



Monografia: Dispositivos Semiconductores

[62.15] Física III
Primer cuatrimestre 2021
Grupo 3

Integrantes

Ledesma	Dylan	102876
Osco	Abraham	102256
Cuppari	Franco	104098
Guglielmone	Lionel	96963

Índice

1. Introducción	2
1.1. La teoria de bandas	2
2. Semiconductores compuestos	3
2.1. Dispositivos semiconductores cuanticos	3
2.2. Otros semiconductores compuestos	7
3. Diodo	11
3.1. Diodo semiconductor	11
3.2. Polarización directa de un diodo	11
3.3. Polarización inversa de un diodo	12
3.4. Aplicaciones del diodo	14
3.5. Contactos de barrera Schottky	15
3.6. Contactos óhmicos (metalizaciones)	16
3.7. Diodo Tunel	17
4. Conclusiones	20
5. Bibliografia y material de referencia	21

1. Introducción

En el presente trabajo monográfico se expondrá una breve teoría sobre semiconductores, para luego dar paso a los dispositivos que usan estos principios específicamente en los dispositivos "diodos". Para una mejor comprensión del tema se necesita que el lector cuente con conocimientos básicos sobre la ecuación de Schrödinger, ondas, el átomo de hidrógeno y estructuras atómicas, entre otros.

Los semiconductores constituyen elementos que poseen características intermedias entre los cuerpos conductores y los aislantes. La estructura y composición atómica de los semiconductores permiten que, bajo ciertas condiciones, exista circulación de corriente eléctrica en un sentido, pero no en el sentido contrario. A nivel atómico, los semiconductores tienen una configuración tal que en la última capa de sus átomos, las subcapas **s** y **p** tienen dos niveles.¹ Por ejemplo, el carbono (C), el silicio (Si) y el Germanio (Ge), semiconductores, tienen la siguiente configuración electrónica:

$$C : 1s^2 - 2s^2 2p^2 \quad (1)$$

$$Si : 1s^2 - 2s^2 2p^6 - 3s^2 3p^2 \quad (2)$$

$$Ge : 1s^2 - 2s^2 2p^6 - 3s^2 3p^6 3d^{10} - 4s^2 4p^2 \quad (3)$$

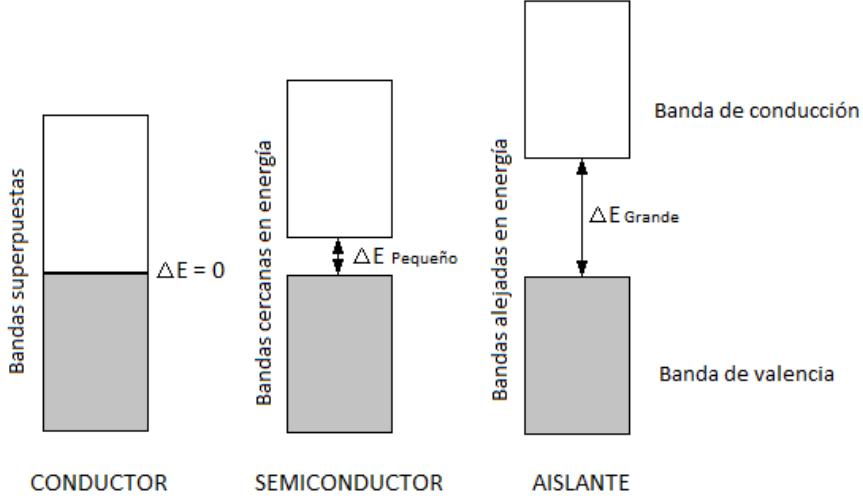
Este tipo de semiconductores se denominan puros. Ahora bien, ¿Cómo se explica la conductividad de los semiconductores (o de cualquier otro tipo de conductividad)? La teoría de bandas permite explicar este fenómeno que caracteriza a los materiales, en este caso a los semiconductores.

1.1. La teoría de bandas

Los orbitales atómicos de valencia de los **n** átomos de un determinado elemento que forman el enlace metálico se combinan entre sí para formar **n** orbitales moleculares que están muy próximos en energía. Esta proximidad genera la formación de lo que se conoce como *banda energética*². Estas bandas están formadas por los orbitales atómicos **2s** (banda de valencia) e, independientemente, por orbitales atómicos **2p** (banda de conducción). La proximidad entre las bandas define el tipo de material que tenemos, tal como se ilustra en la Figura 1.

¹<https://www.youtube.com/watch?v=5UPgOWWAfHO> - Física de los semiconductores - Prof. Ing. Javier Muñoz

²<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/band.html>



Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/band.html> - Department of Physics and Astronomy at Georgia State University

Figura 1: Diferencias energéticas entre bandas de distintos materiales

De manera ilustrativa, la Figura 1, permite entender el comportamiento de los conductores, semiconductores y aislantes: en el caso de los conductores, los electrones contenidos en la banda de valencia pueden moverse libremente hacia la banda de conducción totalmente vacía o parcialmente llena. Para los semiconductores, las bandas de valencia y de conducción no se superponen (como si ocurre con los materiales conductores) pero están muy próximas en términos de energía. Esto hace que baste con una aplicación energética (i.e del orden del eV) para que los electrones puedan *saltar* de la banda de valencia a la de conducción y que, por lo tanto, el semiconductor sea capaz de conducir la corriente.

Además de los conductores puros mencionados (C, Si, Ge) se pueden combinar varios elementos químicos para la constitución de un cristal que tenga las propiedades de un semiconductor.

2. Semiconductores compuestos

2.1. Dispositivos semiconductores cuánticos

Uno de los objetivos fundamentales en la industria es crear commutadores de semiconductores pequeños, rápidos, y de menor costo posible, con el objetivo de aplicarlos en computadoras. Los transistores convencionales poseen limitaciones en cuanto a la miniaturización de los mismos puesto que cuanto menor sea el transistor, menor su efectividad debido a las impurezas generadas o por defecto de enrejamiento que dificultan el movimiento de electrones. Esto hace que las estructuras cuánticas sean idóneas para solucionar dichos problemas.

Con el fin de explicar la naturaleza de un dispositivo cuántico, recordamos que los electrones se encuentran en bandas de energía continuas: la banda de valencia, y la banda de conducción, como se explica en la sección anterior.

