

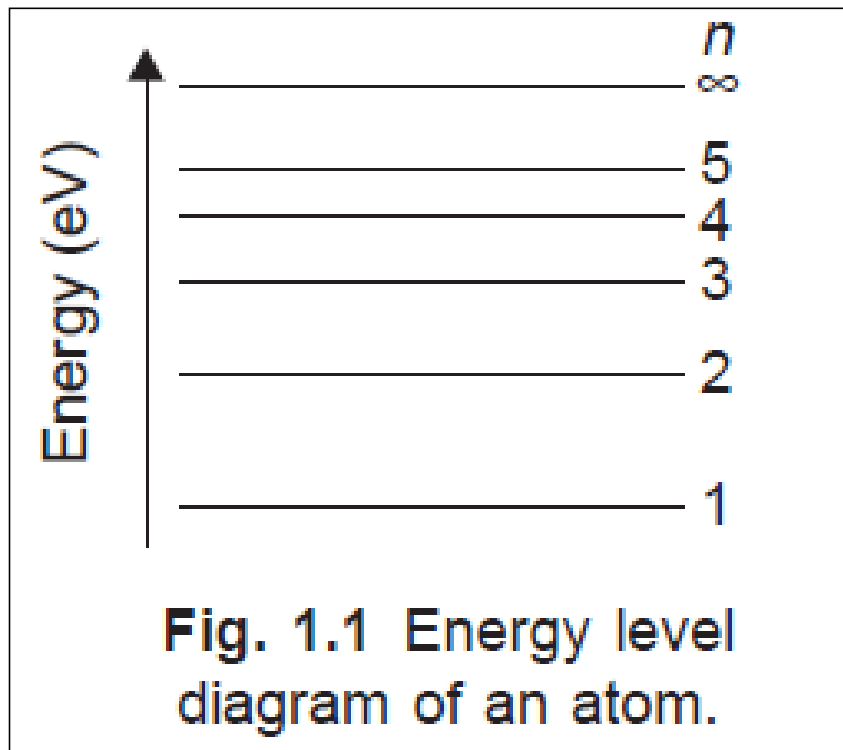
Tema 2: Fundamentos de los materiales semiconductores (estructura sólidos, enlaces, bandas de energía, interacción semiconductor y energía, semiconductores empleados, dopado de semiconductores). Semiconductores cristalinos, policristalinos y amorfos. Crecimiento cristalino.

Lecturas recomendadas:

- <http://ocw.ehu.es/enseñanzas-tecnicas/electronica-general/teoria/tema1>

Estructura electrónica de los átomos: modelo de Bohr

- Los electrones se mueven en órbitas circulares discretas sin radiar energía.
- El momento angular de los electrones es un múltiplo natural, n , de $(h/2\pi)$ donde, $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$, es la constante de Planck.



- Los electrones tienden a ocupar el estado más bajo de energía desocupado.
- Cuando un electrón decae desde un estado de energía E_2 hasta un estado de energía E_1 emite un fotón (cuanto de energía), $h\nu = E_2 - E_1$

Correcciones al modelo de Bohr

- El modelo de Bohr no justifica la formación de enlaces electrónicos y sólo incluía el número cuántico principal (n), que toma valores naturales.

Posteriormente se agregan tres números cuánticos adicionales:

- El número cuántico secundario o azimutal (l).

Toma valores desde 0 hasta n-1.

Determina la forma espacial de la zona (orbitales) en la cual *probablemente* se encuentra un determinado electrón.

- El número cuántico magnético (m).

Toma valores desde -l (pasando por cero) hasta +l.

Indica la orientación de los orbitales en los ejes cartesianos.

- El número cuántico de spin (s).

Puede tomar dos valores: +1/2 y -1/2.

Indica el sentido de giro del electrón sobre si mismo.

Principio de exclusión de Pauli

Z	Name	# of Electrons						Notation
		1		2		3		
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	
1	H	1						$1s^1$
2	He	2						$1s^2$
3	Li	2	1					$1s^2 2s^1$
4	Be	2	2					$1s^2 2s^2$
5	B	2	2	1				$1s^2 2s^2 2p^1$
6	C	2	2	2				$1s^2 2s^2 2p^2$
7	N	2	2	3				$1s^2 2s^2 2p^3$
8	O	2	2	4				$1s^2 2s^2 2p^4$
9	F	2	2	5				$1s^2 2s^2 2p^5$
10	Ne	2	2	6				$1s^2 2s^2 2p^6$
11	Na	2	2	6	1			$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
12	Mg	2	2	6	2			$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
13	Al	2	2	6	2	1		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
14	Si	2	2	6	2	2		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
15	P	2	2	6	2	3		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
16	S	2	2	6	2	4		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
17	Cl	2	2	6	2	5		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
18	Ar	2	2	6	2	6		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$

- No puede haber dos electrones ocupando el mismo estado cuántico, descrito por un mismo conjunto de números cuánticos, n , l , m y s .

SEMICONDUCTORES ELEMENTALES

- Estructura atómica del Carbono (6 electrones):
 $1s^2 2s^2 2p^2$
 - Estructura atómica del Silicio (14 electrones):
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
 - Estructura atómica del Germanio (32 electrones):
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$
- ✓ 4 electrones en la última capa

SEMICONDUCTORES

		13	14	15	16
		IIIA	IVA	VA	VIA
		5 B Boro 10.811	6 C Carbono 12.0107	7 N Nitrógeno 14.00674	8 O Oxígeno 15.9994
12	13 Al Aluminio 26.981538	14 Si Silicio 28.0855	15 P Fósforo 30.973761	16 S Azufre 32.066	
	30 Zn Zinc 65.409	31 Ga Galio 69.723	32 Ge Germanio 72.64	33 As Arsénico 74.92160	34 Se Selenio 78.96
	48 Cd Cadmio 112.411	49 In Indio 114.818	50 Sn Estaño 118.710	51 Sb Antimonio 121.760	52 Te Teluro 127.60

Los semiconductores son materiales de conductividad intermedia entre la de los metales y la de los aislantes:

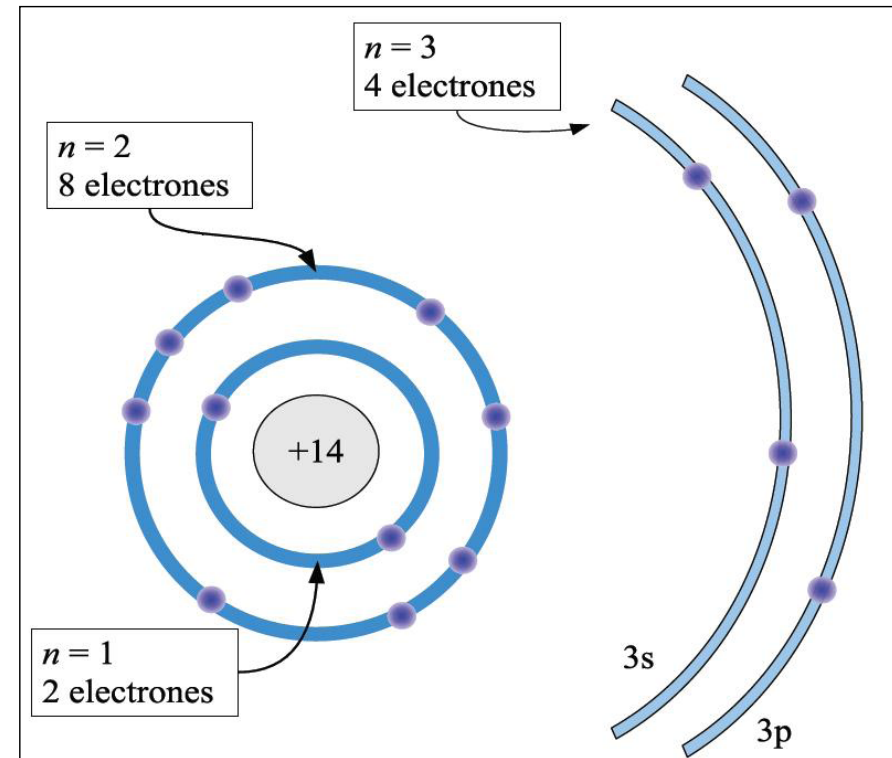
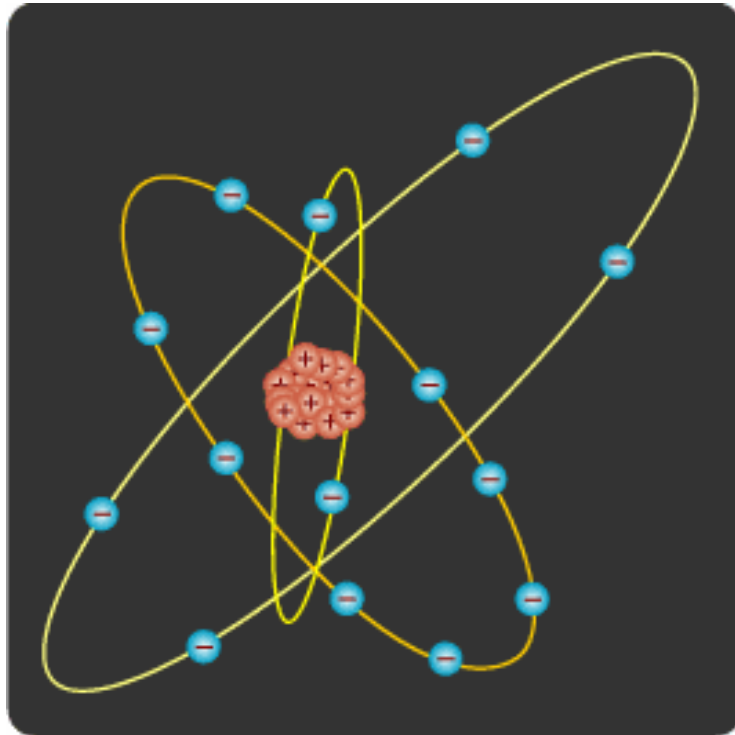
Material:	CONDUCTOR	SEMICONDUCTOR	AISLANTE
Resistividad típica ρ (Ω/cm):	$10^{-10} \sim 10^{-8}$	$10^{-6} \sim 10^6$	$10^{10} \sim 10^{20}$

Su conductividad puede modificarse en gran medida por variaciones de la temperatura, mediante excitación óptica y/o la inclusión de determinadas impurezas.

