uc3m Universidad Carlos III de Madrid

Grado en Ingeniería Informática 2018-2019

Apuntes

Física

Jorge Rodríguez Fraile¹



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada

ÍNDICE GENERAL

I Tema 1. Conceptos de cinemática, dinámica y energía	3
II Tema 2. Atomos y solidos	5
III Tema 3. Coulomb	43
IV Tema 4. Ley de Gauss	45
V Tema 5. Potencial eléctrico	47
VI Tema 6. Conductores	49
VII Tema 7. Condensadores. Dieléctricos y energía	51
VIII Tema 8. Corriente eléctrica	53
IX Tema 9. Fuerzas Magnéticas y Campos magnéticos	69
X Tema 10. Electrónica física dispositivos semiconductores	71

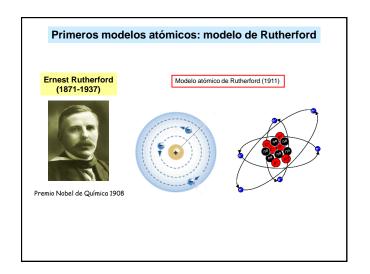
Parte I

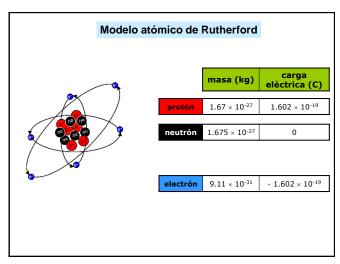
Tema 1. Conceptos de cinemática, dinámica y energía

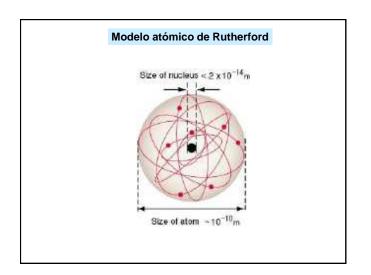
Parte II Tema 2. Atomos y solidos

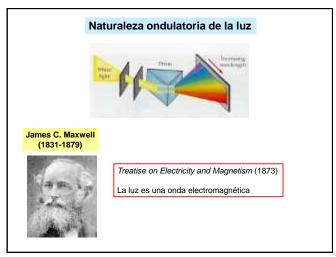


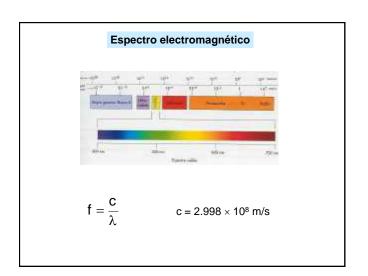
Fuerzas fundamentales					
Interacción	Alcance	Propiedad	Intensidad relativa		
Gravitatoria	largo alcance	masa	1		
Electromagnética	largo alcance	carga eléctrica	10 ³⁶		
Nuclear fuerte	corto alcance	carga de color	1038		
Nuclear débil	corto alcance	carga de sabor	10 ²⁵		











Naturaleza corpuscular de la luz

Albert Einstein (1879-1955)



Premio Nobel de Física 1921

Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de la luz (1905)

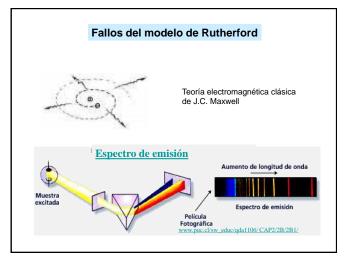
Explica el efecto fotoeléctrico suponiendo la luz como un paquete de partículas de energía

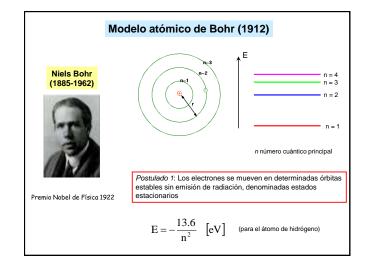
Concepto de fotón: se recupera los principios de la teorica corpuscular

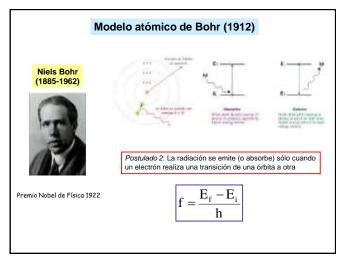
 $\mathsf{E} = \mathsf{hf}$

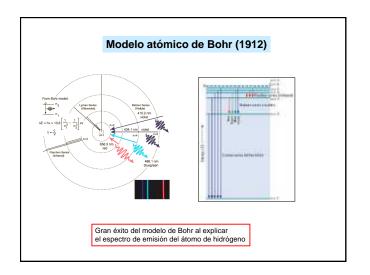
 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ constante de Planck

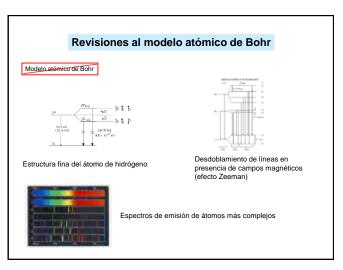












Revisiones al modelo atómico de Bohr

Sommerfeld extendió los resultados del modelo de Bohr para tener en cuenta órbitas elípticas (y no sólo circulares)

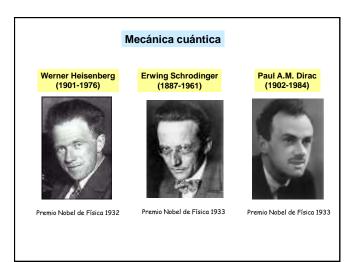
Mantiene el número cuántico n (número cuántico principal) Añade el número cuántico ℓ (número cuántico orbital) $\ell=0,\,1,\,....,\,n$ -1

