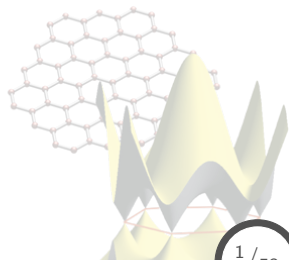


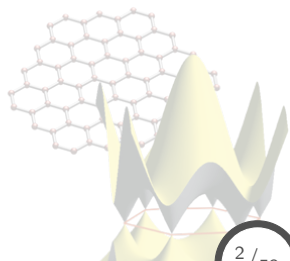
7. Semiconductores



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)



Contenido: Tema 07

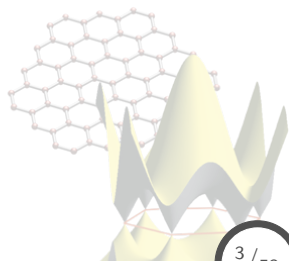
7. Semiconductores

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

7.2 Ecuaciones de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

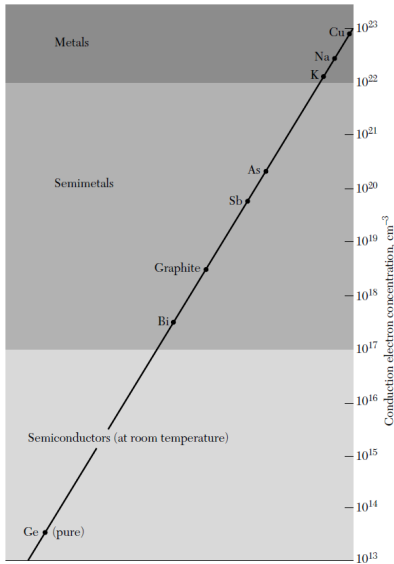
7.3 Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

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



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/periodic/en/>

GROUP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	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	H 1.0079 HYDROGEN																	
2	Li 6.941 LITHIUM	Be 9.0122 BERYLLIUM																
3	Na 22.990 SODIUM	Mg 24.305 MAGNESIUM																
4	K 39.098 POTASSIUM	Ca 40.078 CALCIUM	Sc 44.956 SCANDIUM	Ti 47.867 TITANIUM	V 50.942 VANADIUM	Cr 51.996 CHROMIUM	Mn 54.938 MANGANESE	Fe 55.845 IRON	Co 58.933 COBALT	Ni 58.693 NICKEL	Cu 63.546 COPPER	Zn 65.39 ZINC	Al 26.982 ALUMINUM	Si 28.086 SILICON	P 30.974 PHOSPHORUS	S 32.065 SULPHUR	Cl 35.453 CHLORINE	Ar 39.948 ARGON
5	Rb 85.468 RUBIDIUM	Sr 87.62 STRONTIUM	Y 88.906 YTRITIUM	Zr 90.921 ZIRCONIUM	Nb 92.906 NIOBIUM	Mo 95.94 MOLYBDENUM	Tc 98.906 TECHNETIUM	Ru 101.07 RUTHENIUM	Rh 102.91 RHODIUM	Pd 106.42 PALLADIUM	Ag 107.87 SILVER	Cd 112.41 CADMIUM	In 114.82 INDIUM	Sn 118.71 TIN	Sb 121.76 ANTIMONY	Te 127.60 TELLURIUM	I 126.90 IODINE	Xe 131.29 XENON
6	Cs 132.91 CAESIUM	Ba 137.33 BARIUM	La-Lu 57-71 LANTHANIDE	Hf 178.49 HAFNIUM	Ta 180.95 TANTALUM	W 183.84 TUNGSTEN	Re 186.21 RHENIUM	Os 190.23 OSMIUM	Ir 192.22 IRIDIUM	Pt 195.08 PLATINUM	Au 196.97 GOLD	Hg 200.59 MERCURY	Tl 204.38 THALLIUM	Pb 207.2 LEAD	Bi 208.98 BISMUTH	Po (209) POLONIUM	At (210) ASTATINE	Rn (222) RADON
7	Fr (223) FRANCIUM	Ra (226) RADIUM	Ac-Lr 89-103 ACTINIDE	Rf (261) RUTHENIUM	Db (262) DUBNIUM	Sg (266) SEABORGIUM	Bh (264) BOHRNIUM	Hs (277) HASSIUM	Mt (288) MEITNERIUM	Uu (281) UNILIVIUM	Uu (272) UNUNBIUM	Uu (285) UNUNTRIUM	Uu (289) UNUNQUADIUM	Uu (289) UNUNQUADIUM	Uu (289) UNUNQUADIUM	Uu (289) UNUNQUADIUM	Uu (289) UNUNQUADIUM	Uu (289) UNUNQUADIUM

