac{e^4 \cdot 0.2m_e}{2(4\pi\epsilon_0 \epsilon_{Si} \hbar^2)^2} \approx 20 \text{ meV},$$

donde el estado base **donor** ϵ_D se localiza a 20 meV por debajo de ϵ_c .



Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

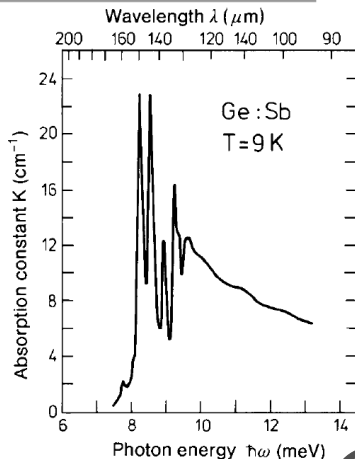
Dopaje de semiconductores: Donores

	P	As	Sb
Si	45.	49.	39.
Ge	12.0	12.7	9.6

Del modelo de átomo **hidrogenoide** se obtendrán ϵ_D **idénticas** (para el mismo host) no importando la naturaleza de la impureza, lo cual no concuerda con datos experimentales.

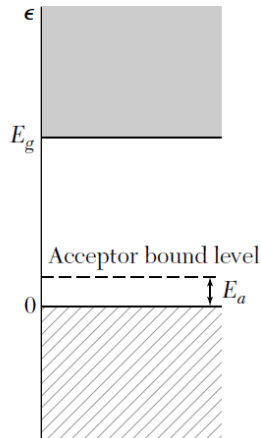
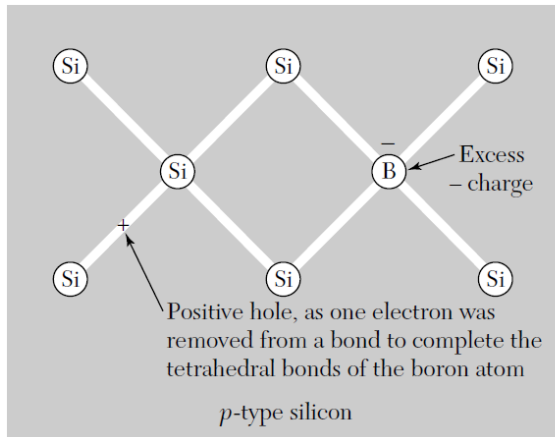
Las dif. vienen de considerar el apantallamiento del host a la impureza mediante la **cte. dieléctrica**, dando sólo una idea del orden de magnitud de ϵ_D .

El **nivel donor** se mide de espectros de absorción óptica, en donde se observa la señal del est. base y mayores.



Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Dopaje de semiconductores: Aceptores



- Si(4): matriz; B(3): impureza **aceptora**.
- El enlace tetragonal de la impureza acepta un elect. de la banda de **valencia**, dejando un hueco, el cual está disponible para participar en la conducción.

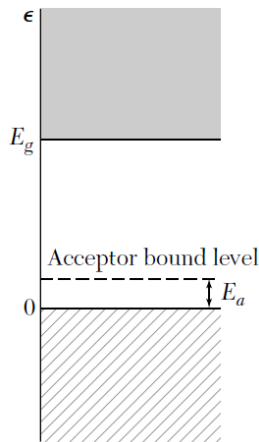
Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Dopaje de semiconductores: Aceptores

	B	Al	Ga	In
Si	45.	57.	65.	157.
Ge	10.4	10.2	10.8	11.2

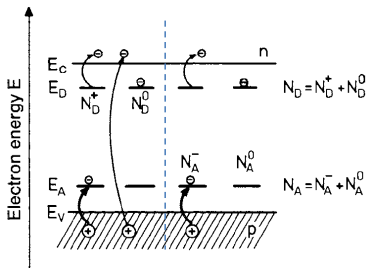
Las energías de ionización **aceptora** ϵ_a pueden ser calculadas con la aprox. de átomo hidrogenoide, dando energías muy similares a los casos de impurezas donoras.