Materiales semiconductores:

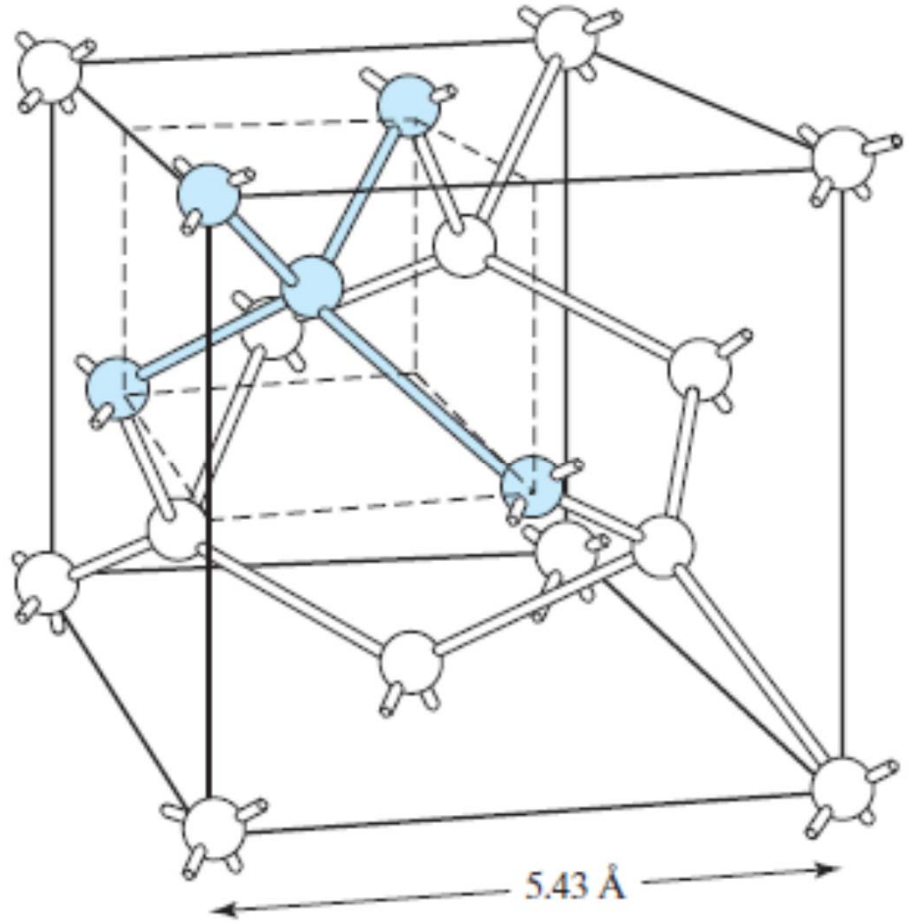
- **Semiconductores elementales:** germanio (Ge), silicio (Si)
- **Compuestos IV:** SiC, SiGe
- **Compuestos III-V:**
 - Binarios: GaAs, GaP, GaSb, GaN, AlAs, AlP, AlSb, InAs, InP, InSb
 - Ternarios: GaAsP, AlGaAs
 - Cuaternarios: InGaAsP
- **Compuestos II-VI:** ZnS, ZnSe, ZnTe, ZnO, CdS, CdSe, CdTe

Estructura electrónica del silicio

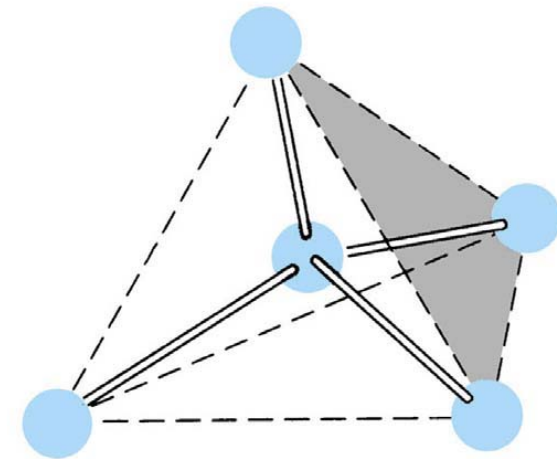


- 10 electrones interiores (fuertemente ligados: $1S^2$; $2S^2$; $2P^6$)
- 4 electrones (débilmente ligados, responsables de la mayoría de las propiedades químicas: $3S^2$; $3P^2$)
- Para minimizar la energía los orbitales 3S y 3P se hibridan para formar un orbital tetraédrico SP^3

El cristal de silicio

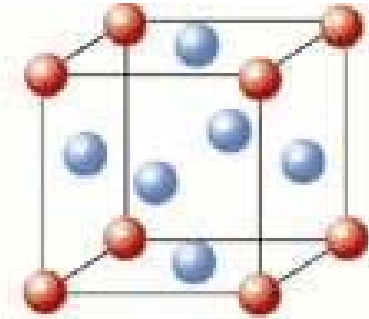
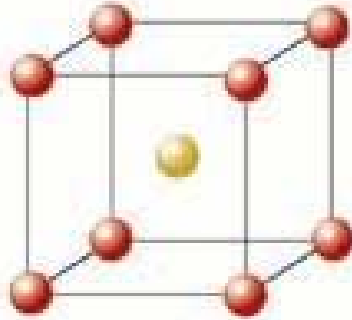
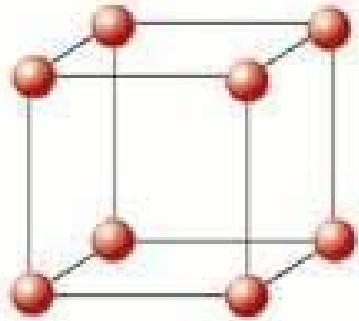


- Red cristalina del diamante



- Cada átomo de Si tiene 4 vecinos próximos

ESTRUCTURAS CRISTALINAS



Cúbico simple

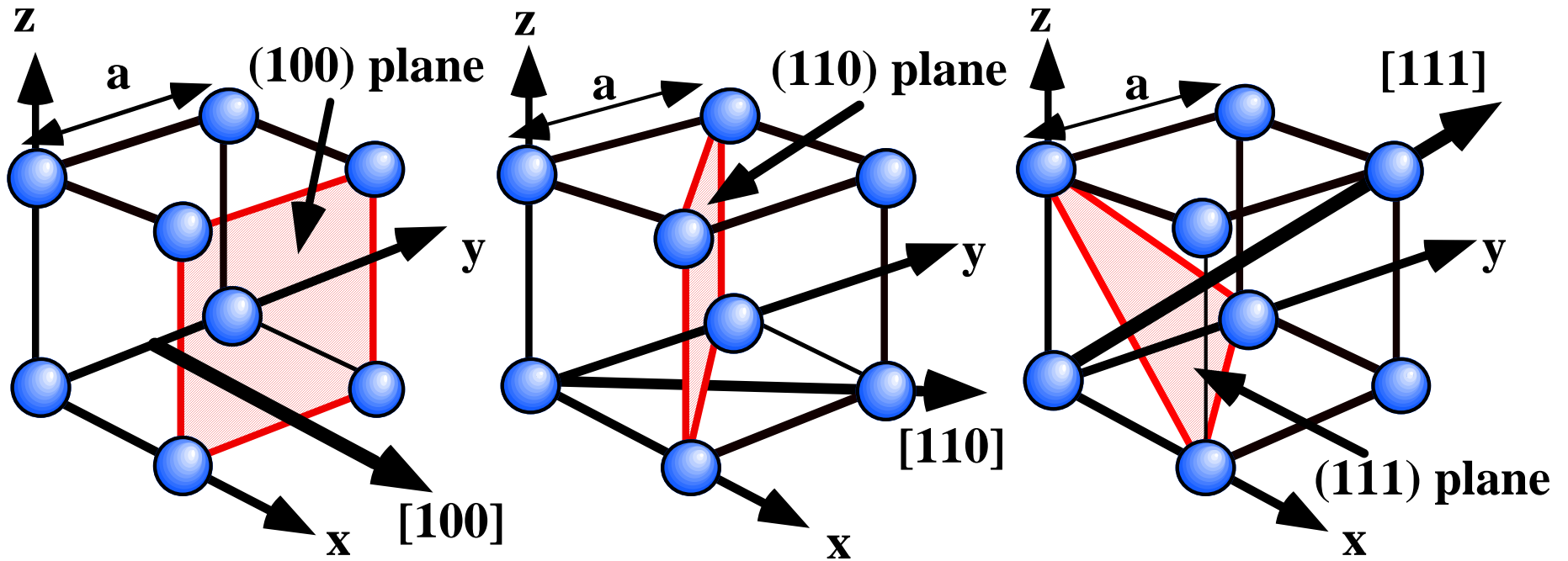


Cúbico centrado en el centro



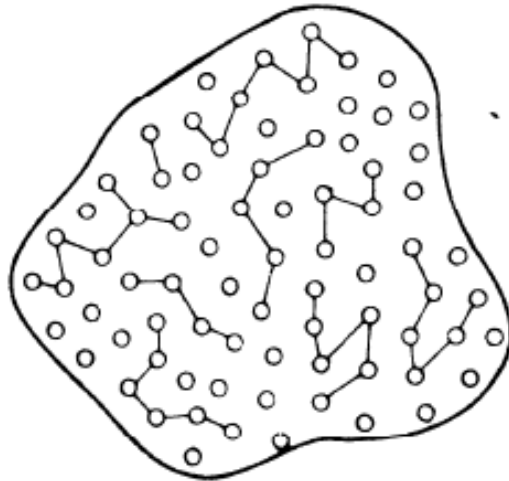
Cúbico centrado en las caras

ORIENTACIONES CRISTALINAS



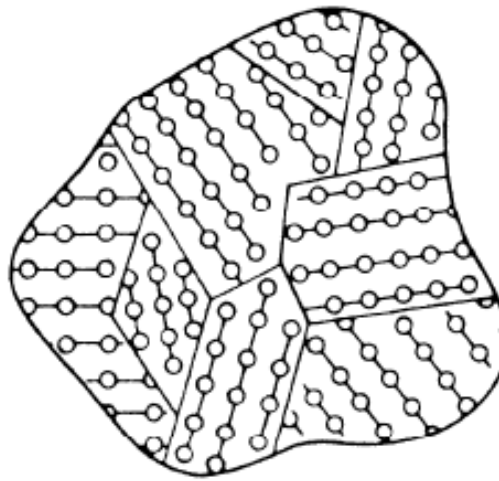
ORDENACIÓN ATÓMICA

amorfo



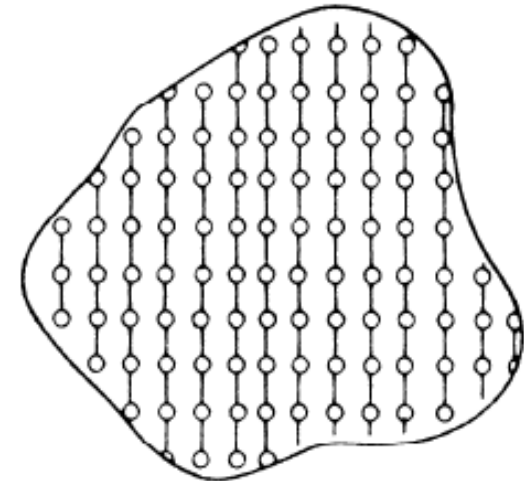
(a) Amorfo
No existe orden
a largo alcance