RELATIVE ATOMIC MASS (A)
GROUP IUPAC
ATOMIC NUMBER
SYMBOL
ELEMENT NAME

Legend:
 Metal (blue), Semimetal (orange), Nonmetal (green)
 1 Alkali metal, 2 Alkaline earth metal, 3 Transition metals, 4 Lanthanide, 5 Actinide
 16 Chalcogens element, 17 Halogens element, 18 Noble gas
 STANDARD STATE (25 °C, 101 kPa)
 Ne - gas, Fe - solid, Ca - liquid, Tc - synthetic

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**
 LANTHANUM CERIUM PRASEODYMIUM NEODYMIUM PROMETHIUM SAMARIUM EUROPIUM GADOLINIUM TERBIUM DYSPROSIUM HOLMIUM ERBIUM THULIUM YTTERIUM LUTETIUM

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**
 ACTINIUM THORIUM PROTACTINIUM URANIUM NEPTUNIUM PLUTONIUM AMERICIUM CURIUM BERKELIUM CALIFORNIUM EINSTEINIUM FERMIUM MENDELEVIUM NOBELIUM LAWRENCIUM

Editor: Ashya Vanehan (ashya@ncl.ac.uk)

Ejemplos de compuestos **III-V**: InSb, GaAs.

Definición y caracterización de la brecha de energía

Nomenclatura

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

<http://www.kjf-split.hr/periodic/en/>

GROUP

PERIOD

RELATIVE ATOMIC MASS (A)

GROUP IUPAC

ATOMIC NUMBER

SYMBOL

ELEMENT NAME

Metal **Semimetal** **Nonmetal**

Alkali metal **Alkaline earth metal** **Transition metals** **Lanthanide** **Actinide**

Chalcogens element **Halogens element** **Noble gas**

STANDARD STATE (25 °C, 101 kPa)

Ne - gas **Fe - solid** **Tc - synthet**

VI **II**

1	2	13	14	15	16	17	18
1	2	13	14	15	16	17	18
3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	32	33	34
35	36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58
59	60	61	62	63	64	65	66
67	68	69	70	71	72	73	74
75	76	77	78	79	80	81	82
83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98
99	100	101	102	103	104	105	106
107	108	109	110	111	112	113	114
115	116	117	118	119	120	121	122
123	124	125	126	127	128	129	130
131	132	133	134	135	136	137	138
139	140	141	142	143	144	145	146
147	148	149	150	151	152	153	154
155	156	157	158	159	160	161	162
163	164	165	166	167	168	169	170
171	172	173	174	175	176	177	178
179	180	181	182	183	184	185	186
187	188	189	190	191	192	193	194
195	196	197	198	199	200	201	202

LANTHANIDE

ACTINIDE

Editor: Ashya Vanehan (advir@nclife.com)

Copyright © 1996-2003 EnG (en@kjf-split.hr)

