

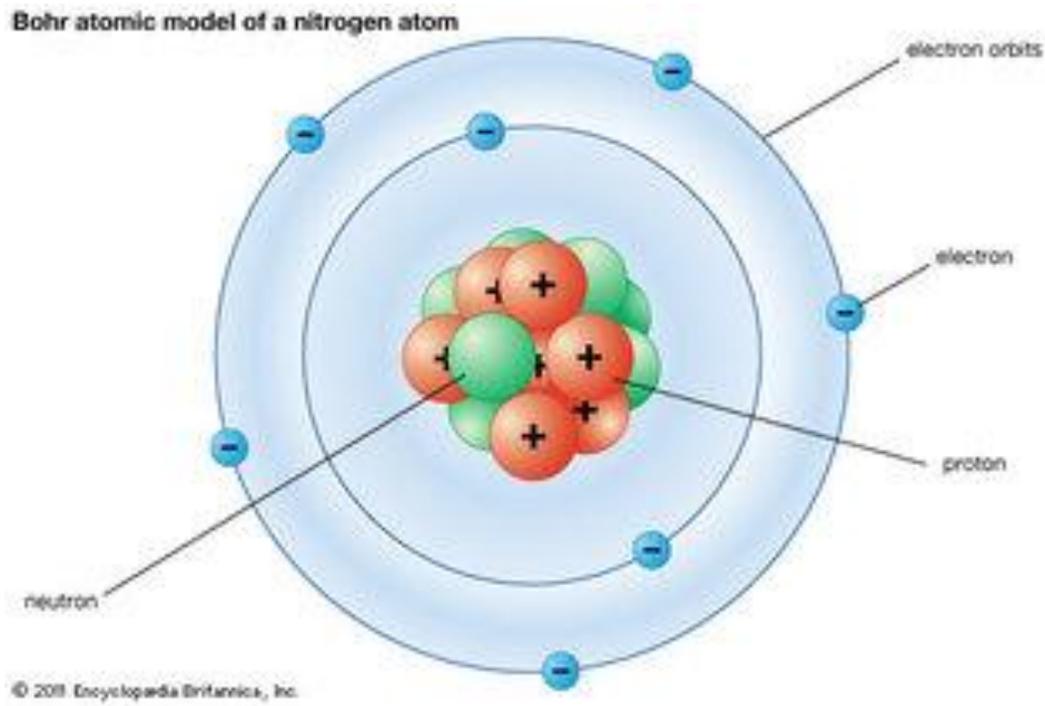
## INTRODUCCIÓN.

**La Física de semiconductores es el conjunto de teorías y modelos que explican el comportamiento de los semiconductores, bajo diversas condiciones.**

### El Átomo

En el átomo distinguimos dos partes: el núcleo y la corteza.

- El núcleo es la parte central del átomo y contiene partículas con carga positiva (Protones), y partículas que no poseen carga eléctrica, es decir son neutras (Neutrones). La masa de un protón es aproximadamente igual a la de un neutrón.



Todos los átomos de un elemento químico tienen en el núcleo el mismo número de protones. Este número, que caracteriza a cada elemento y lo distingue de los demás, es el número atómico y se representa con la letra Z.

- La corteza es la parte exterior del átomo. En ella se encuentran los electrones, con carga negativa. Éstos, ordenados en distintos niveles, giran alrededor del núcleo. La masa de un electrón es unas 2000 veces menor que la de un protón.

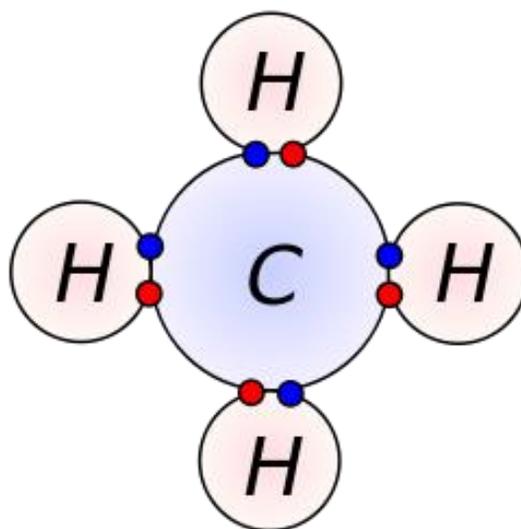
Los átomos son eléctricamente neutros, debido a que tienen igual número de protones que de electrones. Así, el número atómico también coincide con el número de electrones.

**Semiconductor** (Abreviado como **SC**) es un elemento que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre. Los elementos químicos semiconductores de la tabla periódica se indican en la siguiente tabla.

Elemento	Grupos	Electrones en la última capa
Cd(Cadmio)	12	2 e <sup>-</sup>
Al(Aluminio), Ga(Galio), B(Boro), In(Indio)	13	3 e <sup>-</sup>
Si(Silicio), C(Carbono), Ge(Germanio)	14	4 e <sup>-</sup>
P(Fósforo), As(Arsénico), Sb(Antimonio)	15	5 e <sup>-</sup>
Se(Selenio), Te(Teluro), S(Azufre)	16	6 e <sup>-</sup>

El elemento semiconductor más usado es el silicio, el segundo el germanio, aunque idéntico comportamiento presentan las combinaciones de elementos de los grupos 12 y 13 con los de los grupos 16 y 15 respectivamente (GaAs, PIn, AsGaAl, TeCd, SeCd y SCd). Posteriormente se ha comenzado a emplear también el azufre. La característica común a todos ellos es que son tetravalentes, lo que indica que tienen 4 electrones en su último nivel de energía.

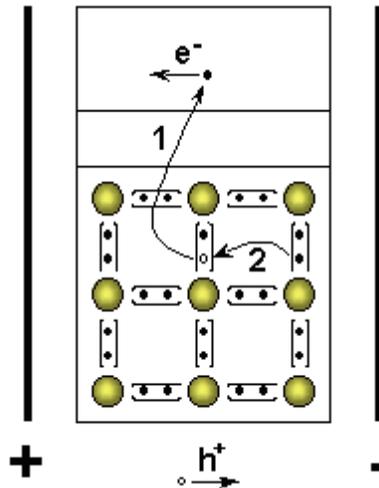
**Enlace Covalente entre dos átomos.** Se produce cuando estos átomos se unen, para alcanzar el octeto estable, compartiendo electrones del último nivel.



- Electrones del hidrógeno
- Electrones del carbono

**Cristal Semiconductor de Silicio.** Al combinarse los átomos de Silicio para formar un sólido, lo hacen formando una estructura ordenada llamada cristal. Esto se debe a los "Enlaces Covalentes", que son las uniones entre átomos que se hacen compartiendo electrones adyacentes de tal forma que se crea un equilibrio de fuerzas que mantiene unidos los átomos de Silicio.

**Semiconductores intrínsecos.** Es un cristal de silicio o germanio que forma una estructura tetraédrica mediante enlaces covalentes entre sus átomos, se ejemplifica en la siguiente figura en dos dimensiones por simplicidad.



Cuando el cristal se encuentra a temperatura ambiente algunos electrones pueden absorber la energía necesaria para saltar a la banda de conducción dejando el correspondiente hueco en la banda de valencia (1). Las energías requeridas, a temperatura ambiente, son de 0.7 V y 0.3 V para el silicio y el germanio respectivamente.

Los electrones y los huecos reciben el nombre de portadores. En los semiconductores, ambos tipos de portadores contribuyen al paso de la corriente eléctrica. Si se somete el cristal a una diferencia de potencial se producen dos corrientes eléctricas. Por un lado la debida al movimiento de los electrones libres de la banda de conducción, y por otro, la debida al desplazamiento de los electrones en la banda de valencia, que tenderán a *saltar* a los huecos próximos (2).

**Semiconductores extrínsecos.** Si a un semiconductor intrínseco, como el anterior, se le añade un pequeño porcentaje de impurezas, es decir, elementos trivalentes o pentavalentes, el semiconductor se denomina extrínseco, y se dice que está dopado. Las impurezas deberán formar parte de la estructura cristalina sustituyendo al correspondiente átomo de silicio.

Un **Semiconductor tipo N** se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado añadiendo un cierto tipo de átomos al semiconductor para poder aumentar el número de portadores de carga libres (en este caso negativos o *electrones*).

Un **Semiconductor tipo P** se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado, añadiendo un cierto tipo de átomos al semiconductor para poder aumentar el número de portadores de carga libres (en este caso positivos o *huecos*).

# UNIDAD 1. INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA DEL SEMICONDUCTOR.

## 1.1 Átomos y Electrones

Un átomo es la unidad constituyente más pequeña de la materia que tiene las propiedades de un elemento químico. Cada sólido, líquido, gas y plasma se compone de átomos neutros o ionizados. Los átomos son muy pequeños; los tamaños típicos son alrededor de 100 pm (diez mil millonésima parte de un metro). No obstante, los átomos no tienen límites bien definidos y hay diferentes formas de definir su tamaño que dan valores diferentes pero cercanos. Los átomos son lo suficientemente pequeños para que la física clásica dé resultados notablemente incorrectos. A través del desarrollo de la física, los modelos atómicos han incorporado principios cuánticos para explicar y predecir mejor su comportamiento.

