

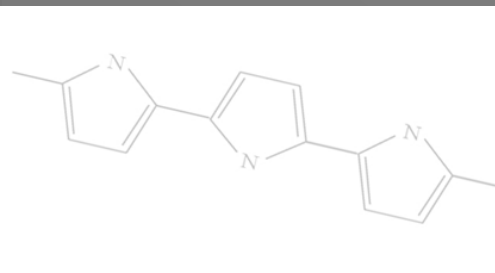


Semiconductores Orgánicos

Programa Educativo: Ingeniería en Electrónica

Física de Semiconductores
Clave: L41115

Facultad de Ingeniería
Elaborado por:
Dra. en C. Laura Luz Valero Conzuelo



2016

FICHA DE IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL DIDÁCTICO

- ◉ Espacio Académico.- Facultad de Ingeniería
- ◉ Tipo de material.- Presentación de diapositivas
- ◉ Título del material.- **Semiconductores Orgánicos**
- ◉ Programa educativo al que se vincula.- Plan de estudios de Ingeniería en Electrónica
- ◉ Unidad de Aprendizaje.- Física de Semiconductores

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA

Alumnos del cuarto semestre de la Licenciatura de
Ingeniería en Electrónica

Horas teóricas 3 Práctica 1 Créditos 7

Periodos Primavera y Otoño
(semestre escolar A y B)

Presentación

- El presente material sirve como apoyo a la unida de aprendizaje de Física de Semiconductores, Unidad III.
- Objetivo:
Que el alumno aprenda el mecanismo de conducción de semiconductores orgánicos

Objetivos

- **Introducción**
- **Unidad 1. Estructura de la materia**
 - ❖ Tema 1.1. Estructura del átomo
 - ❖ Tema 1.2. Estructura electrónica del átomo
 - ❖ Tema 1.3. Tabla periódica y Enlazamiento atómico
- **Unidad 2. Estados de agregación**
 - ❖ Tema 2.1. Materiales cristalinos y amorfos
 - ❖ Tema 2.2. Celdas unitarias y redes de Bravais
 - ❖ Tema 2.3. Notaciones cristalinas (índices de Miller)
 - ❖ Tema 2.4. Análisis cristalográfico con rayos X
 - ❖ Tema 2.5. Red recíproca

Objetivos

- **Unidad 3. Teoría electrónica de los metales y semiconductores.**
 - ❖ Tema 3.1. Teoría del electrón libre de los metales.
 - ❖ Tema 3.2. Teoría cuántica de los metales.
 - ❖ Tema 3.3. Teoría de Bandas en los sólidos, zonas de Brillouin
 - ❖ Tema 3.4. Semiconductores intrínsecos y extrínsecos.
 - ❖ Tema 3.5. Semiconductores orgánicos
 - ❖ Tema 3.6. Teoría de bandas en los semiconductores orgánicos.

- **Unidad 4. Materiales electrónicos.**
 - ❖ Tema 4.1. Ley de Ohm y conductividad eléctrica.
 - ❖ Tema 4.2. Dispositivos semiconductores
 - ❖ Tema 4.3. Aislantes y sus propiedades dieléctricas.
 - ❖ Tema 4.4. Superconductividad.

Objetivos

○ **Unidad 5. Aplicaciones de los semiconductores**

- ❖ Tema 5.1. Dispositivos semiconductores: el diodo
- ❖ Tema 5.2. El transistor de unión bipolar
- ❖ Tema 5.3. El transistor de efecto decampo
- ❖ Tema 5.4. Manufactura y fabricación de dispositivos semiconductores.
- ❖ Tema 5.5. Semiconductores orgánicos
- ❖ Tema 5.6. Diodo orgánico emisor de luz (OLED)
- ❖ Tema 5.7. Manufactura y fabricación de dispositivos semiconductores orgánicos
- ❖ Tema 5.8. Polímeros conductores.
- ❖ Tema 5.9. Supercapacitores
- ❖ Tema 5.10. Perspectivas de la Ingeniería molecular en la rama de los semiconductores

○ **Unidad 6. Materiales Fotónicos.**

- ❖ Tema 6.1. Espectro electromagnético.
- ❖ Tema 6.2. Reflexión, absorción y transmisión
- ❖ Tema 6.3. Fibras ópticas.

COMPETENCIAS GENÉRICAS

Que el egresado mediante el conocimiento sobre los materiales conductores, semiconductores y aislantes; sea capaz de intervenir y decidir en:

- La selección de un dispositivo electrónico orgánico que integre un circuito electrónico.
- Trabajar en equipos multidisciplinarios.
- Expresar de manera clara y concisa sus ideas e interpretación de los fundamentos de la física de semiconductores para analizar las propiedades de los dispositivos semiconductores orgánicos.

SUGERENCIAS DE UTILIZACIÓN

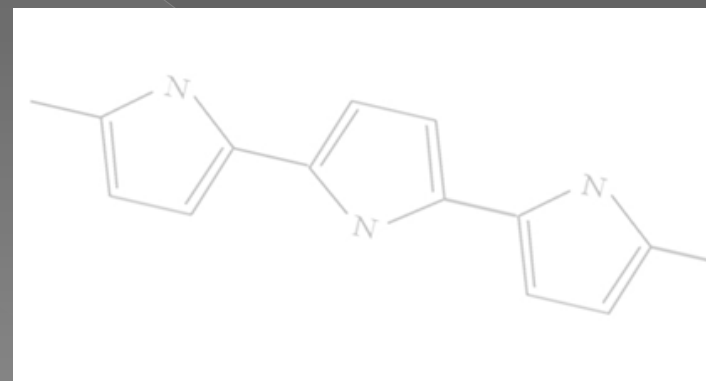
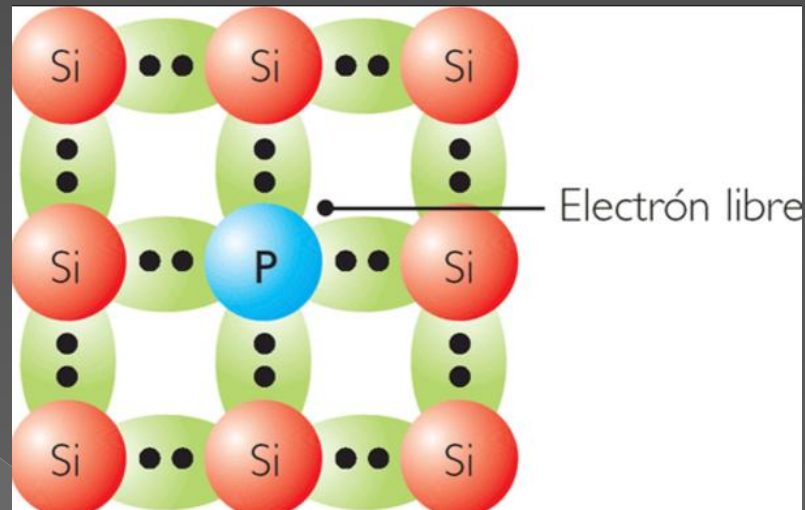
- Se requieren conocimientos básicos de las siguientes disciplinas: Física moderna, cristalografía, teoría de enlaces . Por lo que se recomienda solicitar al alumno un trabajo por escrito para presentar una revisión de estos temas.
- Así mismo el profesor dará una introducción a estos temas, antes de abordar el tema de semiconductores orgánicos
- Se retomarán los Conceptos de semiconductores de Ge y Si y los conceptos que debe manejar el alumno:
 - > Semiconductor intrínseco y extrínseco
 - > Concepto de dopado
 - > Teoría electrónica de los metales y semiconductores.
- Se presentará este material de solo visión para el tema 5.5 del programa educativo.
- El presente material debe complementarse con trabajos de los alumnos y tareas de ejercicios.