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

Definición y caracterización de la brecha de energía

Nomenclatura

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

GROUP 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

PERIOD 1 2 3 4 5 6 7

RELATIVE ATOMIC MASS (1)
 GROUP IUPAC
 ATOMIC NUMBER
 SYMBOL
 ELEMENT NAME

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

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

1 1.0079 H HYDROGEN
 2 4.0026 He HELIUM
 3 6.941 Li LITHIUM
 4 9.0122 Be BERYLLIUM
 5 10.811 B BORON
 6 12.011 C CARBON
 7 14.007 N NITROGEN
 8 15.999 O OXYGEN
 9 18.998 F FLUORINE
 10 20.180 Ne NEON
 11 22.990 Na SODIUM
 12 24.305 Mg MAGNESIUM
 13 26.981 Al ALUMINUM
 14 28.086 Si SILICON
 15 30.974 P PHOSPHORUS
 16 32.06 S SULFUR
 17 35.453 Cl CHLORINE
 18 39.948 Ar ARGON
 19 39.098 K POTASSIUM
 20 40.078 Ca CALCIUM
 21 44.956 Sc SCANDIUM
 22 47.867 Ti TITANIUM
 23 50.942 V VANADIUM
 24 51.996 Cr CHROMIUM
 25 54.938 Mn MANGANESE
 26 55.845 Fe IRON
 27 58.933 Co COBALT
 28 58.693 Ni NICKEL
 29 63.546 Cu COPPER
 30 65.39 Zn ZINC
 31 69.72 Ga GALLIUM
 32 72.64 Ge GERMANIUM
 33 74.922 As ARSENIC
 34 78.96 Se SELENIUM
 35 79.904 Br BROMINE
 36 83.80 Kr KRYPTON
 37 85.468 Rb RUBIDIUM
 38 87.62 Sr STRONTIUM
 39 88.906 Y YTTRIUM
 40 91.224 Zr ZIRCONIUM
 41 92.906 Nb NIOBIUM
 42 95.94 Mo MOLIBDENO
 43 98 Tc TECNETIUM
 44 101.07 Ru RUTENIO
 45 102.91 Rh RHODIO
 46 106.42 Pd PALADIO
 47 107.87 Ag ARGENTUM
 48 112.41 Au ORO
 49 114.82 Hg MERCURIO
 50 118.71 Tl TALIO
 51 121.76 Pb PLOMBO
 52 127.60 Bi BISMUTO
 53 126.90 Po POLONIO
 54 127.60 At ASTATINO
 55 132.91 Cs CESIO
 56 137.33 Ba BARIO
 57 138.91 La LANTANIO
 58 140.12 Ce CERIUM
 59 140.91 Pr PRASEODIMIO
 60 144.24 Nd NEODIMIO
 61 145 Pm PROMETIO
 62 150.36 Sm SAMARIO
 63 151.96 Eu EUROPIO
 64 157.25 Gd GADOLINIO
 65 158.93 Tb TERBIO
 66 162.50 Dy DISPROSIO
 67 164.93 Ho HOLMIO
 68 167.26 Er ERBIO
 69 168.93 Tm TULIO
 70 173.04 Yb YTERBIO
 71 174.97 Lu LUTECIO
 72 223 Fr FRANCO
 73 226 Ra RADIO
 74 226 Ac ACTINIO
 75 227 Th TORIO
 76 232 Pa PROTACTINIO
 77 238 U URANIO
 78 238 Np NEPTUNIO
 79 237 Pu PLUTONIO
 80 244 Am AMERICIO
 81 244 Cm CURMIO
 82 247 Bk BERKELIO
 83 251 Cf CALIFORNIO
 84 251 Es EINSTEINIO
 85 251 Fm FERMIUM
 86 258 Md MENDELEVIO
 87 258 No NOBELIO
 88 258 Lr LAWRENCIO

LANTHANIDE
 57 138.91 La LANTHANIO
 58 140.12 Ce CERIUM
 59 140.91 Pr PRASEODIMIO
 60 144.24 Nd NEODIMIO
 61 145 Pm PROMETIO
 62 150.36 Sm SAMARIO
 63 151.96 Eu EUROPIO
 64 157.25 Gd GADOLINIO
 65 158.93 Tb TERBIO
 66 162.50 Dy DISPROSIO
 67 164.93 Ho HOLMIO
 68 167.26 Er ERBIO
 69 168.93 Tm TULIO
 70 173.04 Yb YTERBIO
 71 174.97 Lu LUTECIO

ACTINIDE
 89 227 Ac ACTINIO
 90 232 Th TORIO
 91 231 Pa PROTACTINIO
 92 238 U URANIO
 93 237 Np NEPTUNIO
 94 244 Pu PLUTONIO
 95 244 Am AMERICIO
 96 247 Cm CURMIO
 97 247 Bk BERKELIO
 98 251 Cf CALIFORNIO
 99 251 Es EINSTEINIO
 100 251 Fm FERMIUM
 101 258 Md MENDELEVIO
 102 258 No NOBELIO
 103 258 Lr LAWRENCIO

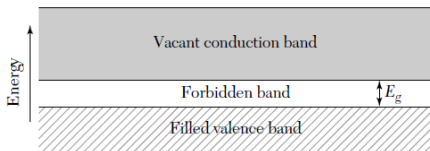
(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 667-683 (2001)
 Relative atomic mass is shown with five significant figures. For elements having no stable nuclides, the value enclosed in brackets indicates the mass number of the longest-lived isotope of the element.
 However three such elements (Th, Pa, and U) do have a characteristic terrestrial isotopic composition, and for these an atomic weight is tabulated.
 Editor: Ashya Vaseeth (advase@ncfline.com)
 Copyright © 1996-2003 EnG (enG@ktf-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)

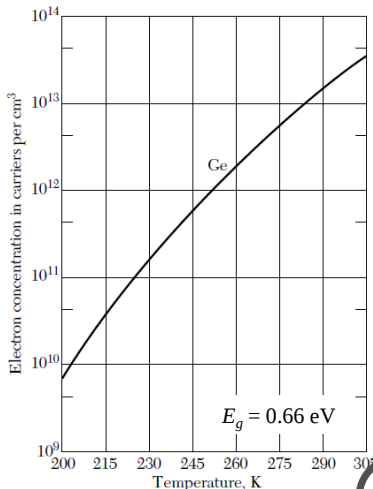


La **conductividad intrínseca** (sin impurezas) a 0 K es nula, debido a que los estados de **valencia** están ocupados, y los de **conducción** desocupados, separados por una **brecha de energía**, definida como:

$$E_g = E_c - E_v,$$

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.

