



Universidad Autónoma del Estado de México  
Centro Universitario UAEM Atlacomulco

## ANTOLOGÍA DE DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

**Programa Educativo:**  
Maestría en Ciencias de la Computación

**Unidad de Aprendizaje:**  
Dispositivos Semiconductores

**Periodo:**  
2024A

**Compiladores:**  
Dr. en P. Carlos Alberto Baltazar Vilchis  
M. en. P. Epigmenio Reza Fajardo  
M. en I. Elizabeth Evangelista Nava  
Dra. en A. Yenit Martínez Garduño  
Dr. en C.F. Alberto Garduño Martínez

Junio, 2024

## **Antología de Dispositivo Semiconductores**

Obra compilada por académicos del Centro Universitario UAEM Atlacomulco

Dr. en P. Carlos Alberto Baltazar Vilchis

M. en. P. Epigmenio Reza Fajardo

M. en I. Elizabeth Evangelista Nava

Dra. en A. Yenit Martínez Garduño

Dr. en C.F. Alberto Garduño Martínez

Periodo de compilación: Febrero – Junio 2024

© de la edición: Carlos Alberto Baltazar Vilchis Centro Universitario UAEM  
Atlacomulco

© del diseño de estilo: Elizabeth Evangelista Nava Centro Universitario UAEM  
Atlacomulco

© del texto: Flores Luna Luis Antonio, García Jaime Jhovani.

## Contenido

1.1 introducción a la física del estado sólido. ....	11
1.1.1 Estructuras Cristalinas .....	12
1.1.2 Teoría de Bandas .....	15
1.1.3 Configuración de las bandas de energía.....	16
1.1.4 Bandas de energía.....	16
1.1.5 Fenómenos de Transporte .....	16
1.1.6 Magnetismo.....	18
1.1.7 Superconductividad.....	19
1.1.8 Semiconductores .....	20
1.1.9 Técnicas Experimentales .....	21
1.2 Historia de la física del estado solido .....	23
1.2.1 Antecedentes .....	23
1.2.3 La física del estado sólido.....	24
1.2.4 Historia de los semiconductores .....	25
.....	26
1.2.5 Los semiconductores en México .....	26
.....	27
1.2.6 Tendencias del sector de semiconductores.....	27
1.2.7 Progresos recientes en materia de semiconductores .....	28
.....	28
1.3 Estructura atómica .....	29
1.3.1 La importancia de la configuración electrónica de los elementos en la estructura atómica.....	31
1.3.2 El comportamiento de los electrones en los enlaces covalentes. ....	31
1.3.3 Estructura atómica en semiconductores .....	32
1.3.4 Desarrollo de nuevos materiales para el desarrollo de componentes semiconductores.....	34
1.4: Corriente en semiconductores.....	35
1.4.1 Comportamiento de la corriente en componentes semiconductores.....	37
1.4.2 Como afectan los fenómenos físicos a la corriente en semiconductores..	39
1.4.3 El desequilibrio en la concentración de portadores.....	40
1.5 Semiconductores tipo N y tipo P .....	42

1.5.1	Semiconductores intrínsecos .....	42
1.5.2	Semiconductores extrínsecos .....	42
1.5.3	Semiconductores de tipo P y de tipo N .....	43
1.5.4	Semiconductores tipo N .....	43
1.5.5	Semiconductor tipo P .....	44
1.5.6	Características del Semiconductor Tipo P .....	44
1.5.7	Características del Semiconductor Tipo N .....	45
1.5.8	Diferencias entre Semiconductor tipo P y semiconductor tipo N .....	45
1.5.9	Características generales del semiconductor tipo P .....	46
1.5.10	Características generales del semiconductor tipo N .....	46
1.6	Aplicaciones actuales de los semiconductores.....	47
1.6.1	Desarrollo y Producción .....	47
1.6.2	Investigación y Educación.....	49
1.6.3	Aplicaciones en Electrónica y Optoelectrónica.....	50
1.6.4	Avances en Materiales Bidimensionales .....	51
1.6.5	Impacto Económico y Futuro.....	52
	Preguntas.....	54
2.1	Diodo unión PN .....	61
2.1.1	Movimiento de Portadores en Equilibrio.....	61
2.1.2	Formación de la unión P-N .....	62
2.1.3	Aplicaciones de los diodos tipo PN .....	63
2.1.4	La unión PN en equilibrio térmico .....	63
2.1.5	Union del diodo PN polarizado.....	64
2.2	Polarización de un diodo .....	66
2.2.1	Concepto de Polarización .....	66
2.2.2	Polarizacion directa.....	67
2.2.3	Polarizacion inversa .....	68
2.2.4	Tension Umbral y Corriente Maxima .....	70
2.2.5	Influencia del Dopaje.....	71
2.2.6	Aplicaciones y Consideraciones.....	72
2.3	Características del voltaje-corriente de un diodo.....	72
2.3.1	¿Cómo distinguir un diodo gráficamente?.....	73

2.3.2 Tipos de diodos, características y sus símbolos .....	73
2.3.3 Comportamiento de la corriente en un diodo .....	77
2.3.4 Características de la corriente en los diodos.....	78
2.3.5 Especificaciones de la corriente en los diodos.....	78
2.3.6 Comportamiento del voltaje en el diodo .....	78
2.3.7 Fenómenos físicos que afectan el comportamiento de la corriente y el voltaje .....	79
2.3.8 Aplicaciones del diodo.....	80
2.4 El modelo del diodo .....	81
2.4.1 Generalidades.....	81
2.4.2 El modelo ideal de un diodo .....	83
2.4.3 El modelo práctico de un diodo .....	84
2.4.4 El modelo completo de diodo .....	85
2.4.5 Encapsulados típicos de diodos.....	86
2.5 Aplicaciones .....	88
2.5.1 Rectificadores .....	88
2.5.2 Filtros y reguladores.....	95
2.5.3 Limitadores.....	97
2.6 Diodos de propósito general.....	103
2.6.2 Diodo rectificador .....	103
2.6.3. Diodo Zener .....	106
2.6.3. Diodo Zener .....	107
2.6.4 Diodo Schottky .....	109
2.6.5 Diodo emisor de luz .....	110
2.7 Aplicaciones actuales .....	112
2.7.2 Diodo Avalancha .....	113
2.7.3 Diodo Laser.....	114
2.7.4 Diodo Schottky .....	115
2.7.5 Diodo Zener .....	116
2.7.6 Fotodiodo .....	117
2.7.8 Diodo Rectificador.....	119
2.7.9 Diodo PIN.....	120
2.7.10 Diodo de Unión PN .....	121

2.7.11 Diodo Túnel .....	122
2.7.12 Diodo Supresor de Voltaje Transitorio – Diodo TVS.....	123
2.7.13 Diodo Gunn .....	123
2.7.14 Rectificador Controlado de Silicio .....	124
2.7.15 Diodo SRD .....	125
2.7.16 Diodo IMPATT .....	126
2.7.17 Diodo Shockley .....	127
2.7.18 Diodo de Vacío.....	128
2.7.19 Otros Tipos de Diodos en Electrónica .....	128
2.7.1 Estudio de dispositivos y sistemas comerciales actuales basados en diodos .....	129
UNIDAD 3. Transistores de unión bipolar BJT .....	142
3.1 Estructura de un BJT .....	142
3.2 Operación básica de un BJT .....	146
.....	146
3.3 Características y parámetros de un BJT .....	148
.....	149
3.4 Aplicaciones .....	149
.....	150
.....	151
.....	152
.....	153
.....	154
.....	155
3.4.2 El BJT como interruptor.....	155
.....	156
3.5 El fototransistor .....	156
.....	157
.....	158
.....	159
3.6 Categorías y encapsulado de transistores .....	160
.....	160
.....	161

.....	162
.....	163
Funcionamiento.....	163
.....	164
3.7.1 Estudio de dispositivos y sistemas comerciales actuales .....	164
.....	165
.....	166
.....	167
.....	168
.....	169
.....	170
Referencias .....	171
4 Transistor MOSFET .....	173
4.1 MOSFET .....	173
4.2 Características y parámetros .....	174
4.3 Polarización .....	178
4.4 Aplicaciones de un MOSFET .....	180
4.5 Aplicaciones actuales.....	185
.....	189
.....	190
.....	191
REFERENCIAS.....	192
Izquierda, M. A. (2018). TEMA 6: TRANSISTORES. MURCIA: Universidad de Murcia. ....	192

## **PRESENTACIÓN**

La materia de dispositivos semiconductores se comprende como una parte de la electrónica la cual abarca todos aquellos elementos electrónicos capaces de actuar como conductores eléctricos o como aislantes eléctricos dependiendo de las condiciones físicas en que se encuentren.

Para el desarrollo de circuitos complejos, los dispositivos semiconductores son altamente utilizados dado que permiten conducir y modular la corriente eléctrica de acuerdo a los patrones necesarios.

Es por ello que la materia de dispositivos semiconductores, para la maestría en ciencias de la computación de la universidad autónoma del estado de México debe considerar los avances tecnológicos y las nuevas herramientas en el mercado que contribuyan al desarrollo de los proyectos de investigación.

Por tal motivo se presenta el siguiente material con el fin de ser considerado como una herramienta de apoyo para el desarrollo de la asignatura de dispositivos semiconductores.

## MAPA CURRICULAR: MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

### UNIDADES DE APRENDIZAJE DEL AREA BASICA

1	Teoría de la computación y complejidad algorítmica
2	Arquitectura de computadoras
3	Ingeniería de Software

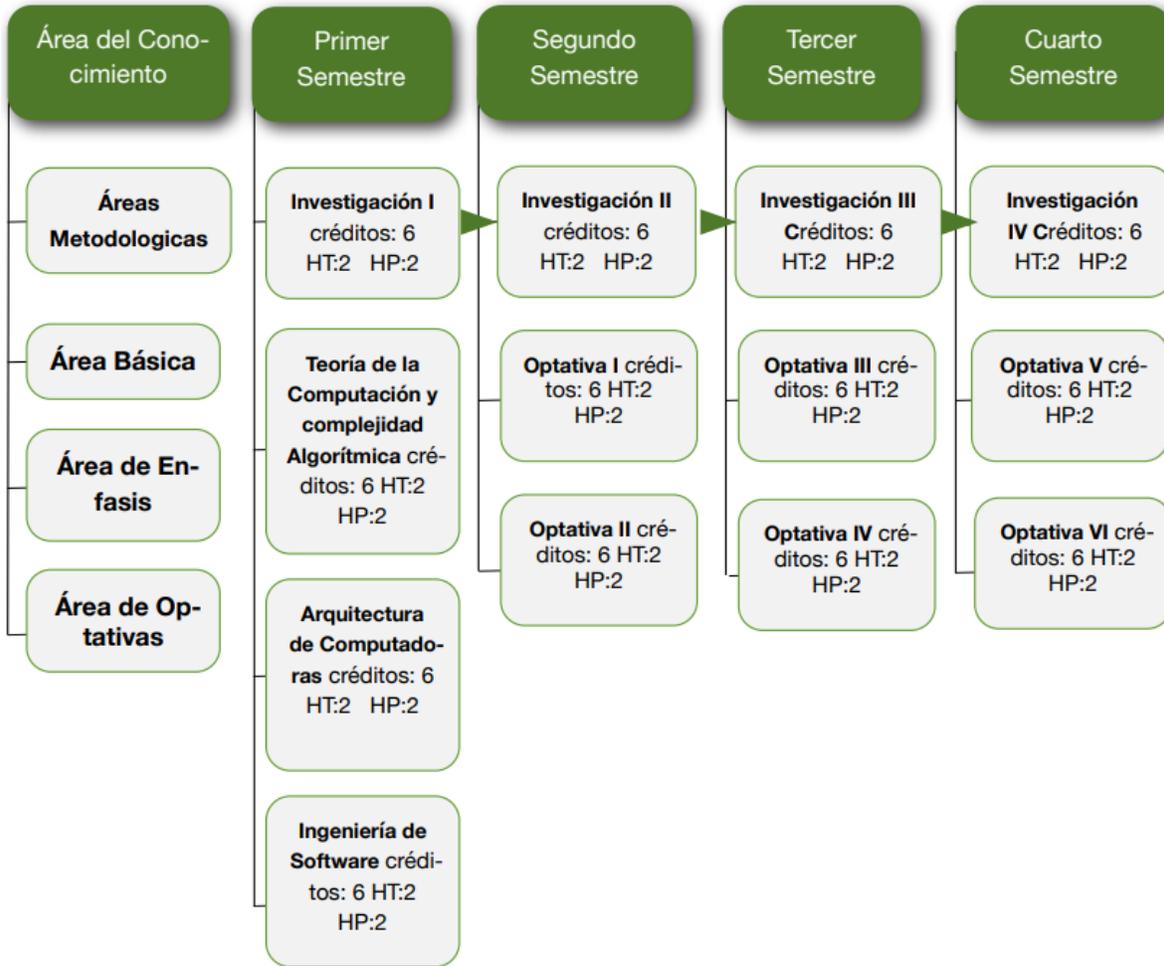
### UNIDADES DE APRENDIZAJE DEL AREA METODOLOGICA

1	Investigación I
2	Investigación II
3	Investigación III
4	Investigación IV

### UNIDADES DE APRENDIZAJE OPTATIVAS

1	Algoritmos Genéticos
2	Almacenes de datos
3	Base de Datos
4	Bases de datos avanzadas
5	Circuitos Integrados CMOS
6	Cómputo cuántico
7	Dispositivos semiconductores
8	Emprendimiento y Administración de Pymes
9	Estándares Internacionales de Calidad de Software
10	Fundamentos de la tecnología del software
11	Gestión de proyectos software
12	Inteligencia artificial
13	Minería de datos
14	Modelo de procesos de negocios
15	Procesos de software
16	Procesos estocásticos
17	Programación avanzada
18	Programación móvil
19	Redes neuronales artificiales
20	Sistemas basados en conocimiento
21	Sistemas de información distribuidos
22	Sistemas de información para la toma de decisiones
23	Sistemas tutoriales inteligentes
24	Sistemas WEB
25	Tecnologías y Aprendizaje
26	Temas selectos de computación
27	Temas selectos

## MAPA CURRICULAR: MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN



## CONTENIDO

### UNIDAD I: Introducción a la física del estado sólido

#### TEMA 1.1: Introducción a la física del estado sólido

##### OBJETIVO GENERAL

El alumno comprenderá los principios de funcionamiento, técnicas de caracterización, simulación y diseño de circuitos con dispositivos semiconductores básicos.

##### 1.1 Introducción a la física del estado sólido.

La física del estado sólido es una rama de la física que se ocupa de estudiar los estados sólidos de la materia. Este campo aborda las propiedades físicas de los sólidos desde un punto de vista microscópico, basándose en la teoría cuántica, el electromagnetismo, y la mecánica estadística. Es fundamental en el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías, incluyendo semiconductores, superconductores, y dispositivos magnéticos. Los cuerpos sólidos están formados por átomos densamente empaquetados con intensas fuerzas de interacción entre ellos. Los efectos de interacción son responsables de las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, magnéticas y ópticas de los sólidos.

Una característica importante de la mayoría de los sólidos es su estructura cristalina. Los átomos están distribuidos en posiciones regulares que se repiten regularmente de manera geométrica. La distribución específica de los átomos puede deberse a una variada gama de fuerzas. Por ejemplo, algunos sólidos como el cloruro de sodio o sal común se mantienen unidos por enlaces iónicos debidos a la interacción electrostática entre los iones que componen el material. En otros, como el diamante, los átomos comparten electrones, lo que da lugar a los llamados enlaces covalentes.

Las sustancias inertes, como el neón, no presentan ninguno de esos enlaces. Su existencia es el resultado de unas fuerzas de atracción conocidas como fuerzas de Van der Waals, así llamadas en honor al físico neerlandés Johannes Diderik van der Waals. Estas fuerzas aparecen entre átomos neutros o moléculas como resultado de la polarización eléctrica. Los metales, se mantienen unidos por lo que se conoce como gas electrónico, formado por electrones libres de la capa atómica externa compartidos por todos los átomos del metal y que definen la mayoría de sus propiedades.

### 1.1.1 Estructuras Cristalinas

Los sólidos se pueden clasificar ampliamente en dos categorías: cristalinos y amorfos. Los sólidos cristalinos tienen un ordenamiento periódico de átomos, iones o moléculas a lo largo de tres dimensiones espaciales, formando una estructura de cristal. Este ordenamiento periódico se describe a través de la red cristalina y la base, siendo la red la disposición geométrica de puntos que define la periodicidad y la base el grupo de uno o más átomos asociados a cada punto de la red.

La física del estado sólido constituye una parte importante de la física cuántica. Con su ayuda podemos comprender las propiedades mecánicas, térmicas, eléctrico-magnéticas y ópticas propias de los sólidos.

La existencia de la materia en un estado u otro depende de las condiciones de presión y temperatura en las que se formaron. De la misma forma, estos parámetros condicionan la formación de la estructura interna del sólido.

Cada elemento tiene sus propias curvas de cambio de fase, de manera que dependiendo del elemento se necesitarán unas condiciones u otras para la formación del sólido o para realizar cualquier otro cambio de fase. Dependiendo del alcance del orden espacial de la estructura interna en la materia y su distribución en la misma podemos distinguir entre:

- **Mono cristal:** presenta una fuerte interacción entre sus componentes los cuales describen una mínima oscilación con poca energía potencial. Las partículas están dispuestas de acuerdo con un orden en el espacio que está determinado de acuerdo con una red estructural formada por la «recreación» geométrica de la celdilla unidad en toda la estructura del sólido. Presentan lo que se conoce como anisotropía.
- **Poli cristal:** está compuesto por diversas regiones en las que individualmente se recrea un monocristal, aunque las disposiciones de cada una de estas regiones no son simétricas entre sí. Presenta lo que se llama Isotropía estadística.
- **Amorfos:** no presentan una estructura o distribución en el espacio, lo cual los determina como una estructura espacial tridimensional no definida. No se trata de una estructura cristalina.

En rigor, esta clasificación solo es aplicable a sustancias puras. En un modelo de sólido en el que los átomos están conectados entre sí mediante una especie de «muelles» (los cuales representarían la energía potencial que los une), la energía interna del sólido se compone de energía potencial elástica y energía cinética de sus átomos. La presión es una medida del grado de compresión de sus átomos y la temperatura una medida de la energía cinética interna del conjunto de estos. Esto nos permite determinar que de acuerdo con las características externas del medio en que se encuentre, permitirán al elemento en cuestión poder adoptar un estado u otro e incluso formar o no una estructura cristalina.

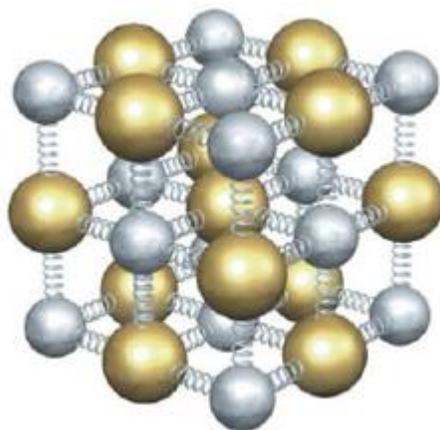
Sin embargo, la formación de una estructura cristalina no es un proceso fijo en un mismo elemento, ya que incluso tratándose así las condiciones de formación del sólido podrían determinar dos estructuras cristalinas diferentes para un mismo elemento, la cual otorga las propiedades tanto físicas y eléctricas como ópticas al nuevo sólido formado. Por ejemplo, el carbono puede cristalizar en grafito en determinadas condiciones y en otras cristaliza en el diamante, sin duda las características de uno frente a otro difieren bastante para tratarse en ambos casos de carbono cristalizado.

Este proceso no sólo es dependiente de la presión y la temperatura en sí mismos, sino también del tiempo aplicado en cada uno de dichos factores. De esta forma se sabe que la formación de cristales requiere un calentamiento del material a alta temperatura, aproximadamente 200 °C, lo que se conoce como temperatura de cristalización, a partir de la cual el elemento se funde para posteriormente, después de un tiempo lo suficientemente largo, cristalice. Al añadir temperatura al material, realmente le estamos dando energía, permitiendo que las partículas que lo componen oscilen a mayor velocidad con una mayor energía térmica, logrando que se funda (cambie al estado líquido). Luego mediante un enfriamiento lento conseguimos dar tiempo a las partículas que, de forma natural, tienden a retomar una forma geométrica y ordenada en la red interna consiguiendo así que se forme un cristal.

De igual forma, si repetimos el proceso, pero aplicando un tiempo de enfriamiento demasiado corto impedimos que las partículas puedan «recolocarse» en una red cristalina homogénea haciendo así que la solidificación de lugar a un amorfo. El policristal es el caso más típico de los que pueden encontrarse en la naturaleza, ya que un monocristal es un caso que rara vez se da. Un cristal posee diferentes zonas que no pueden homogeneizarse entre sí, pero se puede hacer que sean como monocristales individuales en cada una de sus regiones. Siguiendo el ejemplo del carbono, la cualidad de que un mismo elemento pueda cristalizar en diferentes formas nos lleva al hecho de que es la red cristalina que forman la que determina sus propiedades. En la naturaleza existen 14 tipos de redes cristalinas (otras más complejas son combinaciones de estas más simples) que son conocidas como redes de Bravais.

Estas redes son organizaciones geométricas tridimensionales en el espacio características de las partículas del sólido. Así pueden estudiarse las distribuciones en la red de los elementos. Por ejemplo: El fósforo(P) cristaliza en una estructura cúbica, el hierro (Fe) en una BCC (body-centered cubic) y la plata (Ag) en una fcc (face-centered cubic). Otros cristalizan en redes compuestas como por ejemplo los elementos del grupo 14 (C, Si, Ge...) o del grupo 13 de la tabla periódica que lo hacen en una estructura de tipo diamante, que es la combinación de dos redes fcc con una distancia interatómica de 1/4 de la diagonal.

Figura 1.2 Representación de una celdilla en la disposición geométrica de sus partículas.



Fuente: [apuntesdeunjoventonewton.blogspot.com.es](http://apuntesdeunjoventonewton.blogspot.com.es)

Según cada una de estas distribuciones, cada una de las partículas situadas en los nodos de la estructura, contribuye en una parte a la formación del número de átomos contenido en su interior. Se trata del número de partículas por celdilla elemental que puede obtenerse como:

$$n_c = \frac{nv}{8} + n_i + \frac{nf}{2} \quad (1)$$

Siendo "nv" el número de partículas en los vértices, "ni" en el interior y "nf" en las caras del tetraedro.

Debido a que muchos de los compuestos elementales presentan simetría esférica podemos visualizarlas considerando éstas como *empaquetamientos espaciales de esferas rígidas*. Partiendo de esta idea, podemos determinar la llamada Fracción de Empaquetamiento que nos proporciona una medida de lo "llena" que está la estructura reticular:

$$f_c = \frac{n_c \cdot V_e}{a^3} = \frac{\text{Volumen de las esferas}}{\text{Volumen de la celda}} \quad (2)$$

Para observar la estructura interna que posee un cristal generalmente puede determinarse a partir del análisis de la difracción ondulatoria producida cuando los fotones inciden en el cristal. Gracias a estas observaciones, W. L. Bragg propuso la conocida ley de Bragg, que permite ver superficialmente la posición de los planos que forman los átomos:

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (3)$$

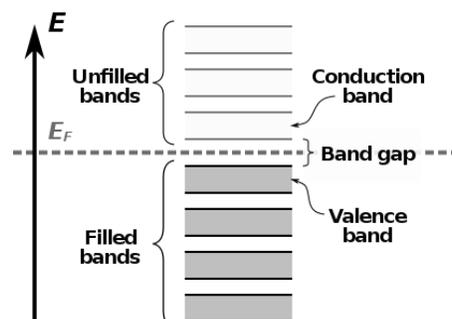
Estas mismas propiedades pertenecientes a los sólidos cristalinos y el fundamento de los cambios de fase es el utilizado en el proceso de grabación de CD-RW y DVD-RW mediante cambios en la estructura cristalina, haciendo zonas amorfas o policristalinas, según los datos (bits) que se desean grabar. Otras propiedades y teorías están relacionadas con la física de los cristales como las bandas de energías o los modelos que explican las propiedades eléctricas de conductores metálicos y semiconductores.

### 1.1.2 Teoría de Bandas

Una contribución central de la física del estado sólido es la teoría de bandas de energía, la cual explica el comportamiento eléctrico de los materiales. En un sólido, los niveles de energía de los electrones se agrupan en bandas separadas por gaps de energía. La diferencia fundamental entre conductores, semiconductores y aislantes radica en la configuración de estas bandas de energía y su ocupación por electrones.

En física de estado sólido, teoría según la cual se describe la estructura electrónica de un material como una estructura de bandas electrónicas, o simplemente estructura de bandas de energía. La teoría se basa en el hecho de que en una molécula los orbitales de un átomo se solapan produciendo un número discreto de orbitales moleculares

Figura 1.1.2.1 Representación esquemática de las bandas de energía en un sólido.



### **1.1.3 Configuración de las bandas de energía**

Cuando se une un gran número de átomos, como en las estructuras sólidas, el número de orbitales de valencia (los niveles de energía más altos) es tan grande y la diferencia de energía entre cada uno de ellos tan pequeña que se puede considerar como si los niveles de energía conjunta formaran bandas continuas en vez de, niveles de energía como ocurre en los átomos aislados. Sin embargo, debido a que algunos intervalos de energía no contienen orbitales, independiente del número de átomos agregados, se crean ciertas brechas energéticas entre las diferentes bandas.

### **1.1.4 Bandas de energía**

La banda de valencia (BV): está ocupada por los electrones de valencia de los átomos, es decir, aquellos electrones que se encuentran en la última capa o nivel energético de los átomos. Los electrones de valencia son los que forman los enlaces entre los átomos, pero no intervienen en la conducción eléctrica.

La banda de conducción (BC): está ocupada por los electrones libres, es decir, aquellos que se han desligado de sus átomos y pueden moverse fácilmente. Estos electrones son los responsables de conducir la corriente eléctrica.

En consecuencia, para que un material sea buen conductor de la corriente eléctrica debe haber poca o ninguna separación entre la BC y la BV (que pueden llegar a solaparse), de manera que los electrones puedan saltar entre las bandas. Cuando la separación entre bandas sea mayor, el material se comportará como un aislante. En ocasiones, la separación entre bandas permite el salto entre las mismas de solo algunos electrones. En estos casos, el material se comportará como un semiconductor. Para que el salto de electrones entre bandas en este caso se produzca deben darse alguna o varias de las siguientes situaciones: que el material se encuentre a altas presiones, a una temperatura elevada o se le añadan impurezas (que aportan más electrones).

Entre la banda de valencia y la de conducción existe una zona denominada banda prohibida o gap, que separa ambas bandas y en la cual no pueden encontrarse los electrones.

### **1.1.5 Fenómenos de Transporte**

Los fenómenos de transporte, incluyendo la conducción eléctrica y térmica, se explican a través del movimiento de electrones y fonones (cuasipartículas asociadas a las vibraciones de la red) en un material. La física del estado sólido proporciona modelos para entender cómo estos procesos dependen de la estructura y composición del material. (Robin et. al, 2008)

Para llevar adelante un análisis ingenieril se deben conocer las leyes físicas fundamentales que rigen a:

1- El transporte de cantidad de movimiento (flujo viscoso de fluidos), basado en el principio de

conservación de la cantidad de movimiento o 2da. ley de Newton.

2- El transporte de energía calorífica (conducción del calor en sólidos y fluidos, convección,

radiación), basado en la ley de conservación de la energía o 1er. principio de la termodinámica.

3- El transporte de materia (difusión ordinaria, térmica, de presión), basado en el principio de conservación de la materia.

Los anteriores, junto con otros postulados fundamentales de la física, tal como la gravitación, permitirían obtener una descripción matemática de cualquier fenómeno. Sin embargo, una descripción de este tipo para las propiedades de un gas en función de su configuración molecular es todavía de improbable solución. Por lo tanto, es evidente que en gran número de casos el comportamiento será demasiado complejo para permitir aplicar las leyes o principios enunciados en su forma fundamental, por lo que en esas situaciones habrá que recurrir a los resultados obtenidos de cuidadosos experimentos realizados en condiciones comparables. De esta forma, se puede mostrar una escala del nivel de descripción fenomenológico posible y el campo de aplicación.

*Tabla 1.1.5.1 Escala de nivel fenomenológico*

<b>ESCALA</b>	<b>APLICACIÓN</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>USO EN ANALISIS DE</b>
1- ATOMICO Y MOLECULAR	Formación fundamental básica	Teoría cinética, Mec. Estadística, Mec cuántica.	Funciones de distribución, Integrales de colisión.
2- MICROSCOPICO	Coefficientes de transporte	Transporte laminar, Transporte molecular.	Coefficientes de viscosidad, difusividad, conductividad.
3- GRADIENTE MÚLTIPLE Y MAXIMO	Coefficientes "efectivos" y de interfase	Transp. Turbulento, transp. medio poroso, transp. Interfase.	Constantes cinéticas, diseño de reactores, fenómenos turbulentos, capa límite
4- MACROSCOPICO	General (Inf. Empírica)	Factores de fricción, coef. de superficie, coef. de transferencia	Cinética, termodinámica, operaciones unitarias, diseño de equipos.

Los FENÓMENOS DE TRANSPORTE serán entonces el eslabón entre la descripción molecular analítica y la macroscópica empírica.

La búsqueda de la sistematización, además, permitirá reconocer que el transporte de cantidad de movimiento, energía calorífica y materia pueden ser estudiados por expresiones matemáticas de la misma forma, cambiando sólo la simbología de acuerdo con cada caso. Esto no sólo permite una presentación más compacta, sino que el mecanismo básico que rige a cada uno debe ser similar.

Por lo tanto, los objetivos planteados serán:

A- Desarrollar aptitudes para el análisis, utilizando los principios fisicoquímicos, para obtener

ecuaciones fenomenológicas que describan el transporte de cantidad de movimiento, energía

calorífica y materia.

B- Reconocer la similitud entre los mecanismos básicos de cada uno.

C- Aplicar los conocimientos previamente adquiridos de física, química y matemática para

obtener las relaciones fundamentales.

D- Adquirir destreza en el uso del lenguaje ingenieril o terminología, y en la utilización de la

bibliografía y manuales. Planteo de problemas con la ayuda de calculadores programables y

computadoras.

E- Estudiar modelos simples de aplicación en la ingeniería.

### **1.1.6 Magnetismo**

El magnetismo en materiales sólidos es otra área de estudio, que abarca desde el magnetismo intrínseco de los materiales ferromagnéticos hasta los efectos magnéticos inducidos por estructuras electrónicas complejas. Este campo tiene aplicaciones importantes en el almacenamiento de datos, motores eléctricos y generadores. (Nacional, 2010)

Por lo que el magnetismo se define como fenómeno natural en el que los materiales ejercen fuerzas de atracción o repulsión entre sí. Estas fuerzas son el resultado de la interacción de los campos magnéticos generados por partículas cargadas en movimiento, como electrones en átomos o corrientes eléctricas. (Nacional, 2010)

El electromagnetismo tiene una amplia gama de aplicaciones prácticas en diversos campos, tales como Electroválvulas, Timbres, Separadores Magnéticos, también se pueden encontrar en distintos componentes electrónicos como las bobinas electromagnéticas y los relés. (Nacional, 2010)

Es necesario mencionar que el magnetismo en si comprende diferentes áreas no solo de componentes eléctricos y electrónicos sino también físicos sin embargo dentro de los componentes eléctricos y electrónicos resaltan las propiedades del fenómeno magnetismo tales como el campo magnético el cual es una representación visual del campo magnético, que fluye desde el polo norte al polo sur en el exterior del imán y de sur a norte en el interior. (Nacional, 2010)

Los polos en el contexto del magnetismo se refieren a las regiones de un imán donde las fuerzas magnéticas son más intensas. En un imán, siempre existen dos polos: un polo norte y un polo sur. Estos polos magnéticos son los puntos donde las líneas de campo magnético entran (polo norte) o salen (polo sur) del imán. (Nacional, 2010)

Es importante destacar que los polos magnéticos son distintos de los polos geográficos de la Tierra. El polo norte magnético de un imán atraerá al polo sur de otro imán y viceversa, siguiendo la regla de que polos opuestos se atraen y polos del mismo tipo se repelen. (Nacional, 2010)

### **1.1.7 Superconductividad**

La superconductividad es un fenómeno físico en el cual ciertos materiales, cuando se enfrían por debajo de una temperatura crítica específica, pierden toda resistencia eléctrica y presentan la capacidad de expulsar completamente el campo magnético de su interior, fenómeno conocido como efecto Meissner-Ochsenfeld. (Baquero, 2014)

Algunas de las características principales de la superconductividad son:

- **Ausencia de Resistencia Eléctrica:** Los superconductores, al alcanzar la temperatura crítica, permiten el flujo de corriente eléctrica sin disipación de energía debido a la ausencia total de resistencia eléctrica en su interior. (Baquero, 2014)
- **Efecto Meissner-Ochsenfeld:** Los superconductores expulsan completamente el campo magnético de su interior cuando se enfrían por debajo de la temperatura crítica, lo que les permite flotar sobre imanes y exhibir propiedades magnéticas únicas. (Baquero, 2014)
- **Temperatura Crítica ( $T_c$ ):** Cada material superconductor tiene una temperatura crítica específica por debajo de la cual exhibe superconductividad. Esta temperatura puede variar según el material y las condiciones en las que se encuentre. (Baquero, 2014)

- Pares de Cooper: En el estado superconductor, los electrones se combinan en pares de Cooper debido a la atracción entre ellos, formando un estado ligado con energía negativa que constituye la base del estado superconductor. (Baquero, 2014)

La superconductividad tiene una amplia gama de aplicaciones en diversos campos debido a sus propiedades únicas. Algunas de las aplicaciones más destacadas incluyen:

- Imanes Superconductores: Los imanes superconductores se utilizan en resonancia magnética nuclear (RMN) y resonancia magnética nuclear de imagen (RMNI) en medicina para obtener imágenes detalladas del cuerpo humano. (Baquero, 2014)
- Generación y Almacenamiento de Energía: Los cables superconductores se utilizan en aplicaciones de generación y transmisión de energía eléctrica, ya que permiten transportar grandes cantidades de electricidad sin pérdidas significativas. (Baquero, 2014)
- Levitación Magnética: Los superconductores se utilizan en sistemas de levitación magnética para transportar objetos sin fricción, como trenes de levitación magnética (maglev). (Baquero, 2014)

### **1.1.8 Semiconductores**

Los semiconductores en estado puro (intrínseco) en términos generales es un material que tiene propiedades eléctricas intermedias entre un conductor (permite el flujo libre de corriente eléctrica) y un aislante (no permite el flujo libre de corriente eléctrica). Los semiconductores son fundamentales en la electrónica moderna ya que pueden controlar el flujo de corriente de manera precisa. Estos materiales son utilizados en la fabricación de componentes electrónicos como diodos, transistores y circuitos integrados, permitiendo el desarrollo de dispositivos cada vez más pequeños, rápidos y eficientes. (Parga, 2015)

Dentro de la fabricación de materiales semiconductores, existe una variante la cual se conoce como semiconductores dopados los cuales son materiales semiconductores a los que se le ha introducido impurezas controladas para modificar sus propiedades eléctricas. Estas impurezas son catalogadas como tipo N y tipo P por lo que la modificación del material permite la adquisición de nuevas propiedades tales como, Aumento de la conductividad, control de la conductividad debido a la mejora en la movilidad de los portadores de carga, la eficiencia de los dispositivos y a los estímulos externos. (Parga, 2015)

Es necesario mencionar, los fenómenos de transporte en semiconductores se refieren a los procesos físicos que gobiernan cómo se mueven los portadores de carga (electrones y huecos) a través de un material semiconductor. Estos fenómenos son fundamentales para entender el funcionamiento de dispositivos electrónicos basados en semiconductores, como transistores, diodos y circuitos integrados. (Yuri G. Gurevich, 2007)

Algunos de los fenómenos de transporte en semiconductores incluyen:

- Difusión: Movimiento de portadores de carga desde regiones de alta concentración a regiones de baja concentración, causado por gradientes de concentración.
- Deriva: Movimiento de portadores de carga bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado, lo que resulta en un flujo neto de carga a través del material. (Yuri G. Gurevich, 2007)
- Conductividad Diferencial Negativa: Algunos materiales exhiben un comportamiento en el que la conductividad disminuye con el aumento del voltaje, lo que puede tener aplicaciones en la comunicación vía microondas. (Yuri G. Gurevich, 2007)

El desarrollo de materiales semiconductores se proyecta hacia la innovación en formas de energía renovables y la nanotecnología con enfoque hacia la eficiencia y la sostenibilidad manteniendo la colaboración interdisciplinaria para impulsar avances significativos en la tecnología moderna. (Parga, 2015)

### **1.1.9 Técnicas Experimentales**

La caracterización de materiales en la física del estado sólido utiliza una amplia gama de técnicas experimentales, como la difracción de rayos X para determinar estructuras cristalinas, la espectroscopia para estudiar las bandas de energía, y la microscopía electrónica para observar la materia a escala nanométrica.

La física del estado sólido es una disciplina vasta y fundamental para el avance tecnológico, proporcionando los principios subyacentes para el diseño y la fabricación de nuevos materiales y dispositivos con aplicaciones en la electrónica, la energía, la informática, y más allá.

Es importante la comprensión de los fenómenos de transporte en semiconductores es crucial por varias razones fundamentales:

- **Diseño de Dispositivos Electrónicos:** Permite el diseño y la optimización de dispositivos electrónicos avanzados, como transistores, diodos y circuitos integrados, al comprender cómo se mueven los portadores de carga a través del material semiconductor. (Yuri G. Gurevich, 2007)
- **Mejora de la Eficiencia:** Comprender estos fenómenos permite aumentar la eficiencia de los dispositivos electrónicos al controlar y optimizar el flujo de corriente a través del semiconductor, lo que resulta en dispositivos más eficientes y de mejor rendimiento. (Yuri G. Gurevich, 2007)
- **Innovación Tecnológica:** La investigación en fenómenos de transporte en semiconductores impulsa la innovación tecnológica al abrir nuevas posibilidades para el desarrollo de dispositivos electrónicos más avanzados y sofisticados.

## **UNIDAD 1. Introducción a la física del estado sólido**

### **TEMA 1.2: Historia de la física del estado sólido**

#### **1.2 Historia de la física del estado sólido**

##### **1.2.1 Antecedentes**

Para entender el progreso de la ciencia a lo largo de la Historia hay que tener en cuenta que las sociedades desarrollan conocimientos científicos una vez que tienen necesidades materiales a las que la ciencia debe encontrar una solución. Por tanto, la ciencia no aparece en la historia hasta que las sociedades humanas se hicieron lo suficientemente complejas, y su evolución ha ido pareja con los avances que cada civilización hizo sobre las que la precedieron. (Sánchez-Quintanilla, s.f.)

Desde los inicios de la historia, la ciencia ha sido moldeada por las necesidades materiales de las sociedades humanas. Las civilizaciones antiguas como Egipto, Mesopotamia, India y China sentaron las bases de disciplinas como la astronomía y las matemáticas, abordando cuestiones prácticas como la organización de los trabajos agrícolas y la resolución de problemas geométricos. Los griegos, por su parte, fueron pioneros en la concepción de la naturaleza como objeto de conocimiento, buscando explicaciones generales a los fenómenos físicos.

Durante la época helenística, la ciencia experimentó avances significativos en disciplinas como la astronomía, la geometría y la óptica, sentando las bases de la tradición científica occidental. Sin embargo, con el tiempo, la vitalidad de la ciencia helenística disminuyó, en parte debido al debilitamiento de las ciudades y la falta de un enfoque experimental. Durante la Alta Edad Media, el conocimiento científico se estancó en Europa, aunque persistió en el Imperio Bizantino y el Imperio Persa. Fue con la llegada de los árabes que se revitalizó la actividad científica, especialmente a través de la traducción y adaptación de textos griegos y sánscritos, así como de las contribuciones propias en áreas como la mecánica, la óptica y la astronomía.

El surgimiento de las primeras universidades en Europa durante los siglos XII y XIII marcó un cambio en la actividad cultural, trasladándola de los monasterios a las ciudades. Aunque al principio se centraron en disciplinas como el Derecho y la Teología, surgieron figuras que abogaban por un enfoque más observacional y experimental en la ciencia. El Renacimiento trajo consigo una nueva orientación hacia las matemáticas aplicadas, impulsada por la necesidad de resolver problemas comerciales. La invención de la imprenta permitió una difusión más rápida de las ideas y métodos matemáticos, allanando el camino para el surgimiento de la física moderna.

A finales del siglo XVI, se sentaron las bases para la física moderna con la aparición de la teoría cuántica y la relatividad especial y general. Estas teorías revolucionarias, propuestas por científicos como Max Planck y Albert Einstein, desafiaron las concepciones previas y condujeron a un período de descubrimiento y avance sin precedentes en el campo de la física. Durante el siglo XIX, la termodinámica se consolidó como una disciplina fundamental, junto con el estudio de la electricidad y el magnetismo.

Durante el resto del siglo XX buena parte de los trabajos en Física estuvieron relacionados con extender el ámbito de aplicación de ambas teorías y con la persecución de una descripción unificada de las interacciones fundamentales siguiendo la propuesta presentada por Einstein. De esta forma surgieron nuevas disciplinas como la Física de Altas energías, la Física Atómica y Nuclear, la Física del Estado Sólido, la Astrofísica o la Cosmología. En 1967 la Física de Altas energías consiguió la descripción unificada del electromagnetismo y la interacción nuclear débil (Steven Weinberg y Abdul Salam) y poco más tarde el modelo de quarks para la interacción nuclear fuerte. A partir de entonces se presentaron diversas teorías para unificar estas tres interacciones, aunque la validez de ninguna de ellas ha sido aceptada de manera generalizada. La Física del estado sólido surgió durante los años 30 como una aplicación particular de la mecánica cuántica y una vez que a principios de los años 60 las máquinas de cálculo se hacen accesibles de forma generalizada para la investigación se convirtió en una de las disciplinas más importantes de la Física en la segunda mitad del siglo XX, quizá la más importante para la investigación industrial.

### **1.2.3 La física del estado sólido**

De acuerdo con Cruz-Beltrán (2021) y Bo Lojek (2007), la historia de la física del estado sólido es una fascinante narrativa que abarca siglos de desarrollo científico y tecnológico. Comienza con los primeros estudios sobre las propiedades de los sólidos, que se remontan a la antigüedad, pero la física del estado sólido como campo disciplinario distinto comenzó a emerger en el siglo XIX y ha experimentado un crecimiento exponencial desde entonces. A continuación, se muestra un resumen de algunos hitos importantes en su historia:

- Siglo XIX: La física del estado sólido como campo independiente comienza a tomar forma con los estudios de Michael Faraday sobre conductividad eléctrica en materiales sólidos y la investigación de Thomas Seebeck sobre el efecto termoeléctrico.
- Siglo XX: La física del estado sólido experimenta un gran avance con el descubrimiento del efecto fotoeléctrico por parte de Albert Einstein en 1905, seguido por los trabajos fundamentales de Max Planck y otros en la teoría cuántica, que proporcionaron una comprensión más profunda de la naturaleza de los sólidos.

- Década de 1920: El desarrollo de la mecánica cuántica lleva a una comprensión más completa de la estructura atómica de los sólidos. En 1928, Paul Dirac formula la ecuación de Dirac, que proporciona una descripción precisa del comportamiento de los electrones en un campo electromagnético.
- Décadas de 1930 y 1940: Se establecen las bases de la teoría de bandas, que describe cómo los electrones se distribuyen en los sólidos. Los trabajos de Felix Bloch, Arnold Sommerfeld, Eugene Wigner y otros contribuyen significativamente a este desarrollo.
- Décadas de 1950 y 1960: Se desarrollan teorías más sofisticadas sobre la conductividad eléctrica, la superconductividad y otros fenómenos relacionados con los sólidos. Destacan los trabajos de John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley en el desarrollo del transistor en 1947, que revolucionó la electrónica.
- Décadas de 1970 y 1980: Se descubren nuevos materiales con propiedades electrónicas interesantes, como los materiales superconductores de alta temperatura. Esto conduce a avances significativos en la tecnología de los semiconductores y la nanotecnología.
- Siglo XXI: La física del estado sólido sigue siendo un campo de intensa investigación y desarrollo. Se están explorando materiales bidimensionales como el grafeno y los topológicos, que tienen aplicaciones potenciales en electrónica, computación cuántica y otras áreas emergentes de la tecnología.

A lo largo de su historia, la física del estado sólido ha sido fundamental para el avance de la electrónica, la informática, la energía renovable y muchas otras áreas de la ciencia y la tecnología modernas. Su evolución ha sido impulsada por una combinación de teoría, experimentación y avances en técnicas de fabricación de materiales.

#### **1.2.4 Historia de los semiconductores**

Autores como Pearson, G., & Brattain, W. (1955), Busch (1989) y Morris (1990), en sus trabajos han permitido vislumbrar que la historia de los semiconductores se remonta a los siglos XIX y XX, con importantes hitos que han marcado su evolución y aplicación en la tecnología moderna. Los principales hitos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Descubrimiento de semiconductores naturales: En la década de 1820, se descubrieron los primeros semiconductores naturales, como el sulfuro de plata ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) y el sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), que mostraron propiedades eléctricas intermedias entre los conductores y los aislantes.
- Desarrollo de la teoría de semiconductores: A lo largo del siglo XIX, se realizaron investigaciones sobre la conductividad eléctrica en sólidos, lo que llevó al desarrollo de la teoría de semiconductores. Científicos como Baedeker, Wagner, Gudden, Wilson y otros contribuyeron a la comprensión de las propiedades semiconductoras de materiales como el  $\text{Cu}$  y el  $\text{Ag}_2\text{S}$ .

- Avances en la física de semiconductores: En la primera mitad del siglo XX, se produjeron avances significativos en la física de semiconductores. Investigadores como Hall, Rowland, Riecke, Drude y Koenigsberger desarrollaron teorías sobre la conductividad eléctrica en metales y semiconductores, así como sobre la influencia de la pureza y las imperfecciones en los materiales.
- Descubrimiento de los semiconductores artificiales: En la década de 1940, se logró la creación de los primeros semiconductores artificiales, como el germanio y el silicio dopados, que permitieron el desarrollo de dispositivos electrónicos como los transistores.
- Revolución de la electrónica: A partir de la introducción de los transistores en la década de 1950, se produjo una revolución en la electrónica, reemplazando a los antiguos tubos de vacío y dando lugar a la miniaturización de dispositivos electrónicos y al surgimiento de la era de la informática y las comunicaciones modernas.

### **1.2.5 Los semiconductores en México**

Por otro lado, (Mercado et al., 2016), detallan que la historia de los semiconductores en México se remonta a la década de los años 60, cuando la industria electrónica comenzó a establecerse en el país. En esa época, el estado de Jalisco fue uno de los primeros en albergar empresas dedicadas a la electrónica, como Mexican Burroughs y Motorola de México, que iniciaron operaciones en 1968. Estas empresas se vieron atraídas por las oportunidades que brindaba el Programa de Importación, el cual incentivaba la llegada de firmas extranjeras al país.

A lo largo de las décadas siguientes, la industria de semiconductores en México experimentó un crecimiento significativo. En los años 80, el país se integró a la división internacional del trabajo del sector electrónico-informático, participando en el desarrollo de una nueva industria electrónica de exportación. Esto implicó la incorporación de México en importantes empresas transnacionales y la producción de una amplia gama de productos electrónicos, incluyendo equipos computacionales, periféricos, televisores y equipos de telecomunicaciones.

Durante la década de los 90, México continuó su evolución en el sector de semiconductores, aplicando redes sistemáticas de producción internacional y subcontratación. Esta estrategia generó una alta dependencia en insumos y componentes provenientes de otros países, pero también permitió al país expandir su presencia en el mercado global de semiconductores.