- Cada átomo se compone de un núcleo y uno o más electrones unidos al núcleo.
- El núcleo está compuesto de uno o más protones y típicamente un número similar de neutrones.
- Los protones y los neutrones son llamados nucleones.
- Más del 99,94 % de la masa del átomo está en el núcleo.
- Los protones tienen una carga eléctrica positiva.
- Los electrones tienen una carga eléctrica negativa y los neutrones tienen ambas cargas eléctricas, haciéndolos neutros.
- Si el número de protones y electrones son iguales, ese átomo es eléctricamente neutro.
- Si un átomo tiene más o menos electrones que protones, entonces tiene una carga global negativa o positiva, respectivamente, y se denomina ion (anión si es negativa y catión si es positiva).

Los electrones de un átomo son atraídos por los protones en un núcleo atómico por esta fuerza electromagnética. Los protones y los neutrones en el núcleo son atraídos el uno al otro por una fuerza diferente, la fuerza nuclear, que es generalmente más fuerte que la fuerza electromagnética que repele los protones cargados positivamente entre sí.

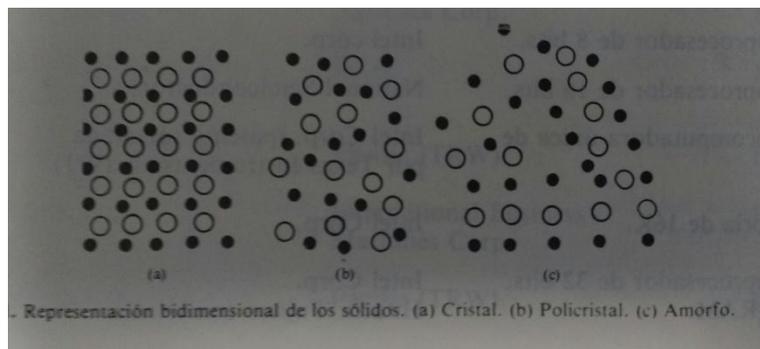
El número de protones en el núcleo define a qué elemento químico pertenece el átomo: por ejemplo, todos los átomos de cobre contienen 29 protones. El número de neutrones define el isótopo del elemento. El número de electrones influye en las propiedades magnéticas de un átomo. Los átomos pueden unirse a otro u otros átomos por enlaces químicos (en los cuales se comparten los electrones de dichos átomos) para formar compuestos químicos tales como moléculas y redes cristalinas. La capacidad de los átomos de asociarse y disociarse es responsable de la mayor parte de los cambios físicos observados en la naturaleza y es el tema de la disciplina de la química.

## 1.2 Propiedad y crecimiento de cristales semiconductores.

El primer paso en la fabricación de un dispositivo semiconductor es obtener materiales semiconductores, como germanio y silicio, del nivel de impurezas deseado. Los niveles de impurezas de menos de una parte en mil millones (1 en 1.000.000.000) se requiere para la mayor parte de la fabricación de semiconductores de hoy día.



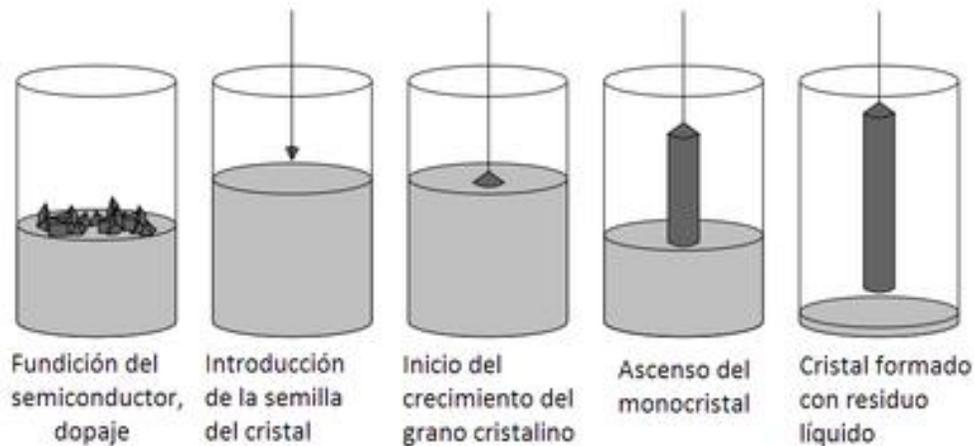
La materia prima se somete primero a una serie de reacciones químicas y a un proceso de refinación de zona para formar un cristal policristalino del nivel deseado de pureza. Los átomos del cristal policristalino se acomodan al azar, mientras que en el cristal deseado los átomos se acomodan en forma simétrica, uniforme, con estructura geométrica en enrejado.



La operación final antes de que la fabricación del semiconductor se lleve a cabo es la formación de un solo cristal de germanio o silicio. Esto se puede lograr usando la técnica de Czochralski o la de zona flotante.

**El proceso o método de Czochralski** consiste en un procedimiento para la obtención de lingotes monocristalinos. Fue desarrollado por el científico polaco Jan Czochralski partir de 1916. Este método es utilizado para la obtención de silicio monocristalino mediante un cristal semilla depositado en un baño de silicio. Es de amplio uso en la industria electrónica para la obtención de *obleas*, destinadas a la fabricación de transistores y circuitos integrados.

Para tener una idea de la funcionalidad que tiene este proceso en la industria microelectrónica, basta señalar que cada circuito integrado creado a partir de estas obleas miden 8mm de lado, esto hace que de cada oblea se obtengan de 120 a 130 circuitos. Cada oblea es tratada de forma que todos los circuitos se hacen a la vez, pasando por el mismo proceso en el mismo instante.



El método consiste en un crisol (generalmente de cuarzo) que contiene el semiconductor fundido, por ejemplo germanio. La temperatura se controla para que esté justamente por encima del punto de fusión y no empiece a solidificarse. En el crisol se introduce una varilla que gira lentamente y tiene en su extremo un pequeño monocristal del mismo semiconductor que actúa como semilla. Al contacto con la superficie del semiconductor fundido, éste se agrega a la semilla, solidificándose con su red cristalina orientada de la misma forma que aquella, con lo que el monocristal crece. La varilla se va elevando y, colgando de ella, se va formando un monocristal cilíndrico. Finalmente se separa el lingote de la varilla y pasa a la fusión por zonas para purificarlo.

Al controlar con precisión los gradientes de temperatura, velocidad de tracción y de rotación, es posible extraer un solo cristal en forma de lingote cilíndrico. Con el control de estas propiedades se puede regular el grosor de los lingotes.

Para entender mejor este proceso véase el siguiente <https://www.youtube.com/watch?v=HWj9ku7qSSc>

Las situaciones de inestabilidad indeseables en la masa fundida se pueden evitar mediante la monitorización y la visualización de los campos de temperatura y la velocidad durante el proceso de crecimiento de cristales. Cuando la temperatura asciende, el propio lingote se va fundiendo, pero si desciende, se forman agregados que no son monocristalinos.

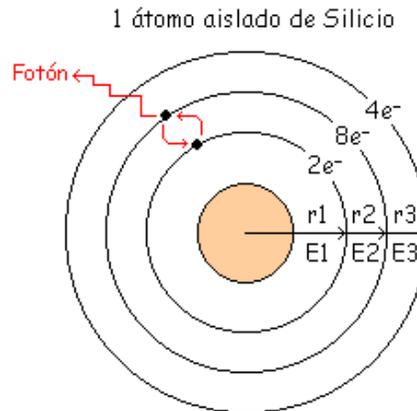
Este proceso se realiza normalmente en una atmósfera inerte, como argón, y en una cámara inerte, como cuarzo.

### 1.3 Bandas de energía y portadores de carga en semiconductores.

Existen diversas maneras de darle energía a un electrón, por:

- Energía Térmica.
- Energía Luminosa.
- Campo Eléctrico.
- etc...

Si se le da energía a un electrón para que pase de E1 a E2, este electrón puede pasar de una órbita a otra.



Ese electrón vuelve enseguida, al volver tiene que ceder o soltar la energía. Puede hacerlo de 2 formas:

- Al volver sale un fotón de luz, cuya aplicación de esta característica se ve en los Diodos Led, que dependiendo de las energías tendrán diferentes colores, y también pueden soltar fotones invisibles a frecuencias en las que la vista no puede captarlas.
- También se suelta energía en forma de calor, energía térmica (calentamiento del diodo).

Las energías las representaremos gráficamente de esta manera:



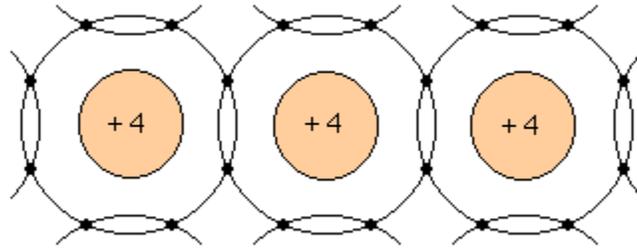
Hasta ahora hemos visto un átomo aislado, pero en un cristal tenemos que aplicar el "Principio de Exclusión de Pauli":

"En un sistema electrónico no puede haber 2 electrones con los mismos números cuánticos".

Esto es, que no puede haber 2 electrones con la misma energía.