Suponiendo, que, de algún modo, las dimensiones del sólido cristalino son del tamaño de la longitud de onda de un electrón, las bandas de energía que, previamente eran continuas, se separarán, formando niveles discretos de energía. Los cálculos realizados para los dispositivos cuánticos son los mismos que los realizados para el modelo de un electrón en un pozo de potencial infinito, cuya expresión para obtener la energía en distintos niveles es la siguiente:

$$E_n = \frac{\hbar \pi}{4 m a^2} n^2 \quad (4)$$

con $n = 1, 2, 3, \dots$

a : ancho del pozo

m : masa del electrón

h : constante de Planck

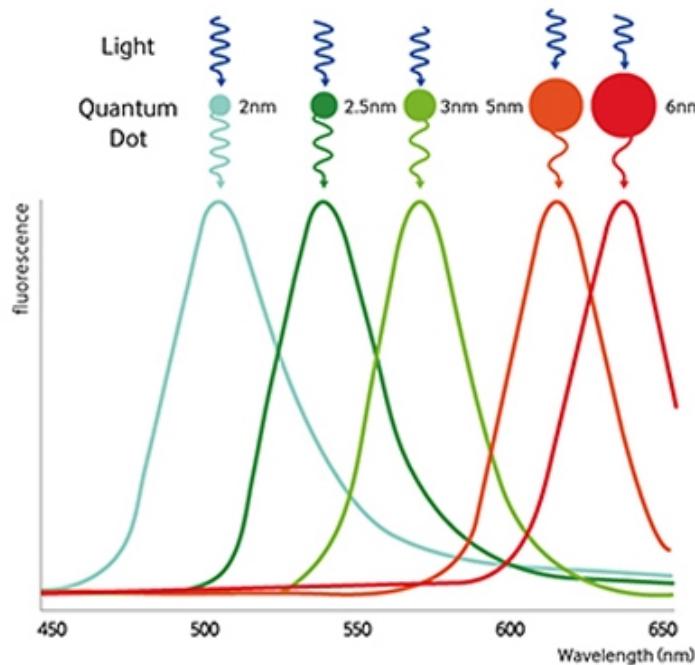
Entonces, cuando las dimensiones del sólido se acercan a la magnitud de los nm , es correcto afirmar que la densidad de estados se torna discontinua y cuantizada. A este mecanismo, se lo puede llamar apropiadamente cuantización de la energía.

Podemos tomar como ejemplo el caso de un cubo compuesto por Arseniuro de Galio (*GaAs*), en el cual sus dimensiones laterales son del orden de $20nm$. El mismo está ubicado entre dos cubos similares, pero compuestos de *Aluminio – Galio – Arsenio*, los cuales están ubicados entre dos bloques más largos de cubos de *GaAsN – dopados*. La representación de ésta estructura puede verse en la Figura 4. Que un compuesto este N – dopado significa que materiales del grupo *IV* se dopan con átomos del grupo *V*. Este tipo de material posee átomos de impurezas que permiten la aparición de electrones libres.

Los átomos de este tipo se llaman “donantes” ya que “donan” o entregan electrones. A esta configuración en tres dimensiones se la denomina punto cuántico. Estos puntos cuánticos pueden representarse como cristales nanométricos hechos de materiales semiconductores no necesariamente puros (*Aluminio, Galio y Arsenio*).

Una característica relevante de estos materiales es que los mismos son fotoactivos, absorben luz y son capaces de emitirla luego. Esto se debe a que, en vez de liberar la energía, generada al momento del traspaso de electrones, en forma de calor, lo hacen a través de la emisión de fotones. Este fenómeno es similar al llamado electroluminiscencia. La luz que emite cada semiconductor es de un color, o longitud de onda característico, dependiendo de su composición y estructura atómica. Esta característica de los semiconductores hace que hoy en día se estén desarrollando investigaciones de puntos cuánticos en campos como paneles solares, bioimágenes, y por supuesto también en pantallas. Este fenómeno también es útil para televisores, ya que a diferencia de los televisores convencionales, aquellos desarrollados con semiconductores permiten reproducir más colores y la propiedad fotoactiva característica permite tener un mejor rendimiento luminoso. Sirva como botón de muestra la inversión realizada por la marca coreana Samsung, que con esta tecnología logró aumentar el brillo máximo de sus televisores QLED hasta $2000nits$ (unidad de medida de luminosidad)³, cuando en el pasado su última línea de televisores alcanzaba apenas los $1000nits$. En la Figura 2, puede verse el color de la luz para determinados tamaños de puntos cuánticos.

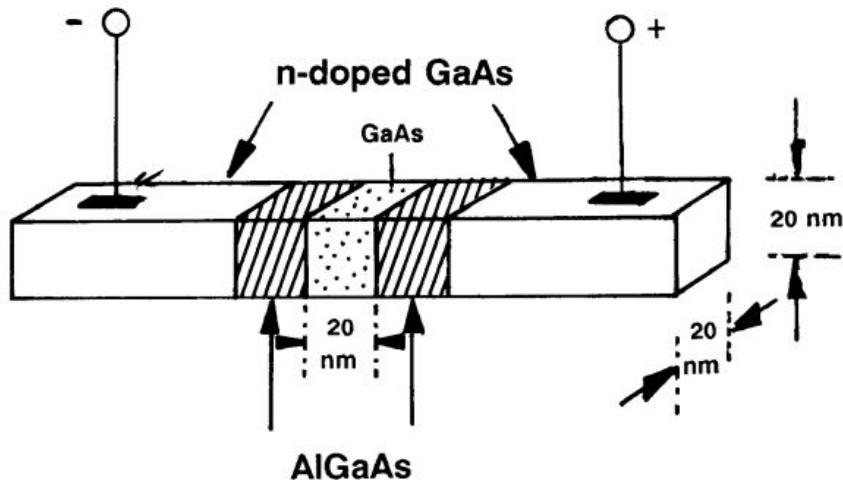
³<https://www.samsung.com/nz/support/tv-audio-video/qled-tv-accurate-colour/>



Fuente: <https://www.cd-bioparticles.com/>

Figura 2: Relacion entre el color de un haz de luz y tamaño de los puntos cuanticos

Retomando el concepto de la estructura del punto cuántico, la Figura 3 muestra la diferencia de tamaño entre la banda de $AlGaAs$ con respecto a las bandas $N - dopadas$ de $GaAs$:

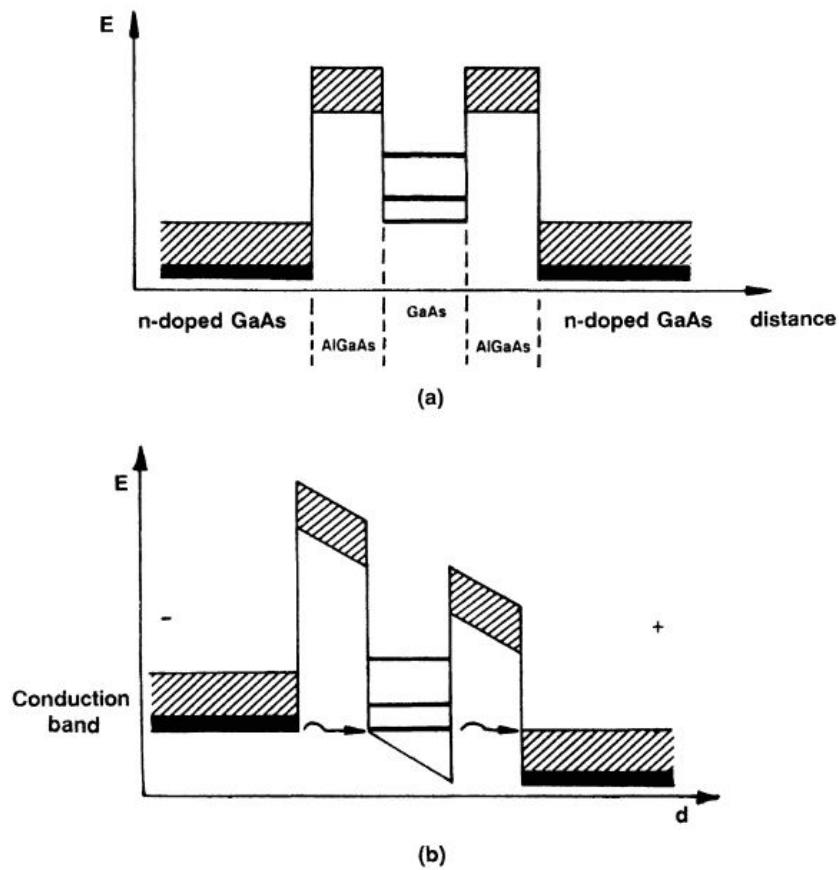


Fuente: Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, pagina 157

Figura 3: Representación de un punto cuántico formado por $AlGaAs$ y las bandas $N - dopadas$ de $GaAs$

Como se puede ver, en la figura 4, la banda conductora de $AlGaAs$ está en un nivel de energía más alto que el de la banda conductora de $GaAs$. Esto resulta en una barrera potencial entre los dos bloques de $GaAs$. Generalmente, sin ningún tipo de perturbación, un electrón $N - dopado$ de $GaAs$ no tiene la suficiente energía para traspasar esta barrera potencial, o pasar de otra forma

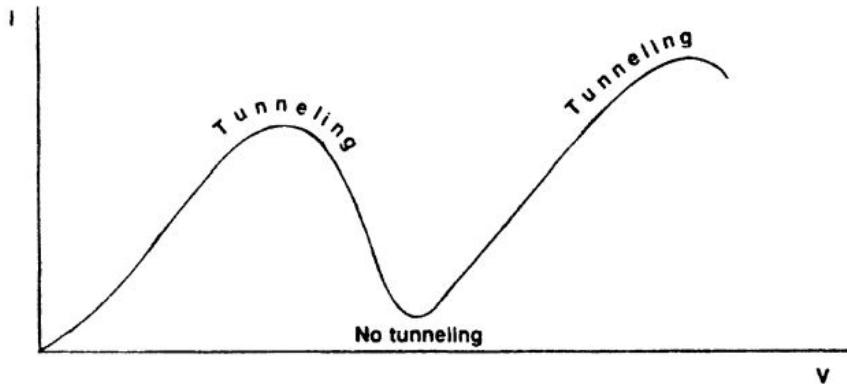
a sus bloques vecinos. Sin embargo, si se le aplica a este dispositivo una cantidad suficiente de energía potencial, la banda conductora del compuesto $GaAsN$ – dopado crece a tal nivel que alcanza el mismo estado de energía que una región central vacía de $GaAs$. En este nuevo estado, los electrones son capaces de pasar a través de dicha barrera y, por ende, pasar a los niveles discretos de energía. A continuación se puede ver, en la Figuras 4 (a) y (b) el estado de este punto cuántico. En la Figura 4 (a), se puede ver como están en estado normal, mientras que la Figura 4 (b), está representada la situación tras haberle aplicado el potencial necesario para que se produzca el traspaso de electrones.



Fuente: Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, pagina 158

Figura 4: (a) estado inicial del punto cuantico y (b) estado final tras haber aplicado el potencial necesario para que ocurra el efecto túnel

Otra escenario posible ocurre cuando se le aplica una cantidad de potencial inferior, en cuyo caso los electrones N – dopados de $GaAs$ no están a la par con un nivel energético vacío, y el traspaso de electrones entre bandas no se realiza. Esto desemboca en una región donde la corriente decrementa mientras el potencial aumenta, tal como se muestra en la Figura 5. Se destaca también que tal como indica la Figura 5, si se continua aumenta el potencial se vuelve a provocar el efecto túnel.



Fuente: Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, pagina 159

Figura 5: corriente vs tensión

Otro efecto producto de la cuantización de la energía es la resonancia. En un potencial específico, el *potencial de resonancia*, el electrón se introduce dentro de la región central, y se refleja una y otra vez entre las paredes de la región, lo cual indica que ocurre interferencia constructiva entre las ondas viajando en distintas direcciones.

Finalmente, otro avance de los dispositivos cuánticos introducidos hasta el momento consiste en acomodar de forma periódica un conjunto de pozos cuánticos uno encima del otro. Esta forma de disponer de estos pozos cuánticos se denomina *superlattice* (i.e. superrejilla en español). Esta disposición crea una estructura periódica artificial en el sólido, en donde se intercalan capas atómicas de un tipo de material y son sucedidas por múltiples capas atómicas de otro tipo de material. Con este nuevo tipo de parámetros estructurales del sólido, se logra obtener nuevas propiedades electrónicas.

En comparación con los transistores convencionales de efecto de campo (i.e. transistores que emplean un campo eléctrico para controlar un canal que transporta un portador de carga), los dispositivos cuánticos son del tamaño de una centésima de los primeros. Sin embargo, más allá de la clara ventaja de tamaño que poseen estos últimos, los dispositivos semiconductores que pueden reemplazar a estos transistores llevan ciertos problemas asociados a la interconexión, arquitectura de los dispositivos y la fabricación de dispositivos con tres terminales que los encarecen mucho. Se estima, no obstante, que cuando se logren superar estos desafíos para los dispositivos semiconductores, el costo de los mismos constituirá la milésima parte del costo actual.