En términos de comercio de microelectrónica, México ha logrado establecer alianzas y acuerdos internacionales que le han permitido participar activamente en la importación y exportación de semiconductores. Además, el país ha invertido en investigación y desarrollo en el sector de semiconductores, contribuyendo así a su integración en la industria a nivel mundial.

### **1.2.6 Tendencias del sector de semiconductores**

Así mismo, Mercado et al. (2016), menciona que el futuro de los semiconductores en México se presenta prometedor y lleno de oportunidades para seguir creciendo y consolidándose como un actor relevante en la industria tecnológica a nivel global. Algunos aspectos para considerar sobre el futuro de los semiconductores en México son los siguientes:

- **Innovación y Desarrollo Tecnológico:** México tiene el potencial de seguir impulsando la innovación y el desarrollo tecnológico en el sector de semiconductores. La colaboración entre empresas, instituciones académicas y centros de investigación puede fomentar la creación de soluciones tecnológicas avanzadas y competitivas a nivel internacional.
- **Diversificación de Productos y Mercados:** La diversificación de productos y la exploración de nuevos mercados pueden ser clave para el crecimiento sostenible de la industria de semiconductores en México. La adaptación a las tendencias tecnológicas emergentes, como la inteligencia artificial, el Internet de las cosas (IoT) y la computación en la nube, puede abrir nuevas oportunidades de negocio.
- **Formación de Talento Especializado:** La formación de talento especializado en el campo de los semiconductores es fundamental para garantizar la competitividad y la innovación en la industria. Programas educativos enfocados en áreas como la ingeniería electrónica, la nanotecnología y la ciencia de materiales pueden contribuir a fortalecer la base de recursos humanos calificados en el país.
- **Sostenibilidad y Responsabilidad Social:** El enfoque en la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social corporativa se está volviendo cada vez más relevante en la industria de semiconductores a nivel mundial. México puede aprovechar esta tendencia para promover prácticas empresariales responsables y contribuir al desarrollo sostenible del sector.
- **Colaboración Internacional:** La colaboración con socios internacionales en proyectos de investigación, desarrollo y comercialización de productos puede ser clave para ampliar el alcance de la industria de semiconductores mexicana. Alianzas estratégicas con empresas y centros de innovación en otros países pueden impulsar la internacionalización y la competitividad del sector.

### **1.2.7 Progresos recientes en materia de semiconductores**

Los avances recientes en semiconductores han sido impulsados por la necesidad de abordar la creciente contaminación del agua con sustancias orgánicas persistentes y no biodegradables, que representan riesgos significativos para la salud humana y los ecosistemas. La fotocatalisis se ha destacado como una técnica prometedora para remediar el medio ambiente y abordar la crisis energética, pero los fotocatalizadores basados en semiconductores a menudo presentan deficiencias, como la recombinación de portadores de carga generados por la luz, la baja respuesta a la luz visible y la cinética lenta de reacción en la superficie (Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. 2023).

Para superar estas limitaciones, se han implementado estrategias innovadoras, como la incorporación de grafeno y sus derivados en los semiconductores. El grafeno, con su estructura de nanolamina bidimensional y propiedades eléctricas distintivas, actúa como un soporte efectivo para mejorar la eficiencia de los fotocatalizadores. La alta área superficial, la conductividad eléctrica y la capacidad de adsorción del grafeno contribuyen a aumentar la actividad fotocatalítica de los semiconductores al mejorar la absorción de luz y la interacción con los contaminantes (Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. 2023).

Además, la formación de enlaces entre el grafeno y los semiconductores facilita la transferencia de carga y la separación eficiente de electrones y huecos, reduciendo la recombinación de portadores de carga y mejorando la eficacia de la reacción fotocatalítica. Estas mejoras en la eficiencia de los fotocatalizadores basados en grafeno y semiconductores han abierto nuevas posibilidades para la degradación de contaminantes orgánicos y la producción de hidrógeno a través de procesos fotocatalíticos (Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. 2023, Valls-Barbera, 2024).

## Unidad 1: Introducción a la física del estado sólido

### Tema 1.3: Estructura atómica

#### 1.3 Estructura atómica

La estructura atómica es uno de los conceptos fundamentales en la comprensión de la naturaleza de la materia. Desde la antigüedad, los filósofos griegos especularon sobre la existencia de partículas indivisibles que constituían la materia, una idea que se reflejaría siglos más tarde en la teoría atómica moderna. La palabra "átomo" deriva del griego "átomos", que significa "indivisible", aunque hoy sabemos que los átomos están compuestos por partículas subatómicas más pequeñas. La evolución del entendimiento de la estructura atómica ha sido un proceso complejo y fascinante que ha involucrado a numerosos científicos y descubrimientos a lo largo de la historia. (Asimov et. al., 1975)

El modelo atómico más temprano fue propuesto por el filósofo griego Demócrito en el siglo V a.C., quien postuló que la materia estaba compuesta por partículas indivisibles llamadas átomos. Sin embargo, esta idea fue principalmente filosófica y carecía de evidencia experimental. Fue durante el siglo XIX cuando los experimentos con electricidad y magnetismo, así como los avances en la espectroscopia, comenzaron a proporcionar pistas sobre la verdadera naturaleza de la estructura atómica.

El descubrimiento del electrón en 1897 por J.J. Thomson marcó un hito crucial en el desarrollo del modelo atómico. Thomson demostró que los átomos contenían partículas subatómicas negativas, los electrones, lo que llevó al modelo del "pastel de pasas" en el que los electrones estaban dispersos dentro de una nube de carga positiva, como las pasas en un pastel. Este modelo fue revolucionario en su época, pero pronto fue reemplazado por modelos más precisos. (Kragh, 2007)

En 1911, Ernest Rutherford realizó su famoso experimento de dispersión alfa en el que bombardeó una lámina delgada de oro con partículas alfa. Observó que la mayoría de las partículas alfa pasaban a través de la lámina sin ser desviadas, pero unas pocas eran desviadas en ángulos grandes. A partir de estos resultados, Rutherford postuló que los átomos tienen un núcleo pequeño y denso cargado positivamente en su centro, mientras que los electrones giran alrededor de él en órbitas definidas, como planetas alrededor del sol. Este modelo, conocido como el modelo planetario o modelo de Rutherford, proporcionó una descripción más precisa de la estructura atómica.

Sin embargo, el modelo de Rutherford tenía una falla importante: según las leyes de la electrodinámica clásica, los electrones en órbita deberían perder energía continuamente y eventualmente colapsar en el núcleo. Esta predicción era claramente inconsistente con la estabilidad observada de los átomos. La solución a este problema vino con el desarrollo de la mecánica cuántica en la primera mitad del siglo XX.

El modelo cuántico del átomo, desarrollado principalmente por Niels Bohr y posteriormente refinado por otros científicos, introdujo la idea de que los electrones no orbitan el núcleo en trayectorias definidas, como planetas en órbita, sino que existen en regiones de probabilidad llamadas "orbitales". Estos orbitales representan las posiciones más probables donde los electrones pueden encontrarse alrededor del núcleo. Además, el modelo cuántico explicó cómo los electrones pueden ocupar diferentes niveles de energía dentro del átomo. (Boveri, 2014).

En la actualidad, el modelo cuántico es la base de nuestra comprensión moderna de la estructura atómica. Se representa a los átomos como núcleos compuestos por protones y neutrones, rodeados por una nube de electrones que ocupan orbitales con diferentes niveles de energía. La teoría cuántica ha demostrado ser extraordinariamente precisa en la descripción de fenómenos atómicos y subatómicos, y continúa siendo objeto de investigación activa en la física moderna.

Además de los protones, neutrones y electrones, los átomos pueden contener otras partículas subatómicas, como los quarks, que constituyen los protones y neutrones. Además, los átomos pueden unirse entre sí mediante enlaces químicos para formar moléculas y estructuras más grandes, lo que da lugar a la diversidad de sustancias que observamos en el mundo que nos rodea.

La estructura atómica es un campo de estudio fundamental en la física y la química que ha evolucionado enormemente a lo largo de la historia. Desde las especulaciones filosóficas de los antiguos griegos hasta los modelos cuánticos avanzados de hoy en día, nuestra comprensión de los átomos y sus componentes constituyentes ha sido un viaje fascinante que ha transformado nuestra visión del universo y ha sentado las bases para numerosas aplicaciones tecnológicas y científicas. (Wilber, 2023).

### **1.3.1 La importancia de la configuración electrónica de los elementos en la estructura atómica**

En el contexto de los semiconductores, la importancia de la configuración electrónica de los elementos radica en su papel crucial en determinar las propiedades eléctricas de estos materiales. La configuración electrónica influye en la cantidad de electrones de valencia disponibles para participar en la conducción eléctrica y en la formación de enlaces en la estructura cristalina del semiconductor. (Carmona, 2006)

La comprensión de la configuración electrónica de los elementos semiconductores, como el silicio y el germanio, es fundamental para explicar por qué estos materiales tienen un comportamiento eléctrico intermedio entre los conductores y los aislantes. Por ejemplo, la presencia de cuatro electrones de valencia en el silicio y el germanio les confiere propiedades semiconductoras, ya que pueden conducir la electricidad bajo ciertas condiciones al tener una banda de energía parcialmente llena. (Carmona, 2006)

Además, la configuración electrónica de los elementos semiconductores también está relacionada con fenómenos como la formación de uniones PN y el dopaje para modular las propiedades eléctricas de los semiconductores. Por lo tanto, comprender la configuración electrónica de los elementos es esencial para explicar el comportamiento eléctrico específico de los semiconductores y su aplicación en dispositivos electrónicos. (Carmona, 2006)

### **1.3.2 El comportamiento de los electrones en los enlaces covalentes.**

En los enlaces covalentes, los electrones de valencia de los átomos se comparten para formar una estructura cristalina. En el caso de materiales semiconductores como el silicio y el germanio, los átomos comparten electrones para completar sus órbitas externas con ocho electrones, siguiendo la regla del octeto. Esta estructura cristalina hace que los átomos estén unidos de manera muy fuerte, y la fuerza que mantiene esta unión no es eléctrica, sino estructural. (E. E. T. P, 2017)

Cuando un electrón adquiere suficiente energía térmica para vencer la barrera potencial, puede romper un enlace covalente y convertirse en un electrón de conducción libre en el semiconductor. Este electrón libre se mueve en el cristal, mientras que el enlace roto se convierte en un hueco con carga positiva. Tanto los electrones de conducción como los huecos son responsables de la conductividad eléctrica en los semiconductores. (E. E. T. P, 2017)

Los materiales más utilizados en la elaboración de dispositivos semiconductores son el silicio y el germanio. Estos materiales son fundamentales en la industria electrónica debido a sus propiedades semiconductoras y su capacidad para controlar el flujo de corriente eléctrica en dispositivos como diodos, transistores y circuitos integrados. (E. E. T. P, 2017)

El silicio es el material semiconductor más utilizado en la fabricación de dispositivos electrónicos debido a su abundancia en la naturaleza, su estabilidad química y su capacidad para formar enlaces covalentes. El germanio también se utiliza en dispositivos semiconductores, aunque en menor medida que el silicio. (E. E. T. P, 2017)

La importancia de estos materiales radica en su capacidad para controlar el flujo de corriente eléctrica de manera eficiente, lo que permite la creación de dispositivos electrónicos cada vez más pequeños, rápidos y eficientes. Los semiconductores basados en silicio y germanio son la base de la industria de la electrónica moderna y han revolucionado campos como la informática, las comunicaciones y la electrónica de consumo. (E. E. T. P, 2017)

### **1.3.3 Estructura atómica en semiconductores**

La relación entre la estructura atómica y los semiconductores es fundamental para comprender el funcionamiento de muchos dispositivos electrónicos modernos. Los semiconductores son materiales que tienen una conductividad eléctrica intermedia entre los conductores, como los metales, y los aislantes, como el vidrio. Esta propiedad se debe en gran medida a la estructura atómica específica de los semiconductores y cómo interactúan los electrones en estos materiales.

En un nivel básico, los semiconductores están compuestos de átomos que forman una red cristalina. Los dos tipos de semiconductores más comunes son el silicio (Si) y el germanio (Ge), ambos elementos del grupo IV de la tabla periódica, lo que significa que tienen cuatro electrones de valencia. Esta configuración de valencia juega un papel crucial en las propiedades eléctricas de los semiconductores.

La estructura cristalina del silicio, por ejemplo, implica que cada átomo de silicio comparte electrones con cuatro átomos vecinos en la red cristalina, formando así enlaces covalentes. En esta estructura, todos los electrones de valencia están involucrados en los enlaces covalentes, lo que hace que los electrones no estén libres para moverse fácilmente y contribuir a la conducción eléctrica. (Lefevre, 2014).

Sin embargo, bajo ciertas condiciones, como la adición de impurezas o la aplicación de voltaje, los semiconductores pueden alterar su capacidad para conducir electricidad. Este fenómeno se basa en dos procesos principales: el dopaje y el cambio de la estructura atómica inducido por la excitación eléctrica.

El dopaje implica la introducción controlada de impurezas en la red cristalina de un semiconductor. Estas impurezas, conocidas como dopantes, pueden ser de tipo n (dopaje con átomos con más electrones de valencia que el material del semiconductor) o de tipo p (dopaje con átomos con menos electrones de valencia que el material del semiconductor). El dopaje de tipo n introduce electrones adicionales en la estructura cristalina, mientras que el dopaje de tipo p crea huecos (lugares vacíos donde faltan electrones) en la red cristalina. (Flórez, 2020)

Cuando se aplica un voltaje a un semiconductor dopado, se crea una diferencia de potencial que permite que los electrones se muevan a través del material. En un semiconductor de tipo n, los electrones adicionales de los átomos dopantes están libres para moverse y contribuir a la corriente eléctrica. En un semiconductor de tipo p, los huecos se comportan como portadores de carga positiva y pueden moverse a través del material.

La combinación de semiconductores de tipo n y tipo p es esencial para la creación de dispositivos electrónicos como los diodos y los transistores, que forman la base de la electrónica moderna. Por ejemplo, un diodo consiste en la unión de un semiconductor de tipo n y un semiconductor de tipo p, lo que crea una barrera de potencial que controla el flujo de corriente eléctrica en una dirección particular.

La comprensión de la estructura atómica de los semiconductores es crucial para explicar cómo estos materiales pueden manipularse para controlar el flujo de corriente eléctrica. Desde el dopaje hasta la formación de dispositivos electrónicos complejos, la relación entre la estructura atómica y los semiconductores ha sido fundamental para el desarrollo de la tecnología electrónica moderna. (Tosi, 2019)

### **1.3.4 Desarrollo de nuevos materiales para el desarrollo de componentes semiconductores**

El desarrollo de nuevos materiales para materiales semiconductores conlleva diversas ventajas que pueden impulsar avances significativos en tecnología y aplicaciones. (Gerzon E. Delgado, 2014). Algunas de las ventajas son las siguientes:

**Mejora en las propiedades eléctricas:** El diseño y síntesis de nuevos materiales semiconductores pueden conducir a mejoras en las propiedades eléctricas, como la conductividad, la movilidad de carga y la eficiencia en dispositivos electrónicos

**Optimización de la eficiencia energética:** La introducción de nuevos materiales semiconductores con propiedades mejoradas puede contribuir a la optimización de la eficiencia energética en dispositivos como celdas solares, sensores y dispositivos optoelectrónicos

**Ampliación de aplicaciones:** El desarrollo de nuevos materiales semiconductores abre la puerta a una amplia gama de aplicaciones en sectores como la electrónica, la fotónica, la energía renovable y la comunicación, lo que impulsa la innovación tecnológica (Gerzon E. Delgado, 2014)

Uno de los nuevos materiales desarrollados son Ternario  $\text{Cu}_2\text{GeSe}_4$ . Este compuesto ha demostrado tener propiedades interesantes, como un gran coeficiente de absorción y una pequeña brecha de energía, lo que lo hace atractivo para aplicaciones en celdas solares utilizando películas delgadas. (Gerzon E. Delgado, 2014)

Además, la caracterización estructural detallada mediante difracción de rayos-X proporciona información crucial para comprender su estructura cristalina, lo que es fundamental para su uso en dispositivos de alto rendimiento. Por lo tanto, el  $\text{Cu}_2\text{GeSe}_4$  muestra potencial para ser empleado en la fabricación de componentes semiconductores. (Gerzon E. Delgado, 2014)

El semiconductor ternario  $\text{Cu}_2\text{GeSe}_4$  ha demostrado varias propiedades interesantes que lo hacen atractivo para diversas aplicaciones:

**Gran coeficiente de absorción:** Se ha reportado que el  $\text{Cu}_2\text{GeSe}_4$  posee un gran coeficiente de absorción de  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ , lo que lo hace prometedor para aplicaciones en celdas solares utilizando películas delgadas

Pequeña brecha de energía: Este material presenta una pequeña brecha de energía de 1 eV, lo que también lo hace atractivo para su uso en dispositivos fotovoltaicos

Estructura cristalina cúbica: El  $\text{Cu}_2\text{GeSe}_4$  cristaliza con una estructura cúbica, lo que es relevante para su aplicación en componentes semiconductores

En resumen, el  $\text{Cu}_2\text{GeSe}_4$  ha demostrado propiedades como un alto coeficiente de absorción, una pequeña brecha de energía y una estructura cristalina cúbica, lo que lo posiciona como un material semiconductor con potencial para diversas aplicaciones tecnológicas. (Gerzon E. Delgado, 2014)

#### **1.4: Corriente en semiconductores**

La corriente en semiconductores se refiere al flujo de carga eléctrica a través de materiales semiconductores, como el silicio o el germanio. Estos materiales tienen características eléctricas únicas que les permiten comportarse como conductores o como aislantes dependiendo de diversas condiciones, como la temperatura o la aplicación de un campo eléctrico externo. (Boylestad, 2002)

Hay dos tipos principales de corriente en semiconductores:

- Corriente de derivación (o de conducción): Ocurre cuando los portadores de carga (electrones o huecos) se mueven a través del material debido a la aplicación de un campo eléctrico. Este tipo de corriente es similar a la corriente en un conductor metálico y se debe principalmente al movimiento de portadores de carga libres. (Zozaya, 2015)
- Corriente de difusión: Surge debido a la diferencia de concentración de portadores de carga a través de una región de semiconductor. Por ejemplo, si hay una región con una alta concentración de electrones y otra con una baja concentración de electrones, los electrones tenderán a difundirse de la región de alta concentración hacia la región de baja concentración, creando una corriente de electrones. Lo mismo ocurre con los huecos. Este tipo de corriente es importante en dispositivos como los diodos y transistores. (Valero, 2017)

La corriente en semiconductores es fundamental para el funcionamiento de una amplia gama de dispositivos electrónicos, desde diodos y transistores hasta circuitos integrados y componentes de potencia. La comprensión de los principios de la corriente en semiconductores es esencial para el diseño y la fabricación de estos dispositivos.

En semiconductores, como el silicio o el germanio, los electrones de conducción y los huecos juegan roles fundamentales en la conducción de la corriente eléctrica. (Soto, 2005)

- Electrones de conducción:

En un semiconductor intrínseco (sin impurezas), todos los átomos de silicio o germanio están enlazados en la red cristalina y todos los electrones de valencia están ocupando enlaces covalentes.

Cuando se aplica una energía externa, como un campo eléctrico o la absorción de fotones, algunos electrones de valencia pueden ser excitados a estados de energía más alta, dejando atrás huecos en los enlaces covalentes.

Estos electrones excitados (electrones de conducción) son capaces de moverse libremente en el cristal y contribuyen a la corriente eléctrica a través del material.

Los electrones de conducción son portadores de carga negativa y se mueven hacia los bornes positivos de un circuito eléctrico, lo que constituye la corriente de electrones.

- Un hueco es el sitio donde un electrón de valencia ha sido excitado a un nivel de energía superior, dejando atrás un vacío en el enlace covalente.
- Se puede considerar como si un electrón faltara en la estructura del cristal.
- A pesar de que conceptualmente se describen como partículas positivas, los huecos son simplemente la ausencia de un electrón y no son partículas reales. Son una forma conveniente de describir el comportamiento de los electrones en los semiconductores.
- Los huecos pueden moverse dentro del cristal, y cuando un electrón de valencia vecino se mueve para llenar el hueco, se crea un nuevo hueco en otra ubicación.
- Los huecos contribuyen a la corriente eléctrica en el semiconductor, moviéndose hacia los bornes negativos de un circuito eléctrico en la dirección opuesta a la de los electrones.

Tanto los electrones de conducción como los huecos son portadores de carga en un semiconductor y juegan un papel crucial en la conducción de la corriente eléctrica. La interacción entre ellos determina las propiedades eléctricas y el comportamiento de dispositivos semiconductores como los diodos, los transistores y los circuitos integrados.

En los semiconductores, el comportamiento de la corriente eléctrica está influenciado por la presencia de portadores de carga tanto positivos (huecos) como negativos (electrones). Cuando un semiconductor se dopa con impurezas donadoras de electrones, se convierte en un material tipo n, donde la conducción es predominantemente electrónica. Por otro lado, si se dopa con impurezas aceptoras de electrones, se convierte en un material tipo p, donde la conducción es predominantemente por huecos.

En un material tipo n, al aplicar un voltaje, los electrones débilmente ligados se mueven hacia un punto de potencial positivo, lo que genera un flujo de corriente electrónica. Por otro lado, en un material tipo p, el paso de corriente es bloqueado debido a la barrera de oposición en la unión, lo que lo hace útil para aplicaciones como diodos rectificadores y estabilizadores de voltaje.

#### **1.4.1 Comportamiento de la corriente en componentes semiconductores**

En los semiconductores, el comportamiento de la corriente eléctrica está influenciado por la presencia de portadores de carga tanto positivos (huecos) como negativos (electrones). Cuando un semiconductor se dopa con impurezas donadoras de electrones, se convierte en un material tipo n, donde la conducción es predominantemente electrónica. Por otro lado, si se dopa con impurezas aceptoras de electrones, se convierte en un material tipo p, donde la conducción es predominantemente por huecos. (Farrera, 2008)

En un material tipo n, al aplicar un voltaje, los electrones débilmente ligados se mueven hacia un punto de potencial positivo, lo que genera un flujo de corriente electrónica. Por otro lado, en un material tipo p, el paso de corriente es bloqueado debido a la barrera de oposición en la unión, lo que lo hace útil para aplicaciones como diodos rectificadores y estabilizadores de voltaje. (Farrera, 2008)

La teoría de bandas es un concepto fundamental en la física de materiales que describe la estructura de los niveles de energía de los electrones en sólidos cristalinos. Esta teoría explica cómo los electrones se distribuyen en bandas de energía en lugar de niveles discretos, como en átomos individuales, debido a la interacción entre los átomos en un cristal. (Farrera, 2008)

Es importante comprender la teoría de bandas para la conductividad eléctrica porque explica cómo los electrones pueden moverse en un material sólido y contribuir a la corriente eléctrica. En un material conductor, como un metal, los electrones de valencia ocupan una banda de energía que se superpone con la banda de conducción, lo que permite que los electrones se muevan fácilmente y conduzcan la electricidad. (Farrera, 2008)

Por otro lado, en materiales aislantes, la banda de energía de valencia está separada por una brecha de energía significativa de la banda de conducción, lo que dificulta que los electrones se muevan y la corriente eléctrica fluya. En los semiconductores, la brecha de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción es más pequeña que en los aislantes, lo que permite cierta conductividad eléctrica que puede ser controlada mediante dopaje y polarización de la unión pn. (Farrera, 2008)

El movimiento relativo de los huecos en un semiconductor es un concepto importante en la conducción de la corriente eléctrica en este tipo de material. En un semiconductor intrínseco, el número de electrones disponibles para la conducción es igual al número de huecos formados, lo que limita su utilidad para aplicaciones electrónicas directas. (Farrera, 2008)

Cuando se agregan impurezas (dopaje) a un semiconductor, se pueden crear regiones con una mayor concentración de electrones o huecos, lo que modifica su comportamiento eléctrico. Por ejemplo, al agregar impurezas donadoras de electrones, se incrementa la cantidad de electrones disponibles para la conducción, convirtiendo al semiconductor en un material tipo n, donde la corriente es principalmente electrónica. (Farrera, 2008)

Por otro lado, al agregar impurezas aceptoras de electrones, se incrementa la cantidad de huecos disponibles para la conducción, convirtiendo al semiconductor en un material tipo p, donde la corriente es principalmente por huecos. Este proceso de controlar la cantidad y tipo de impurezas en un semiconductor se conoce como dopaje y es fundamental para ajustar las propiedades eléctricas del material para aplicaciones específicas. (Farrera, 2008)

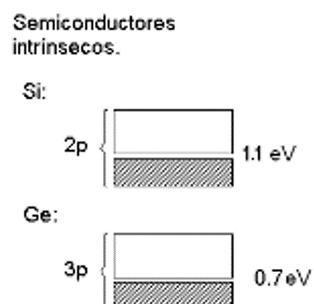


Fig 1.4.1.1 Bandas prohibidas para materiales semiconductores

Para comprender el movimiento relativo de los huecos, es necesario recurrir a la analogía donde a los electrones los imaginaremos como esferas que se mueven por un tubo (fig.2).

Cuando una esfera (electrón) se disloca, deja un espacio vacío (hueco positivo), el cual es ocupado inmediatamente por la esfera (electrón) adyacente, (b) y (c). El desplazamiento se repite hasta que la última esfera (electrón) se mueve, dejando un último espacio vacío (hueco), (d). El movimiento de las esferas hacia la izquierda genera un movimiento aparente de los espacios vacíos hacia la derecha. (Farrera, 2008)

De la misma manera, puede entenderse el movimiento, en sentidos opuestos, de los electrones (negativos) y “huecos” positivos, en un semiconductor. En los semiconductores intrínsecos, el número de electrones disponibles para la conducción y los correspondientes huecos formados, se encuentran en igual número y los materiales de este tipo son de poca utilidad para la electrónica. Sin embargo, cuando se agregan ciertos átomos (impurezas) a estos materiales, sus propiedades eléctricas cambian notablemente. Así, cuando se agrega una impureza “donadora de electrones”, la proporción de electrones será mayor que la de huecos, y el material se comportará como un “portador de carga negativa” (Farrera, 2008)

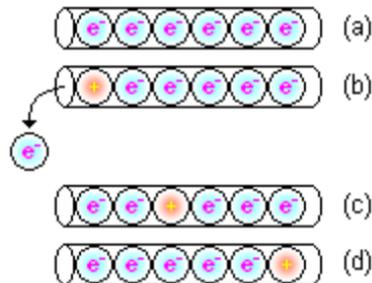


Fig. 1.4.1.2 Movimientos de huecos en materiales semiconductores

#### 1.4.2 Como afectan los fenómenos físicos a la corriente en semiconductores

Los fenómenos de transporte en semiconductores tienen un impacto significativo en la corriente que fluye a través de estos materiales. Algunos de los aspectos que afectan la corriente en semiconductores incluyen (Yuri G. Gurevich, 2007):

- Interacción electrón-fonón: La interacción entre los electrones y los fonones en el material puede influir en la resistividad y, por lo tanto, en la corriente que puede pasar a través del semiconductor. (Yuri G. Gurevich, 2007)

- Efecto de campos eléctricos y magnéticos: Los campos eléctricos y magnéticos pueden modular la conductividad del semiconductor y, por lo tanto, afectar la corriente que fluye a través de él. (Yuri G. Gurevich, 2007)
- Conductividad diferencial negativa: Algunos materiales presentan conductividad diferencial negativa, lo que significa que la corriente puede disminuir con el aumento de la tensión. Este fenómeno es importante en aplicaciones tecnológicas, como la comunicación vía microondas. (Yuri G. Gurevich, 2007)
- Propagación de ondas electromagnéticas: La propagación de ondas electromagnéticas en semiconductores también puede influir en la corriente, ya que está relacionada con las propiedades térmicas del material. (Yuri G. Gurevich, 2007)

Los fenómenos de transporte en semiconductores afectan la corriente a través de interacciones complejas entre electrones, fonones, campos eléctricos y magnéticos, así como propiedades específicas del material como la conductividad diferencial negativa y la propagación de ondas electromagnéticas. (Yuri G. Gurevich, 2007)

#### **1.4.3 El desequilibrio en la concentración de portadores**

El desequilibrio en la concentración de portadores se refiere a una situación en la que la cantidad de electrones y huecos en un semiconductor no se encuentra en equilibrio termodinámico. Esto puede ocurrir cuando hay diferencias en las temperaturas de los electrones y los huecos, lo que puede provocar cambios en la distribución de portadores en las bandas de conducción y de valencia. (Lopez, 2004)

Cuando se presenta este desequilibrio, la concentración de portadores en las bandas puede variar, lo que a su vez afecta la respuesta del material semiconductor a estímulos externos, como campos eléctricos intensos. Estas disparidades en la concentración de portadores pueden influir en la conductividad eléctrica, en la generación de corriente y en fenómenos de recombinación-generación en el semiconductor. (Lopez, 2004)

El desequilibrio en la concentración de portadores, causado por diferencias en las temperaturas de electrones y huecos, afecta la generación de corriente eléctrica en semiconductores de varias formas. Este desequilibrio puede modificar la población de los niveles de impureza, lo cual influye en la movilidad de los portadores y en la tasa de recombinación de los mismos. Además, puede provocar cambios en la concentración de portadores en las bandas de conducción y de valencia, lo que impacta en la distribución de carga y en la respuesta del material a campos eléctricos intensos. (Lopez, 2004)

La importancia de los portadores de carga como electrones y huecos, desempeñan un papel fundamental en la conducción de corriente eléctrica en los semiconductores. Los electrones, al moverse a través de la banda de conducción, contribuyen a la corriente eléctrica en un sentido, mientras que los huecos, que son ausencias de electrones en la banda de valencia, contribuyen en sentido opuesto. Estos portadores son responsables de transportar la carga eléctrica a través del material semiconductor y de permitir el flujo de corriente en dispositivos electrónicos. (Lopez, 2004)

En el contexto de desequilibrios energéticos y de concentración, como se discute en el documento, los portadores pueden experimentar cambios en su concentración y en su energía promedio debido a factores como el calentamiento. Estos desequilibrios pueden influir en la conductividad eléctrica, en la generación de corriente y en fenómenos de recombinación-generación en los semiconductores. (Lopez, 2004)

## 1.5 Semiconductores tipo N y tipo P

### 1.5.1 Semiconductores intrínsecos

Un semiconductor intrínseco se reconoce como el tipo más puro de semiconductor. Los semiconductores intrínsecos también pueden reconocerse como semiconductores de tipo i o semiconductores no dopados. En estos, los electrones presentes en la banda de conducción y los huecos presentes en la banda de valencia son iguales en número. Los ejemplos más comunes de semiconductores intrínsecos son el Silicio (Si) y el Germanio (Ge). (Mendoza, 2021).

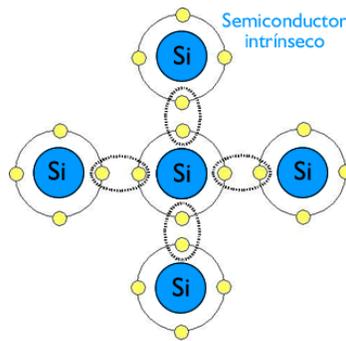


Figura 1.5.1.1. Semiconductor intrínseco

### 1.5.2 Semiconductores extrínsecos

Existe otro tipo de semiconductores que se obtienen artificialmente añadiendo impurezas a los semiconductores intrínsecos. Estos nuevos semiconductores se denominan DOPADOS. Existen dos clases de semiconductores dopados: semiconductores N y semiconductores P (Rodríguez, 2001). Ramos (2021) define a los semiconductores del tipo P y del tipo N son semiconductores extrínsecos. El semiconductor se puede clasificar en base a su dopaje; como intrínseco y extrínseco según la relación de pureza en de sí mismos.

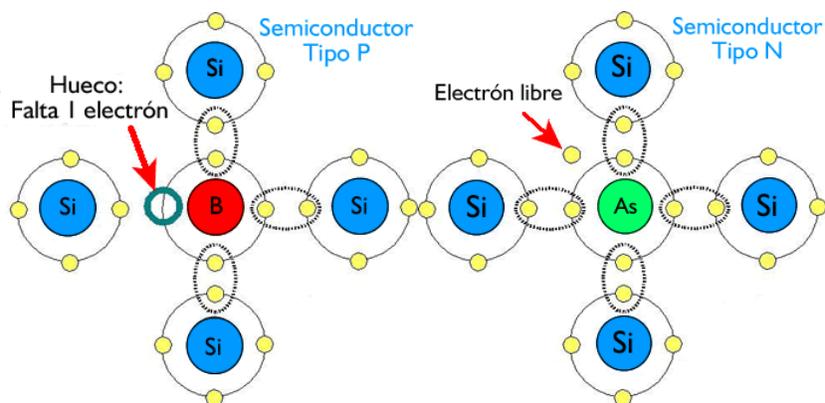


Figura 1.5.2.1. Semiconductores extrínsecos tipo P y tipo N

### 1.5.3 Semiconductores de tipo P y de tipo N

Para la elaboración del material semiconductor del tipo p; se realiza agregando los elementos del grupo III de la tabla periódica química. Para la elaboración del material semiconductor del tipo n; se logran agregando los elementos del grupo V de la tabla periódica química. (Pineda, 2012)

Group III	Group IV	Group V
<b>B</b> Boron	<b>C</b> Carbon	<b>N</b> Nitrogen
<b>Al</b> Aluminum	<b>Si</b> Silicon	<b>P</b> Phosphorus
<b>Ga</b> Gallium	<b>Ge</b> Germanium	<b>As</b> Arsenic
<b>In</b> Indium	<b>Sn</b> Tin	<b>Sb</b> Antimony
<b>Tl</b> Thallium	<b>Pb</b> Lead	<b>Bi</b> Bismuth

Figura 1.5.3.1. Elementos de la tabla periódica trivalentes y pentavalentes para elaborar semiconductores.

### 1.5.4 Semiconductores tipo N

Estos tipos de semiconductores se obtienen cuando se mezclan semiconductores puros con elementos pentavalentes (valencia 5). Cuando el silicio se mezcla con elementos pentavalentes, cuatro de sus electrones se unirán a cuatro átomos de silicio vecinos formando un enlace con ellos. Pero el quinto electrón permanecerá débilmente unido al átomo padre. Entonces, para liberar este electrón, la energía de ionización requerida es muy baja. Por lo que este electrón débilmente unido puede viajar en la red incluso a temperatura ambiente. (Chavero, 2024).

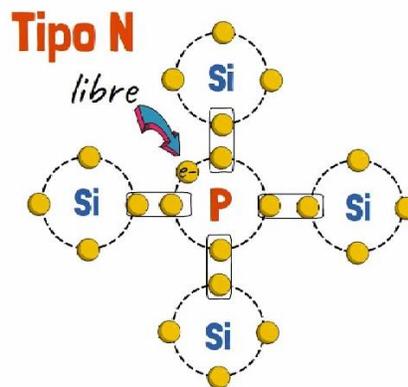


Figura 1.5.4.1. Semiconductores tipo N con un electrón libre

### 1.5.5 Semiconductor tipo P

Un semiconductor tipo p se forma cuando se mezclan semiconductores puros con agentes dopantes trivalentes (valencia 3). Por ejemplo, con la adición de un elemento trivalente en un átomo de silicio, tres de sus electrones formarán un enlace con tres de sus átomos de silicio vecinos. Pero no hay ningún electrón libre para formar un enlace con el cuarto átomo de silicio. Este proceso provoca la formación de una vacante o un agujero entre el cuarto átomo de silicio y el trivalente. Entonces, un electrón de la órbita exterior del átomo vecino saltará para llenar este agujero. Este salto del electrón creará un agujero en el lugar de su presencia. En otras palabras, para la conducción, hay un agujero disponible. (Chavero, 2024).

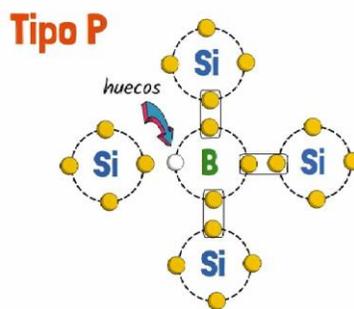


Figura 1.5.5.1. Semiconductores tipo P con un hueco

A continuación, se reconocerán las características más sencillas para la identificación correcta y conocer los tipos de cargas que poseen; como los materiales que los componen.

### 1.5.6 Características del Semiconductor Tipo P

Para definir un semiconductor de tipo P, los átomos de impurezas trivalentes; como el indio (In), el galio (Ga), les son agregados al semiconductor intrínseco teniendo como el tipo P. Para los semiconductores del tipo P; se tiene que los portadores mayoritarios de carga serán los huecos y los portadores minoritarios de cargas serán los electrones. (Baltazar, 2023)

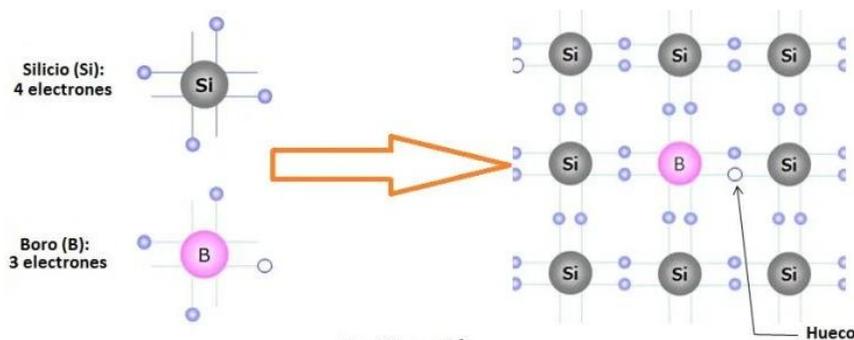


Figura 1.5.6.1. Semiconductor con impureza trivalente (Boro)

Como dato de conocimiento extra se tiene que; la densidad que poseen los huecos es mayor a la densidad que poseen los electrones. También se tiene que el porcentaje en el nivel de aceptaciones de intercambio; se encuentra principalmente más cercana de la banda de valencia.

### 1.5.7 Características del Semiconductor Tipo N

Se verá que para la clasificación y definición del semiconductor del tipo N; por mediación de los átomos de impurezas pentavalentes. Se tiene como impurezas pentavalentes al Antimonio (Sb) y Arsénico (As); los cuales son agregados a un semiconductor intrínseco. Teniendo como resultado a un semiconductor del tipo n.

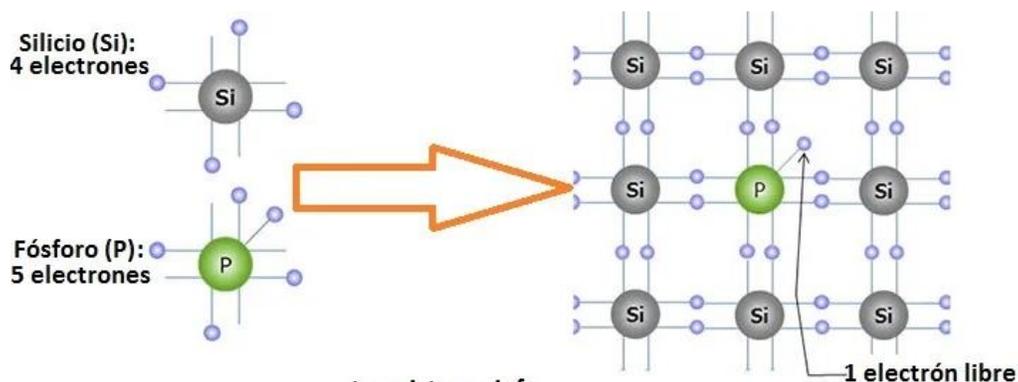


Figura 1.5.7.1. Semiconductor con impureza pentavalente (Fósforo)

Para este semiconductor la mayoría de los portadores de carga serán los electrones; mientras que los portadores de carga minoritarios son huecos. En este caso se verá que la densidad en los electrones es mucho mayor que la densidad que tienen los huecos. Aquí se tiene que el nivel del donante se encuentra gradualmente más cerca de la banda de conducción. (Zúñiga, 2020).

### 1.5.8 Diferencias entre Semiconductor tipo P y semiconductor tipo N

Se conocerán casi todas las diferencias entre un semiconductor del tipo P y un semiconductor del tipo N. Se repasan las principales diferencias que se deben conocer de ambos tipos; como los tipos de carga portadoras ya sean de mayoría y de minoría. Los elementos que se usan para el dopaje, naturaleza del elemento de dopaje.

También la densidad que tienen estos portadores de carga, como el nivel de Fermi, la carga mayoritaria transportadores movimiento de dirección, niveles de energía y otros datos relevantes de diferenciación entre ambos. Se comenzará con la diferencia del tipo p y luego las del tipo n. (Troyo, 2015)

### **1.5.9 Características generales del semiconductor tipo P**

- Son elementos del grupo III ver en la imagen de la tabla periódica química Al, Ga, In, etc.
- El semiconductor de tipo P normalmente se forman agregando impurezas trivalentes.
- Debido a la concentración de agujeros es alta, este semiconductor llevará una carga preferentemente +Ve.
- Se verá que el movimiento del portador de carga mayoritario será de alto potencial a bajo potencial.
- Se denominan aceptores debido a la formación de agujeros en este semiconductor.
- La conductividad que poseen los del tipo P se deberá por la presencia que tienen los portadores de carga mayoritarios debido a los agujeros.
- En el proceso de dopaje cuando se le agrega la impureza, como resultado se obtendrán huecos (espacio sin electrones). El cual se nombrará átomo aceptor.
- Aquí se tiene que los portadores de cargas mayoritarios son los huecos y que los portadores de cargas minoritarias serán los electrones.
- Se tiene que el nivel de Fermi del semiconductor de tipo P; se encuentra entre el nivel de energía del aceptor y con el de la banda de valencia.
- La densidad que poseen los huecos serán mucho mayor a la densidad de los electrones; la cual se representa ( $n_h \gg n_e$ ).
- El nivel de concentración en los portadores de carga mayoritarios será superior.
- En el caso del tipo P; se identificó que el nivel de energía del aceptor está muy cerca de la banda de valencia y ausente de la banda de conducción.

### **1.5.10 Características generales del semiconductor tipo N**

- Son elementos del grupo V ver en la imagen de la tabla periódica química As, Sb, P, Bi, etc.
- El semiconductor de tipo N normalmente se forman agregando impurezas pentavalentes.
- Debido a la concentración de electrones, este semiconductor llevará una carga preferentemente -Ve.
- Se verá que el movimiento del portador de carga mayoritario será de bajo potencial a alto potencial.
- Se denominan aceptores debido a la formación de electrones en este semiconductor.
- La conductividad que poseen los del tipo N se deberá por la presencia que tienen los portadores de carga mayoritarios ya que son electrones.

- En el proceso de dopaje cuando se le agrega la impureza, se obtendrán unos electrones adicionales extras. El cual se nombrará átomo donante.
- Aquí se tiene que los portadores de cargas mayoritarias son los electrones y los portadores de cargas minoritarios son los huecos.
- Se tiene que el nivel de Fermi en los semiconductores tipo N; se encuentra entre el nivel de energía del donante y con la banda de conducción.
- La densidad que poseen los electrones será mucho mayor que la densidad que poseen lo huecos; la cual se representa ( $n_e \gg n_h$ ).
- El nivel de concentración en los portadores de carga mayoritarios es superior.
- En el caso del tipo N; se confirmó que el nivel de energía del donante está muy cerca de la banda de conducción y ausente de la banda de valencia.

## **1.6 Aplicaciones actuales de los semiconductores**

Los semiconductores son materiales con propiedades eléctricas que se sitúan entre los conductores y los aislantes, lo que les permite ser fundamentales en la fabricación de dispositivos electrónicos. Estos materiales son esenciales en la creación de móviles, ordenadores, electrodomésticos, vehículos y dispositivos médicos, y están en el centro de avances tecnológicos como el 5G, la inteligencia artificial, la conducción autónoma y la Internet de las cosas. (Iberdrola, 2021)

### **1.6.1 Desarrollo y Producción**

Las empresas líderes en la fabricación de semiconductores se encuentran principalmente en Taiwán, Corea del Sur y Estados Unidos. Sin embargo, la crisis de suministro reciente ha evidenciado la dependencia de estos mercados y la necesidad de diversificar la producción. En respuesta, la Unión Europea y países como España están invirtiendo significativamente para aumentar su capacidad de producción de semiconductores. (Universidad Politécnica de Cataluña, 2023)

A su vez es necesario mencionar que los materiales semiconductores no solo se definen por la optimización o mejora de sistemas ya existentes sino también en el desarrollo de nuevos materiales que puedan abaratar costos o que tengan un uso potencial, ya sea en el diseño y construcción de sistemas embebidos inteligentes o que contribuyan a la educación u otras áreas. (Vanasupa, 2022)

Los polímeros semiconductores son materiales orgánicos que presentan propiedades semiconductoras, lo que significa que tienen la capacidad de conducir la electricidad de manera intermedia entre un conductor (como un metal) y un aislante (como un plástico). Estos materiales son de gran interés en diversas áreas, como la electrónica flexible, la optoelectrónica y la fotónica, debido a su capacidad para transportar cargas eléctricas y emitir luz. (Vanasupa, 2022)

Los polímeros semiconductores se utilizan en la fabricación de dispositivos electrónicos como diodos emisores de luz (LEDs), paneles solares orgánicos, transistores orgánicos, sensores y otros dispositivos electrónicos flexibles y de bajo costo. Su versatilidad y propiedades únicas los hacen atractivos para aplicaciones en la industria y la investigación científica. (Vanasupa, 2022)

Los polímeros semiconductores ofrecen una serie de beneficios significativos en diversos campos, incluyendo la educación multidisciplinaria y la investigación científica. Algunos de los beneficios clave de los polímeros semiconductores son:

- **Facilidad de manipulación:** Los polímeros semiconductores permiten a los estudiantes fabricar y probar dispositivos electrónicos visibles a simple vista utilizando técnicas de fabricación simples y económicas, lo que facilita la experimentación y comprensión de conceptos complejos.
- **Accesibilidad:** A diferencia de los dispositivos inorgánicos emisores de luz, cuya fabricación requiere técnicas costosas y sofisticadas, los dispositivos basados en polímeros semiconductores son más accesibles para los estudiantes de licenciatura, ya que son de mayor tamaño y más fáciles de manipular.
- **Enfoque multidisciplinario:** Los polímeros semiconductores fomentan la participación de estudiantes de diversas disciplinas, como química, ingeniería de materiales y eléctrica, al proporcionar una plataforma para integrar conceptos teóricos con aplicaciones prácticas, enriqueciendo así la experiencia educativa.
- **Aplicaciones versátiles:** Los polímeros semiconductores tienen aplicaciones en una amplia gama de dispositivos electrónicos, como diodos emisores de luz, sensores de imagen y pantallas, lo que los convierte en materiales versátiles y atractivos para la investigación y el desarrollo tecnológico. (Vanasupa, 2022)

### **1.6.2 Investigación y Educación**

La investigación en semiconductores está avanzando hacia el desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones, como los sensores de viento con microchips de silicio utilizados en el rover Perseverance de la NASA. Además, se están explorando materiales emergentes y diseños bioinspirados para mejorar la eficiencia de los dispositivos electrónicos. Instituciones educativas como la UPC ofrecen programas especializados para formar a los futuros profesionales del sector.

Los semiconductores desempeñan un papel fundamental en el desarrollo educativo de los alumnos en el campo de la electrónica y la ingeniería. Aquí se presentan algunas razones clave de su importancia: (Alfonso Pontes Pedrajas, 2017)

- **Base de la electrónica moderna:** Los semiconductores, como los transistores, son la base de la electrónica moderna y se utilizan en una amplia variedad de dispositivos electrónicos, desde computadoras hasta teléfonos móviles y sistemas de comunicación.
- **Aplicaciones prácticas:** Al comprender el comportamiento de los semiconductores, los alumnos pueden aplicar este conocimiento en el diseño y la construcción de circuitos electrónicos, lo que les permite desarrollar habilidades prácticas en el campo de la ingeniería.
- **Fomento del pensamiento crítico:** El estudio de los semiconductores requiere un entendimiento profundo de conceptos científicos y tecnológicos complejos, lo que fomenta el pensamiento crítico y la resolución de problemas en los alumnos.
- **Preparación para el mercado laboral:** Conocer el funcionamiento de los semiconductores es esencial para aquellos que desean trabajar en campos relacionados con la electrónica, la tecnología y la ingeniería, lo que prepara a los alumnos para el mercado laboral actual.
- **Innovación y avances tecnológicos:** El conocimiento de los semiconductores permite a los alumnos participar en la innovación y contribuir a los avances tecnológicos en áreas como la electrónica, las comunicaciones y la informática.