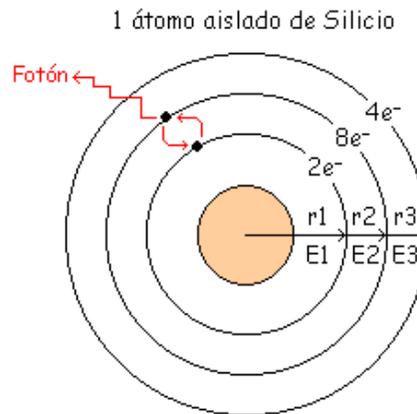
### **Bandas de Energía en un Semiconductor Intrínseco**

Anteriormente hemos visto que los semiconductores intrínsecos eran aquellos que no tenían impurezas, esto es, todos son átomos de Silicio.

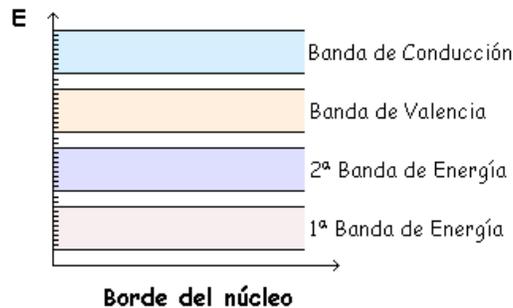


Al aplicar el principio de exclusión de Pauli, el electrón de energía  $E_1$  de un átomo y el electrón de energía  $E_1$  del átomo vecino se han de separar en energía. Como hay una gran cantidad de átomos aparecen muchos niveles energéticos con una separación muy pequeña, formando la 1ª Banda de Energía.

Los electrones de energía  $E_2$  se separan en energía formando la 2ª Banda de Energía.



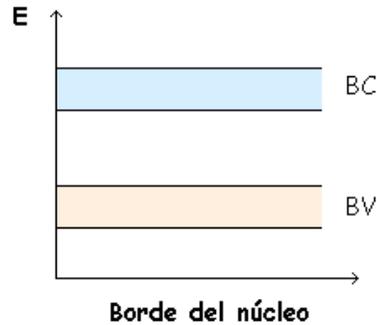
Y así sucesivamente con el resto de energías se van creando Bandas de Energía (grupos de niveles energéticos). El resultado es el siguiente:



Banda de Conducción: Es la última banda de energía del átomo.

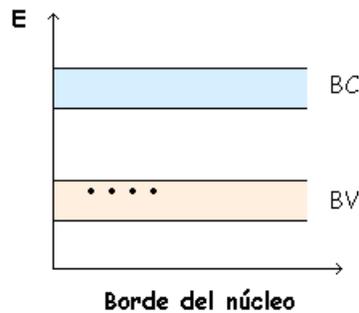
Banda de Valencia: Es la última banda de energía del átomo que está completa en número de electrones.

Como es difícil sacar un electrón de las bandas inferiores, no nos interesan las 2 bandas inferiores, no las tendremos en cuenta, así tendríamos:

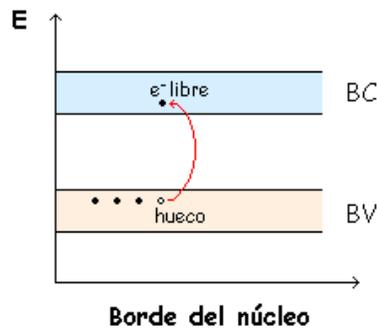


Estas 2 bandas son las creadas por los 4 electrones de la última órbita del átomo.

A 0 °K los 4 electrones de cada átomo están en la Banda de Valencia (cada uno en un radio o energía permitido).



A 300 °K (27 °C, temperatura ambiente) o a mayor temperatura, algún electrón puede conseguir suficiente energía como para pasar a la Banda de Conducción, dejando así un hueco en la Banda de Valencia.



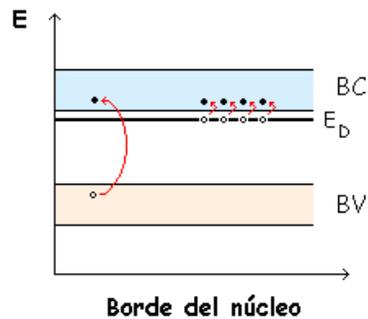
Recordar que a esto le llamábamos Generación Térmica de Pares electrón libre-hueco. Cuanto más aumente la temperatura, más electrones suben debido a la generación térmica.

Por eso un semiconductor a 0 °K no conduce y si aumenta la temperatura conduce más. Ahora veremos que es lo que ocurre con los semiconductores con impurezas.

### **Bandas de Energía en un Semiconductor tipo n**

Tenemos muy pocos átomos de impurezas (+5) en comparación con los átomos normales de Silicio (+4). Como se impurifica muy poco, los átomos de +5 están muy alejados y no se influyen entre sí, pudiendo tener electrones de átomos diferentes la misma energía y por lo tanto están todos al mismo nivel. Esa energía que tienen se llama "Energía del átomo Donador" ( $E_D$ ).

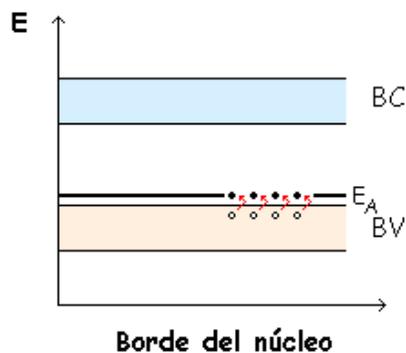
En cuanto se le dé una pequeña energía los electrones suben a la BC y se convierten en libres.



### **Bandas de Energía en un Semiconductor tipo p**

En este caso las impurezas son átomos de +3, y como en el caso anterior hay muy pocos y están muy alejados por lo que los electrones de átomos diferentes están al mismo nivel energético. Esa energía es la "Energía del átomo Aceptor" ( $E_A$ ).

A 300 °K o más, el electrón cercano a  $E_A$  sube desde la BV y deja un hueco en la BV mientras que la  $E_A$  se llena de electrones. Se sigue dando generación térmica también, pero como antes es despreciable.



### **Portadores de carga en semiconductores.**

En un cristal hay dos clases de portadores de carga: electrones y huecos. Si bien estos últimos son ficticios, ya que resultan de un estado vacante en la banda de valencia, esta condición no invalida los modelos.

### 1.4 Portadores en exceso.

En teoría de semiconductores, se denominan **portadores en exceso** a los electrones o huecos encargados del transporte de corriente eléctrica que se encuentran en exceso en un material semiconductor dopado como tipo N o tipo P.

En un semiconductor tipo N, el cual consiste en un material semiconductor puro al cual se le han agregado átomos de otro elemento químico que posea al menos un electrón adicional al que posee naturalmente dicho semiconductor (usualmente Fósforo, Arsénico o Antimonio); hay en total más electrones libres debido a los átomos de las impurezas agregadas, que huecos, por lo cual en este tipo de material semiconductor, los electrones son los portadores mayoritarios, mientras que los huecos (carencia de un electrón), son los portadores minoritarios.

Para el caso de un semiconductor tipo P, que consisten en un material semiconductor puro al cual se le han agregado átomos de otro elemento químico que pertenece al grupo III de la tabla periódica de los elementos (usualmente Aluminio, Galio, e Indio) los portadores mayoritarios son los huecos (o carencia de electrones), mientras que los portadores minoritarios son los electrones.

### Conductividad

La conductividad es el nombre que designa a una propiedad física que está presente en algunos cuerpos, materiales o elementos y que hace que los mismos sean capaces de conducir a través de ellos a la electricidad o al calor. Es decir, aquellos materiales conductores de electricidad o de calor tienen la facilidad de dejar pasar libremente a través de ellos a la corriente eléctrica.

Ahora bien, existen condiciones básicas que determinan esa capacidad conductora y que son la estructura molecular y atómica, la temperatura que presentan ese cuerpo o material y algunas otras características particulares.

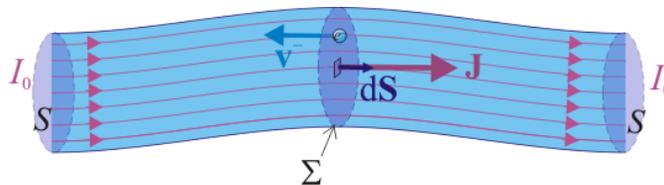
En tanto, en materia de conductividad se destacan sin dudas los metales, por su elevada conducción de la electricidad gracias a su estructura atómica que así lo facilita.