INTRODUCCIÓN

- En el área de investigación científica se trabaja actualmente en el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías en semiconductores, con la utilización de materiales inorgánicos y orgánicos.
- Se busca su potencialidad en conductividad, compactación y alta desempeño para aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento.

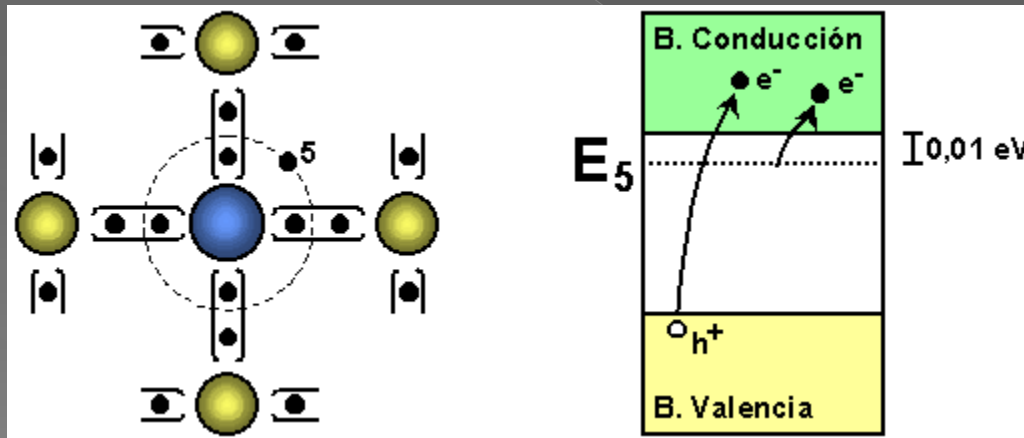
¿Qué es un Semiconductor orgánico?

- Es un Compuesto orgánico: cristal o un polímero (macromolécula).
- Conducción de un Semiconductor de Si o Ge se da por la conducción por e^- y huecos y por la teoría de bandas.
- El semiconductor Orgánico por reacciones de oxidación – reducción (Redox) en oposición a los semiconductores de Si



Ley de Ohm y conductividad eléctrica

- En los semiconductores inorgánicos la conductividad depende de la cantidad de dopaje.

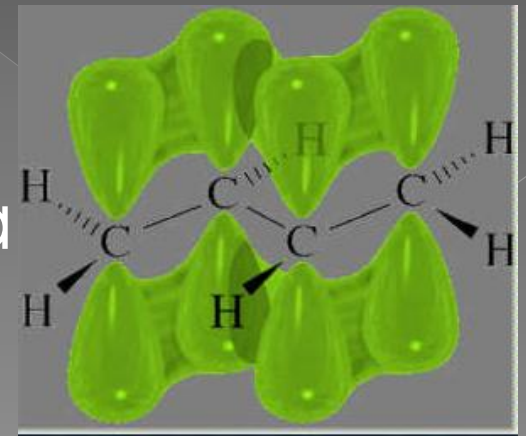


Semiconductor orgánico

- La conductividad, y la conjugación, van aumentando con la oxidación y de esta manera se obtienen valores en un intervalo entre 10^{-8} hasta 10^3S/cm .
- Con esta variación, se logran cambios significativos en el material en sus propiedades eléctricas, mecánicas, ópticas, químicas, térmicas, etc. En el límite inferior de 10^{-8}S/cm el material se comporta como semiconductor, y en el límite superior se comportan como conductor.

¿Un plástico puede conducir la electricidad??

- Durante años un plástico siempre ha sido utilizado como un material aislante.
- ¿Cómo es que, se dice que puede conducir electricidad?.....
- Que sucede en la estructura molecular??

