

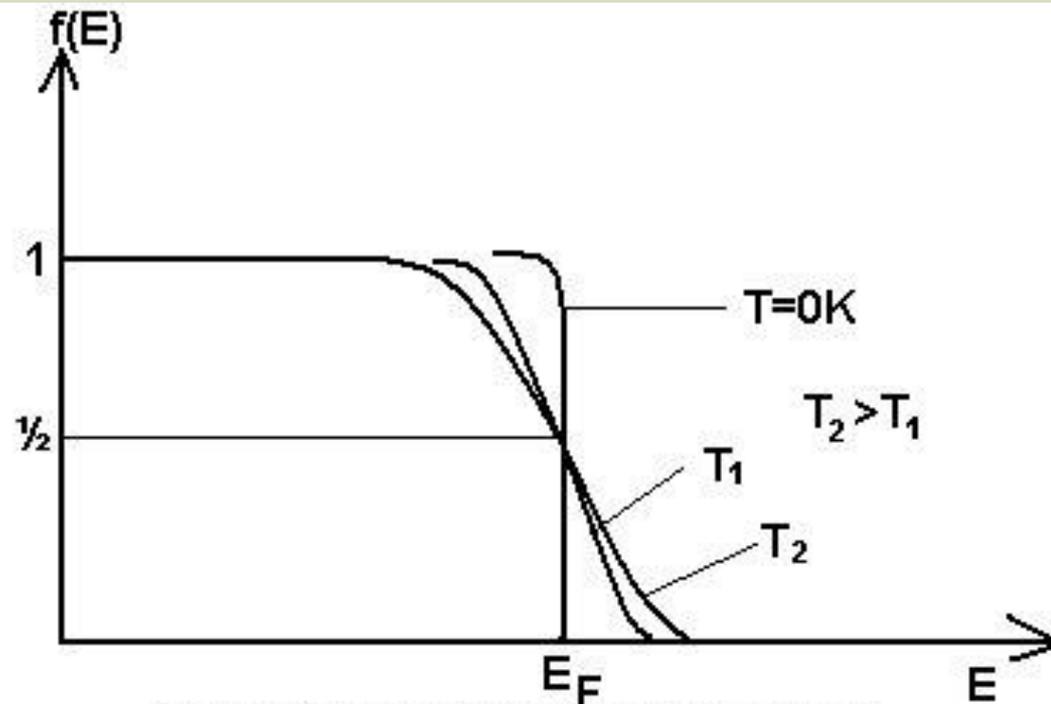
Estatística de Fermi

Qualquer sistema a uma temperatura absoluta de zero graus Kelvin encontra-se no estado fundamental. Se o sistema for de férmions, isto é, partículas com spin semi-inteiro, todos os estados abaixo do potencial de Fermi E_f estarão ocupados. Estatisticamente, todos os estados com energia E abaixo do potencial de Fermi estarão ocupados, com probabilidade $f(E)=1$, e todos acima estarão vazios, com probabilidade $f(E)=0$.

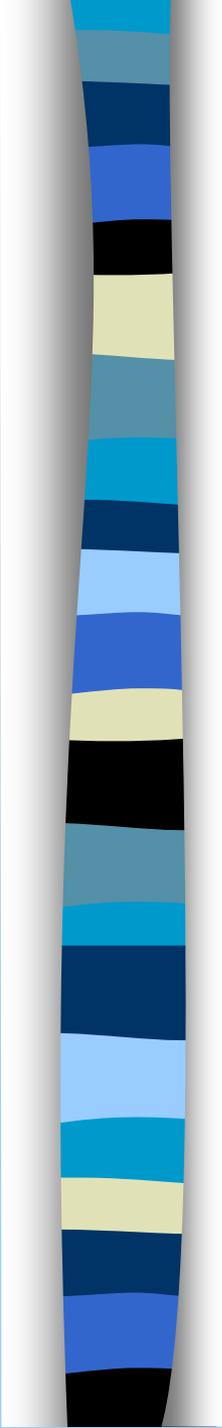
Se a temperatura não é zero, a probabilidade de um estado de energia E estar ocupado segue a distribuição de Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{\exp \frac{E - E_F}{kT} + 1}$$