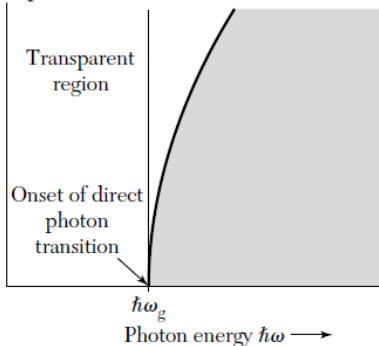


Definición y caracterización de la brecha de energía

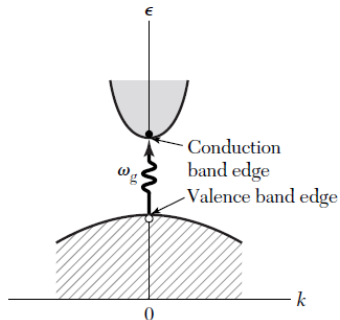
Brecha de energía (band-gap): Clasificación

Band-gap directo

Absorption



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



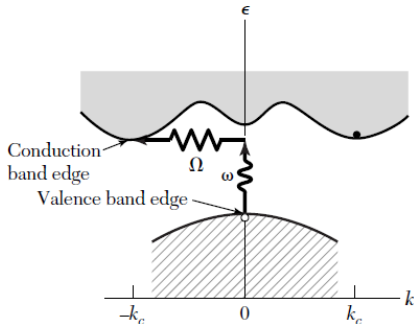
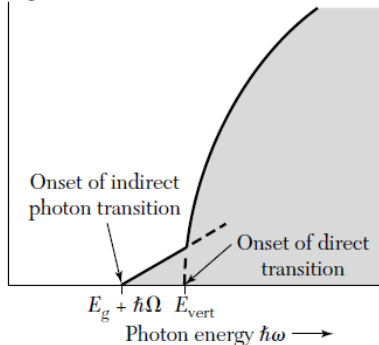
En este proceso, un fotón es absorbido por el cristal con la creación de un **par electrón-hueco**, con el mismo k .

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,

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

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.

Contenido: Tema 07

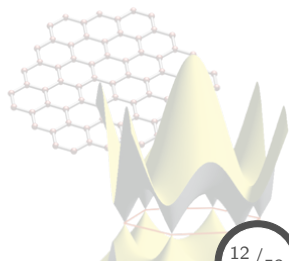
7. Semiconductores

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)



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,

pero se también se tiene:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad \forall \quad \omega = \frac{\epsilon}{\hbar},$$

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

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

comparando resultados,

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

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

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

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

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

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

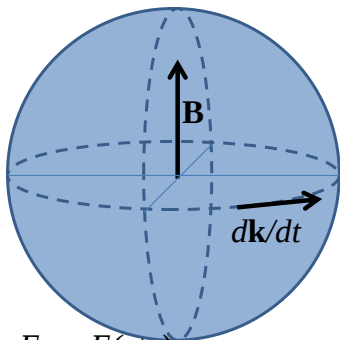
Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

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**.

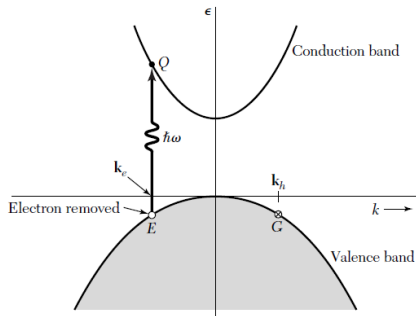
Vector de onda

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 **hueco**,

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



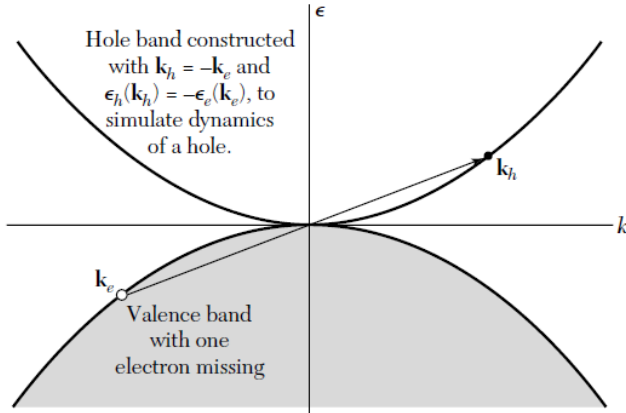
El **hueco** es una descripción alternativa de una banda con un electrón menos.