Las diferencias observadas en ϵ_a respecto al experimento provienen en gran medida de la **degeneración** de las bandas de valencia.



Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Concentración de portadores de carga



Electrón en la b. de conducción

- Banda de **valencia**, dejando un hueco.
- Ionización de una impureza **donora**, dejando un ión positivo.

Hueco en la b. de valencia

- Correspondiente a un e^- en la banda de **conducción**.
- De una impureza **aceptora**, ionizada negativamente.

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Concentración de portadores de carga

En el caso de semiconductores extrínsecos, las ocupaciones de las bandas de **conducción** y de **valencia** se siguen expresando como:

$$n = n_0 \exp \left[-\frac{\epsilon_c - \epsilon_F}{k_B T} \right] \quad \forall \quad n_0 = 2 \left(\frac{m_n^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2},$$
$$p = p_0 \exp \left[-\frac{\epsilon_F - \epsilon_v}{k_B T} \right] \quad \forall \quad p_0 = 2 \left(\frac{m_p^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2},$$

siendo que la **ley de atracción de las masas** se sigue cumpliendo,

$$np = 4 \left(\frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^3 (m_n^* m_p^*)^{3/2} e^{-\epsilon_g/k_B T} \quad \forall \quad \epsilon_g = \epsilon_c - \epsilon_v.$$

Sin embargo, la **condición de neutralidad** debe tomar en cuenta la **carga de las impurezas**,

Donores : $N_D = N_D^0 + N_D^+$,

Aceptores : $N_A = N_A^0 + N_A^-$,

donde,

- N_D^0, N_A^0 : concentración de **neutrales**,
- N_D^+, N_A^- : concentración de **ionizados**.

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

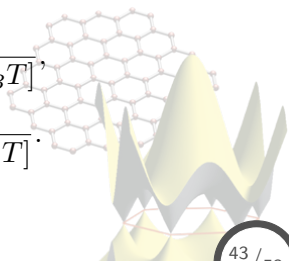
Concentración de portadores de carga

En un semiconductor **homogéneo**, la densidad de carga **negativa total** debe compensar en la misma proporción la correspondiente **positiva total**,

$$n + N_A^- = p + N_D^+ \quad \forall \quad N_D = N_D^0 + N_D^+ \quad \& \quad N_A = N_A^0 + N_A^-.$$

En el caso de que las impurezas donoras y aceptoras no se afecten mutuamente, la ocupación de donores por electrones (n_D) y la ocupación de aceptores por huecos (p_A) viene dada por:

$$n_D = N_D^0 = \frac{N_D}{1 + \exp[(\epsilon_D - \epsilon_F)/k_B T]},$$
$$p_A = N_A^0 = \frac{N_A}{1 + \exp[(\epsilon_F - \epsilon_A)/k_B T]}.$$



Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Concentración de portadores de carga

Considerando un semiconductor **tipo-n puro**, en donde están disponibles solamente donores, se tiene:

$$n = n_0 \exp \left[-\frac{\epsilon_c - \epsilon_F}{k_B T} \right],$$

$$N_D = N_D^0 + N_D^+,$$

$$N_D^0 = \frac{N_D}{1 + \exp [(\epsilon_D - \epsilon_F)/k_B T]},$$

en donde los e^- **libres** en la banda de conducción se originan puramente de **donores** o desde la **banda de valencia**,

$$n + N_A^- = p + N_D^+ \rightarrow n = p + N_D^+.$$

Tomando en cuenta que la contribución principal a la cond. proviene de los **donores ionizados**,

$$N_D^+ \gg n_i \quad (np = n_i^2) \rightarrow n \approx N_D^+,$$

por tanto,

$$n \approx N_D - N_D^0,$$

$$\approx \frac{N_D}{1 + \exp [(\epsilon_F - \epsilon_D)/k_B T]}.$$

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Concentración de portadores de carga