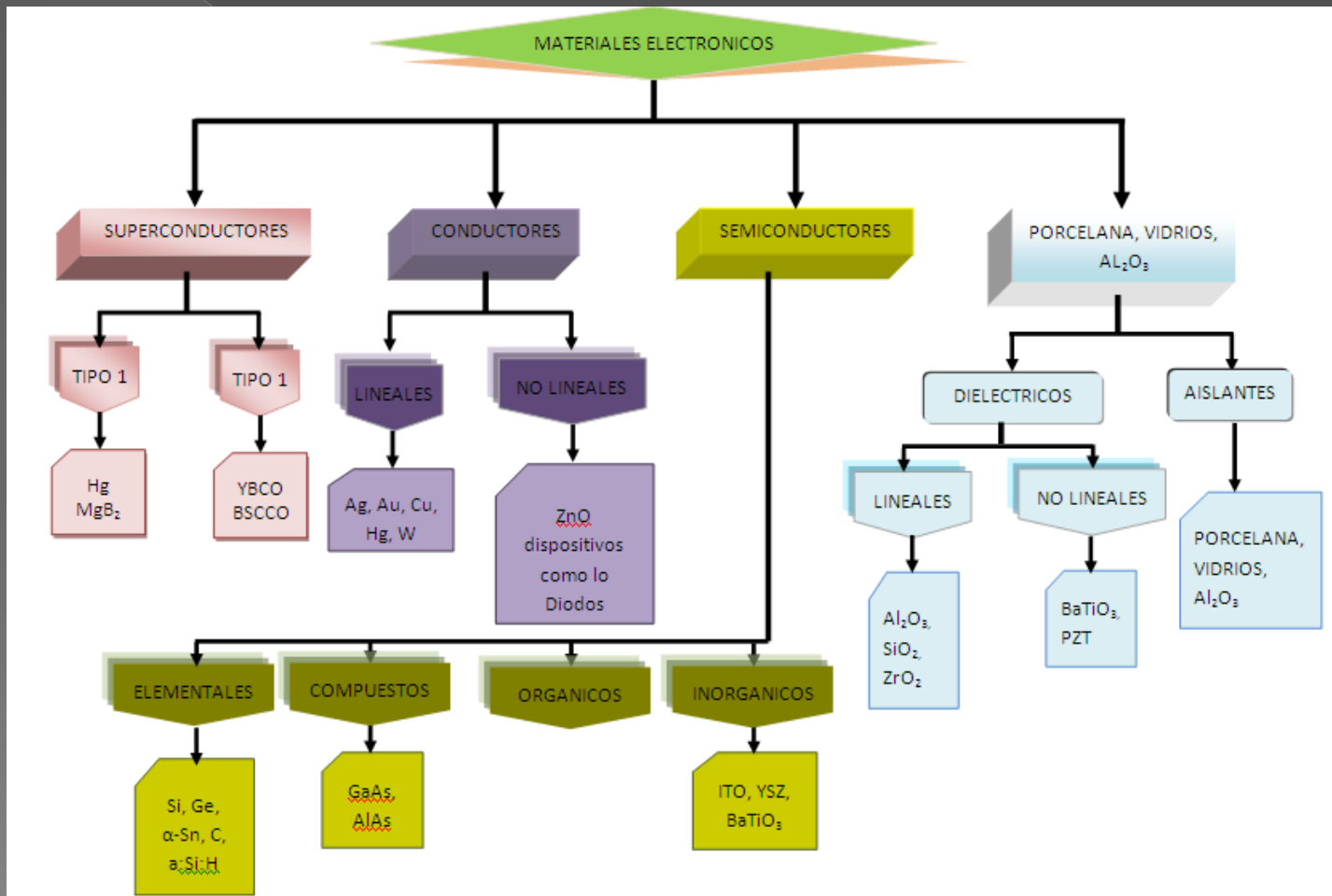


Antecedentes:



- La Academia de Ciencias sueca otorgó el premio Nobel de Química del año 2000 a los investigadores A. Heeger, A. McDiarmid y H. Shirakawa por su contribución al descubrimiento y desarrollo de polímeros orgánicos conductores.
- Estos investigadores han contribuido al diseño y síntesis de una familia de polímeros conductores de la electricidad, por los cuales es posible aumentar su conductividad en varios órdenes de magnitud, lo que abre la puerta al desarrollo de nuevos dispositivos tecnológicos.

Materiales Electrónicos



Semiconductores

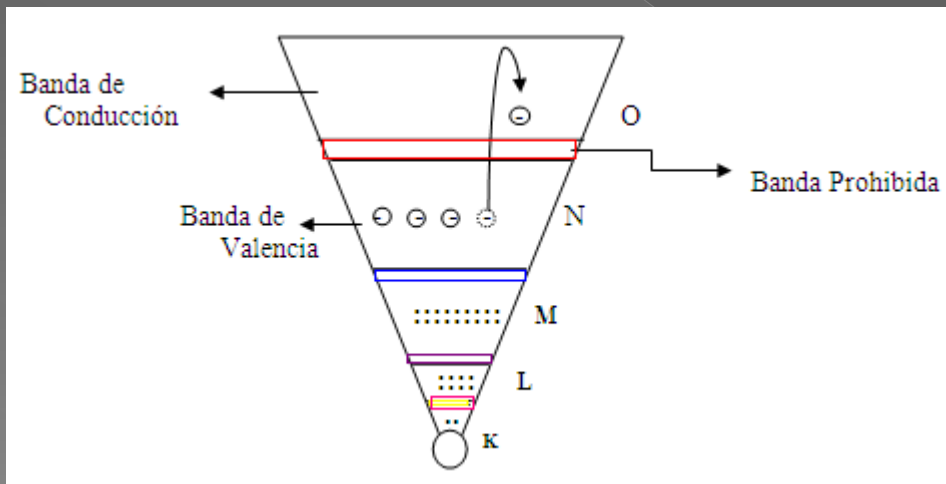
Diferencias:

- Semiconductores Orgánicos
- Semiconductores Inorgánicos

Teoría de bandas

- Semiconductores Inorgánicos

El nivel de Energía es de un solo átomo y la Banda de Energía es de un grupo de átomos.

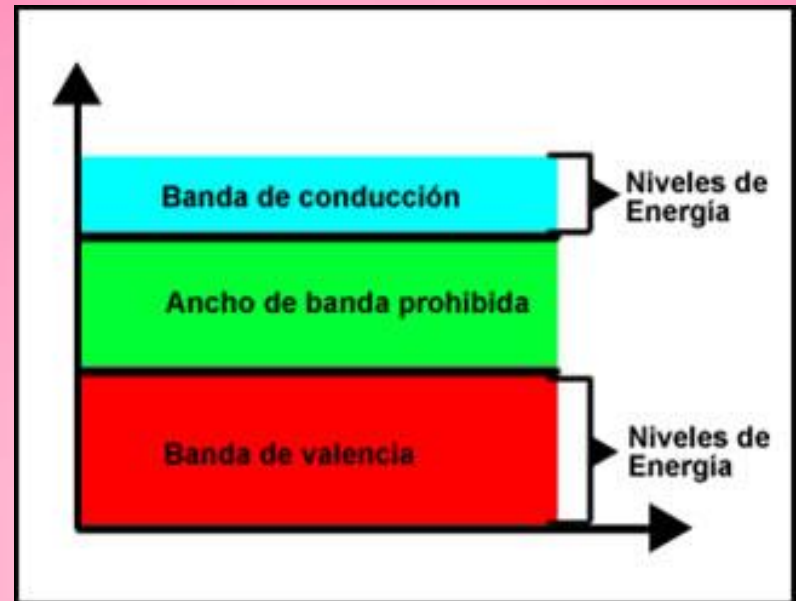


Semiconductores Inorgánicos

Bandas de Conducción y de Valencia

- La brecha de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción es relativamente pequeña para que los electrones “salten” la brecha y entren a la banda de conducción

- Banda de conducción y de valencia



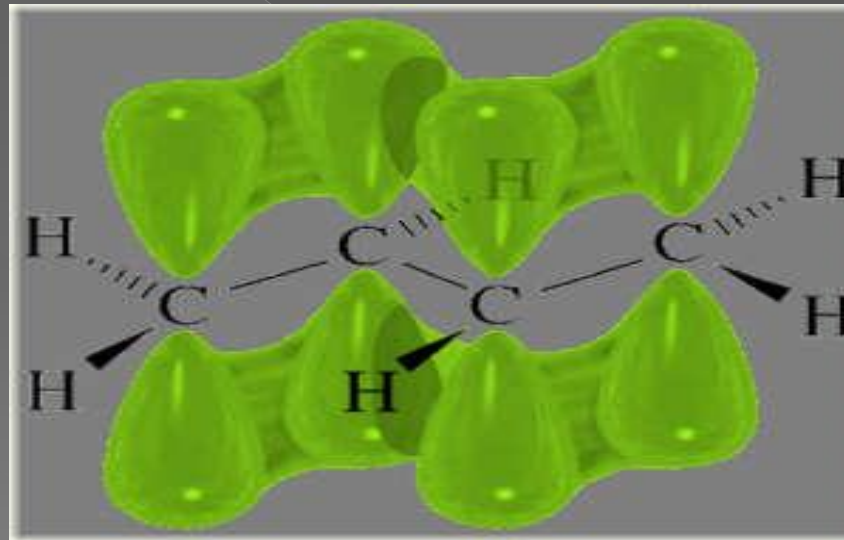
- La teoría que explica de manera más razonable la estructura electrónica de un material es la teoría de bandas.
- La mecánica cuántica estipula que el electrón de un átomo solo puede tener niveles cuantizados de energía. Cuando los átomos están cercanos, los niveles de energía se describen por la banda de valencia y de conducción

Semiconductor Orgánico

- Un **semiconductor orgánico** es un compuesto orgánico bajo la forma de un cristal o un polímero.
- Propiedades:
Mecanismo de
Conducción: por electrones y huecos, y la presencia de una banda prohibida.