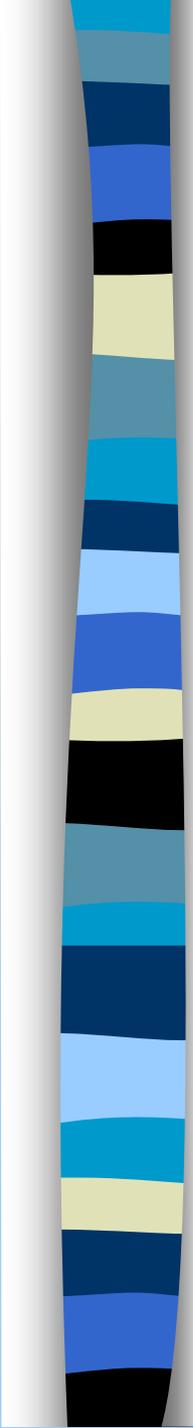
$$f(E) = \frac{1}{\exp \frac{E-E_F}{kT} + 1}$$



Fermi-Dirac Distribution Function



Semicondutores



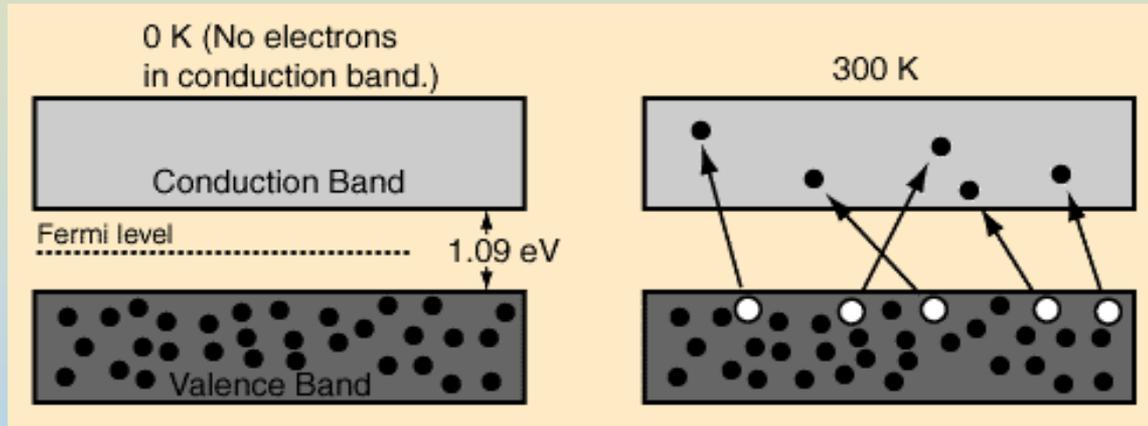
Tipos

- Intrínsecos (Si, Ge e compostos estequiométricos 1:1)
- Extrínsecos (intrínsecos dopados)
- Compostos (com 2 ou mais elementos)
- Amorfos (Si para células solares)