En resumen, el estudio de los semiconductores es crucial para el desarrollo educativo de los alumnos, ya que les proporciona las bases teóricas y prácticas necesarias para comprender y trabajar con tecnologías electrónicas avanzadas en la actualidad. (Alfonso Pontes Pedrajas, 2017)

### **1.6.3 Aplicaciones en Electrónica y Optoelectrónica**

Los semiconductores permiten la conducción y modulación de la corriente eléctrica, lo que es crucial para la industria electrónica. Se utilizan en transistores, circuitos integrados, diodos eléctricos, sensores ópticos y láseres de estado sólido, entre otros. Los materiales más comunes incluyen el silicio, el germanio y el arseniuro de galio. (Universitat de València, s.f.)

Los semiconductores son la base para el desarrollo de nuevas tecnologías y optimización de las mismas, debido a que son los materiales base utilizados en la investigación para el desarrollo de celdas solares. En este caso, se estudian semiconductores de óxido de titanio y titanatos modificados con el objetivo de mejorar sus propiedades ópticas, eléctricas y optoelectrónicas para su aplicación en dispositivos fotovoltaicos. La modificación de estos semiconductores busca aumentar la eficiencia de conversión de energía solar en electricidad, lo cual es fundamental en el desarrollo de tecnologías sostenibles y renovables. (Esteves, 2023)

Las celdas solares, también conocidas como paneles solares, tienen diversas aplicaciones principales, entre las que se destacan:

- **Generación de electricidad:** Las celdas solares convierten la energía solar en electricidad, lo que permite alimentar sistemas eléctricos en hogares, edificios, empresas e incluso en redes eléctricas a gran escala.
- **Sistemas de energía solar fotovoltaica:** Se utilizan para la generación de energía eléctrica a partir de la luz solar, tanto en instalaciones conectadas a la red como en sistemas aislados, como en casas, granjas, parques solares, etc.
- **Carga de baterías:** Las celdas solares se utilizan para cargar baterías en dispositivos portátiles, vehículos eléctricos, sistemas de respaldo de energía, entre otros.
- **Aplicaciones espaciales:** En la industria aeroespacial, las celdas solares se utilizan en satélites y naves espaciales para proporcionar energía eléctrica en el espacio.
- **Bombeo de agua:** Se utilizan en sistemas de bombeo de agua para riego agrícola, suministro de agua potable en zonas rurales, entre otros.

#### **1.6.4 Avances en Materiales Bidimensionales**

La investigación en materiales semiconductores bidimensionales, como el seleniuro de indio, está abriendo posibilidades para la creación de dispositivos electrónicos y optoelectrónicos más eficientes y económicos. (McKinsey & Company, 2022)

Los materiales bidimensionales semiconductores son una clase especial de materiales bidimensionales que exhiben propiedades semiconductoras. Estos materiales tienen un ancho de banda prohibida (gap de energía) que les permite comportarse como semiconductores, es decir, pueden conducir la electricidad de manera controlada.

Algunos ejemplos de materiales bidimensionales semiconductores son los dicalcogenuros de metales de transición (TMDCs), como el MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, y GaSe. Estos materiales tienen una estructura de capas y su gap de energía puede variar de indirecto a directo dependiendo del número de capas. Esto les confiere propiedades ópticas y electrónicas únicas que los hacen atractivos para aplicaciones en fotodetectores, transistores y otros dispositivos optoelectrónicos.

En el campo de la optoelectrónica, los materiales bidimensionales semiconductores son de gran interés debido a su capacidad para convertir la luz en señales eléctricas y viceversa, lo que los hace ideales para aplicaciones en fotodetectores y dispositivos optoelectrónicos avanzados.

Los materiales bidimensionales semiconductores tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos campos debido a sus propiedades únicas. Algunas de las principales aplicaciones de estos materiales incluyen:

- **Fotodetectores:** Los materiales bidimensionales semiconductores se utilizan en la fabricación de fotodetectores para la detección de luz en diferentes rangos espectrales, incluido el infrarrojo. Su capacidad para convertir la luz en señales eléctricas los hace ideales para aplicaciones en sensores de imagen, cámaras y sistemas de detección remota.
- **Transistores:** Los transistores basados en materiales bidimensionales semiconductores, como los transistores de efecto campo (FET), se utilizan en la electrónica de alta velocidad y baja potencia. Estos transistores ofrecen un rendimiento mejorado en comparación con los transistores de silicio tradicionales, lo que los hace atractivos para aplicaciones en dispositivos electrónicos avanzados.

- Celdas solares: Los materiales bidimensionales semiconductores se investigan para su uso en celdas solares y dispositivos fotovoltaicos. Su capacidad para absorber la luz y generar corriente eléctrica los convierte en candidatos prometedores para aplicaciones en energía solar.
- Dispositivos optoelectrónicos: Estos materiales se utilizan en la fabricación de dispositivos optoelectrónicos como moduladores ópticos, emisores de luz y detectores de luz. Su respuesta rápida a la luz y su eficiencia en la conversión de energía los hacen valiosos en aplicaciones de comunicaciones ópticas y tecnologías de visualización.

En resumen, los materiales bidimensionales semiconductores tienen aplicaciones significativas en fotodetectores, transistores, celdas solares y dispositivos optoelectrónicos, lo que los convierte en componentes clave en la próxima generación de tecnologías electrónicas y ópticas. (Vaquero Garzon, 2019)

### **1.6.5 Impacto Económico y Futuro**

La escasez de semiconductores ha afectado a diversas industrias, lo que ha llevado a una inversión significativa en nuevas fábricas para satisfacer la demanda creciente. Se espera que el mercado de semiconductores continúe creciendo, impulsado por la demanda de dispositivos electrónicos y la adopción de tecnologías emergentes. Sectores como la automoción y la computación en la nube podrían ver un aumento significativo en la demanda de semiconductores. (Universidad Latina de Costa Rica, 2024)

Se enlistan a continuación otras aplicaciones actuales en el uso de los semiconductores:

- A. Electrónica de consumo: Los semiconductores son fundamentales en dispositivos como smartphones, tablets, televisores, reproductores de música, y consolas de videojuegos. Permiten la miniaturización de estos dispositivos mientras se aumenta su potencia y eficiencia.
- B. Computadoras y periféricos: Desde microprocesadores hasta memorias RAM y discos de estado sólido (SSD), los semiconductores son cruciales para el funcionamiento y la mejora de computadoras personales, laptops, y servidores.
- C. Telecomunicaciones: Los semiconductores posibilitan la comunicación global a través de dispositivos móviles y la infraestructura de telecomunicaciones, incluyendo transmisores, receptores, y antenas.

- D. Redes y almacenamiento de datos: Los switches, routers, y otros dispositivos de red dependen de los semiconductores para gestionar y dirigir el flujo de datos a través de internet y las redes internas de las empresas.
- E. Automoción: La industria automotriz utiliza semiconductores en sistemas de gestión de motores, sistemas de asistencia al conductor, sistemas de navegación, y en la electrificación de vehículos, incluidos los vehículos eléctricos (EV) y los sistemas de baterías.
- F. Energía renovable y sistemas de gestión de energía: Los semiconductores son esenciales en la conversión de energía en sistemas solares fotovoltaicos y en inversores para energía eólica. También desempeñan un papel crucial en la gestión de la red eléctrica y en la eficiencia de la transmisión de energía.
- G. Iluminación: Los diodos emisores de luz (LED) y la iluminación de estado sólido utilizan materiales semiconductores para producir una iluminación más eficiente y de mayor duración en comparación con las fuentes de luz tradicionales.
- H. Salud y biotecnología: Los semiconductores se usan en dispositivos médicos, incluidos los marcapasos, máquinas de resonancia magnética (MRI), equipos de rayos X, y dispositivos portátiles de monitoreo de salud, mejorando la precisión y la disponibilidad de tratamientos y diagnósticos médicos.
- I. Defensa y aeroespacial: En este sector, los semiconductores se encuentran en sistemas de navegación, comunicaciones, vigilancia, y control de armamentos. La robustez y la capacidad de funcionar en condiciones extremas son especialmente valoradas en estas aplicaciones.
- J. Robótica y automatización industrial: Los semiconductores permiten la inteligencia y la conectividad en robots y sistemas de automatización que realizan una amplia gama de tareas de manufactura, inspección, y logística.

Los semiconductores son cruciales para el desarrollo y funcionamiento de la tecnología moderna. Con la creciente demanda de dispositivos electrónicos y la adopción de nuevas tecnologías, la industria de los semiconductores se enfrenta a desafíos y oportunidades significativas. La investigación y la educación en este campo son esenciales para asegurar el progreso y la innovación en el futuro.

## **Preguntas**

1.- ¿Qué es la banda de conducción en un material sólido?

A) Está ocupada por los electrones libres responsables de conducir la corriente eléctrica.

B) Es la zona donde se encuentran los electrones en reposo.

C) Contiene electrones ligados a los átomos.

2.- ¿Qué fenómenos de transporte se explican a través del movimiento de electrones y fonones en un material sólido?

A) Conducción magnética y convección térmica.

B) Conducción eléctrica y difusión de presión.

C) Conducción eléctrica y térmica.

3.- ¿Cuál fue uno de los avances significativos en la ciencia durante la época helenística?

A) Descubrimiento de la electricidad

B) Avances en astronomía, geometría y óptica

C) Invención de la imprenta

D) Desarrollo de la teoría de la relatividad

4.- ¿Qué disciplina científica experimentó un avance significativo con el descubrimiento del efecto fotoeléctrico por Albert Einstein en 1905?

A) Física de partículas

B) Física del estado sólido

C) Física nuclear

D) Física cuántica

5.- ¿Cuál de los siguientes científicos descubrió el electrón, una partícula subatómica con carga negativa?

A) Ernest Rutherford

B) Niels Bohr

C) J.J. Thomson

D) James Chadwick

6.- ¿Qué tipo de material se comporta como un "portador de carga negativa" cuando se agrega una impureza donadora de electrones?

A) Material tipo p

B) Material tipo n

C) Material intrínseco

7.- ¿Qué tipo de dopaje convierte a un semiconductor en un material tipo p, donde la corriente es principalmente por huecos?

A) Dopaje con impurezas donadoras de electrones

B) Dopaje con impurezas aceptoras de electrones

C) Dopaje con impurezas neutras

8.- ¿Cuál es la característica principal de un semiconductor tipo P?

A) Los portadores de carga mayoritarios son electrones

B) Se forman agregando impurezas trivalentes

C) La carga preferente es negativa

D) El nivel de Fermi se encuentra entre la banda de conducción y la banda de valencia

9.- ¿Qué tipo de semiconductor se obtiene al mezclar semiconductores puros con elementos pentavalentes?

- A) Semiconductor tipo P
- B) Semiconductor tipo N
- C) Semiconductor intrínseco
- D) Semiconductor extrínseco

10.- ¿Para qué aplicación se utilizan los materiales bidimensionales semiconductores en el campo de la optoelectrónica?

- A) Generación de electricidad
- B) Fotodetectores
- C) Carga de baterías
- D) Aplicaciones espaciales

### **Respuestas correctas**

- 1.- A
- 2.- C
- 3.- B
- 4.- B
- 5.- C
- 6.- B
- 7.- B
- 8.- C
- 9.- B
- 10.- B

## Referencias

- Baquero, R. (2014). La superconductividad: sus orígenes, sus teorías, sus problemas candentes hoy. *Departamento de Física, Ciencias físicas*, 38(<https://repositorio.accefyn.org.co/jspui/bitstream/001/825/1/2.%20La%20Superconductividad.pdf>), 18-33.
- Nacional, I. P. (2010). Magnetismo y electromagnetismo. En *Magnetismo y electromagnetismo* (págs. 1-23). Ciudad de México: IPN.
- Parga, J. T. (2015). Asomate a la materia: ¿Que es un semiconductor? En *Asomate a la materia: ¿Que es un semiconductor?* (págs. 3-24). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Yuri G. Gurevich, F. P. (2007). Fenómenos de transporte en semiconductores. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C.*, 20(002. <https://www.researchgate.net/publication/236173633>), 38-39.
- Carmona, A. G. (2006). Influencia de la temperatura en el comportamiento eléctrico de los materiales: análisis de su comprensión y dificultades de aprendizaje. *Investigaciones en Enseño de Ciencias (Área de ciencias)*, 7(6), 67-83.
- E. E. T. P. (2017). *Materiales semiconductores intrínsecos, impurezas en el sólido cristalino*. Ciudad de México: Escuela de Educación Técnico Profesional N° 460 'Guillermo Lehmann'.
- Gerzon E. Delgado, J. E. (2014). CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL SEMICONDUCTOR TERNARIO  $\text{Cu}_2\text{GeSe}_4$ . *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, 34-38.
- Farrera, I. (19 de 03 de 2008). *Universidad Autónoma del Estado de México*. Obtenido de [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/\\_27503.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/_27503.pdf)
- Lopez, G. E. (2004). Corriente eléctrica de portadores calientes en semiconductores intrínsecos: desequilibrio en la concentración. *Revista Mexicana de Física*, 620-624.
- Yuri G. Gurevich, F. P. (2007). Fenómenos de transporte en semiconductores. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C.*, 38-39.

Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. (2023). Recent progress in semiconductor/graphene photocatalysts: Synthesis, photocatalytic applications, and challenges. *RSC Advances*, 13(1), 421-439. <https://doi.org/10.1039/D2RA07225D>

Busch, G. (1989). Early history of the physics and chemistry of semiconductors-from doubts to fact in a hundred years. *European Journal of Physics*, 10(4), 254-264. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/10/4/002>

Cruz-Beltrán. J. (2021). Breve historia de la Física. Colegio República de Colombia IED. <https://bit.ly/4at0CpJ>

Bo Lojek (2007). History of semiconductor engineering. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34258-8>

Mercado, A. M., Facio, M. M., Flores, F. F., & Moya, A. G. (2016). Historia y evolución de la industria de semiconductores y la integración de México en el sector. *European Scientific Journal, ESJ*, 12(18), 65-65. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n18p65>

Morris, P.R. (1990). A History of the World Semiconductor Industry. Institution of Electrical Engineers. Peregrinus.

Pearson, G., & Brattain, W. (1955). History of semiconductor research. *Proceedings of the IRE*, 43(12), 1794-1806. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1955.278042>

Sánchez-Quintanilla. M. A. (s.f.). Breve historia de la física. Facultad de Física. Universidad de Sevilla. <https://bit.ly/3Pin0da>

Valls-Barberà. M. (2024.). Apuntes. Ilustre colegio oficial de fisioterapeutas de la Comunidad Valenciana. <https://bit.ly/3vfEjEH>

Asimov, I., Cruz, A., & Villena, M. I. (1975). Breve historia de la química (No. 580). Madrid: Alianza Editorial.

Boveri, M. M. (2014). El nacimiento del átomo cuántico: una breve historia de sus comienzos. *Anales de Flórez Galván*, L. A. (2020). Correlación entre las propiedades estructurales y ópticas del óxido de zinc nanoestructurado dopado con cobalto.

*Química de la RSEQ*, (2), 162-168.

Lefevre, R. (2014). 5501-14 MATERIALES Estructura.

Kragh, H. (2007). Generaciones cuánticas. Ediciones Akal.

Tosi, E. (2019). Estudios de Superficies de Nanoestructuras Semiconductoras.

Wilber, K. (2023). Cuestiones cuánticas: escritos místicos de los físicos más famosos del C

Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2002). Electronic devices and circuit theory. Pearson Educación.

Soto, I. E. P. (2005). Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Santiago de Chile, 7.

Zozaya Coello, A. A. (2015). Obtención y caracterización eléctrica del material  $\text{In}_2\text{S}_3/\text{CuInS}_2$  para aplicación como material termoeléctrico.

Valero, L. J. P. (2017). Caracterización eléctrica de contactos de aluminio fabricados por deposición física de vapor sobre obleas de Silicio de distintos dopajes (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica del Perú (Peru)).

Baltazar, J. A. R. (2023). Síntesis y caracterización del semiconductor magnético diluido nanoestructurado  $\text{CdS}:\text{Mn}$  con aplicaciones potenciales en la fabricación de dispositivos electrónicos.

Chavero, L. G. J. (2024). Estudio de películas delgadas de  $\text{ZnS}$  impurificadas con  $\text{Cr}$  y  $\text{Mn}$  POR la técnica de baño químico.

Mendoza Ruíz, C. A. (2021). Nanopartículas de  $\text{SnO}_2$  dopado con cobalto preparado por descomposición térmica: un estudio de sus propiedades estructurales y ópticas.

PINEDA LEON, H. A. (2012). *Presentación de una formulación alternativa para la elaboración de películas nanoestructuradas de  $\text{PbS}$  mediante técnica de depósito de baño químico utilizando polietilénimina* (Master's thesis, PINEDA LEON, HORACIO ANTOLIN).

Ramos Rivero, J. D. (2021). Efecto sobre las propiedades estructurales, ópticas y magnéticas del Dopaje con cobalto en nanopartículas de Óxido de Indio ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ).

Rodríguez, P. (2001). Semiconductores. TECNIBOOK EDICIONES.

TROYO VEGA, E. N. R. I. Q. U. E. (2015). *Estudio de propiedades eléctricas y diseño de dispositivos mediante simulaciones numéricas* (Master's thesis, TROYO VEGA, ENRIQUE).

Zúñiga Santiz, I. G. (2020). *Estudio de las densidades de estados de trampas en celdas solares de kesterita, por medio de la simulación en AMPS-1D* (Master's thesis, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas).

Universidad Politécnica de Cataluña. (2023, 5 de septiembre). Semiconductores, en el corazón de la tecnología. <https://www.upc.edu/es/sala-de-prensa/noticias/semiconductores-en-el-corazon-de-la-tecnologia>

Universitat de València. (s.f.). Avances científicos en materiales semiconductores bidimensionales para la generación de nuevos dispositivos optoelectrónicos. <https://www.uv.es/uvweb/parque-cientifico/es/novedades/avances-cientificos-materiales-semiconductores-bidimensionales-generacion-nuevos-dispositivos-optoelectronicos-1285968516390/Novetat.html?id=1285970709090>

Iberdrola. (2021, 22 de abril). Semiconductores, ¿qué son y por qué su escasez amenaza la economía global? <https://www.iberdrola.com/innovacion/semiconductores>

Universidad Latina de Costa Rica. (2024, 27 de marzo). Semiconductores: lo que tenés que saber y que sin duda te afectará. <https://www.ulatina.ac.cr/articulos/semiconductores-lo-que-tenes-que-saber-y-que-sin-duda-te-afectara>

McKinsey & Company. (2022, 1 de abril). La década de los semiconductores: Una industria de un billón de dólares. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/destacados/la-decada-de-los-semiconductores-una-industria-de-un-billon-de-dolares/es>

- Alfonso Pontes Pedrajas, M. d. (2017). Diseño de un laboratorio virtual para el estudio práctico de circuitos con semiconductores y sus aplicaciones en la formación de estudiantes de ingeniería. *research gate.com*, 33-35.
- Esteves, L. (2023). Estructura, propiedades, modelado y funcionalidad de semiconductores de óxido de titanio y titanatos modificados para aplicaciones en celdas solares. *Universidad de la República de Uruguay*, 22-30.
- Vanasupa, L. (2022). POLIMEROS SEMICONDUCTORES PARA LA EDUCACION MULTIDISCIPLINARIA. *Journals of materials educations*, 738-739.
- Vaquero Garzon, L. (2019). Materiales bidimensionales para optoelectrónica en el IR. *Universidad autónoma de Madrid*, 66-70.

## **2.1 Diodo unión PN**

El diodo P-N es indispensable para el funcionamiento de todos los dispositivos electrónicos, contando con todas las formas de transporte de portadores, generación y recombinación. Los portadores mayoritarios se pueden difundir a través de la región de agotamiento unión PN, a pesar de que el campo eléctrico impide su travesía. Los portadores minoritarios que llegan a la unión son arrastrados a través de la región de agotamiento debido a la corriente de arrastre. En equilibrio, la corriente neta (difusión y arrastre) es cero para ambos, electrones y huecos, debido a que la corriente de difusión es igual y opuesta a la corriente de arrastre tanto para ambos portadores. Diodos de unión p-n son la base no sólo de las células solares, sino de muchos otros dispositivos electrónicos, como los LED, láser, fotodiodos y transistores de unión bipolar (BJTs). Una unión p-n combina, en un solo dispositivo, los efectos de la recombinación, la generación, la difusión y la corriente de arrastre, descritos en las páginas anteriores. (Figuroa, 2013)

La unión P-N es una unión semiconductor-formada por la unión de un material tipo P (con exceso de huecos) y un material tipo N (con exceso de electrones). Esta unión es un componente fundamental en dispositivos electrónicos como diodos, transistores y tiristores, y desempeña un papel crucial en la electrónica moderna. En una unión P-N, se establece una región de carga espacial que crea una barrera de potencial, lo que permite controlar el flujo de corriente a través de la unión. La unión P-N presenta propiedades interesantes que la hacen útil en aplicaciones de rectificación, conmutación y en la construcción de diversos dispositivos semiconductores. (Vidal, 2019)

### **2.1.1 Movimiento de Portadores en Equilibrio**

Una unión pn sin alteraciones externas representa un equilibrio entre la generación de portadores, la recombinación, la difusión y la corriente de arrastre en la presencia del campo eléctrico en la región de agotamiento. (Martínez, 2016) A pesar de la presencia del campo eléctrico que crea un impedimento para la difusión de portadores en todo el campo eléctrico, algunos portadores todavía cruzan la unión por difusión. En la animación de abajo, la mayoría de los portadores mayoritarios que entran en la región de agotamiento se mueven de nuevo hacia la región donde se originaron. Sin embargo, estadísticamente algunos portadores tendrán una alta velocidad y viajan en una dirección neta suficiente tal que cruzan la unión. Una vez que un portador mayoritario cruza la unión, se convierte en un portador minoritario. Continuará difundándose lejos de la unión y puede recorrer una distancia en promedio igual a la longitud de difusión antes de que se recombine. (Holt, 1989)

La corriente causada por la difusión de los portadores través de la unión se denomina corriente de difusión. En la animación de abajo, observe los portadores en la región de agotamiento y espere a los portadores que cruzan la unión. Se debe recordar que en una unión pn real el número y la velocidad de los portadores es mucho mayor y que el número de portadores que cruzan la unión es mucho más grande. (Holt, 1989)

Portadores minoritarios que llegan al borde de la región de difusión son arrastrados a través de ella por el campo eléctrico en la región de agotamiento. Esta corriente se denomina corriente de arrastre. En equilibrio la corriente de arrastre está limitada por el número de portadores minoritarios que se generan térmicamente dentro de una longitud de difusión de la unión.

### **2.1.2 Formación de la unión P-N**

- Uniéndose el material de tipo n con el material de tipo p provoca un exceso de electrones en el material de tipo n que se difunden hacia el lado de tipo p y el exceso de huecos a partir del material de tipo p se difunden hacia el lado de tipo n.
- El movimiento de electrones para el lado de tipo p expone núcleos de iones positivos en el lado de tipo n mientras que el movimiento de huecos para el lado de tipo n expone núcleos de iones negativos en el lado de tipo p, lo que resulta en un campo de electrones en la unión y la formación de la región de agotamiento.
- Un voltaje es el resultado del campo eléctrico formado en la unión.

Las uniones P-N se forman mediante la unión de materiales semiconductores tipo n y de tipo p, como se muestra a continuación. (Cevallos, 2019) Puesto que la región de tipo n tiene una concentración de electrones alta y la de tipo p tiene una concentración alta de agujeros, los electrones se transportarán desde el lado de tipo n hasta el lado de tipo p. Del mismo modo lo hará el flujo de huecos por difusión desde el lado de tipo p hasta el lado de tipo n. Si no tuvieran carga los electrones y los huecos, este proceso de difusión continuaría hasta que la concentración de electrones y agujeros en los dos lados fueran los mismos, como sucede cuando dos gases entran en contacto unos con otros. Sin embargo, en una unión pn, cuando los electrones y los huecos se mueven hacia el otro lado de la unión, dejan atrás las cargas expuestas en los sitios de átomos dopantes, que están fijados en la red cristalina y son incapaces de moverse. En el lado de tipo n, núcleos de iones positivos están expuestos. En el lado de tipo p, los núcleos de iones negativos están expuestos. Se forma un campo eléctrico  $E$  entre los núcleos positivos en el material de tipo n y núcleos negativos en el material de tipo p. (PVEducation, s.f.)

Esta región es llamada la "región de agotamiento", ya que el campo eléctrico transporta fuera rápidamente portadores libres, por lo tanto, la región se agota de portadores libres. Un "potencial de contacto"  $V_{bi}$  se forma en la unión debido a  $E$ . La animación a continuación muestra la formación de  $E$  en la unión entre  $n$  y el material de tipo  $p$ . (PVEducation, s.f.)

### 2.1.3 Aplicaciones de los diodos tipo PN

Los diodos tipo P-N tienen una amplia gama de aplicaciones en electrónica debido a sus propiedades únicas. Algunas de las aplicaciones más comunes de los diodos tipo P-N incluyen:

- **Rectificación:** Los diodos tipo P-N se utilizan en circuitos rectificadores para convertir corriente alterna en corriente continua. Esto es fundamental en fuentes de alimentación y en la electrónica de potencia.
- **Protección contra polaridad inversa:** Los diodos tipo P-N se utilizan para proteger circuitos electrónicos contra daños causados por la conexión incorrecta de la polaridad de la fuente de alimentación.
- **Modulación de señales:** En circuitos de modulación, los diodos tipo P-N se utilizan para modular señales de alta frecuencia.
- **Detección de señales:** Los diodos tipo P-N se utilizan en circuitos de detección de señales, como en receptores de radio y televisión.
- **Estabilización de voltaje:** Los diodos tipo P-N se utilizan en circuitos reguladores de voltaje para mantener un voltaje constante en una carga. (Vidal, 2019)
- **Conmutación rápida:** En aplicaciones que requieren conmutación rápida, como en circuitos de alta frecuencia y lógica digital, se utilizan diodos tipo P-N para su rápida respuesta. (Vidal, 2019)

### 2.1.4 La unión PN en equilibrio térmico

La unión P-N en equilibrio térmico es un componente semiconductor fundamental que se forma al unir un material tipo P y un material tipo N. En esta unión, se establece una región de carga espacial, también conocida como región de depleción, que crea una barrera de potencial debido a las diferencias en la concentración de portadores de carga entre los dos materiales. (Vidal, 2019)

En esta configuración, el nivel de Fermi se mantiene constante a lo largo de la unión, lo que garantiza que no haya flujo neto de portadores de carga en ausencia de una tensión externa aplicada. Esta constancia del nivel de Fermi es esencial para mantener el equilibrio térmico y la neutralidad de carga en la unión. (Vidal, 2019)

En la región de carga espacial, se establecen corrientes de difusión y de arrastre que juegan un papel crucial en el equilibrio de cargas y en la formación de la barrera de potencial. Las corrientes de difusión se deben al gradiente de concentración de portadores de carga a través de la unión, mientras que las corrientes de arrastre surgen debido al campo eléctrico presente en la región de carga espacial. (Vidal, 2019)

En resumen, la unión P-N en equilibrio térmico es un componente semiconductor con propiedades eléctricas únicas que se utilizan en una amplia variedad de dispositivos electrónicos. El mantenimiento del equilibrio térmico, la constancia del nivel de Fermi y la interacción entre las corrientes de difusión y de arrastre son aspectos fundamentales para comprender su funcionamiento y sus aplicaciones en la electrónica moderna. (Vidal, 2019)

### **2.1.5 Unión del diodo PN polarizado**

La unión P-N polarizada se refiere a la aplicación de una tensión externa a una unión P-N, lo que resulta en dos modos de operación: polarización directa y polarización inversa.

- **Polarización directa:** En la polarización directa, la polaridad de la tensión externa aplicada favorece el paso de corriente a través de la unión P-N. Esto reduce la barrera de potencial en la región de carga espacial, permitiendo que los portadores de carga atraviesen la unión y generen corriente eléctrica. En este modo, la unión P-N se comporta como un conductor.
- **Polarización inversa:** En la polarización inversa, la polaridad de la tensión externa aplicada aumenta la barrera de potencial en la región de carga espacial, lo que dificulta el paso de corriente a través de la unión P-N. En este modo, la corriente que fluye a través de la unión es muy pequeña, ya que la mayoría de los portadores de carga son repelidos por la barrera de potencial. La unión P-N en polarización inversa se comporta como un aislante. (Vidal, 2019)

La capacidad de transición de la unión polarizada se refiere a la capacidad de almacenar carga eléctrica en la región de carga espacial cuando se aplica una tensión externa. Esta capacidad de almacenamiento de carga es fundamental en la operación de dispositivos como los diodos, donde se aprovecha para controlar el flujo de corriente a través de la unión. (Vidal, 2019)

Los fenómenos de ruptura son eventos que ocurren en las uniones P-N cuando se someten a tensiones inversas elevadas, lo que puede resultar en un aumento brusco de la corriente a través de la unión. Los dos principales fenómenos de ruptura son:

- **Ruptura por efecto túnel o Zener:** En este fenómeno de ruptura, la corriente comienza a aumentar significativamente debido al efecto túnel que permite que los portadores de carga atraviesen la barrera de potencial a través de un proceso de tunelización cuántica. Este fenómeno es conocido como ruptura Zener en honor al físico Clarence Zener, quien describió este proceso. La ruptura por efecto túnel es importante en dispositivos como los diodos Zener, donde se aprovecha este fenómeno para mantener una tensión constante a través del dispositivo.
- **Ruptura por avalancha:** En la ruptura por avalancha, el aumento brusco de la corriente se debe a la generación en cadena de pares electrón-hueco bajo la influencia de un campo eléctrico intenso. Este fenómeno ocurre cuando los portadores de carga adquieren suficiente energía cinética para ionizar los átomos de la red cristalina, creando así nuevos pares electrón-hueco que contribuyen a un aumento exponencial de la corriente. La ruptura por avalancha es fundamental en dispositivos como los fotodetectores por avalancha y los diodos IMPATT, donde se aprovecha este efecto para aplicaciones específicas. (Vidal, 2019)

Los fenómenos de ruptura pueden afectar significativamente al funcionamiento del diodo de unión tipo P-N. Cuando se aplica una tensión inversa lo suficientemente alta a un diodo de unión P-N, pueden ocurrir los fenómenos de ruptura por efecto túnel (Zener) y ruptura por avalancha, lo que puede tener consecuencias importantes en el dispositivo. Por lo tanto, es importante tener en cuenta los fenómenos de ruptura al operar un diodo de unión tipo P-N, especialmente al aplicar tensiones inversas elevadas. El diseño y la operación adecuados del diodo son fundamentales para controlar estos fenómenos y garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del dispositivo. (Vidal, 2019)

## **2.2 Polarización de un diodo**

El diodo es un componente electrónico fundamental que permite el flujo de corriente eléctrica en una sola dirección, gracias a su estructura de unión PN. Este reporte se enfoca en la polarización de un diodo, un proceso que determina cómo y cuándo el diodo conduce electricidad. (Boylestad, 2018)

El diodo ideal es un componente discreto en electrónica que se utiliza para permitir la circulación de corriente en un solo sentido, bloqueando el flujo en el sentido opuesto. En términos ideales, un diodo ideal presenta una resistencia nula al paso de corriente en un sentido (conducción) y una resistencia infinita en el sentido opuesto (corte). (Schiavon, 2019)

En la representación del diodo ideal, la punta de la flecha en su símbolo indica el sentido permitido de la corriente. Cuando el diodo está en conducción, la corriente circula del ánodo al cátodo, comportándose como un interruptor cerrado. Por otro lado, en corte, el diodo impide el paso de corriente, actuando como un interruptor abierto. (Schiavon, 2019)

Es importante destacar que el diodo ideal es un modelo simplificado que se utiliza para análisis teóricos y cálculos en circuitos electrónicos. Aunque en la práctica no existen diodos ideales, este concepto ayuda a comprender el comportamiento básico de los diodos en aplicaciones reales. (Schiavon, 2019)

### **2.2.1 Concepto de Polarización**

La polarización de un diodo ocurre cuando se aplica una diferencia de tensión externa a sus terminales, pudiendo ser esta polarización directa o inversa. El concepto de polarización de un diodo es fundamental en la electrónica, ya que determina la manera en que un diodo conduce la corriente eléctrica. Un diodo es un componente electrónico que permite el flujo de corriente en una sola dirección, actuando como un interruptor o una válvula dentro de un circuito. La polarización del diodo es el proceso de aplicar una tensión externa para determinar la dirección del flujo de corriente. Hay dos modos principales de polarización: directa e inversa. (Valls, 2006)

La polarización en los diodos se refiere a la aplicación de una tensión externa a través de sus terminales para permitir o bloquear el flujo de corriente a través de ellos. Dependiendo de la polarización aplicada, un diodo puede encontrarse en uno de dos estados principales: polarización directa o polarización inversa. La comprensión de los estados de polarización en los diodos es fundamental para diseñar y analizar circuitos electrónicos, ya que determina el comportamiento del diodo en diferentes situaciones de aplicación de voltaje. (Schiavon, 2019)

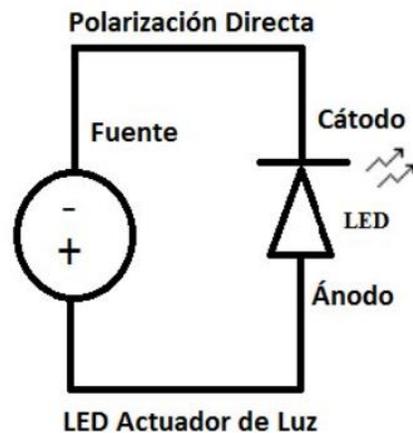
### 2.2.2 Polarización directa

La polarización directa en un diodo ocurre cuando se aplica una tensión positiva en el ánodo y una tensión negativa en el cátodo, lo que permite que el diodo conduzca corriente eléctrica de manera efectiva. En este estado, la polaridad de la tensión aplicada facilita el flujo de corriente a través del diodo al superar la barrera de potencial en la unión PN. (Universidad del País Vasco, 2018)

Cuando la tensión aplicada en polarización directa es suficiente para vencer la barrera de potencial, los portadores de carga (electrones y huecos) pueden moverse a través de la unión PN y la corriente puede circular a través del diodo. En resumen, en la polarización directa, el diodo se comporta como un interruptor cerrado, permitiendo que la corriente fluya en una dirección específica. (Universidad del País Vasco, 2018)

Es importante comprender la polarización directa en los diodos, ya que es un estado fundamental para su funcionamiento en circuitos electrónicos y dispositivos. La polarización directa es esencial para activar la conducción del diodo y aprovechar sus propiedades de rectificación y conmutación en diversas aplicaciones. (Universidad del País Vasco, 2018)

Figura 2.2.2.1. Polarización directa de un diodo



Fuente: Martínez-Ciro et.al (2023)

Un aspecto clave de la polarización directa es el voltaje de umbral o de encendido (aproximadamente 0.7V para diodos de silicio y 0.3V para diodos de germanio), que es la tensión mínima necesaria para que el diodo comience a conducir significativamente. Por debajo de este voltaje, la corriente a través del diodo es despreciable.

La polarización directa de los diodos tiene diversas aplicaciones en electrónica y circuitos eléctricos debido a su capacidad para permitir el flujo de corriente en una dirección específica. Algunas de las aplicaciones más comunes de la polarización directa de los diodos incluyen:

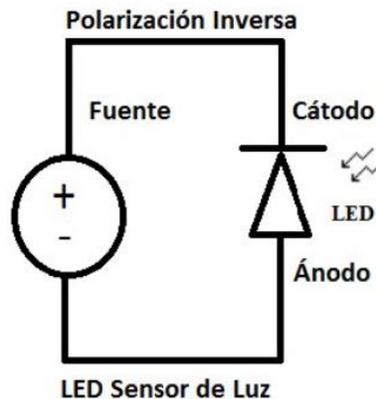
- **Rectificación de corriente:** Los diodos en polarización directa se utilizan en circuitos rectificadores para convertir corriente alterna en corriente continua. Al permitir que la corriente fluya en una sola dirección, los diodos eliminan la parte negativa de la señal de entrada, generando una salida rectificada.
- **Protección de polaridad:** Los diodos en polarización directa se emplean para proteger circuitos electrónicos contra polaridades inversas. Al colocar un diodo en polarización directa en paralelo con un circuito, se evita que la corriente fluya en la dirección incorrecta, protegiendo así los componentes sensibles.
- **Conmutación de circuitos:** Los diodos en polarización directa se utilizan en circuitos de conmutación para permitir o bloquear el flujo de corriente en momentos específicos. Su capacidad para actuar como interruptores controlados por la polarización los hace útiles en aplicaciones de control de potencia.
- **Estabilización de voltaje:** Los diodos en polarización directa se emplean en circuitos reguladores de voltaje para mantener una tensión constante en una carga. Al proporcionar una ruta conductiva en polarización directa, los diodos ayudan a estabilizar el voltaje de salida del circuito. (Schiavon, 2019)

### 2.2.3 Polarización inversa

En la polarización inversa, el polo positivo de la fuente se conecta al cátodo y el polo negativo al ánodo. Esto genera una pequeña corriente de saturación inversa debido a la formación de pares electrón-hueco por efecto de la temperatura. La corriente superficial de fugas también es función de la tensión aplicada y aumenta con ella. Si la tensión inversa es muy elevada, puede ocurrir el efecto avalancha.

En contraste, la polarización inversa ocurre cuando el ánodo se conecta al terminal negativo de la fuente de alimentación y el cátodo al terminal positivo. En esta situación, la barrera de potencial interna del diodo aumenta, impidiendo el flujo de corriente a través del dispositivo, excepto por una pequeña corriente de fuga. La polarización inversa refuerza la función del diodo como un dispositivo de "no paso" para la corriente eléctrica en esta orientación. (Schuler, 2021)

Figura 2.2.3.1. Polarización inversa de un diodo



Fuente: Martínez-Ciro et.al (2023)

Si la tensión aplicada en polarización inversa supera un valor crítico, conocido como la tensión de ruptura, el diodo puede comenzar a conducir corriente en dirección inversa. Este comportamiento puede dañar el diodo si no está diseñado para operar en condiciones de ruptura, como en el caso de los diodos Zener, que se utilizan específicamente por su capacidad para regular la tensión en la polarización inversa. (Schiavon, 2019)

La polarización inversa en un diodo ocurre cuando se aplica una tensión positiva en el cátodo y una tensión negativa en el ánodo, lo que impide que el diodo conduzca corriente de manera efectiva. En este estado, la polaridad de la tensión aplicada aumenta la zona de agotamiento en la unión PN del diodo, dificultando el flujo de corriente a través de este.

Cuando se aplica una tensión inversa al diodo, se produce un aumento en la anchura de la zona de agotamiento, lo que hace que sea más difícil para los portadores de carga (electrones y huecos) atravesar la unión PN. Como resultado, en condiciones de polarización inversa, solo una pequeña corriente de fugas, conocida como corriente inversa, puede fluir a través del diodo. (Schiavon, 2019)

En resumen, la polarización inversa en un diodo hace que actúe como un interruptor abierto, bloqueando efectivamente el flujo de corriente a través del componente. Este estado se utiliza en diversas aplicaciones, como la protección de circuitos contra polaridades inversas y la generación de efectos de ruptura en diodos especiales, como los diodos Zener. (Universidad del País Vasco, 2018)

La polarización inversa de los diodos también tiene aplicaciones importantes en electrónica y en el diseño de circuitos. Algunas de las aplicaciones de la polarización inversa de los diodos incluyen:

- **Protección contra polaridad inversa:** Los diodos en polarización inversa se utilizan para proteger circuitos electrónicos sensibles contra polaridades inversas. Al aplicar una tensión inversa, el diodo bloquea el flujo de corriente en la dirección incorrecta, evitando daños a los componentes.
- **Detección de luz:** En dispositivos como los fotodiodos, la polarización inversa se utiliza para detectar la presencia de luz. Cuando la luz incide sobre el fotodiodo, genera pares electrón-hueco que pueden conducir corriente en polarización inversa, lo que permite detectar la intensidad luminosa.
- **Diodos Zener:** Los diodos Zener operan en polarización inversa y se utilizan como reguladores de voltaje. Cuando se polarizan inversamente a través de su zona de ruptura, los diodos Zener mantienen una tensión constante en sus terminales, lo que los hace útiles en circuitos de regulación de voltaje.
- **Generación de ruido:** En algunos circuitos, la polarización inversa de los diodos se utiliza para generar ruido eléctrico controlado. Este ruido puede ser útil en aplicaciones de prueba y medición, así como en la caracterización de dispositivos electrónicos.
- **Detección de radiación:** En aplicaciones de detección de radiación, como en detectores de radiación ionizante, la polarización inversa de los diodos se utiliza para medir la ionización generada por la radiación incidente. (Universidad del País Vasco, 2018)

#### 2.2.4 Tension Umbral y Corriente Maxima

La tensión umbral es la tensión mínima necesaria para que el diodo conduzca en polarización directa y coincide con la tensión de la zona de carga espacial del diodo no polarizado. La corriente máxima que puede conducir el diodo sin dañarse por el efecto Joule es un parámetro crítico. (IEL2-II, F. D. C., 2006)

- **Tensión Umbral ( $V_{\gamma}$ ):** La tensión umbral, representada como  $V_{\gamma}$ , es la tensión mínima necesaria para que un diodo comience a conducir corriente en polarización directa. En otras palabras, es el voltaje de activación necesario para que el diodo empiece a permitir el flujo de corriente en la dirección correcta. La tensión umbral puede variar según el tipo de diodo y el material semiconductor utilizado.

- **Corriente Máxima:** La corriente máxima se refiere a la corriente máxima que un diodo puede soportar en condiciones de polarización directa sin sufrir daños. Esta corriente máxima se especifica por el fabricante y se conoce como la corriente máxima directa o corriente máxima en directa (IFMAX). Superar esta corriente máxima puede provocar un calentamiento excesivo en el diodo debido al efecto Joule, lo que puede dañar el componente. (Schiavon, 2019)

Estos parámetros son críticos para el diseño y la selección adecuada de diodos en circuitos electrónicos, ya que garantizan un funcionamiento seguro y confiable del componente. Es importante tener en cuenta la tensión umbral y la corriente máxima al utilizar diodos en aplicaciones específicas para evitar daños en los dispositivos y garantizar un rendimiento óptimo.

### 2.2.5 Influencia del Dopaje

El dopaje es un proceso fundamental en la fabricación de diodos y tiene una influencia significativa en la polarización y el comportamiento de los diodos.

- **Dopaje en la Zona P y Zona N:** En un diodo de unión PN, la zona P está dopada con impurezas tipo aceptoras (como boro) para crear huecos como portadores de carga, mientras que la zona N está dopada con impurezas tipo donadoras (como fósforo) para crear electrones como portadores de carga. El tipo y la concentración de impurezas dopantes en cada zona determinan las propiedades eléctricas del diodo.
- **Ancho de la Zona de Agotamiento:** El dopaje afecta el ancho de la zona de agotamiento en la unión PN. Un mayor nivel de dopaje en las zonas P y N puede reducir el ancho de la zona de agotamiento, lo que influye en la tensión umbral y la corriente de fuga en polarización inversa.
- **Tensión Umbral y Corriente Directa:** El dopaje influye en la tensión umbral ( $V_f$ ) y la corriente máxima en directa (IFMAX) del diodo. La concentración y el tipo de impurezas dopantes determinan la barrera de potencial en la unión PN, lo que afecta la tensión umbral necesaria para la conducción y la corriente máxima que puede soportar el diodo.
- **Comportamiento en Polarización Inversa:** El dopaje también puede influir en el comportamiento del diodo en polarización inversa. Un dopaje adecuado en las zonas P y N puede mejorar la capacidad del diodo para bloquear la corriente en polarización inversa y reducir la corriente de fuga. (Schiavon, 2019)

### **2.2.6 Aplicaciones y Consideraciones**

Los diodos tienen múltiples aplicaciones, como rectificación de corriente, iluminación, demodulación de radio, protección contra sobretensiones y en la construcción de microchips. Existen diversos tipos de diodos, como los diodos Zener, que se utilizan para mantener un voltaje constante en sus terminales cuando se polarizan inversamente.

La polarización de un diodo es un fenómeno clave para su funcionamiento y aplicaciones. La comprensión de cómo se comporta un diodo bajo diferentes condiciones de polarización es esencial para el diseño y análisis de circuitos electrónicos.

Los diodos son esenciales en una amplia gama de aplicaciones electrónicas, incluyendo la rectificación de corriente (conversión de corriente alterna en corriente directa), regulación de voltaje, protección de circuitos contra sobretensiones, y en la formación de circuitos lógicos y de señalización.

Al diseñar circuitos con diodos, es crucial considerar las características de polarización del diodo, como el voltaje de umbral en polarización directa y la tensión de ruptura en polarización inversa, para asegurar que el dispositivo funcione según lo previsto sin sufrir daños.

En resumen, la polarización de un diodo determina su comportamiento en un circuito eléctrico, habilitando una variedad de funciones esenciales en la electrónica moderna. Comprender y aplicar correctamente estos principios es clave para el diseño y la implementación efectiva de soluciones electrónicas. (Gonzales-Calderon, 2022).

### **2.3 Características del voltaje-corriente de un diodo**

El diodo es un semiconductor cuya principal función es dejar pasar la corriente solo en una dirección, es decir, en un solo sentido y bloquear la corriente en el otro sentido. De esta manera, el diodo se encuentra formado químicamente por una unión llamada PN y, generalmente, estos son fabricados con metal compuesto de Silicio. (Rodríguez, 2001).

Se usa el Silicio con el objetivo de hacerlo un elemento activo, lo cual, para lograr eso, deberá doparse. Es decir, se añadirán impurezas a los materiales de fabricación del diodo y es aquí donde ocurre la unión tipo PN.

En un material tipo P encontramos escasez de electrones. También estará presente un material tipo N que tiene un exceso de ellos. Teniendo en cuenta que esos elementos tienen faltantes, ambos se unen para generar un comportamiento electrónico.

Los **diodos** se clasifican en las siguientes categorías

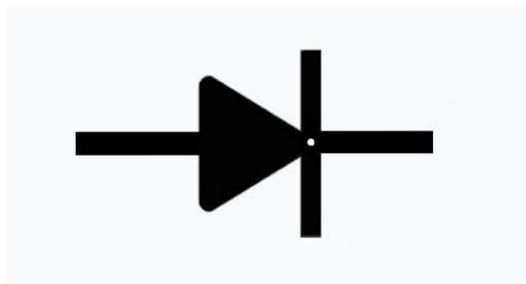
- Detector o de baja señal
- Rectificador
- Zener
- Varactor
- Emisor de luz
- Láser
- Estabilizador
- Túnel
- Pin
- Backward
- Schottky
- Fotodiodos.

### 2.3.1 ¿Cómo distinguir un diodo gráficamente?

En general, el diodo se representa de la siguiente manera:

De lado izquierdo se encuentra la entrada positiva llamado ánodo y de lado derecho se encuentra la salida negativa llamada cátodo, obsérvalo en la siguiente imagen.