### Densidad de Corriente

La densidad de corriente, designada por el símbolo  $J$ , es la corriente media por unidad de área (sección transversal) del conductor, es decir, suponiendo una distribución uniforme de la corriente:

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

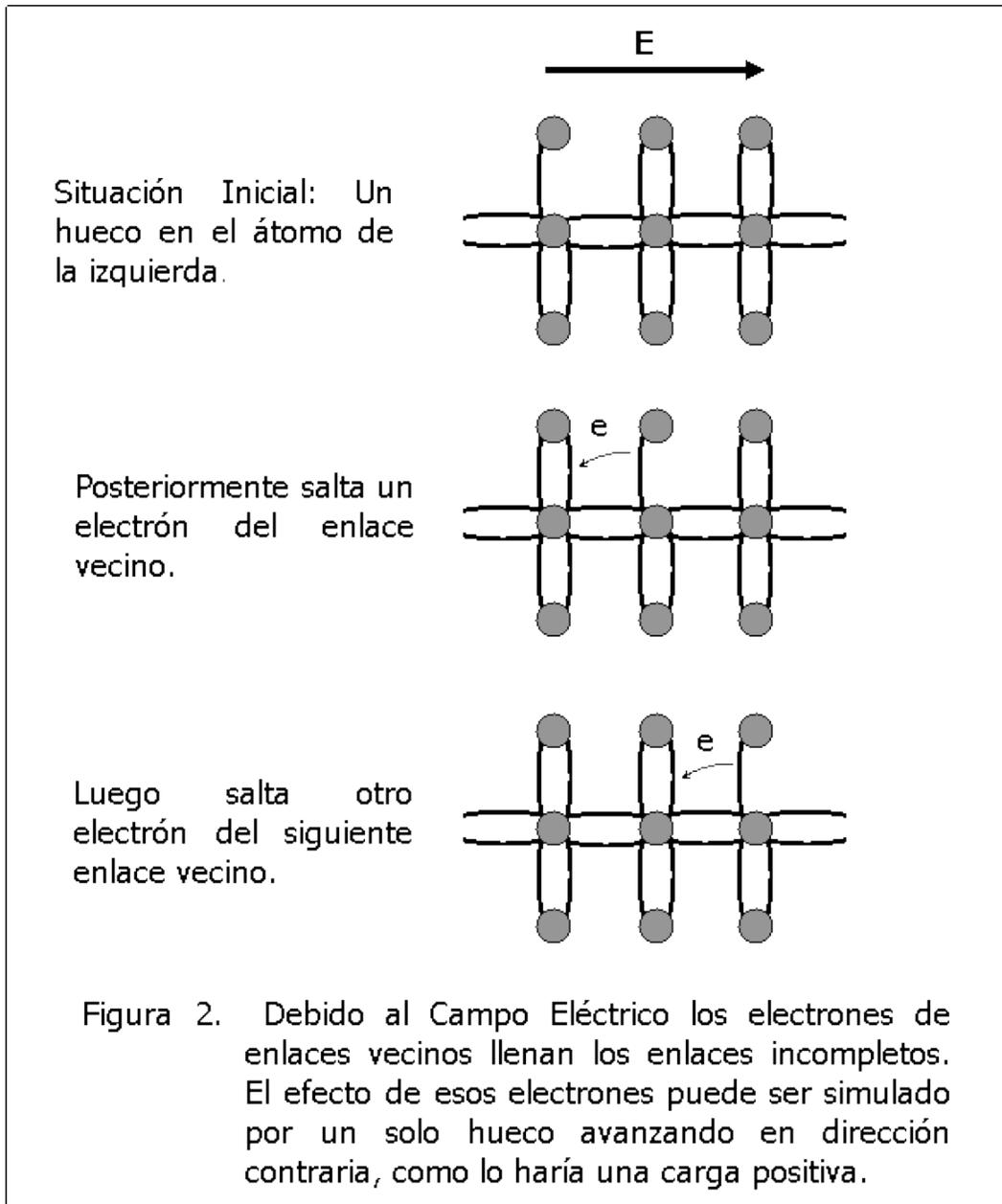
En cuanto a sus unidades,  $J$  se mide en el S.I. en  $A/m^2$  pero es frecuente expresarlo en  $A/mm^2$  ya que, evidentemente, al tratarse de la sección de un conductor, es más manejable realizar la medición en  $mm^2$ .



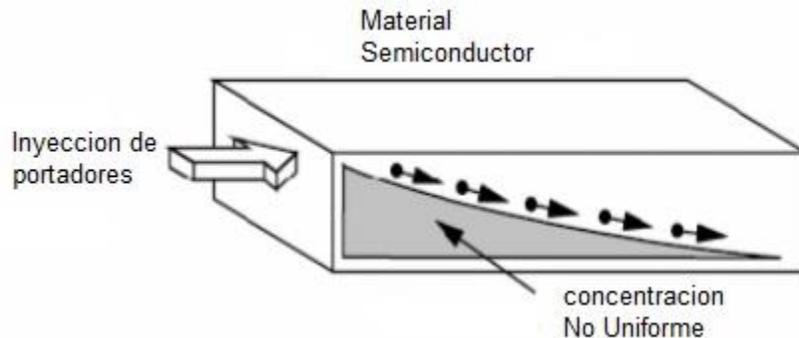
### Conducción de la corriente en un material semiconductor

Puede ser de dos tipos:

Corriente de Arrastre.- Electrones que saltan entre enlaces atómicos incompletos, (huecos) como se presenta en la Figura 2, en ella se representan, en un modelo de dos dimensiones, los enlaces covalentes de tres átomos de Silicio. Inicialmente el primer átomo presenta un enlace incompleto con su vecino de arriba, y hemos supuesto que el Campo Eléctrico externo está aplicado hacia la derecha, tal como se indica:



Corriente de difusión.- Esta corriente aparece en forma espontánea cuando de un lado del semiconductor hay mayor concentración de portadores que en otro lado, es decir, cuando existe un gradiente de concentración de portadores. Es un efecto puramente estadístico-térmico similar al que se produce cuando una gota de tinta cae en un vaso de agua en reposo, o cuando en una esquina de un cuarto cerrado (sin brisa) se abre una botella con perfume. En todos estos casos la difusión ocurre automáticamente. De la misma manera, la corriente de difusión en un semiconductor no necesita campo eléctrico externo aplicado para producirse.



### Fotoconductividad

La fotoconductividad es un fenómeno óptico y eléctrico en el que un material se vuelve un mejor conductor eléctrico debido a la absorción de radiación electromagnética, pudiendo esta ser:

- Luz infrarroja
- Luz ultravioleta
- Luz visible
- Radiación gamma

Fue observado por vez primera en 1873 en el selenio por el ingeniero inglés Willoughby Smith.

Al conectar a un circuito un material fotoconductor, este pasa a funcionar como un resistor cuya resistencia depende de la intensidad de la luz. Así, el material pasa a llamarse fotorresistor.

La aplicación más común de los fotorresistores es como fotodetectores.

El principio básico sobre el que se basa la fotoconductividad es muy simple:

Cuando un fotón de energía mayor o igual que la brecha del material incide sobre un semiconductor puede ser absorbido por el material, pasando un electrón a la banda de conducción, dejando un hueco (vacío) en la banda de valencia; estos dos portadores contribuyen al aumento de la conductividad del material. En este caso la conductividad es denominada intrínseca.

## UNIDAD 2. UNIÓN P-N.

### Introducción.

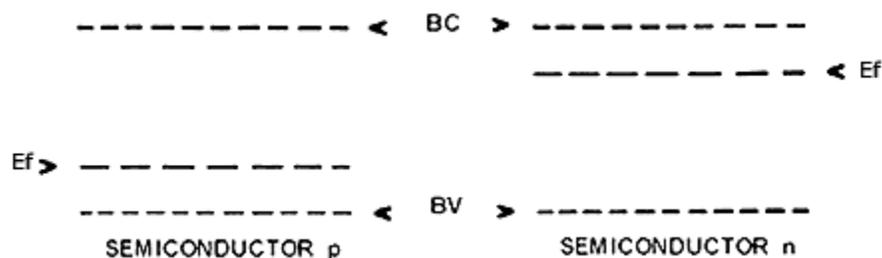
Se denomina unión P-N a la estructura fundamental de los componentes electrónicos comúnmente denominados semiconductores, principalmente diodos y transistores. Está formada por la unión metalúrgica de dos cristales, generalmente de silicio (Si), aunque también se fabrican de germanio (Ge), de naturalezas P y N según su composición a nivel atómico. Estos tipos de cristal se obtienen al dopar cristales de metal puro intencionadamente con impurezas, normalmente con algún otro metal o compuesto químico. Es la base del funcionamiento de la energía solar fotovoltaica.

En los temas anteriores se han estudiado las propiedades de los semiconductores en equilibrio térmico y fuera del equilibrio. Los semiconductores intrínsecos tienen un uso muy limitado, sin embargo los semiconductores dopados con impurezas son la base de los dispositivos que a partir de ahora vamos a estudiar. Si sobre la superficie de un semiconductor previamente dopado con impurezas receptoras se difunden átomos donadores, se forma una unión de propiedades muy interesantes llamada unión p-n. La unión p-n desempeña un importante papel en las aplicaciones de la electrónica moderna, así como en la construcción y aplicación de otros dispositivos semiconductores. Se utiliza por ejemplo en aplicaciones de rectificación y conmutación, además es un dispositivo fundamental en la construcción de otros dispositivos semiconductores tales como los transistores bipolares, tiristores, transistores de efecto de campo o dispositivos para aplicación en microondas o fotónicos. En esta lección se van a presentar las características ideales estáticas y dinámicas de la unión p-n en base al conocimiento adquirido en la unidad anterior.