Por otro lado, de la relación de n con el nivel de Fermi ϵ_F , se tiene:

$$n = n_0 \exp \left[-\frac{\epsilon_c - \epsilon_F}{k_B T} \right] = n_0 \exp \left[-\frac{\epsilon_F - \epsilon_D}{k_B T} \right] \exp \left[-\frac{\epsilon_D - \epsilon_c}{k_B T} \right],$$
$$\therefore \frac{n}{n_0} \exp \left[-\frac{\epsilon_c - \epsilon_D}{k_B T} \right] = \exp \left[-\frac{\epsilon_F - \epsilon_D}{k_B T} \right].$$

Sustituyendo en lo anterior la expresión obtenida para n ,

$$n \approx \frac{N_D}{1 + \exp [(\epsilon_F - \epsilon_D)/k_B T]},$$
$$\Rightarrow n \approx \frac{N_D}{1 + (n/n_0)e^{\epsilon_d/k_B T}} \quad \forall \quad \epsilon_d = \epsilon_c - \epsilon_D,$$

en donde ϵ_d representa la separación del nivel **donor**, ϵ_D , respecto al fondo de la banda de **conducción**, ϵ_c .

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Concentración de portadores de carga

Expresando la ecuación anterior en forma cuadrática,

$$n \approx \frac{N_D}{1 + (n/n_0)e^{\epsilon_d/k_B T}},$$
$$\frac{n^2}{n_0} e^{\epsilon_d/k_B T} + n \approx N_D,$$

resolviendo, se obtiene:

$$n \approx \frac{2N_D}{1 + \left[1 + 4\frac{N_D}{n_0} e^{\epsilon_d/k_B T}\right]^{1/2}}.$$

Analizando diferentes casos límites para la relación entre ϵ_d y la temperatura:

I) Temp. bajas ($k_B T \ll \epsilon_d$)

$$n \approx \frac{2N_D}{1 + \left[1 + 4\frac{N_D}{n_0} e^{\epsilon_d/k_B T}\right]^{1/2}},$$
$$\approx \frac{2N_D}{1 + \left(4\frac{N_D}{n_0}\right)^{1/2} e^{\epsilon_d/2k_B T}},$$
$$\approx (N_D n_0)^{1/2} e^{-\epsilon_d/2k_B T},$$

en este límite existen muchas impurezas donoras que **no se ionizan**, por lo que se conoce como el **rango congelado**.

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Concentración de portadores de carga

II) Temp. altas ($k_B T \gg \epsilon_d$)

$$\begin{aligned}n &\approx \frac{2N_D}{1 + \left[1 + 4\frac{N_D}{n_0}e^{\epsilon_d/k_B T}\right]^{1/2}}, \\ &\approx \frac{N_D}{1 + \frac{N_D}{n_0}e^{\epsilon_d/k_B T}}, \\ &\approx N_D \left[1 - \frac{N_D}{n_0}e^{\epsilon_d/k_B T}\right], \\ &\approx N_D,\end{aligned}$$

la concentración de elec. donores ha alcanzado su **máximo**, por tanto **todas** las impurezas se ionizan, por ello se habla del **rango de saturación**.