Figura 2.3.1.1 Diodo

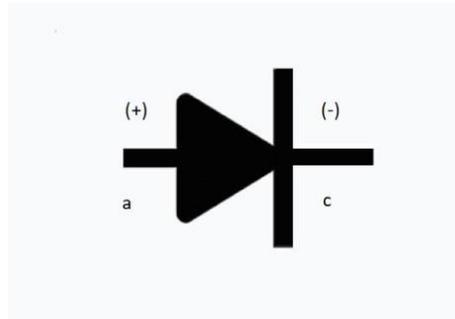


Fuente: Aprende Institute (2024)

### 2.3.2 Tipos de diodos, características y sus símbolos

Diodo Rectificador

Figura 2.3.2.1. Diodo Rectificador

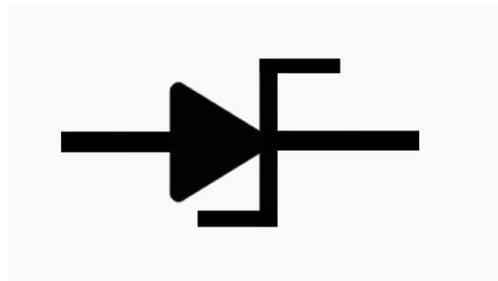


Fuente: Aprende Institute (2024)

Este tipo de diodo es prácticamente el diodo normal, con las características antes mencionadas, el cual tiene una unión tipo PN y que funciona como válvula de corriente. Es un diodo convencional que se le llama rectificador debido a que se utiliza en aplicaciones de circuitos rectificadores, en los cuales **convierte corriente alterna (AC) a corriente continua (CC)**. Estos diodos tienen tres técnicas químicas de fabricación las cuales son la aleación, difusión y crecimiento epitaxial. El voltaje para este tipo de diodos de Silicio es de 0.7 volts aproximadamente, y para los diodos de Germanio es de 0.3 volts. (Trinidad, 2016).

### Diodo Zener

Figura 2.3.2.2. Diodo Zener

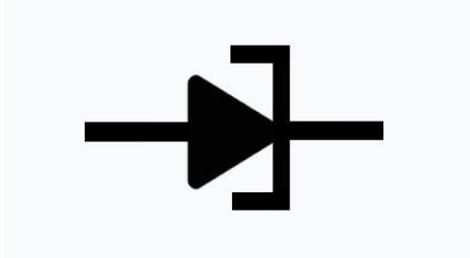


Fuente: Aprende Institute (2024)

El diodo Zener tiene una zona de conducción igual a la de los diodos rectificadores. Su diferencia radica en el momento en el que son polarizados inversamente. En este caso, este tipo de diodo no conduce corriente cuando el voltaje de este es menor al que nos proporciona. Sin embargo, en cuanto se alcance el voltaje que necesita el diodo Zener, que aproximadamente se encuentra entre 3.3V, 5.1V y 12V; la corriente va a fluir en sentido inversamente polarizado, es decir, de cátodo a ánodo. Las aplicaciones que se encuentran comúnmente con este tipo de diodo son los reguladores de voltaje, recortadores de pico de voltajes o desplazadores (Valls, 2006)

## Diodo Túnel o Esaki

Figura 2.3.2.3. Túnel o Esaki



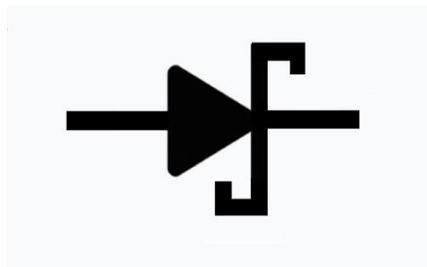
Fuente: Aprende Institute (2024)

Este diodo también es conocido como el diodo Esaki. Este tipo de diodo tiene como principal característica un efecto de túnel en la unión PN. Esta es una región de resistencia negativa en la dirección polarizada de manera directa. El diodo túnel tiene un dopaje de Silicio o Germanio 1000 veces mayor, y, por lo tanto, cuando el voltaje aumente, la corriente va a disminuir. Así que ten presente esto cuando lo estés trabajando, ya que podría verse modificado algún factor. (Boylestad, 2018)

Las aplicaciones que encontramos para un diodo túnel pueden ser como: amplificador, oscilador o un flip-flop. Este tipo de diodo, de baja potencia, es común verlo en aplicaciones de microondas debido a que su voltaje de operación se encuentra entre 1.8 y 3.8 volts.

## Diodo Schottky

Figura 2.3.2.4. Schottky

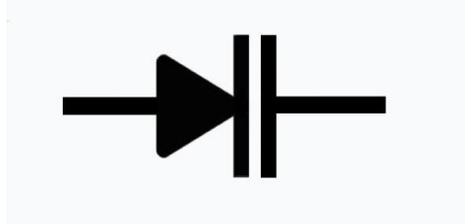


Fuente: Aprende Institute (2024)

El diodo Schottky tiene una gran diferencia en su unión. La unión de este tipo de diodo es una **Metal-N**, es decir que pasa de un metal a un semiconductor (Zeljami, 2013), que, al ser polarizado en dirección directa, su caída de voltaje se encuentra entre 2.0 a 0.5 volts, lo cual es perfecto para aplicaciones de circuitos de alta velocidad que requieren agilidad de conmutación y poca caída de voltaje; tal como puedes observar en las computadoras.

## Diodo Vericap

Figura 2.3.2.5. Diodo Vericap



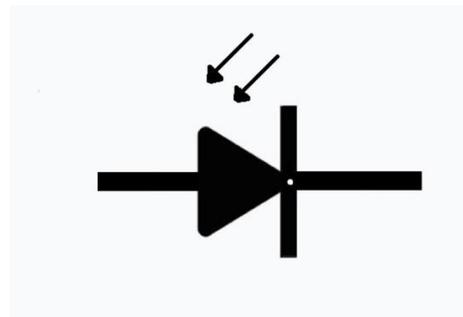
Fuente: Aprende Institute (2024)

La principal característica de este diodo es que es utilizado para proporcionar capacitancia variable. Esto dependerá de la aplicación inversa y polarización en corriente continua.

Las aplicaciones que se le han dado a este tipo de diodo han sido para sustituir sistemas mecánicos en los circuitos electrónicos donde hay emisión y recepción con capacitor variable, un ejemplo de ello, puede ser la televisión y la transmisión FM de radio. (Proaño, 2023)

## Fotodiodo

Figura 2.3.2.6. Fotodiodo

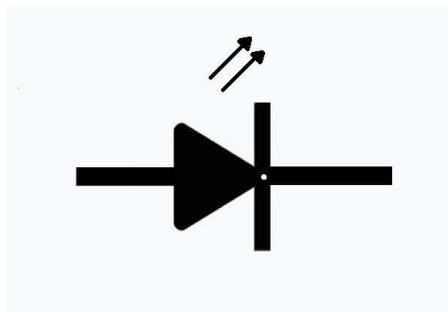


Fuente: Aprende Institute (2024)

El fotodiodo presenta una característica muy particular, la cual es que este diodo es muy sensible a la luz. Es por ello que la manera correcta de utilizarlo es conectarlo de manera inversa, esto permitirá el flujo de corriente en este mismo sentido, ya que, al incidir la luz en el diodo, este aumentará la intensidad de corriente. Las aplicaciones que obtenemos de este tipo de diodo son similares a la de un LDR o un fototransistor, ya que va a responder a los cambios de oscuridad a luz muy rápidamente. De aquí se puede encontrar también dos tipos de fotodiodos: PIN y avalancha. (Zetina, 1999)

## Diodo LED

Figura 2.3.2.7. Diodo LED



Fuente: Aprende Institute (2024)

El famoso diodo emisor de luz, es un diodo muy popular en el mercado. Este diodo emite fotones a partir de muy baja intensidad de corriente y existen de diferentes colores, lo cual dependerá del material con el que fueron contruidos. Su funcionamiento es básicamente que, al ser polarizado directamente, fluirá una intensidad de corriente y al aumentar la tensión el diodo, comenzará a emitir fotones. (Cerezo, 2013)

Un diodo LED tiene una caída de voltaje entre 1.5 a 2.5 volts y una intensidad de corriente entre 20 y 40 mA. Por lo tanto, si se exceden estos valores el diodo no funcionará. De igual forma, si tampoco alcanza el voltaje, o la corriente mínima requerida este no encenderá. Dentro de sus varias aplicaciones se encuentra la iluminación de circuitos de encendido y apagado, de contadores e iluminación en general. (Zorrilla, 2012)

### 2.3.3 Comportamiento de la corriente en un diodo

El comportamiento de la corriente en los diodos y sus características principales son fundamentales para comprender su funcionamiento, el comportamiento de la corriente en los diodos es el siguiente:

- **Polarización Directa:** En esta configuración, cuando se aplica un voltaje positivo al diodo, se establece una corriente significativa que fluye a través del diodo en la dirección de la flecha del símbolo. La corriente aumenta rápidamente una vez se supera el voltaje de umbral (alrededor de 0.6V para diodos de silicio).
- **Polarización Inversa:** En esta configuración, la corriente es muy pequeña y puede aumentar con la temperatura. Se estima que la corriente se duplica aproximadamente cada vez que la temperatura sube 10K. Al alcanzar el voltaje inverso de ruptura, la corriente puede crecer rápidamente.

### 2.3.4 Características de la corriente en los diodos

- **Zona de Polarización Directa:** En esta zona, la corriente aumenta rápidamente una vez se supera el voltaje de umbral. Se dice que la característica presenta una "rodilla" alrededor de 0.6V para diodos de silicio. El voltaje de rodilla disminuye a razón de 2mV/K con el aumento de la temperatura.
- **Zona de Polarización Inversa:** Aquí, la corriente es típicamente del orden de 1nA a temperatura ambiente y puede aumentar con la temperatura. La corriente puede crecer rápidamente al alcanzar el voltaje inverso de ruptura.

### 2.3.5 Especificaciones de la corriente en los diodos

Las especificaciones importantes para evaluar un diodo incluyen la corriente máxima que puede soportar en conducción (polarización directa) y la tensión inversa máxima antes de la ruptura. Estas especificaciones son críticas para determinar la idoneidad del diodo para una aplicación específica.

### 2.3.6 Comportamiento del voltaje en el diodo

El comportamiento del voltaje en los diodos y sus características son aspectos clave para comprender su funcionamiento por lo que el comportamiento del voltaje es el siguiente

#### Comportamiento del Voltaje en los Diodos:

- **Polarización Directa:** En esta configuración, cuando se aplica un voltaje positivo al diodo, se establece una corriente significativa que fluye a través del diodo en la dirección de la flecha del símbolo. El voltaje directo aplicado debe superar un umbral (alrededor de 0.6V para diodos de silicio) para que la corriente fluya con facilidad.
- **Polarización Inversa:** En esta configuración, el voltaje aplicado es negativo y la corriente es muy pequeña. Al alcanzar el voltaje inverso de ruptura, el diodo puede conducir corrientes significativas en la región de ruptura inversa,. (Maria, 2010)

#### Características del Voltaje en los Diodos:

- **Voltaje de Rodilla:** En la zona de polarización directa, el voltaje de rodilla es el voltaje mínimo necesario para que el diodo comience a conducir corriente de manera significativa. Para diodos de silicio, este voltaje de rodilla suele ser alrededor de 0.6V y disminuye a razón de 2mV/K con el aumento de la temperatura.

- **Voltaje Inverso de Ruptura:** Es el voltaje máximo que un diodo puede soportar en polarización inversa antes de que ocurra la ruptura. Al alcanzar este voltaje, la corriente puede aumentar rápidamente, lo que puede dañar el diodo si no se controla adecuadamente,. (Maria, 2010)

### **Especificaciones del Voltaje en los Diodos:**

Las especificaciones importantes relacionadas con el voltaje en los diodos incluyen el voltaje de rodilla en polarización directa y el voltaje inverso de ruptura. Estas especificaciones son cruciales para el diseño y la selección de diodos en diversas aplicaciones. (Maria, 2010)

### **2.3.7 Fenómenos físicos que afectan el comportamiento de la corriente y el voltaje**

Varios fenómenos pueden afectar la corriente y el voltaje en un diodo. Aquí se presentan algunos de los principales:

- **Temperatura:** La temperatura es un factor crítico que afecta la corriente y el voltaje en un diodo. A medida que la temperatura aumenta, el voltaje de rodilla del diodo puede disminuir, lo que afecta la corriente en la zona de polarización directa. Además, la corriente inversa puede aumentar con la temperatura, lo que influye en el comportamiento del diodo.
- **Polarización Directa e Inversa:** La polarización del diodo (directa o inversa) determina la corriente y el voltaje que atraviesa el diodo. En la polarización directa, el diodo conduce corriente y presenta una caída de voltaje característica. En la polarización inversa, la corriente es muy pequeña hasta que se alcanza el voltaje inverso de ruptura, momento en el que la corriente puede aumentar significativamente.
- **Voltaje de Rodilla:** El voltaje de rodilla es el voltaje mínimo necesario para que un diodo comience a conducir corriente de manera significativa en la zona de polarización directa. Este voltaje puede variar con la temperatura y afecta la corriente que fluye a través del diodo.
- **Ruptura:** Cuando se aplica un voltaje inverso lo suficientemente alto, se puede producir la ruptura del diodo, lo que resulta en un aumento significativo de la corriente. Este fenómeno puede afectar tanto la corriente como el voltaje en el diodo y debe evitarse en la mayoría de las aplicaciones.
- **Degradación:** Con el tiempo y el uso, los diodos pueden experimentar degradación, lo que puede afectar sus características eléctricas, incluida la corriente y el voltaje. La degradación puede deberse a factores como la temperatura, la corriente excesiva y el estrés eléctrico. (Maria, 2010)

Estos fenómenos son fundamentales para comprender cómo la temperatura, la polarización, el voltaje de rodilla, la ruptura y la degradación pueden influir en la corriente y el voltaje en un diodo. Considerar estos aspectos es crucial para el diseño y la operación adecuada de circuitos que incluyan diodos. (Maria, 2010)

### 2.3.8 Aplicaciones del diodo

Los diodos tienen una amplia variedad de aplicaciones en electrónica debido a sus propiedades únicas. Aquí se presentan algunas de las aplicaciones más comunes de los diodos:

- **Rectificación:** Una de las aplicaciones más comunes de los diodos es en circuitos rectificadores, donde se utilizan para convertir corriente alterna en corriente continua. Esto es fundamental en fuentes de alimentación y cargadores de baterías.
- **Protección:** Los diodos se utilizan para proteger circuitos electrónicos contra sobretensiones y picos de corriente. Los diodos de protección, como los diodos Zener, se utilizan para limitar el voltaje en un circuito y proteger los componentes sensibles.
- **Modulación y demodulación:** En aplicaciones de comunicaciones, los diodos se utilizan en la modulación y demodulación de señales. Por ejemplo, en la detección de señales de radio AM, los diodos se utilizan para extraer la información de la señal modulada.
- **Generación de señales:** Los diodos se utilizan en la generación de señales de radiofrecuencia, osciladores y circuitos de conmutación. Los diodos Schottky, por ejemplo, se utilizan en circuitos de alta frecuencia debido a su rápida conmutación.
- **Regulación de voltaje:** Los diodos Zener se utilizan como reguladores de voltaje en circuitos donde se requiere un voltaje de referencia constante. Estos diodos mantienen un voltaje constante incluso cuando la corriente varía, lo que los hace ideales para aplicaciones de regulación de voltaje.
- **Diodos emisores de luz (LED):** Los LED son diodos que emiten luz cuando se polarizan directamente. Se utilizan en pantallas, iluminación, señalización y muchas otras aplicaciones donde se requiere iluminación eficiente y de bajo consumo. (Maria, 2010)

## 2.4 El modelo del diodo

### 2.4.1 Generalidades

#### 2.4.1.1 Símbolo del diodo

El símbolo del diodo es una representación gráfica estandarizada que se utiliza en los esquemas de circuitos electrónicos para identificar y comprender la función de este componente fundamental (Electronics Tutorials, s.f.). Consiste en una forma geométrica simple que proporciona información sobre la dirección del flujo de corriente y la naturaleza semiconductor del dispositivo.

En su forma más básica, el símbolo del diodo consta de una línea recta con una flecha o triángulo en un extremo. La línea recta representa el cuerpo del diodo, mientras que el triángulo indica la dirección del flujo de corriente, que va desde el ánodo hacia el cátodo (All About Circuits, s.f.). Este diseño refleja la estructura física del diodo, donde el ánodo está conectado al material semiconductor de tipo P y el cátodo al material semiconductor de tipo N.

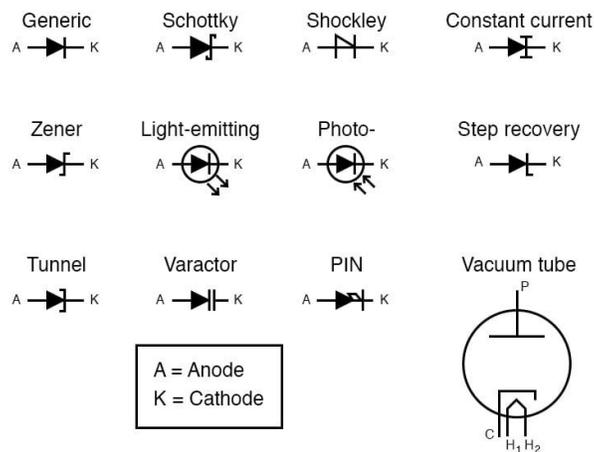


Figura 2.4.1.1. Símbolos de diodos (All About Circuits, s.f.).

El uso del símbolo del diodo simplifica la representación de circuitos electrónicos y facilita la comprensión de su funcionamiento. Por ejemplo, en un circuito con varios componentes, la presencia de un símbolo de diodo indica claramente la existencia de una unión PN con propiedades rectificadoras. Además, la dirección de la flecha proporciona información sobre la polaridad del diodo, es decir, si está polarizado en directa o inversa.

Es importante destacar que, aunque el símbolo del diodo proporciona una representación visual intuitiva de su función, no describe todas las características del dispositivo. Para un análisis más detallado, es necesario utilizar modelos de diodo que tengan en cuenta aspectos como la resistencia en directa y en inversa, la capacitancia y la corriente de fuga. Estos modelos permiten realizar cálculos más precisos y comprender mejor el comportamiento del diodo en diferentes aplicaciones.

#### 2.4.1.2 Conexión para polarización en directa

La polarización en directa es una configuración común en la cual se aplica una tensión positiva en el ánodo y una tensión negativa en el cátodo del diodo. Esto crea un gradiente de potencial que favorece el flujo de corriente a través del diodo, permitiendo que la corriente circule en la dirección de la flecha del símbolo del diodo. Esta configuración es fundamental en aplicaciones rectificadoras, donde se utiliza el diodo para convertir corriente alterna en corriente continua (Floyd, T. L. 2017).

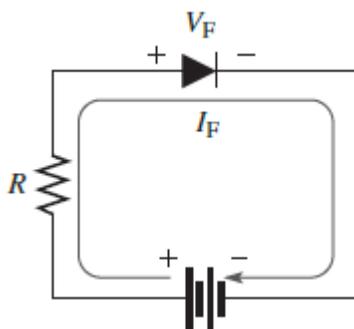


Figura 2.4.1.2. Polarización directa (Floyd, T. L. 2017).

En la conexión para polarización en directa, el diodo se comporta como un circuito cerrado, permitiendo que la corriente fluya libremente a través de él. La resistencia en directa del diodo, que es relativamente baja, limita la caída de tensión a través del componente, lo que resulta en una pérdida de potencia mínima. Esta característica hace que los diodos sean ideales para aplicaciones de rectificación, donde se desea minimizar la pérdida de energía (Sedra & Smith, 2004).

#### 2.4.1.3 Conexión para polarización en inversa

En contraste con la polarización en directa, la polarización en inversa implica aplicar una tensión negativa en el ánodo y una tensión positiva en el cátodo del diodo. Esto crea un gradiente de potencial que actúa en contra del flujo de corriente a través del diodo, lo que resulta en una corriente prácticamente nula en condiciones ideales (Floyd, T. L. 2017).

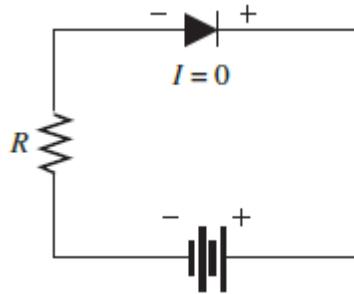


Figura 2.4.1.3. Polarización indirecta (Floyd, T. L. 2017).

En la conexión para polarización en inversa, el diodo se comporta como un circuito abierto, lo que significa que no permite el flujo significativo de corriente. Sin embargo, debido a la presencia de la corriente de fuga, se produce una pequeña corriente en sentido contrario a la flecha del símbolo del diodo. Esta corriente de fuga es típicamente muy baja y puede ser ignorada en la mayoría de las aplicaciones prácticas. La polarización en inversa se utiliza en aplicaciones donde se desea bloquear el flujo de corriente en una dirección específica, como en circuitos de protección contra polaridad inversa o en la generación de campos eléctricos en dispositivos como los diodos Zener (Sedra & Smith, 2004).

### 2.4.2 El modelo ideal de un diodo

El modelo ideal de un diodo es una representación simplificada que se utiliza en el análisis teórico de circuitos electrónicos. Este modelo asume condiciones ideales que simplifican los cálculos y facilitan la comprensión del comportamiento del diodo en diferentes aplicaciones. Aunque este modelo no refleja completamente las características reales del diodo, es una herramienta invaluable para realizar análisis preliminares y estimaciones aproximadas en ingeniería electrónica (Streetman & Banerjee, 2000).

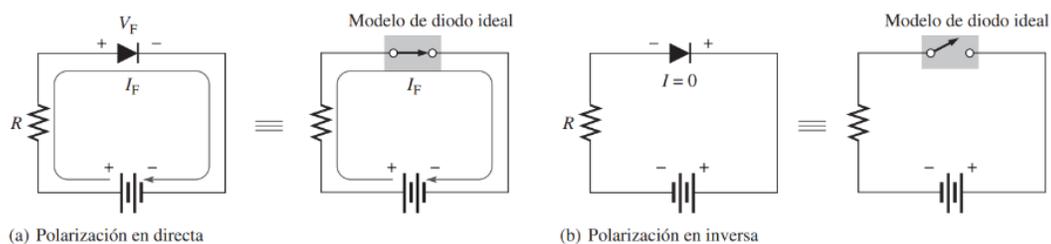


Figura 2.4.2.1. Modelo de diodo ideal (Floyd, T. L. 2017).

En el modelo ideal de un diodo, se consideran dos condiciones principales: la corriente en directa y la corriente en inversa.

### Corriente en Directa:

En condiciones de polarización directa, el diodo ideal se comporta como un interruptor cerrado, permitiendo el flujo de corriente sin resistencia interna (Sedra & Smith, 2004). En este estado, se supone que la resistencia en directa del diodo es cero, lo que significa que no hay caída de voltaje a través del diodo cuando está conduciendo corriente. Esta simplificación permite realizar cálculos más simples en circuitos donde se utilizan diodos para rectificar señales o como interruptores de circuito.

### Corriente en Inversa:

Por otro lado, en condiciones de polarización inversa, el diodo ideal se comporta como un interruptor abierto, lo que significa que no permite el flujo de corriente en esta dirección. En este caso, se supone que la corriente en inversa es cero, lo que implica que no hay corriente que fluya a través del diodo cuando se aplica una tensión negativa en el ánodo y positiva en el cátodo.

Aunque el modelo ideal de un diodo proporciona una aproximación útil en muchos casos, es importante tener en cuenta que no refleja todas las características reales del dispositivo. Por ejemplo, no tiene en cuenta la resistencia en directa, la capacitancia parasitaria ni la corriente de fuga en inversa, que son aspectos importantes en aplicaciones prácticas de circuitos electrónicos.

### **2.4.3 El modelo práctico de un diodo**

El modelo práctico de un diodo es una representación más precisa del comportamiento del diodo en comparación con el modelo ideal. Mientras que el modelo ideal simplifica las características del diodo para facilitar el análisis teórico, el modelo práctico tiene en cuenta aspectos más realistas del dispositivo, como la resistencia en directa y la corriente de fuga en inversa.

En el modelo práctico, se incorpora el concepto de potencial de barrera. Cuando el diodo se polariza en directa, se asemeja a un interruptor cerrado en serie con una pequeña fuente de voltaje equivalente (VF), que representa el potencial de barrera del diodo (generalmente alrededor de 0.7 V). Esta fuente de voltaje equivalente está orientada con el lado positivo hacia el ánodo del diodo. Su función es simular el efecto del potencial de barrera que debe superarse por el voltaje de polarización aplicado antes de que el diodo comience a conducir. Es importante destacar que esta fuente de voltaje equivalente no es una fuente activa de voltaje, sino más bien una representación del potencial de barrera del diodo. Una vez que el diodo comienza a conducir, se produce una caída de voltaje de aproximadamente 0.7 V a través de él.

Este enfoque práctico del modelo del diodo permite una mejor comprensión del comportamiento real del dispositivo en condiciones de polarización directa, donde el potencial de barrera debe superarse para permitir el flujo de corriente a través del diodo. Además, la inclusión del potencial de barrera en el modelo ayuda a predecir con mayor precisión la respuesta del diodo en circuitos electrónicos, especialmente en aplicaciones donde se requiere una precisión detallada del voltaje y la corriente.

Este concepto del modelo práctico del diodo se utiliza ampliamente en el diseño y análisis de circuitos electrónicos, ya que proporciona una representación más precisa y realista del comportamiento del diodo en comparación con el modelo ideal. Al considerar el potencial de barrera, los ingenieros pueden realizar análisis más precisos y tomar decisiones informadas en el diseño de circuitos que involucran diodos.

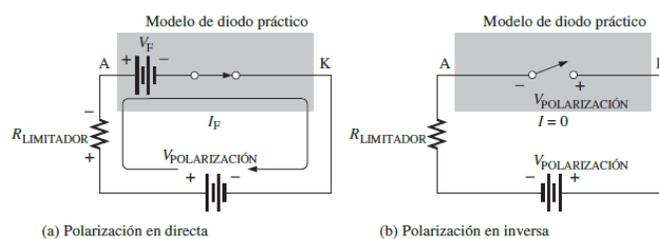


Figura 2.4.3.1. Modelo de diodo práctico (Floyd, T. L. 2017).

#### 2.4.4 El modelo completo de diodo

El modelo completo de un diodo es la aproximación más detallada que tiene en cuenta varias características del diodo, incluyendo el potencial de barrera, la resistencia dinámica de polarización en directa y la gran resistencia interna de polarización en inversa (Streetman & Banerjee, 2000). Estos elementos son importantes para comprender el comportamiento del diodo en diferentes condiciones de polarización y aplicaciones.

Cuando el diodo se polariza en directa, se comporta como un interruptor cerrado en serie con el voltaje de potencial de barrera equivalente ( $V_B$ ) y la pequeña resistencia dinámica de polarización en directa (Streetman & Banerjee, 2000). Esto se ilustra en la figura 6 (a), donde el diodo permite el flujo de corriente en la dirección de conducción. La resistencia dinámica de polarización en directa es una resistencia interna que varía con la corriente que atraviesa el diodo, contribuyendo a la caída de voltaje a través del componente.

Por otro lado, cuando el diodo se polariza en inversa, actúa como un interruptor abierto en paralelo con la gran resistencia interna de polarización en inversa, como se muestra en la figura 6 (b) (Streetman & Banerjee, 2000). Esta resistencia proporciona una trayectoria para la corriente de polarización en inversa, que es una corriente muy pequeña pero importante de tener en cuenta en ciertas aplicaciones.

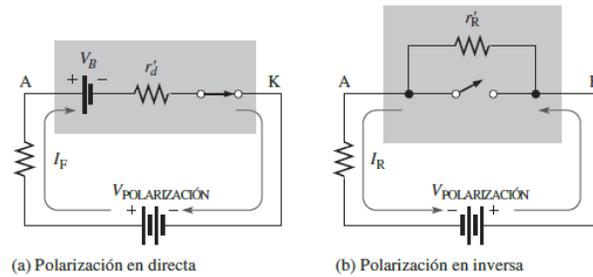


Figura 2.4.4.1. Modelo de diodo completo (Floyd, T. L. 2017).

El potencial de barrera no afecta la polarización en inversa, por lo que no se considera un factor en esta condición. Sin embargo, cuando el diodo se polariza en directa, el voltaje a través de él ( $V_F$ ) se compone del voltaje de potencial de barrera más la pequeña caída de voltaje a través de la resistencia dinámica (Streetman & Banerjee, 2000). Esta relación se observa en la parte de la curva a la derecha del origen, donde la caída de voltaje aumenta con la corriente debido al incremento en la resistencia dinámica.

### 2.4.5 Encapsulados típicos de diodos

La figura 7(a) presenta diferentes configuraciones físicas comunes de diodos montados a través de un orificio en placas de circuitos impresos (Floyd, T. L. 2017).. En estas configuraciones, el ánodo (A) y el cátodo (K) se identifican de diversas formas según el tipo de encapsulado utilizado. Por lo general, el cátodo se distingue mediante una banda, una pestaña u otro marcador visual. En casos donde un conductor está conectado a la cápsula del diodo, esta cápsula se considera el cátodo (Streetman & Banerjee, 2000).

Por otro lado, la figura 7(b) muestra los encapsulados típicos de diodos diseñados para montaje superficial en tarjetas de circuito impreso (Floyd, T. L. 2017). Estos encapsulados, como el SOD, el SOT y el SMA, presentan conectores con formas específicas, como alas de gaviota o una L doblada hacia abajo. En los encapsulados SOD y SMA, se utiliza una banda para indicar el cátodo en cada extremo. Por su parte, el encapsulado SOT, que puede contener uno o dos diodos, tiene una disposición de terminales específica. En encapsulados de un solo diodo, la punta 1 suele ser el ánodo y la 3 el cátodo. En los encapsulados SOT con dos diodos, la punta 3 sirve como terminal común y puede ser el ánodo o el cátodo, dependiendo de la configuración específica del dispositivo (Sedra & Smith, 2004).

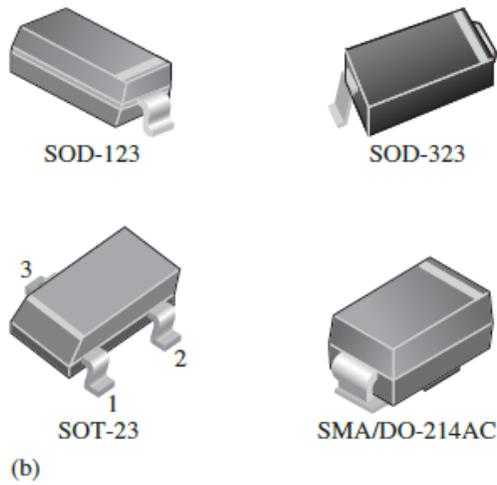
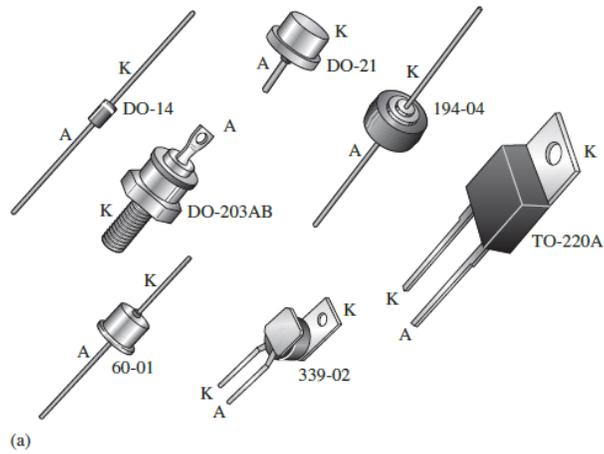


Figura 2.4.5.1 Paquetes de diodos típicos (Floyd, T. L. 2017).

## 2.5 Aplicaciones

### 2.5.1 Rectificadores

Un **diodo rectificador** es un semiconductor de dos terminales que permite el paso de la corriente en una sola dirección. Generalmente, el diodo de unión P-N se forma uniendo materiales semiconductores de tipo n y de tipo p. El lado de tipo P se llama ánodo y el de tipo n, cátodo. El diodo rectificador es capaz de conducir valores de corriente que varían desde varios miliamperios hasta unos pocos kiloamperios y voltajes hasta unos pocos kilovoltios. Se utilizan en las fuentes de alimentación para convertir la corriente alterna en corriente continua, un proceso llamado rectificación. También se utilizan en otros circuitos en los que debe pasar una gran corriente a través del diodo. (Boylestad et. al., 2018)

#### Tipos de Diodos Rectificadores

Los diodos rectificadores más típicos están hechos de silicio (cristal semiconductor). Son capaces de conducir altos valores de corriente eléctrica, y eso se puede clasificar como su característica básica. También hay diodos semiconductores menos populares, pero que aún se usan, hechos de germanio o arseniuro de galio. Los diodos de germanio tienen un voltaje inverso permisible mucho más bajo y una temperatura de unión permisible más pequeña ( $T_u = 75^\circ \text{C}$  para diodos de germanio y  $T_u = 150^\circ \text{C}$  para un diodo de silicio).

La única ventaja que tiene el diodo de germanio sobre el diodo de silicio es un valor de voltaje de umbral más bajo durante el funcionamiento con polarización directa ( $V = 0.3 \div 0.5 \text{ V}$  para germanio y  $0.7 \div 1.4 \text{ V}$  para diodos de silicio). La mayoría de los diodos de rectificación están hechos de silicio y, por lo tanto, tienen una caída de tensión directa de 0.7V. La tabla muestra la corriente máxima y la tensión inversa máxima de algunos diodos rectificadores populares. El 1N4001 es adecuado para la mayoría de los circuitos de baja tensión con una corriente inferior a 1A. (Boylestad et. al., 2018)

Tabla 2.5.1.1. Tabla de Diodos Rectificadores

Diodo	Corriente Máxima	Tensión Inversa Máxima
1N4001	1A	50V
1N4002	1A	100V
1N4007	1A	1000V
1N4001	3A	100V
1N4008	3A	1000V

Fuente: electronicaonline.net (2022)

## Rectificadores: Un Diodo con un Manejo de Corriente Superior

Un rectificador es un tipo especial de diodo que convierte la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC). Este es un proceso importante, ya que la corriente alterna puede invertir la dirección periódicamente, mientras que la corriente continua fluye constantemente en una sola dirección, lo que facilita su control. (Boylestad et. al., 2018)

Existen varios tipos de rectificadores, entre ellos:

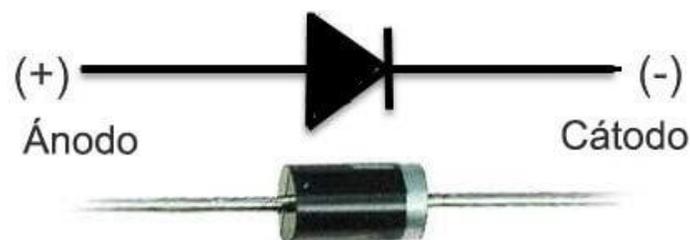
- **Rectificadores de media onda:** rectificadores que sólo permiten el paso de la mitad de la señal de CA de la entrada a la salida.
- **Rectificadores de onda completa:** rectificadores que utilizan toda la señal, lo que requiere el uso adicional de un transformador.
- **Rectificación de medio ciclo positivo:** aquellos en los que un diodo superior con polaridad positiva conduce la corriente mientras que uno inferior con polaridad negativa la bloquea.
- **Rectificación de medio ciclo negativo:** aquellos en los que el diodo superior está bloqueado y el inferior está abierto.

Los electrodomésticos generalmente contienen un diodo diseñado para la rectificación monofásica, lo que significa que el voltaje de suministro cambia al unísono. Los motores y las redes eléctricas a escala industrial, por otro lado, requieren una rectificación multifásica, lo que permite la generación, transmisión y distribución de energía al mismo tiempo.

Símbolo de un Diodo Rectificador

La simbología del diodo rectificador se muestra a continuación, la punta de la flecha apunta en la dirección del flujo de corriente convencional. (Wildi, 2006)

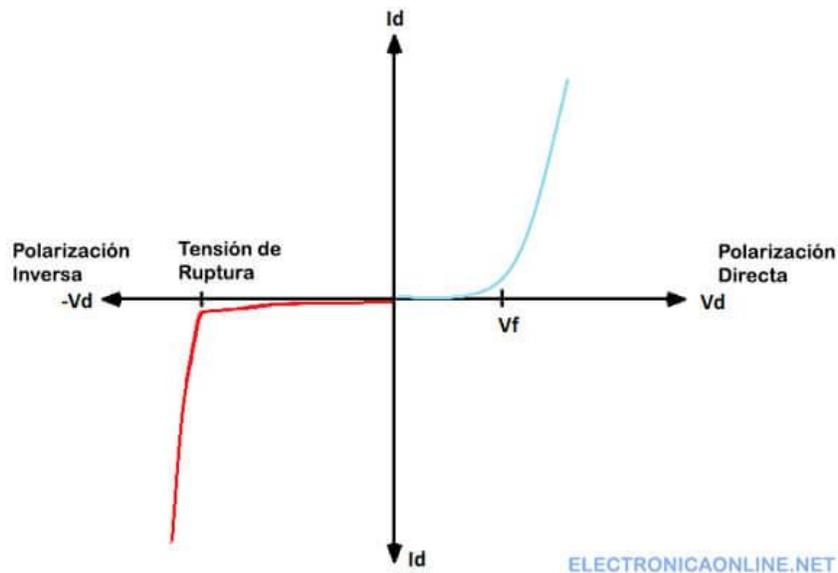
Figura 2.5.1.2. Curva Característica del Diodo Rectificador



Fuente: [electronicaonline.net](http://electronicaonline.net) (2022)

A continuación se muestra la curva característica del diodo rectificador:

Figura 2.5.1.3. Curva característica del diodo rectificador.



Fuente: electronicaonline.net (2022)

### Funcionamiento del Diodo Rectificador

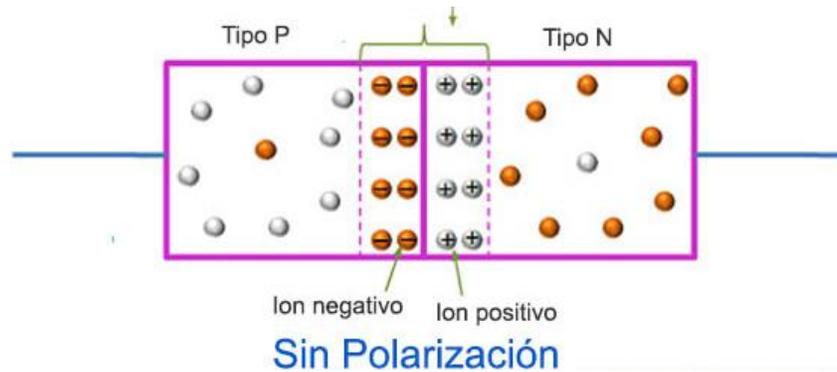
Los materiales de tipo n y de tipo p se combinan químicamente con una técnica de fabricación especial que da lugar a la formación de una unión p-n. Esta unión P-N tiene dos terminales que pueden denominarse electrodos y, por este motivo, se denomina «DIODO» (Di-odo). (Boylestad et. al., 2018)

Si se aplica una tensión de alimentación de CC externa a cualquier dispositivo electrónico a través de sus terminales, se denomina Polarización.

### Diodo rectificador no polarizado

- Cuando no se suministra tensión a un diodo rectificador, se denomina diodo no polarizado, el lado N tendrá un número mayoritario de electrones y muy pocos números de agujeros (debido a la excitación térmica), mientras que el lado P tendrá una mayoría de agujeros portadores de carga y muy pocos números de electrones.
- En este proceso, los electrones libres del lado N se difundirán (propagarán) hacia el lado P y la recombinación tiene lugar en los agujeros presentes allí, dejando iones +ves inmóviles (no movibles) en el lado N y creando iones -ve inmóviles en el lado P del diodo.
- Los inmóviles en el lado de tipo n cerca del borde de unión. Del mismo modo, los iones inmóviles en el lado de tipo p cerca del borde de la unión. Debido a esto, el número de iones positivos y negativos se acumulará en la unión. Esta región así formada se denomina **Región de Agotamiento**.
- En esta región, se crea un campo eléctrico estático llamado Potencial de Barrera a través de la unión PN del diodo.

Figura 2.5.1.4. Ancho de agotamiento durante la condición sin polarización.

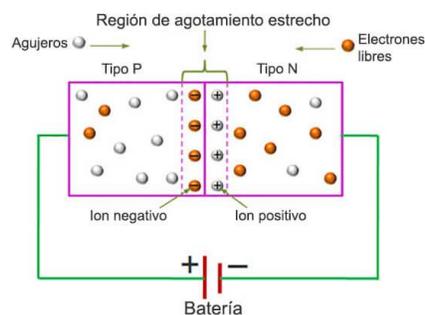


Fuente: electronicaonline.net (2022)

### Polarización Directa

- Polarización directa: En un diodo de unión PN, el terminal positivo de una fuente de tensión está conectado al lado de tipo p, y el terminal negativo está conectado al lado de tipo n, se dice que el diodo está en condición de polarización directa.
- Los electrones son repelidos por el terminal negativo de la alimentación de corriente continua y derivan hacia el terminal positivo.
- Entonces, bajo la influencia de la tensión aplicada, esta derivación de electrones hace que fluya la corriente en un semiconductor. Esta corriente se denomina «corriente de deriva». Como los portadores mayoritarios son los electrones, la corriente en el tipo n es la corriente de electrones.
- Como los agujeros son portadores mayoritarios en el tipo p, éstos son repelidos por el terminal positivo de la alimentación de corriente continua y se mueven a través de la unión hacia el terminal negativo. Por lo tanto, la corriente en el tipo p es la corriente de agujeros.
- Entonces, la corriente global debida a los portadores mayoritarios crea una corriente directa.
- dirección de la corriente convencional es opuesta al flujo de electrones.

Figura 2.5.1.5. Polarización Directa

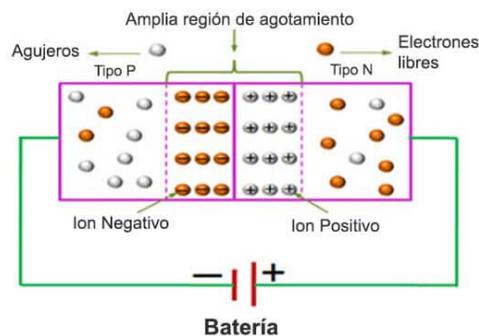


Fuente: electronicaonline.net (2022)

## Polarización Inversa

- Condición de polarización inversa: si el terminal positivo de la fuente de voltaje está conectado al extremo de tipo n, y el terminal negativo de la fuente está conectado al extremo de tipo p del diodo, no habrá corriente a través del diodo, excepto la corriente de saturación inversa.
- Esto se debe a que en la condición de polarización inversa la Región de Agotamiento de la unión se hace más amplia con el aumento de la tensión de polarización inversa.
- Aunque hay una pequeña corriente que fluye desde el extremo de tipo n al de tipo p en el diodo debido a los portadores minoritarios. Esta corriente se denomina Corriente de Saturación Inversa.
- Los portadores minoritarios son principalmente electrones/agujeros generados térmicamente en el semiconductor tipo p y en el semiconductor tipo n, respectivamente.
- Ahora bien, si la tensión inversa aplicada a través del diodo se incrementa continuamente, entonces, después de cierta tensión, la región de agotamiento se destruirá, lo que hará que fluya una enorme corriente inversa a través del diodo.
- Si esta corriente no está limitada externamente y llega más allá del valor de seguridad, el diodo puede destruirse definitivamente.
- Estos electrones, que se mueven rápidamente, chocan con los demás átomos del dispositivo y les quitan algunos electrones más. Los electrones, así liberados, liberan mucho más electrones de los átomos al romper los enlaces covalentes.
- Este proceso se denomina multiplicación de portadores y conduce a un aumento considerable del flujo de corriente a través de la unión p-n. El fenómeno asociado se denomina Efecto Avalancha.

Figura 2.5.1.6. Polarización inversa.

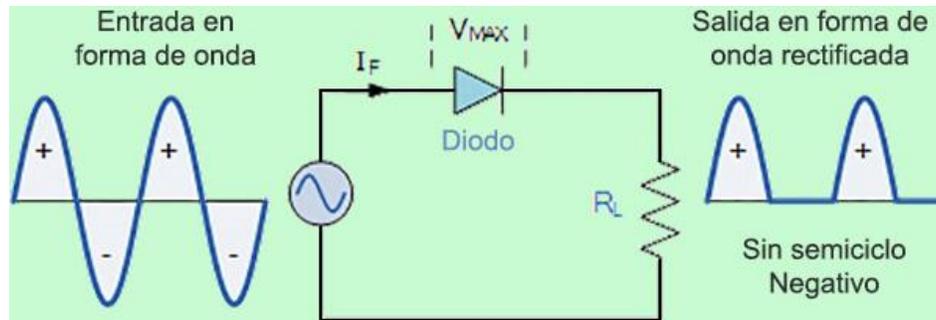


Fuente: [electronicaonline.net](http://electronicaonline.net) (2022)

## Rectificador de Media Onda

Uno de los usos más comunes del diodo es rectificar la tensión de CA en una fuente de alimentación de CC. Dado que un diodo sólo puede conducir la corriente en un sentido, cuando la señal de entrada sea negativa, no habrá corriente. Esto se denomina rectificador de media onda. La siguiente figura muestra el circuito del diodo rectificador de media onda. (Boylestad et. al., 2018)

2.5.1.6 Rectificador de Media onda



Fuente: electronicaonline.net (2022)

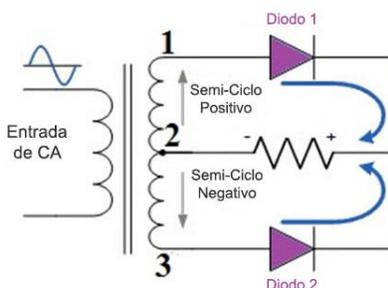
## Rectificador de Onda Completa

Un circuito de diodos rectificadores de onda completa se construye con cuatro diodos, mediante esta estructura podemos hacer que ambas mitades de las ondas sean positivas. Tanto para los ciclos positivos como para los negativos de la entrada, hay una ruta directa a través del puente de diodos.

Mientras que dos de los diodos están en polarización directa, los otros dos están en polarización inversa y se eliminan efectivamente del circuito. Ambos caminos de conducción hacen que la corriente fluya en la misma dirección a través de la resistencia de carga, logrando la rectificación de onda completa.

Los rectificadores de onda completa se utilizan en las fuentes de alimentación para convertir las tensiones de CA en tensiones de CC. Un gran condensador en paralelo con un resistor de carga de salida reduce el ondulado del proceso de rectificación. La siguiente figura muestra el circuito del diodo rectificador de onda completa.

Figura 2.5.1.7. Rectificador de onda completa



Fuente: electronicaonline.net (2022)

## ¿Cómo Probar un Diodo Rectificador?

El diodo rectificador puede probarse mediante los siguientes métodos. El multímetro simple se utiliza principalmente para decidir la polaridad del diodo rectificador como ánodo o cátodo. Hay un mínimo de tres métodos para hacer esto, pero aquí los dos métodos sencillos para hacerlo son: el uso del ohmímetro y la función de medición VDC. (Castillo, 2020)

### Uso del ohmímetro

En polarización directa, el ohmímetro especificará el valor estimado de la tensión directa del diodo, que es casi 0,7. En polarización inversa, el ohmímetro especificará «1», lo que significa que es una resistencia extremadamente alta. La función de comprobación del diodo proporcionará un resultado igual que el método utilizado anteriormente.

### Función de medición VDC

- En polarización directa, un multímetro indicará que la caída de tensión del diodo de silicio es de 0,7V
- En polarización inversa, un multímetro especifica el valor estimado de la alimentación de tensión completa.

Los diodos rectificadores se utilizan principalmente para la rectificación, es decir, para convertir la CA en CC. Se utilizan en circuitos en los que debe circular una gran corriente a través del diodo.