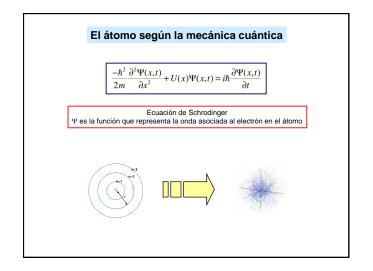
Para explicar el comportamiento de un átomo en presencia de un campo magnético (efecto Zeeman) es necesario añadir el número cuántico m_{ℓ} (número cuántico magnético) $m_{\ell} = -\ell$,....,0,...,+ ℓ

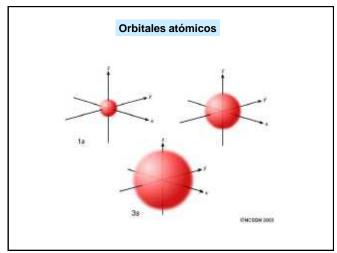
Para explicar la estructura fina de las líneas, es necesario añadir el número cuántico m_s (número cuántico de espín) $m_s = -1/2 \; , + 1/2$

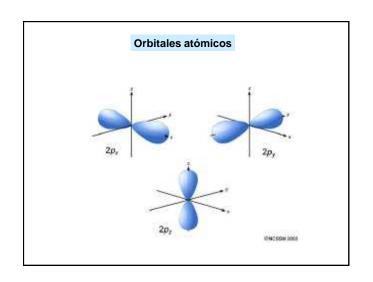
Revisiones al modelo atómico de Bohr

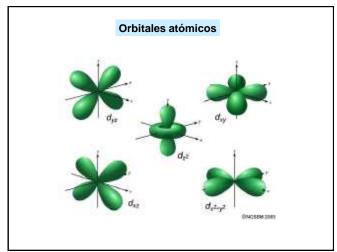
Las propiedades de un electrón en un átomo quedan totalmente determinadas por sus 4 números cuánticos











Principio de exclusión de Pauli (1925)

Wolfgang Pauli (1900-1958)



En un átomo no puede haber dos electrones con los cuatro números cuánticos iguales

Clasificando átomos

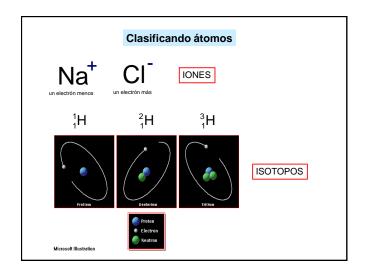
Número atómico Z = nº protones

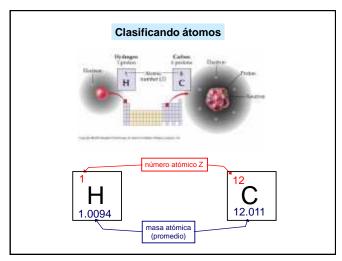
Cada elemento tiene un único número atómico

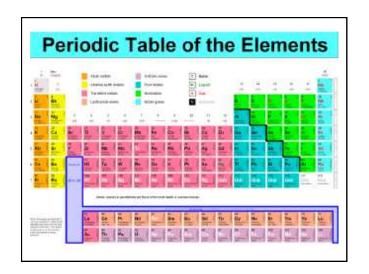
Número másico A = nº protones + nº neutrones

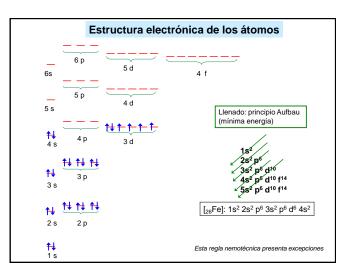
Los isótopos de un elemento tienen el mismo Z pero diferente A

Masa atómica: u.m.a. = 1/12 de la masa del núcleo del ₁₂C 1 u.m.a. ≈ masa de un protón ≈ masa de un neutrón









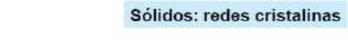


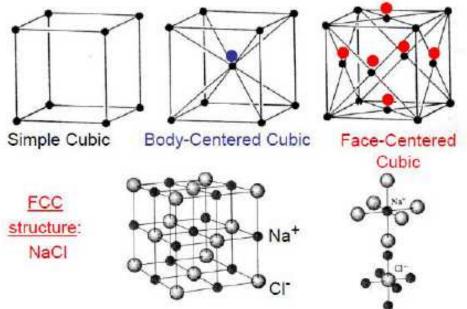
Introducción a la materia condensada



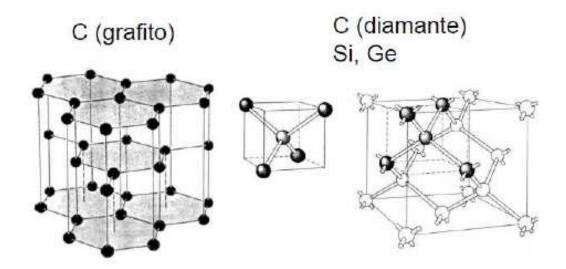
Lingotes de silicio y cortes en obleas

Física - Grado en Ingeniería Informática



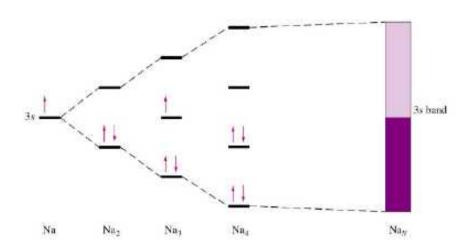


Sólidos: redes cristalinas



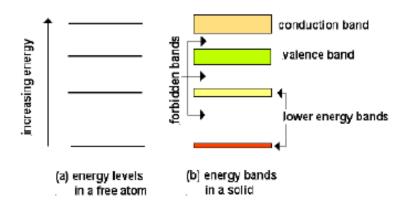
- -La teoría de bandas está basada en la mecánica cuántica y procede de la teoría de los orbitales moleculares
- -En esta teoría, se considera el enlace metálico como un caso extremo del enlace covalente, en el que los electrones de valencia son compartidos de forma conjunta y simultánea por todos los cationes.