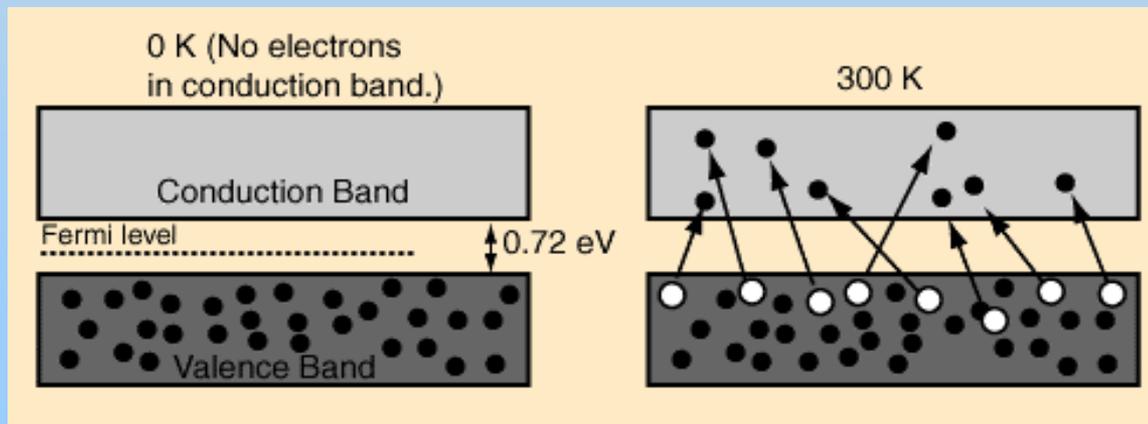
Semicondutores Intrínsecos

---- Grupo IVA ----

Estruturas de banda

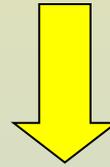


Silício

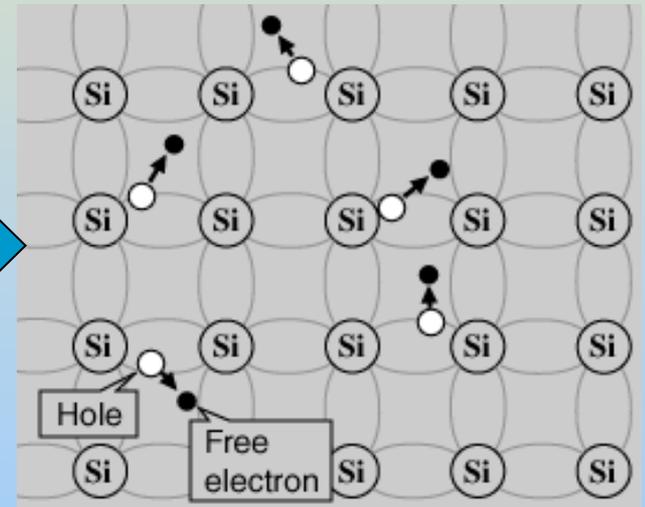
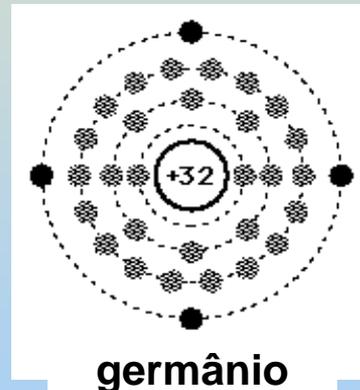
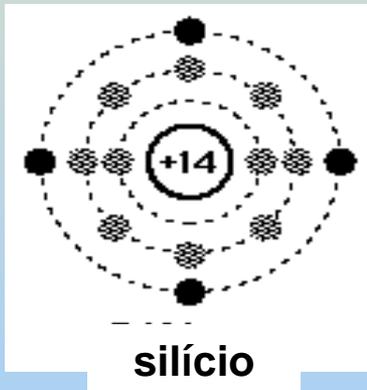