### Características del Diodo rectificador

Técnicamente, un diodo rectificador es cualquier diodo utilizado en un circuito rectificador. De hecho, la mayoría de los diodos utilizados en aplicaciones de rectificación de potencia no son más que diodos de conmutación comunes.

Sin embargo, hay diodos hechos especialmente para su uso en rectificadores que deben convertir grandes cantidades de energía. Estos diodos rectificadores, también llamados diodos de potencia, son esencialmente diodos de conmutación simples, sin embargo, tienen una construcción mucho más robusta y resistente que los diodos estándar para manejar cargas de trabajo mucho más pesadas. (Arengas, 2020)

### Aplicaciones

Como parte integral de un chip de silicio, los diodos se encuentran en una amplia gama de dispositivos electrónicos.

En un horno de microondas, por ejemplo, un diodo funciona junto con un capacitor para duplicar el voltaje transmitido al magnetrón de la cavidad (que genera las microondas). Los diodos también se utilizan en los teclados como parte de los circuitos de matriz, lo que reduce la cantidad de cableado necesario.

Los investigadores incluso han desarrollado diodos a escala nanométrica a partir de una sola molécula de ADN, lo que puede dar lugar a dispositivos electrónicos aún más pequeños y potentes en un futuro próximo.

Los diodos de rectificación tienen muchas más aplicaciones. Otras aplicaciones típicas de los diodos rectificadores son:

- Aislamiento de señales de un suministro
- Referencia de voltaje
- Controlar el tamaño de una señal
- Mezcla de señales
- Señales de detección
- Sistemas de iluminación
- Diodos láser

Así, un diodo rectificador permite el flujo de corriente eléctrica en una sola dirección, utilizada para el funcionamiento de la fuente de alimentación. Estos diodos pueden manejar el máximo flujo de corriente en comparación con los diodos normales.

Estos diodos se utilizan normalmente para alterar la corriente alterna (CA) a la corriente continua (CC). El diseño de los mismos puede realizarse como componentes discretos o como circuitos integrados. Están diseñados a partir de Si y se distinguen por una superficie de unión PN bastante grande, por lo que resulta en una alta capacitancia en condiciones de polaridad inversa.

Los dos diodos rectificadores se conectan a suministros de alta tensión en serie para mejorar la capacidad de PIV (pico de tensión inversa) para la combinación.

### **2.5.2 Filtros y reguladores**

Los diodos también actúan como dispositivos de protección, salvaguardando los componentes electrónicos contra picos de voltaje o polaridad inversa que podrían causar daños. (electricity-magnetism, 2024)

Los filtros y reguladores son componentes adicionales que se pueden utilizar junto con los diodos de unión PN en circuitos rectificadores para mejorar la eficiencia y la estabilidad de la salida de corriente continua (CC) (Locón, 2020). Aquí hay una explicación de cada uno:

#### **Filtros:**

Los filtros se utilizan para suavizar la corriente pulsante que resulta de la rectificación de la corriente alterna (CA) por los diodos de unión PN. La salida de un rectificador sin filtrar tiene componentes de corriente alterna superpuestos a la corriente continua. Los filtros eliminan o atenúan estas componentes de CA, produciendo una salida de CC más suave y constante. Hay varios tipos de filtros utilizados en sistemas de rectificación de diodos:

Filtro de Condensador (Filtro Capacitivo): Consiste en un capacitor conectado en paralelo con la carga. El capacitor se carga durante los picos de voltaje de entrada y se descarga durante los valles, suavizando así la salida de CC. Este tipo de filtro es comúnmente utilizado en rectificadores de media onda y de onda completa.

Filtro de Inductor (Filtro Inductivo): Consiste en un inductor en serie con la carga. El inductor almacena energía durante los picos de corriente y la libera durante los valles, actuando para suavizar la corriente pulsante. Se utiliza a menudo en rectificadores de onda completa para obtener una salida de CC más limpia.

### **Reguladores:**

Los reguladores se utilizan para mantener la salida de CC dentro de ciertos límites establecidos, independientemente de las variaciones en la entrada de CA o de la carga conectada al circuito. Los reguladores de voltaje son especialmente importantes para garantizar que los dispositivos electrónicos funcionen correctamente con una fuente de alimentación constante y confiable (Areny, 2006). Hay varios tipos de reguladores utilizados en sistemas de rectificación de diodos:

Reguladores de Tensión Lineales: Utilizan elementos de regulación, como transistores de potencia, para mantener una tensión de salida constante. Son relativamente simples y eficientes, pero no son adecuados para grandes diferencias entre la tensión de entrada y la tensión de salida.

Reguladores de Tensión Conmutados (Switching): Utilizan técnicas de conmutación para regular la tensión de salida de manera más eficiente y con menos pérdidas de energía que los reguladores lineales. Son más complejos pero pueden manejar una gama más amplia de tensiones de entrada y salida.

Los filtros y reguladores son componentes importantes que se utilizan junto con los diodos de unión PN en sistemas de rectificación para suavizar la salida de CC y mantenerla dentro de los niveles deseados. Esto es crucial para el funcionamiento estable y confiable de una variedad de dispositivos electrónicos.

### 2.5.3 Limitadores

Los diodos de unión PN son componentes electrónicos fundamentales que permiten la circulación de corriente en una sola dirección, siendo esenciales en la rectificación, conmutación y limitación de corriente y voltaje en circuitos electrónicos. Este reporte se centra en su función como limitadores, explorando su operación, tipos y aplicaciones. (Sánchez, 2013)

#### Fundamentos de la Unión PN

La unión PN es la estructura básica de los semiconductores, como diodos y transistores, esta unión se forma al combinar regiones semiconductoras de tipo P y N, generando un campo eléctrico que permite el flujo de corriente en una sola dirección bajo polarización directa y bloqueándola bajo polarización inversa. (Romero-Salazar, 2023)

#### Comportamiento de los Diodos

Los diodos de silicio, germanio y selenio tienen voltajes de polarización directa característicos que permiten su funcionamiento como rectificadores, interruptores y limitadores. En polarización directa, los diodos conducen electricidad, mientras que, en polarización inversa, aumentan la zona de carga espacial, impidiendo el flujo de corriente. (Zbar et. al., 2003)

#### Limitadores de Voltaje y Corriente

Los diodos Zener son conocidos por su capacidad para mantener un voltaje constante a través de ellos, actuando como limitadores de voltaje. Por otro lado, existen diodos de corriente constante que funcionan como limitadores de corriente, estabilizando la corriente a un valor específico.

#### Aplicaciones de los Diodos Limitadores

Los diodos limitadores se utilizan para proteger circuitos sensibles contra sobretensiones, manteniendo el voltaje y la corriente dentro de rangos seguros. En dispositivos de comunicación, se emplean en configuraciones consecutivas para limitar los voltajes aplicados a circuitos de RF sensibles. (Figuroa, 2014)

#### Tipos de Diodos y sus Funciones Especiales

Además de los diodos Zener y de corriente constante, existen otros tipos de diodos con funciones de limitación:

- Diodo Avalancha (TVS): Conduce en dirección contraria cuando el voltaje inverso supera el voltaje de ruptura, protegiendo contra picos de voltaje.
- Diodo Túnel o Esaki: Produce una resistencia negativa debido al efecto túnel, útil en la amplificación de señales.

- Diodo Gunn: Genera una resistencia negativa, permitiendo la creación de osciladores de microondas de alta frecuencia.
- Diodo Láser: Emite luz coherente para almacenamiento óptico y comunicación de alta velocidad.

Los diodos de unión PN son componentes versátiles con una amplia gama de aplicaciones en la electrónica. Su capacidad para limitar voltajes y corrientes los hace indispensables en el diseño de circuitos electrónicos, protegiendo dispositivos sensibles y asegurando la estabilidad de los sistemas. Desde la protección de circuitos hasta la regulación de voltaje, los diodos de unión PN desempeñan un papel crucial en la funcionalidad y seguridad de los dispositivos electrónicos modernos. (Schuler, 2021)

Diodos LED como posibles agentes bactericidas.

Otra de las aplicaciones de los diodos son los diodos led para la emisión de luz ultravioleta, los cuales permiten la emisión de la luz ultravioleta en diferentes longitudes de onda. Este tipo de diodos están diseñados en función de su tamaño por lo que para el desarrollo de la investigación se utilizaron los siguientes:

- Emisión ultravioleta mediante array de 350nm: Se emplearon diodos LEDs convencionales con una longitud de onda alrededor de 350nm. Estos diodos se ubicaron en una placa de circuito impreso con una cuadrícula de 5x5 soportes para LEDs separados un centímetro. (Muños, 2016)
- Emisión ultravioleta a 280nm: Se utilizaron diodos LEDs modelo 'TH-UV280T-5050L' fabricados por Zhuhai Tianhui Electronic Co., Ltd, que emiten a una longitud de onda de 280nm, con una desviación típica de 10nm. Esta longitud de onda es relevante para el tratamiento de muestras en disolución acuosa y en medio salino. (Muños, 2016)

Se utilizaron este tipo de diodos emisores de luz ultravioleta para investigar acerca de la potencial aplicación como bactericida en microorganismos específicos, pero los resultados del estudio indicaron que la radiación ultravioleta emitida por estos diodos no fue efectiva para reducir el crecimiento de E. Coli y S. aureus en las condiciones experimentales. Sin embargo, las aplicaciones de los diodos led en el contexto de la emisión de luz ultravioleta son: (Muños, 2016)

Desinfección de agua: Los diodos LED ultravioleta se utilizan para desinfectar el agua al inactivar microorganismos patógenos.

Desinfección de superficies: La radiación ultravioleta emitida por los diodos LED puede utilizarse para desinfectar superficies en entornos médicos, industriales y domésticos.

Cultivo de plantas: Los diodos LED de diferentes longitudes de onda se utilizan en la agricultura para estimular el crecimiento de las plantas.

Secado de pinturas y recubrimientos: La radiación ultravioleta emitida por los diodos LED se emplea en el secado rápido de pinturas y recubrimientos.

Tratamientos médicos: Los diodos LED se utilizan en terapias médicas como la fototerapia para tratar afecciones de la piel y otras enfermedades. (Muños, 2016)

De forma general los diodos led presentan mayores beneficios en comparación con otros dispositivos emisores de luz, en el contexto de la emisión de luz ultravioleta, estos presentan los siguientes beneficios:

Menor consumo energético: Los diodos LED consumen menos energía en comparación con otras fuentes de iluminación, lo que los hace más eficientes.

Menor tiempo de emisión: Los LED pueden encenderse y apagarse rápidamente, lo que permite un control preciso de la exposición a la radiación ultravioleta.

Ambientalmente inocuos: Los diodos LED no contienen mercurio u otros materiales dañinos, lo que los hace más seguros para el medio ambiente.

Rango de longitudes de onda sintonizable: Los diodos LED pueden ajustarse para emitir luz en diferentes longitudes de onda, lo que los hace versátiles para diversas aplicaciones.

Posibilidad de miniaturización: Debido a su tamaño compacto, los diodos LED son ideales para aplicaciones donde el espacio es limitado.

Menor efecto contaminante en su reciclado: Los diodos LED son más fáciles de reciclar en comparación con otras fuentes de iluminación. (Muños, 2016)

Diodos emisores de luz como apoyo para el crecimiento de plantas

Las aplicaciones de la iluminación con diodos emisores de luz (LEDs) y diodos emisores de luz orgánicos (OLEDs) en el campo de la horticultura. Estos desarrollos tecnológicos han despertado un gran interés en la comunidad científica y agrícola debido a su capacidad para modular el espectro radiante que incide sobre las plantas, con el fin de mejorar la producción y generar efectos fisiológicos específicos, especialmente en entornos como invernaderos. La posibilidad de sustituir los sistemas de iluminación fotosintética convencionales, como las lámparas de descarga en gases, por LEDs comerciales que emiten en regiones específicas del espectro, representa un avance significativo en la optimización del crecimiento vegetal. A medida que la tecnología LED continúa evolucionando y demostrando su eficacia en la estimulación del crecimiento de las plantas, se abren nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia energética, la calidad de los cultivos y la sostenibilidad en la agricultura. (Ramos, 2016)

Los diodos emisores de luz (LEDs) y los diodos emisores de luz orgánicos (OLEDs) pueden manipular el espectro radiante para mejorar el crecimiento de las plantas al emitir luz en longitudes de onda específicas que son óptimas para la fotosíntesis y otros procesos fisiológicos. En el caso de la fotosíntesis, las plantas absorben principalmente la luz en las regiones azul y roja del espectro visible, donde la clorofila es más receptiva. Al combinar bandas de emisión en azul y rojo de manera mimética al espectro de absorción de la clorofila, se puede estimular la asimilación fotosintética de las plantas de manera más eficiente. (Ramos, 2016)

Los OLEDs, al ser dispositivos basados en capas electroluminiscentes de componentes orgánicos, pueden generar y emitir luz por sí mismos en respuesta a una estimulación eléctrica, lo que les permite producir espectros de emisión específicos, como bandas de emisión simultánea en rojo y azul, esenciales para la irradiación de las plantas. Esta capacidad de controlar las longitudes de onda de la luz emitida por los LEDs y OLEDs permite adaptar la iluminación a las necesidades específicas de las plantas, mejorando así su crecimiento, desarrollo y producción. (Ramos, 2016)

Con base en lo anterior, Se recomienda sustituir los sistemas de iluminación fotosintética tradicionales por LEDs comerciales en las regiones roja y azul del espectro por varias razones fundamentales:

**Eficiencia Espectral:** Las plantas absorben principalmente la luz en las regiones roja y azul del espectro para la fotosíntesis, lo que significa que la emisión de luz en estas longitudes de onda específicas es más eficiente para estimular el crecimiento vegetal.

**Mayor Eficiencia Energética:** Los LEDs comerciales son más eficientes en la conversión de energía eléctrica en luz que las lámparas tradicionales, lo que resulta en un menor consumo de energía y costos operativos reducidos a lo largo del tiempo.

**Vida Útil Prolongada:** Los LEDs tienen una vida útil mucho más larga en comparación con las lámparas tradicionales, lo que significa menos reemplazos y mantenimiento, lo que a su vez reduce los costos a largo plazo.

**Menor Generación de Calor:** Los LEDs generan menos calor en comparación con las lámparas tradicionales, lo que evita daños por temperatura a las plantas sensibles y reduce la necesidad de sistemas de enfriamiento adicionales.

**Repelente de Insectos:** En el caso de los LEDs rojos, se ha observado que pueden repeler insectos, lo que puede reducir la necesidad de utilizar agrotóxicos y pesticidas en los cultivos. (Ramos, 2016)

El uso de LEDs comerciales en las regiones del espectro visible roja y azul para la iluminación fotosintética ofrece beneficios significativos en términos de eficiencia energética, vida útil prolongada, control de temperatura y reducción de productos químicos, lo que contribuye a un crecimiento más saludable y sostenible de las plantas, a su vez, al utilizar estos dispositivos para la irradiación de los cultivos pueden obtener una serie de beneficios específicos, entre los cuales se incluyen (Ramos, 2016):

**Mayor Eficiencia Energética:** Los LEDs son más eficientes en la conversión de energía eléctrica en luz, lo que resulta en un menor consumo de energía en comparación con las fuentes de iluminación tradicionales.

**Control Espectral Preciso:** Los LEDs permiten modular el espectro de luz emitido para adaptarse a las necesidades específicas de los cultivos, proporcionando la combinación óptima de longitudes de onda para la fotosíntesis y otros procesos fisiológicos.

**Mejora en la Producción y Calidad:** La iluminación LED puede aumentar la producción de los cultivos y mejorar la calidad de los productos finales al proporcionar una iluminación más adecuada y personalizada para las plantas.

**Menor Generación de Calor:** Los LEDs generan menos calor que las fuentes de iluminación convencionales, lo que ayuda a mantener una temperatura adecuada en el invernadero y evita daños por calor en las plantas.

**Reducción del Uso de Agrotóxicos:** Algunos tipos de LEDs, como los LEDs rojos, pueden actuar como repelentes de insectos, lo que puede reducir la necesidad de utilizar agrotóxicos y pesticidas en los cultivos.

**Mayor Durabilidad y Vida Útil:** Los LEDs tienen una vida útil más larga que las fuentes de iluminación tradicionales, lo que reduce los costos de mantenimiento y reemplazo a largo plazo en los invernaderos. (Ramos, 2016)

**Diodos laser y su importancia como objeto de estudio para la educación**

el uso de diodos láser como medios de enseñanza en el campo de la física, específicamente en el contexto de la enseñanza de la física en ingeniería. Con base en lo anterior en el contexto de la enseñanza de la física en ingeniería, los diodos láser son herramientas ideales como medios de enseñanza, ya que permiten una modulación directa de la radiación emitida y son fáciles de controlar mediante la corriente eléctrica. (Lemus, 2008)

Además, los diodos láser tienen un umbral de corriente muy bajo, lo que los hace altamente eficientes en la conversión de energía eléctrica en energía luminosa. Su tamaño compacto y peso ligero los hacen fáciles de manipular y transportar, lo que los convierte en dispositivos versátiles para aplicaciones educativas y experimentales. (Lemus, 2008)

La importancia de utilizar diodos láser en la enseñanza de la física en ingeniería radica en su capacidad para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje de manera efectiva y atractiva. Algunos aspectos destacados son: (Lemus, 2008)

**Facilitar la comprensión de conceptos:** Los diodos láser permiten visualizar de manera práctica y concreta fenómenos ópticos y principios físicos abstractos, lo que ayuda a los estudiantes a comprender de forma más clara y profunda los conceptos estudiados.

**Motivar el aprendizaje:** La utilización de diodos láser en experimentos y demostraciones puede despertar el interés y la curiosidad de los estudiantes, motivándolos a participar activamente en el proceso de aprendizaje.

**Desarrollar habilidades prácticas:** Mediante la manipulación y observación de diodos láser en experimentos de óptica, los estudiantes pueden desarrollar habilidades prácticas y de observación, lo que contribuye a un aprendizaje más significativo y aplicable en situaciones reales.

**Optimizar la efectividad del proceso de enseñanza-aprendizaje:** Los diodos láser, al ser herramientas versátiles y eficientes, pueden mejorar la efectividad del proceso educativo al proporcionar una forma innovadora y atractiva de presentar los contenidos de física en ingeniería. (Lemus, 2008)

Los diodos láser pueden mejorar la comprensión y el aprendizaje de la física en los estudiantes de ingeniería de diversas formas:

**Visualización de conceptos abstractos:** Los diodos láser permiten visualizar de manera concreta fenómenos ópticos y principios físicos abstractos, lo que facilita la comprensión de conceptos teóricos difíciles de asimilar únicamente a través de la lectura.

**Experimentación práctica:** Al realizar experimentos con diodos láser, los estudiantes pueden aplicar directamente los conceptos teóricos aprendidos en clase, lo que les brinda una experiencia práctica que refuerza su comprensión y les ayuda a internalizar los conocimientos de manera más efectiva. (Lemus, 2008)

Los resultados preliminares obtenidos al aplicar los diodos láser en el contexto de la enseñanza de la física en ingeniería incluyen:

**Aplicaciones en diferentes áreas de la óptica:** Los diodos láser han sido utilizados en experimentos relacionados con dispersión, generación de figuras de Lissajous y sistemas de escaneo láser, lo que ha permitido explorar diversas aplicaciones de la óptica en el diseño y construcción de prácticas de laboratorio de física.

**Facilidad de uso y bajo costo:** La accesibilidad y el bajo costo de los diodos láser han facilitado su integración en las actividades educativas, permitiendo a los estudiantes experimentar con tecnología avanzada de manera asequible. (Lemus, 2008)

Con base en lo anterior, los resultados preliminares de la aplicación de diodos láser en la enseñanza de la física en ingeniería han demostrado beneficios significativos en términos de comprensión de conceptos, motivación de los estudiantes, desarrollo de habilidades prácticas y exploración de diversas aplicaciones en el campo de la óptica, lo que sugiere que esta tecnología puede ser una herramienta valiosa para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje en esta disciplina. (Lemus, 2008)

## 2.6 Diodos de propósito general

Los diodos son dispositivos electrónicos fundamentales en la electrónica moderna, utilizados en una amplia variedad de aplicaciones. Entre los diodos de propósito general, se encuentran el diodo rectificador, el diodo Zener, el diodo Schottky y el diodo emisor de luz (LED). Cada uno de estos diodos posee características únicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones en circuitos electrónicos (Pendino & Roldán, 2014).

### 2.6.2 Diodo rectificador

Un diodo rectificador es un dispositivo semiconductor (véase Figura 1) que permite el flujo de la corriente eléctrica en una sola dirección (UNIT, 2020). Es decir, es permitir el flujo de corriente eléctrica en una dirección mientras que bloquea el flujo en la dirección opuesta. Este proceso de rectificación es esencial en numerosas aplicaciones, como fuentes de alimentación, cargadores de baterías y sistemas de rectificación de señales de radio (Rashid, 2013).

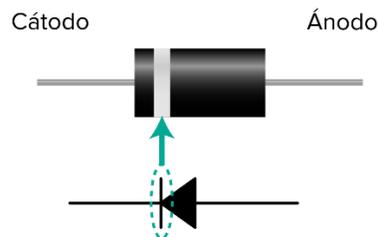


Figura 2.6.2.1. Símbolo del diodo rectificador (Khan Academy, 2024).

### 2.6.2.1 Funcionamiento del diodo rectificador

La curva característica de un diodo rectificador de la Figura 2, proporciona una representación visual de la relación entre el voltaje aplicado a través del diodo y la corriente que fluye a través de él (Streetman & Banerjee, 2006). En condiciones ideales, esta curva se asemejaría a una línea vertical en el primer cuadrante del plano de voltaje-corriente, lo que indica que la corriente fluye solo en una dirección cuando se aplica un voltaje positivo y no fluye en la dirección opuesta cuando el voltaje es negativo.

Sin embargo, en la práctica, los diodos exhiben una característica no lineal debido a su estructura física (Sedra & Smith, 2004). La curva característica de un diodo real se aproxima a una forma exponencial, donde la corriente aumenta rápidamente con un aumento en el voltaje aplicado en polarización directa, y prácticamente no hay corriente cuando el diodo está polarizado inversamente hasta que se alcanza un cierto voltaje de ruptura.

El voltaje de ruptura representa el punto en la curva característica donde el diodo comienza a conducir significativamente en inversa (Streetman & Banerjee, 2006). Esta característica es esencial en aplicaciones de regulación de voltaje y protección contra sobretensiones, donde se utiliza para limitar el voltaje a un nivel seguro.

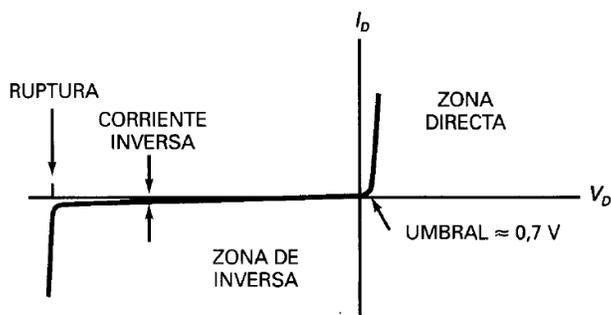


Figura 2.6.2.1.1. Curva característica de un diodo rectificador (Braga, 2019).

#### 2.6.1.2 Modos de polarización del diodo rectificador

- Polarización directa:

En este modo, el terminal positivo del voltaje se aplica al ánodo y el terminal negativo al cátodo del diodo. Esto permite que la corriente fluya fácilmente a través del diodo, ya que reduce la barrera de potencial en la unión PN, lo que resulta en una baja resistencia y una alta corriente de conducción. En este estado, el diodo se comporta prácticamente como un interruptor cerrado, permitiendo que la corriente fluya de manera eficiente (véase Figura 3a).

- Polarización inversa:

En este modo, el terminal positivo del voltaje se aplica al cátodo y el terminal negativo al ánodo del diodo. Esto aumenta la barrera de potencial en la unión PN, lo que hace que sea difícil para los portadores de carga atravesar la unión y, por lo tanto, prácticamente no hay corriente que fluya a través del diodo (véase Figura 3b). Sin embargo, a medida que se aumenta el voltaje en polarización inversa, eventualmente se alcanza el voltaje de ruptura. En este punto, el diodo comienza a conducir significativamente en inversa y puede dañarse si se excede este voltaje durante un período prolongado.

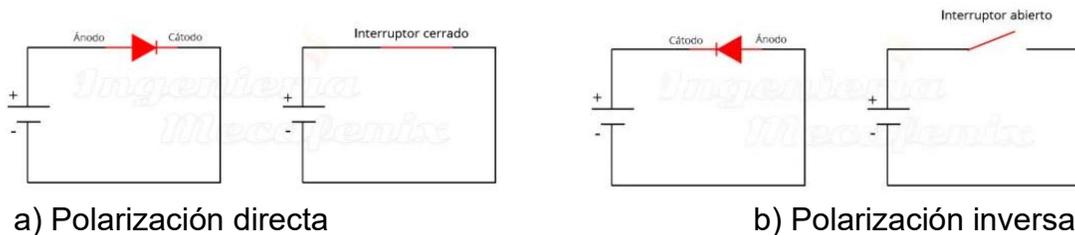


Figura 2.6.1.2. Polarización de un diodo rectificador (Mecafenix, 2018).

### 2.6.1.3 Aplicaciones del diodo rectificador

Dos de los esquemas más convencionales que emplean diodos rectificadores abarcan los circuitos de media onda y de onda completa, siendo cruciales en el proceso de transformación de energía de corriente alterna (CA) a corriente continua (CC) en sistemas de alimentación y dispositivos de electrónica de potencia (Rashid, 2013).

- Circuito de media onda:

En esta disposición, se recurre a un único diodo para rectificar una porción de la señal de entrada de CA hacia una salida de CC. Durante la fase en que la señal de entrada posee un valor positivo, el diodo se polariza en directa, facilitando el flujo de corriente y permitiendo que la porción positiva de la señal alcance la carga. Por otro lado, en el ciclo negativo de la señal de entrada, el diodo se polariza en inversa, evitando el paso de corriente y bloqueando la porción negativa de la señal. Este proceso conlleva a una salida de CC pulsante, donde solo se aprovecha la parte positiva de la señal de entrada (Rashid, 2013).

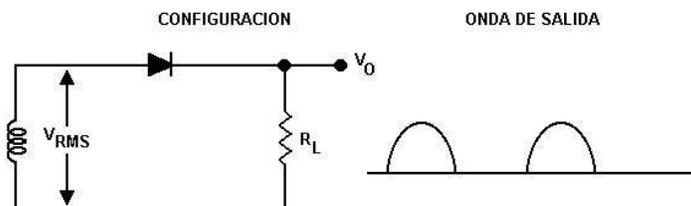


Figura 2.6.1.3. Circuito rectificador de media onda.

- Circuito de onda completa:

En contraste, en este diseño se emplean dos diodos para rectificar tanto la porción positiva como la negativa de la señal de entrada de CA a CC. Una implementación común de este circuito es el puente de diodos, el cual consta de cuatro diodos conectados en una configuración que posibilita la rectificación de ambas semiondas de la señal de entrada. Esta configuración se destaca por su eficacia y sencillez. Los circuitos de onda completa generan una salida de CC más uniforme que la salida pulsante obtenida con el circuito de media onda, ya que la señal de entrada se rectifica en ambas direcciones (Rashid, 2013).

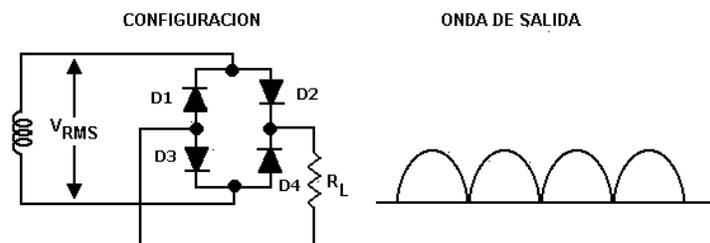


Figura 2.6.1.4. Circuito rectificador de onda completa.

### 2.6.3. Diodo Zener

El diodo Zener es otro tipo de diodo de propósito general que se utiliza principalmente para mantener un voltaje constante en un circuito, incluso cuando la corriente a través del diodo varía considerablemente (Boylestad & Nashelsky, 2012). Su característica distintiva es la capacidad de operar en inversa de forma controlada, manteniendo una tensión constante a través del diodo cuando se polariza en inversa en su región de ruptura Zener (Rashid, 2013).

La Figura 6 muestra el símbolo esquemático del diodo Zener. En polarización directa, el diodo Zener se comporta de manera similar a un diodo rectificador convencional, permitiendo el flujo de corriente cuando el ánodo es positivo en relación con el cátodo. Sin embargo, en polarización inversa, cuando el voltaje aplicado supera el voltaje de ruptura Zener, el diodo Zener comienza a conducir significativamente, manteniendo un voltaje constante a través de él (Sedra & Smith, 2004).

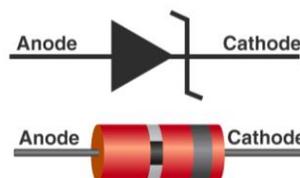


Figura 2.6.3.1. Símbolo del diodo Zener (TecnoElite, 2024).

- Circuito de onda completa:

En contraste, en este diseño se emplean dos diodos para rectificar tanto la porción positiva como la negativa de la señal de entrada de CA a CC. Una implementación común de este circuito es el puente de diodos, el cual consta de cuatro diodos conectados en una configuración que posibilita la rectificación de ambas semiondas de la señal de entrada. Esta configuración se destaca por su eficacia y sencillez. Los circuitos de onda completa generan una salida de CC más uniforme que la salida pulsante obtenida con el circuito de media onda, ya que la señal de entrada se rectifica en ambas direcciones (Rashid, 2013).

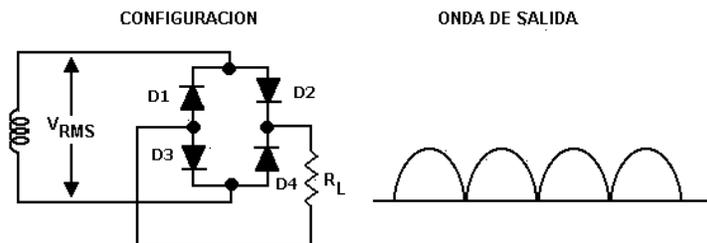


Figura 2.6.3.2. Circuito rectificador de onda completa.

### 2.6.3. Diodo Zener

El diodo Zener es otro tipo de diodo de propósito general que se utiliza principalmente para mantener un voltaje constante en un circuito, incluso cuando la corriente a través del diodo varía considerablemente (Boylestad & Nashelsky, 2012). Su característica distintiva es la capacidad de operar en inversa de forma controlada, manteniendo una tensión constante a través del diodo cuando se polariza en inversa en su región de ruptura Zener (Rashid, 2013).

La Figura 6 muestra el símbolo esquemático del diodo Zener. En polarización directa, el diodo Zener se comporta de manera similar a un diodo rectificador convencional, permitiendo el flujo de corriente cuando el ánodo es positivo en relación con el cátodo. Sin embargo, en polarización inversa, cuando el voltaje aplicado supera el voltaje de ruptura Zener, el diodo Zener comienza a conducir significativamente, manteniendo un voltaje constante a través de él (Sedra & Smith, 2004).

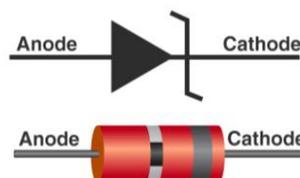


Figura 2.6.3.1. Símbolo del diodo Zener (TecnoElite, 2024).

### 2.6.3.1 Funcionamiento del diodo Zener

La curva característica de un diodo Zener muestra la relación entre el voltaje aplicado a través del diodo y la corriente que fluye a través de él en su región de ruptura Zener (Boylestad & Nashelsky, 2012). A diferencia de un diodo rectificador, que se daña si se polariza inversamente más allá de su voltaje de ruptura, el diodo Zener está diseñado para operar de manera segura en esta región de ruptura Zener, manteniendo un voltaje constante a través de él dentro de ciertos límites de corriente.

### 2.6.3.2 Aplicaciones del diodo Zener

Los circuitos comunes que emplean el diodo Zener son fundamentalmente los reguladores de voltaje. Estos circuitos son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones, como fuentes de alimentación estabilizadas, sistemas de protección contra sobretensiones y reguladores de voltaje en dispositivos electrónicos.

- Reguladores de voltaje:

Los reguladores de voltaje basados en el diodo Zener se utilizan para mantener un voltaje constante en una carga, independientemente de las variaciones en el voltaje de entrada o de las corrientes de carga (Boylestad & Nashelsky, 2012). En estos circuitos, el diodo Zener se polariza inversamente y se coloca en paralelo con la carga (véase Figura 7). Cuando la tensión de entrada supera el voltaje de ruptura del diodo Zener, este comienza a conducir, limitando el voltaje a su valor de ruptura Zener. Esto garantiza que la carga reciba un voltaje constante incluso si hay fluctuaciones en la fuente de alimentación.

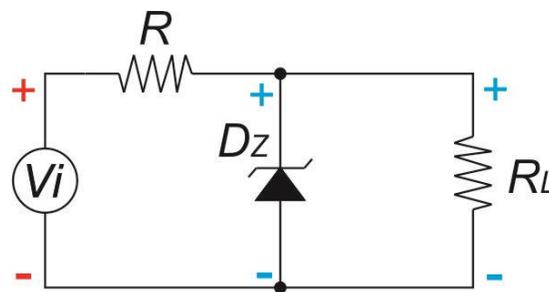


Figura 2.6.3.2.1. Circuito regulador de voltaje.

## 2.6.4 Diodo Schottky

El diodo Schottky es otro tipo de diodo de propósito general que se distingue por su rápida conmutación y baja caída de voltaje directo. Su diseño se basa en la unión entre un metal y un semiconductor de tipo n, lo que permite tiempos de conmutación más rápidos y una menor pérdida de potencia en comparación con los diodos rectificadores convencionales (Boylestad & Nashelsky, 2012).

El símbolo esquemático del diodo Schottky se muestra en la Figura 8. En comparación con los diodos rectificadores convencionales, el diodo Schottky tiene una caída de voltaje directo significativamente menor, lo que resulta en una pérdida de potencia menor y una mayor eficiencia en aplicaciones de alta frecuencia (Rashid, 2013).

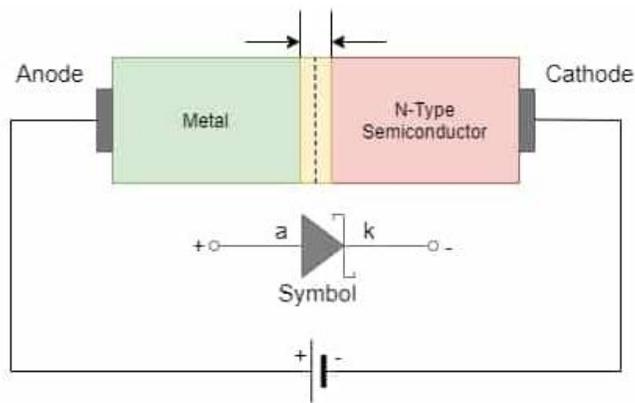


Figura 2.6.4.1. Símbolo del diodo Schottky (Isaac, 2024).

### 2.6.4.1 Funcionamiento del diodo Schottky

La curva característica de un diodo Schottky exhibe una rápida transición entre los estados de conducción y de corte, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren tiempos de conmutación rápidos, como rectificación de alta frecuencia y circuitos de conmutación (Sedra & Smith, 2004). La Figura 9 muestra una representación esquemática de la curva característica típica de un diodo Schottky, donde se aprecia que el tiempo de conmutación es rápido (0.1V), lo que permite su uso con frecuencias altas.

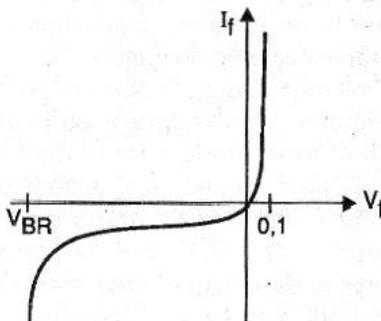


Figura 2.6.4.1.1. Curva característica de un diodo Schottky (Braga, 2019).

### 2.6.5 Diodo emisor de luz

El diodo emisor de luz (LED) es un dispositivo semiconductor que emite luz cuando una corriente eléctrica pasa a través de él en la dirección adecuada (Sze & Ng, 2007). Su operación se basa en el fenómeno de electroluminiscencia, donde los electrones al recombinarse con huecos en la región de unión emiten fotones de luz.

El símbolo esquemático del LED se muestra en la Figura 10. Se asemeja al de un diodo rectificador convencional, pero con la adición de flechas indicando la emisión de luz. Los LED están disponibles en una variedad de colores y potencias, y pueden emitir luz visible, infrarroja o ultravioleta dependiendo del material semiconductor utilizado en su construcción (Sze & Ng, 2007).

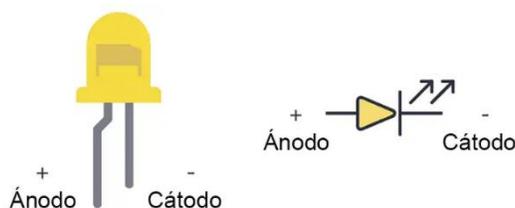


Figura 2.6.5.1. Símbolo del LED (Biskmarks, s.f.).

#### 2.6.5.1 Funcionamiento del diodo LED

La estructura del chip de los diodos LED, al contrario de lo que ocurre con los diodos comunes, no emplea cristales de silicio (Si) como elemento semiconductor, sino una combinación de otros tipos de materiales, igualmente semiconductores, pero que poseen la propiedad de emitir fotones de luz de diferentes colores cuando lo recorre una corriente eléctrica.

Cuando existe una diferencia de potencial entre los terminales, los electrones del terminal más positivo se moverán hacia el terminal más negativo. Muchos electrones al recombinarse con los huecos que dejaron otros electrones, liberan energía excedente en forma de fotones de luz (véase Figura 11), el color con el que se iluminara el LED se determina a partir de la banda de energía del semiconductor, es proporcional a la energía del propio fotón (ElectroTec, 2024).

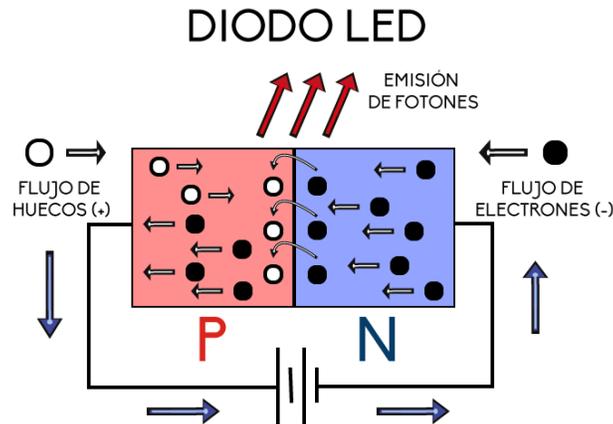


Figura 2.6.5.1.1. Funcionamiento de un diodo emisor de luz.

### 2.6.5.2 Tipos de LED

Existen varios tipos de LED, cada uno diseñado para cumplir con requisitos específicos de aplicaciones y ofrecer características distintas en términos de rendimiento, eficiencia y durabilidad. Algunos de los tipos más comunes son:

- LED de potencia:

Estos LED están diseñados para manejar corrientes más altas y producir mayor luminosidad que los LED estándar. Son ideales para aplicaciones que requieren una iluminación intensa, como iluminación de exteriores, faros de automóviles y proyectores (Hsu, 2013).

- LED SMD:

SMD significa "Surface Mount Device", y estos LED se caracterizan por su montaje superficial. Son pequeños y compactos, lo que los hace ideales para aplicaciones donde el espacio es limitado, como en pantallas LED, paneles de iluminación y dispositivos electrónicos portátiles (Mallick & Mallick, 2019).

- LED COB:

COB significa "Chip on Board", y estos LED consisten en múltiples chips LED montados directamente en un sustrato para formar una matriz de iluminación. Ofrecen una distribución uniforme de la luz y son utilizados en aplicaciones de iluminación general, como lámparas de techo y focos (Li, 2017).

- **LED RGB:**

Estos LED están diseñados para producir luz en tres colores primarios: rojo, verde y azul. Al combinar diferentes intensidades de estos colores, es posible crear una amplia gama de colores y efectos de iluminación. Se utilizan en aplicaciones decorativas, iluminación de escenarios y sistemas de iluminación de espectáculos (Daud, 2014).

- **LED UV:**

Los LED UV emiten luz ultravioleta y se utilizan en una variedad de aplicaciones, como la curación de resinas, la desinfección de agua y superficies, y la detección de materiales fluorescentes en aplicaciones forenses y de inspección (Hirata, 2014).

## **2.7 Aplicaciones actuales**

Existen varios tipos de diodos, cada uno con sus propias características. Los diodos pueden clasificarse en varios tipos en función de sus características y aplicaciones:

### **2.7.1 Diodo Emisor de Luz (LED)**

El Diodo Emisor de Luz (LED) es un tipo de diodo semiconductor que emite luz cuando lo atraviesa una corriente eléctrica. El LED funciona según el principio de electroluminiscencia, en el que la energía de una corriente eléctrica se convierte en energía luminosa. La luz emitida se genera por la recombinación electrón-hueco que tiene lugar en el material semiconductor. (FRAILE-VILARRASA et. al., 2012)

Figura 2.7.1.1. Diodo Emisor de Luz (LED)



Fuente: Electronicaonline (2021)

Los LED se construyen uniendo un material de tipo p (con un exceso de cargas positivas) y un material de tipo n (con un exceso de cargas negativas) para formar una unión p-n. Cuando se aplica una polarización directa a través de la unión p-n, los electrones del material de tipo n se recombinan con los huecos del material de tipo p, liberando energía en forma de fotones. La longitud de onda de la luz emitida depende de los materiales semiconductores utilizados, lo que determina el color de la luz.

### Aplicaciones

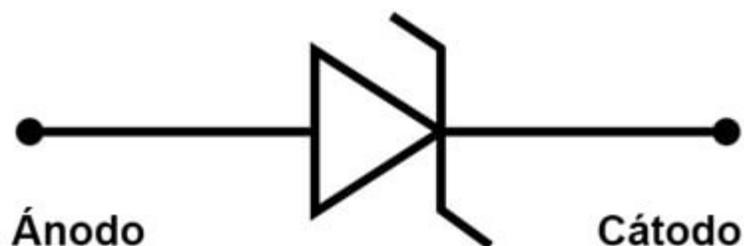
Los LED se utilizan a menudo como indicadores luminosos en dispositivos electrónicos, sustituyendo a las pequeñas bombillas incandescentes. En diversas aplicaciones se utilizan diodos emisores de luz, como señales de tráfico, flashes de cámaras, iluminación de aviación y faros de automóviles.

#### 2.7.2 Diodo Avalancha

Un **diodo Avalancha** es un diodo semiconductor especializado diseñado para funcionar en polarización inversa cerca de su tensión de ruptura, donde conduce la corriente mediante la multiplicación de avalancha. Esto ocurre cuando el campo eléctrico inverso a través de la unión p-n es lo suficientemente fuerte como para acelerar electrones y huecos libres, generando pares electrón-hueco adicionales mediante ionización por impacto. (Hernández-Labañino, 2011)

La construcción de un diodo avalancha se asemeja a la de un diodo de unión p-n convencional, pero con una tensión de ruptura estable y bien definida que se consigue optimizando los perfiles de dopaje y la geometría de la unión. Cuando la polarización inversa es inferior a su tensión de ruptura, el diodo tiene una corriente de fuga baja. Sin embargo, una vez que la tensión alcanza el punto de ruptura, el diodo conduce una corriente significativa debido a la multiplicación de avalancha, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones.

Figura 2.7.2.1. Diodo Avalancha



Fuente: Electronicaonline (2021)

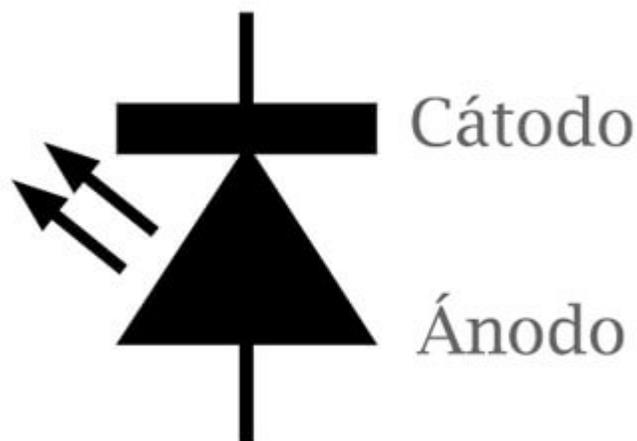
## Aplicaciones

- Regulación de la tensión: Utiliza diodos Zener para mantener tensiones estables.
- Protección contra sobretensiones: Tensión de bloqueo para proteger los componentes sensibles.
- Conmutación de alta velocidad: Respuesta rápida a los cambios de tensión en los circuitos.
- Generación de pulsos: Creación de pulsos rápidos de tensión en aplicaciones de alta velocidad.

### 2.7.3 Diodo Láser

Un Diodo Láser es similar a un LED porque convierte la energía eléctrica en energía luminosa. Pero a diferencia del LED, el diodo láser produce luz coherente. Los diodos láser son más caros que los LED. Sin embargo, son más baratos que otras formas de generadores láser. Además, estos diodos láser tienen una vida útil limitada. (González, 2003)

Figura 2.7.3.1.. Diodo Laser



Fuente: Electronicaonline (2021)

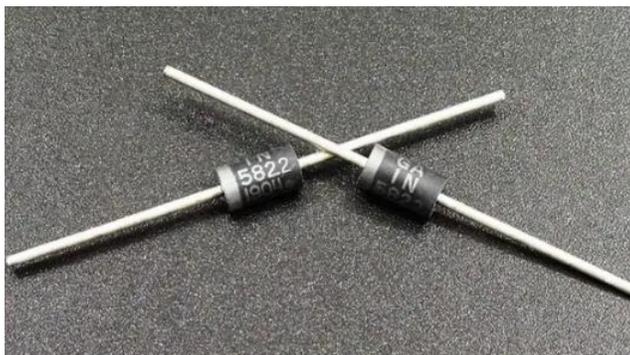
## Aplicaciones

- Grabación y lectura de datos en CD-ROM, DVD y discos Blu-ray
- Comunicaciones por fibra óptica
- Procesado de materiales por láser, como corte, perforado, etc.
- Aplicaciones médicas: Tratamiento dental, eliminación de tejidos no deseados y tumores

### 2.7.4 Diodo Schottky

El **diodo Schottky** es un tipo de diodo con una caída de tensión directa más baja a la del diodo de unión PN de silicio. Su caída de tensión directa es muy inferior a 0.7 voltios. Está formado por la unión de un semiconductor con un metal. (Rashid, 2004)

Figura 2.7.4.1. Diodo Schottky



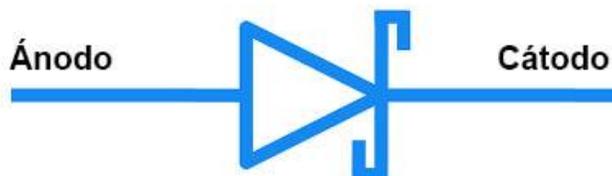
Fuente: Electronicaonline (2021)

En comparación con el diodo de unión PN, el diodo Schottky utiliza metal como el platino o el aluminio en lugar de material de tipo p. La unión del diodo Schottky se convierte en una unión metal-semiconductor o unión M-S y esta unión crea una barrera o capa de agotamiento conocida como barrera Schottky. También se conoce como *diodo de portador caliente* o *diodo de baja tensión* o *diodo de barrera Schottky*.

La conmutación del diodo Schottky es más rápida que la del diodo de unión PN. También produce menos ruido no deseado que el diodo de unión PN. Se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones de conformación de ondas, rectificación y conmutación.

El símbolo del diodo Schottky se basa en el símbolo básico del circuito de diodos. En este diodo, el metal actúa como ánodo y el semiconductor de tipo N actúa como cátodo.