Diagrama de bandas

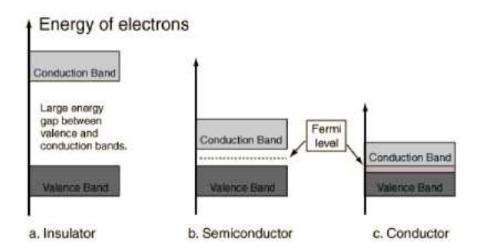


-Desaparecen los orbitales atómicos por combinaciónes entre ellos y se forman orbitales moleculares con energías muy parecidas, tan próximas entre ellas que todos en conjunto ocupan una franja denominada "banda de energía" (se obtienen tantos orbitales moleculares como orbitales atómicos se combinen).

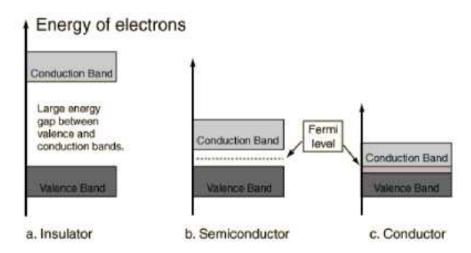
Diagrama de bandas



La banda ocupada por los orbitales moleculares con los electrones de valencia se llama banda de valencia, mientras que la banda formada por los orbitales moleculares vacíos se llama banda de conducción.

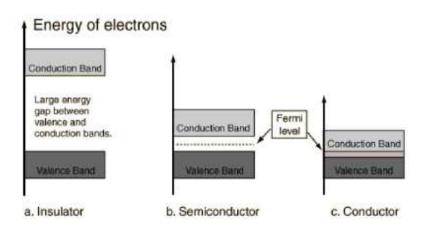


El nivel de Fermi representa el nivel de energía por debajo del cual todos los niveles están ocupados por electrones a una temperatura de 0 K. Este nivel determina las propiedades de conducción de un material



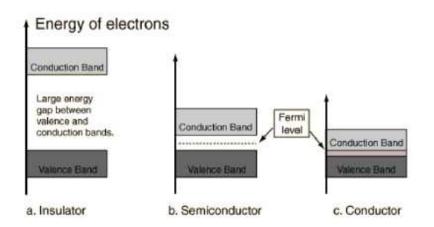
AISLANTES O DIELÉCTRICOS:

- A 0 K tienen la banda de valencia completamente llena mientras que la de conducción está vacía.
- La banda prohibida (gap) tiene un ancho del orden de 10 eV. El nivel de Fermi se encuentra en medio de la banda de la banda prohibida.



SEMICONDUCTORES:

- A 0 K todos los electrones que ocupan los niveles más altos de energía se encuentran en la banda de valencia: la banda de valencia esta llena y la de conducción vacía.
- -Como una banda llena no contribuye al mecanismo de conducción (y una vacía tampoco), los semiconductores se comportan como un aislante a 0 K existen pocos electrones excitados ocupando los niveles de la banda de conducción.
- La banda prohibida (gap) tiene un ancho del orden de I eV. El nivel de Fermi se encuentra en medio de la banda de la banda prohibida.

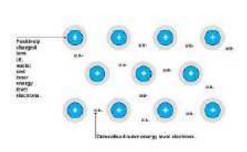


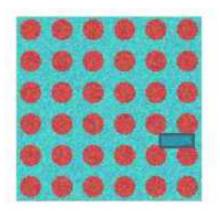
CONDUCTORES:

- No existe "gap" entra la banda de valencia y la de conducción.
- Por ello, los electrones necesitan poca energía para pasar de la banda de valencia a la de conducción.
- -Al aplicar un campo eléctrico o aumentar la temperatura del conductor los electrones adquieren la suficiente energía para pasar a la banda de conducción.
- Por ello, el nivel de Fermi se encuentra en la banda de conducción
- -En general, un buen conductor se caracteriza por tener una densidad alta de portadores de carga (electrones) y muchos niveles ocupados en la banda de conducción.

Propiedades de conducción eléctrica en metales

Enlace metálico





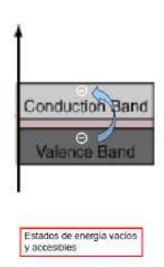
Movimiento de portadores de carga (electrones libres)

 $n \approx 10^{22} \text{ portadores/cm}^3$

Un metal se caracteriza por tener una estructura cristalina en la que los cationes (iones positivos) están rodeados de electrones libre que se mueven por todo el metal.

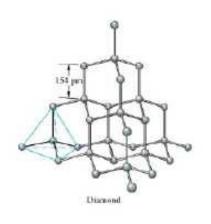
¿Por qué el Na en contacto con el agua produce reacciones "explosivas"?

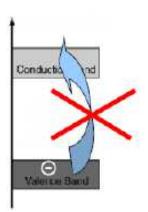
Propiedades de conducción eléctrica en metales



- -Al aplicar un campo eléctrico o aumentar la temperatura del conductor los electrones adquieren la suficiente energía para pasar a la banda de conducción.
- -Un aumento de la temperatura produce un incremento de la agitación térmica de los electrones y de los cationes de la red (iones positivos), aumentando los choques entre estos y aumentando la resistividad eléctrica del material.
- -En general, un buen conductor se caracteriza por tener una alta densidad de portadores de carga y muchos niveles ocupados en la banda de conducción.