Germânio

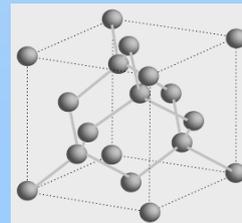
Origem da banda de valência cheia



Ligações Covalentes



Estrutura Cristalina
Diamante



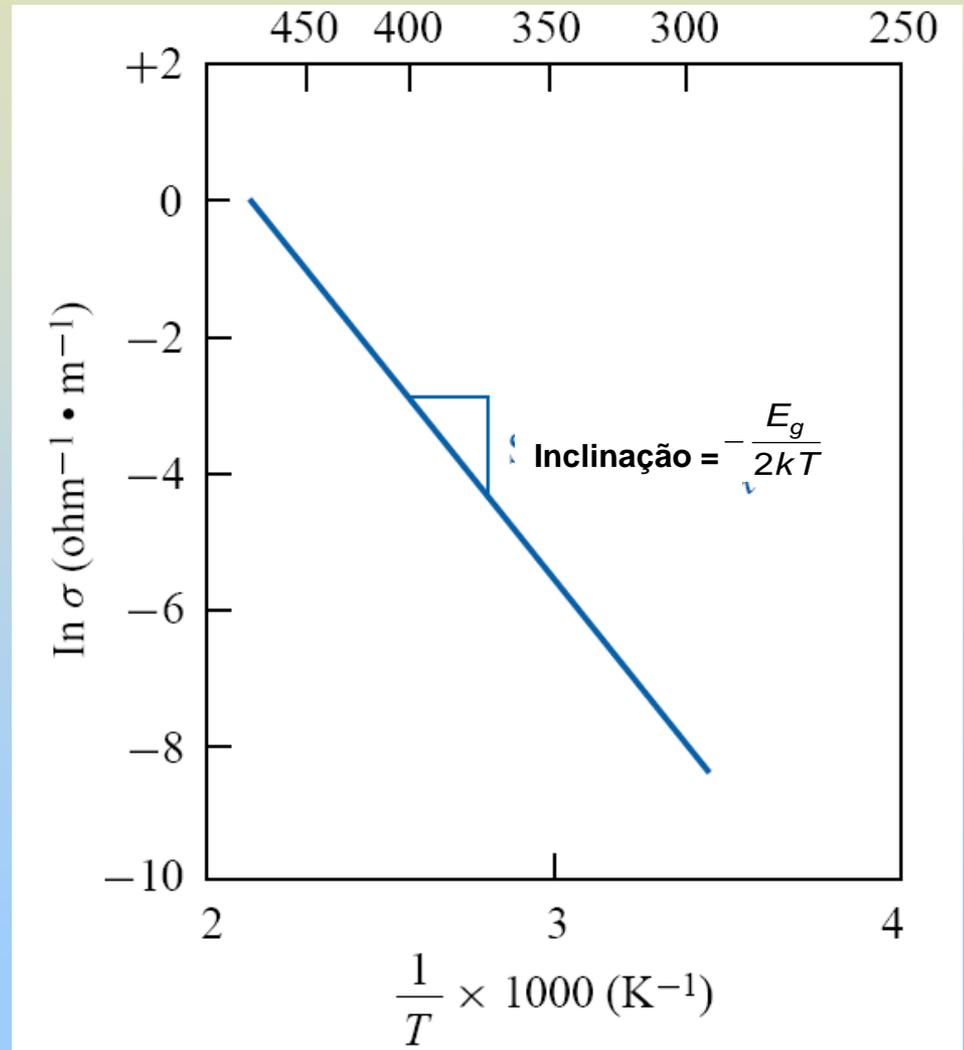
Condutividade em Semicondutores Intrínsecos

Propriedades elétricas de semicondutores intrínsecos (elementares) em temperatura ambiente

Group	Semiconductor	E_g (eV)	μ_e [$\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$]	μ_h [$\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$]	$n_e (= n_h)$ (m^{-3})
IVA	Si	1.107	0.140	0.038	14×10^{15}
	Ge	0.66	0.364	0.190	23×10^{18}

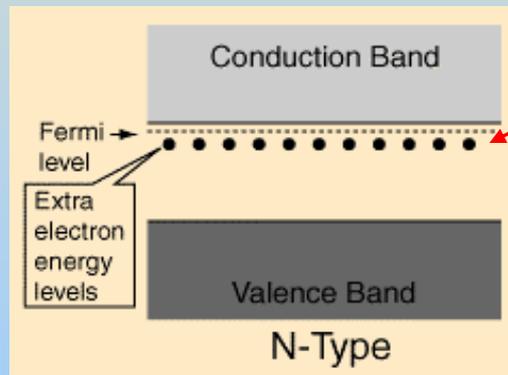
Condutividade em Semicondutores Intrínsecos

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

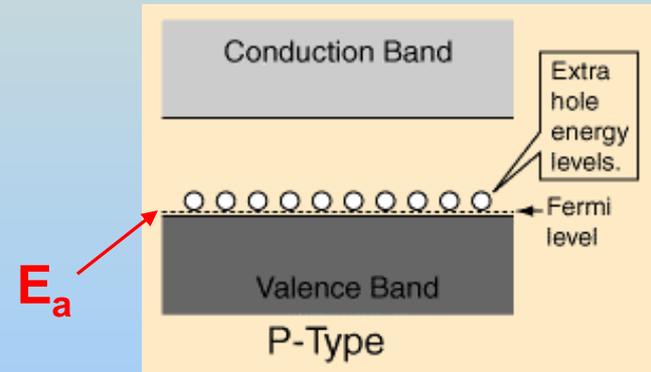


Semicondutores Extrínsecos

- São semicondutores intrínsecos , Si e Ge dopados com elementos das:
 - Colunas VA (P, As, Sb) - **Tipo-n** – excesso de elétrons
nível extra de doadores (E_d)
 - Colunas IIIA (Al,Ga,In) - **Tipo-p** – excesso de buracos
nível extra de aceitadores (E_a)