### Nivel de Fermi

El "Nivel de Fermi" es el término utilizado para describir la parte superior del conjunto de niveles de energía de electrones a la temperatura de cero absoluto. Los electrones son fermiones y por el principio de exclusión de Pauli no pueden existir en estados de energías idénticas. En el cero absoluto, estos se encuentran en los niveles más bajos de energía disponibles de los estados de energía de electrones, constituyendo el llamado "mar de Fermi" ó "líquido de Fermi". El nivel de Fermi es la superficie de ese mar en el cero absoluto, donde no hay electrones que tengan suficiente energía para elevarse por encima de esa superficie. El concepto de la energía de Fermi es de importancia crucial para la comprensión de las propiedades eléctricas y térmicas de los sólidos. Ambos procesos eléctrico y térmico implican valores de energías de una pequeña fracción de un electrón-voltio. Pero las energías de Fermi de los metales están en el orden de electrón-voltios. Esto implica que la gran mayoría de los electrones no puede recibir energía de esos procesos, porque no existen estados de energía disponibles. Limitado a una pequeña profundidad de energía, estas interacciones constituyen las "ondas en el mar de Fermi".

El nivel de Fermi juega un papel importante en la teoría de bandas de sólidos. En los semiconductores dopados de tipo p y tipo n, el nivel de Fermi se desplaza por las impurezas, según lo ilustran bandas prohibidas. El nivel de Fermi se conoce en otros contextos como el potencial químico de electrones.



**Contacto de dos materiales.**- Se dice que dos materiales están en contacto, cuando la proximidad entre sus superficies es del orden de la separación interatómica.

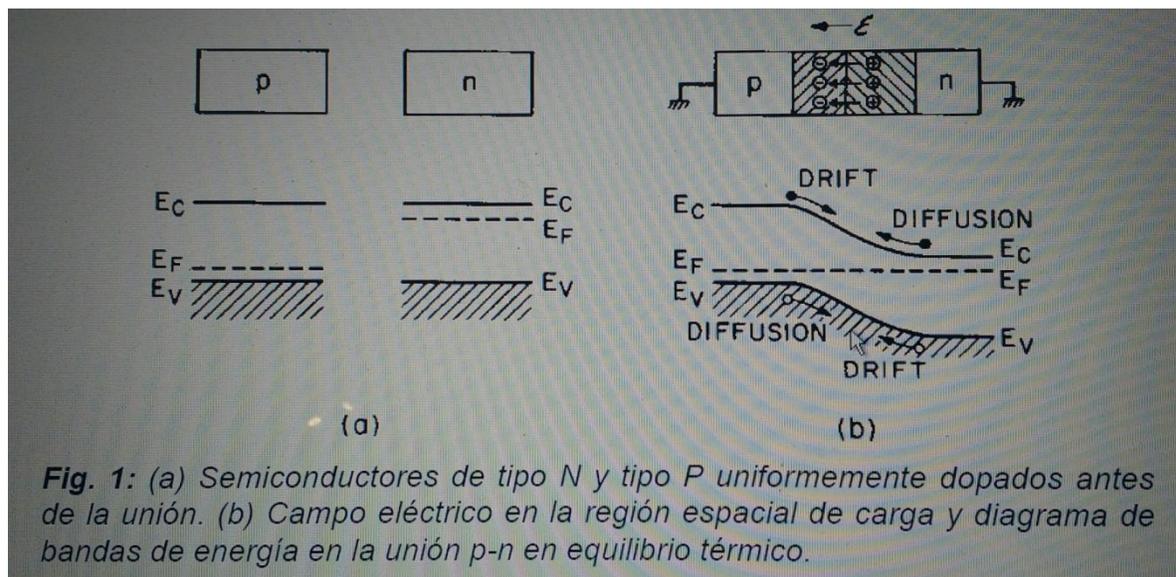
**Unión de dos materiales.**- Se dice que dos materiales están unidos cuando se ha efectuado un proceso metalúrgico en sus fronteras. (Aleación, soldadura, difusión, etc)

## 2.1 Unión P-N en Estado de Equilibrio.

En equilibrio se entenderá que el semiconductor se encuentra a una temperatura uniforme y que no existen perturbaciones externas, tales como luz, voltajes, radiación, etc. Además que la concentración de huecos es igual a la concentración de átomos impureza.

En este objetivo analizaremos la unión abrupta de dos materiales tipo P y tipo N, unión abrupta se entiende como la transición de impurezas del semiconductor tipo P al tipo N en una región despreciable. Esta unión puede ser del orden de espesores menores a  $10^{-6}$  cm.

La Fig. 1a muestra dos materiales semiconductores, uno de tipo P y otro de tipo N separados entre sí. En ellos el nivel de Fermi ( $E_F$ ) está cerca de la banda de valencia para la muestra de tipo P y cerca de la banda de conducción para el material de tipo N. Por otra parte, el material de tipo P tiene una concentración de huecos mucho mayor que de electrones y al revés ocurre en el material de tipo N.



### **Formación de la región espacial de carga.**

Una unión p-n se forma cuando se unen estas dos regiones. Para simplificar vamos a suponer el caso en que el límite entre las regiones P y N represente una *unión abrupta*. En este tipo de unión la transición entre las regiones P y N tiene lugar en una distancia nula. Por lo tanto, hay un cambio brusco en el dopaje yendo desde P hasta N. El hecho de unir ambos tipos de material provoca un elevado gradiente de concentración de portadores en las proximidades de la unión.

En este estado de equilibrio, habrá cierto número de electrones (portadores mayoritarios en la región N), los cuales tendrán suficiente energía para remontar la barrera de potencial y difundirse sobre la región P (Diffusion), a este movimiento de electrones se le conoce como Corriente de Recombinación ( $J_{nr}$ ). Los electrones que componen la Corriente de Recombinación al llegar a la región P, se comportan como

portadores minoritarios y después de un tiempo la mayoría desaparecen por recombinación, los sobrantes podrán fácilmente resbalarse en la barrera de potencial hacia el lado N (Drift), a este movimiento de electrones se la llama Corriente de Generación ( $J_{ng}$ ). El mismo razonamiento se aplica para los huecos, existiendo una  $J_{pr}$  y  $J_{pg}$ .

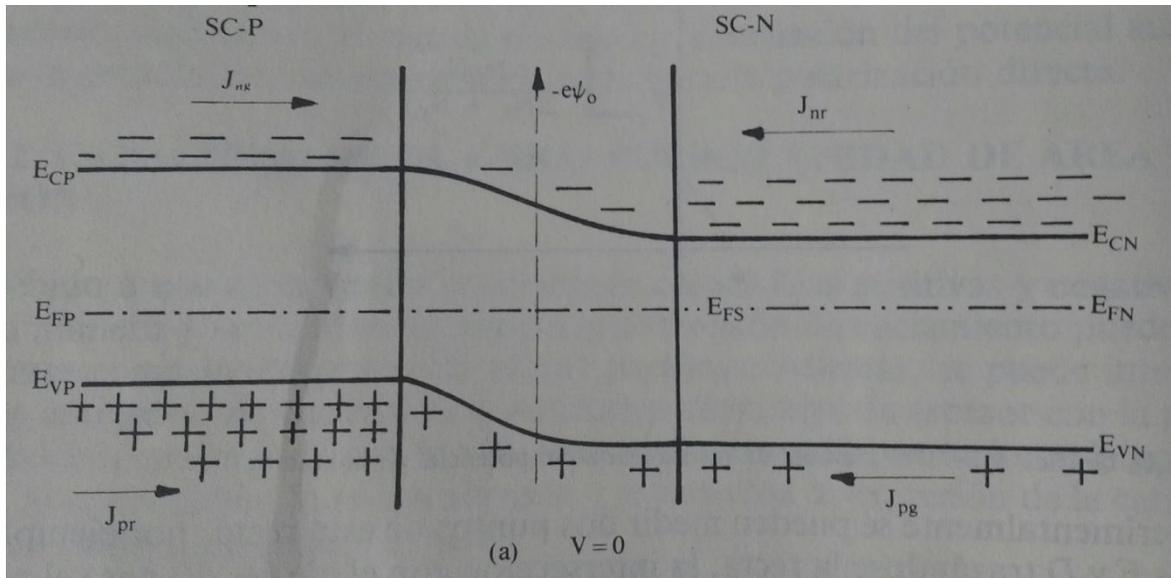
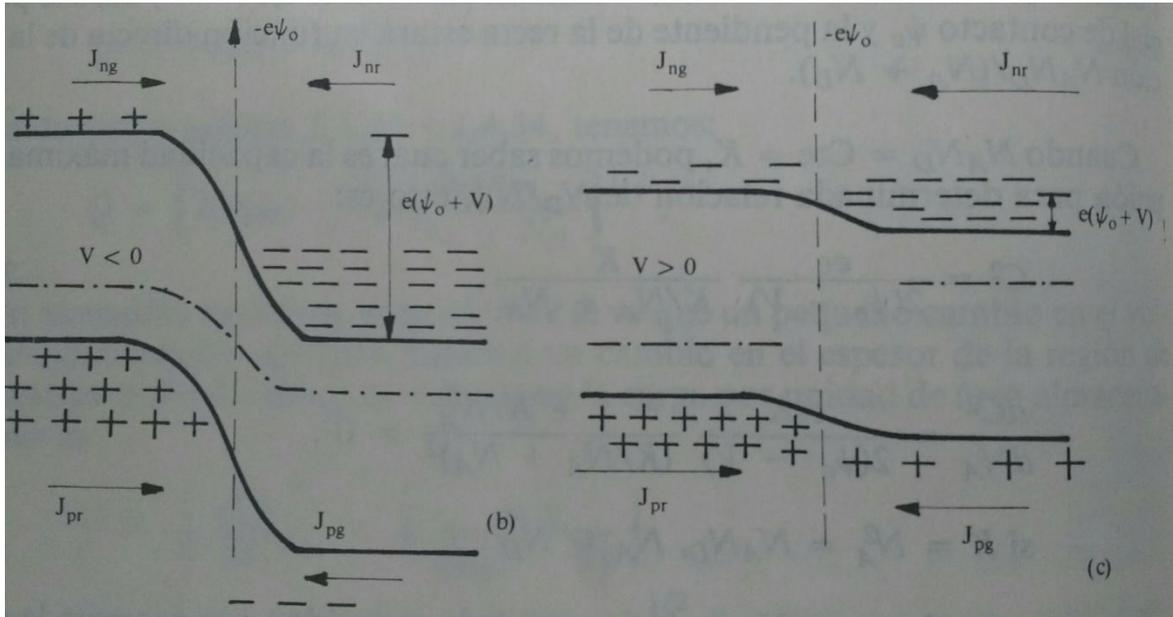


Fig. 2a Diagrama de potencial de la Unión P-N en función de potencial aplicado igual a cero. (En equilibrio).