III) Temp. muy altas

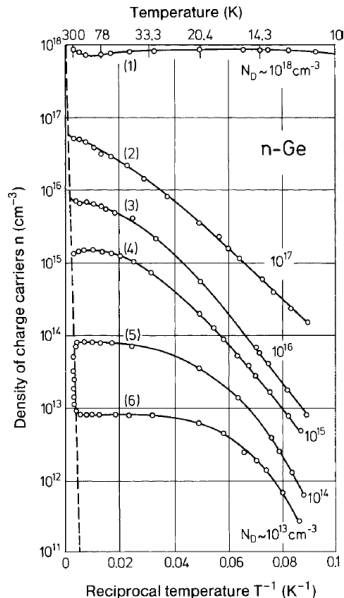
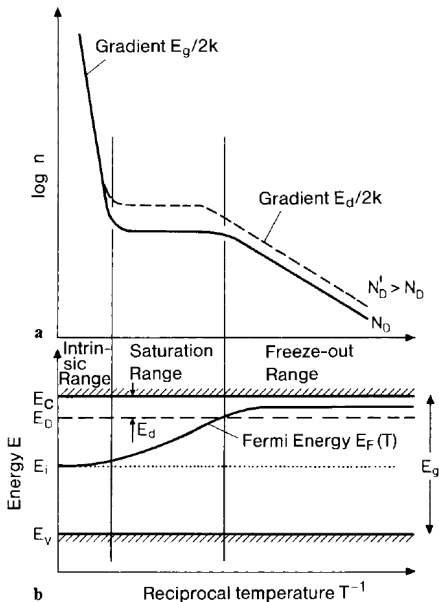
Para temperaturas extremadamente altas, los electrones excitados desde la banda de **valencia** (por sobre ϵ_g), eventualmente sobrepasan la densidad elect. de los e^- **donores**,

$$n_i \gg n_d.$$

En este rango el sist. dopado tipo- n se comporta como un semiconductor **intrínseco**, por tanto se le conoce como **región intrínseca**.

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Concentración de portadores de carga



Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Conductividad

La **conductividad** de un semiconductor involucra a los electrones en la banda de **conducción** y a los huecos en la banda de **valencia**,

$$\sigma = |e| (n\mu_n + p\mu_p).$$

Para el caso de sem. **extrínsecos**, la movilidad se expresa como:

$$\mu_\alpha = -q_\alpha \frac{1}{m_\alpha^*} \frac{\langle \tau(\mathbf{k}) v^2(\mathbf{k}) \rangle}{\langle v^2(\mathbf{k}) \rangle},$$

en donde se aplica la aprox. de Boltzmann ($\epsilon_g \gg k_B T$) con:

$$\alpha = n \rightarrow q = -e, \quad m_\alpha^* = m_n^*,$$

$$\alpha = p \rightarrow q = e, \quad m_\alpha^* = -m_p^*.$$

Además,

$v(\mathbf{k}) \rightarrow$ vel. de portadores de carga,

$\tau(\mathbf{k}) \rightarrow$ tiempo de relajación.

De las relaciones, se deduce para la **movilidad**:

$$\mu \propto \tau,$$

mientras que para el **tiempo de relajación**,

$$1/\tau \propto \Sigma \langle v \rangle,$$

donde Σ es la **secc. transversal** de electrones y huecos en un centro de dispersión determinado.

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Conductividad

La velocidad $\langle v \rangle$ representa un promedio **térmico** de las velocidades de los portadores de carga,

$$\langle v \rangle \propto T^{1/2}.$$

Con las expresiones anteriores, se puede deducir una expresión cualitativa para la **movilidad**,

$$\mu \propto \tau \propto \frac{1}{\Sigma \langle v \rangle} \propto \frac{1}{\Sigma T^{1/2}}.$$

La **secc. transversal** Σ tiene una contribución **fonónica**, debido a la disp. por fonones acústicos $\omega_{\mathbf{q}}$ con amplitud $u_{\mathbf{q}}$,

en donde la energía viene dada por,

$$M\omega_{\mathbf{q}}^2 \langle u_{\mathbf{q}}^2 \rangle = k_B T,$$

por tanto, la secc. transversal fonónica viene siendo:

$$\Sigma_{ph} \sim T.$$

Con la expresión anterior se puede obtener la dependencia en la temp. de la movilidad con dispersión de fonones,

$$\mu_{ph} \propto \frac{1}{T^{3/2}}.$$

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Conductividad

Otra contribución a la secc. transversal es debido a la dispersión de portadores de carga por donores o aceptores **cargados** (defectos):

$$\Sigma_{def} = N_{def} \langle v \rangle^{-4},$$

lo anterior debido a la interacción coulombica entre los portadores y los defectos.