policristalino

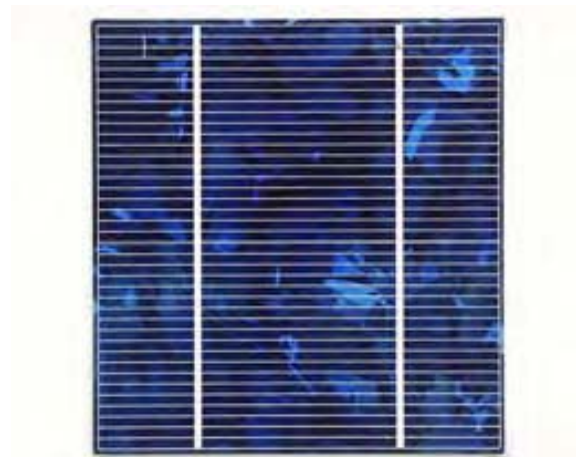


(b) Policristalino
Totalmente ordenado
en segmentos

cristalino

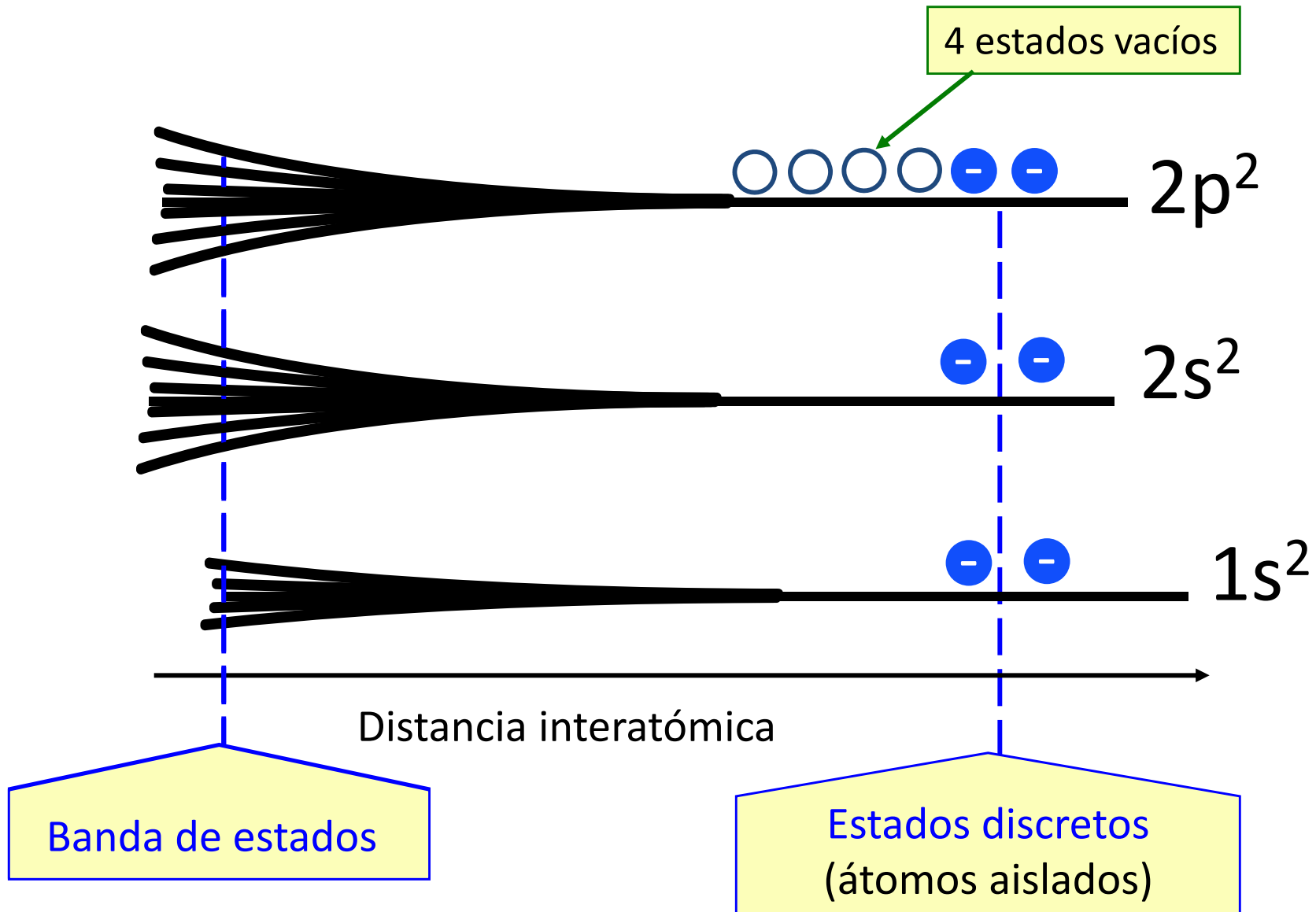


(c) Cristalino
Los átomos en el sólido forman
un conjunto totalmente ordenado



Origen de las bandas de energía

Carbono (6 electrones) $1s^2, 2s^2, 2p^2$



NIVELES DE ENERGÍA

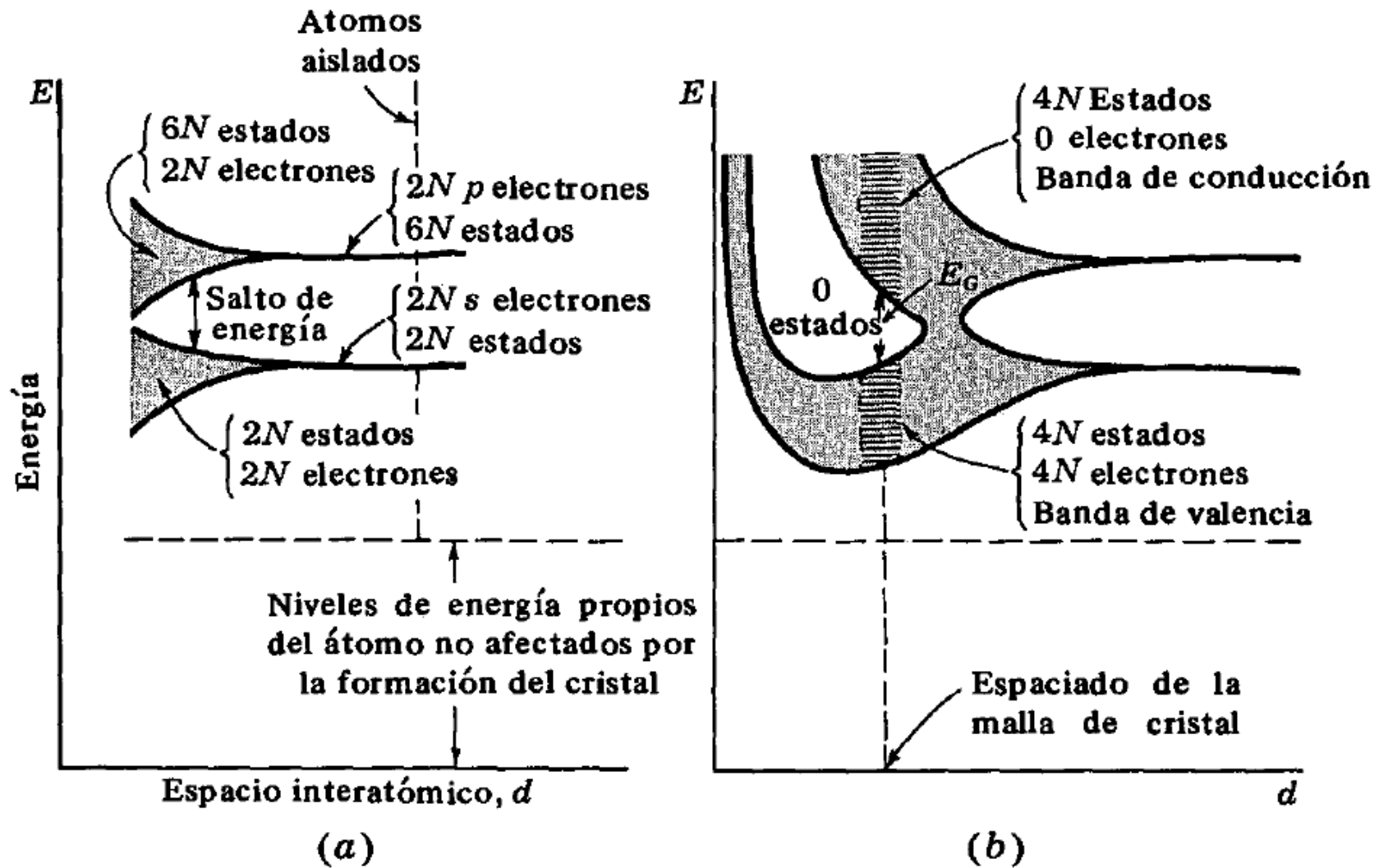
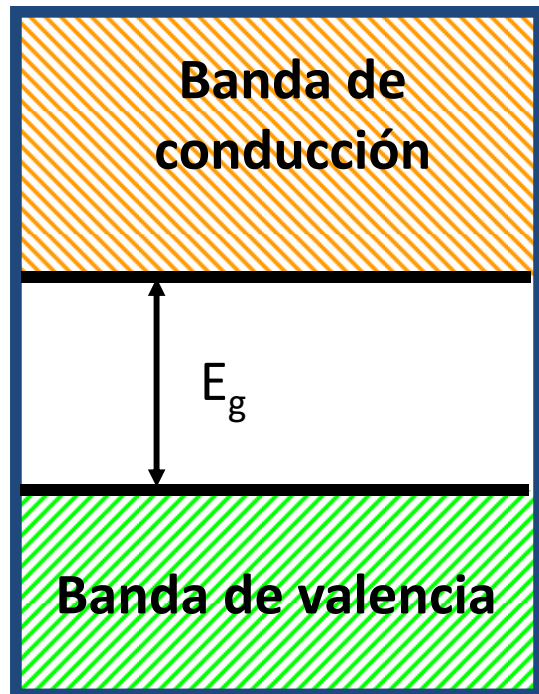
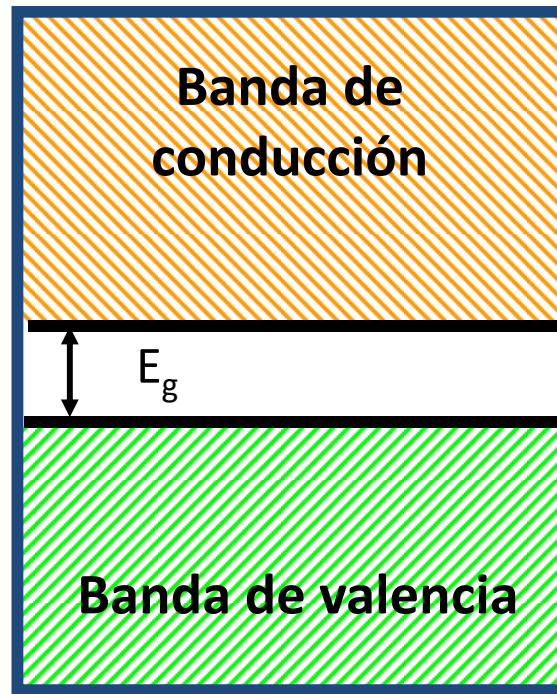


Fig. 1-3. Como se distribuyen los niveles de energía de los átomos aislados en bandas de energía, cuando estos átomos están próximos a otros para constituir un cristal.