## 2.2 Condiciones de Polarización.

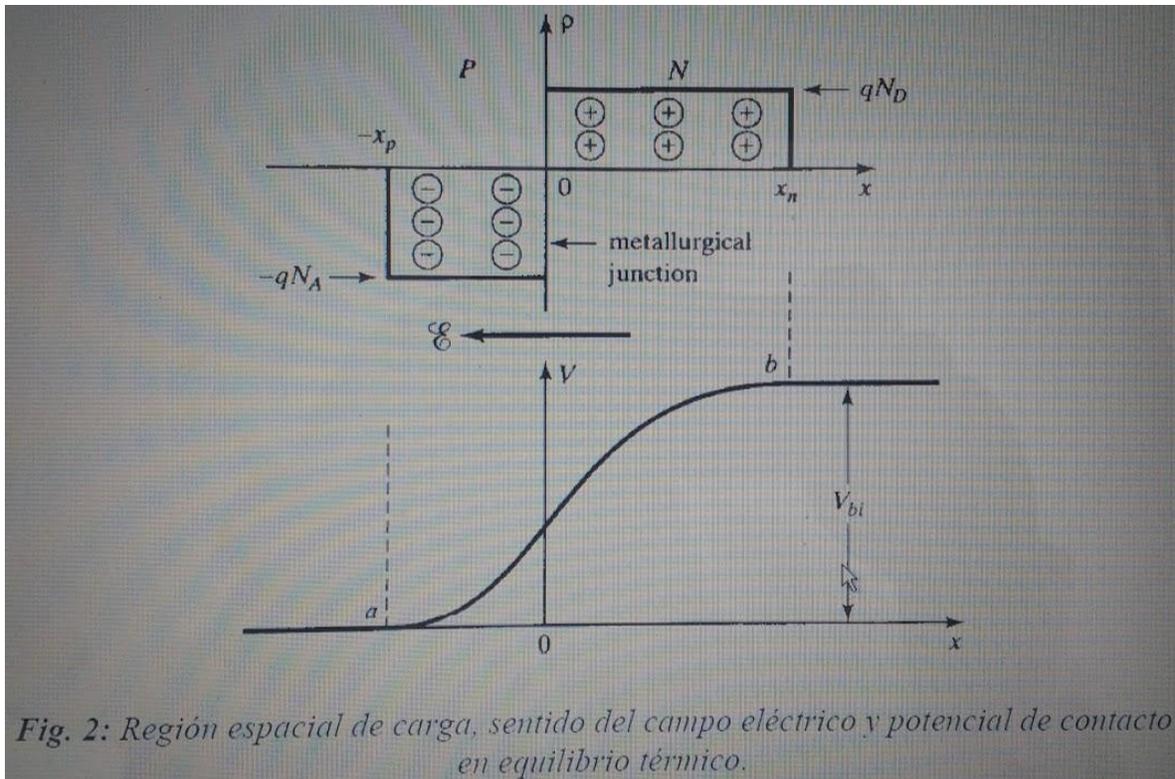
Ya se ha analizado la naturaleza física de la unión semiconductor P-N y algunas manifestaciones físicas de la estructura de la misma, tales como campo eléctrico, potencial de contacto, etc., tomando como base el modelo aproximado para la unión abrupta desde el punto de vista de un flujo electrónico cuando la unión no está en equilibrio.



En el diagrama anterior, la densidad de electrones que fluyen del semiconductor P al semiconductor N y la densidad de huecos que fluyen del N al P debido a portadores generados térmicamente (portadores minoritarios), son proporcionales a la altura de la barrera de potencial ( $\psi_0$ ), mientras que la densidad de electrones que fluyen del semiconductor N al P, y la densidad de huecos que fluyen del semiconductor P al N debido a portadores mayoritarios, son proporcionales a la altura de la barrera de potencial ( $\psi_0$ ) modificada por el potencial externo  $V$ .

Así pues se puede deducir lo siguiente:

Existe una corriente de recombinación de huecos de la región P hacia la región N y por otro lado, una corriente de recombinación de electrones de la región N hacia la P. Pero además, la marcha o difusión de estos portadores de su región inicial a la otra deja al descubierto algunos iones fijos en la red cristalina, iones negativos  $-NA$  en la región P e iones positivos en la región N,  $+ND$ . Dicha zona es llamada **zona de agotamiento o región espacial de carga**. En consecuencia, se forma una zona con cargas negativas fijas en la cara P de la unión y una zona con cargas positivas fijas en la cara N. La presencia de estas cargas fijas da lugar a la aparición de un fuerte campo eléctrico cuyas líneas de campo se dirigen desde la zona N hacia la zona P, dicho campo eléctrico provoca una diferencia de potencial (Voltaje), al cual se le llamará Potencial de Contacto ( $V_{bi}$ ).



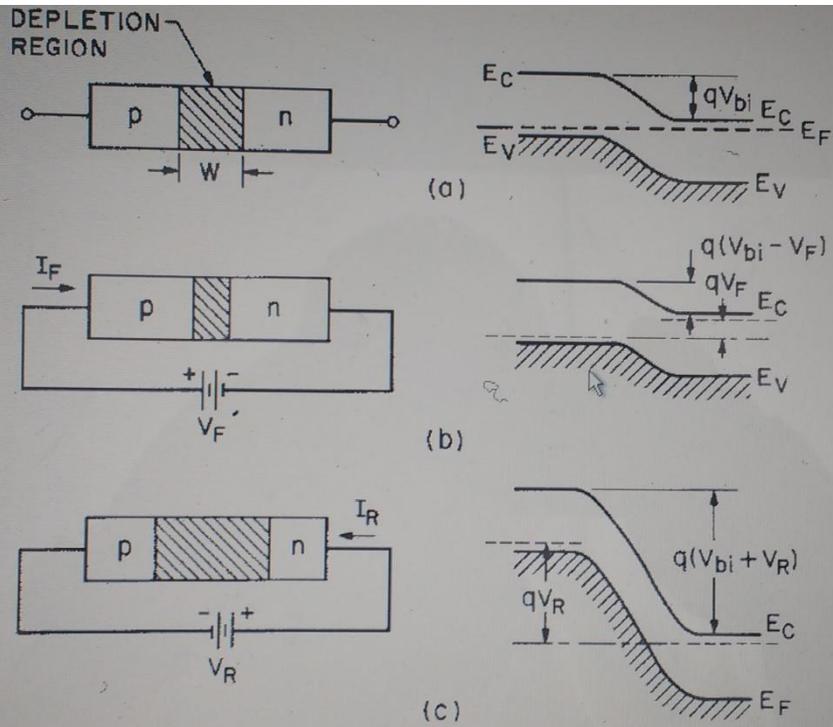
*Fig. 2: Región espacial de carga, sentido del campo eléctrico y potencial de contacto en equilibrio térmico.*

**Polarización directa:** En este caso, la parte P se somete a un potencial positivo respecto de la parte N,  $V_F > 0$ . El efecto es que el potencial electrostático de contacto en la unión decrece en dicha cantidad  $V_F$ , es decir,  $V_{bi} - V_F$ , reduciéndose además la región espacial de carga, cuya anchura depende de la diferencia de potencial a la que está sometida la unión (Fig. 11b). Los niveles energéticos en el semiconductor de tipo N se desplazan hacia arriba en una cantidad  $q \cdot V_F$ , que es la misma diferencia que existe entre los niveles de Fermi de los semiconductores de tipo N y P al existir una diferencia de potencial entre ellos de  $V_F$ .

La reducción de la barrera de potencial cuando la polarización es directa hace que la corriente de difusión predomine sobre la de arrastre. Esto permite que los portadores mayoritarios atraviesen la unión, convirtiéndose entonces en minoritarios y dando lugar a una corriente medible. Se tiene, por tanto, una inyección de portadores minoritarios, es decir, de electrones en la zona P y de huecos en la N.