- Nível extra de energia (elétrons)
- Nível de Fermi deslocado para cima

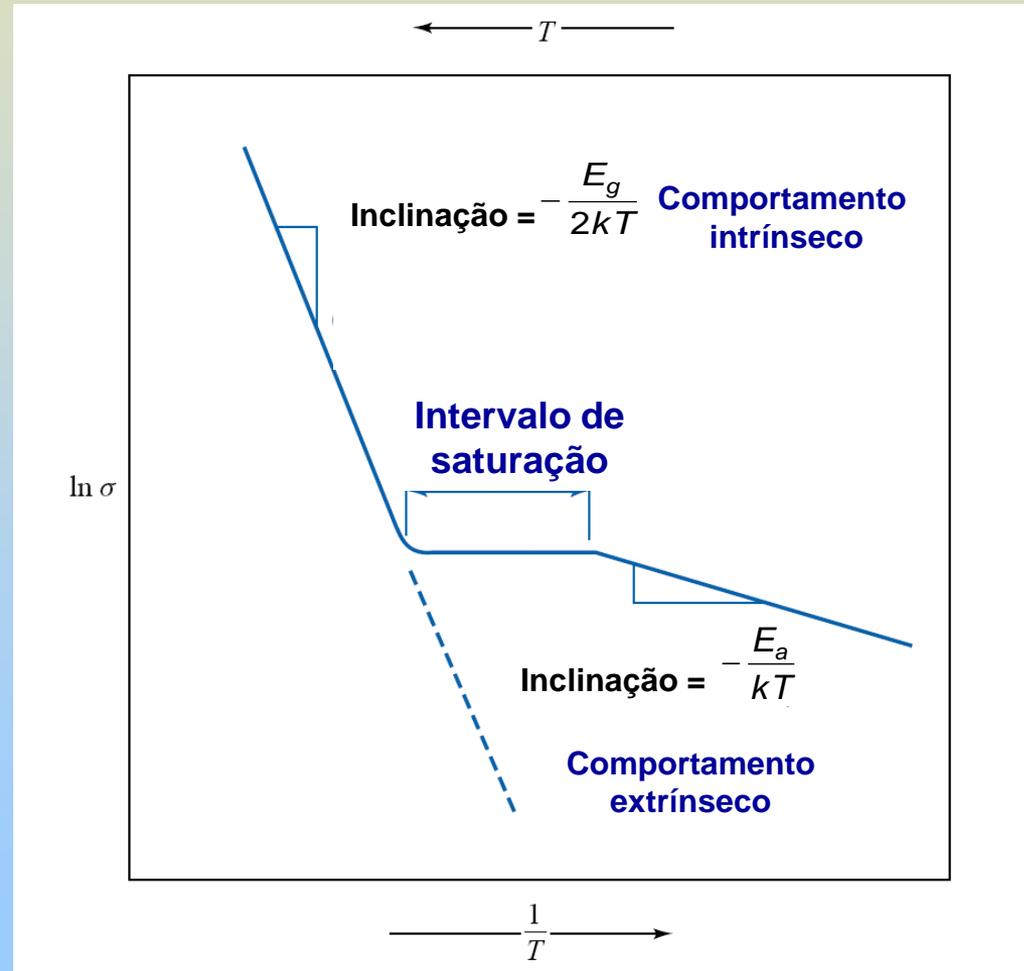


- Nível extra de energia (buracos)
- Nível de Fermi deslocado para baixo

Condutividade em Semicondutores Extrínsecos

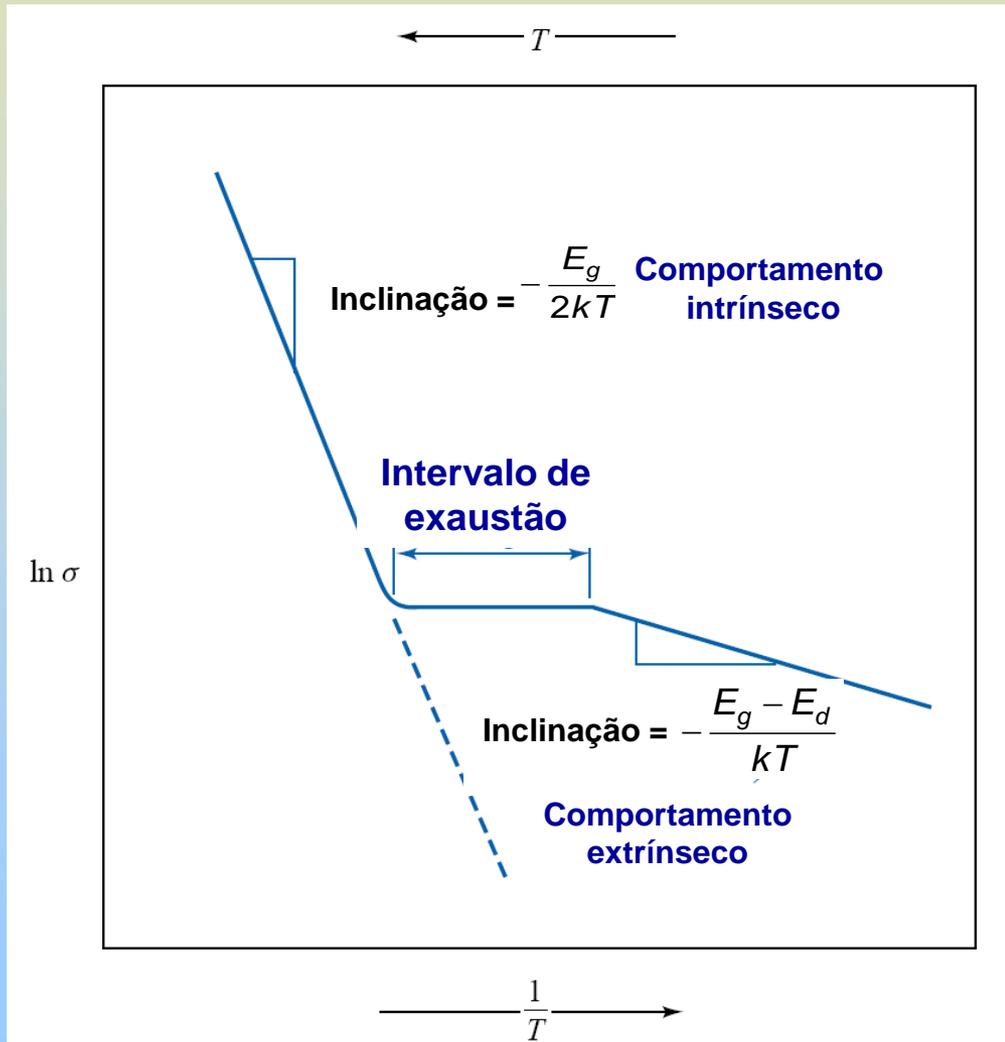
Tipo-p

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$



Tipo-n

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{(E_g - E_d)}{kT}\right)$$



Semicondutores Extrínsecos – Propriedades I

Alguns semicondutores extrínsecos (elementares)

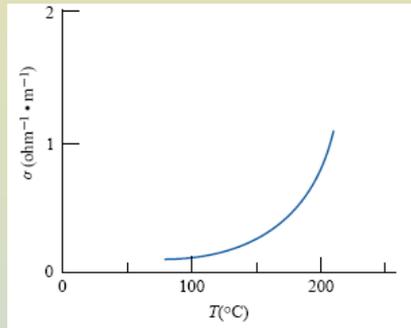
Element	Dopant	Periodic table group of dopant	Maximum solid solubility of dopant (atoms/m ³)
Si	B	IIIA	600×10^{24}
	Al	IIIA	20×10^{24}
	Ga	IIIA	40×10^{24}
	P	VA	1000×10^{24}
	As	VA	2000×10^{24}
	Sb	VA	70×10^{24}
Ge	Al	IIIA	400×10^{24}
	Ga	IIIA	500×10^{24}
	In	IIIA	4×10^{24}
	As	VA	80×10^{24}
	Sb	VA	10×10^{24}

Semicondutores Extrínsecos – Propriedades II

Energias dos níveis de impureza em
semicondutores extrínsecos

Semiconductor	Dopant	$E_g - E_d$ (eV)	E_a (eV)
Si	P	0.044	—
	As	0.049	—
	Sb	0.039	—
	Bi	0.069	—
	B	—	0.045
	Al	—	0.057
	Ga	—	0.065
	In	—	0.16
	Tl	—	0.26
Ge	P	0.012	—
	As	0.013	—
	Sb	0.096	—
	B	—	0.01
	Al	—	0.01
	Ga	—	0.01
	In	—	0.011
GaAs	Tl	—	0.01
	Se	0.005	—
	Te	0.003	—
	Zn	—	0.024
Cd	—	0.021	