METALES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES



Aislante
 $E_g=5-10\text{eV}$

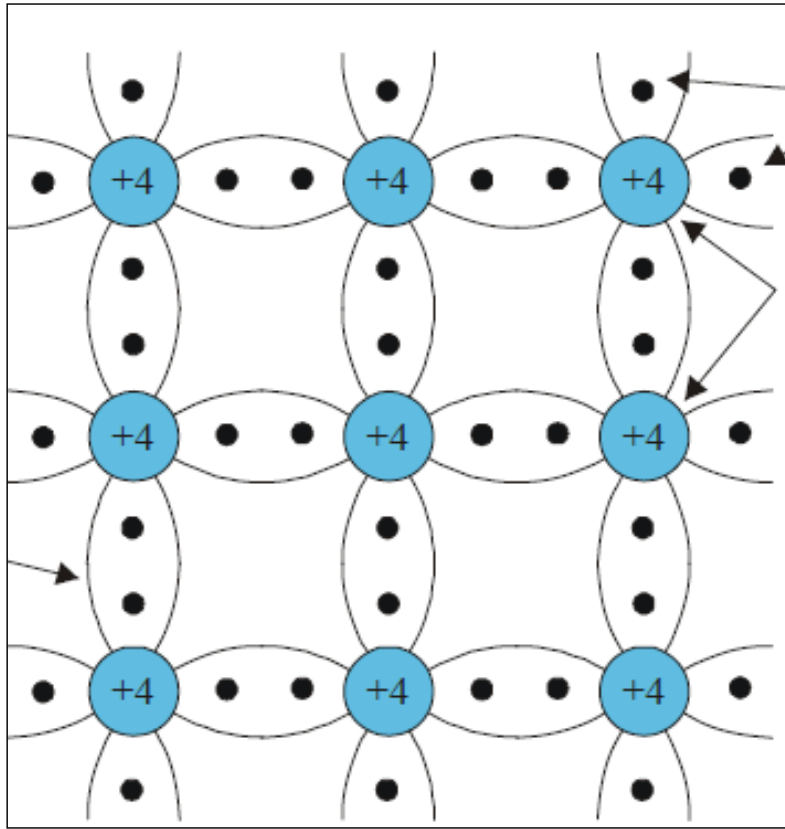


Semiconductor
 $E_g=0,5-2\text{eV}$

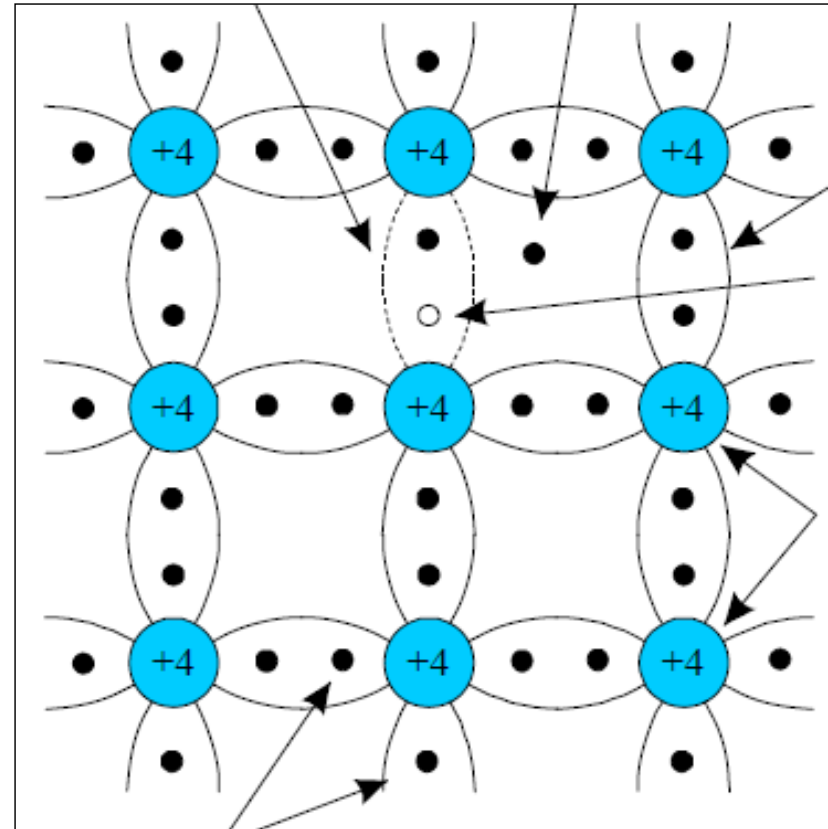


Conductor
No hay "gap"

SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS



Temperaturas bajas



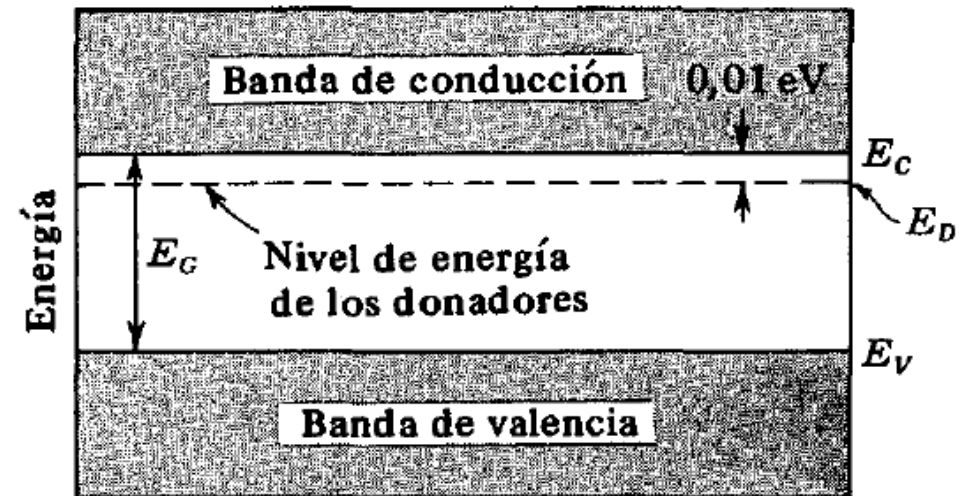
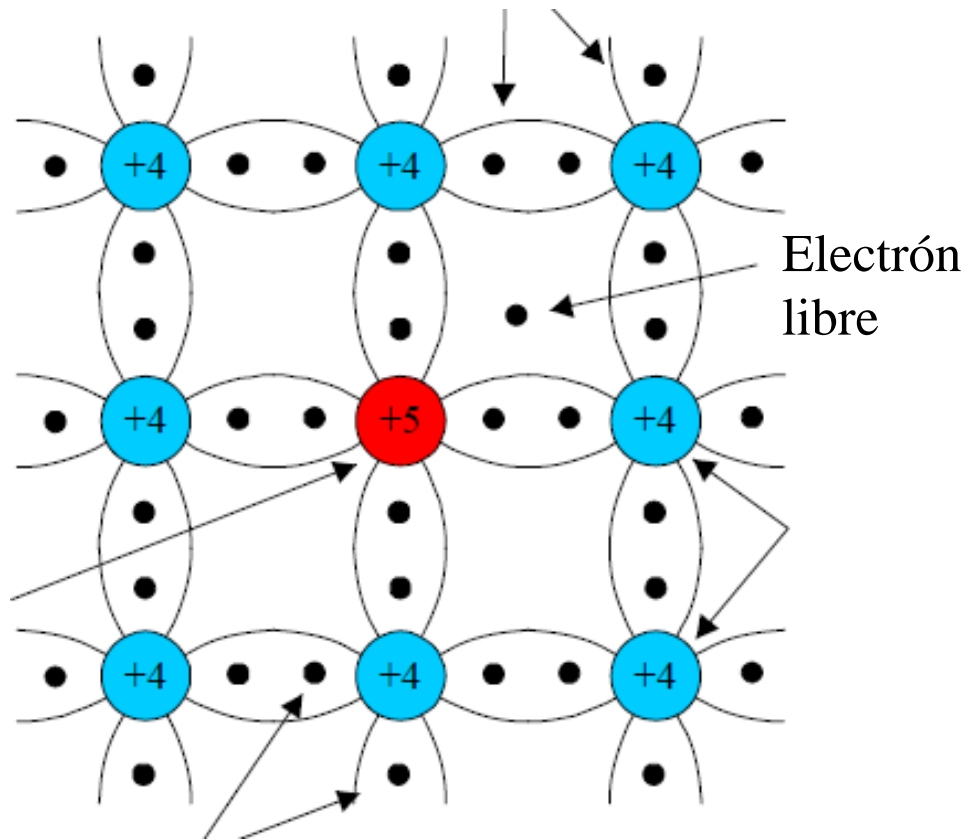
Temperaturas elevadas

- Concentración intrínseca:

$$n_0 = p_0 = n_i = A \cdot T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right)$$

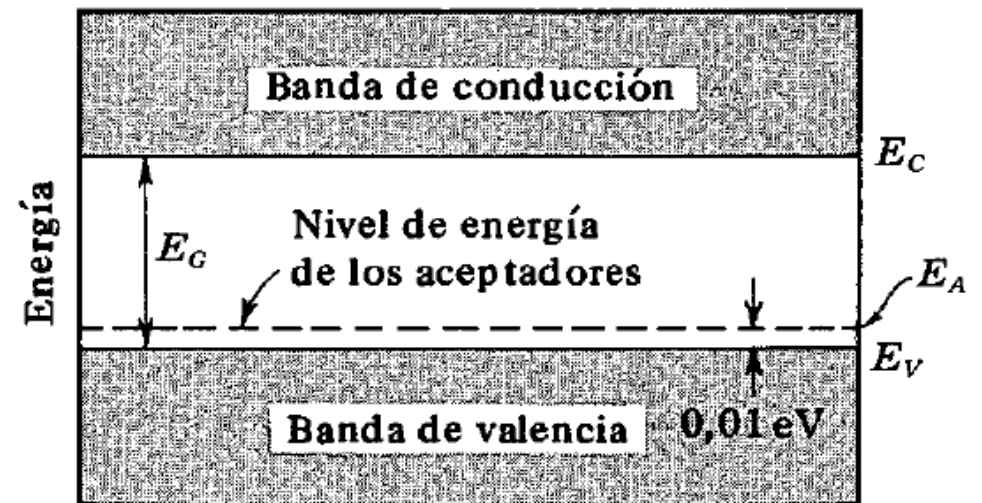
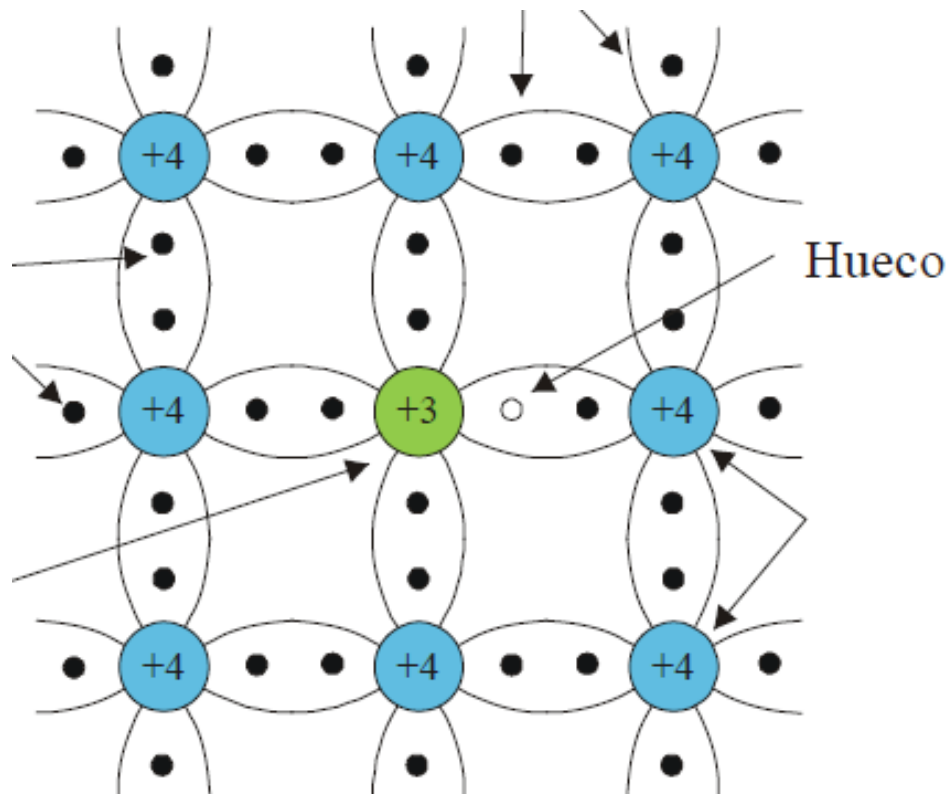
- Aplicación: TERMISTORES