- Estos materiales han dado lugar a la electrónica orgánica, o electrónica de los plásticos. Por orgánica se entienden las moléculas que se basan en el carbono

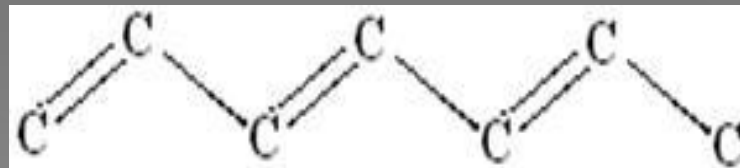


CARACTERISTICAS ELECTRICAS DEL ATOMO DE CARBONO.

¿Que características lo definen como conductor?

Un compuesto orgánico no puede ser semiconductor mediante una estructura cristalina de tipo atómico como la del Si o el Ge.

Para que un **compuesto orgánico se comporte como un semiconductor**: debe optar por la conjugación, una estructura de enlaces simples y dobles que se alternan (ver figura2), pero a diferencia de los aislante orgánicos, esta conjugación debe darse a lo largo de toda una molécula, o en su gran mayoría, con lo cual el material ya no será regido por las características del enlace σ , **sino por las del enlace π .**



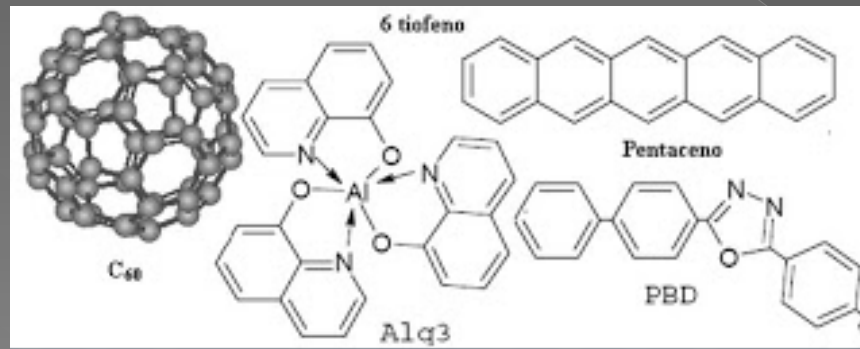
Dopaje en conductores orgánicos

Con el fin de suministrar los espacios vacíos en la banda de valencia o los portadores en la banda de conducción y de que el material conduzca mayoritariamente por huecos o electrones, estos materiales necesitan ser dopados de forma análoga a los semiconductores inorgánicos.

Semiconductor orgánico
HOMO
LUMO
Banda prohibida

La diferencia entre el dopaje de los materiales orgánicos e inorgánicos, es que en los inorgánicos, algunos átomos del cristal son reemplazados por átomos dopantes, mientras que en los materiales orgánicos los átomos dopantes se insertan de forma adicional sin reemplazar a los átomos en la cadena principal de la molécula.

En los semiconductores orgánicos, en que los orbitales electrónicos de cada átomo tienden a solaparse y dan lugar a la formación de bandas de energía.



Los semiconductores orgánicos pueden ser dopados de dos formas:

- ◉ **Dopaje N, Producen electrones en exceso.**
- ◉ **Dopaje P , huecos .**

Gracias al dopaje, un material se comporta como semiconductor, y un compuesto orgánico conjugado puede convertirse en conductor mediante altos niveles de dopaje

Física de los semiconductores orgánicos

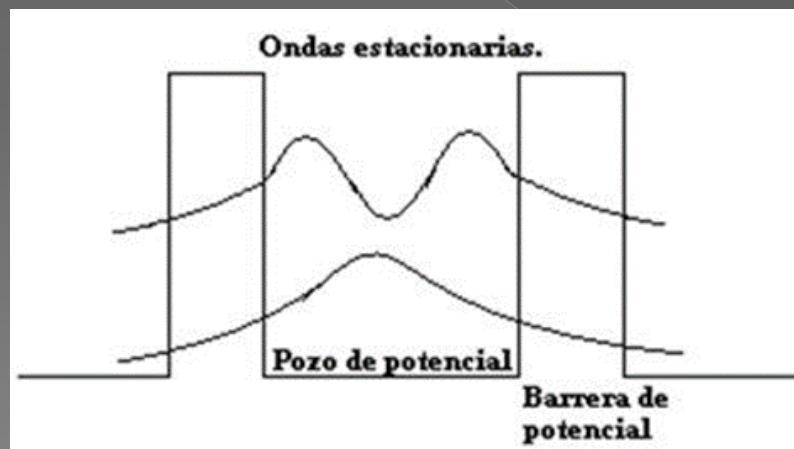
Fenómeno de Conducción

En los semiconductores orgánicos los electrones se encuentran en estados energéticos o niveles de energía localizados, a diferencia de los conductores y semiconductores tradicionales en donde los electrones están deslocalizados por todo el material.

En los materiales orgánicos, estos estados localizados son: los estados de las moléculas individuales en los cristales moleculares, los estados de las cadenas poliméricas individuales o los estados de los segmentos de estas cadenas donde la conjugación es interrumpida por defectos estructurales o químicos. Los estados localizados actúan como pozos de potencial.

La transferencia de carga entre sitios se da mediante saltos cuánticos o *hopping* en donde los portadores de carga mediante efecto túnel asistido por fonones (vibraciones de la estructura del material) pasan de un sitio a otro, bajo ciertas condiciones.

La ecuación de onda de Schrödinger, predice que una partícula subatómica dentro de un pozo de potencial o fuera de éste, siempre y cuando la barrera de potencial sea finita, tiene una probabilidad (aunque muy pequeña) de encontrarse por fuera o de entrar a dicho pozo, atravesando sus paredes, como si hiciera un túnel(efecto túnel).



Pozo de potencial o sitio.

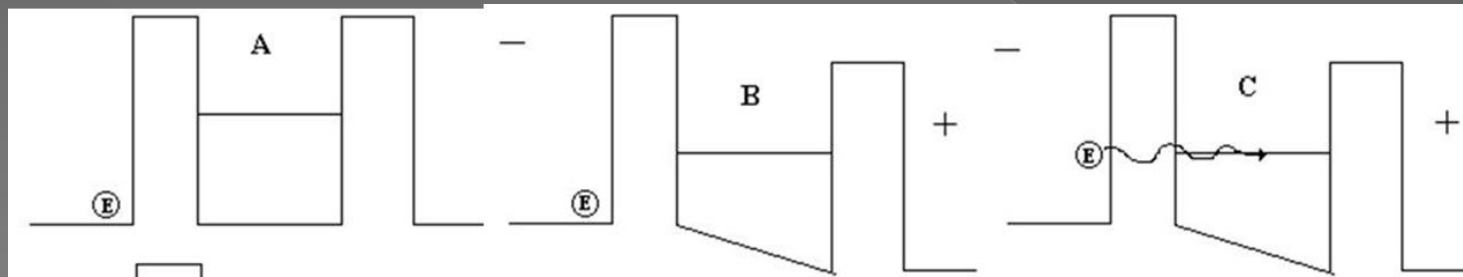
Los electrones, se encuentran deslocalizados dentro de los sistemas π de las moléculas individuales de los cristales moleculares o de las cadenas poliméricas.