Propiedades de conducción eléctrica en aislantes

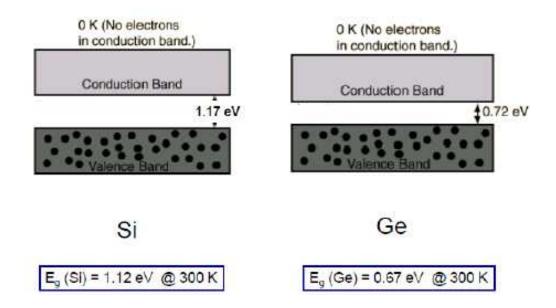




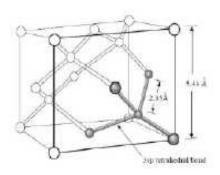
No hay portadores de carga libres

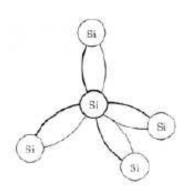
Un aislante se caracteriza por una densidad casi nula de portadores y una banda de conducción vacía.

Diagrama de bandas: gap en Si y Ge



Semiconductores: silicio

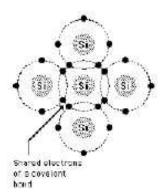


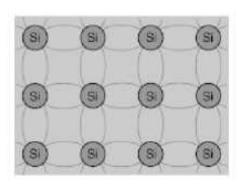


Cada átomo de Si (silicio) está unido a otros tres más mediante enlace covalentes sencillos. Cada enlace covalente se debe a la compartición de un par de electrones para, así, alcanzar el octeto (ocho electrones de valencia)

Semiconductores: silicio

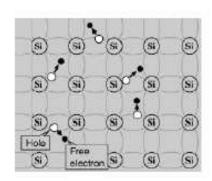
 $[_{14}Si]:1s^2 2s^2p^6 3s^2p^2$

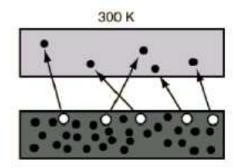




Cada átomo de Si (silicio) está unido a otros cuatro más mediante enlace covalentes sencillos. Cada enlace covalente se debe a la compartición de un par de electrones para, así, alcanzar el octeto (ocho electrones de valencia)

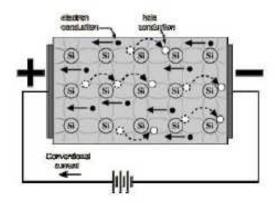
Generación de pares electrón-hueco





- -Los semiconductores intrínsecos son estructuras cristalinas sin átomos extraños.
- -En un semiconductor intrínseco a una temperatura mayor de 0 K, la excitación térmica produce electrones y huecos a pares, con el electrón en la banda de conducción y el hueco en la de valencia (se comporta como una carga positiva). Es decir, la conductividad eléctrica del semiconductor aumenta con la temperatura.

Conducción en un semiconductor intrinseco

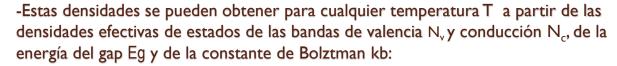


Cada ion positivo de la red puede recombinarse con otro electrón de valencia de otro átomo neutro vecino. Este último se convertirá en otro ion positivo y resultado global es equivalente a un movimiento de una carga positiva (hueco) en un sentido.

El movimiento de huecos produce una corriente de cargas de signo positivo de la misma forma que el movimiento de los electrones libres produce una corriente de cargas negativas.

¿Cuáles se moverán más rápidos, los electrones o los huecos?







La expresión anterior se deduce a partir de una relación que se cumple en todo semiconductor a una temperatura dada:

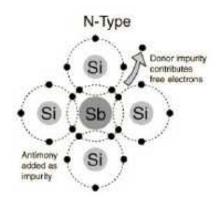
$$n_i^2 = n_e n_h$$

NO OLVIDES QUE:

« Cuanto mayor sea el ancho de la banda prohibida (gap), menores serán los valores de las densidades de huecos y electrones»

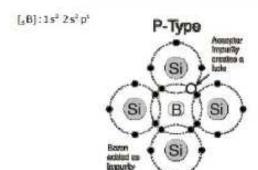
Semiconductor extrinseco: tipo N

[stSb]:1s2 2s2p6 3s2p6d10 4s2p6d10 5s2p3



- -Un semiconductor extrínseco tipo n se obtiene a partir de un semiconductor intrínseco (por ejemplo, Si) que se ha dopado con impurezas (átomos de Sb, por ejemplo) que donan electrones.
- -Como resultado existe una densidad mayoritaria de electrones con energías en la banda de conducción
- -Las impurezas donadoras elevan el nivel de Fermi con respecto a su posición en el conductor intrínseco

Semiconductor extrinseco: tipo P



- ✓ Un semiconductor extrínseco tipo p se obtiene a partir de un semiconductor intrínseco (por ejemplo, Si) que se ha dopado con impurezas (átomos de B, por ejemplo) que donan huecos a la red.
- ✓ En este caso, un átomo de B (con 3 electrones de valencia) se une a cuatro de Si.
- ✓ Se deduce que el átomo de B aporta una deficiencia de un electrón o aporta un hueco a la red cristalina.
- ✓ Como resultado existe una densidad mayoritaria de huecos o portadores positivos en la banda de valencia.
- ✓ El cuarto electrón que necesita el B para completar los 4 enlaces aparecerá de un enlace vecino de Si, y que al pasar a completar la capa externa del B, deja un hueco con esa energía en la posición que ocupaba el electrón. Repitiendo ese proceso el hueco se mueve a través de la red.
- ✓ Las impurezas donadoras bajan el nivel de Fermi con respecto a su posición en el conductor intrínseco.