SEMICONDUCTORES TIPO N: DONANTES



- Concentración de electrones: $n = N_D$

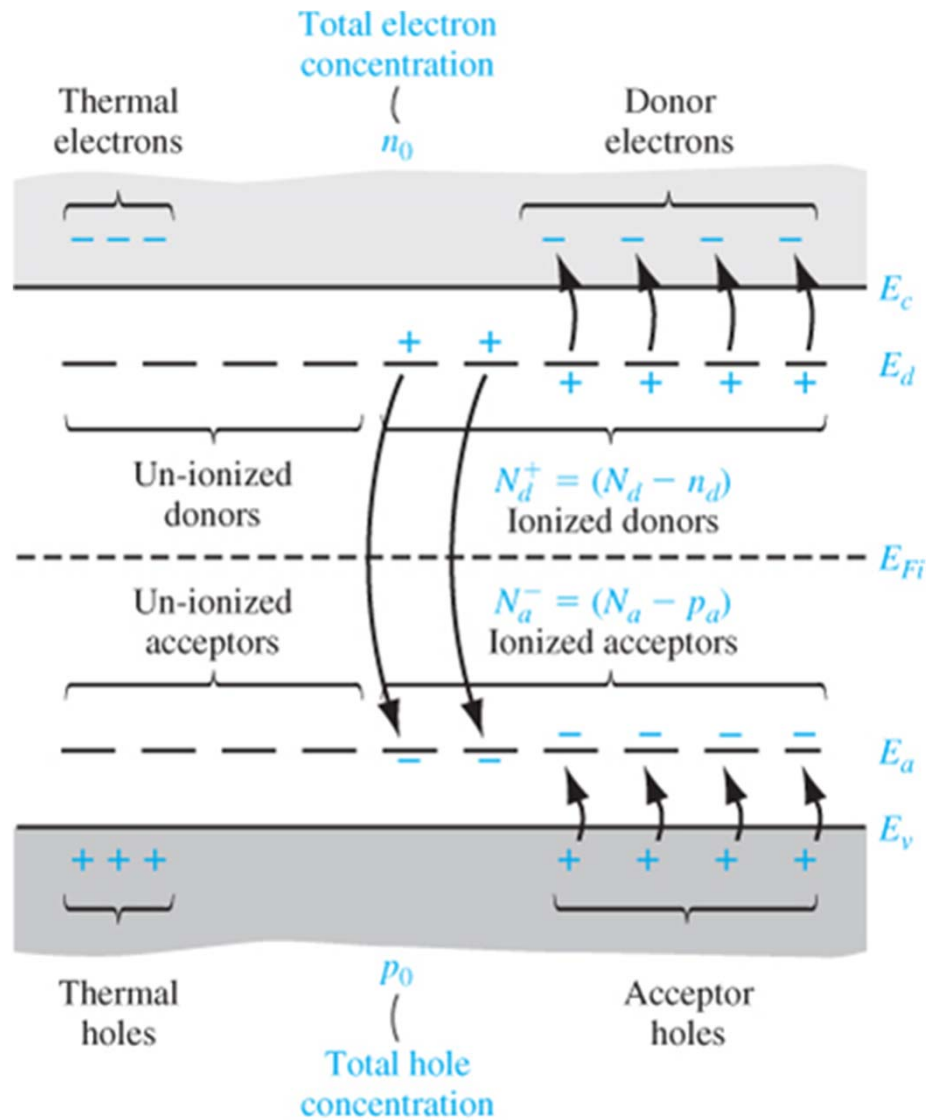
SEMICONDUCTORES TIPO P: ACEPTORES



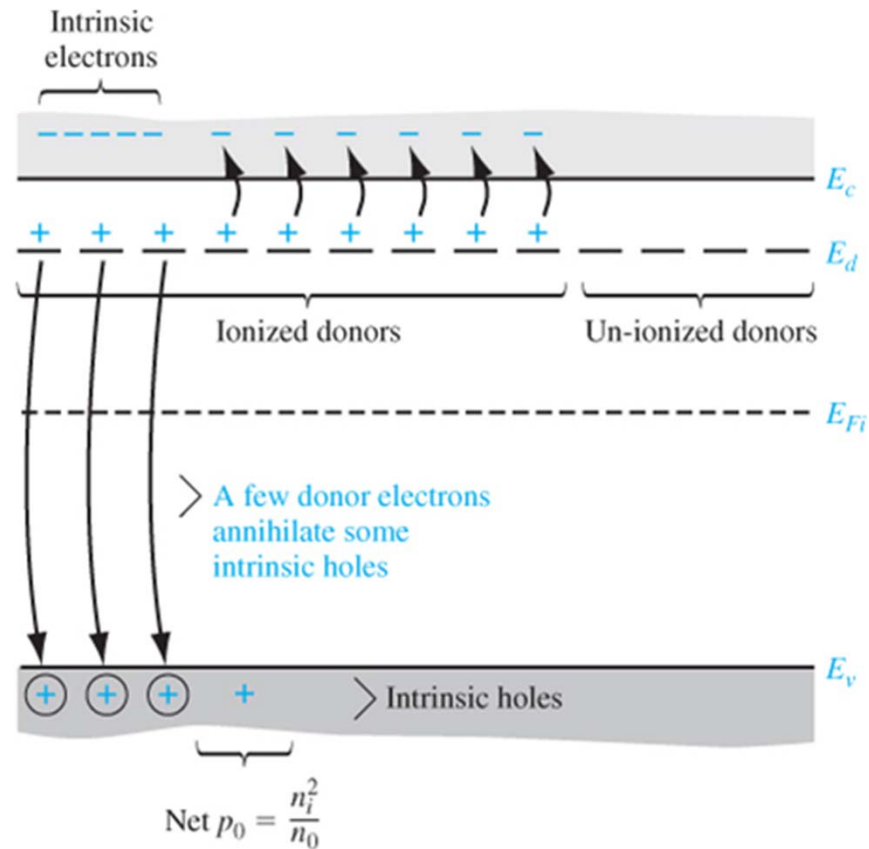
- Concentración de huecos: $p = N_A$

LEY DE ACCIÓN DE MASAS

- En equilibrio térmico: $n_0 \cdot p_0 = (n_i)^2$



Portadores MAYORITARIOS y MINORITARIOS



Tipo N	Tipo P
Mayoritarios: $n_0 = N_D$	Mayoritarios: $p_0 = N_A$
Minoritarios: $p_0 = (n_i)^2 / N_D$	Minoritarios: $n_0 = (n_i)^2 / N_A$

FOTOCONDUCTORES

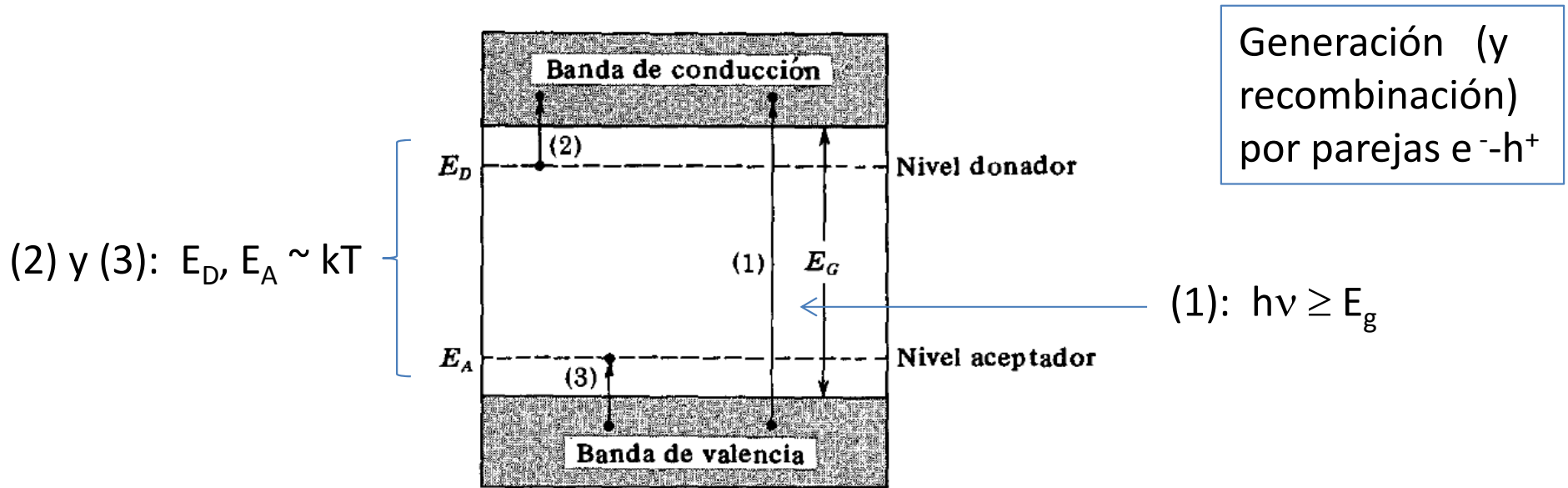


Fig. 2-11. Fotoexcitación en los semiconductores. (1) es intrínseca, mientras que (2) y (3) son excitaciones extrínsecas.

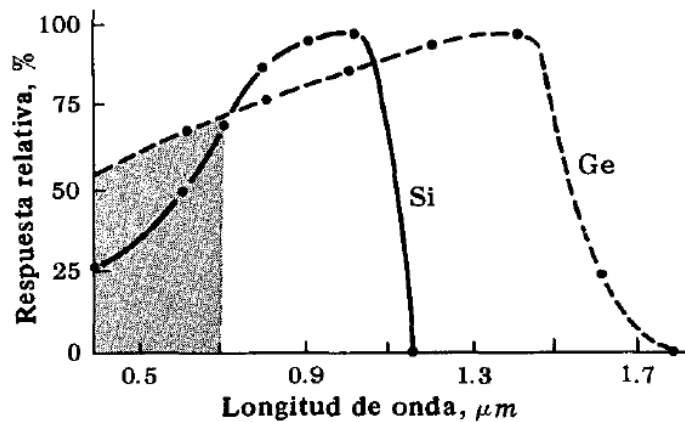
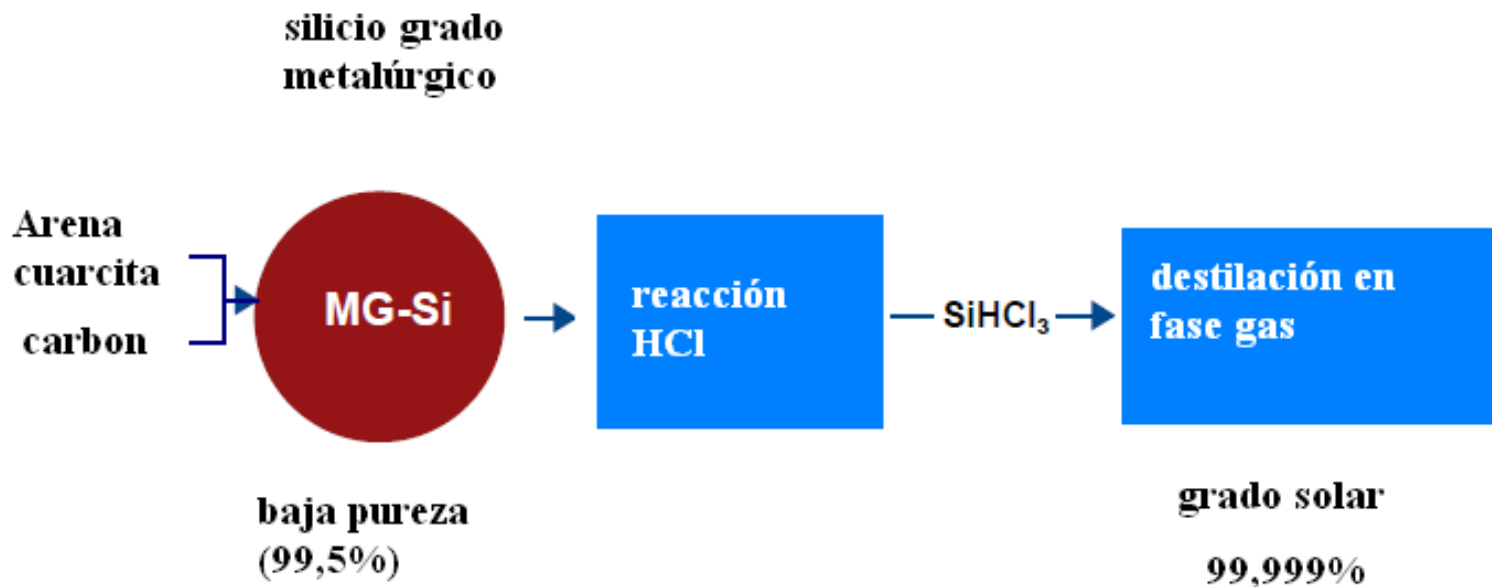