Estos electrones al ser estimulados por un campo eléctrico se mueven dentro de estos sitios de extremo a extremo y al encontrarse con una barrera energética rebotan y forman ondas estacionarias que tienen cierto nivel de energía.

Los electrones u ondas estacionarias tienen la posibilidad de atravesar la barrera de potencial entre las moléculas o polímeros, siempre y cuando los electrones de un sitio origen estén en un nivel de energía igual a uno de los niveles de energía permitido en el sitio al que va a trasladarse, de lo contrario el *hopping* no se lleva a cabo.

La energía de los fonones es transmitida a los electrones que de esta forma alcanzan la energía suficiente para trasladarse por efecto túnel.

En la figura 4, en la parte A, observamos al lado izquierdo un electrón en una molécula o sitio con una energía inferior a la energía de uno de los niveles de energía discretos de otra molécula o sitio, inhabilitando su traslado por efecto túnel. En la parte B, al aplicarle un campo eléctrico al material los niveles de energía al igual que en los semiconductores inorgánicos se inclinan y la diferencia de energía entre los dos sitios disminuye pero aun no coinciden. En la parte C, el electrón absorbe la energía de un fonón e iguala la energía de la molécula vecina, situación ésta que le permite trasladarse por *hopping*.



Hopping asistido por fonones.

La conductividad está asegurada por los portadores de carga: los electrones (electrones π) y los huecos (electrones π no apareados).

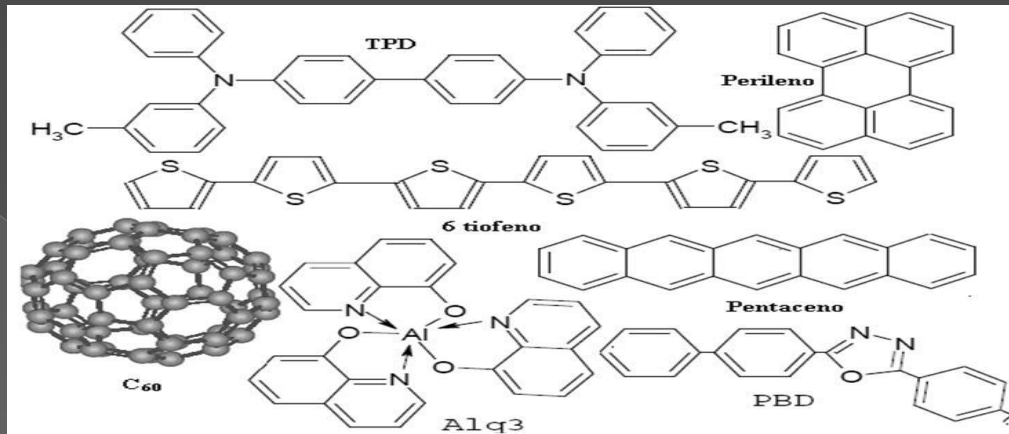
En general, los sólidos orgánicos son aislantes. Sin embargo, en los cristales formados por moléculas orgánicas que contienen uniones conjugadas π , o incluso los polímeros que contengan uniones conjugadas π , los electrones pueden moverse libremente en los recubrimientos de nubes de electrones π , lo que permite la conducción de electricidad.

CLASIFICACIÓN DE LOS SEMICONDUCTORES ORGÁNICOS.

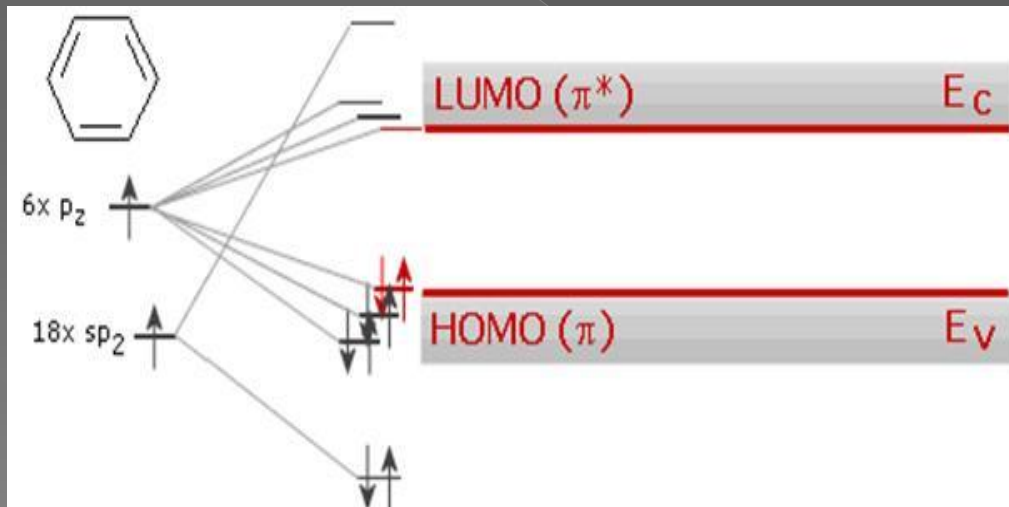
Se clasifican en dos grandes grupos, dependiendo de su peso molecular, que son:

- **Moléculas de bajo peso molecular** : moléculas conjugadas, de un tamaño menor a 20 monómeros, las cuales se conocen como oligómeros
- **Moléculas de alto peso molecular:**, moléculas conjugadas de más de 20 monómeros, las cuales se conocen como polímeros.

Ambos se diferencian entre sí por su tamaño y propiedades físicas, pero en cuanto a las propiedades eléctricas su comportamiento es muy similar.



Principales semiconductores de bajo peso molecular.



Estructura energética de una pequeña molécula orgánica.

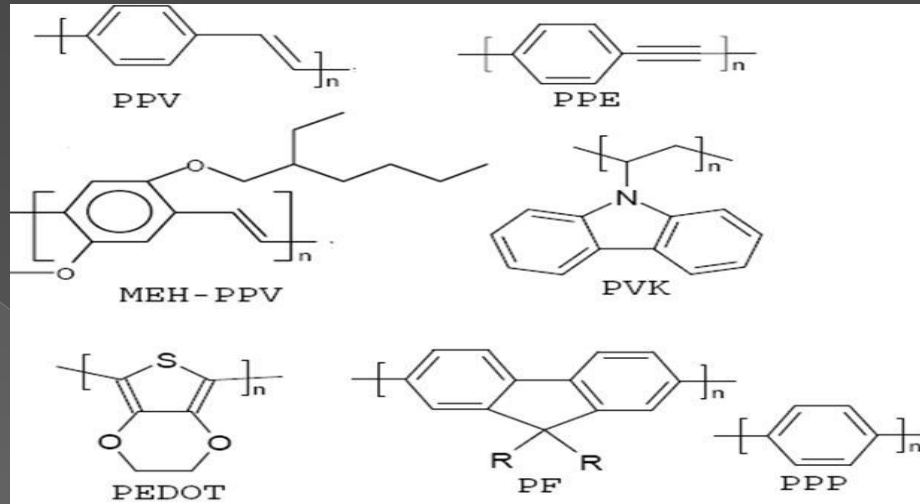


Figura 6. Principales polímeros semiconductores.