Figura 2.7.4.2. Símbolo del Diodo Schottky



Fuente: Electronicaonline (2021)

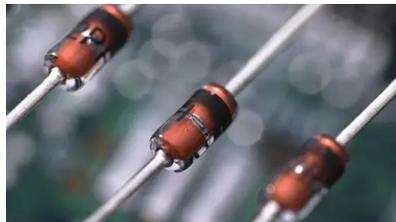
## Aplicaciones

- Se utiliza en aplicaciones de sujeción de tensión
- Se utiliza en fuentes de alimentación como SMPS (Switched Mode Power supply)
- Se utiliza en mezcladores de RF y diodos detectores.
- Se utiliza en rectificadores de uso general.
- Se utiliza en protección contra corriente inversa y protección contra descargas
- Se utiliza en aplicaciones de celdas solares como paneles solares

### 2.7.5 Diodo Zener

Un diodo Zener es un tipo de diodo de unión PN diseñado para funcionar en la región de ruptura inversa, donde la tensión a través del diodo es mayor que la tensión de ruptura, también conocida como «*tensión Zener*». Esto permite utilizar el diodo para estabilizar y regular la tensión. (Zbar et. al, 2003)

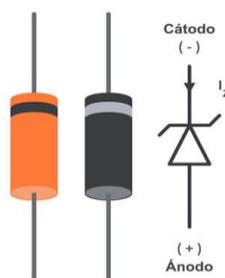
Figura 2.7.5.1.. Diodo Zener



Fuente: Electronicaonline (2021)

Cuando un diodo Zener está en polarización inversa, a medida que aumenta la tensión a través del diodo, el campo eléctrico en la región de agotamiento se hace más fuerte y, finalmente, alcanza un punto en el que es lo suficientemente fuerte como para romper la unión y permitir que fluya una gran corriente. Esto se conoce como ruptura Zener. En esta región, el diodo Zener actúa como una fuente de tensión constante y la tensión a través del diodo permanece en la tensión Zener independientemente de la corriente que fluya a través de él.

Figura 2.7.5.2. Diodo Zener



Fuente: Electronicaonline (2021)

## Aplicaciones

- Regulación de tensión: Los diodos Zener se utilizan habitualmente en circuitos reguladores de tensión para mantener una tensión de salida estable, independientemente de los cambios en la tensión de entrada o la corriente de carga.
- Referencia de tensión: Los diodos Zener se utilizan a menudo como fuente de tensión de referencia en circuitos analógicos.
- Protección contra sobretensiones: Los diodos Zener pueden utilizarse en circuitos de protección contra sobretensiones para proteger los dispositivos electrónicos de picos de tensión y transitorios.
- Bloqueo: Los diodos Zener pueden utilizarse en circuitos de sujeción para limitar la amplitud de una señal.

### 2.7.6 Fotodiodo

Un **fotodiodo** es un dispositivo semiconductor que convierte la luz en corriente eléctrica. Funciona según el principio del efecto fotoeléctrico, en el que los fotones de luz interactúan con el material semiconductor, generando pares electrón-hueco. Cuando estos portadores de carga son separados por un campo eléctrico o una unión p-n, se produce una fotocorriente. (Cappelletti et.al, 2007)

Figura 2.7.6.1. Fotodiodo



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

Los fotodiodos se construyen formando una unión p-n o una estructura p-i-n dentro de un material semiconductor sensible a la luz. Cuando los fotones de luz inciden sobre el fotodiodo, son absorbidos por el semiconductor, generando pares electrón-hueco. El flujo de estos portadores de carga, bajo la influencia de un campo eléctrico externo, crea una corriente proporcional a la intensidad de la luz incidente.

## Aplicaciones

- Comunicación óptica: Se utilizan como receptores en redes de fibra óptica.
- Células solares: Convierten la luz solar en energía eléctrica.
- Dispositivos de imagen: Se encuentran en las cámaras digitales y en los dispositivos de carga acoplada (CCD).

- Se utiliza para medir distancias y detectar objetos.
- Sensores de luz ambiental: Regulan el brillo de la pantalla en smartphones y otros dispositivos.
- Espectroscopia: Medir la absorción y reflexión de la luz en análisis químicos.
- Aplicaciones médicas: Monitorizar la frecuencia cardíaca, la saturación de oxígeno y la presión arterial.
- Escáneres de códigos de barras: Decodifican códigos de barras para la identificación de productos.
- Detectores de humo: Detectan partículas de humo gracias a las propiedades de dispersión de la luz.
- Mandos a distancia por infrarrojos: Reciben señales de dispositivos controlados a distancia.

### 2.7.7 Diodo Varicap o Diodo Varactor

Un diodo varactor, también conocido como diodo varicap o diodo de sintonización, es un diodo semiconductor especializado diseñado para aprovechar su propiedad de capacitancia variable en polarización inversa. Se utiliza principalmente en aplicaciones de modulación de frecuencia y sintonización, donde la capacitancia del diodo se controla variando la tensión inversa aplicada.

La construcción de un diodo varactor es similar a la de un diodo de unión p-n típico, pero está diseñado específicamente con una región de agotamiento más grande y perfiles de dopaje optimizados para mejorar sus características de capacitancia-voltaje. La región de agotamiento actúa como un medio dieléctrico entre las regiones p y n, que sirven como placas del condensador. (Martínez-Cuaspud et. al, 2014)

Figura 2.7.7.1. Diodo Varicap o Diodo Varactor



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

Cuando se aplica una polarización inversa al diodo varactor, la anchura de la región de agotamiento aumenta, haciendo que la capacitancia disminuya. Controlando la tensión inversa, la capacitancia del diodo varactor puede ajustarse en un amplio rango, lo que lo convierte en un condensador controlado por tensión.

### Aplicaciones

- Osciladores controlados por tensión (VCO): Generan señales de frecuencia modulada.
- Multiplicadores de frecuencia: Producen armónicos de alta frecuencia a partir de señales de entrada.
- Receptores FM: Permiten sintonizar emisoras de radio ajustando la frecuencia del oscilador local.
- Sintonizadores de TV: Permiten seleccionar canales variando la frecuencia del oscilador local.
- Sistemas de satélite: Facilitan la sintonización y los ajustes de frecuencia en los sistemas de comunicación.
- Filtros electrónicos: Proporcionan filtrado sintonizable en tensión en diversas aplicaciones de procesamiento de señales.
- Adaptación de impedancias: Ofrecen capacitancia variable para optimizar la impedancia en circuitos de RF.

### 2.7.8 Diodo Rectificador

Un diodo rectificador es un tipo de diodo de unión P-N, cuya área de unión P-N es muy grande. Esto se traduce en una alta capacitancia en dirección inversa. Su velocidad de conmutación es baja. Es el tipo de diodo más común y más utilizado. Estos tipos de diodos pueden manejar grandes corrientes y se utilizan para convertir CA en CC (rectificación). (Madrid et. al, 2003)

Figura 2.7.8.1. Diodo Rectificador



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

Los diodos rectificadores suelen estar hechos de Silicio. Pero para fabricar diodos rectificadores se utilizan materiales semiconductores a base de Ge o arseniuro de galio. Son capaces de conducir altos valores de corriente eléctrica.

## Aplicaciones

- Rectificar una tensión, como convertir la CA en CC
- Aislar señales de una fuente de alimentación
- Referencia de tensión
- Control del tamaño de una señal
- Mezcla de señales
- Señales de detección
- Sistemas de iluminación

### 2.7.9 Diodo PIN

Un diodo PIN es un tipo de diodo semiconductor con una amplia región intrínseca entre las regiones fuertemente dopadas de tipo p y tipo n. Esta construcción permite que el diodo PIN funcione como una resistencia variable a altas frecuencias cuando esta en polarización directa. (Silva, 1998)

Figura 2.7.9.1. Diodo PIN



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

Cuando está en polarización directa, el diodo PIN actúa como un diodo convencional. Sin embargo, a altas frecuencias, los portadores de carga de la región intrínseca no pueden seguir los rápidos cambios de tensión, lo que da lugar a una resistencia que varía con la corriente de polarización directa.

La capacidad de alta frecuencia del diodo PIN lo hace útil en diversas aplicaciones, como conmutadores de RF, atenuadores, fotodetectores y limitadores de potencia.

## Aplicaciones

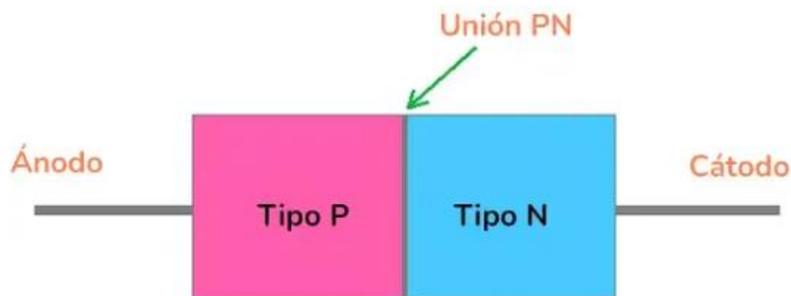
- Conmutadores de RF: Conmutación de rutas de señal de alta frecuencia.
- Atenuadores: Control de amplitud de señales de alta frecuencia.
- Fotodetectores: Detección óptica de señales.
- Limitadores de potencia: Protección contra el exceso de potencia de RF.
- Desfasadores de RF: Desfasadores de señales de alta frecuencia.

- Moduladores de frecuencia: Modulación de frecuencia de señales de alta frecuencia.
- Mezcladores de señales: Mezcla de señales de alta frecuencia.
- Rectificadores de alta frecuencia: Conversión de señales de corriente alterna de alta frecuencia en corriente continua.

### 2.7.10 Diodo de Unión PN

Un **diodo de Unión PN** es un tipo de dispositivo semiconductor que permite que la corriente fluya en una sola dirección. Consta de dos regiones de material semiconductor, una dopada con impurezas para crear un exceso de electrones (tipo n) y la otra dopada con impurezas para crear una deficiencia de electrones (tipo p). (Boylestad et.al, 2018)

Figura 2.7.10.1. Diodo de Unión PN



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

Cuando las regiones de tipo p y n entran en contacto, se forma una unión en la que los electrones de la región de tipo n fluyen hacia la región de tipo p, creando una región de agotamiento con un campo eléctrico incorporado que se opone a cualquier flujo posterior de corriente. Esto permite que el diodo actúe como rectificador, convirtiendo la corriente alterna en continua.

### Aplicaciones

- Rectificación: Los diodos de unión PN se utilizan a menudo en fuentes de alimentación para convertir la corriente alterna en continua.
- Clipping y clamping: Los diodos de unión PN pueden utilizarse para limitar la amplitud de una señal recortando las partes por encima o por debajo de un umbral determinado.
- Conmutación: Los diodos de unión PN pueden utilizarse como dispositivos de conmutación rápida en circuitos digitales.
- Detección: Los diodos de unión PN pueden utilizarse como detectores de señales de radiofrecuencia.

### 2.7.11 Diodo Túnel

Un **diodo Túnel** es un diodo semiconductor con materiales fuertemente dopados de tipo p y tipo n, lo que da lugar a una unión p-n estrecha y altamente conductora y a una fina región de agotamiento, fue inventado por Leo Esaki, que descubrió el efecto túnel cuántico en los semiconductores. (Sanchez-Aniorte, 2012)

Figura 2.7.11.1. Diodo Túnel



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

En su funcionamiento, cuando se aplica una pequeña tensión de avance, los electrones «atravesan» la barrera de potencial formada por la región de agotamiento, provocando un rápido aumento de la corriente. A tensiones más altas, la corriente disminuye debido a la reducción de la probabilidad de tunelización, creando una región de resistencia negativa.

#### Aplicaciones

- Osciladores de alta frecuencia: Generan señales estables de alta frecuencia.
- Amplificadores de microondas: Amplifican señales de microondas débiles.
- Circuitos de RF: Utilizados en sistemas de comunicación por radiofrecuencia.
- Conmutación de alta velocidad: Se emplea en determinados circuitos lógicos y de memoria de ordenador.
- Osciladores controlados por tensión: Utilizados en circuitos de bucle de enganche de fase para la síntesis de frecuencias.
- Generadores de impulsos: Crean pulsos rápidos y nítidos para diversas aplicaciones.
- Conformación de formas de onda: Modifican y filtran formas de onda en circuitos de procesamiento de señales.

### 2.7.12 Diodo Supresor de Voltaje Transitorio – Diodo TVS

Un diodo supresor de voltaje transitorio (TVS) también se conoce como transil o tirector. Un diodo TVS es un tipo de diodo avalancha que se utiliza para proteger componentes electrónicos de los picos de tensión inducidos en los cables conectados o bloquea la tensión en una cantidad determinada antes de entrar en el circuito. Los diodos TVS están disponibles en configuraciones de circuito de diodos unidireccionales (unipolares) y bidireccionales (bipolares). (Fontal et.al, 2005)

Figura 2.7.12.1. Diodo Supresor de Voltaje Transitorio – Diodo TVS



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

#### Aplicaciones

- Protección contra sobretensiones.
- Protege los circuitos electrónicos de las descargas electrostáticas.

### 2.7.13 Diodo Gunn

El **diodo Gunn**, inventado por J. B. Gunn, es un dispositivo semiconductor que presenta una resistencia diferencial negativa debido al efecto Gunn. Carece de unión p-n y está formado por un único material semiconductor de tipo n, normalmente arseniuro de galio (GaAs) o nitruro de galio (GaN). (Mediavilla-Sánchez, 2011)

Figura 2.7.13.1. Diodo Gunn



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

En su construcción, el diodo Gunn presenta dos contactos óhmicos conectados al material de tipo n. El efecto Gunn surge de una propiedad denominada *efecto de electrones transferidos* presente en el semiconductor.

Cuando se aplica una tensión elevada, los electrones de la banda de conducción adquieren energía suficiente para desplazarse a una banda de mayor energía, disminuyendo su movilidad. Al aumentar el voltaje, la corriente aumenta inicialmente, pero acaba disminuyendo a partir de cierto umbral debido a la reducción de la movilidad de los electrones, lo que da lugar a una resistencia diferencial negativa. Esta característica permite al diodo Gunn generar oscilaciones a frecuencias de microondas.

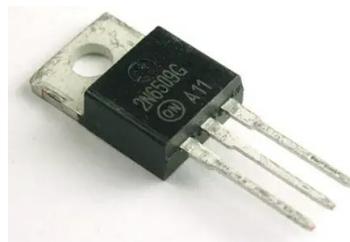
### Aplicaciones

- Osciladores de microondas: Generan señales de microondas estables.
- Multiplicadores de frecuencia: Aumentan las frecuencias de las señales de entrada.
- Amplificadores: Amplifican las señales de microondas débiles.
- Guerra electrónica: Interferencia de señales y contramedidas.
- Teledetección: Sensores activos de microondas para imagen/detección.
- Osciladores locales: Señales estables en receptores superheterodinos.
- Fuentes de onda continua: Generación de señales continuas de microondas.
- Comunicación inalámbrica: Sistemas punto a punto y por satélite.

### 2.7.14 Rectificador Controlado de Silicio

Los **rectificadores controlados de silicio (SCR)** son un tipo de diodo de la familia de los tiristores. Los SCR son dispositivos de control de corriente de estado sólido de cuatro capas. Las cuatro capas del semiconductor son P-N-P-N. Hay tres terminales: ánodo, cátodo y la compuerta. (Cruz-Villachica, 2007)

Figura 2.7.14.1. Rectificador Controlado de Silicio



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

El dispositivo está formado por un material de silicio que controla la alta potencia, y convierte la corriente alterna elevada en corriente continua (rectificación). Los SCR son unidireccionales, la corriente eléctrica sólo puede circular en una dirección.

## Aplicaciones

Los SCR se utilizan en aplicaciones de control de potencia, como la alimentación de motores eléctricos, el control de sistemas de iluminación, controles de relés o elementos de calefacción por inducción.

### 2.7.15 Diodo SRD

El diodo de recuperación de paso (SRD) es un diodo semiconductor especializado conocido por su rápido comportamiento de conmutación de un estado conductor a un estado no conductor. Tiene un perfil de dopaje a medida, con una concentración de dopaje que disminuye gradualmente desde la unión p-n hacia el lado n, creando una «región de deriva» con una baja concentración de portadores de carga mayoritarios. (Acosta-Rico, 2011)

Figura 2.7.15.1. Diodo SRD



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

En polarización directa, el SRD conduce la corriente como un diodo normal. Cuando se polariza rápidamente en sentido inverso, los portadores de carga almacenados en la región de deriva son barridos rápidamente, provocando un aumento repentino de la corriente inversa, seguido de una caída abrupta a medida que se agotan las cargas. Esta rápida transición genera pulsos de tensión agudos y contenido armónico a altas frecuencias, lo que hace que el SRD sea adecuado para diversas aplicaciones de alta frecuencia.

## Aplicaciones

- Generación de pulsos: Pulsos de tensión rápidos y nítidos.
- Multiplicación de frecuencias: Creación de armónicos de alta frecuencia.
- Conformación de ondas: Procesamiento ultrarrápido de formas de onda.
- Compuertas de muestreo: Compuertas rápidas en circuitos de alta velocidad.

### 2.7.16 Diodo IMPATT

El **diodo IMPATT** es un tipo de diodo semiconductor diseñado para generar señales de microondas de alta frecuencia mediante ruptura de avalancha. Su construcción es similar a la de un diodo de unión p-n convencional, con una transición gradual entre capas muy dopadas de tipo n y tipo p que crea una «región de avalancha» para la generación de microondas de alta frecuencia. (Robredo, 2014)

Figura 2.7.16.1. Diodo IMPATT



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

Cuando se pone en polarización inversa, el diodo IMPATT experimenta un proceso de multiplicación de avalancha que genera un número significativo de portadores de carga, lo que provoca un rápido aumento de la corriente y señales de microondas de alta frecuencia. Sus capacidades de alta frecuencia lo hacen adecuado para diversas aplicaciones en sistemas de comunicación y radar, circuitos de procesamiento de señales, formación de imágenes, aplicaciones industriales e investigación científica.

#### Aplicaciones

- Osciladores de microondas: Generación de señales de microondas estables.
- Amplificadores: Amplificación de señales de microondas débiles.
- Multiplicadores de frecuencia: Aumento de la frecuencia de la señal de entrada.
- Osciladores locales: Proporcionan señales estables en receptores superheterodinos.
- Equipo de guerra electrónica: Utilizados para la interferencia de señales y la contramedida.
- Sistemas de imágenes: Utilizados para la detección activa de microondas.
- Generadores de energía: Producen señales de microondas de alta potencia.

### 2.7.17 Diodo Shockley

El **diodo Shockley**, también conocido como diodo p-n-p-n o diodo de cuatro capas, es un tipo de diodo semiconductor con una estructura única de cuatro capas. El diodo consta de dos regiones semiconductoras de tipo p y dos de tipo n. Las regiones de tipo p forman las capas exteriores y las de tipo n, las interiores. (Boylestad et.al, 2018)

Figura 2.7.17.1. Diodo Shockley



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

El funcionamiento del diodo Shockley se basa en el principio de la resistencia negativa. Cuando se aplica una tensión directa al diodo, las dos uniones p-n se polarizan y empieza a circular corriente. A medida que la corriente aumenta, la tensión a través del diodo disminuye debido a la región de resistencia negativa en el centro del diodo.

#### Aplicaciones

- Osciladores: Generación de señales para sistemas de comunicación y electrónicos.
- Interruptores: Control del flujo de corriente en circuitos electrónicos.
- Circuitos de disparo: Generación de impulsos para activar otros componentes electrónicos.
- Circuitos Latch: Mantenimiento de un estado o información en circuitos digitales.
- Osciladores de relajación: Producción de formas de onda repetitivas para aplicaciones de temporización.

### 2.7.18 Diodo de Vacío

Es la forma más simple de un diodo fabricado a partir de un tubo de vacío y dos electrodos (cátodo y ánodo). El ánodo y el cátodo están encerrados dentro del tubo de vacío (vidrio vacío). Cuando el cátodo se calienta emite electrones, el ánodo recoge los electrones y el flujo continúa. El cátodo puede calentarse directa o indirectamente. En polarización directa, los electrones libres del cátodo se liberan al vacío tras calentarse. El ánodo recoge estos electrones y la corriente fluye. En polarización inversa, el electrón libre en el vacío es repelido por el ánodo, ya que está conectado al terminal negativo, por lo que la corriente no fluye. Así, la corriente fluye en una sola dirección. (Boylestad et.al, 2018)

Figura 2.7.18.1. Diodo de Vacío



Fuente: Fuente: Electronicaonline (2021)

### Aplicaciones

- Radios, hornos microondas, televisores, teléfonos móviles, transmisiones Wi-Fi e incluso dispositivos de comunicación por satélite y radar.
- Tubos de rayos catódicos, tubos de rayos X, fotomultiplicadores y magnetrones.
- Dispositivos electrónicos de vacío

### 2.7.19 Otros Tipos de Diodos en Electrónica

- Diodos Dopados en Oro: Estos diodos usan oro como dopante y pueden operar a frecuencias de señal incluso si aumenta la caída de voltaje directo.
- Diodos de Súper Barrera: También se denominan diodos rectificadores. Estos diodos tienen la propiedad de una corriente de fuga inversa baja como la del diodo de unión p-n normal y una caída de voltaje directa baja como la del diodo Schottky con capacidad de manejo de sobretensión.

- **Diodos de Contacto Puntual:** La construcción de este diodo es más simple y se utiliza en aplicaciones analógicas y como detector en receptores de radio. Este diodo está construido con semiconductor tipo n y pocos metales conductores colocados para estar en contacto con el semiconductor. Algunos metales se mueven hacia el semiconductor para formar una pequeña región de semiconductor tipo p cerca del contacto.
- **Diodos Peltier:** Este diodo se utiliza como motor térmico y sensor para enfriamiento termoeléctrico.
- **Diodo de Cristal:** Estos son un tipo de diodos de contacto puntual que también se denominan diodos de bigotes de gato. Este diodo se compone de un fino alambre de metal afilado que se presiona contra el cristal semiconductor. El alambre de metal es el ánodo y el cristal semiconductor es el cátodo. Estos diodos están obsoletos.

Hay muchos tipos de diodos, cada uno de ellos adecuado para su propia aplicación. No sólo la tecnología difiere entre los distintos tipos de diodos, sino que también pueden estar contenidos en diferentes empaques: algunos pueden tener plomo y otros pueden atornillarse a disipadores térmicos y, con la cantidad de montaje de placas de circuito impreso que utiliza técnicas de fabricación automatizadas, los diodos SMD se utilizan ahora en grandes cantidades.

### **2.7.1 Estudio de dispositivos y sistemas comerciales actuales basados en diodos**

Las celdas solares de tercera generación son una evolución de las tecnologías fotovoltaicas tradicionales, como las celdas de silicio. Estas celdas de tercera generación utilizan materiales y diseños innovadores para mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción de energía solar. (Varela, 2015)

Algunos ejemplos de celdas solares de tercera generación incluyen:

- **Celdas solares de película delgada:** Utilizan materiales semiconductores como telururo de cadmio (CdTe) o telururo de indio y selenio (CIS) para capturar la luz solar de manera más eficiente que el silicio tradicional.
- **Celdas solares orgánicas:** Utilizan materiales orgánicos o polímeros conductores para convertir la luz solar en electricidad. Estas celdas son flexibles, ligeras y pueden ser fabricadas a bajo costo.
- **Celdas solares de tinte sensibilizante:** También conocidas como celdas solares de colorante, utilizan un semiconductor de óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) recubierto con un tinte fotosensible para generar electricidad a partir de la luz solar. (Varela, 2015)

Estas tecnologías de tercera generación buscan mejorar la eficiencia, la flexibilidad y la sostenibilidad de la energía solar, abriendo nuevas posibilidades para su aplicación en dispositivos portátiles y otros sistemas de energía renovable. (Varela, 2015)

Las celdas solares de tercera generación ofrecen varias ventajas significativas para su aplicación en dispositivos portátiles:

- **Eficiencia mejorada:** Las celdas solares de tercera generación, como las celdas de tinte sensibilizante y las celdas orgánicas, pueden tener una mayor eficiencia en la conversión de la luz solar en electricidad en comparación con las celdas solares tradicionales de silicio.
- **Flexibilidad y ligereza:** Algunas tecnologías de tercera generación, como las celdas solares orgánicas, son flexibles y ligeras, lo que las hace ideales para integrarse en dispositivos portátiles sin añadir mucho peso ni volumen.
- **Bajo costo de producción:** Las celdas solares de tercera generación, especialmente las orgánicas y las de película delgada, pueden fabricarse a bajo costo en comparación con las celdas solares de silicio, lo que las hace más accesibles para aplicaciones en dispositivos portátiles.
- **Mayor versatilidad:** Debido a su flexibilidad y diseño innovador, las celdas solares de tercera generación pueden adaptarse a diferentes formas y tamaños, lo que las hace ideales para integrarse en dispositivos portátiles con diseños variados.
- **Sostenibilidad:** Al utilizar tecnologías de tercera generación, se promueve el uso de energía solar renovable y sostenible, lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono y al fomento de prácticas energéticas más respetuosas con el medio ambiente. (Varela, 2015)

Las celdas solares de tercera generación presentan diferencias significativas en comparación con las celdas solares convencionales de silicio en términos de eficiencia y rendimiento:

- **Eficiencia:** Las celdas solares de tercera generación, como las celdas de tinte sensibilizante y las celdas orgánicas, pueden tener una eficiencia de conversión de la luz solar en electricidad comparable o incluso superior a las celdas solares de silicio. Estas tecnologías innovadoras permiten aprovechar de manera más efectiva la energía solar incidente.

- **Flexibilidad:** Mientras que las celdas solares de silicio son rígidas y frágiles, las celdas solares de tercera generación, como las orgánicas y las de película delgada, son flexibles y pueden adaptarse a diferentes superficies y formas. Esta flexibilidad las hace ideales para integrarse en dispositivos portátiles con diseños variados.
- **Costo de producción:** Las celdas solares de tercera generación, especialmente las orgánicas y las de película delgada, pueden fabricarse a un costo menor en comparación con las celdas solares de silicio. Esto se debe a los materiales y procesos de fabricación menos costosos utilizados en estas tecnologías. (Varela, 2015)
- **Sostenibilidad:** Las celdas solares de tercera generación, al ser más eficientes y fabricadas con materiales menos contaminantes, contribuyen a una mayor sostenibilidad en la generación de energía solar. Estas tecnologías promueven el uso de energía renovable y la reducción de la huella de carbono.

El sistema de alimentación con panel solar de tinte sensibilizante y circuito de alimentación funciona de la siguiente manera, basado en la información proporcionada en el documento:

- **Panel solar de tinte sensibilizante:** El panel solar de tinte sensibilizante está compuesto por un semiconductor de óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) recubierto con un tinte fotosensible. Este panel es capaz de generar electricidad a partir de la luz solar al absorber la radiación y convertirla en corriente eléctrica.
- **Circuito de alimentación:** El circuito de alimentación está diseñado para llevar el panel solar a su punto máximo de potencia, asegurando que suministre energía de manera eficiente a las baterías que alimentan el circuito principal. Este circuito se encarga de regular la carga de las baterías y optimizar la potencia entregada por el panel solar.
- **Funcionamiento conjunto:** El panel solar de tinte sensibilizante capta la luz solar y genera electricidad, que es enviada al circuito de alimentación. El circuito de alimentación se encarga de regular esta energía y cargar las baterías de manera óptima para alimentar el circuito principal del dispositivo portátil.
- **Integración con el dispositivo portátil:** El sistema de alimentación con panel solar de tinte sensibilizante y circuito de alimentación se integra con el dispositivo portátil, permitiendo que este se alimente de manera autónoma con energía solar. El circuito de alimentación garantiza que la energía generada por el panel solar se utilice de manera eficiente para mantener operativo el dispositivo. (Varela, 2015)

## **Diseño, fabricación y caracterización de diodos laser basados en pozos cuánticos de InGaAs(N)GaAs**

Estudio y desarrollo de diodos láser basados en pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs. Se discute cómo pequeños cambios en la estructura electrónica del material pueden afectar la emisión en longitudes de onda específicas, así como la calidad cristalina y óptica de la estructura. El objetivo principal es la fabricación de diodos láser, lo que requiere comprender el efecto del nitrógeno en la estructura y caracterizar el material. (Herrero, 2005)

El documento aborda la creación de un modelo teórico para describir los niveles de energía confinados en los pozos de GaInNAs/GaAs, el cálculo de la ganancia y el diseño de estructuras láser. También se dedica a la caracterización estructural y óptica de los pozos, con énfasis en el efecto del aleado térmico rápido (RTA). Además, se menciona la fabricación y caracterización de dispositivos como LEDs y LDs para comprender los mecanismos de recombinación de portadores. (Herrero, 2005)

Los diodos láser basados en pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs funcionan mediante un proceso detallado que implica la estructura de bandas del material, la ganancia material, la densidad umbral de portadores y la longitud de onda de emisión. Aquí se resume el funcionamiento de los diodos láser basados en este tipo de estructura, según la información proporcionada en el documento:

- **Estructura de Bandas:** La introducción de nitrógeno (N) en el material semiconductor GaInNAs/GaAs modifica la estructura de bandas del material, lo que afecta la energía del gap y la estructura electrónica del mismo .
- **Ganancia Material:** Se calcula la ganancia material del pozo cuántico, que está influenciada por la densidad de portadores y la presencia de N en la estructura .
- **Densidad Umbral de Portadores:** La densidad umbral de portadores es un parámetro importante para determinar la eficiencia del diodo láser. Se observa que aumenta con el contenido de N en la estructura, pero a un ritmo menor a medida que se incrementa el porcentaje de N .
- **Longitud de Onda de Emisión:** La presencia de N en la estructura afecta la longitud de onda de emisión del diodo láser. Se han logrado emisiones en diferentes longitudes de onda, como 1.18  $\mu\text{m}$ , 1.3  $\mu\text{m}$ , 1.4  $\mu\text{m}$  y 1.5  $\mu\text{m}$ , con diferentes densidades de corriente umbral. (Herrero, 2005)

## Preguntas

1.- ¿Cuál es el nombre de la corriente causada por la difusión de portadores a través de la unión P-N?

- A) Corriente de arrastre
- B) Corriente de saturación
- C) Corriente de difusión
- D) Corriente inversa

2.- ¿Cuál es una de las aplicaciones comunes de los diodos tipo P-N?

- A) Amplificación de señales
- B) Conversión de corriente alterna a corriente continua
- C) Generación de señales de alta frecuencia
- D) Protección contra sobrecargas

3.- ¿Cómo influye el dopaje en la fabricación de diodos?

- A) No tiene impacto en las propiedades eléctricas.
- B) Afecta el ancho de la zona de agotamiento en la unión PN.
- C) Incrementa la corriente máxima en directa.
- D) Disminuye la tensión umbral.

4.- ¿Por qué es importante conocer la clasificación de los diodos en diferentes categorías?

- A) Para saber cuántos electrones tiene cada diodo.
- B) Para determinar la resistencia interna de cada diodo.
- C) Para identificar las aplicaciones específicas de cada tipo de diodo.
- D) Para calcular la potencia máxima que puede disipar un diodo.

5.- ¿Por qué es necesario utilizar modelos de diodo más allá del símbolo estándar en los circuitos electrónicos?

- A) Para indicar la polaridad del diodo.
- B) Para simplificar la representación visual.
- C) Para tener en cuenta aspectos como la resistencia y la capacitancia.
- D) Para reducir la corriente de fuga.

6.- ¿Qué tipo de encapsulado se utiliza para montaje superficial en tarjetas de circuito impreso?

- A) Encapsulado a través de orificio.
- B) Encapsulado SOD.
- C) Encapsulado SOT.
- D) Encapsulado SMA.

7.- ¿Cuál es la función principal de los diodos rectificadores en un circuito?

- A) Convertir la corriente alterna en corriente continua
- B) Filtrar la corriente
- C) Amplificar la señal
- D) Regular la tensión

8.- ¿Cuál es uno de los esquemas más convencionales que emplean diodos rectificadores en la transformación de energía de corriente alterna a corriente continua?

- A) Circuito de media onda
- B) Circuito de onda cuadrada
- C) Circuito de onda senoidal
- D) Circuito de onda completa

9.- ¿Qué tipo de diodo está diseñado para manejar corrientes más altas y producir mayor luminosidad que los LED estándar?

- A) LED SMD
- B) LED COB
- C) LED de potencia
- D) LED convencional

10.- ¿Cuál es una característica de los diodos de Contacto Puntual mencionados en el documento?

- A) Se utilizan en aplicaciones de enfriamiento termoeléctrico.
- B) Son diodos rectificadores con baja corriente de fuga inversa.
- C) Están compuestos por un fino alambre de metal afilado.
- D) Se utilizan como detectores en receptores de radio.

### **Respuestas**

- 1.- C
- 2.- B
- 3.- B
- 4.- C
- 5.- C
- 6.- B
- 7.- A
- 8.- D
- 9.- C
- 10.- D

## REFERENCIAS

Cevallos, W. B. C., Llangarí, D. F. R., Ruiz, L. E. D., Manya, B. A. C., & Juiña, M. E. Y. (2019). La energía fotovoltaica. *Contribuciones a la Economía*, 17(1), 12.

Figueroa, E. C., Loureiro, A. G., & Rodríguez, M. A. (2013). *Desarrollo de herramientas para la simulación de dispositivos basados en semiconductores magnéticos* (Doctoral dissertation, Universidade de Santiago de Compostela).

Holt, C. A. (1989). *Circuitos electrónicos digitales y analógicos*. Reverté.

PVEducation. (s.f.). *Diodos de Union P-N*.  
<https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/dispositivos-semiconductores/diodos-de-union-p-n-0>

Vidal, J. L. (2019). Física de la union PN. *Universidad de valencia*, 1-52.

Boylestad, R. L., Nashelsky, L., Barraza, C. M., & Fernández, A. S. (2018). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (Vol. 8). PEARSON educación.

Gonzales-Calderon, L. M. (2022). Implementación de una luminaria LED de potencia con control de nivel de iluminación y monitoreo de sus variables usando la internet de las cosas para iluminación en interiores.

IEL2-II, F. D. C. (2006). *INTERRUPTOR ESTATICO PARA ALIMENTACION DE EQUIPOS ELECTRONICOS SENSIBLES* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES).

Martínez-Ciro, R. A., Restrepo-Martínez, A., & Lopez-Giraldo, F. E. (2013). Compensador de Iluminación Utilizando un Diodo LED como Sensor y Actuador de Luz. *Tecnológicas*, 303-313.

Schuler, C. A. (2021). *Electrónica, principios y aplicaciones*. Reverté.

Valls, G. C., López, J. E., & Marí, J. M. (2006). *Fundamentos de electrónica analógica* (Vol. 94). Universitat de València.

Zbar, P. B., Malvino, A. P., & Miller, M. A. (2003). *Prácticas de electrónica*. Marcombo.

Schiavon, M. I. (2019). Fundamentos de diodos. *Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura*, 1-16.

Universidad del País Vasco. (2018). Teoría del diodo. *OCW*, 1-22.

Aprende Institute Institute. (2024). Tipos de diodos, características técnicas y funcionamiento. <https://bit.ly/3TPFJ0X>

Boylestad, R. L., Nashelsky, L., Barraza, C. M., & Fernández, A. S. (2018). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (Vol. 8). PEARSON educación.

Cerezo Téllez, R. (2013). Caracterización de LEDs mediante el uso y programación de espectrómetro.

Proaño Tixilema, R. S., & Robayo Santana, Y. Y. (2023). *Implementación de un módulo de entrenamiento para la asignatura de Electrónica de la carrera de Electromecánica en la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná* (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)).

Rodriguez, P. (2001). *Semiconductores*. TECNIBOOK EDICIONES.

Trinidad Urbina, R. E. (2016). *Depósito de películas de materiales semiconductores por métodos químicos*.

Zeljami, K. (2013). Caracterización y modelado de dispositivos semiconductores para uso en sistemas de telecomunicaciones a frecuencias de terahercios.

Valls, G. C., López, J. E., & Marí, J. M. (2006). *Fundamentos de electrónica analógica* (Vol. 94). Universitat de València.

Zetina, A., Zetina, Á., & Zetina, Á. (1999). *Electrónica básica*. Editorial Limusa.

Zorrilla Guzmán, C. (2012). Diseño de un sistema de gestión inalámbrica de iluminación LED.

Maria, F. S. (2010). Fundamentos de electronica. *Universidad de Venecia*, 20-32.

All About Circuits. (s.f.). Diode Symbols and Markings. Recuperado de <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/reference/chpt-9/diodes/>

Boylestad R. y Nashelsky L. (2009). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*, Ed. Pearson (Décima Edición)

Electronics Tutorials. (s.f.). Diode Symbols. Recuperado de [https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode\\_2.html](https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html)

Floyd, T. L. (2017). *Dispositivos electrónicos* (8va ed.). Pearson Educación de México.

Malvino A. y Bates D. (2007). *Principios de Electrónica*, Ed. Mc Graw Hill (Séptima Edición)

Rashid M. (2000). Circuitos Microelectrónicos: Análisis y diseño, Ed. International ThomsonEditores

Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2004). Microelectronic Circuits (5th ed.). Oxford University Press.

Streetman, B. G., & Banerjee, S. K. (2000). Solid State Electronic Devices (5th ed.). Prentice Hall.

Arengas Rojas, D. L. (2000). Rectificadores de diodos en la regulación de voltaje y control de velocidad de un motor eléctrico.

Areny, R. P. (2006). *Instrumentos electrónicos básicos*. Marcombo.

Boylestad, R. L., Nashelsky, L., Barraza, C. M., & Fernández, A. S. (2018). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (Vol. 8). PEARSON educación.

CASTILLO VERA, R. A. (2020). ENTRENADOR DE ELECTRÓNICA ANALÓGICA Y DIGITAL PARA MEJORAR EL PROCESO DE ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LOS ESTUDIANTES EN EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA Y ROBÓTICA DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ (Bachelor's thesis, Jipijapa. UNESUM).

Electricity-magnetism. (2024). *Diodo Semiconductor: Principios y Aplicaciones*. <https://www.electricity-magnetism.org/es/diodo-semiconductor-union-p-n-y-aplicacion/#:~:text=Protecci%C3%B3n%20Como%20dispositivos%20de%20p rotecci%C3%B3n%20contra%20picos%20de%20voltaje%20o%20polaridad%20in versa>

Electronicaonline. (2022). *¿Qué es un Diodo Rectificador?: Funcionamiento y Aplicaciones*. <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/diodo/diodo-rectificador/>

Figuroa, J. (2014). Protección de sistemas eléctricos. *Instituto Universitario Politécnico "Santiago Mariño*, 3(54), 53.

Locón Amézquita, R. H. (2020). *Detección y corrección de armónicos en inversores de energía solar, implementando sistemas embebidos en tiempo real* (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).

Romero-Salazar, A. (2023). Métodos numéricos avanzados para el estudio electroestático de la unión PN.

Sánchez, J. A. (2013). *Instrumentación y control básico de procesos*. Ediciones Díaz de Santos.

Schuler, C. A. (2021). *Electrónica, principios y aplicaciones*. Reverté.

Wildi, T. (2006). *Electrical machines, drives, and power systems*. Pearson Educación.

Zbar, P. B., Malvino, A. P., & Miller, M. A. (2003). *Prácticas de electrónica*. Marcombo.

Biskmarks J. (s.f). Diodo Emisor de Luz (LED). Recuperado de <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/diodo/que-es-un-led/>

Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2012). *Dispositivos electrónicos y teoría de circuitos* (11va ed). Pearson.

Braga N. (2019). *Electrónica de Potencia – Curso de electrónica* (1ra ed). Editora NCB.

Daud, M. A. M. (2014). Algoritmo de mezcla de color para el sistema de iluminación LED RGB. *Procedia Engineering*, 97, 1665-1673.

Hirata, A. (2014). *Sistemas de diodos emisores de luz (LED) ultravioleta (UV) de estado sólido para aplicaciones de esterilización: desarrollo de ingeniería y características de rendimiento*. Instituto de Investigación Técnica Giga.

Hsu, J. (2013). LEDs de alta potencia: tecnología, aplicaciones y mejoras. In Tech. Isaac. (2024). Diodo Schottky: qué es y qué tiene de especial. Recuperado de <https://www.hwlibre.com/diodo-schottky/>

Khan Academy (2024). El diodo como un elemento de circuito. Recuperado de <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-semiconductor-devices/ee-diode/a/ee-diode-circuit-element>

Li, X. (2017). Diseño de un sistema de control de iluminación LED COB basado en algoritmos de control difuso. En la Conferencia de Ingeniería de Tecnología de la Información y Mecatrónica IEEE 3rd (ITOEC) de 2017.

Mallick, A., & Mallick, P. (2019). *Tecnología y práctica de montaje en superficie: principios y práctica*. CRC Press.

Mecafenix (2018). El diodo: ¿Qué es y para qué sirve?. Recuperado de <https://www.ingmecafenix.com/electronica/componentes/diodo-semiconductor/>

Pendino, C., & Roldán, G. (2014). *ELECTRÓNICA LINEAL Componentes Electrónicos I*.

Rashid, M. H. (2013). *Manual de electrónica de potencia* (3ra ed). Academic Press.

Sedra, A., & Smith, K. (2004). *Circuitos microelectrónicos* (5ta ed). Oxford University Press.

Streetman, B., & Banerjee, S. (2006). *Dispositivos electrónicos de estado sólido* (6ta ed). Pearson.

TecnoElite (2024). ¿Qué es un diodo Zener?. Recuperado de <https://tecnoelite.co/que-es-el-diodo-zener-aplicaciones/>

UNIT ELECTRONICS. (2020). Funcionamiento del diodo rectificador. Recuperado de <https://uelectronics.com/funcionamiento-del-diodo-rectificador/>

Electronicaonline. (2021). *Tipos de Diodos*. <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/diodo/tipos-de-diodos/>

FRAILE-VILARRASA, J. O. R. G. E., & GAGO CALDERON, A. L. F. O. N. S. O. (2012). *Iluminación con tecnología LED*. Ediciones Paraninfo, SA.

Hernández Labañino, R. (2011). *Accionamiento eléctrico a través de un rectificador monofásico semicontrolado, para el simulador de desgaste CMT 2070-1* (Doctoral dissertation, Departamento de Eléctrica).

González, É. (2003). *El láser: principios básicos*. Universidad Santo Tomas.

Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.

Zbar, P. B., Malvino, A. P., & Miller, M. A. (2003). *Prácticas de electrónica*. Marcombo.

Cappelletti, M. A., & Cédola, A. P. (2007). Análisis de la respuesta espectral y de la corriente oscura de fotodiodos sometidos a radiación espacial. In *XV Jornadas de Jóvenes Investigadores de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo (Paraguay, 24 al 26 de octubre de 2007)*.

Martínez-Cuaspué, A. C., & Narváez Fuertes, E. (2014). Diseño e implementación de filtros de microondas reconfigurables en frecuencia central y ancho de banda.

Madrid, G. V., & Izquierdo, M. A. Z. (2003). CIRCUITOS CON DIODOS.

Silva García, J. F. (1998). *Autoevaluación y comprobación de calidad de aprendizaje en electrónica* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Boylestad, R. L., Nashelsky, L., Barraza, C. M., & Fernández, A. S. (2018). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (Vol. 8). PEARSON educación.

Sanchez-Aniorte, M. I. (2012). *Microprocesos láser para la mejora de dispositivos fotovoltaicos basados en silicio cristalino* (Doctoral dissertation, Industriales).

Fontal, B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi, F., Contreras, R., & Romero, I. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. *Escuela de la Ingeniería*, 1, 24.

Mediavilla-Sánchez, A. (2011). *Contribución al estudio de osciladores microondas en régimen de gran señal*. Universidad de Cantabria.

Cruz-Villachica, M. Á. (2017). *El SCR y sus aplicaciones* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN Enrique Guzmán y Valle).

Acosta-Rico, M y Gaviria-Vargas, J. (2011). ImPAR® : Implementación de un prototipo para automatización de riegos. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10785/115>

Robredo, G. A. R. (2014). *Electrónica básica para ingenieros* (Vol. 45). Ed. Universidad de Cantabria.

Herrero, J. M. (2005). Diseño, fabricación y caracterización de diodos laser basados en pozos cuanticos de InGaAs . *Universidad Politecnica de Madrid* , 50-60.

Varela, E. B. (2015). Utilización de celdas solares de tercera generación para alimentar dispositivos electrónicos portátiles de consumo masivo. *Tecnologico de Costa Rica* , <https://hdl.handle.net/2238/3021>.

## UNIDAD 3. Transistores de unión bipolar BJT

### 3.1 Estructura de un BJT

Los Transistores de Unión Bipolar (BJT) son dispositivos semiconductores de estado sólido que constan de tres terminales denominados emisor, base y colector. Estos dispositivos se fabrican sobre un monocristal de material semiconductor, como el silicio, el germanio o el arseniuro de galio. (Izquierdo, 2017)

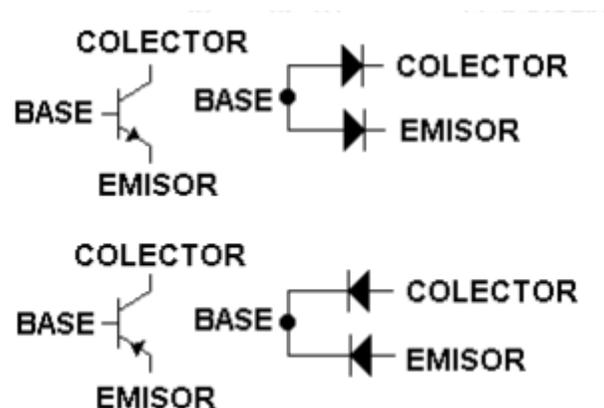
El transistor es un semiconductor utilizado como amplificador e interruptor en el que una pequeña corriente (BJT) o tensión (FET) en uno de los terminales controla o modula la corriente entre los otros dos terminales. (Izquierdo, 2017)

Existen dos grandes familias, los transistores de unión bipolar (**BJT**) y de efecto de campo (**FET**). Ambos tipos de transistores se pueden utilizar como amplificadores y como conmutadores. Es el componente fundamental de la electrónica analógica moderna. En circuitos analógicos fundamentalmente como amplificadores y en circuitos digitales (puertas lógicas, memorias RAM, microprocesadores, etc) como interruptores. (Izquierdo, 2017)

#### 3.1.1 Terminales

Como ya se mencionó anteriormente los transistores cuentan con 3 terminales de conexión (emisor, base, colector). Lo que lo vuelve el equivalente a dos diodos unidos en sentido opuesto, en función del tipo de unión existen dos tipos (NPN y PNP). La unión Base-Emisor se polariza de forma directa y la unión Base-Collector de forma inversa (Véase la figura.1).

Figura. 3.1.1.1 Tipos de unión.



El emisor emite portadores de carga hacia la base (con menor concentración), donde se gobiernan los portadores hacia el colector. El colector recoge los portadores que no puede acaparar la base (la mayoría). (Izquierdo, 2017)

### 3.1.3 Características del transistor de unión bipolar

El transistor al tener tres terminales de conexión existe tres formas de conectarlo. Cada método de conexión responde de manera diferente a las señales de entrada dentro de un circuito. [30]

- **La Configuración de emisor común:** tiene ganancia de tensión y de corriente.
- **La configuración de colector común:** no tiene ganancia de tensión, pero sí de corriente.
- **La configuración de base común:** no tiene ganancia de corriente, pero sí de tensión. [30]

Las características de los diferentes tipos de conexiones se muestran en la siguiente tabla.