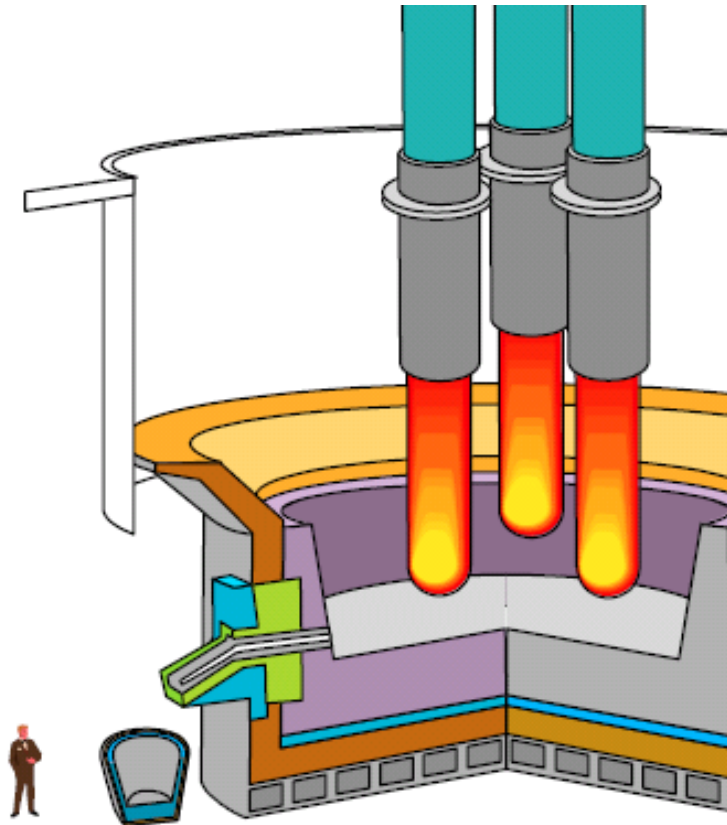
Fig. 2-12. Relativo a la respuesta espectral del Si y del Ge (Cortesía de Texas Instruments, Inc.).

FABRICACIÓN DE OBLEAS: SILICIO

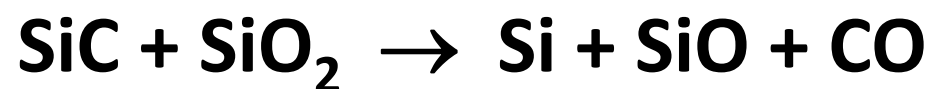
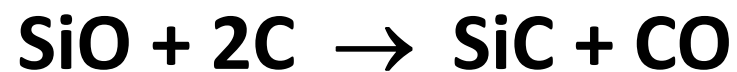
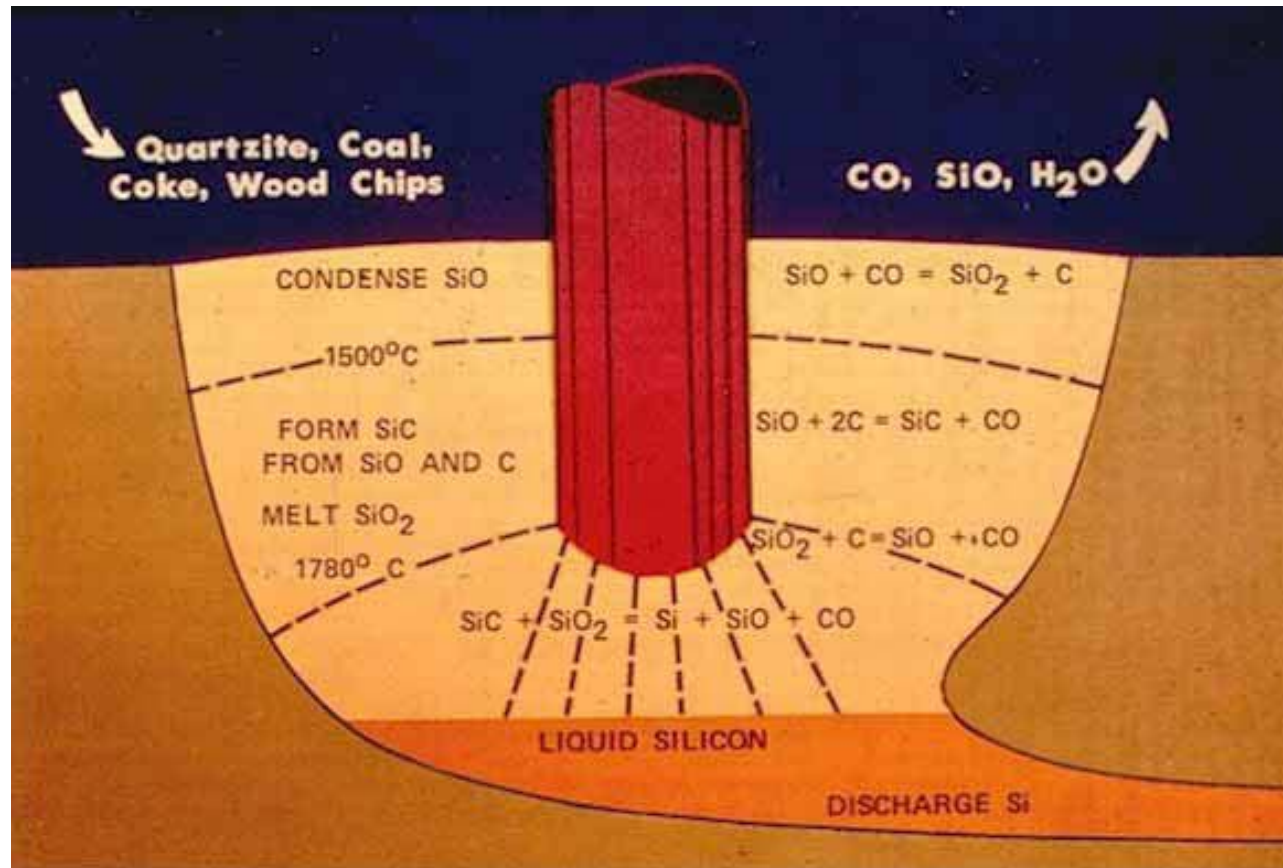
- Silicio grado metalúrgico
- Destilación en fase gaseosa
- Condensación a partir del vapor (grado solar)
- Purificación del silicio
- Crecimiento cristalino



HORNO INDUSTRIAL DE ARCO DE CARBÓN



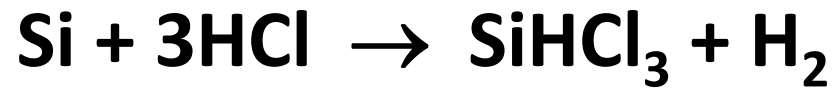
SILICIO GRADO METALÚRGICO: 99% PUREZA



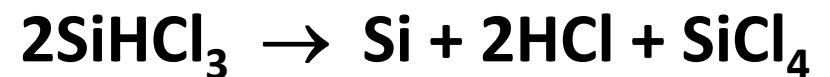
($T > 1500^\circ\text{C}$)

($T > 1780^\circ\text{C}$)

COLUMNAS DE DESTILACIÓN DEL TRICLOROSILANO

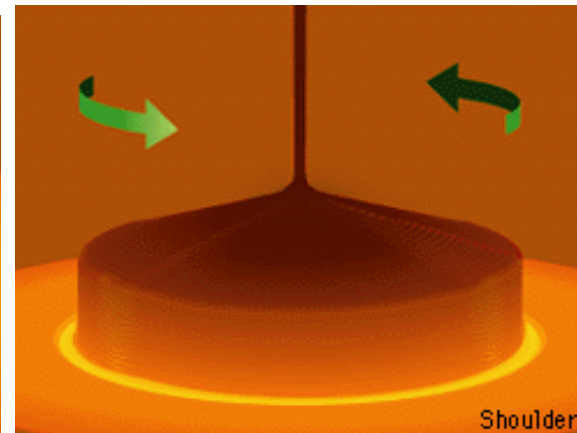
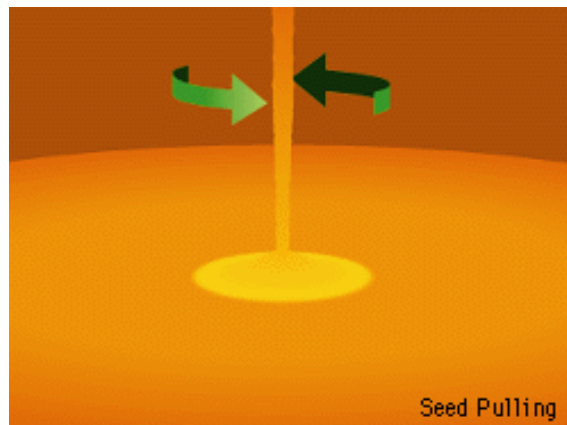
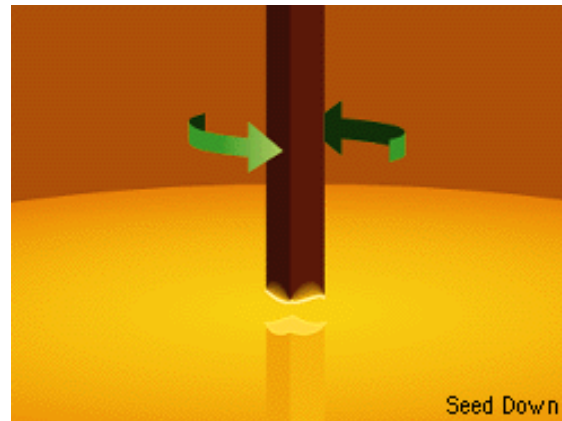


Depósito de Si policristalino a partir del SiHCl_3 a alta temperatura:

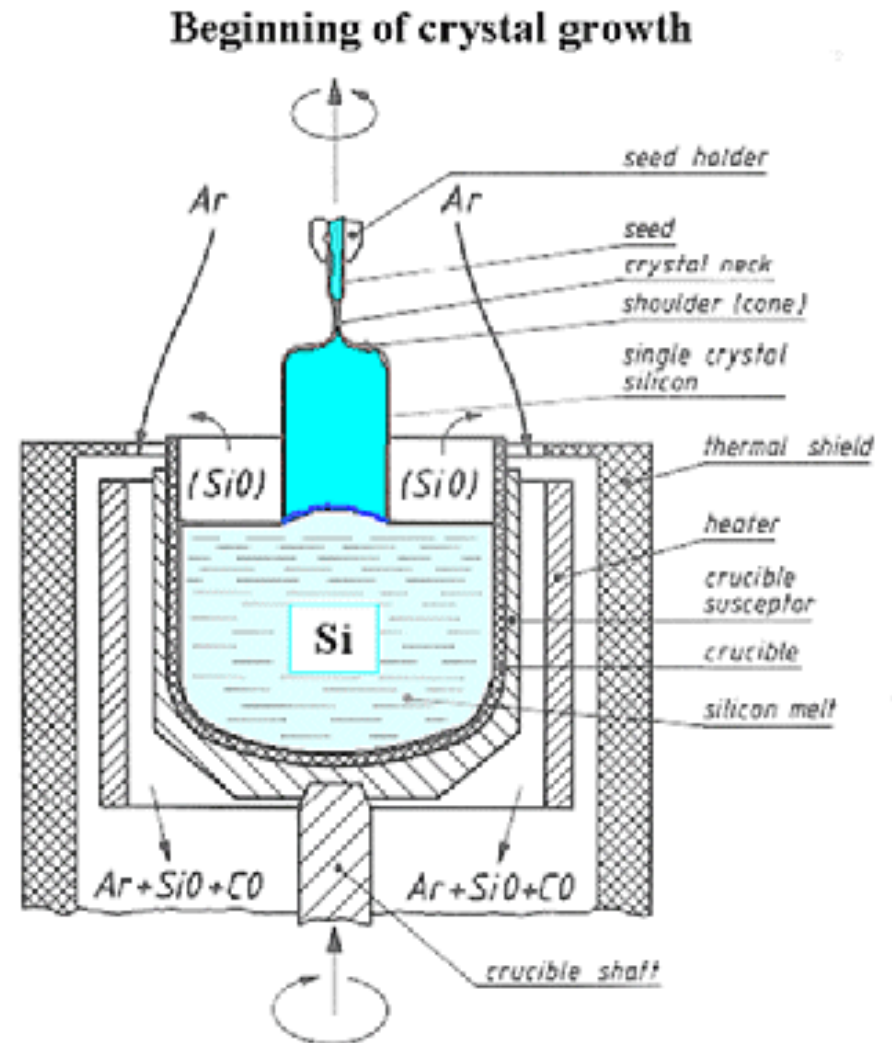
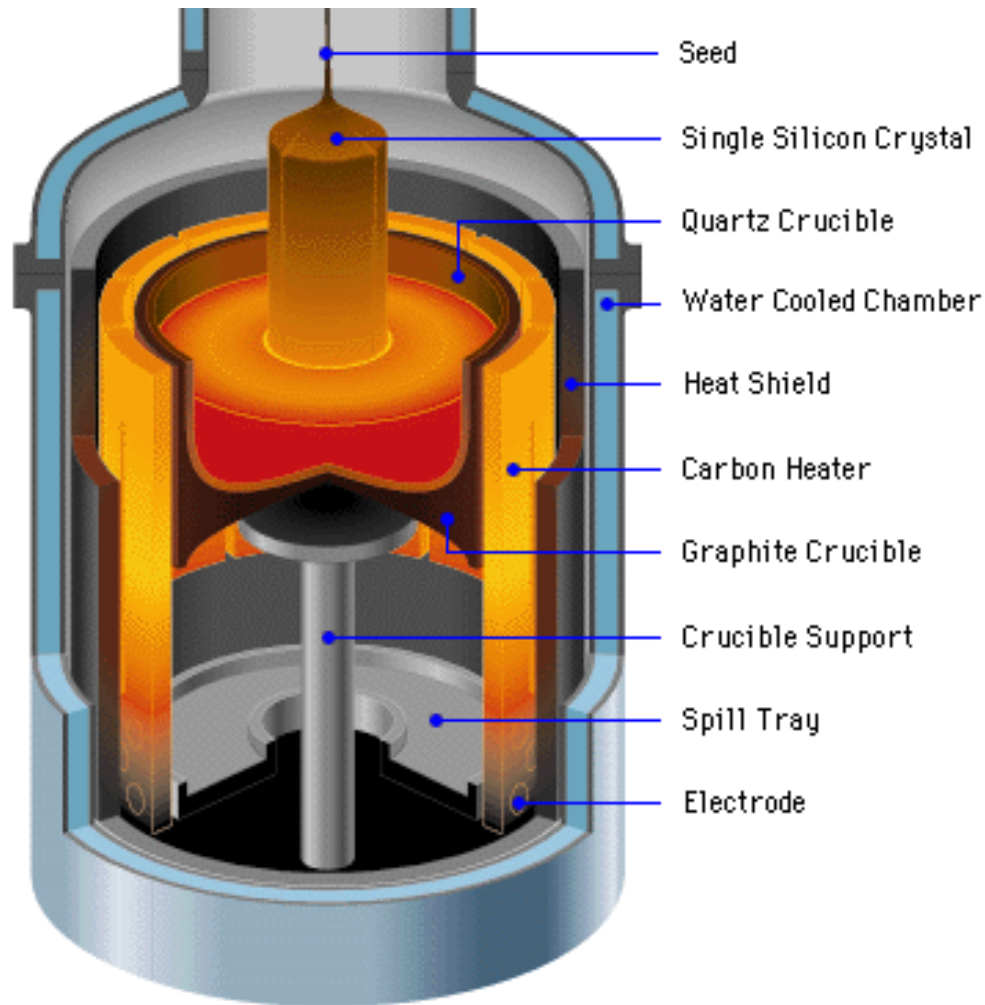


(proceso Siemens de CVD en una varilla/semilla de Si policristalino)

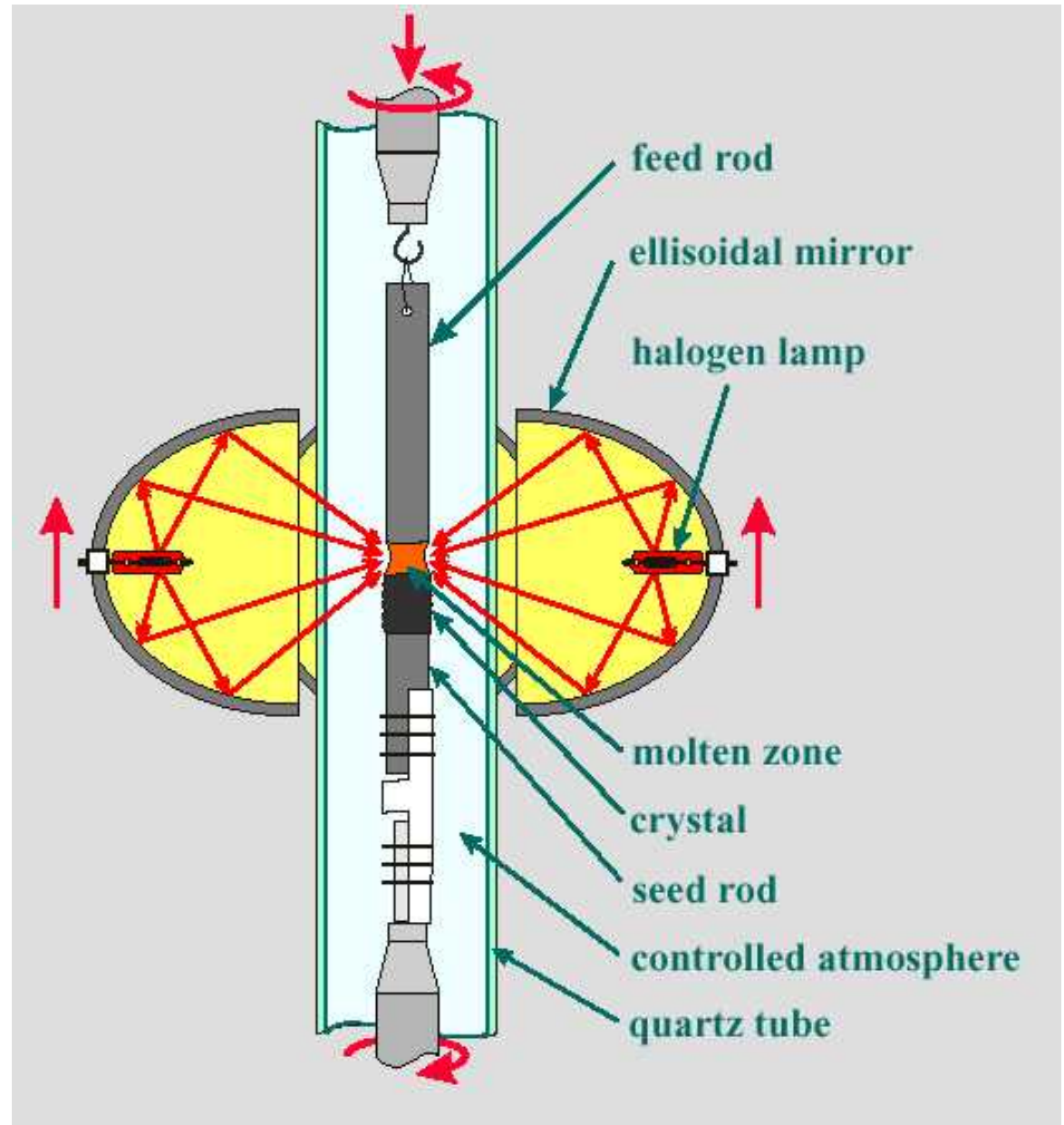
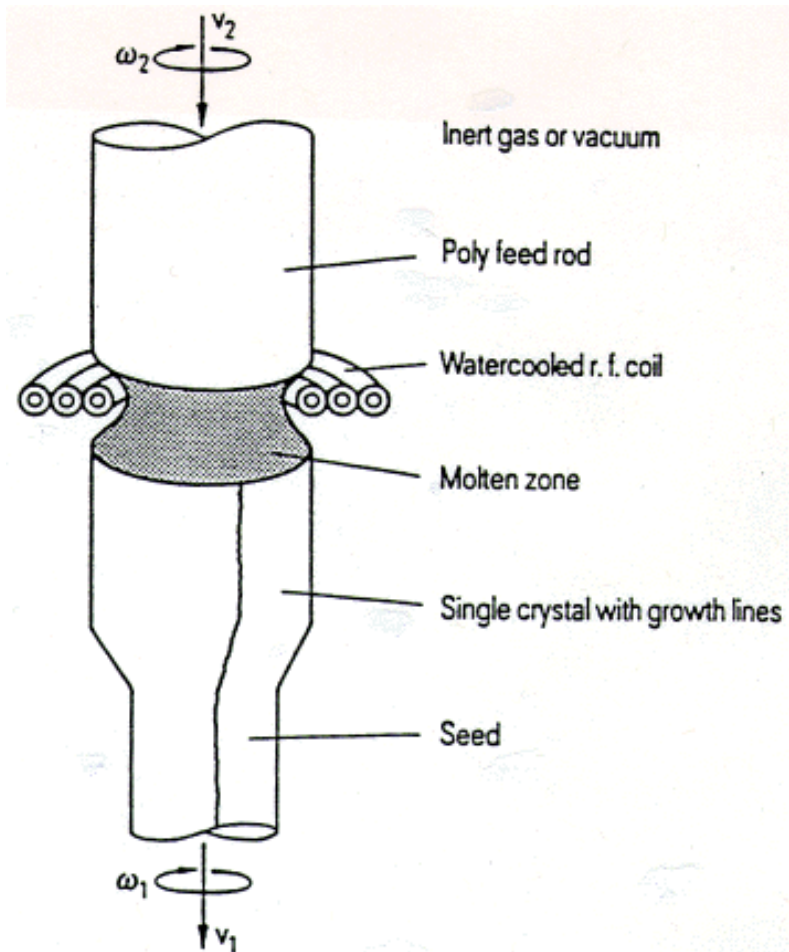
MÉTODO DE CZOCHRALSKI