Tal como se detalló y se ejemplificó hasta el momento, existen compuestos semiconductores además de los puros. Se pueden realizar distintas combinaciones de elementos que dan lugar a semiconductores con diferencias energéticas distintas entre la banda de valencia y de conducción. Esta distancia, entre otras cosas, define la utilidad y el uso de un determinado semiconductor. A continuación se mostrarán algunos de estos compuestos que resultan de interés para entender las propiedades de dichos compuestos.

2.2. Otros semiconductores compuestos

Arseniuro de galio (GaAs): ⁴ Con la combinación de elementos del grupo V A y III A, como en el caso del arseniuro de galio (una combinación de arsénico y galio), se pueden producir semiconductores. El **GaAs** es de particular interés en la industria por su amplia brecha entre bandas que aún mantiene la conductividad (ver Figura 6). Esta diferencia energética entre bandas impide cualquier tipo de contribución de impureza incluso a altas temperaturas (energías altas). Por tal motivo, este semiconductor se emplea en aplicaciones que requieren altas velocidades, por ejemplo. Otro beneficio que ofrece el arseniuro de galio está asociado a sus propiedades ópticas.

⁴Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, pag 129, 130

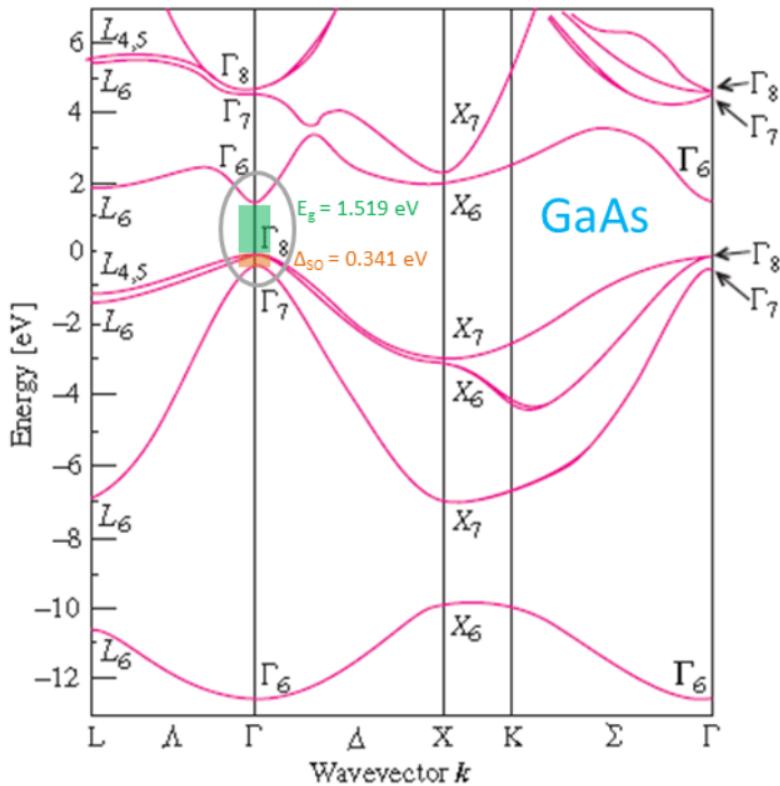
Dado que se trata de una banda prohibida directa, un electron puede emitir directamente un foton por lo que la luz se absorbe muy bien.

Material	Intervalo de energía (eV)	
	0°K	300°K
Si	1,17	1,11
Ge	0,74	0,66
InSb	0,23	0,17
InAs	0,43	0,36
InP	1,42	1,27
GaP	2,32	2,25
GaAs	1,52	1,43
GaSb	0,81	0,68
CdSe	1,84	1,74
CdTe	1,61	1,44
ZnO	3,44	3,2
ZnS	3,91	3,6

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/band.html> - Department of Physics and Astronomy at Georgia State University

Figura 6: Intervalos energéticos entre bandas para distintos materiales a 0 y 300K

La movilidad alta del electron es producto de la pequeña masa efectiva del mismo. Este fenómeno es causado por una marcada curvatura de la banda de conducción cerca de Γ , tal como se puede ver en la Figura 7:



Fuente: Optical control and detection of spin coherence in multilayer systems, Gomal University - Thesis for PhD by Saeed Ullah

Figura 7: La banda prohibida directa y la split-off hole band están resaltadas en anaranjado y verde respectivamente

Los electrones excitados en la banda de conducción son los que ocuparán con mayor probabilidad la zona cercana al pico de la curvatura cerca de Γ .

Por otro lado, se logra completa ionización aún a bajas temperaturas, lo cual se produce porque la energía de ionización de los donores y aceptores de **GaAs** tienen un orden de magnitud más pequeño que el Germanio o el Silicio.

Aunque las propiedades de éste semiconductor permite desarrollar dispositivos 2.5 veces más rápidos que los producidos a base de Silicio así también como dispositivos menos sensibles a radiación cósmica (por su amplio ancho entre bandas), el costo de estos productos se ubica en el orden de 10 veces más caros que otros. Además, son mucho más densos por lo que estos dispositivos son más pesados. Esto hace que las expectativas puestas en los dispositivos de GaAs no se hayan materializado aun.

Otros semiconductores ⁵ El arseniuro de galio no es el único semiconductor sobre el cuál se ha investigado y explorado en usos. Existen otros semiconductores compuestos que utilizan elementos del grupo III y V de la tabla periódica que también resultan de interés. Entre estos, se cuentan **GaP**, **GaN**, **InP**, **InAs**, **InSb** y **AlSb**.

Otros semiconductores con elementos de grupos II-IV también se consideran para aplicaciones. La característica que poseen estos elementos es que la combinación de los componentes individuales aseguran un promedio de 4 electrones de valencia por átomo. Algunos de estos compuestos son **ZnO**, **ZnS**, **ZnSe**, **CdTe** y **HgS**.

Otro tipo de semiconductores compuestos, que incluye elementos de los grupos IV-VI, tales como **PbS**, **PbSe** y **PbTe**.