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

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Portadores de carga: Huecos

Energía



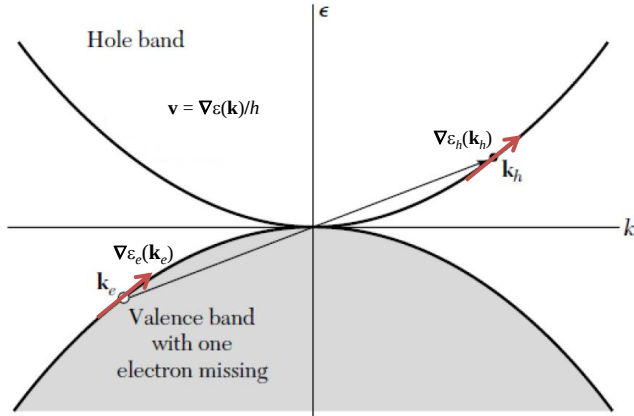
Teniendo en cuenta la simetría de **inversión** de la estructura de bandas,

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

Ecs. de movimiento de electrones y huecos, masa efectiva

Portadores de carga: Huecos

Velocidad



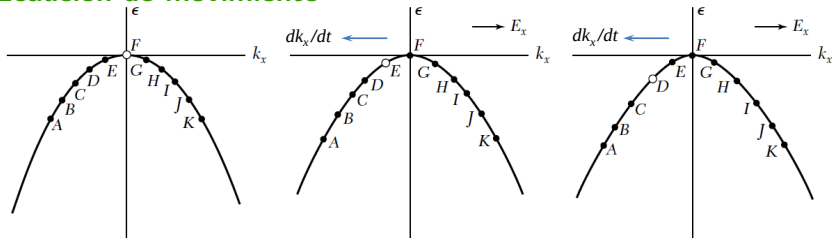
Calculando el gradiente para el electrón y hueco,

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

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

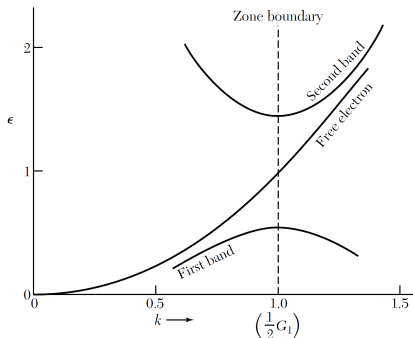
De la relación de dispersión tipo **electrón libre**,

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

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:

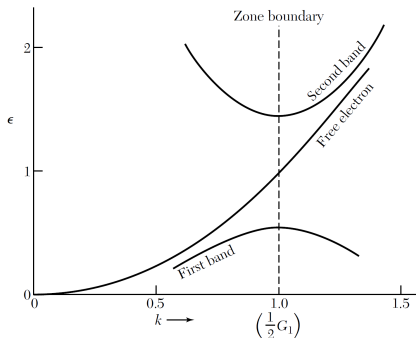
$$\epsilon_{\pm}(k) = \epsilon_{\pm} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \left(1 \pm \frac{2\lambda}{U} \right).$$



- $k = K - G/2$, 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:

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

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**,

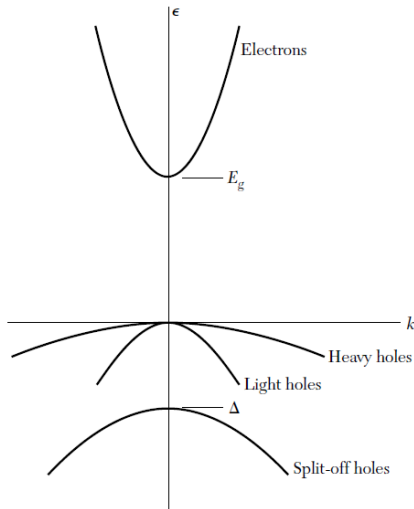
$$\epsilon_v(hh) \approx -\hbar^2 k^2 / 2m_{hh},$$

- **Light holes**,

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

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

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



Contenido: Tema 07

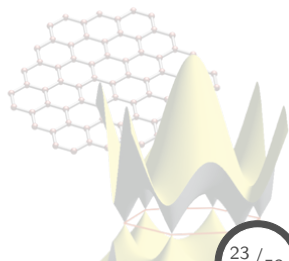
7. Semiconductores

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)



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

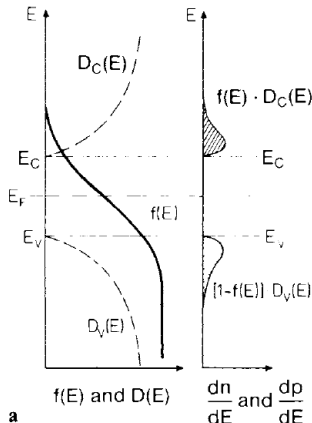
Sistemas en los cuales excitaciones electrónicas desde una banda de valencia a una banda de conducción dan lugar a la creación de un par electrón-hueco.

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.