Condutividade Elétrica em Semicondutores



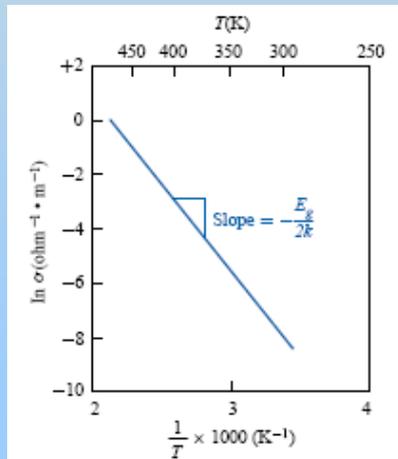
**σ aumenta com a temperatura!
comportamento oposto ao de
condutores !**

E_g = energia do gap

k = constante de Boltzmann

Intrínsecos

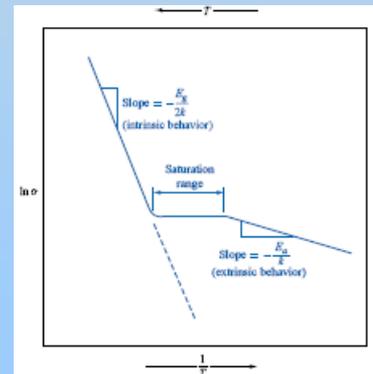
$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$



Extrínsecos

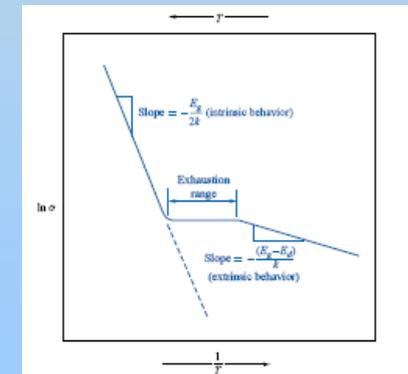
Tipo-p

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$



Tipo-n

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{(E_d - E_g)}{kT}\right)$$



Semicondutores Compostos

- Combinação de elementos das colunas IIIA-VA, IIB-VIA → ligações covalentes e iônicas
- São intrínsecos
- Desvio da proporção 1:1 gera um semicondutor extrínseco

SOME COMPOUND
SEMICONDUCTORS

Group	Compound	Group	Compound
III-V	BP	II-VI	ZnS
	AlSb		ZnSe
	GaP		ZnTe
	GaAs		CdS
	GaSb		CdSe
	InP		CdTe
	InAs		HgSe
	InSb		HgTe