No debes olvidar que:

«La habilidad para mover el nivel de Fermi en un semiconductor intrínseco variando la concentración de impurezas, permite cambiar las propiedades eléctricas del semiconductor, cuestión fundamental para construir dispositivos semiconductores»

Parte III

Tema 3. Coulomb

Parte IV Tema 4. Ley de Gauss

Parte V

Tema 5. Potencial eléctrico

Parte VI

Tema 6. Conductores

Parte VII

Tema 7. Condensadores. Dieléctricos y energía

Parte VIII

Tema 8. Corriente eléctrica



Física

Tema 8: Corriente eléctrica

Ángel de Andrea González

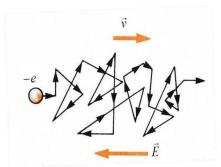
Departamento de Física. Universidad Carlos III

aandrea@fis.uc3m.es



Concepto de corriente eléctrica

❖ Bajo la influencia de un campo eléctrico, los electrones libres del metal experimentan una fuerza de sentido opuesto al del campo, y son acelerados en el sentido de esta fuerza.

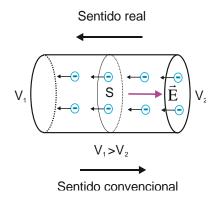


Los choques con los cationes frenan pronto a los electrones libres o los detienen, después de lo cual vuelven a ser acelerados, y así sucesivamente. El movimiento electrónico tiene una velocidad media en sentido opuesto al campo.



Se puede considerar que los electrones se mueven uniformemente con esta velocidad media.

Intensidad de corriente eléctrica



Se define la intensidad de corriente eléctrica como la carga que atraviesa perpendicularmente la sección de un conductor, por unidad de tiempo

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Se puede demostrar que I = nevS

siendo n el número de electrones por unidad de volumen, e la carga en valor absoluto de cada uno y v su velocidad. La velocidad de los electrones en el metal $10^{-4} m\ s^{-1}$

Densidad de corriente eléctrica

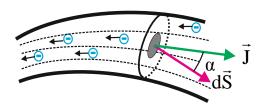
Recuerda que la unidad de la intensidad de corriente en el SI es el amperio 1 A=1 C/1s.

Las intensidades pequeñas se expresan generalmente en miliamperios (mA), o en microamperio (μA)

Suponiendo que por un conductor circula una corriente homogénea, se define la densidad de corriente, J

$$J = \frac{I}{S} = nev$$

Esta magnitud vectorial se mide en amperio por metro cuadrado $(A \text{ m}^{-2})$



¿A qué velocidad viaja la corriente eléctrica en un conductor?

i 300 000 km/s (velocidad de la luz en el vacío)!

Intensidad producida por diferentes tipos de cargas

Cuando circula una corriente por un conductor en el cual existen cargas libres de ambos signos, como en el caso de un electrólito, gas...las cargas negativas cruzan la sección en un sentido, y las cargas positivas en el otro.

la intensidad de corriente $I = S \sum_{i=1}^{N} n_i q_i v_i$.

Todos los productos nqv tendrán el mismo signo, puesto que las cargas de signo contrario se moverán en sentidos opuestos.

Observa que...

Para crear una pequeña sensación de dolor en el cuerpo humano se necesita una intensidad de corriente entre 5 mA y $10~\mathrm{mA}$. Una intensidad de corriente de $70~\mathrm{mA}$ puede matar a una persona.

...entonces, ¿por qué es posible sobrevivir en ciertos casos a la caída de un rayo?

Ley de Ohm (1827)

En los conductores lineales e isótropos la densidad de corriente es proporcional a la intensidad de campo eléctrico

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Siendo σ una constante característica de cada sustancia que se denomina conductividad; su valor, para un mismo conductor, varía con las condiciones físicas, especialmente con la temperatura. La unidad de la conductividad en el SI es $S\ m^{-1}$, donde S es el símbolo del siemens.

Para un conductor lineal, isótropo y homogéneo (como por ejemplo, un conductor filiforme), la ley de Ohm es más común expresarla mediante una caída de potencial a lo largo de la longitud l de sección S.



Georg Simon Ohm (1789-1854)



$$I = \left(V_1 - V_2\right) / R$$

Fórmula de Pouillet

¿Constante de proporcionalidad R?

 $R=rac{1}{\sigma}rac{l}{S}$. La inversa de σ , se denomina *resistividad* ho o resistencia específica, de modo que la resistencia también puede escribirse de esta forma $R=
horac{l}{S}$, conocida como fórmula de Pouillet.

¿Unidad de resistencia eléctrica R en el SI?

A partir de las ecuaciones anteriores se puede definir la unidad de resistencia eléctrica denominada ohmio (Ω) , $1~\Omega=1~V/1~A$. El ohmio es la resistencia de un conductor que teniendo aplicada entre sus extremos una ddp de 1 voltio está recorrido por una corriente de 1 amperio.

¿Unidad de resistividad eléctrica el SI?

La unidad de conductancia 1/R se denomina \emph{mho} el (Ω^{-1}) o $\emph{siemens}$ (S): $1 \text{ S} = 1 \ \Omega^{-1}$. La unidad de la $\emph{resistividad ser\'a}$ el Ω m . La resistividad de los mejores conductores como el cobre y el aluminio es del orden $10^{-8} \ \Omega$ m a temperatura ambiente.