**Polarización inversa:** En este caso, la parte N tiene una tensión positiva aplicada  $V_R > 0$  con respecto de la P. A diferencia del anterior caso, el potencial electrostático se ve aumentado en la cantidad  $V_R$ , es decir,  $V_{bi} + V_R$ , aumentando la anchura de la región espacial de carga (Fig. 11c). El consiguiente aumento del campo eléctrico en la región espacial de carga hace que las corrientes de regeneración se vean muy reducidas, resultando únicamente una pequeña corriente inversa de generación.

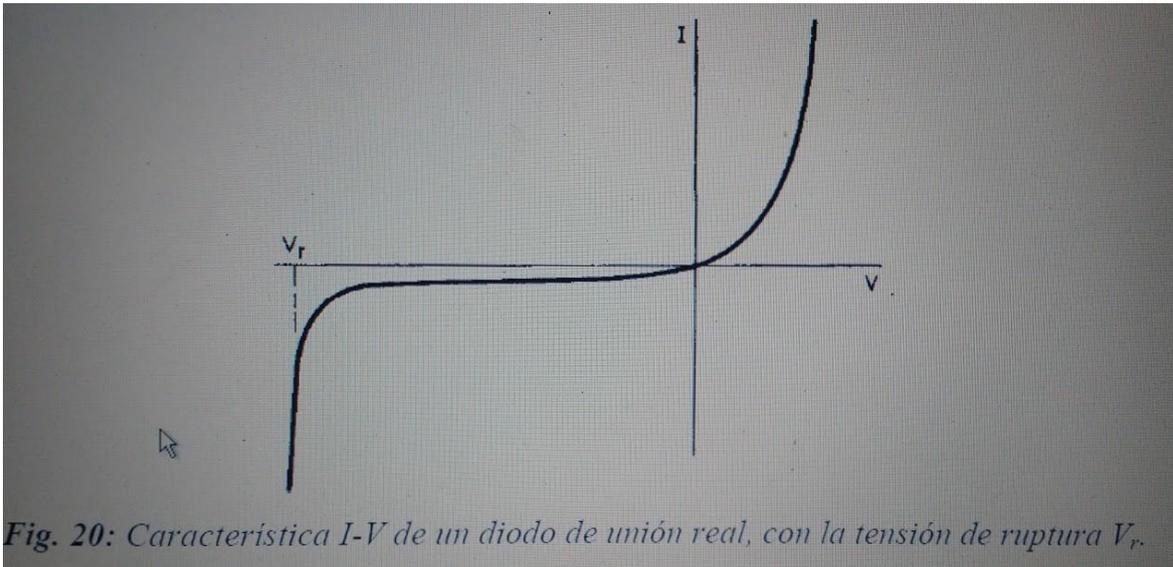
Sustituyendo dichos valores de tensión en la unión  $V_j = V_{bi} - V$  donde  $V$  es positivo para el caso de polarización directa ( $V_F$ ) y negativo para el caso de polarización inversa ( $-V_R$ ), en lugar de  $V_{bi}$  en la expresión que nos da la anchura de la región espacial de carga en el equilibrio podemos obtener una nueva expresión para  $W$ , ahora ya fuera del equilibrio, en el caso de una unión abrupta:



*Fig. 11: Representación esquemática de la anchura de la región espacial de carga y de los diagramas de bandas de la unión p-n bajo distintas condiciones de polarización. (a) En equilibrio térmico. (b) En polarización directa. (c) En polarización inversa.*

## 2.3 Fenómenos de ruptura.

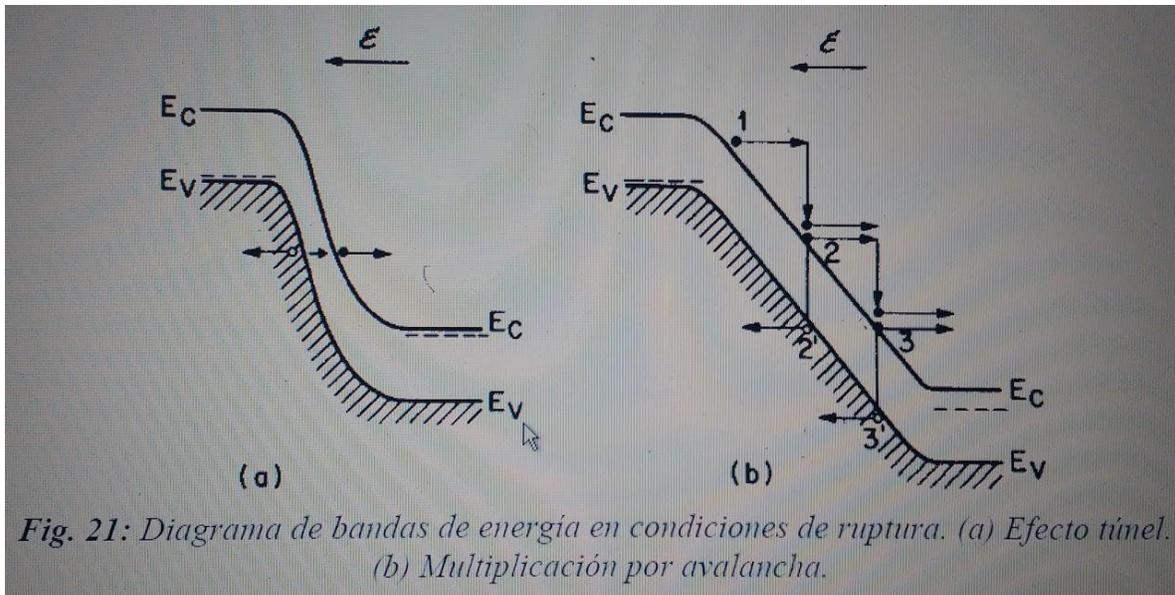
El fenómeno de ruptura aparece en las uniones p-n cuando se las somete a una tensión inversa de elevado valor. En principio, para pequeños valores de la tensión inversa aplicada, la corriente que circula por la unión es aproximadamente constante e igual a  $-I_s$  (Fig. 20). Sin embargo, cuando la tensión inversa aplicada toma valores relativamente elevados se llega a un momento en el cual la corriente crece bruscamente alcanzando valores muy grandes, es el fenómeno de la ruptura. Al valor de la tensión inversa aplicada para el cual ocurre este aumento brusco de la corriente recibe el nombre de tensión de ruptura  $V_r$ .



El proceso de ruptura por sí solo es destructivo y el aumento de corriente debe ser limitado por un circuito externo a la unión p-n para evitar el aumento excesivo de calor en la unión. Fundamentalmente se dan dos tipos de fenómenos de ruptura: a) ruptura por efecto túnel o zéner y b) ruptura por avalancha. Consideraremos brevemente el primero de ellos y se entrará en más detalles para el caso de multiplicación por avalancha, ya que la ruptura por avalancha impone un límite máximo para la tensión inversa en la mayor parte de diodos. La ruptura por avalancha también limita la tensión de colector en un transistor bipolar y la de drenador de un MOSFET. Además los mecanismos de multiplicación por avalancha pueden generar potencia a nivel de microondas (diodo IMPATT) y pueden ser utilizados para detectar señales ópticas (foto detector por avalancha).

- a) Ruptura de multiplicación por avalancha: Fenómeno de ruptura provocado por la creación en cadena de pares (e-) (h+) en condiciones de campo eléctrico intenso.

Desde un punto de vista cualitativo, el proceso de multiplicación por avalancha ocurre cuando en presencia de un campo eléctrico suficientemente elevado se genera un electrón de procedencia térmica (denotado por 1). Dicho electrón adquiere energía cinética a expensas de la del campo eléctrico. Si este campo es suficientemente elevado, la energía cinética puede ser la suficiente como para producir, mediante colisión con un átomo de la red cristalina, un par electrón-hueco (denotado por 2 y 2'). Este hecho se denomina ionización por impacto. El par electrón-hueco también puede aumentar su energía cinética a expensas del campo aplicado y generar otro par electrón-hueco (3 y 3'). Este proceso en presencia del campo eléctrico puede ser multiplicativo aumentando la conductividad de las regiones P y N y, en consecuencia, la corriente que pasa a su través. Este es el llamado fenómeno de ruptura a través de la multiplicación por avalancha (Fig. 21b).



*Fig. 21: Diagrama de bandas de energía en condiciones de ruptura. (a) Efecto túnel. (b) Multiplicación por avalancha.*

b) Ruptura por efecto túnel o zéner.