Se obtiene, por tanto, la expresión para el tiempo de relajación por **dispersión de defectos**,

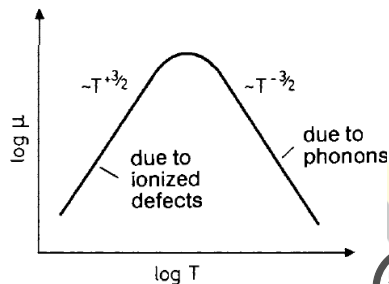
$$\tau_{def} \propto \frac{1}{\Sigma_{def} \langle v \rangle} \propto \frac{T^{3/2}}{N_{def}},$$

con la expresión anterior se obtiene la movilidad asociada,

$$\mu_{def} \propto T^{3/2} / N_{def}.$$

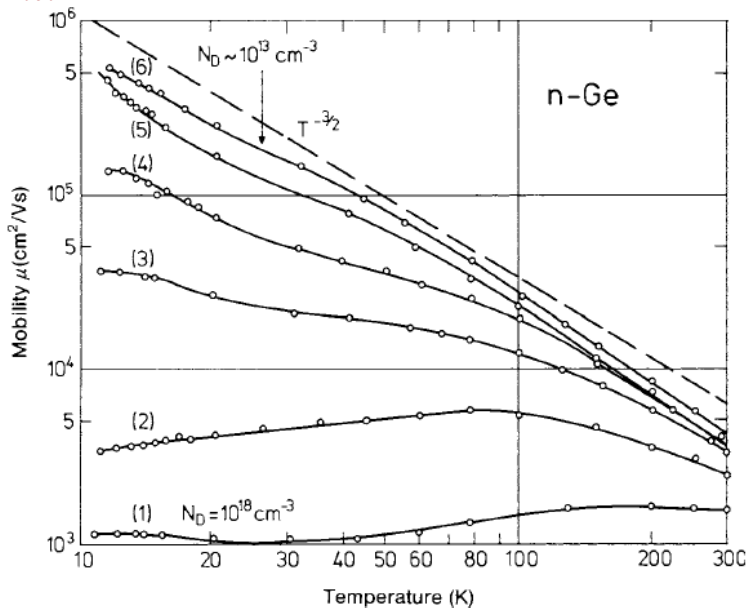
Por tanto, se obtiene la **movilidad total**,

$$1/\mu = 1/\mu_{ph} + 1/\mu_{def}.$$



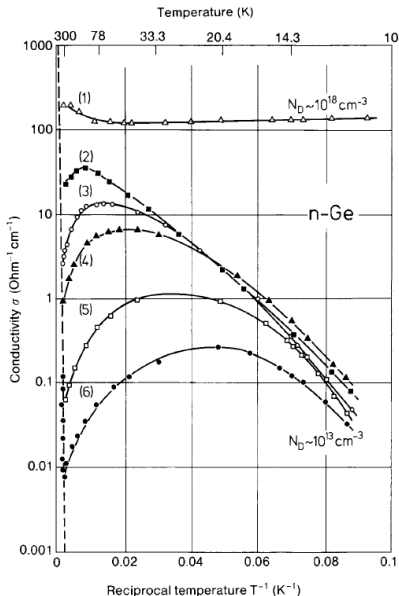
Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Conductividad



Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Conductividad



- **R. Saturación:** Temp. **intermedias**, con $n \sim \text{cte.}$, σ presenta un **máximo**.

- **R. Congelado:** Temp. **bajas**,

$$\mu_{ph} \gg \mu_{def} \Rightarrow \mu \sim \mu_{def},$$

$\therefore \sigma$ será dominada por dispersiones vía **defectos cargados**.

- **R. Intrínseco:** Temp. **altas**,

$$\mu_{ph} \ll \mu_{def} \Rightarrow \mu \sim \mu_{ph},$$

lo cual indica que σ será dominada por las dispersiones con origen **fonónico**.