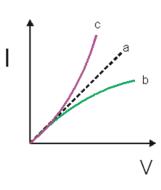
Material	Resistividad
(a 20 °C-25 °C)	(Ω·m x10 ⁻⁸)
Plata	1,55
Cobre	1,71
Oro	2,22
Aluminio	2,82
Wolframio	5,65
Níquel	6,40
Hierro	9,71
Platino	10,60
Estaño	11,50
Acero inoxidable	72,00
Grafito	60,00

Variaciones de la resistencia de un conductor

La resistividad es función lineal de la temperatura, y para temperaturas no muy elevadas

$$\rho = \rho_o(1 + \alpha t)$$

Que indica que la resistividad es función lineal de la temperatura; α es un coeficiente que nos da la variación de ρ con la temperatura, y sus dimensiones son °C . En los metales, $\alpha>0$, lo cual quiere decir que su resistividad aumenta con la temperatura; en cambio, en algunos cuerpos no metálicos, tales como el carbón, el coeficiente α es negativo.



...entonces, ¿es la ley de Ohm una verdadera ley?



iiiNO!!!

Superconductividad

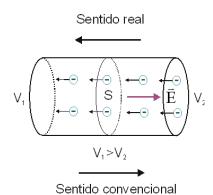
¿Existen materiales con resistividad nula?



En algunos metales se verifica que a una determinada temperatura muy baja, por debajo de una temperatura crítica T_c y por debajo de un campo magnético aplicado (campo crítico B_c) , la resistencia salta súbitamente un valor finito (muy pequeño) a cero. Se dice entonces que los metales han adquirido el estado superconductor. Kamerlingh-Onnes observó en 1911 esta superconductividad en cinco metales (plomo, mercurio, estaño, indio y talio). La temperatura a la cual tiene lugar el salto se encuentra entre 2,5 K (talio) y 7,2 K (plomo). Posteriormente se ha visto que algunos otros metales (entre ellos, aluminio, tantalo, torio) son también superconductores; últimamente se han encontrado que igualmente lo son algunas aleaciones. En otros metales, por el contrario, no se ha llegado a encontrar, ni aún a las temperaturas muy bajas, ese salto de la conductividad.

Potencia de una corriente eléctrica

Consideremos dos secciones 1 y 2 de un conductor recorrido por una corriente.



El trabajo realizado por el campo eléctrico que produce la corriente en la unidad de tiempo, se denomina potencia eléctrica

$$P = \frac{\delta W}{dt} = (V_1 - V_2)I$$

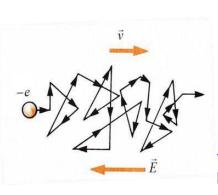
cuya unidad en el SI es el vatio (W)

Observa que...

No debe confundirse el kilovatio (kW), unidad de potencia, con el kilovatio hora (kWh), que es unidad de energía, equivalente a la suministrada por una corriente cuya potencia es de un kilovatio durante una hora

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \text{W} \cdot 3600 \text{ s} = 3.6 \cdot 10^6 \text{J}$$

El efecto Joule (1843)



Debido al trabajo hecho por el campo, en los metales, los electrones adquieren una adicional energía cinética que invierten en excitar las vibraciones de la red a través de colisiones con los cationes.



Esto hace que aumente la energía interna (energía térmica) del conductor, y en consecuencia que se produzca una elevación de temperatura en éste.





Se produce una transferencia de energía en forma de calor desde el conductor al medio ambiente.

- \triangleright La potencia calorífica disipada al medio ambiente será es $P = (V_1 V_2)I$
- ightharpoonup De acuerdo con la Ley de Ohm $(V_1-V_2)=I$ R
- > Se obtiene $P = I^2R$ Ley de Joule

Aplicaciones del efecto Joule

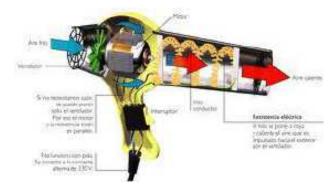
✓ Alumbrado, calefactores, secadores...



✓ Fusibles (corta-circuitos), o resistencias de seguridad, que se tunden automáticamente. Cuando la corriente rebasa un valor umbral, el hilo se funde quedando interrumpida la corriente.



Preguntas de desafío





- > ¿Por qué el filamento de una bombilla de incandescencia tiene una longitud de medio metro?
- > ¿ Qué tiene mayor resistencia una bombilla o una estufa?
- > Un hornillo eléctrico se funde, y al arreglarlo se pierde un trozo del hilo de la resistencia. Al conectarlo de nuevo, ¿darás más o menos calor que antes?
- > ¿Por qué las bombillas de incandescencia estandar pierden luminosidad al cabo del tiempo?

Incovenientes del efecto Joule

Observa que...



Los ordenadores disponen de ventiladores con objeto de disipar energía en forma de calor producida por efecto Joule. No obstante, es de común uso en los ordenadores portátiles las bases refrigeradoras que suelen incluir dos ventiladores interiores alimentados por USB.



En las grandes instalaciones es preciso poner los alambres conductores lo suficientemente gruesos para que el calor desarrollado por efecto Joule no rebase cierto límite. Esto tiene por objeto el evitar una excesiva pérdida de energía y el prevenir los riesgos de incendio.