Características	Base común	Emisor común	Colector común
Ganancia de potencia	Baja	Muy alta	Media
Ganancia de corriente	Baja	Media	Alta
Ganancia de voltaje	Alta	Media	Baja
Angulo de fase	0	180	0
Impedancia de salida	Muy alta	Alta	Baja
Impedancia de entrada	Baja	Media	Alta

Tabla 3.1.3.1 Características de conexión

### 3.1.4 Funcionamiento del transistor BJT

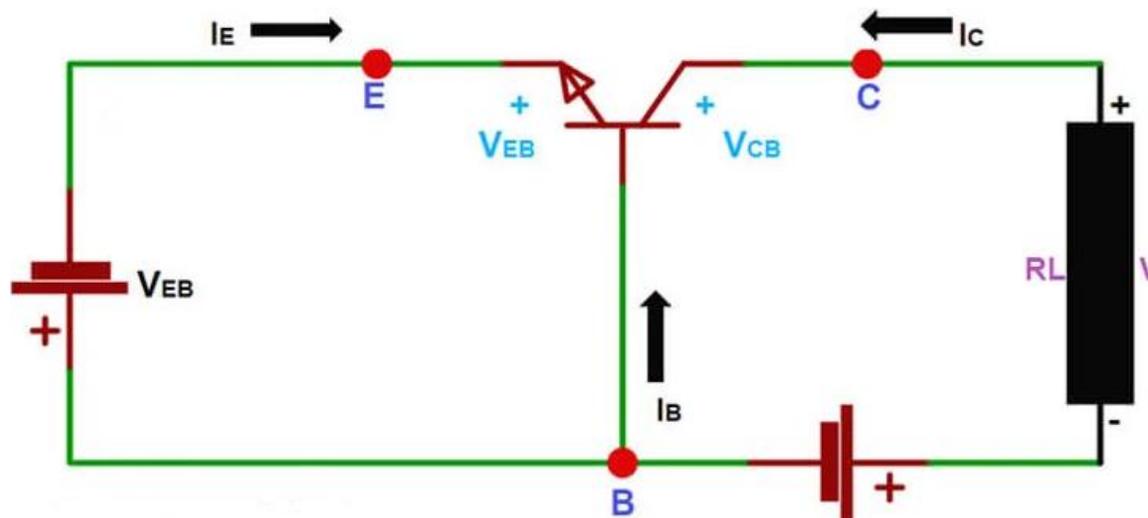
El funcionamiento del transistor BJT comienza desde el pin Base. Cuando se aplica una tensión al pin Base en el transistor NPN, se pone en ON el transistor y como resultado, la corriente comienza a fluir desde el terminal Colector al Emisor. [30]

Esta corriente se conoce como corriente colector y se denota por  $I_c$ . Como se trata de un transistor NPN, aquí la unión Colector-Base tiene polarización inversa y la unión Base-Emisor tiene polarización directa. [30]

La anchura de la región de agotamiento en la unión Colector-Base es mayor, en comparación con la anchura de la región de agotamiento de la unión Base-Emisor.

El potencial de barrera disminuye en la unión  $B - E$  que está en polarización directa, y como resultado, los electrones se moverán del Emisor a la región Base. La región Base está ligeramente dopada y es muy fina, por lo que se esfuerza por mantener el número de electrones durante el máximo tiempo posible (véase figura 1). (Boylestad, 2001)

Figura 3.1.4.1. Funcionamiento del transistor BJT



Obtenido de: <https://www.um.es/documents/4874468/11689381/tema6.transistores.pdf>

Estos electrones se combinarán con los huecos presentes en la región de la Base y comenzarán a fluir fuera de la región Base en forma de corriente base. (Boylestad, 2001)

Un gran número de electrones sobrantes en la región de la base que no se combinan con los huecos, comienzan a entrar en el lado del colector, en forma de corriente colector. (Boylestad, 2001)

Según la ley de corriente de Kirchoff, la corriente del emisor es la combinación de la corriente del colector y la corriente de la base. (Boylestad, 2001)

$$I_E = I_B + I_C$$

Este es el funcionamiento de los transistores NPN. Los transistores PNP funcionan de la misma manera, pero aquí la dirección de la corriente y las polaridades de la tensión se invierten. (Boylestad, 2001)

### 3.1.5 Aplicaciones del transistor BJT

#### Amplificadores de audio

Los amplificadores de audio utilizan el BJT para amplificar señales de sonido. La corriente de base controla la corriente de colector-emisor, lo que permite amplificar la señal de entrada y mejorar su calidad y potencia. (Boylestad, 2001)

## **Electrónica de potencia**

El BJT se utiliza en la electrónica de potencia para controlar la corriente y el voltaje en circuitos de alta potencia, como en la regulación de la energía eléctrica en sistemas de alimentación. (Boylestad, 2001)

## **Conmutación de señales**

El BJT se utiliza para conmutar señales de corriente o voltaje en circuitos electrónicos, como en interruptores y relés. (Boylestad, 2001)

## **Circuitos integrados**

El BJT se utiliza en la fabricación de circuitos integrados, donde se combinan múltiples transistores en un solo chip para crear circuitos más complejos y eficientes. (Boylestad, 2001)

## **Comunicaciones**

El BJT se utiliza en sistemas de comunicaciones, como en radios y televisores, para amplificar y sintonizar señales de radiofrecuencia. (Boylestad, 2001)

### **3.1.6 Tipos de BJT**

Tipos de BJT según su estructura de base:

**BJT de base estrecha:** En este tipo de BJT, la región de base es muy estrecha en comparación con las regiones de emisor y colector. Esto permite una alta ganancia de corriente, pero también hace que el dispositivo sea más propenso a la ruptura. Este tipo de BJT se utiliza en circuitos de alta frecuencia y amplificadores de bajo ruido. (Boylestad, 2001)

**BJT de base ancha:** En el BJT de base ancha, la región de base es más ancha que en el BJT de base estrecha. Esto reduce la ganancia de corriente, pero aumenta la capacidad del dispositivo para manejar altas corrientes y voltajes. Este tipo de BJT se utiliza en circuitos de potencia y en dispositivos de conmutación. (Boylestad, 2001)

Tipos de BJT según su encapsulado:

**BJT de montaje superficial:** Este tipo de BJT se monta directamente sobre la superficie de una placa de circuito impreso (PCB). Es más pequeño y liviano que el BJT de montaje a través de agujeros, lo que lo hace ideal para dispositivos portátiles y electrónica de consumo. (Boylestad, 2001)

**BJT de montaje a través de agujeros:** En este tipo de BJT, los terminales se insertan en agujeros en la PCB y se sueldan en su lugar desde la parte inferior. Es más robusto y puede manejar corrientes y voltajes más altos que el BJT de montaje superficial, lo que lo hace adecuado para aplicaciones industriales y de alta potencia. (Boylestad, 2001)

### 3.2 Operación básica de un BJT

Implementación del modelo VBIC para la simulación y comprensión del funcionamiento del transistor BJT

El modelo VBIC (Vertical Bipolar Inter-Company) es un modelo de transistor bipolar desarrollado para la simulación de dispositivos bipolares, como transistores de unión bipolar (BJT). Este modelo se basa en el modelo SPICE Gummel-Poon (SGP) con modificaciones y mejoras específicas para la modelización de dispositivos de alta tensión y otros dispositivos especializados. (McAndrew, 2012)

El VBIC se ha convertido en un estándar en la industria para la modelización de transistores bipolares, ya que ofrece una serie de ventajas sobre otros modelos, como una mejor precisión en la predicción del comportamiento del dispositivo, la capacidad de modelar dispositivos de alta tensión de manera más efectiva y la inclusión de características específicas para diferentes tipos de dispositivos bipolares. (McAndrew, 2012)

Según (McAndrew, 2012) realiza el análisis del modelo VBIC para transistores bipolares (BJT), con un enfoque en la versión 1.3 y sus actualizaciones. Se detallan mejoras significativas en la modelización de dispositivos de alta tensión, incluyendo la interacción explícita con parámetros globales del simulador, limitación de la subida local de temperatura, formulación de fase en exceso, entre otros aspectos.

El objetivo principal es mejorar la precisión y eficiencia en la modelización de transistores bipolares, especialmente para dispositivos de alta tensión, a través de las actualizaciones implementadas en la versión 1.3 del modelo VBIC. (McAndrew, 2012)

Destacando sus principales Ventajas:

- **Mejora en la precisión:** Las actualizaciones en VBICv1.3 permiten una modelización más precisa de dispositivos de alta tensión, incluyendo la recopilación de datos de temperatura y la formulación de fase en exceso. (McAndrew, 2012)
- **Interacción con parámetros globales:** La capacidad de interactuar con parámetros globales del simulador, como  $g_{min}$  y  $p_{njmaxi}$ , mejora la adaptabilidad y precisión del modelo. (McAndrew, 2012)
- **Simplificación de la implementación:** La formulación de fase en exceso elimina la necesidad de corrientes inductoras y se puede implementar con fuentes de corriente controladas por voltaje y cargas. (McAndrew, 2012)

Principales Desventajas:

- **Complejidad:** A pesar de las mejoras, la modelización de dispositivos de alta tensión sigue siendo un desafío complejo debido a la naturaleza de los componentes y sus interacciones. (McAndrew, 2012)
- **Requerimientos de Convergencia:** Algunas actualizaciones, como la limitación de la subida local de temperatura, pueden requerir ajustes adicionales para garantizar la convergencia en la simulación. (McAndrew, 2012)

### **Operación de compuertas lógicas (AND,NAND,OR,NOR) utilizando BJT**

El documento analiza el funcionamiento de un circuito que utiliza transistores de unión bipolar (BJT) para operar simultáneamente las compuertas lógicas AND, NAND, OR y NOR con solo dos entradas, con el objetivo de simplificar y reducir el tamaño de los circuitos especiales. El BJT se utiliza como un interruptor para controlar el flujo de corriente en el circuito, permitiendo que el transistor actúe como una compuerta lógica al alternar entre la región de saturación y la región de corte. Esta capacidad del BJT de funcionar como un interruptor es fundamental para el diseño eficiente de circuitos lógicos complejos. (Mallampati, 2019)

Una de las ventajas clave de utilizar BJT en este diseño de circuito es la capacidad de reducir la complejidad y el tamaño del circuito al integrar múltiples compuertas lógicas en un solo circuito. En lugar de utilizar cuatro circuitos integrados separados para cada compuerta lógica, este enfoque innovador permite operar las cuatro compuertas con un solo IC, lo que ahorra espacio y simplifica el diseño. Además, al tener solo seis transistores BJT en el circuito, se logra una mayor eficiencia en términos de recursos y costos de fabricación en comparación con diseños tradicionales que requieren más componentes. (Mallampati, 2019)

Esta investigación no solo ofrece una solución práctica y eficiente para operar múltiples compuertas lógicas con un solo circuito, sino que también abre nuevas posibilidades en el campo de la innovación tecnológica. Al simplificar el diseño de circuitos lógicos y reducir la cantidad de componentes necesarios, este enfoque puede allanar el camino para el desarrollo de circuitos integrados más avanzados y compactos. Además, al demostrar la versatilidad y eficacia del BJT como un componente fundamental en la operación de compuertas lógicas, esta investigación contribuye al avance continuo en el campo de las operaciones de compuertas lógicas y la electrónica digital. (Mallampati, 2019)

### **3.3 Características y parámetros de un BJT**

#### **Cambio de parámetros en relación con la temperatura del BJT**

El estudio sobre los efectos de la temperatura en las características eléctricas de los BJTs revela varios cambios significativos en el comportamiento de estos dispositivos semiconductor. Al aumentar la temperatura, se observa un aumento en la corriente del colector y la ganancia de corriente, mientras que el voltaje umbral disminuye. Además, la capacitancia de difusión de la unión emisor-base del BJT aumenta notablemente con la temperatura. En cuanto al voltaje de umbral de un BJT, se ha demostrado que disminuye de manera lineal con el aumento de la temperatura, lo que se atribuye a la excitación de electrones en la banda de valencia debido al calor, lo que resulta en un aumento de la corriente. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar los efectos térmicos al diseñar y operar circuitos electrónicos con transistores bipolares. (Ibrahim, 2017)

Al aumentar la temperatura, la capacitancia de difusión de la unión emisor-base de un BJT experimenta un aumento significativo. Este fenómeno se debe a la mayor cantidad de portadores de carga térmica generados en la región de la unión emisor-base a temperaturas más altas. La presencia de más portadores de carga aumenta la capacidad de almacenamiento de carga en la unión, lo que se refleja en un aumento en la capacitancia de difusión. Por lo tanto, a medida que la temperatura aumenta, la capacitancia de difusión de la unión emisor-base del BJT aumenta debido a la mayor densidad de portadores de carga térmica presentes en la región de la unión. (Ibrahim, 2017)

#### **Diseño de osciladores BJT de carburo de silicio mediante parámetros S**

El artículo "Silicon Carbide BJT Oscillator Design Using S-Parameters" presenta un enfoque innovador en el diseño de osciladores de radiofrecuencia (RF) de alta temperatura utilizando tecnología de SiC BJT. Se destaca la importancia de los osciladores RF en sistemas inalámbricos de alta temperatura, como en la telemetría de perforación en pozos profundos, motores de turbina y misiones planetarias futuras. Tradicionalmente, se han utilizado MESFETs y JFETs de SiC en el diseño de osciladores de alta temperatura, pero este estudio propone un enfoque basado en parámetros S que simplifica el proceso de diseño al evitar modelos de simulación complejos y ajustes de parámetros. (Elahipanah, 2019)

La metodología de diseño propuesta se basa en modelos de pequeña señal de parámetros S, lo que permite diseñar un oscilador de 58 MHz de alta temperatura utilizando un SiC BJT de 4H-SiC. Se destaca la imagen óptica del BJT y su disposición en un sustrato de SiC de 4 pulgadas, junto con detalles sobre los componentes pasivos utilizados en el circuito del oscilador. Se seleccionan inductores y capacitores específicos para garantizar la estabilidad del oscilador a temperaturas de hasta 300 °C, demostrando la viabilidad de esta metodología de diseño sin la necesidad de dividir el transistor en obleas. (Elahipanah, 2019)

Además, se presentan los resultados de rendimiento del circuito diseñado, incluida la potencia de salida, la eficiencia de conversión de CC a RF y la frecuencia central del oscilador en diferentes temperaturas. Se destaca la capacidad de mantener condiciones de inicio satisfactorias hasta 300 °C, lo que demuestra la robustez y eficacia del diseño propuesto. En resumen, este estudio resalta el potencial de la tecnología de SiC BJT y la metodología de diseño basada en parámetros S para el desarrollo de osciladores RF de alta temperatura, abordando los desafíos asociados con las temperaturas extremas y ofreciendo una alternativa eficiente a los enfoques convencionales de diseño de osciladores. (Elahipanah, 2019)

### **3.4 Aplicaciones**

#### **3.4.1 El BJT como amplificador**

El transistor bipolar de unión (BJT) es un componente semiconductor versátil ampliamente utilizado en electrónica, con aplicaciones que van desde la conmutación hasta la amplificación de señales. Entre sus configuraciones más comunes, destaca el modo de emisor común, especialmente eficaz como amplificador. En esta configuración, la señal de entrada se aplica entre la base y el emisor, mientras que la señal amplificada se obtiene entre el colector y el emisor. Este diseño permite una amplificación efectiva de señales débiles, manteniendo la forma de onda original. (Bustamante, 2021)

Los modos de operación de un BJT (Bipolar Junction Transistor) son tres:

1. **Corte (Cut-off):** En este modo, tanto el transistor NPN como PNP están en estado de corte cuando no hay corriente de base presente y, por lo tanto, no hay corriente de colector. En este estado, el transistor no conduce corriente entre el colector y el emisor. (Bustamante, 2021)

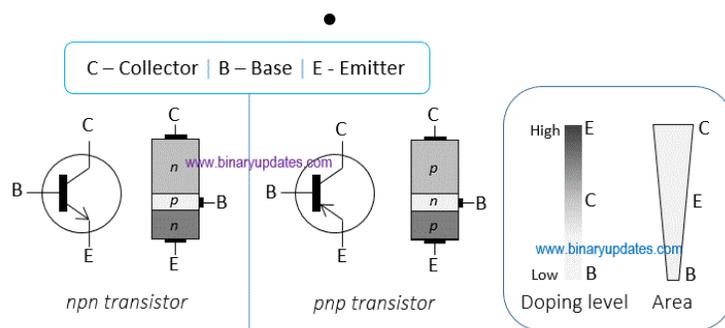
2. **Activo (Active):** En el modo activo, el transistor BJT está conduciendo corriente entre el colector y el emisor. Se logra aplicando una corriente de base adecuada para permitir que la corriente fluya desde el colector hacia el emisor en un NPN, o desde el emisor hacia el colector en un PNP. (Bustamante, 2021)

3. **Saturación (Saturación):** En la saturación, el transistor BJT está completamente encendido y la corriente de colector está en su máximo nivel. En este estado, el transistor actúa como un interruptor cerrado, permitiendo que la corriente fluya libremente entre el colector y el emisor en un NPN, o desde el emisor hacia el colector en un PNP. (Bustamante, 2021)

Alguna de las ventajas del transistor BJT (Bipolar Junction Transistor) como amplificador son:

- **Banda ancha de frecuencia:** Los BJT tienen una respuesta de frecuencia relativamente amplia, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren amplificación de señales a diferentes frecuencias. (Bustamante, 2021)
- **Facilidad de control:** Los BJT son fáciles de controlar mediante corrientes de base, lo que permite ajustar la ganancia de amplificación según sea necesario. (Bustamante, 2021)
- **Compatibilidad con señales analógicas:** Los BJT son adecuados para amplificar señales analógicas, lo que los hace útiles en una amplia gama de aplicaciones de audio y comunicaciones. (Bustamante, 2021)
- **Robustez y fiabilidad:** Los BJT son dispositivos robustos y confiables en comparación con otros dispositivos de amplificación, lo que los hace populares en muchas aplicaciones industriales y comerciales. (Bustamante, 2021)

Figura 3.4.1.1. Transistor BJT



- Fuente: [www.binaryupdates.com](http://www.binaryupdates.com)

### 3.4.1.2 Características clave

Según (Floyd, 2008) demuestra que las características clave del amplificador BJT de emisor común con los cálculos teóricos, son las siguientes:

- **Corriente del emisor (emitter current):** Se mide la corriente del emisor del BJT para evaluar su comportamiento en la simulación y se compara con el valor teórico calculado. (Floyd, 2008)
- **Ganancia de voltaje (voltage gain):** Se analiza la ganancia de voltaje del amplificador para determinar cuánto amplifica la señal de entrada y se compara con el valor teórico esperado. (Floyd, 2008)
- **Impedancia de entrada (input impedance):** Se mide la impedancia de entrada del amplificador para evaluar cómo afecta a la señal de entrada y se compara con el cálculo teórico. (Floyd, 2008)
- **Impedancia de salida (output impedance):** Se analiza la impedancia de salida del amplificador para determinar cómo afecta a la carga conectada y se compara con el valor teórico calculado. (Floyd, 2008)

Estas características son fundamentales para comprender el rendimiento y la eficacia del amplificador BJT de emisor común de una etapa, y la comparación con los cálculos teóricos ayuda a validar la precisión de la simulación en LTSpice con base en el estudio realizado por. (Floyd, 2008)

### 3.4.1.3 Materiales de fabricación

En la fabricación de BJT (Bipolar Junction Transistors), se utilizan materiales semiconductores y dopantes para crear las regiones de tipo p y n necesarias para el funcionamiento del transistor. Algunos de los materiales comunes utilizados en la fabricación de BJT son:

**Silicio (Si):** El silicio es el material semiconductor más comúnmente utilizado en la fabricación de transistores bipolares debido a sus propiedades semiconductoras y su disponibilidad en la industria de semiconductores. (Floyd, 2008)

**Arsénico (As):** El arsénico se utiliza como dopante para introducir portadores de carga negativa (electrones) en regiones de tipo p en el silicio, creando la región de tipo n necesaria para la operación del BJT. (Floyd, 2008)

**Boro (B):** El boro se utiliza como dopante para introducir portadores de carga positiva (huecos) en regiones de tipo n en el silicio, creando la región de tipo p necesaria para el funcionamiento del transistor. (Floyd, 2008)

**Fósforo (P):** El fósforo también se utiliza como dopante para crear regiones de tipo n en el silicio, permitiendo la formación de las uniones p-n esenciales en el BJT. (Floyd, 2008)

Estos materiales y dopantes se utilizan en combinación durante el proceso de fabricación para crear las capas semiconductoras y las uniones p-n necesarias para el funcionamiento adecuado de los transistores bipolares. (Floyd, 2008)

#### 3.4.1.4 Aplicaciones del transistor BJT

Los transistores bipolares de unión (BJT) se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones en electrónica debido a sus características de amplificación y conmutación. Algunas de las aplicaciones comunes del BJT incluyen:

- **Amplificadores de señal:** Los BJT se utilizan en circuitos amplificadores para aumentar la amplitud de señales eléctricas, como en amplificadores de audio y amplificadores de RF. (Peñaranda, 2017)
- **Fuentes de corriente constante:** Los BJT se pueden configurar para proporcionar una corriente constante independientemente de las variaciones en la carga o la tensión de alimentación, lo que los hace útiles en circuitos de referencia de corriente. (Peñaranda, 2017)
- **Conmutación de señales:** Los BJT se utilizan en circuitos de conmutación para controlar el flujo de corriente en respuesta a señales de control, como en interruptores electrónicos y circuitos de temporización. (Peñaranda, 2017)
- **Osciladores:** Los BJT se utilizan en la construcción de osciladores para generar señales periódicas, como en osciladores de onda sinusoidal, cuadrada o de pulso.
- **Amplificadores de potencia:** Los BJT se utilizan en amplificadores de potencia para amplificar señales de alta potencia, como en sistemas de audio de alta potencia y amplificadores de RF de alta potencia. (Peñaranda, 2017)
- **Reguladores de voltaje lineales:** Los BJT se utilizan en circuitos reguladores de voltaje lineales para mantener una tensión de salida constante independientemente de las variaciones en la carga o la tensión de entrada. (Peñaranda, 2017)

Estas son solo algunas de las muchas aplicaciones en las que se utilizan los transistores bipolares de unión (BJT) debido a su versatilidad y capacidad para amplificar y controlar señales eléctricas en una amplia gama de circuitos electrónicos. (Peñaranda, 2017)

#### 3.4.1.5 Amplificadores en cascada utilizando BJT

Los amplificadores en cascada, también conocidos como amplificadores cascode, son configuraciones de amplificación en las que se conectan varios amplificadores en serie, de modo que la salida de uno se convierte en la entrada del siguiente. Estas configuraciones ofrecen varias características y aplicaciones importantes:

#### Características:

1. **Alta ganancia:** Debido a la conexión en serie de varios amplificadores, los amplificadores en cascada pueden lograr una ganancia total mayor que la de un solo amplificador. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
2. **Ancho de banda amplio:** La estructura en cascada puede ayudar a mejorar el ancho de banda del sistema, lo que es beneficioso para aplicaciones de alta frecuencia. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
3. **Baja impedancia de salida:** Al utilizar etapas de amplificación en cascada, se puede lograr una baja impedancia de salida, lo que facilita la conexión con cargas externas. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
4. **Buena linealidad:** La configuración en cascada puede mejorar la linealidad del sistema, lo que es importante en muchas aplicaciones de amplificación. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)

#### Aplicaciones:

1. **Amplificación de señales de radiofrecuencia (RF):** Los amplificadores en cascada son comúnmente utilizados en aplicaciones de RF debido a su alta ganancia y ancho de banda. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
2. **Amplificación de señales de audio:** En sistemas de audio de alta calidad, los amplificadores en cascada pueden utilizarse para amplificar señales de audio con baja distorsión. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
3. **Amplificación de señales de instrumentación:** En aplicaciones donde se requiere una alta precisión en la amplificación de señales de bajo nivel, los amplificadores en cascada pueden ser útiles. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
4. **Amplificación de señales de alta frecuencia:** En sistemas de comunicación y transmisión de datos, los amplificadores en cascada son útiles para amplificar señales de alta frecuencia de manera eficiente. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)

Los amplificadores en cascada son configuraciones versátiles y potentes que se utilizan en una variedad de aplicaciones donde se requiere alta ganancia, ancho de banda amplio y baja impedancia de salida. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)

Por otra parte, las configuraciones disponibles para la configuración en cascada de los transistores son las siguientes:

- **Configuración BJT-BJT (Bipolar Junction Transistor - Bipolar Junction Transistor):** En esta configuración, se utilizan transistores bipolares en serie para formar el amplificador en cascada. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
- **Configuración FET-BJT (Field-Effect Transistor - Bipolar Junction Transistor):** En esta configuración, se combina un transistor de efecto de campo (FET) con un transistor bipolar para crear el amplificador en cascada. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
- **Configuración FET-FET (Field-Effect Transistor - Field-Effect Transistor):** En esta configuración, se utilizan transistores de efecto de campo en serie para formar el amplificador en cascada. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)

Cada una de las configuraciones disponibles tiene propiedades únicas que pueden adaptarse a diversas aplicaciones según las necesidades de ganancia, ancho de banda y linealidad del sistema.

Sin embargo, este presenta ciertas limitaciones de respuesta a alta frecuencia del amplificador en cascada BJT-BJT son los siguientes:

- **Impedancia de fuente o impedancia de salida de la etapa anterior:** Esta limitación está relacionada con la impedancia que la etapa anterior presenta a la entrada del amplificador en cascada. Una alta impedancia de fuente puede limitar la respuesta en alta frecuencia del amplificador. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
- **Impedancia de salida o carga del amplificador:** La impedancia de salida del amplificador en cascada y la carga conectada a su salida también pueden limitar la respuesta en alta frecuencia. Una alta impedancia de salida o una carga pesada pueden afectar la respuesta del amplificador a frecuencias altas. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)
- **Corriente de polarización en continua del amplificador:** La corriente de polarización en continua del amplificador, que determina la capacitancia de difusión de la unión base-emisor, es un factor crucial que limita la respuesta en alta frecuencia del amplificador en cascada BJT-BJT. Un aumento en la corriente de polarización puede afectar negativamente la respuesta en alta frecuencia del amplificador. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)

Estos factores son importantes consideraciones al diseñar y analizar amplificadores en cascada BJT-BJT, ya que influyen en su rendimiento en frecuencias altas y en la optimización de su respuesta en alta frecuencia. (Mohammad Nizam Ibrahim, 2016)

### 3.4.2 El BJT como interruptor

El transistor BJT se utiliza en este circuito como un interruptor para controlar la corriente fotónica proveniente del fotodiodo integrado en el chip. En el estado de apagado del circuito, el transistor opera en la región de corte, lo que significa que la corriente de base es baja y el transistor está en estado de no conducción. En contraste, en el estado de encendido del circuito, el transistor opera en la región de saturación, donde la corriente de base es lo suficientemente alta para que el transistor esté completamente activado y conduzca corriente de manera eficiente 1. Esta configuración permite controlar la corriente proveniente del fotodiodo mediante la variación de la corriente de base del transistor, actuando, así como un interruptor para la corriente fotónica. (Hou, 2018)

El transistor BJT utilizado como interruptor en este circuito presenta varias cualidades importantes:

- **Región de Corte:** En el estado de apagado del interruptor, el BJT opera en la región de corte, donde la corriente de base es baja y el transistor está en estado de no conducción. Esto permite que la corriente fotónica del fotodiodo sea interrumpida eficazmente 3. (Hou, 2018)
- **Región de Saturación:** En el estado de encendido del interruptor, el BJT opera en la región de saturación, donde la corriente de base es lo suficientemente alta para que el transistor conduzca corriente de manera eficiente. Esto permite que la corriente fotónica del fotodiodo sea transmitida a través del circuito 3. (Hou, 2018)
- **Control de Corriente:** Al variar la corriente de base del BJT, se puede controlar la conmutación de la corriente fotónica del fotodiodo, actuando como un interruptor para regular el flujo de corriente en el circuito 3. (Hou, 2018)

El dispositivo BJT como interruptor son fundamentales para el funcionamiento efectivo del circuito integrado de fotodiodo UV según. (Hou, 2018)

Una de las características importantes para supervisar en la aplicación de transistores BJT como interruptores es la tensión de transferencia, la cual debe mantenerse constante, aunque el incremento de temperatura sea la perturbación del sistema, en este caso, la tensión de transferencia del circuito disminuye a medida que la temperatura ambiente aumenta, con una variación de aproximadamente 2 mV por grado Celsius. Tanto la corriente en estado de encendido como la corriente en estado de apagado del circuito presentan un coeficiente de temperatura positivo. Además, se menciona que el circuito tiene un ratio de encendido/apagado mayor a 80 en un rango de temperatura que va desde 25 °C hasta 400 °C. (Hou, 2018)

### 3.4.2.1 Analisis de fiabilidad del transistor BJT.

Los transistores BJT son dispositivos electrónicos confiables y ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones. La fiabilidad de un transistor BJT depende de varios factores, incluyendo la calidad de fabricación, las condiciones de operación, el diseño del circuito y la gestión térmica. En general, los transistores BJT son conocidos por su robustez y durabilidad en muchas aplicaciones. (Sundaresan, 2016)

Algunos aspectos que contribuyen a la fiabilidad de los transistores BJT incluyen:

- **Calidad de fabricación:** Los transistores BJT de alta calidad fabricados por empresas confiables suelen tener una mayor fiabilidad y vida útil. (Sundaresan, 2016)
- **Condiciones de operación:** Es importante operar los transistores BJT dentro de sus especificaciones de voltaje, corriente y temperatura para garantizar su fiabilidad a largo plazo. (Sundaresan, 2016)
- **Diseño del circuito:** Un diseño adecuado del circuito, que incluya protecciones contra sobretensiones, sobrecorriente y sobrecalentamiento, puede mejorar la fiabilidad de los transistores BJT. (Sundaresan, 2016)
- **Gestión térmica:** Mantener los transistores BJT dentro de los límites de temperatura especificados y proporcionar una adecuada disipación de calor contribuye a su fiabilidad. (Sundaresan, 2016)

En el caso específico de los transistores BJT de SiC de 10 kV mencionados en el documento, se destaca su estabilidad en condiciones de alta tensión y temperatura, así como la baja corriente de fuga medida incluso después de largos períodos de operación. Estos resultados sugieren que estos transistores BJT de SiC de alta potencia son dispositivos fiables para aplicaciones en electrónica de potencia de media y alta tensión. (Sundaresan, 2016)

### 3.5 El fototransistor

Un fototransistor es un dispositivo electrónico que combina un transistor con una célula fotoeléctrica para detectar y amplificar la luz. Es una variante del transistor convencional que utiliza la luz en lugar de una señal eléctrica para activar la base del transistor. (Gu, (2015))

El principio de funcionamiento de un fototransistor se basa en el efecto fotoeléctrico, que es la liberación de electrones en un material cuando se expone a la luz. En un fototransistor, la luz incide sobre la base del transistor y genera electrones que fluyen a través de la base-emisor, lo que aumenta la corriente en el circuito. (Gu, (2015))

El fototransistor tiene tres terminales: colector, base y emisor. La luz incide sobre la base, lo que produce una corriente de base que activa el transistor. Esta corriente de base se amplifica y se convierte en una corriente de colector-emisor, que puede ser utilizada para controlar otros componentes electrónicos. (Gu, (2015))

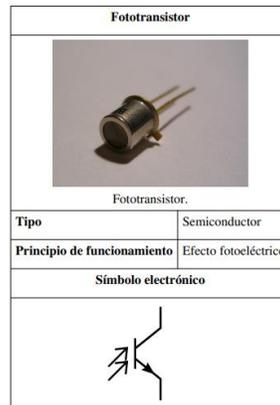


Figura 3.5.1 Simbología del fototransistor

### 3.5.1 Aplicaciones

Los fototransistores son dispositivos semiconductores que combinan las funciones de un fotodiodo y un transistor, lo que les permite detectar luz y amplificar la señal resultante. Algunas de las aplicaciones comunes de los fototransistores incluyen: (Gu, (2015))

- **Sensores de luz:** Los fototransistores se utilizan ampliamente en aplicaciones de detección de luz, como en fotocélulas para controlar la iluminación en respuesta a la luz ambiental. (Gu, (2015))
- **Comunicaciones ópticas:** En sistemas de comunicaciones ópticas, los fototransistores se utilizan para detectar señales ópticas y convertirlas en señales eléctricas para su procesamiento. (Gu, (2015))
- **Control remoto:** En los controles remotos infrarrojos, los fototransistores se utilizan para detectar la luz infrarroja emitida por el control remoto y convertirla en señales eléctricas para controlar dispositivos electrónicos. (Gu, (2015))
- **Fotodetectores:** Los fototransistores se utilizan como fotodetectores en equipos de medición y sistemas de seguridad para detectar la presencia de luz o cambios en la intensidad lumínica. (Yin, 2012)
- **Automatización industrial:** En entornos industriales, los fototransistores se utilizan en sistemas de automatización para detectar la presencia o ausencia de objetos basados en la detección de luz. (Yin, 2012)

### 3.5.2 Ventajas del uso de fototransistores

El uso de fototransistores en aplicaciones electrónicas ofrece varias ventajas significativas, entre las cuales se destacan:

- **Aislamiento eléctrico:** Los fototransistores proporcionan un aislamiento eléctrico efectivo entre la entrada óptica y la salida eléctrica. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere separar circuitos de alta potencia o donde se necesita protección contra interferencias electromagnéticas. (Vega, 2001)
- **Alta sensibilidad:** Los fototransistores son altamente sensibles a la luz, lo que les permite detectar incluso niveles bajos de intensidad lumínica. Esto los hace ideales para aplicaciones de detección de luz o señales ópticas débiles. (Vega, 2001)
- **Velocidad de respuesta:** Los fototransistores tienen tiempos de respuesta rápidos, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren una detección rápida de cambios en la intensidad lumínica. (Vega, 2001)
- **Bajo consumo de energía:** En comparación con otros dispositivos optoelectrónicos, los fototransistores tienden a tener un consumo de energía más bajo, lo que los hace eficientes en términos de consumo energético. (Vega, 2001)
- **Facilidad de integración:** Los fototransistores son dispositivos compactos y fáciles de integrar en circuitos electrónicos, lo que facilita su uso en una variedad de aplicaciones. (Vega, 2001)

### 3.5.3 Uso de transistores en conjunto con los fototransistores

El uso de transistores en conjunto con fototransistores es de gran importancia en aplicaciones donde se requiere la detección de luz o señales ópticas. Algunas de las razones clave para utilizar transistores junto con fototransistores son: (Serenó, 1993)

- **Amplificación de señales:** Los transistores BJT pueden amplificar las señales débiles generadas por los fototransistores, lo que permite un procesamiento más eficiente de la información óptica captada. (Serenó, 1993)
- **Aislamiento eléctrico:** Los fototransistores, al ser dispositivos optoelectrónicos, permiten el aislamiento eléctrico entre dos partes de un circuito. Al utilizar transistores en conjunto, se puede controlar la amplificación de la señal óptica sin comprometer el aislamiento eléctrico.
- **Conmutación de señales:** Los fototransistores pueden utilizarse para detectar la presencia o ausencia de luz, actuando como interruptores ópticos. Al combinarlos con transistores, se pueden diseñar circuitos que respondan a cambios en la intensidad lumínica para activar o desactivar otros componentes del circuito. (Serenó, 1993)

La combinación de transistores con fototransistores permite diseñar circuitos más complejos y versátiles que pueden detectar, amplificar y procesar señales ópticas de manera eficiente y segura. (Serenó, 1993)

### **3.5.4 Parámetros característicos del fototransistor**

Los parámetros característicos del fototransistor que se analizan en el documento son:

1. **Sensibilidad espectral:** Es la respuesta relativa del dispositivo a distintas longitudes de onda de luz. Cada fototransistor presenta una mayor sensibilidad a una longitud de onda específica, lo que influye en su respuesta y rendimiento. (Jimenez, 2008)
2. **Corriente de colector (IC):** Es la corriente que circula por el colector del fototransistor en función de la iluminación recibida. Se observa que la corriente de colector aumenta con la intensidad de luz incidente. (Jimenez, 2008)
3. **Tensión colector-emisor (VCE):** Es la tensión entre el colector y el emisor del fototransistor. Se analiza cómo varía esta tensión en función de la corriente de colector y la iluminación. (Jimenez, 2008)

### **3.5.5 La importancia de la experimentación en el diseño de circuitos electrónicos**

La experimentación desempeña un papel crucial en el análisis y diseño de circuitos electrónicos por varias razones fundamentales:

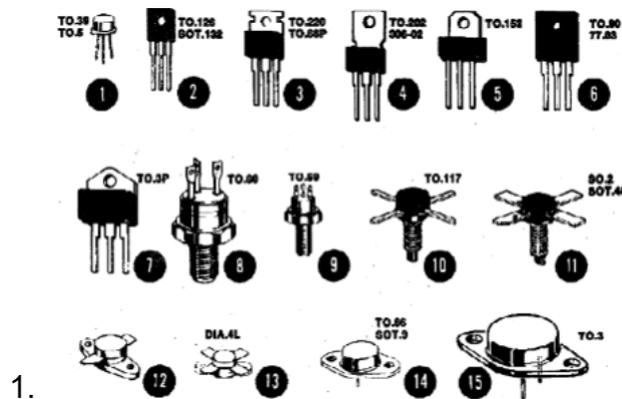
- **Validación de teorías y modelos:** Permite contrastar la teoría con la práctica, verificando si los modelos y cálculos teóricos se corresponden con el comportamiento real de los componentes y circuitos. (Jimenez, 2008)
- **Optimización y ajuste:** A través de la experimentación, es posible ajustar y optimizar los parámetros de un circuito para que cumpla con las especificaciones deseadas, permitiendo realizar mejoras y correcciones. (Jimenez, 2008)
- **Identificación de problemas:** La experimentación revela posibles fallos, errores de diseño o comportamientos inesperados en los circuitos, lo que facilita la identificación y corrección de problemas. (Jimenez, 2008)
- **Entendimiento profundo:** Permite un entendimiento más profundo y práctico de los principios y fenómenos eléctricos, electrónicos y de los componentes utilizados en los circuitos. (Jimenez, 2008)

### 3.6 Categorías y encapsulado de transistores

Los encapsulados disponibles actualmente para transistores de nitruro de galio, existen varios tipos comunes en el mercado. Algunos de los encapsulados utilizados para dispositivos GaN incluyen: (Madrid, 2012)

- Encapsulado SMD (Surface Mount Device): Este tipo de encapsulado se monta directamente en la superficie de la placa de circuito impreso, lo que facilita su integración en diseños compactos y de alta densidad. (Madrid, 2012)
- Encapsulado TO (Transistor Outline): Los encapsulados TO son comunes en dispositivos de potencia y proporcionan una buena disipación de calor. (Madrid, 2012)
- Encapsulado LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor): Este tipo de encapsulado se utiliza en aplicaciones de alta potencia y frecuencia. (Madrid, 2012)
- Encapsulado QFN (Quad Flat No-leads): Los encapsulados QFN son populares en aplicaciones de RF y microondas debido a su buen rendimiento térmico y eléctrico. (Madrid, 2012)

Figura 3.6.1 Tipos de encapsulado



Obtenido de: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/2748/pfc4289.pdf>

Cada uno de los encapsulados presentan sus características específicas que pueden contribuir en la elección correcta del encapsulado según la aplicación a la que se desea emplear. (Madrid, 2012)

- Encapsulado SMD (Surface Mount Device):
  - Montaje superficial directamente en la placa de circuito impreso.
  - Diseño compacto y de alta densidad.
  - Facilita la automatización del montaje.
  - Ampliamente utilizado en aplicaciones de RF y microondas.
- Encapsulado TO (Transistor Outline):
  - Proporciona una buena disipación de calor.
  - Adecuado para dispositivos de potencia.
  - Variedad de tamaños y configuraciones disponibles.
  - Robusto y confiable en entornos exigentes.
- Encapsulado LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor):
  - Diseñado para aplicaciones de alta potencia y frecuencia.
  - Buen rendimiento térmico y eléctrico.
  - Ampliamente utilizado en amplificadores de potencia y transceptores de RF.
- Encapsulado QFN (Quad Flat No-leads):
  - Sin pines de conexión en los lados, lo que permite un diseño compacto.
  - Buena disipación de calor.
  - Baja inductancia parasitaria.
  - Adecuado para aplicaciones de alta frecuencia y potencia. (Madrid, 2012)

Estos son solo algunos ejemplos de los encapsulados disponibles para transistores de nitruro de galio, y la elección del encapsulado adecuado dependerá de los requisitos específicos de la aplicación en la que se utilice el dispositivo. (Madrid, 2012)

### **3.6.1 Importancia del encapsulado**

La selección de un encapsulado adecuado para un transistor es de vital importancia en el diseño de circuitos electrónicos, especialmente en dispositivos de potencia y alta frecuencia. Algunas razones clave para elegir un encapsulado adecuado son:

1. Disipación de calor: Los encapsulados juegan un papel crucial en la disipación de calor generada por el transistor durante su funcionamiento. Un encapsulado inadecuado puede resultar en un aumento de la temperatura del dispositivo, lo que puede afectar su rendimiento y vida útil. (Zhao, 2022)
2. Protección mecánica: El encapsulado proporciona protección mecánica al transistor, evitando daños físicos y protegiendo los componentes internos de factores ambientales adversos como la humedad, la suciedad y los impactos mecánicos. (Zhao, 2022)

3. Compatibilidad eléctrica: El encapsulado debe ser compatible eléctricamente con el circuito en el que se integrará el transistor. Esto incluye consideraciones como la impedancia, la capacitancia parasitaria y la inductancia del encapsulado, que pueden afectar el rendimiento del circuito. (Zhao, 2022)
4. Facilidad de montaje: Un encapsulado adecuado facilita el montaje del transistor en la placa de circuito impreso, lo que puede reducir los tiempos de producción y los costos asociados. (Zhao, 2022)
5. Compatibilidad con el entorno de aplicación: Dependiendo de la aplicación específica, se deben considerar factores como la resistencia a la corrosión, la estabilidad térmica, la protección contra la radiación, entre otros, al seleccionar un encapsulado para el transistor. (Zhao, 2022)

Figura 3.6.1.1. Aplicaciones del transistor



Obtenido de: <https://www.videorockola.com/proyectos-electronicos/amplificadoresaudiopotencia>

### 3.6.2 Nuevos encapsulados

Capsula de hidrogel como nuevo material para el encapsulamiento de nuevos transistores, según (L.M Dumitru, 2015) menciona que El alginato es un polisacárido natural derivado de algas marinas que se ha utilizado en diversas aplicaciones biomédicas y biotecnológicas debido a su biocompatibilidad y capacidad para formar geles.