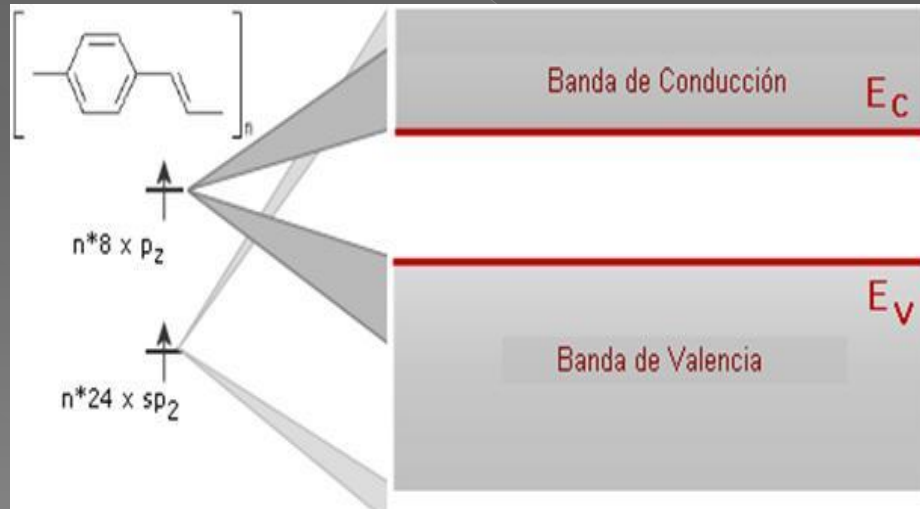
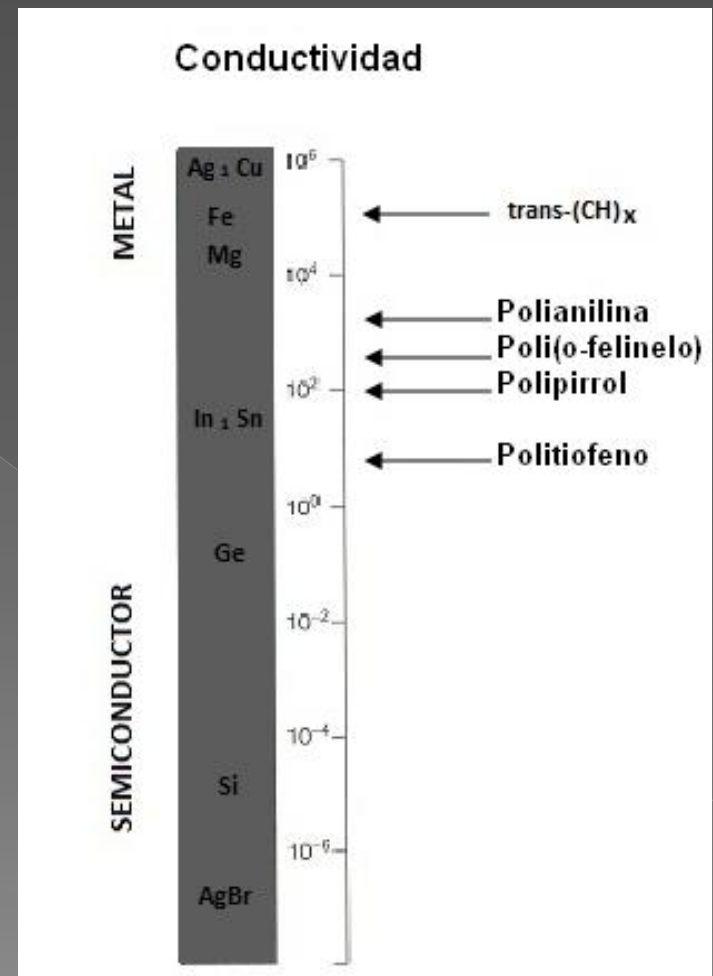


Figura 7. Estructura energética de un polímero conjugado.

Mecanismo de Conducción

La conducción eléctrica de los metales se basa en el movimiento de electrones en la banda de conducción. Esta se debe a que tienen una banda de valencia llena y una banda de conducción parcialmente llena permitiendo con facilidad el salto de los electrones entre niveles llenos y vacíos en la banda. La conductividad de los PC depende de la técnica de síntesis, el agente dopante y las características del medio en que se polimeriza (tipo de sustrato, temperatura, medio de la disolución, luminosidad, etc.)

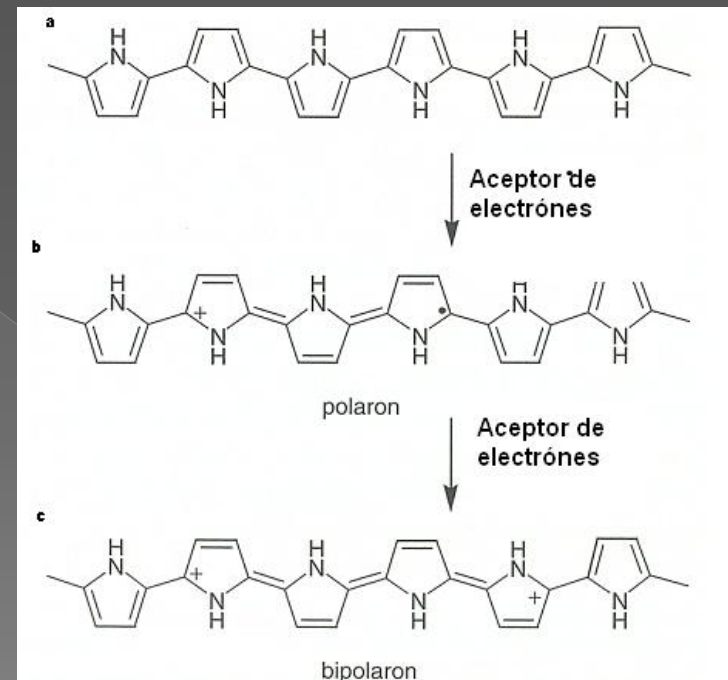


El dopado de un polímero conductor, involucra la introducción de una gran cantidad de un donador o un aceptor, llegando a ser aproximadamente de hasta un 33% de su peso, con el resultado de un material diferente al material sin dopar. El nivel del dopado puede ser reversiblemente controlado para obtener conductividades entre un estado aislante (no dopado) a uno altamente conductor (totalmente dopado).

El dopado involucra más que estados de oxidación y reducción, remueve electrones y produce una carga positiva en el polímero y es denominado “dopado p”. Similarmente la reducción desde el estado neutro produce carga negativa en la cadena polimérica y se le denomina “dopado n”.