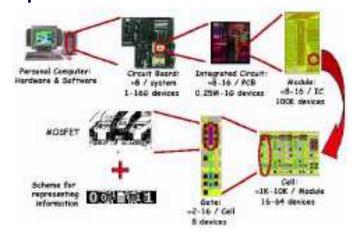
Parte IX

Tema 9. Fuerzas Magnéticas y Campos magnéticos

Parte X

Tema 10. Electrónica física dispositivos semiconductores

Introducción a los dispositivos semiconductores



Grado en Ingeniería Informática Curso 2016/17

Un ordenador manipula y almacena información

La información viene representada de manera digital, en forma de voltajes

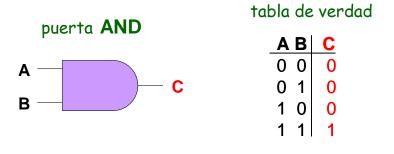
El formato digital es sencillo de implementar y evita ambigüedades y errores

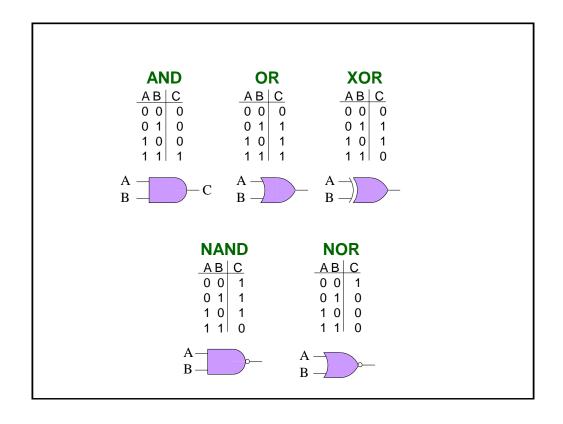
- lógica CMOS 5V
- una señal por debajo de 1.5 V es identificada como O
- una señal por encima de 3.5 V es identificada como 1

La manipulación de la información se realiza utilizando unas reglas que definen la lógica.

Todas las operaciones lógicas se van a realizar electrónicamente utilizando puertas lógicas

Puertas lógicas: de acuerdo a las entradas, se obtiene una salida digital predecible





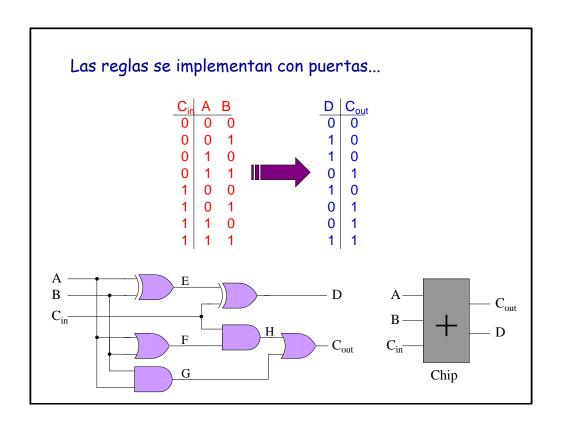
Un ejemplo:suma de números en binario

$$00101110 = 46$$
+ $01001101 = 77$

$$01111011 = 123$$

Las reglas...

```
0 + 0 = 0; 0 + 1 = 1 + 0 = 1; 1 + 1 = 10 (2): (0, se acarrea 1); 1 + 1 + (1 \text{ acarreo}) = 11 (3): (1, se acarrea 1)
```



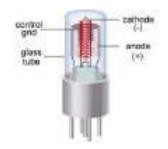
... y las puertas lógicas se construyen con transistores

Transistor (TRANSfer reSISTOR)

como amplificador

como interruptor (on/off)

Precedentes: las válvulas de vacío







ENIAC (1946)

Ordenador totalmente digital
Desarrollada en la univ. Pennsylvania
Ocupaba 167 m² y pesaba 27 tons
19000 válvulas de vacío
1500 relés
70000 resistencias
10000 condensadores
6000 interruptores (manuales)
Desarrollada por la US Navy para
cálculos balísticos





AT&T Bell Labs, 1947

John Bardeen, Willian Shockley y Walter Brattain inventan el transistor

Premio Nobel de Física en 1956



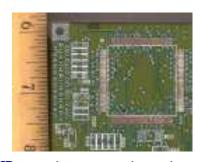


Texas Instruments, 1958

Jack Kilby inventa el CI monolítico (microchip)

(flip-flop de Ge con interconexiones de Au)

Premio Nobel de Física en 2000



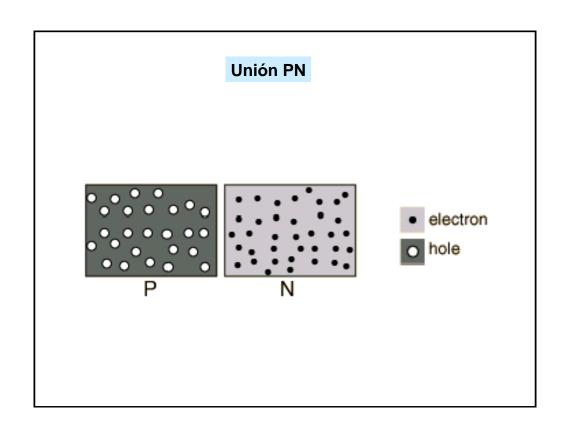
CI: transistores, resistencias y condensadores integrados