⁵Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, pag 130, 131

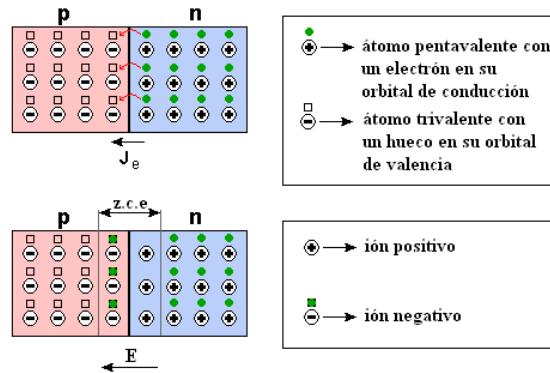
Además, existen aleaciones ternarias (ejemplo, $Al_xGa_{1-x}As$) o cuaternarias (como el caso de $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$) cuyo uso se focaliza en la construcción de dispositivos óptico-electricos pues emiten luz en el espectro visible, tal es el caso de la tecnologia LED.

Finalmente, el carburo de silicio (**SiC**) es el semiconductor más representativo del grupo IV-IV. Dado que la brecha entre bandas ronda los $3eV$, se le puede dar usos que alcanzan altas temperaturas, alrededor de $700C$ y LEDs que emiten luz azul al final del espectro visible. Sin embargo, como contraparte, el **SiC** es caro y no se puede producir con propiedades reproductivas. Actualmente, se ha reemplazado el **SiC** con **Ga-N-In** como emisor de luz LED azul.

3. Diodo

3.1. Diodo semiconductor

Un diodo es un semiconductor formado por la unión de dos semiconductores tipo N (i.e. contiene portadores de carga negativa (electrones) y tipo P que contiene portadores de carga positiva (huecos). Puede verse, una representación de un diodo semiconductor, en la Figura 8.



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Unión_PN

Figura 8: Representación de la unión P-N

Al unir ambos semiconductores se provoca una difusión de electrones desde el semiconductor N hacia el semiconductor P (J_{e^-}). Una vez alcanzado el equilibrio aparece una corriente de difusión, con presencia de cargas fijas en la intersección entre ambos semiconductores. Esta zona recibe el nombre de **capa de agotamiento** o **región de agotamiento**.

A medida que aumenta la corriente de difusión mayor es el ensanchamiento de la capa de agotamiento. Sin embargo, la acumulación de iones positivos y negativos en la intersección de ambos semiconductores generará un campo eléctrico que actúa sobre los electrones libres en el semiconductor N , deteniéndolos al intentar desplazarse hacia el semiconducto P .

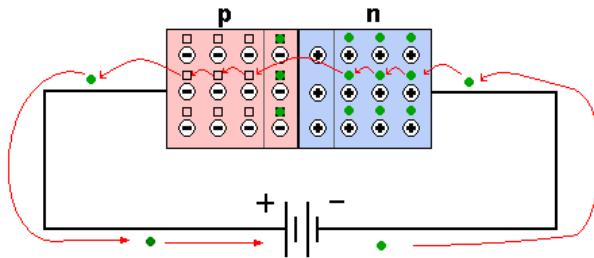
El campo eléctrico entre los semiconductores es equivalente a hablar de una diferencia de potencial entre ambos semiconductores. A esta diferencia de potencial se la denomina "**Potencial de barrera**" o "**tensión umbral**".

Por ejemplo, en el caso del Silicio esta barrera es: $V_D = 0,7V$ y en el Germanio es $V_D = 0,3V$.

Cuando se conecta el diodo a una fuente de tensión, según como se conecten los bornes de la fuente al diodo se obtendrán resultados totalmente distintos. Analizaremos estos casos.

3.2. Polarización directa de un diodo

Para obtener una polarización directa, se conecta el borne positivo de la fuente con el semiconductor tipo P y el borne negativo de la fuente con el semiconductor tipo N . En la Figura 9 se puede observar la representación de lo mencionado.



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Union_PN

Figura 9: Representación polarización directa circula corriente en la unión P-N

En estas condiciones se observa que:

- El borne negativo de la fuente repele los electrones libres del semiconductor N , empujándolos hacia la capa de agotamiento.
- El borne positivo de la fuente atrae los electrones de valencia del semiconductor P lo cual equivale a decir que repele los huecos hacia la capa de agotamiento.
- Cuando la diferencia de potencial aplicada en la fuente supera a la *barrera de potencial*, los electrones libres en el semiconductor N adquieren la energía suficiente para poder atravesar la barrera de potencial para caer en los huecos de del semiconductor P , convirtiéndose en un electron de valencia. Luego, el electron es atraído por el borne positivo de la fuente y se desplaza de átomo en atomo hasta llegar al final del semiconductor P pasa por el hilo conductor y llega hasta la batería.

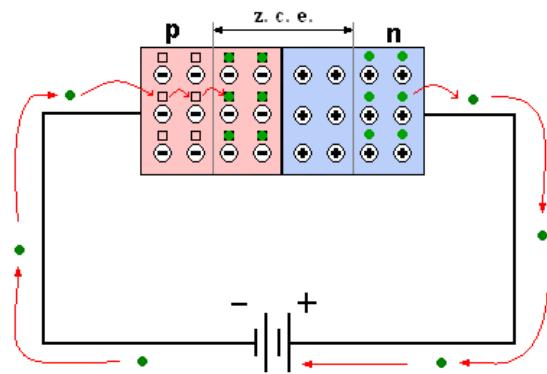
3.3. Polarización inversa de un diodo

Para obtener una polarización inversa se conecta el borne positivo de la fuente en el semiconductor N , y el borne negativo en el semiconductor P . Se puede observar la representación de lo mencionado anteriormente en la Figura 10. En éstas condiciones se observa que:

- El borne positivo de la fuente atrae los electrones libres del semiconductor N hasta la batería. Los átomos pentavalentes que inicialmente son neutros, al arrancar el electron en la banda de conducción adquieren estabilidad (cumple regla del octeto) y adquieren una carga eléctrica neta +1, convirtiéndose en iones positivos.
- El borne negativo de la fuente cede los electrones libres a los átomos trivalentes del semiconductor P . Cuando estos electrones entran, caen dentro de los huecos de manera que los átomos trivalentes adquieren estabilidad y una carga eléctrica neta de -1 convirtiéndose así en iones negativos.
- Este proceso se repite una y otra vez hasta que la barrera de potencial adquiere el mismo potencial que la fuente.