Fenómenos electrónicos en los polímeros conductores

Para explicar los fenómenos electrónicos en los polímeros conductores se utilizan conceptos tales como son los solitones, polarones (radical-cación), bipolarones (dicación), que ha sido propuestos por los físicos dedicados a estudiar la teoría de física de estado sólido.



Al remover un electrón de la cadena del polipirrol resulta la formación de un radical catión y conjugación, con movimientos de electrones entre varias unidades manoméricas. En física del estado sólido un radical catión que está parcialmente deslocalizado sobre un segmento del polímero es denominado un polarón, que tiene un spin de $\frac{1}{2}$.

El radical y el catión son acoplados uno al otro por resonancia de la carga y del radical. La presencia de un polarón induce la creación de una unión tipo quinoidea seguida de una unión aromática.

La distorsión de la red tiene un consumo energético el cuál limita la formación de anillos tipo quinonas, que puedan ligar los radicales y cationes. En el caso del polipirrol se ha establecido que esta distorsión se da cada cuatro anillos de pirrol.

En el estado de no-dopado la brecha entre la banda de valencia (VB) y la banda de conducción (CB) es de 3.2eV. La presencia de un polarón crea, entre las dos bandas dos nuevos estados electrónicos: uno enlazante, el otro antienlazante, ambos desocupados (puesto que e le ah arrebatado el electrón).

El nivel de un polarón es aproximadamente 0.5eV (considerada desde los límites de la VB). La energía de unión del bipolarón es 0.12eV (diferencia entre la energía de ionización de 0.49eV menos la energía $\pi + \sigma$ de 0.37eV necesitada para cambiar su geometría).

La geometría de relajación en el bipolarón y esta es mayormente de forma quinoidea comparada al polarón¹¹⁶, tal que el nivel electrónico vacío en la banda, del bipolarón es aproximadamente 0.75eV desde las terminales de las bandas.

La energía de unión del bipolarón es de 0.69eV , significando que un bipolarón está favorecido sobre dos polarones (esta evolución está soportada por la resonancia del spin de un electrón medida sobre un polipirrol dopado-oxidado).

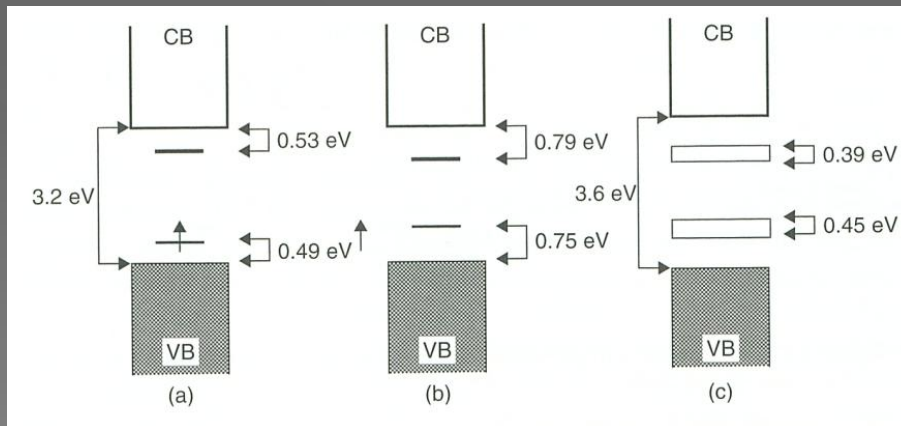
En dopados pequeños, la señal de resonancia del spin del electrón crece, de acuerdo al hecho de que se forma un polarón con spin $\frac{1}{2}$. En estados de dopado intermedios la señal de resonancia del spin del electrón se satura y luego decrece, siendo consistente con la recombinación de polarones para formar bipolarones.

A altos dopados, realizando muestreo de ciclados electroquímicos, no se observa señal de resonancia del spin del electrón aunque el sistema es altamente conductor, indicando que el acarreo de cargas tiene un menor spin.

Con un proceso de dopado continuo, la superposición de las bandas CB y VB entre los estados de los bipolarones forma dos bandas continuas de bipolarón aproximadamente de 0.4eV en la brecha. La brecha entre las bandas se incrementa de 3.2eV en el estado neutro a 3.6eV en el estado de alto dopado. Esto se debe a que los bipolarones formados están en la brecha entre las terminales de la banda de valencia y conducción.

Para un polímero altamente dopado, es esperado que las bandas superiores e inferiores de los bipolarones se fusionen con la banda de conducción y de valencia respectivamente para producir bandas parcialmente llenas y alcanzar una conductividad similar a los metales

Evolución de la estructura de las bandas del polipirrol de nivel de dopado



a) bajo nivel de dopado, formación del polarón.

b) nivel medio de dopado formación del bipolarón.

c) alto nivel de dopado, formación de bandas de bipolarón ^{124,125}.

En el dopado de ICPs, las formas de conductividad electrónica típicamente aportan cargas (polarones o bipolarones) a lo largo de la cadena polimérica y estas cargas son balanceadas por la incorporación de aniones.

Los aniones pueden ser muy variados e incluyen grupos químicos como el Cl^- , HSO_4^- , ClO_4^- , NO_3^- , ó polielectrólitos como el poliestireno sulfonado, al igual que amino-ácidos y biopolímeros, incluidas las proteínas y el ADN.

La adición de los dopantes es una herramienta poderosa para cambiar las propiedades del ICPs resultante, dando una gran variedad de materiales poliméricos aplicables a diferentes usos.

Conductividad eléctrica de algunos polímeros conductores dopados con diferentes moléculas

- Se ha encontrado que la conductividad en los polímeros conductores está relacionada con el proceso de dopado.
- En la tabla se dan los valores de conductividad máxima de diferentes polímeros con diferentes materiales dopantes.

<i>Polímero</i>	<i>Material Dopante</i>	<i>Conductividad aproximada (S/cm)</i>
Poliacetileno	I, Br, I, Na, AsF	10000
Polipirrol	BF ₄ ⁻ , ClO ₄ ⁻ , tosilato	500-7500
Politiofeno	BF ₄ ⁻ , ClO ₄ ⁻ , tosilato, FeCl ₄ ⁻	1000
Poli(3-alkitiofeno)	BF ₄ ⁻ , ClO ₄ ⁻ , FeCl ₄ ⁻	1000-10000
Polifenil-sulfuro	AsF ₆ ⁻	500
Polifenilvinileno	AsF ₆ ⁻	10000
Politienilvinileno	AsF ₆ ⁻	2700
Polifenileno	AsF ₆ ⁻ , Li, K	1000
Polisotianofeno	BF ₄ ⁻ , ClO ₄ ⁻	50
Polifurano	BF ₄ ⁻ , ClO ₄ ⁻	100
Polianilina	HCl	200

Similitudes con los semiconductores inorgánicos

Los semiconductores orgánicos poseen características similares a los semiconductores tradicionales de Ge y Si.