Variação do tamanho do gap e semicondutores compostos

↑ componente iônica da ligação



↑ gap

↓ número atômico → ↑ gap

ou

↑ número atômico → ↓ gap

Tabela Periódica

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	*
1A	2A	3B	4B	5B	6B	7B	8B			1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	0	
H 1,00794 HIDROGÊNIO																		He 4,0026 HÉLIO
Li 6,941 LÍTIO	Be 9,0122 BERILIO											B 10,811 BÓRIO	C 12,01115 CARBONO	N 14,0064 NITROGÊNIO	O 15,9994 OXIGÊNIO	F 18,9984 FLUOR	Ne 20,180 NEÔNIO	
Na 22,98977 SÓDIO	Mg 24,304 MAGNÉSIO											Al 26,9815385 ALUMÍNIO	Si 28,0855 SILÍCIO	P 30,973762 FÓSFORO	S 32,065 ENXOFRE	Cl 35,453 CLORO	Ar 39,948 ARGÔNIO	
K 39,0983 POTÁSSIO	Ca 40,078 CÁLCIO	Sc 44,9559122 ESCANDIÓ	Ti 47,88 TITÂNIO	V 50,9415 VANADÍO	Cr 51,9961 CROMO	Mn 54,938044 MANGANÊS	Fe 55,845 FERRO	Co 58,933195 COBALTO	Ni 58,6934 NÍQUEL	Cu 63,546 COPRÉ	Zn 65,38 ZINCO	Ga 69,723 GÁLIO	Ge 72,6305 GERMÂNIO	As 74,9216 ARSENÍO	Se 78,96 SELÊNIO	Br 79,904 BROMO	Kr 83,80 CRÍPTONO	
Rb 85,4678 RUBÍDIO	Sr 87,62 ESTRÔNIO	Y 88,905848 ÍTRIO	Zr 91,224 ZIRCONÍO	Nb 92,90638 NÍOBIO	Mo 95,94 MOLIBDÊNIO	Tc 98,90625 TECNICÍO	Ru 101,07 RUTÊNIO	Rh 102,90550 RÓDIO	Pd 106,42 PALÁDIO	Ag 107,8682 PRATA	Cd 112,411 CÁDmio	In 114,818 ÍNDIO	Sn 118,710 ESTANHO	Sb 121,757 ANTIMÔNIO	Te 127,60 TELÚRIO	I 126,90544 IODO	Xe 131,29 XENÔNIO	
Cs 132,90545196 CÉSIO	Ba 137,327 BÁRIO		Hf 178,49 HAFNÍO	Ta 180,94788 TÁNTALO	W 183,84 WOLFRÊNIO	Re 186,207 RÉNIUM	Os 190,23 ÓSMÍO	Ir 192,222 ÍRIDIUM	Pt 195,084 PLATINA	Au 196,966569 OURIBÁ	Hg 200,59 MERCÚRIO	Tl 204,377 TÁLLIO	Pb 207,19 CHUMBO	Bi 208,980383 BISMUTO	Po 209 PÓLONIO	At 210 ASTATO	Rn 222 RÁDIO	
Fr 223 FRÂNCIO	Ra 226 RÁDIO		Dh 261 DUBNÍO	Jl 269 JOLÍFÓ	Rf 261 RIFÓ	Bh 264 BÉRIUM	Hn 277 HELVÍO	Mt 273 MÉTALIO										

Elementos de transição

Número atômico: 6
 Distribuição eletrônica: 1s² 2s² 2p²
 Símbolo: C
 Massa atômica: 12,01115

Lantanídeos

La 138,90547 LANTÂNIO	Ce 140,12 CÉRIO	Pr 140,90765 PRASÉODÍMIO	Nd 144,24 NÍQUELO	Pm 147 PROMÉCIO	Sm 150,36 SAMÁRIO	Eu 151,964 EUROPIUM	Gd 157,25 GADOLÍNIO	Tb 158,90486 TERBÓ	Dy 162,50 DÍSMIO	Ho 164,930329 HÓLMIUM	Er 167,259 ERBÓ	Tm 168,934018 TULÍO	Yb 173,04 ÍTERBIO	Lu 174,967 LUTÉCIO
-----------------------------	-----------------------	--------------------------------	-------------------------	-----------------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	------------------------	-----------------------------	-----------------------	---------------------------	-------------------------	--------------------------

Actinídeos

Ac 227 ACTÍNIO	Th 232,0377 TÓRIO	Pa 231 PACTÍNIO	U 238,02891 URÂNIO	Np 237 NEPULMIO	Pu 244 PLUTÔNIO	Am 243 AMÉRICIO	Cm 247 CURÍUM	Bk 247 BERGÓLIO	Cf 251 CALIFÓRNIUM	Es 252 EINSTEINÍUM	Fm 257 FERMIUM	Md 288 MÉNDELÉVIO	No 289 NOBELÍUM	Lr 260 LAWRÊNÇIO
----------------------	-------------------------	-----------------------	--------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	---------------------	-----------------------	--------------------------	--------------------------	----------------------	-------------------------	-----------------------	------------------------

Propriedades elétricas de alguns semicondutores compostos

Group	Semiconductor	E_g (eV)	μ_e [m ² /(V · s)]	μ_h [m ² /(V · s)]	$n_e (= n_h)$ (m ⁻³)
III-V	AlSb	1.6	0.090	0.040	—
	GaP	2.25	0.030	0.015	—
	GaAs	1.47	0.720	0.020	1.4×10^{12}
	GaSb	0.68	0.500	0.100	—
	InP	1.27	0.460	0.010	—
	InAs	0.36	3.300	0.045	—
	InSb	0.17	8.000	0.045	13.5×10^{21}
II-VI	ZnSe	2.67	0.053	0.002	—
	ZnTe	2.26	0.053	0.090	—
	CdS	2.59	0.034	0.002	—
	CdTe	1.50	0.070	0.007	—
	HgTe	0.025	2.200	0.016	—

Si → $E_g = 1,09$ eV

Ge → $E_g = 0,72$ eV