Sin embargo, debido al efecto de la temperatura, en la capa de agotamiento se forman pares electron-hueco a ambos lados de la unión, produciendo una pequeña corriente ($1\mu A$) que se denomina **Corriente inversa de saturación**⁶

⁶<https://es.wikipedia.org/wiki/Diodo>

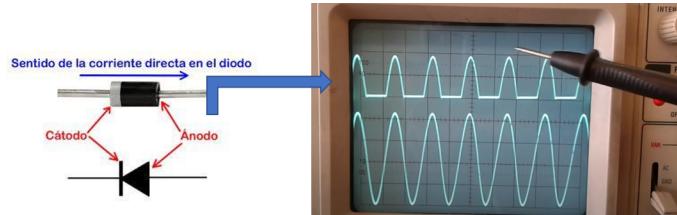


Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Union_PN

Figura 10: Representación de polarización inversa. Se puede observar que no circula corriente en la unión P-N

3.4. Aplicaciones del diodo

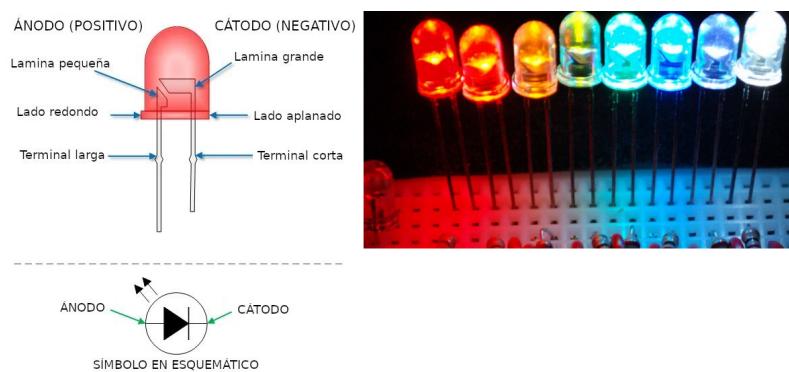
Diodo como Rectificador: Uno de los usos mas importantes y comunes de los diodos es la rectificación de la alimentación de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC). Solo por mencionar algunos tipos basicos de circuitos rectificadores, se pueden mencionar aquellos rectificadores de puente de media onda, onda completa, puente completo,etc.



Fuente:Propia - generada a partir de imágenes de licencia libre

Figura 11: Uso de un diodo rectificador en un osciloscopio para poder rectificar las señales. Señal original (abajo), señal a media onda rectificada (arriba)

LED(Light-Emitting Diode): Este es un diodo de union $P - N$ que emite luz cuando esta activada. Si se aplica una tensión adecuada a los terminales, los electrones se recombinan con los huecos en la union $P - N$ liberando energía en forma de foton. Dicho efecto se denomina **electroluminiscencia**, y el color de la luz viene dada por el ancho del potencial de barrera (Figura 12). Algunas de las aplicaciones incluyen indicadores y lámparas de señales, iluminación sostenible, fuentes de luz para sistemas de visión artificial, medicina y biología (los endoscopios actuales están dotados de iluminación led) e industrial, entre otros.



Fuente: Propia - generada a partir de imágenes de licencia libre

Figura 12: La diferencia de colores de luz LED varia segun el ancho de la barrera de potencial

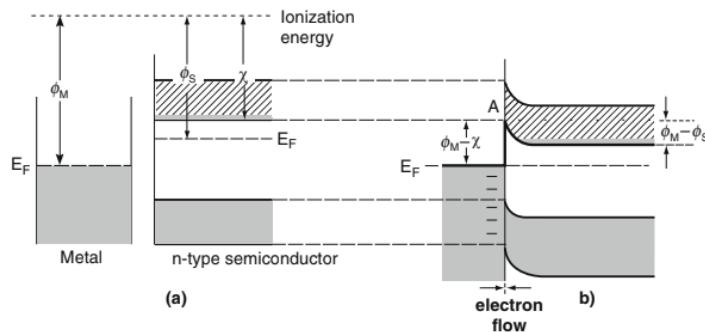


Fuente: Propia - generada a partir de imágenes de licencia libre

Figura 13: LED aplicados como fuente de luz en los endoscopios actuales (izq), LED usados como fuente de iluminación sostenible (der)

3.5. Contactos de barrera Schottky

Para describir los contactos de barrera de Schottky⁷ se comienza considerando un metal y un semiconductor de tipo *N* antes de que entren en contacto. Se sabe que un metal tiene una energía de Fermi menor que la del semiconductor (Figura 14). Inmediatamente después de que el metal y el semiconductor han entrado en contacto, los electrones comienzan a fluir desde el semiconductor hacia el metal hasta que las energías de Fermi de ambos sólidos se igualen. Como consecuencia, el metal se carga negativamente y se forma una barrera de potencial como el de la Figura 14 (b). Las bandas del semiconductor se reducen.



Fuente: Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, página 133

Figura 14: Bandas de energía para un sc tipo *N* y metal antes (a) y después (b) del contacto

En el equilibrio, los electrones de ambos materiales cruzan la barrera de potencial. Este flujo de electrones constituye la denominada *corriente de difusión*. El número de electrones que se difunden en ambas direcciones debe ser igual porque el metal contiene más electrones libres. De manera similar, si un semiconductor del tipo *P* se pone en contacto con un metal, entonces los electrones se difunden desde el metal hacia el semiconductor, cargando así el metal y por lo tanto la superficie del semiconductor positivamente. Consecuentemente, se forma una barrera de potencial hacia abajo. Además de la corriente de difusión que se acaba de mencionar, es necesario tener en cuenta una corriente de *deriva*. Si se supone que se creó térmicamente un par electrón-agujero cerca de la capa de agotamiento, entonces, el electrón creado térmicamente en la banda de conducción es barrido inmediatamente por la barrera y el agujero en la banda de valencia sube por la barrera. Esta corriente de deriva suele ser muy pequeña y es relativamente insensible a la altura de la barrera del potencial. Finalmente, la corriente total a través de una unión es la suma de los componentes de deriva y difusión.

Se conectan un metal y un *sc* de tipo *N* a una fuente de *DC*, y en dicha conexión se supone inicialmente que el metal está conectado al terminal negativo de la batería. Como resultado, el metal se cargará aún más negativamente. Por lo tanto, los electrones del semiconductor se repelen aún más y la barrera de potencial aumenta. Además, la capa de agotamiento se ensancha debido a que ambas barreras son ahora relativamente altas por lo que las corrientes de difusión en ambas direcciones son insignificantes. Sin embargo, la corriente de deriva pequeña (esencialmente independiente del voltaje) todavía existe, lo que arroja como resultado una corriente neta de electrones muy pequeña y constante del metal en el semiconductor.