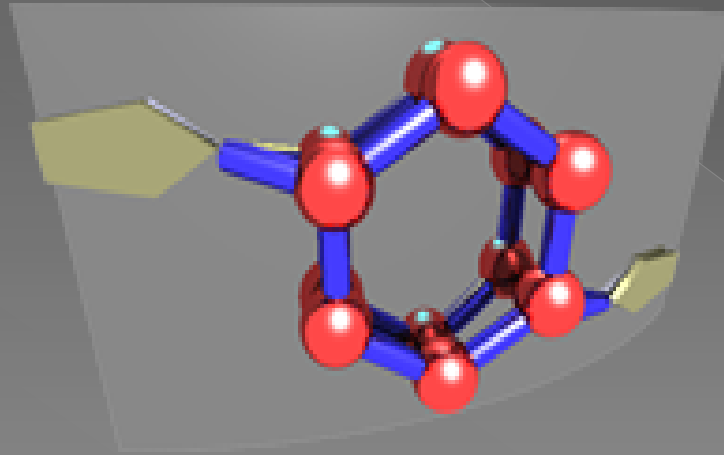
La siguiente tabla muestra sus correspondencias.

Semiconductor	Semiconductor orgánico
Banda de valencia	HOMO
Banda de conducción	LUMO
Banda prohibida	Banda prohibida

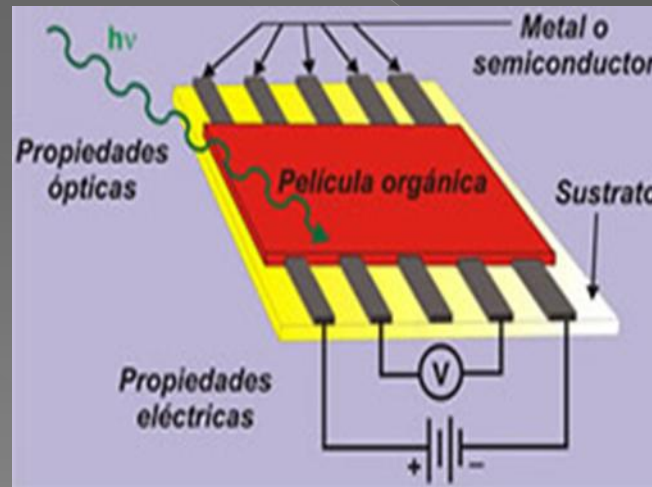
Ventajas

- Ligeros: de fácil portabilidad
- Flexibilidad: menos frágiles que los semiconductores inorgánicos que se depositan sobre sustratos rígidos y planos.
- La facilidad de fabricación y ensamblaje: los semiconductores son en general fáciles y económicos de fabricar en el laboratorio. La ingeniería química puede desarrollar moléculas que se autoensamblen. Estos métodos de fabricación contrastan con el proceso de fabricación más difícil y costoso de las tecnologías inorgánicas; calentar a temperaturas muy altas, por ejemplo.

- Flexibilidad mecánica de los enlaces moleculares en compuestos orgánicos y polímeros, es posible fabricar estructuras ordenadas y/o cristales en forma de película delgada sobre sustratos flexibles. Se abre la posibilidad de fabricar paneles solares portables, que puedan enrollarse y transportarse a diversos sitios.



- En algunos compuestos orgánicos y polímeros cambian su conductividad eléctrica en varios órdenes de magnitud después de que se les aplica un campo eléctrico o una diferencia de potencial que supera cierto valor umbral de voltaje. Se puede usar en la fabricación de memorias.



Desventajas

- ◉ Tiempo de vida: La vida útil de los dispositivos orgánicos es inferior a los tradicionales LCD. Esto es debido a la decoloración de las moléculas orgánicas que emiten luz de color.
- ◉ Desechables: La industria de semiconductores orgánicos considera, debido a su bajo costo y facilidad de fabricación, la posibilidad de fabricar dispositivos electrónicos desechables. Hay dudas acerca del aspecto ecológico de esta fabricación.

Aplicaciones

Son utilizados en el ámbito de la optoelectrónica para el desarrollo de:

- Diodos orgánicos emisores de luz (OLED) con los que se pueden fabricar dispositivos que compitan con los LCD de hoy día.
- Energía solar
- Transistores de efecto de campo o FET (**F**ield **E**ffect **T**ransistor)



- Ventanas inteligentes que se oscurecen cuando hay demasiado sol. Que ya utilizan esta tecnología para hacer lentes que se oscurece cuando se sale al exterior.
- Fabricación de celdas solares.
- Papel electrónico (e-papel).
- Construcción de memorias basadas en materiales orgánicos (organic memories).
- Aplicación en la obtención de fuentes de energía alternativa como las celdas de combustible (fuel cells).



Tecnología de nueva generación

Los semiconductores orgánicos permiten crear nuevos dispositivos electrónicos y una diversidad de aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento.

Bibliografía

- J.P. Mckelvey, ed. Física del Estado Solido y Semiconductores, Ed. Limusa noriega editores. 1993.
- Robert M Rose, Lawrence a Shepard, John Wulff; Propiedades Electrónicas (tomo IV) Ed. Limusa. 1985.
- Charles Kittel, Introducción a la Física del estado sólido, Ed. Wiley. 1985.
- A. Beiser, Conceptos de Física Moderna Ed. Mc. Graw Hill. 1988.
- Eisberg, Resnick, Física Cuántica , Ed. Limusa noriega editores. 2008.
- Donal R. Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales Ed. Thomson, 4 edición. 2008.

Bibliografía

- ◉ W. Smith, J. Hashemid, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales Mc Graw Hill. 2008.
- ◉ Raymond A Serway, Clement J Moses, Curt Moyer Física Moderna, Ed. Thomson.
- ◉ M. Alan G, Synthetic metals: a novel rule for organic polymers, Synth. Met. 125, 11-22, 2002.
- ◉ L. Stryer, J.M. Berg, J.L. Tymoczko, Biochemistry 4 th ed. W. H. Freeman & Company; 1995.
- ◉ L. Valero, J. Arias-Padilla, J. Cauich-Rodriguez, M. Smit, T.F. Otero, Sensing and tactile artificial muscles from reactive materials, Sensors 10, 1-39, 2010.

Bibliografía

- T.F. Otero, J. Rodriguez en Intrinsicly conducting polymers: An emerging technology., Aldissi, M., Ed.; Kluwer, Dordrecht (The Netherlands), 1993, 179-190.
- M.S. Freund, B. DeoreSelf-Doped Conducting Polymers, John Wiley & Sons, Chichester, 2007.
- T.F. Otero, I. Boyano, Comparative study of conducting polymers by the ESCR model, Journal of Physical Chemistry B 107, 6730-6738, 2003.
- C. Masalles, S. Borros, C. Vinas, F. Teixidor, Are low-coordinating anions of interest as doping agents in organic conducting polymers?, Advanced Materials 12, 1199-1202, 2000.

Bibliografía

- M. Skolka Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Wiley, 1988.
- J.L. Bredas, G.B. Street, Polarons, Bipolarons, and Solitons in Conducting Polymers, Acc. Chem. Res. 18, 309-315, 1985.
- J.L. Bredas, J.C. Scott, K. Yakushi, G.B. Street, Polarons and Bipolarons in Polypyrrole - Evolution of the Band-Structure and Optical-Spectrum Upon Doping, Physical Review B 30, 1023-1025, 1984.