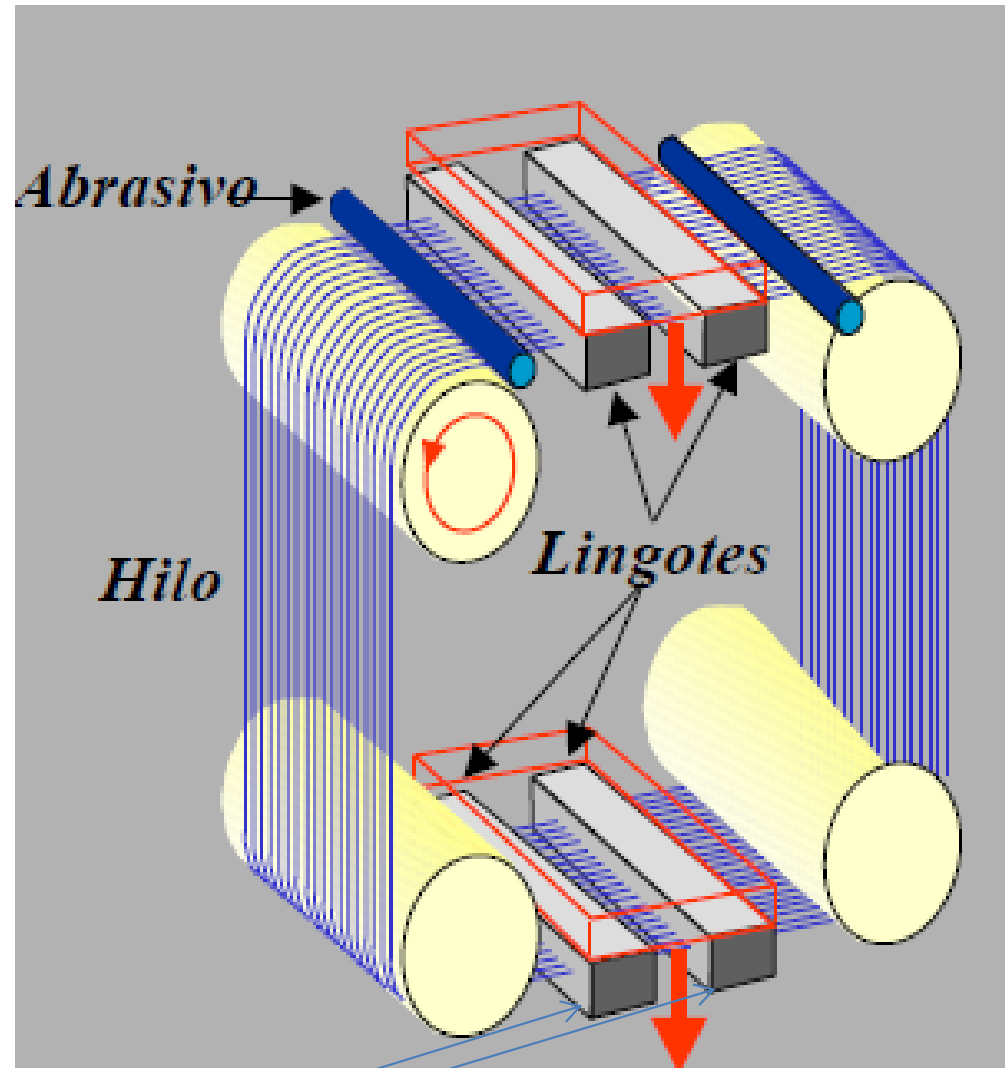
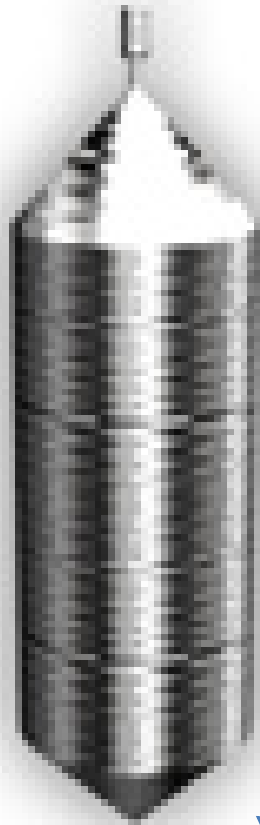
MÉTODO DE CZOCHRALSKI



PURIFICACIÓN POR ZONAS

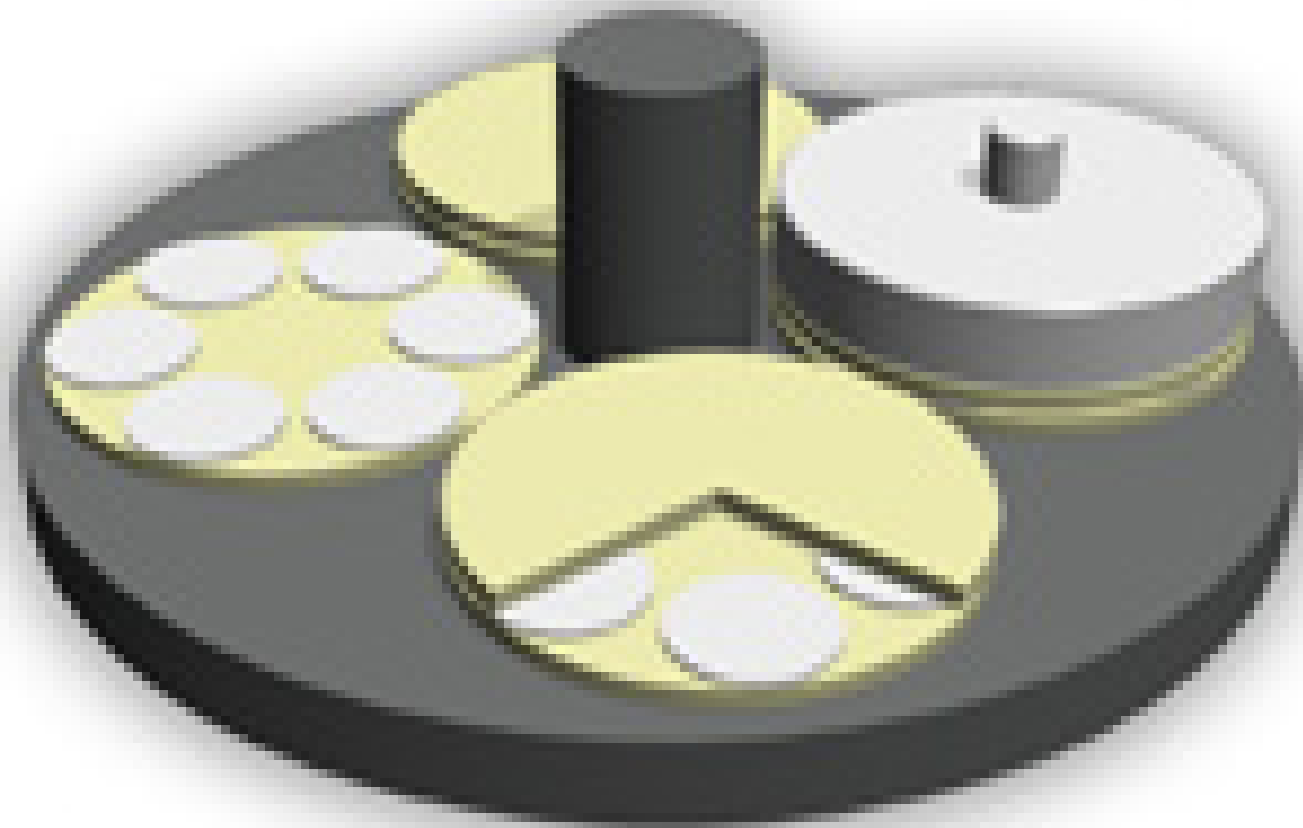


CORTE DE OBLEAS



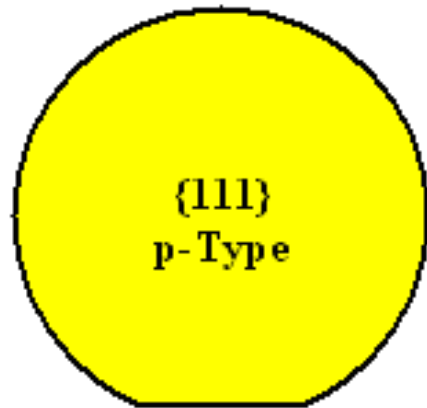
lingotes

PULIDO DE OBLEAS

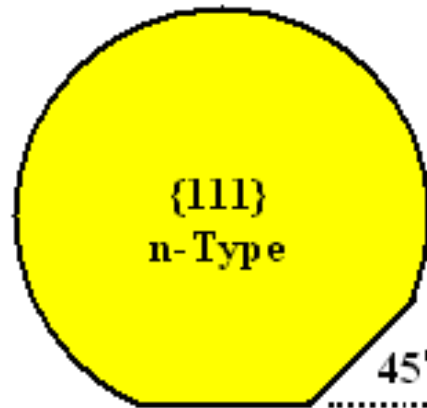


Adelgazamiento - pulido mecánico - pulido químico

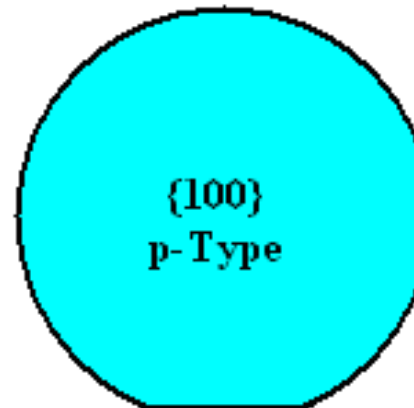
ORIENTACIONES



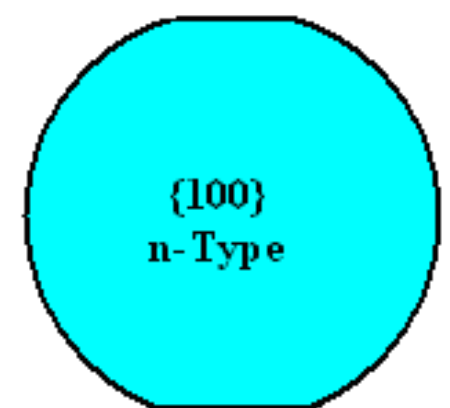
$\langle 110 \rangle$



$\langle 110 \rangle$



$\langle 110 \rangle$



$\langle 110 \rangle$

TAMAÑO DE OBLEAS