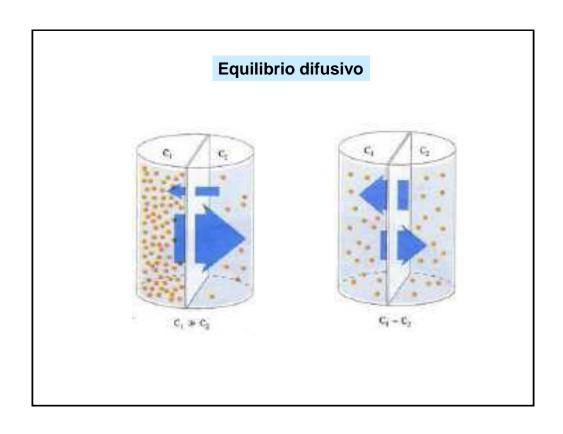


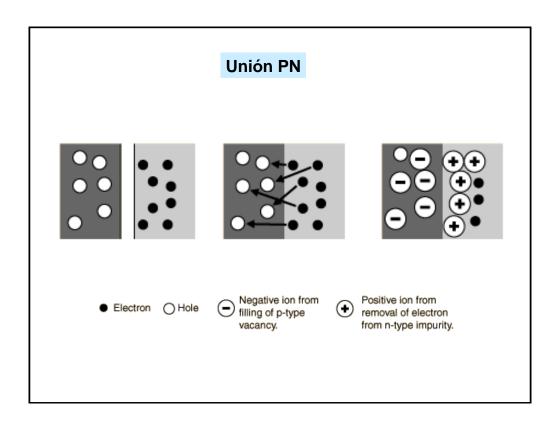
1961: TI y Fairchild fabrican el primer IC de Si (flip-flop dual con 4 transistores)

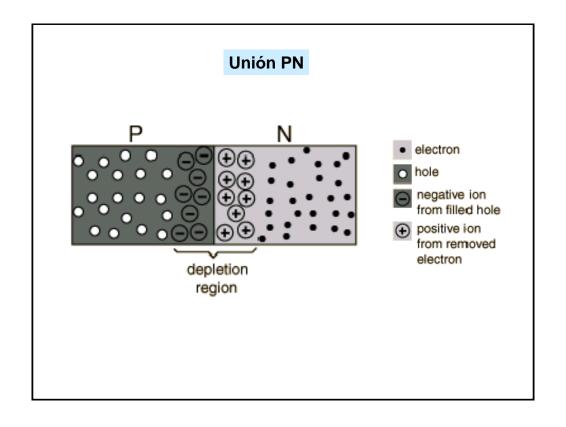


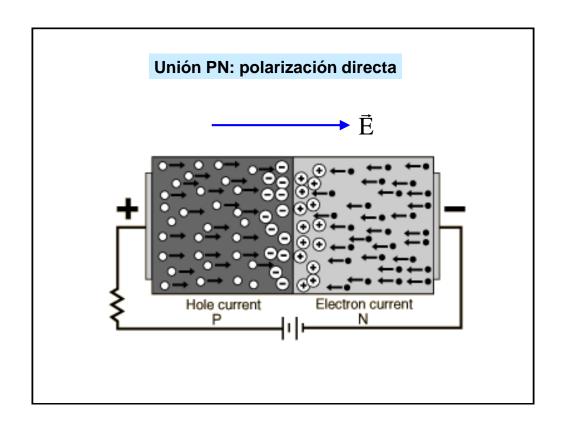
1968: Robert Noyce y Gordon Moore fundan INTegrated ELectronics 1971: Intel fabrica el primer microprocesador, diseñado por Ted Hoff

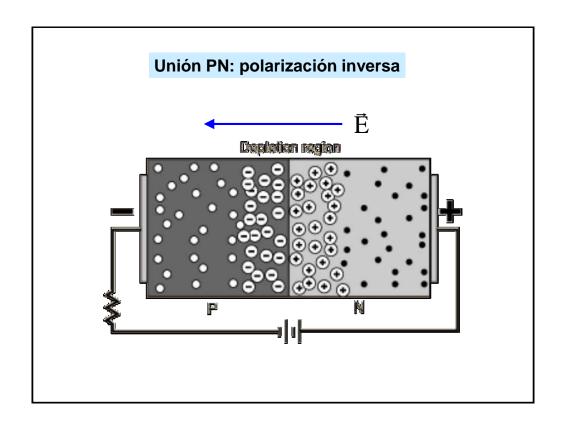


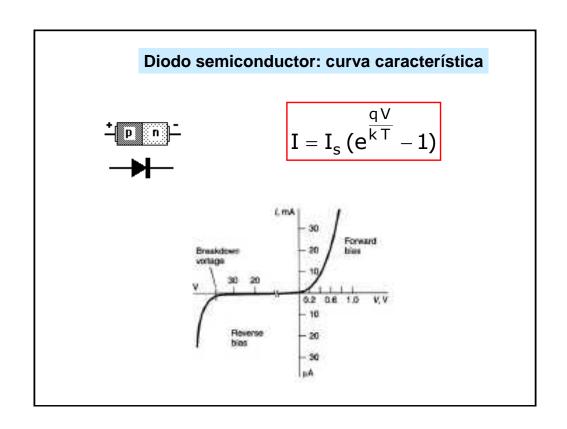










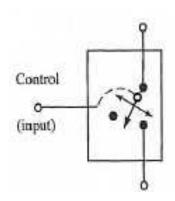


Transistores

Dispositivos con tres terminales.

La corriente o voltaje en uno de ellos (input) controla el flujo de corriente entre los dos otros dos

Funcionan como amplificadores y como interruptores



Transistor de efecto campo (Field Effect Transistor – FET)

- Impedancia del circuito de entrada alta
- Tres terminales: fuente, drenaje y puerta
- Dispositivo controlado por voltaje (y no por corriente) corriente determinada por un proceso de deriva asociado al campo eléctrico controlado por el voltaje aplicado a la puerta
- > Flujo de portadores de un solo tipo
- Dos tipos

JFET (transistor de efecto campo de unión)

MOSFET (transistor de efecto campo metal-óxido-semiconductor)