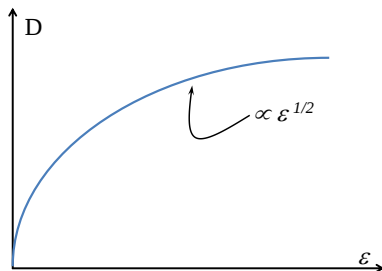


Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

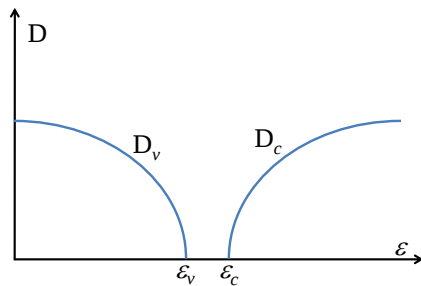
Portadores de carga

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,



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

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

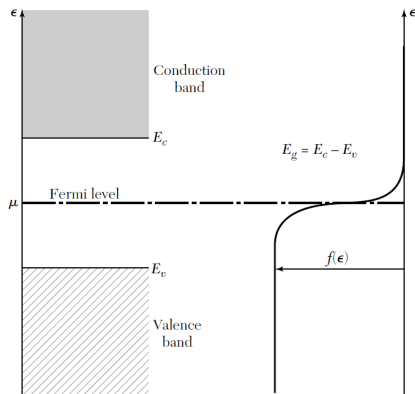
en donde $D(\epsilon) = 0 \quad \forall \quad \epsilon_v < \epsilon < \epsilon_c$.

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 $f(\epsilon, T)$,

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



Siendo también,

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

Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

Portadores de carga: Electrones

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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 :

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

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

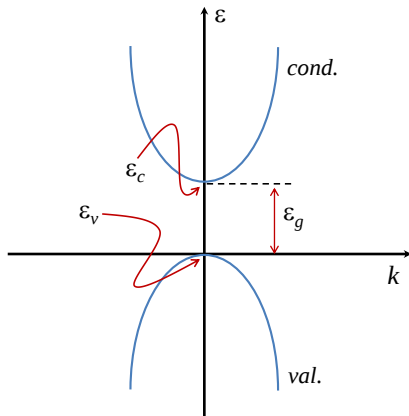
Nivel de Fermi

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** $\Rightarrow m_p^* = m_n^*$:

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

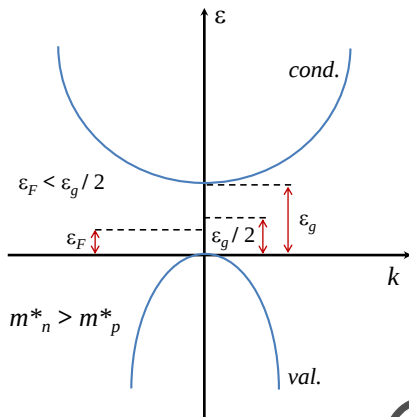
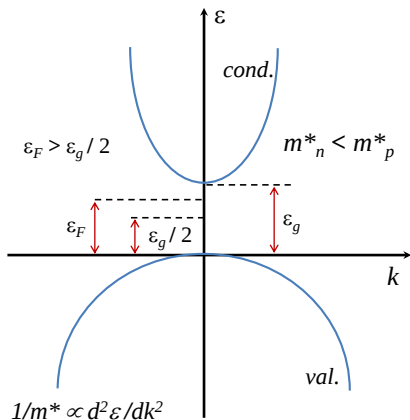
Semiconductores intrínsecos y portadores de carga

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 :

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

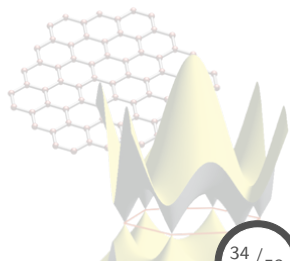
Movilidad

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
					cm ² /V-s

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)



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

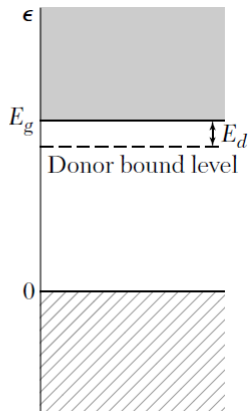
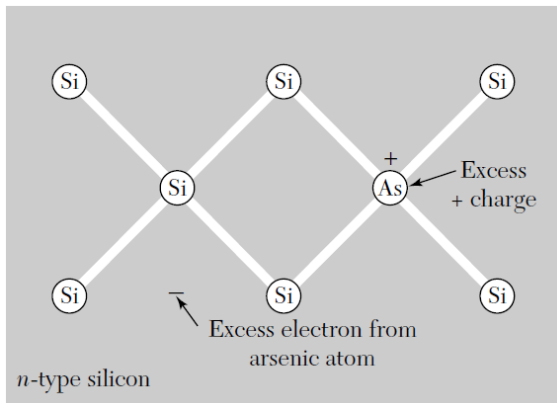
Sistemas en los cuales las **impurezas** eléctricamente activas incrementan la concentración de electrones o huecos libres, **donando** electrones a la banda de conducción, o huecos a la banda de valencia.