Por otro lado, si se invierte la polaridad de la pila, la barrera de potencial en el semiconductor se reduce, es decir, los electrones son impulsados a través de la barrera, de modo que se produce una gran corriente neta desde el semiconductor hacia el metal (en este caso la capa de agotamiento es estrecha). Los rectificadores de este tipo se utilizan para convertir la corriente alterna en continua. La corriente que fluye desde el metal hacia el semiconductor se obtiene a partir de la siguiente expresión:

⁷Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, págs 132-136

$$I_{ms} = ACT^2 e^{-\frac{\phi_M - \chi}{k_B T}} \quad (5)$$

Con T = Temperatura (en Kelvin),

k_B = constante de Boltzmann

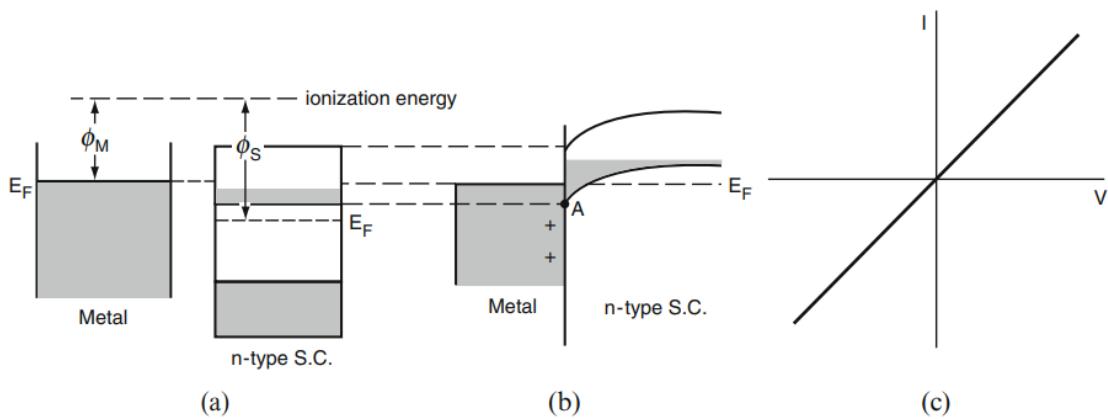
ϕ_M = Función trabajo

χ = afinidad del electrón

Estos efectos rectificadores también se pueden lograr usando un diodo con juntura del tipo $N - P$. No obstante, existen algunas ventajas en el uso del rectificador *meta - sc*. Primero, la conducción en un dispositivo de *metal - sc* involucra naturalmente un solo tipo de portador de conducción (electrones), por lo tanto, no puede producirse aniquilación mutua de electrones y huecos. Como consecuencia de esta falta de recombinación portadora, el dispositivo puede cambiarse más rápidamente de polarización directa a inversa, y, por lo tanto, es más adecuado para detectores de frecuencia de microondas. Segundo, la base de metal proporciona una mejor eliminación del calor que un simple chip semiconductor, lo que es útil en dispositivos de alta potencia.

3.6. Contactos óhmicos (metalizaciones)

En las figuras 15 (a) y (b), se muestran diagramas de bandas para el caso en el que un metal se pone en contacto con un semiconductor de tipo N :



Fuente: Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, pagina 136

Figura 15: (a) El metal y los semiconductores están separados. (b) El metal y el semiconductor están en contacto. (c) Voltaje característico.

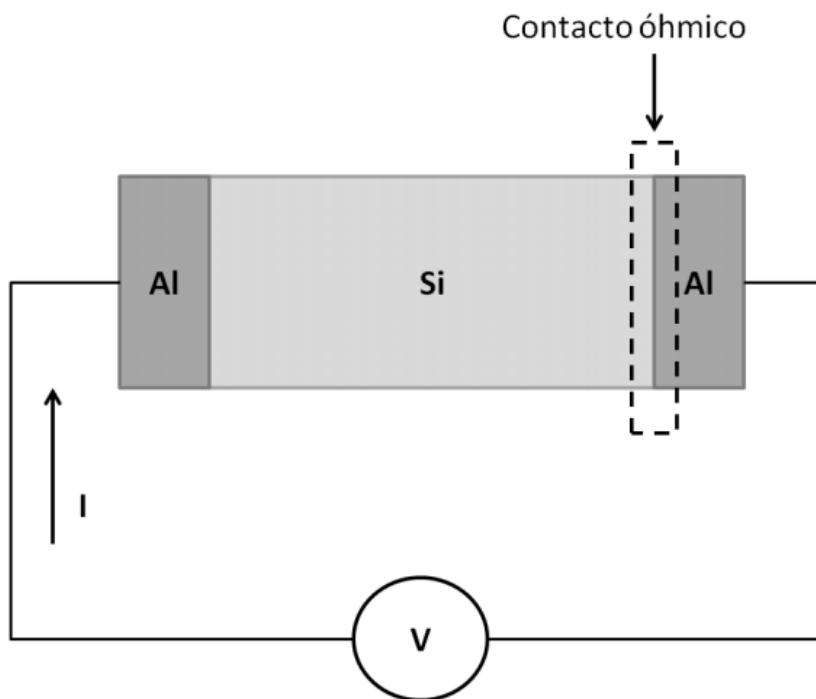
Siendo ϕ la diferencia de energía entre la energía de Fermi y la energía de ionización o en otras palabras la energía necesaria para transportar un electrón desde la energía de Fermi hasta el infinito. Se observa que $\phi_M < \phi_S$, por lo que los electrones fluyen desde el metal hacia el semiconductor, cargando el metal positivamente. Ahora no existe barrera para el flujo de electrones en ninguna dirección. En otras palabras, esta configuración permite la inyección de una corriente dentro y fuera del semiconductor sin sufrir una pérdida de potencia considerable. En esencia, la corriente aumenta linealmente al aumentar el voltaje y es simétrica con respecto al origen, entonces cumple con la ley de Ohm (figura (c)). Esta unión se denomina *contacto óhmico*⁸. Cabe destacar que existe una situación similar para un semiconductor tipo P donde en ese caso $\phi_M > \phi_S$.

El aluminio se usa con frecuencia para hacer el contacto entre un dispositivo (por ejemplo, la región P de un rectificador) y los cables externos, (el silicio con impurezas de aluminio forma un

⁸Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, pag 136, 137

semiconductor de tipo P el cual cumple que $\phi_M > \phi_S$) entonces el contacto con la región P es óhmico. La representación de lo explicado se puede ver en la Figura 16.