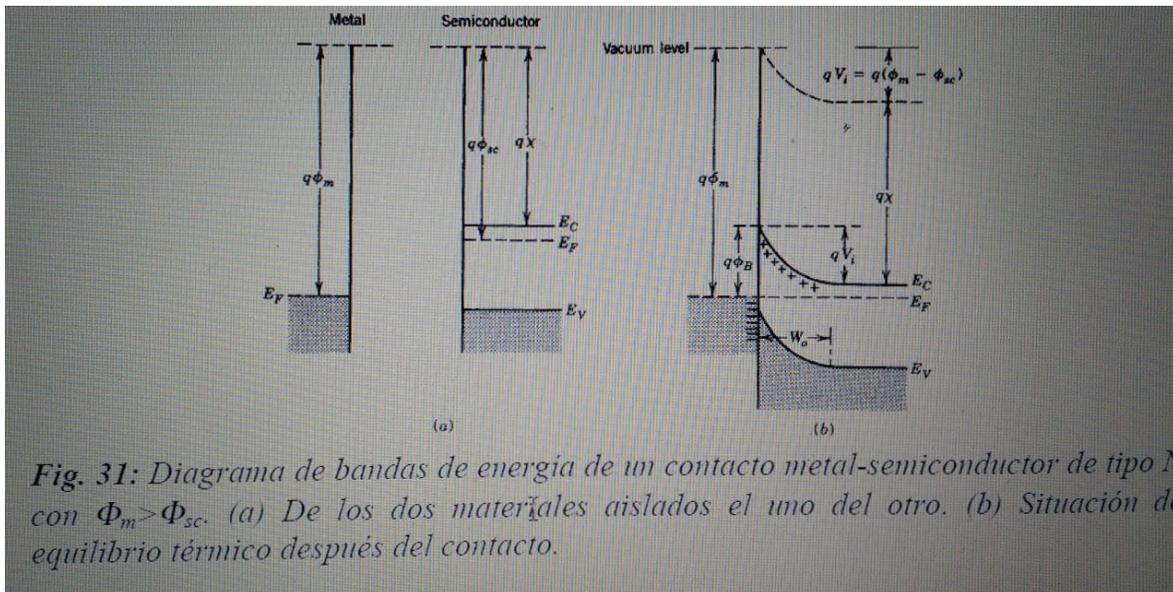
El efecto túnel o zéner se produce cuando un campo eléctrico intenso se aplica a la unión p-n. Tiene su explicación en las propiedades mecánico-cuánticas de los electrones. En concreto bajo estas condiciones de campo eléctrico un electrón situado en la banda de valencia puede efectuar una transición a la banda de conducción penetrando o saltándose la barrera de potencial (Fig. 21a).

## 2.4 Unión Metal-Semiconductor.

Los diodos llamados Schottky son dispositivos formados mediante la unión de un metal y un semiconductor. En esta unión se crea una barrera de potencial (barrera Schottky) debido a la diferente concentración de electrones libres entre ambos elementos. La conducción se efectúa, por tanto, mediante portadores mayoritarios (electrones), al contrario que en los diodos de unión, lo cual permite una inmediata respuesta, muy útil en aplicaciones de conmutación rápida (lógicas digitales de alta velocidad). Por otra parte, también poseen una menor altura de la barrera de potencial con respecto al diodo de unión (aproximadamente 0.3V para los diodos Schottky frente a los 0.6V de los de unión). Fig. 31 muestra el proceso de formación de la barrera de acuerdo con la teoría de Schottky-Mott. Vamos a suponer que el semiconductor es de tipo N y está uniformemente dopado. Fig. 31a muestra los dos componentes (metal y semiconductor tipo N) aislados el uno del otro. Se ha tomado como nivel de referencia de las energías el nivel superior que es el llamado nivel de vacío, el cual representa la energía de un electrón en reposo fuera de los materiales. La función de trabajo  $q \cdot \Phi_m$  (del metal) y  $q \cdot \Phi_{sc}$  (del semiconductor), son la diferencia de energía entre el nivel de vacío y el nivel de Fermi del material y, por tanto, representan la energía necesaria para llevar un electrón que está en el nivel de Fermi del material al nivel de vacío fuera de este. La afinidad electrónica del semiconductor  $q \cdot \chi$  denota la diferencia energética entre el nivel inferior de la banda de conducción  $E_C$  y el nivel de vacío. En un semiconductor determinado,  $q \cdot \chi$  es independiente del nivel de dopado (magnitud constante), pero sin embargo  $q \cdot \Phi_{sc}$  no lo es.

Para que la unión metal-semiconductor tipo N se comporte como una unión rectificadora se ha de cumplir la relación  $q \cdot \Phi_m > q \cdot \Phi_{sc}$ . En caso contrario, los electrones pueden ser transferidos de un lado a otro con facilidad.

Cuando el metal es puesto en contacto con el semiconductor, los electrones de la banda de conducción del semiconductor fluyen hacia el metal hasta que los niveles de Fermi en los dos materiales se alinean. Este paso se debe por tanto a una diferente densidad de electrones libres en los dos materiales. El diagrama de bandas resultante puede observarse en Fig. 31b.



Esta transferencia de electrones deja en el semiconductor una carga positiva fija, debida a los iones sin compensar  $+DN$ , creándose una carga negativa en el metal (debida a los electrones transferidos) que iguala a la positiva.

Se forma, por tanto, una región de carga espacial de anchura  $W_0$  en el semiconductor de tipo N. Sin embargo, la carga producida por los electrones en el metal es una carga cuyo espesor es despreciable y es, esencialmente, una carga superficial. La presencia de estas cargas establece un campo eléctrico en el sentido desde el semiconductor al metal.

Una vez alcanzada la situación de equilibrio térmico, el flujo de electrones del semiconductor al metal es igualado por otro flujo de electrones del metal al semiconductor.

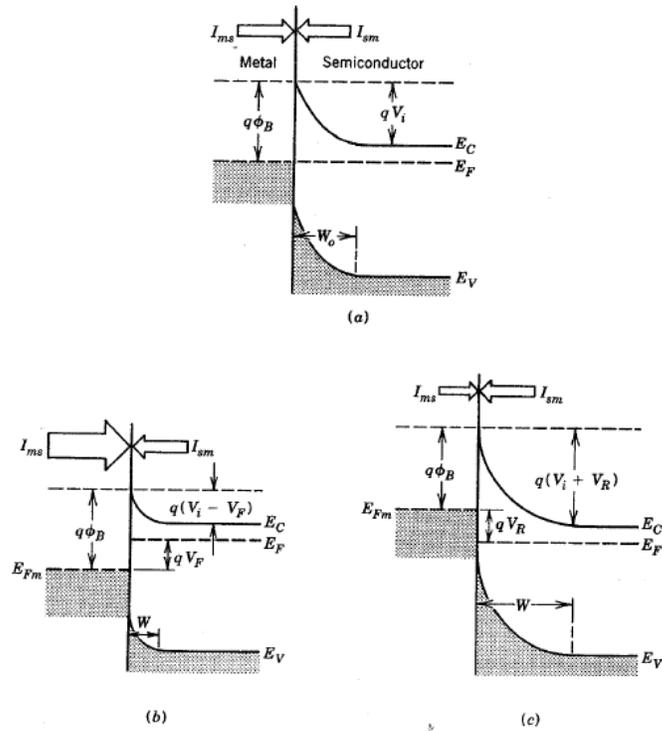
En el diagrama de bandas de la Fig. 31b, se ha supuesto que  $\Phi_m$ ,  $\chi$  y la anchura de la banda prohibida  $E_g$  del semiconductor permanecen invariables después de producirse el contacto entre los dos materiales. Por tanto, lejos de la zona de transición y en el semiconductor podemos dibujar este diagrama colocando el nivel de Fermi en el equilibrio  $E_F$  y después dibujando las posiciones relativas de  $E_c$ ,  $E_v$  y el nivel de vacío con respecto a  $E_F$  (y que por tanto, disminuye en una cantidad  $(\ ) m_{sc} q \cdot \Phi - \Phi$  ).

Finalmente, en la zona de transición, el nivel de vacío del semiconductor se ha de aproximar de forma gradual al del metal para mantener la continuidad.  $E_c$  y  $E_v$  han de seguir la misma variación que el nivel de vacío porque  $q \cdot \chi$  permanece invariable. Este procedimiento es bastante general y puede ser utilizado para dibujar el diagrama de bandas cualesquiera que sean los dos materiales en contacto.

En equilibrio térmico a una temperatura  $T$ , sólo una pequeña fracción de electrones de la banda de conducción del semiconductor tendrá energía suficiente para sobrepasar la barrera. Estos electrones que fluyen desde el semiconductor hacia el metal dan lugar a una corriente  $I_{ms}$  (recordar que la corriente tiene sentido contrario al movimiento de los electrones). Esta corriente es equilibrada exactamente por una igual y de sentido contrario  $I_{sm}$  causada por el flujo de electrones del metal al semiconductor (Fig. 32a).

Cuando se aplica una tensión negativa al semiconductor con respecto al metal (Fig. 32b),  $V_F$ , la altura de la barrera para los electrones del semiconductor disminuye desde  $q \cdot V_i$  hasta  $q \cdot (V_i - V_F)$ . Más electrones podrán por tanto fluir desde el semiconductor hasta  $I_{sm}$  permanece invariable ya que no hay caída de tensión a través del metal y  $q \cdot \Phi_B$  permanece casi invariable. Por tanto, hay un flujo neto de corriente del metal al semiconductor.

La aplicación de una tensión de polarización inversa  $V_R$  (Fig. 32c) reduce el flujo de electrones desde el semiconductor hasta el metal, y  $I_{ms}$  se reduce por debajo de su valor en equilibrio térmico mientras  $I_{sm}$  permanece casi inalterada. Por tanto, hay un flujo de una pequeña corriente inversa.



**Fig. 32:** Diagrama de bandas de energía de una unión rectificadora metal-semiconductor de tipo N en (a) equilibrio térmico, (b) polarización directa y (c) polarización inversa.