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:

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

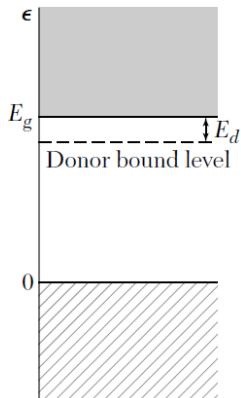
para el caso del **Si** como host:

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

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

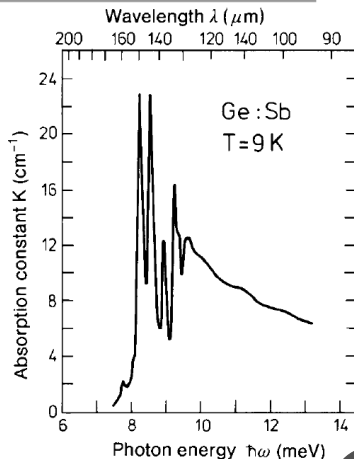
Dopaje de semiconductores: Donores

	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.

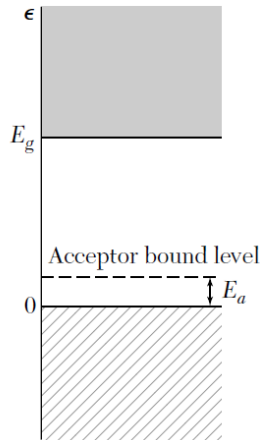
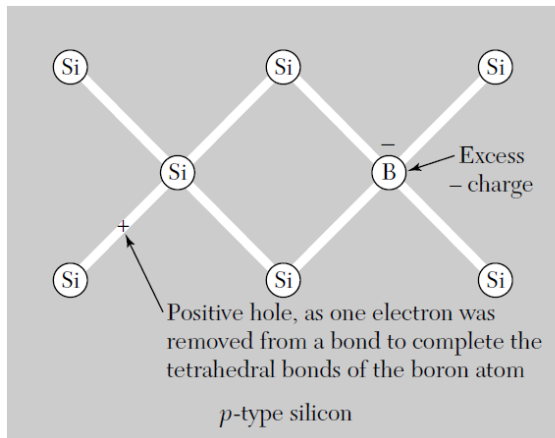
Las dif. vienen de considerar el apantallamiento del host a la impureza mediante la **cte. dieléctrica**, dando sólo una idea del orden de magnitud de ϵ_D .

El **nivel donador** 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.

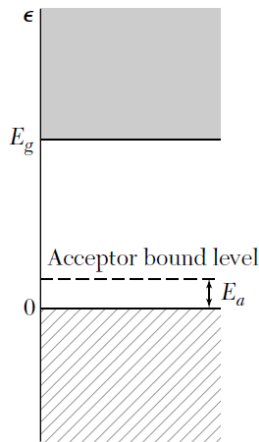
Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

Dopaje de semiconductores: Aceptores

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

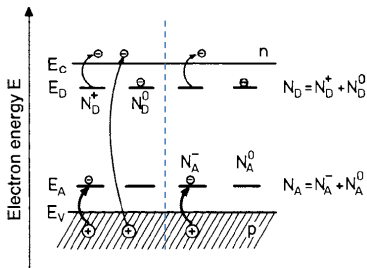
Las energías de ionización **aceptora** ϵ_a pueden ser calculadas con la aprox. de átomo hidrogenoide, dando energías muy similares a los casos de impurezas donoras.

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**,

donde,

- Donores** : $N_D = N_D^0 + N_D^+$
 - Aceptores** : $N_A = N_A^0 + N_A^-$
- N_D^0, N_A^0 : concentración de **neutrales**,
 - N_D^+, N_A^- : concentración de **ionizados**.

Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

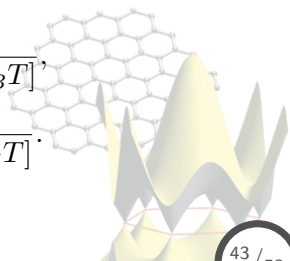
Concentración de portadores de carga

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 ($k_B T \ll \epsilon_d$)

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

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

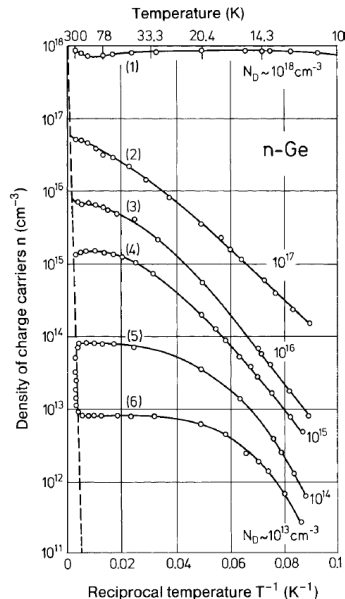
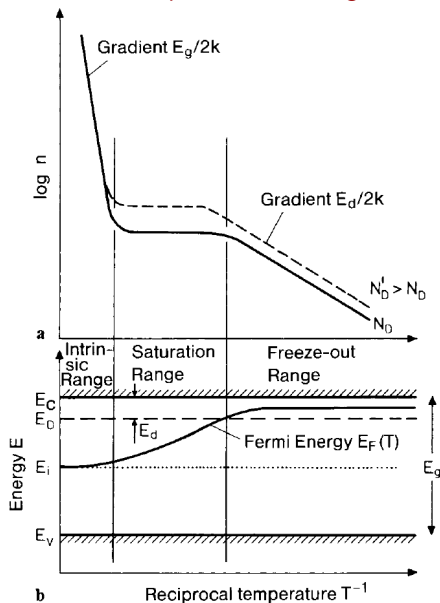
Para temperaturas extremadamente altas, los electrones excitados desde la banda de **valencia** (por sobre ϵ_g), eventualmente sobrepasan la densidad elect. de los e^- **donores**,

$$n_i \gg n_d.$$

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**,

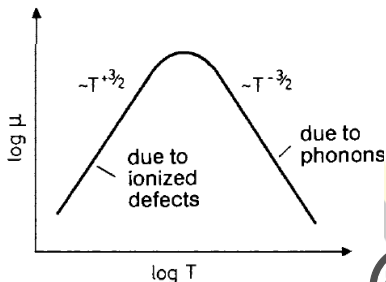
$$\tau_{def} \propto \frac{1}{\Sigma_{def} \langle v \rangle} \propto \frac{T^{3/2}}{N_{def}},$$

con la expresión anterior se obtiene la movilidad asociada,

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

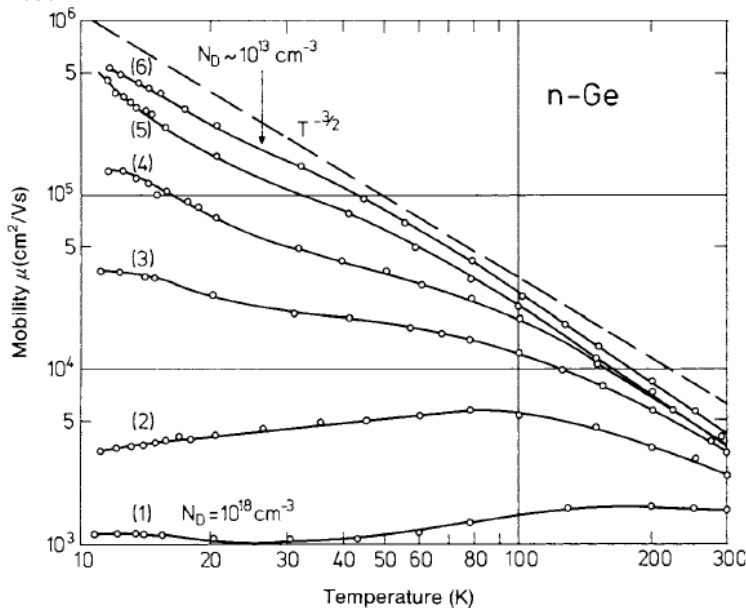
Por tanto, se obtiene la **movilidad total**,

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



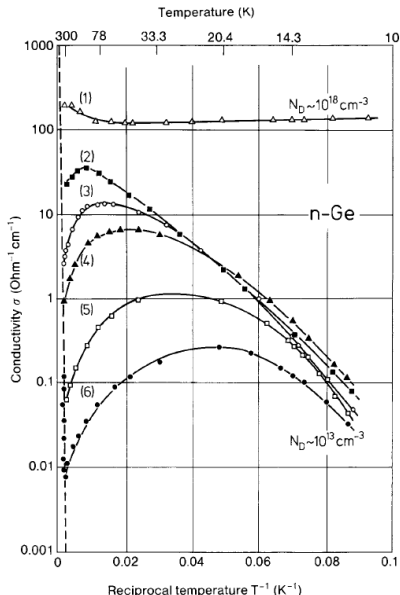
Semiconductores extrínsecos, estados donores y aceptores

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**.