Sin embargo existen muy pocas combinaciones que cumplan este requisito ($\phi_M > \phi_S$) por lo cual la alternativa más común es darle una capa fuertemente dopada sobre el semiconductor, para que el espesor de la región de carga espacial y el ancho de la barrera de potencial sean pequeñas. De esta forma se permite fácilmente el paso de los electrones a través de la barrera por efecto túnel, es decir que la barrera de potencial resulta tan pequeña que los electrones la penetran en lugar de sobrepasarlas.



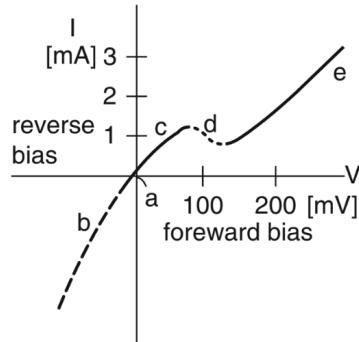
Fuente: Fabricacion y caracterizacion de contactos metal-semiconductor para microelectronica - Fernandez, Chiussi, Moure

Figura 16: Estructura de un dispositivo electrónico con contactos óhmicos

3.7. Diodo Tunel

El diodo tunel se conforma con la union de dos semiconductores, uno del tipo p y otro del tipo n. Estos deben estar cada uno altamente dopados de impurezas respectivamente, así se logra que la zona de agotamiento sea estrecha (de aproximadamente 10 nm) lo que permite a los electrones atravesar la barrera con muy bajo voltaje en polarización, sin necesidad de *saltar* la misma.

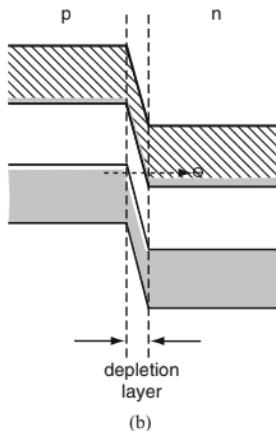
El diodo tunel es un diodo semiconductor que tiene una union del tipo $P - N$, en la cual se produce el efecto tunel que da origen a una conductancia diferencial negativa en un cierto intervalo de la característica corriente-tensión. La figura 17 representa la curva tensión-corriente:



Fuente: Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, pagina 146

Figura 17: Característica de voltaje-corriente para un diodo de túnel

Hasta ahora hemos estudiado los casos en el que los electrones viajan desde el semiconductor tipo N hacia el semiconductor tipo P luego de superar una barrera de potencial. Sin embargo, esta no es la única manera que hay para el desplazamiento de electrones en una juntura tipo $P - N$, sino qué, también este fenómeno puede darse si el área de agotamiento es muy estrecho (Figura 18), y si el material está altamente dopado (10^{20} átomos de impureza por cm^3). Debido a este alto nivel de dopaje, la energía de Fermi se extiende desde la banda de valencia hacia la banda de conducción.



Fuente: Rolf E. Hummel - Electronic Properties of Materials, capítulo 8, pagina 140

Figura 18: Área agotada angosta

En el estado de equilibrio, no hay flujo de corriente neta, por lo que si se aplica una mínima tensión al diodo, entonces la barrera de potencial aumenta y la energía de Fermi junto con la parte inferior y superior de las bandas, aumenta. Esto crea estados de electrones vacíos en la banda de conducción del semiconductor tipo P . Como consecuencia de esto, algunos electrones forman un túnel desde el semiconductor tipo P hacia el semiconductor tipo N . Un aumento en el voltaje inverso produce un aumento en la corriente a través del dispositivo.

Un pequeño aumento en la tensión provoca que los electrones atraviesen la barrera de potencial desde la banda de conducción hacia la banda de valencia. El voltaje aplicado solo debe ser del orden de los mV para producir una corriente del orden de los mA .

Si se aumenta la tensión a centenas de mV , entonces la barrera de potencial disminuirá tanto que al contrario de los estados de conducción en el tipo N llenos, no hay estados vacíos permitidos

en el tipo P , por lo que no se producirá ningún túnel. Como consecuencia de este fenómeno, la corriente disminuye al aumentar la tensión. Se experimenta una característica de voltaje-corriente negativa que se explica graficamente en la figura 18.

Finalmente, si se aumenta aún más el voltaje, entonces los electrones del semiconductor tipo N obtienen la energía suficiente para escalar la barrera de potencial hacia el lado P , como en una unión $P - N$ regular, en cuyo caso la corriente aumenta junto al voltaje.

4. Conclusiones

A lo largo de este trabajo y en cada una de las secciones, los semiconductores tienen increíbles características que los convierten en materiales distintivos en la construcción de dispositivos. Empleando semiconductores se logran ventajas que serían imposibles de obtener con materiales convencionales. Los semiconductores son especialmente útiles en la industria de la electrónica, dado que permiten conducir y modular la corriente eléctrica de acuerdo a las situaciones necesarias. Esto permite que se puedan emplear en dispositivos tales como transistores, circuitos integrados, diodos eléctricos, sensores ópticos, láseres de estado sólido y moduladores de transmisión eléctrica (como un amplificador de guitarra eléctrica), sólo por mencionar algunos usos.

Otras ventajas en el uso de materiales semiconductores en electrónica están asociados a la mayor flexibilidad y mejores posibilidades de control de los dispositivos, la posibilidad de obtener mejor estabilidad y rapidez de respuesta, la ausencia de partes mecánicas móviles redundante en un menor mantenimiento y ausencia de vibraciones, mayor fiabilidad de los equipos y una vida más larga y al no producirse arco eléctrico permite el trabajo en ambientes explosivos.

Sin embargo, la mayor dificultad que enfrenta la construcción de dispositivos con semiconductores está relacionado al alto coste de fabricación de dicho elementos. Asimismo, su capacidad para soportar sobretensiones y sobreintensidades es más reducida.

Sin embargo, más allá de estos inconvenientes al día de la fecha, los semiconductores han logrado una mayor presencia en el día a día de las personas y se estima que cuando se logren sortear los obstáculos (principalmente asociados al costo) en la manufacturación de estos materiales, aumentarán su presencia de forma cabal.

5. Bibliografia y material de referencia

- Electronic Properties of Materials (capitulo 8), 4ta edicion, Springer - Rolf E. Hummel
- Fabricacion y caracterizacion de contactos metal-semiconductor para microelectronica (tesis, Universidad de Vigo - Espana) - Gomez Fernandez, Marta; Chiussi, Stefano; Moure Rodriguez, Maria Jose
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/index.html> - Department of Physics and Astronomy , Georgia State University , Carl R. (Rod) Nave
- <https://www.youtube.com/watch?v=5UPgOWWAfHO> - Fisica de los semiconductores - Prof. Ing. Javier Muiño