En este caso, la cápsula de alginato actúa como un sistema de electrolito biocompatible y biodegradable que permite el funcionamiento de los transistores orgánicos de efecto de campo a voltajes bajos y también puede servir como sistema de entrega para moléculas biológicas. (L.M Dumitru, 2015)

Algunas de las ventajas del encapsulado con cápsulas de hidrogel a base de alginato en transistores orgánicos de efecto de campo incluyen:

- **Biocompatibilidad:** El alginato es un material biocompatible, lo que lo hace adecuado para aplicaciones biomédicas y biotecnológicas. (L.M Dumitru, 2015)

- **Biodegradabilidad:** Las cápsulas de alginato son biodegradables, lo que las hace respetuosas con el medio ambiente y adecuadas para aplicaciones que requieren degradación controlada. (L.M Dumitru, 2015)
- **Flexibilidad:** Al ser un hidrogel, las cápsulas de alginato pueden adaptarse a sustratos flexibles, lo que es beneficioso para dispositivos electrónicos flexibles. (L.M Dumitru, 2015)
- **Capacidad de entrega de moléculas biológicas:** Las cápsulas de alginato pueden servir como sistemas de entrega para moléculas biológicas, lo que amplía las posibilidades de aplicaciones en bio-sensores electrónicos.
- **Funcionamiento a bajos voltajes:** Permiten el funcionamiento de transistores orgánicos de efecto de campo por debajo de 0.5 V, lo que contribuye a la eficiencia energética de los dispositivos. (L.M Dumitru, 2015)

### **Funcionamiento**

La implementación del material como el hidrogeno produce una biorreacción llamada biorreacción enzimática que tiene lugar dentro de las cápsulas del transistor como compuerta en el estudio realizado por (L.M Dumitru, 2015) es significativo el análisis de la reacción por varias razones:

**Preservación de la funcionalidad:** Las enzimas dentro de las cápsulas, como la glucosa-oxidasa (GOx) y la peroxidasa de rábano picante (HRP), conservan su funcionalidad incluso cuando están dispersas en los geles de alginato. Esto significa que las reacciones enzimáticas pueden seguir produciéndose eficazmente dentro de las cápsulas. (L.M Dumitru, 2015)

**Detección biológica:** Las reacciones enzimáticas, como la oxidación de la glucosa en ácido glucónico por GOx y la posterior producción de peróxido de hidrógeno, proporcionan una base para la detección biológica dentro de las cápsulas. Estas reacciones pueden ser detectadas y medidas, permitiendo la detección de moléculas biológicas específicas o analitos. (L.M Dumitru, 2015)

**Versatilidad:** Las cápsulas pueden captar y liberar proteínas, como la estreptavidina, lo que demuestra la versatilidad del sistema a la hora de alojar distintos tipos de biomoléculas para diversas aplicaciones. (L.M Dumitru, 2015)

### **3.7.1 Estudio de dispositivos y sistemas comerciales actuales**

La investigación actual en dispositivos y sistemas comerciales basados en transistores de unión bipolar (BJT) muestra avances significativos en la mejora de la ganancia de corriente y la optimización de la geometría del dispositivo para aplicaciones de alta potencia y temperatura. (Miyake, 2011)

Los BJTs de 4H-SiC han alcanzado ganancias de corriente récord, con mejoras logradas a través de la geometría optimizada del dispositivo y procesos de reducción de niveles profundos basados en la oxidación térmica. Se han desarrollado BJTs de 4H-SiC capaces de manejar 1000 V y 30 A, mostrando ganancias de corriente significativas y comportamiento de conmutación rápida, lo que representa una mejora significativa sobre el estado del arte. Los BJTs laterales de 4H-SiC han sido optimizados para circuitos integrados monolíticos de alta temperatura, logrando altas densidades de corriente y bajos valores de resistencia en estado activo. (Miyake, 2011)

Se han fabricado BJTs de 4H-SiC para ultra-altos voltajes sin necesidad de implantación, alcanzando ganancias de corriente altas y voltajes de ruptura estables gracias a la pasivación de superficie optimizada y geometrías de celda óptimas. Los BJTs se utilizan para crear fuentes de corriente precisas, siendo los dispositivos emparejados en un solo paquete los que ofrecen los mejores resultados debido a su coincidencia en características eléctricas y térmicas. Los sistemas sensoriales basados en BJT para la detección selectiva de dirección y velocidad de objetos en movimiento han sido propuestos, mostrando potencial para simplificar la complejidad del hardware en implementaciones VLSI. (Miyake, 2011)

Se ha propuesto un biosensor basado en BJT en modo híbrido MOSFET-BJT para la detección de proteína C-reactiva, demostrando buena selectividad y reproducibilidad. Los detectores BJT ofrecen un sistema de detección de partículas alfa simple, de bajo costo y bajo consumo de energía, adecuado para el monitoreo de la radioactividad ambiental. Los BJTs laterales controlados por puerta de tecnología CMOS estándar se han utilizado como fotodetectores con alta responsividad a bajas intensidades de luz, con la capacidad de ajustar la respuesta fotoeléctrica según los requisitos de la aplicación. (Miyake, 2011)

Los avances en BJTs de 4H-SiC han llevado a dispositivos con ganancias de corriente récord y características mejoradas para aplicaciones de alta potencia y temperatura. Además, los BJTs se han utilizado con éxito en la creación de fuentes de corriente precisas, sistemas sensoriales para detección de movimiento y biosensores, así como en sistemas de detección de partículas y fotodetección, demostrando la versatilidad y el potencial de estos dispositivos en una variedad de aplicaciones comerciales. (Miyake, 2011)

## Nanomateriales en los transistores.

El documento "Nanomaterials in transistors: From high-performance to thin-film applications" del autor Aaron D. Franklin destaca la importancia de los avances en nanomateriales para la evolución de la tecnología de transistores. Se resalta que, a pesar de la diversidad de nanomateriales y los progresos en su síntesis y funciones básicas, es crucial reflexionar sobre si su novedad se traduce en una superioridad real sobre otras opciones disponibles. A lo largo de los últimos 15 años, se ha observado un crecimiento significativo en la investigación de nanomateriales para transistores, lo que ha ampliado el abanico de opciones disponibles y ha permitido superar desafíos técnicos. (Franklin, 2015)

En el documento se menciona la importancia de alinear el avance científico de los transistores de nanomateriales con los objetivos finales de desarrollo. Se destaca la necesidad de mejorar la síntesis, uniformidad y posicionamiento de los nanomateriales en sustratos específicos, así como de optimizar las interfaces clave y explorar nuevas estructuras de transistores que aprovechen al máximo los beneficios de los nanomateriales. Se subraya que, si bien se han logrado avances en abordar estos desafíos, aún queda mucho trabajo por hacer para que los nanomateriales sean adecuados para la tecnología de transistores, especialmente en aplicaciones de TFTs de bajo costo. (Franklin, 2015)

En resumen, el documento enfatiza la promesa de los nanomateriales en el campo de los transistores, señalando que ofrecen ventajas significativas sobre las opciones tradicionales, como una mayor movilidad y corriente de encendido. Se destaca el potencial de los nanotubos de carbono como una de las opciones más prometedoras hasta la fecha. Se plantea el desafío de aprovechar de manera efectiva los avances científicos y tecnológicos en este campo en constante evolución, con la esperanza de que futuras investigaciones sean más colaborativas y abarcativas, demostrando impactos significativos en múltiples aspectos clave de las aplicaciones de transistores de nanomateriales. (Franklin, 2015)

## **Nuevas aplicaciones en transistores emisores de luz**

El documento "Nuevas Aplicaciones de Películas Delgadas y Transistores Emisores de Luz" destaca las innovaciones recientes en el campo de los transistores emisores de luz (LEFETs) y su potencial para revolucionar la optoelectrónica. Una de las ventajas clave de los LEFETs es su capacidad para combinar las funciones de emisión de luz y conmutación de señales en un solo dispositivo, lo que los hace ideales para aplicaciones en pantallas, sensores y comunicaciones ópticas. Además, la posibilidad de fabricar LEFETs mediante procesos de solución ofrece una ventaja significativa en cuanto a escalabilidad y costos de producción. (Zaumseil, 2020)

El objetivo principal es explorar las posibilidades de desarrollo de los LEFETs para incluir funcionalidades adicionales más allá de la emisión de luz. Se plantea la integración de materiales semiconductores orgánicos y poliméricos en los LEFETs para mejorar su rendimiento y eficiencia energética. Asimismo, se discute la importancia de investigar nuevas estrategias de diseño y fabricación para optimizar la operación de estos dispositivos en diferentes aplicaciones. (Zaumseil, 2020)

Otro aspecto destacado es la colaboración entre la academia y la industria para impulsar la investigación y el desarrollo de LEFETs con miras a su comercialización. Se enfatiza la importancia de comprender a fondo los mecanismos de funcionamiento de estos dispositivos para aprovechar al máximo su potencial en futuras tecnologías optoelectrónicas. En resumen, se subraya las ventajas y oportunidades que los LEFETs ofrecen en términos de innovación, eficiencia y versatilidad en el campo de la optoelectrónica. (Zaumseil, 2020)

Algunas de las ventajas acerca de los transistores emisores de luz (LEFETs) incluyen:

- **Innovación Tecnológica:** Los LEFETs representan una innovación tecnológica al combinar las propiedades de los transistores con la emisión de luz, lo que los hace ideales para aplicaciones en pantallas, sensores y comunicaciones ópticas. Esta capacidad única de integrar funciones ópticas y electrónicas en un solo dispositivo abre nuevas posibilidades en el campo de la optoelectrónica. (Zaumseil, 2020)
- **Eficiencia Energética:** La investigación en LEFETs busca mejorar la eficiencia energética de estos dispositivos, lo que podría conducir a avances significativos en el desarrollo de tecnologías más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La posibilidad de utilizar materiales semiconductores orgánicos y poliméricos en los LEFETs también contribuye a esta meta al ofrecer alternativas más eficientes y económicas. (Zaumseil, 2020)
- **Colaboración Interdisciplinaria:** La colaboración entre la academia y la industria en la investigación y desarrollo de LEFETs es fundamental para impulsar la innovación y acelerar la comercialización de estas tecnologías. Esta sinergia entre diferentes sectores permite aprovechar al máximo el potencial de los LEFETs y acelerar su adopción en aplicaciones prácticas, lo que a su vez fomenta el crecimiento y la competitividad en el campo de la optoelectrónica. (Zaumseil, 2020)

## **Azaacenos fusionados linealmente: Nuevos enfoques y nuevas aplicaciones más allá de los transistores de efecto de campo (FET)**

El documento "NUEVAS APPS 3.pdf" presenta avances significativos en el campo de los Azaacenos linealmente fusionados, explorando aplicaciones más allá de los transistores de efecto de campo (FETs) en la ciencia de materiales. El objetivo principal de la investigación es investigar nuevas estrategias para el diseño y la síntesis de compuestos orgánicos con propiedades electrónicas prometedoras, con un enfoque particular en la creación de dispositivos de memoria de alta densidad. Se destaca la importancia de la estructura molecular en la conductividad y capacidad de conmutación de estos compuestos, lo que sugiere un potencial significativo para aplicaciones en dispositivos electrónicos avanzados. (Jumbo Li, 2015)

Uno de los principales hallazgos del documento es la síntesis de heteroacenos más grandes con anillos fusionados linealmente, que contienen grupos aceptor de electrones como ciano y pirazina. Estos compuestos muestran estados de conducción estables en respuesta a voltajes aplicados, lo que los hace ideales para dispositivos de memoria ternaria con altas relaciones de corriente ON2/ON1/OFF y una buena estabilidad en estos estados. Además, la combinación de diferentes grupos aceptor de electrones en una sola molécula ha demostrado ser efectiva para mejorar las propiedades de memoria de los dispositivos basados en estos compuestos. (Jumbo Li, 2015)

Otro aspecto destacado del documento es la exploración de polímeros de metal-coordinación conductores basados en tetraazanaptaeno, que muestran una alta conductividad a temperatura ambiente al coordinarse con iones de cobre. Se plantea la posibilidad de reemplazar el cobre con iones de metales magnéticos para generar conductores moleculares con propiedades magnéticas robustas. Estos descubrimientos abren nuevas perspectivas para el desarrollo de materiales conductores y dispositivos electrónicos con funcionalidades avanzadas y aplicaciones potenciales en campos como la electrónica molecular y la computación cuántica. (Jumbo Li, 2015)

## Preguntas

1.- ¿Qué tipo de ganancia tiene la configuración de emisor común en un transistor BJT?

- A) Ganancia de potencia
- B) Ganancia de corriente
- C) Ganancia de voltaje
- D) Todas las anteriores

2.- ¿Cuál es el modelo de transistor bipolar desarrollado para la simulación de dispositivos bipolares?

- A) Modelo BIC
- B) Modelo VBIC
- C) Modelo BJT
- D) Modelo FET

3.- ¿Cuál es una ventaja clave de utilizar transistores BJT en el diseño de circuitos lógicos complejos?

- A) Mayor complejidad y tamaño del circuito
- B) Menor eficiencia en recursos y costos de fabricación
- C) Integración de múltiples compuertas lógicas en un solo circuito
- D) Necesidad de más componentes para el diseño

4.- ¿Qué función cumple el corriente colector en un transistor BJT NPN?

- A) Fluye desde el colector al emisor
- B) Fluye desde el emisor al colector
- C) Se acumula en la base
- D) Se disipa en el colector

## Preguntas

5.- ¿Qué tipo de polarización tiene la unión Colector-Base en un transistor BJT NPN?

- A) Polarización directa
- B) Polarización inversa
- C) Polarización neutra
- D) Polarización variable

6.- ¿Cuál es una característica clave de los amplificadores en cascada según Mohammad Nizam Ibrahim?

- A) Alta distorsión
- B) Baja impedancia de salida
- C) Baja ganancia
- D) Estrecho ancho de banda

7.- ¿Qué factor puede limitar la respuesta en alta frecuencia de un amplificador en cascada BJT-BJT según Mohammad Nizam Ibrahim?

- A) Corriente de polarización en continua
- B) Baja impedancia de salida
- C) Alta ganancia
- D) Baja impedancia de fuente

8.- ¿Cuál es una aplicación común de los fototransistores según el documento?

- A) Cocina doméstica
- B) Agricultura
- C) Construcción
- D) Automatización industrial

## **Preguntas**

9.- ¿Por qué es importante seleccionar un encapsulado adecuado para un transistor?

- A) Para aumentar la temperatura del dispositivo
- B) Para reducir la vida útil del transistor
- C) Para facilitar la disipación de calor
- D) Para aumentar la impedancia del circuito

10.- ¿Qué se menciona en el documento sobre los BJTs de 4H-SiC en relación con aplicaciones de alta potencia y temperatura?

- A) La capacidad de manejar altos voltajes y corrientes con ganancias de corriente significativas.
- B) La falta de mejoras en la ganancia de corriente.
- C) Su incompatibilidad con sistemas sensoriales.
- D) Su exclusión en sistemas de detección de partículas.

## **Respuestas**

- 1.- D
- 2.- B
- 3.- C
- 4.- A
- 5.- B
- 6.- B
- 7.- A
- 8.- D
- 9.- C
- 10.- A

## Referencias

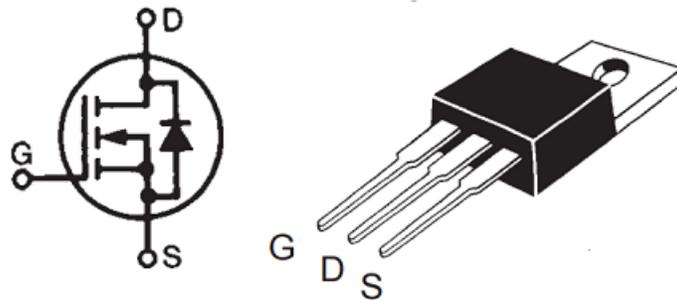
- Boylestad, R. (2001). *Electronica teoria de circuitos*. Madrid: Prentice Hall.
- Elahipanah, H. (2019). Silicon Carbide BJT Oscillator Design Using S-Parameters. *Reseach Gate*, 70-73.
- Ibrahim, R. O. (2017). Temperature effects on the electrical characteristics of BJTs and MOSFETS. *Electronic Res Lab, Physics Dept, Feculty of Women of Arts, science and education*, 100-112.
- Izquierdo, D. M. (2017). *Transistores* . Murcia: Universidad de Murcia.
- Mallampati, K. P. (2019). Operation of logic gates (AND,NAND,OR,NOR) with single circuit using BJT (Bipolar Junction Transistor). *IJARIT* , 705-709.
- McAndrew, C. (2012). BJT modeling with VBIC, basic and v1.3 updates. *NXP Semiconductors*, 80-85.
- Serrano, J. R. (2019). *Electronica general*. Vaso: Universidad del Pais Vaso.
- Bustamante, O. A. (2021). . *Enseñanza del transistor BJT como amplificador utilizando herramientas tecnológicas digitales para la experimentación*. Mundo FESC, 11(S6): <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/1134>.
- Floyd, T. L. (2008). *Dispositivos electrónicos*. Mexico: Pearson México.
- Gu, P. Y. ((2015)). . Recent advances in polymer phototransistors. <https://doi.org/10.1039/C5PY01373A>., 50-62.
- Herrero, J. M. (2005). Diseño, fabricacion y caracterizacion de diodos laser basados en pozos cuanticos de InGaAs . *Universidad Politecnica de Madrid* , 50-60.
- Hou, S. (2018). A 4H-SiC BJT as a Switch for On-chip Integrated UV Photodiode. *IEEE*, 90-101.
- Jimenez, F. G. (2008). Analisis y medicion de algunos parametros caracteristicos de un fototransistor. *Universidad Nacional de Peru* , 70-76.
- Mohammad Nizam Ibrahim, Z. H. (2016). A simulation of single stage bjt amplifier using Itspice. *Faculty of electrical engineering Universiti Teknologi*, 80-88.
- Peñaranda, G. S. (2017). *Herramienta computacional de uso pedagógico para el modelamiento de los transistores de unión bipolar BJT*. Mundo FESC: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6559175>.
- Sereno, M. M. (1993). Control digital de fototransistores integrados en tecnología CMOS. *Congreso Diseño de Circuitos Integrados*, 265-268.

- Sundaresan, S. (2016). 10 kV SiC BJTs - static, switching and reliability characteristics. *GeneSiC semiconductor Inc*, 140-148.
- Varela, E. B. (2015). Utilizacion de celdas solares de tercera generacion para alimentar dispositivos electronicos portatiles de consumo masivo. *Tecnologico de Costa Rica* , <https://hdl.handle.net/2238/3021>.
- Vega, G. R. (2001). Transistores BJT. Amplificacion de senales pequenas y los fototransistores. *Facultad de ciencias universidad nacional de ingenieria*, 80-87.
- Yin, Z. L. (2012). Single-layer MoS<sub>2</sub> phototransistors. *ACS nano*, 74-80.
- L.M Dumitru, K. M. (2015). A Hydrogel capsule as gate dielectric in flexible organic field-effect transistor. *APL Materials*, <https://doi.org/10.1063/1.4901124>.
- Madrid, J. M. (2012). *Caracterización de transistores de nitruro de galio (GaN) para alta potencia y alta frecuencia*. Cartagena: Universidad Politecnica de cartagena.
- Zhao, L. S. (2022). Low Parasitic-Inductance Packaging of a 650 V/150 A Half-Bridge Module Using Enhancement-Mode Gallium-Nitride High Electron Mobility Transistors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,, 344-351.
- Franklin, A. D. (2015). Nanomaterials in transistors: From High-performance to thin-film applications. *Device Technology*, 704-714.
- Jumbo Li, Q. Z. (2015). Linearly-fused Azaacenes: Novel Approaches and New Applications Beyond Field-Effect Transistors (FETs). *Applied Materials and interfaces*, 75-107.
- Miyake, H. K. (2011). H-SiC BJTs With Record Current Gains of 257. *IEEE Electron Device Letters*, 841-843.
- Zaumseil, J. (2020). Nuevas Aplicaciones de Películas Delgadas y Transistores Emisores de Luz. *Advanced Functional Materials*, 80-100.

## 4 Transistor MOSFET

### 4.1 MOSFET

Los Transistores de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor (MOSFET, por sus siglas en inglés) son dispositivos semiconductores de tres terminales ampliamente utilizados en la industria electrónica (Véase Figura 4.1). Este tipo de transistor opera bajo el principio de control de la corriente que se mueven desde la terminal de fuente(S) hasta la del drenaje (D), a través de un campo eléctrico generado por una tensión aplicada en su terminal de puerta (G) (Kasap, 2017).



*Figura 4.1.1. Símbolo y encapsulado de un MOSFET (Roch, 2021).*

El funcionamiento del transistor MOSFET se basa en su capacidad para modular la conductividad del canal entre el drain (D) y el source (S) mediante la aplicación de un voltaje al gate (G). Este fenómeno se explica mediante la acción del gate, donde la aplicación de un voltaje induce una carga en el canal del semiconductor debajo de la capa de óxido. (Kasap, 2017).

Este proceso puede manifestarse en dos modos principales: el modo corte y el modo de saturación. En el modo corte, característico de los transistores MOS de tipo n, un voltaje negativo en el gate repelerá los electrones de la región cercana a la superficie del semiconductor, creando una región de corte. Por otro lado, en el modo de saturación, un voltaje positivo en el gate atraerá electrones, formando un canal conductivo entre el source y el drain. (Kasap, 2017).

La corriente que fluye entre el source y el drain está controlada por el voltaje aplicado al gate. Este principio de modulación de la conductividad del canal por el voltaje gate permite la amplificación y conmutación de señales eléctricas en los circuitos integrados, lo que hace que los transistores MOS sean fundamentales en la electrónica moderna. (Kasap, 2017).

## 4.2 Características y parámetros

### 4.2.1 Estructura básica

Neamen (2012) identifica la estructura básica que presentan los semiconductores de óxido metálico, dividida en tres capas principales (véase Figura 4.2.1.1.). Una capa metálica, comúnmente hecha de aluminio o polisilicio dopado; una capa de óxido, generalmente de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), que actúa como aislante; y el semiconductor (substrato), normalmente silicio (Si), pero en algunos casos se utilizan otros materiales como el arseniuro de galio.

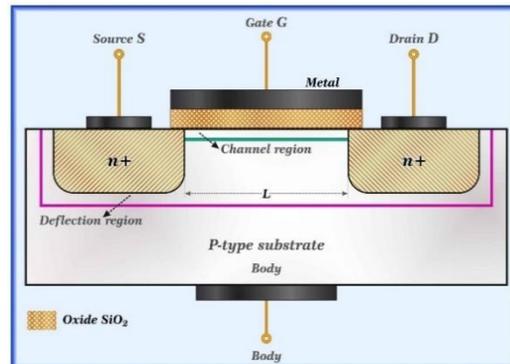


Figura 4.2.1.1.. Estructura de capas MOS (Roch, 2021).

Las tres capas del MOSFET interactúan de manera coordinada para controlar el flujo de corriente a través del dispositivo. La capa metálica, también conocida como gate, actúa como el terminal de control del MOSFET. Al aplicar un voltaje al terminal de puerta, se crea un campo eléctrico en la región de óxido semiconductor, lo que afecta la conductividad del canal en el semiconductor debajo de la capa de óxido. Este voltaje aplicado al gate controla la cantidad de carga almacenada en la región de óxido-semiconductor, determinando así la conductividad del canal y la corriente que fluye entre el source y el drain.

Por otro lado, la capa de óxido, generalmente dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), sirve como aislante eléctrico entre el gate y el semiconductor. Debido a su alta resistividad eléctrica, evita que fluya corriente entre el gate y el semiconductor cuando no está polarizado. Sin embargo, cuando se aplica un voltaje al gate, el campo eléctrico resultante en la capa de óxido induce una acumulación o corte de portadores de carga en el semiconductor subyacente, alterando así la conductividad del canal.

Finalmente, el semiconductor, típicamente silicio (Si), forma el sustrato del MOSFET y actúa como el canal a través del cual fluye la corriente entre el source y el drain. La cantidad de portadores de carga en el canal semiconductor, y por lo tanto su conductividad, está influenciada por el campo eléctrico inducido por el voltaje aplicado al gate a través del óxido. Dependiendo del tipo de MOSFET (nMOS o pMOS), el canal puede ser dopado con impurezas tipo n o tipo p para proporcionar portadores de carga adecuados para la conducción de corriente.

#### 4.2.2 MOSFET de Tipo n (nMOS)

En un MOSFET de tipo n (nMOS), el sustrato semiconductor es de tipo n (véase Figura 3), lo que significa que está dopado con impurezas que proporcionan portadores de carga negativos (electrones) como portadores mayoritarios. En este tipo de MOSFET, el canal conductor se forma mediante la acumulación de electrones en el semiconductor bajo la capa de óxido cuando se aplica un voltaje positivo al gate.

El nMOS se utiliza comúnmente en aplicaciones donde se requiere una alta velocidad de conmutación y una baja resistencia en el canal, como en la lógica CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor).

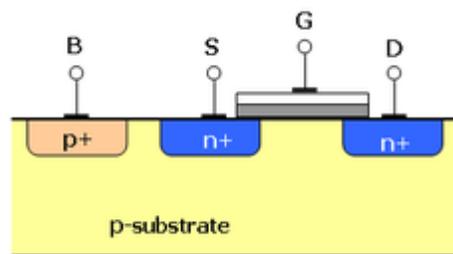


Figura 4.2.2.1. Transistor nMOS (González et al, 2016).

#### 4.2.3 MOSFET de Tipo p (pMOS)

En un MOSFET de tipo p (pMOS), el sustrato semiconductor es de tipo p (véase Figura 4), lo que significa que está dopado con impurezas que proporcionan portadores de carga positivos (huecos) como portadores mayoritarios. En este tipo de MOSFET, el canal conductor se forma mediante la depleción de huecos en el semiconductor bajo la capa de óxido cuando se aplica un voltaje negativo al gate.

El pMOS se utiliza comúnmente en aplicaciones donde se requiere un bajo consumo de energía y una mayor inmunidad al ruido, como en la carga de alta impedancia y los circuitos de acondicionamiento de señales.

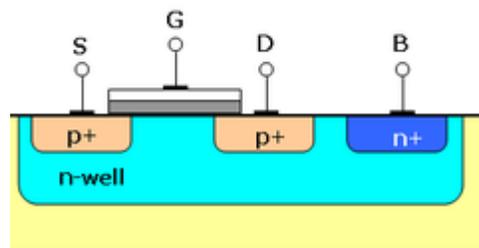


Figura 4.2.3.1. Transistor pMOS (González et al, 2016).

#### 4.2.4 Operación del MOSFET

Los modos de operación de los MOSFET se pueden describir mediante varias ecuaciones importantes:

1. *Ecuación de la Corriente en el Modo Lineal*: describe la corriente que fluye entre el source y el drain de un MOSFET cuando el dispositivo está operando en una región de baja tensión entre el gate y el source ( $V_{GS}$ ) y entre el drain y el source ( $V_{DS}$ ). Esta ecuación se utiliza cuando el MOSFET está operando en una región lineal de su curva de transferencia, donde el voltaje aplicado al gate es suficiente para inducir un canal en el semiconductor, pero no lo suficientemente alto como para alcanzar la saturación (véase Figura 5) (Sze & Ng, 2007; Taur & Ning, 2009). La ecuación se expresa como:

$$I_D = \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) \left[ (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

Donde  $I_D$  es la corriente de drain,  $\mu_n$  es la movilidad del electrón,  $C_{ox}$  es la capacitancia del óxido por unidad de área,  $W$  y  $L$  son el ancho y la longitud del canal,  $V_{GS}$  es el voltaje gate-source,  $V_{th}$  es el voltaje umbral, y  $V_{DS}$  es el voltaje drain-source.

2. *Ecuación de la Corriente en el Modo de Saturación*: describe la corriente que fluye entre el source y el drain de un MOSFET cuando el dispositivo está operando en una región de alta tensión entre el gate y el source ( $V_{GS}$ ) y entre el drain y el source ( $V_{DS}$ ). En esta región, el MOSFET está completamente encendido y la corriente de drain alcanza un valor máximo (Sze & Ng, 2007; Taur & Ning, 2009). La ecuación se expresa como:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th})^2$$

En esta ecuación, la corriente de drain  $I_D$  depende cuadráticamente de la diferencia de potencial ( $V_{GS} - V_{th}$ ). En el modo de saturación, la corriente de drain es independiente de  $V_{DS}$  y está controlada principalmente por  $V_{GS}$ . En esta región, el MOSFET se comporta como un interruptor completamente encendido, con una corriente de drain máxima determinada por la geometría del dispositivo (véase Figura 5) y el voltaje aplicado al gate.

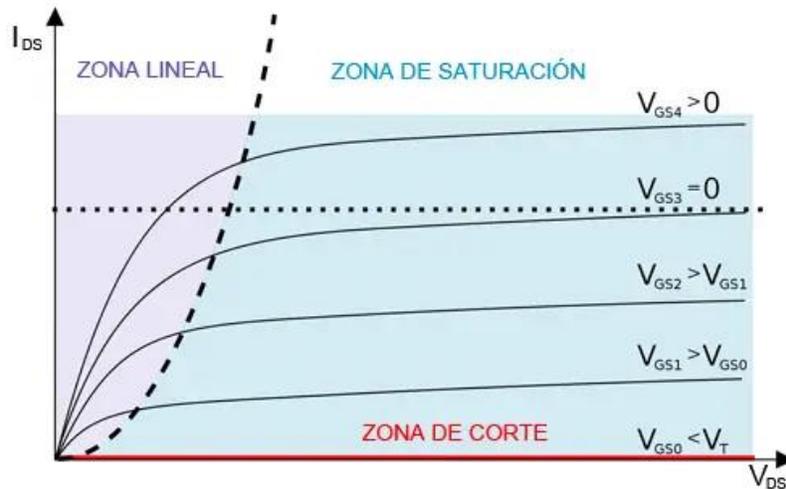


Figura 4.2.4.1. Modos de operación del MOSFET (Llamas, 2016).

### 4.2.3 Propiedades

Además de su estructura básica y sus modos de operación, los transistores MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) poseen varias propiedades que los hacen fundamentales en la electrónica moderna. Algunas de estas propiedades incluyen:

**1. Alta Impedancia de Entrada:** Los MOSFET tienen una alta impedancia de entrada, lo que significa que requieren una cantidad mínima de corriente para activarse. Esto los hace ideales para su uso en circuitos de entrada de alta impedancia, como amplificadores operacionales y amplificadores de instrumentación (Sze & Ng, 2007).

**2. Baja Corriente de Fuga:** Los MOSFET tienen una baja corriente de fuga, lo que significa que incluso cuando están apagados, hay muy poca corriente que fluye a través del dispositivo. Esto es crucial para conservar la energía en circuitos de baja potencia y para mantener la precisión en aplicaciones de baja señal (Neamen, 2012).

**3. Alta Ganancia de Voltaje:** Los MOSFET tienen la capacidad de proporcionar una alta ganancia de voltaje, lo que significa que pequeñas variaciones en el voltaje de entrada pueden resultar en grandes cambios en la corriente de salida. Esto los hace ideales para aplicaciones de amplificación de señales (Sze & Ng, 2007).

**4. Baja Sensibilidad a la Temperatura:** Comparado con otros tipos de transistores, como los bipolares, los MOSFET son menos sensibles a las variaciones de temperatura. Esto se debe a que no requieren corriente de base, lo que reduce la dependencia de la temperatura en su funcionamiento (Neamen, 2012).

**5. Capacidades de Conmutación Rápida:** Los MOSFET pueden encenderse y apagarse rápidamente, lo que los hace ideales para aplicaciones de conmutación de alta velocidad, como en convertidores de potencia y circuitos de radiofrecuencia (Sze & Ng, 2007).

**6. Tolerancia a la Radiación:** En comparación con otros dispositivos semiconductores, los MOSFET muestran una buena tolerancia a la radiación, lo que los hace útiles en aplicaciones espaciales y nucleares donde la radiación puede ser un problema (Neamen, 2012).

### **4.3 Polarización**

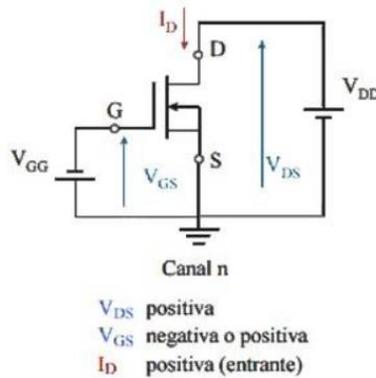
La polarización es un concepto fundamental en electrónica que se refiere a la aplicación de tensiones o corrientes externas a un dispositivo semiconductor para controlar su comportamiento y su funcionamiento. En el caso de los transistores MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor), la polarización juega un papel crucial en determinar el estado de conducción o corte del dispositivo. La polarización de un MOSFET implica la aplicación de tensiones adecuadas a sus terminales (gate, source y drain) para establecer el estado de funcionamiento deseado (Sze & Ng, 2007).

De acuerdo con Sze & Ng (2007) y Neamen (2012), tanto para nMOS como para pMOS, hay dos tipos principales de polarización en los MOSFET: la polarización de corte y la polarización de saturación.

#### **4.3.1 Polarización de Tipo n (nMOS)**

En la polarización de corte de un nMOS, el transistor está en un estado de apagado. Para lograr esta condición, el voltaje aplicado al terminal de puerta (gate) debe ser inferior al umbral de voltaje ( $V_{th}$ ) del nMOS. Esto evita que los electrones se acumulen en el canal entre el source y el drain, bloqueando así el flujo de corriente. En la práctica, el gate se polariza negativamente con respecto al source para mantener el transistor en estado de corte.

En la polarización de saturación de un nMOS, el transistor está completamente activado y permite un flujo máximo de corriente entre el source y el drain. Para lograr esta condición, el voltaje aplicado al terminal de puerta debe ser lo suficientemente alto como para inducir un canal conductor en el semiconductor debajo de la capa de óxido. En este estado, el nMOS se comporta como un interruptor cerrado y la corriente de drain alcanza su valor máximo.

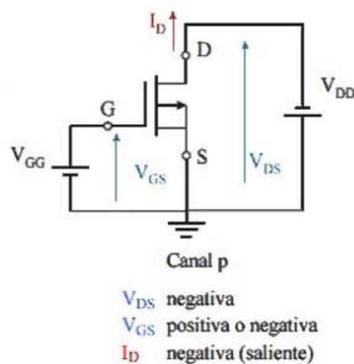


*Figura 4.3.1.1. Polarización habitual de un MOSFET tipo n (Coello. K. & Dávila, J., 2015).*

### 4.3.2 Polarización de Tipo p (pMOS)

En la polarización de corte de un pMOS, el transistor está en un estado de apagado. Para lograr esta condición, el voltaje aplicado al terminal de puerta debe ser positivo con respecto al source y mayor que el umbral de voltaje ( $V_{th}$ ) del pMOS. Esto evita que los huecos se acumulen en el canal entre el source y el drain, bloqueando así el flujo de corriente. En la práctica, el gate se polariza positivamente con respecto al source para mantener el transistor en estado de corte.

En la polarización de saturación de un pMOS, el transistor está completamente activado y permite un flujo máximo de corriente entre el source y el drain. Para lograr esta condición, el voltaje aplicado al terminal de puerta debe ser lo suficientemente bajo como para inducir un canal conductor en el semiconductor debajo de la capa de óxido. En este estado, el pMOS se comporta como un interruptor cerrado y la corriente de drain alcanza su valor máximo.



*Figura 4.3.2.1. Polarización habitual de un MOSFET tipo p (Coello. K. & Dávila, J., 2015).*

#### 4.4 Aplicaciones de un MOSFET

En los transistores MOSFET la tensión entre los terminales de entrada determina el comportamiento eléctrico de la salida, los cuales pueden ser: (Universidad de Cantabria, 2020)

- Fuente de corriente controlada (región de saturación)
- Resistencia (región óhmica)
- Circuito abierto (región de corte)

#### Transistor MOSFET como amplificador

El funcionamiento del transistor MOSFET como amplificador este asociado al concepto de recta de carga y de polarización en un determinado punto de trabajo. Como se puede apreciar en la siguiente figura. (Universidad de Cantabria, 2020)

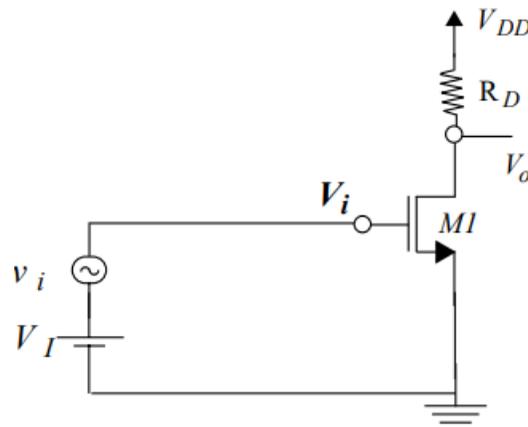


Figura 4.4.1.

Con base en la figura anterior en el que aparece una resistencia de carga  $R_D$ . La tensión de entrada  $V_i$  es aplicada directamente a la puerta del transistor, de modo que  $V_{GS} = V_I$ . Además  $V_{DD} = i_D * R_D + v_{DS}$  representa la recta de carga en el plano  $i_D * v_{DS}$ , que incluye a todos los puntos de solución del circuito, en función del valor  $V_i$ . El punto de trabajo queda definido por  $v_{GS}(V_i)$  (Universidad de Cantabria, 2020)

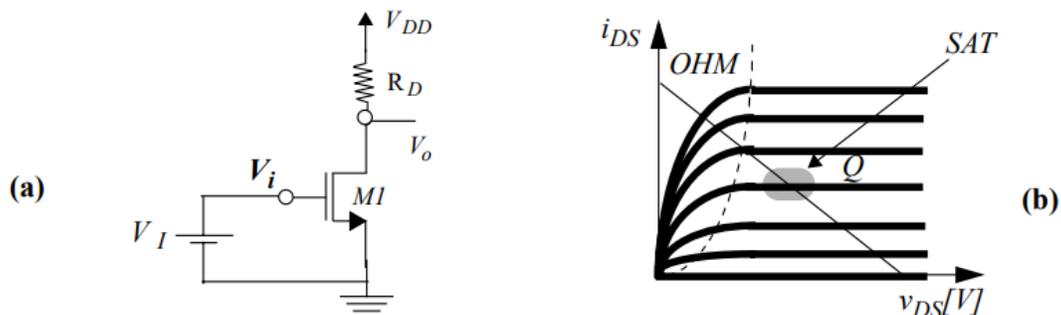


Figura 4.4.2 Recta de carga (a) y polarización de M1 (b)

Como se ha visto anteriormente, a partir de los puntos de la recta de carga se puede obtener la característica de transferencia de un circuito inversor, pero también se puede hacer funcionar a este circuito como amplificador de señal. Para ello, la polarización ha de hacerse en la región de saturación. El análisis como amplificador requiere que, una vez se ha realizado la polarización del transistor (Q), se linealice el comportamiento en un entorno reducido de dicho punto. Para ello se substituye el MOS por su modelo en pequeña señal. (Universidad de Cantabria, 2020)

### Transistor MOSFET en conmutación

El funcionamiento como inversor del transistor NMOS se basa en sus características en conmutación: paso de corte a zona óhmica. Para el inversor NMOS con carga resistiva analizado en el ejemplo anterior, la variable a la entrada, considerada como binaria, ( $0, V_{DD} - -V_L, V_H$ ) se invierte a la salida ( $V_H, V_L$ ). La realización de resistencias en circuitos integrados es tecnológicamente compleja e imprecisa, no siendo una solución eficiente (tamaño elevado, precisión baja), de forma que en la práctica se emplean otros tipos de cargas equivalentes. A continuación, se analiza el funcionamiento de tales circuitos. En la siguiente figura se muestra un inversor NMOS con carga resistiva. (Izquierda, 2018)

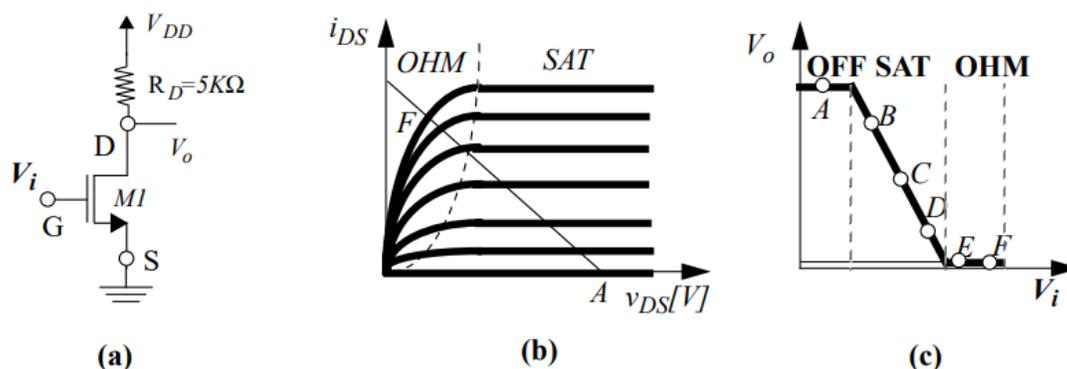


Figura 4.4.3 Inversor NMOS con carga resistiva: circuito (a). polarización de las curvas de salida (b). características de transferencia (c)

Para diferentes valores de  $V_i$ , el NMOS conmuta entre corte y óhmica, siguiendo la trayectoria que va desde el punto A al F, cuando la entrada varía entre 0 y  $V_{DD}$ . En ella, el transistor pasa por las regiones de corte, saturación y óhmica, por este orden. (Izquierda, 2018)

La razón **conexión-desconexión** es la relación entre la señal de salida a nivel alto, y la señal de salida a nivel bajo. Cuanto mayor sea, más fácil será discriminar entre ambos estados. (Izquierda, 2018)

## El NMOS en conmutación

La dificultad de obtener resistencias integradas puede ser resuelta si se substituye por algún elemento de carga capaz de conservar la funcionalidad como inversor (Fig. 3). Se puede tomar como carga un transistor de empobrecimiento de canal N, como se muestra en la Fig. 4 (Izquierda, 2018)

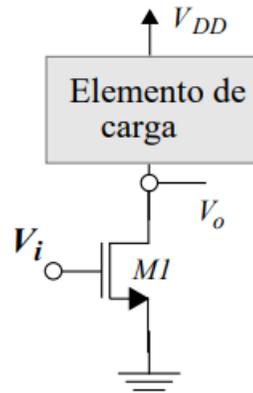


Figura 4.4.4 Inversor NMOS con elemento de carga generico

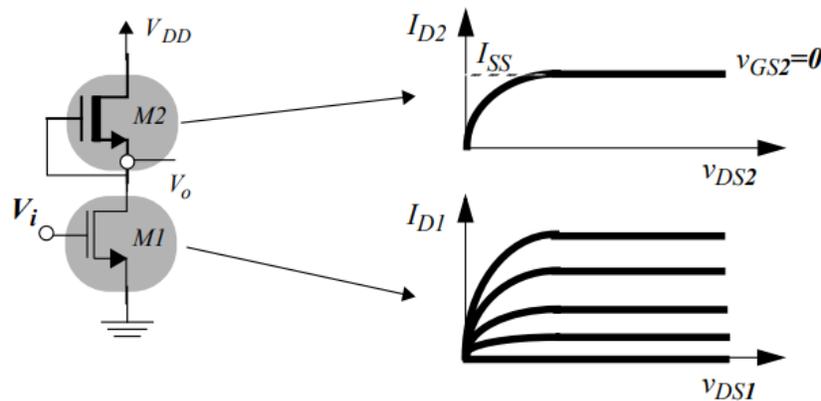


Figura 1.4.5 inversor con carga de empobrecimiento

En la Fig. 4 se muestran algunos valores de  $v_{GS1}$  tomados para ilustrar la evolución de la intensidad de drenador en M1, transistor de control o “driver”. La curva  $i_{D2} - v_{DS2}$  para M2, queda definida por la tensión  $v_{GS2} = 0$ . Para analizar el comportamiento se puede deducir las siguientes relaciones topológicas, (Izquierda, 2018)

$$V_i = v_{GS1}$$

$$V_o = V_{DD} - v_{DS2} = v_{DS1}$$

$$i_{D1} = i_{D2}$$

De la expresión (Fig. 2) se deduce que el comportamiento del transistor M2 se asemeja al de una línea de carga (misma funcionalidad que una recta de carga) para el transistor M1. La solución gráfica demuestra que la trayectoria que siguen los puntos solución del circuito obedece a las que corresponderían a un inversor. En este caso, los puntos que visitan son diferentes a los encontrados con una resistencia de carga. La característica de transferencia se aproxima mejor a la de un inversor ideal, ya que se reduce la anchura de la región de transición (Para un inversor ideal, la ganancia en la zona de transición es infinita). A partir del punto A, los transistores cambian de regiones de operación en función del valor de la entrada. (Izquierda, 2018)

### **Transistor MOSFET en circuitos de potencia**

En transistor MOSFET puede implementarse en circuitos de potencia como los convertidores estáticos de energía donde según (REFERENCIA) utilizó un convertidor de potencia tipo elevador como circuito de conmutación del MOSFET. Este convertidor permitió obtener datos experimentales controlados de carga en la capacitancia de entrada del SiC-MOSFET, lo que facilitó la validación de los resultados de simulación. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)

El convertidor de potencia tipo elevador utilizado en la aplicación de los MOSFET de potencia en carburo de silicio presentaba las siguientes propiedades: (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)

- Permitted obtener datos experimentales controlados de carga en la capacitancia de entrada del SiC-MOSFET. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)
- Facilitó la comparación entre los resultados de simulación y los datos experimentales para determinar el valor más adecuado de la resistencia de compuerta y observar con detalle el comportamiento de la capacitancia de compuerta-fuente. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)
- Ayudó a identificar los valores de umbral más adecuados para configurar un sistema de detección de averías aplicado a la tecnología de carburo de silicio en convertidores de potencia. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)

Las razones por las que se utilizaron los MOSFET en lugar de los transistores BJT son las siguientes

- Mejores propiedades físicas: El carburo de silicio (SiC) ofrece propiedades físicas superiores al silicio, como una banda prohibida más amplia, una velocidad de saturación de electrones más elevada y una mayor conductividad térmica. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)

- Altas características eléctricas: Los MOSFET de potencia en SiC (SiC-MOSFET) tienen una mayor capacidad de corriente y voltaje en comparación con los BJT, lo que los hace ideales para aplicaciones en convertidores de potencia. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)
- Necesidad de detección de fallas tempranas: Dado que los SiC-MOSFET presentan altas características eléctricas, es crucial contar con un subsistema de detección de fallas tempranas, principalmente en el dispositivo de conmutación. La detección temprana de averías y su aislamiento son fundamentales para evitar la propagación de la falla en todo el sistema electrónico. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)

Los MOSFET de potencia en carburo de silicio se eligieron por sus superiores propiedades físicas, altas características eléctricas y la necesidad de un sistema de detección de averías eficiente en aplicaciones de convertidores de potencia. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)

Los resultados obtenidos por (REFERENCIA) en el estudio de simulación de MOSFET de potencia en carburo de silicio, se obtuvieron los siguientes resultados significativos: (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)

1. Se presentaron resultados de simulación y experimentales del comportamiento de la señal de compuerta-fuente del SiC-MOSFET, con un enfoque en la variación de la corriente de drenaje. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)
2. Se utilizó un modelo proporcionado por el fabricante Cree para la simulación, y se diseñó un convertidor de potencia tipo elevador como circuito de conmutación del MOSFET para la validación de los resultados. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)
3. Se identificaron los valores de umbral más adecuados para configurar un sistema de detección de averías aplicado a la tecnología de carburo de silicio en convertidores de potencia. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)
4. La comparación entre la simulación y los datos experimentales permitió determinar el valor óptimo de la resistencia de compuerta y observar detalladamente el comportamiento de la capacitancia de compuerta-fuente. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)

Por lo que los resultados obtenidos en este estudio proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento y la detección de averías en MOSFET de potencia en carburo de silicio, lo que contribuye al desarrollo de sistemas más eficientes y seguros en convertidores de potencia. (Leobardo Hernandez Gonzalez, 2014)

#### 4.5 Aplicaciones actuales

Una de las aplicaciones actuales es el análisis comparativo de diferentes comparativas entre cuatro tecnologías de MOSFET de potencia: Silicio convencional (Si), Superunión (SJ), Carburo de Silicio (SiC) y Nitruro de Galio (GaN) en aplicaciones de electrónica de potencia. Se destaca que cada tecnología tiene características únicas que impactan en su rendimiento y eficiencia en diferentes rangos de voltaje, corriente y frecuencia. (Edemar O. Prado, 2022)

- Silicio (Si): Es la tecnología convencional con la que se comparan las otras. Presenta resistencia de encendido entre drenaje y fuente (RDSon) más alta y tiempos de conmutación más largos en comparación con las tecnologías de SiC y GaN. (Edemar O. Prado, 2022)
- Superunión (SJ): Ofrece una reducción significativa en la resistencia de encendido entre drenaje y fuente, así como tiempos de conmutación más cortos y mayor capacidad de voltaje de ruptura entre drenaje y fuente. Es una mejora con respecto al Silicio convencional. (Edemar O. Prado, 2022)
- Carburo de Silicio (SiC): Presenta alta conductividad térmica, alto campo eléctrico y amplio espacio de energía, lo que lo hace atractivo para operaciones a altas temperaturas, frecuencias, potencias y voltajes de drenaje-fuente. Es especialmente eficaz en aplicaciones de alta potencia y frecuencia. (Edemar O. Prado, 2022)
- Nitruro de Galio (GaN): Tiene una movilidad de electrones mayor y una conductividad térmica menor en comparación con el SiC. Esto se traduce en tiempos de conmutación más cortos y menor capacitancia de salida, lo que lo hace ideal para operaciones de alta frecuencia, pero puede presentar desventajas en aplicaciones de alta potencia y temperatura. (Edemar O. Prado, 2022)

Las diferentes tecnologías de MOSFET de potencia (Si, SJ, SiC y GaN) influyen en la eficiencia y el rendimiento de las aplicaciones de electrónica de potencia de las siguientes maneras:

1. Eficiencia Energética:
  - Silicio (Si): Aunque es la tecnología convencional, puede presentar mayores pérdidas de conmutación y resistencia de encendido, lo que puede afectar la eficiencia en aplicaciones de alta frecuencia y potencia. (Edemar O. Prado, 2022)
  - Superunión (SJ): Con una resistencia de encendido reducida y tiempos de conmutación más cortos, los dispositivos SJ pueden mejorar la eficiencia al reducir las pérdidas de conmutación. (Edemar O. Prado, 2022)

- Carburo de Silicio (SiC): Debido a su alta conductividad térmica y baja resistencia de encendido, los MOSFET de SiC pueden ofrecer una mayor eficiencia en aplicaciones de alta potencia y frecuencia. (Edemar O. Prado, 2022)
- Nitruro de Galio (GaN): Con tiempos de conmutación más rápidos y menor capacitancia de salida, los dispositivos GaN son ideales para aplicaciones de alta frecuencia, lo que puede mejorar la eficiencia en tales escenarios. (Edemar O. Prado, 2022)

## 2.- Rendimiento en Diferentes Escenarios:

- Silicio (Si): Adecuado para aplicaciones convencionales de baja y media potencia, pero puede no ser óptimo para aplicaciones de alta frecuencia y potencia. (Edemar O. Prado, 2022)
- Superunión (SJ): Ofrece un equilibrio entre rendimiento y costo, siendo una opción atractiva para aplicaciones de potencia media a alta. (Edemar O. Prado, 2022)
- Carburo de Silicio (SiC): Destacado por su rendimiento superior en aplicaciones de alta potencia y frecuencia, donde se requiere una mayor eficiencia y capacidad de conmutación. (Edemar O. Prado, 2022)
- Nitruro de Galio (GaN): Ideal para aplicaciones de alta frecuencia donde se prioriza la velocidad de conmutación y la eficiencia energética. (Edemar O. Prado, 2022)

Los posibles desarrollos y aplicaciones futuros de las tecnologías MOSFET de potencia de Si, Superunión, SiC y GaN en la industria de la electrónica de potencia incluyen:

### 1.- Mejoras en Eficiencia y Rendimiento:

- Continuarán los avances en la eficiencia y rendimiento de los MOSFET de potencia para satisfacer la creciente demanda de aplicaciones de alta potencia y frecuencia. (Edemar O. Prado, 2022)

### 2.- Reducción de Tamaño y Costos:

- Se espera una reducción en el tamaño y los costos de los dispositivos MOSFET de potencia, lo que permitirá su integración en sistemas más compactos y económicos. (Edemar O. Prado, 2022)

### 3.- Mayor Integración en Sistemas de Energía Renovable:

- Las tecnologías de MOSFET de potencia jugarán un papel crucial en la integración de sistemas de energía renovable, como paneles solares y turbinas eólicas, mejorando la eficiencia y la gestión de la energía. (Edemar O. Prado, 2022)

#### 4.- Electrificación del Transporte:

- Se prevé un aumento en la adopción de tecnologías de MOSFET de potencia en vehículos eléctricos y sistemas de carga rápida, lo que permitirá una mayor eficiencia y autonomía. (Edemar O. Prado, 2022)

#### 5.- Aplicaciones en Redes Inteligentes:

- Las tecnologías de MOSFET de potencia serán fundamentales en el desarrollo de redes inteligentes y sistemas de almacenamiento de energía, optimizando la distribución y gestión de la energía eléctrica. (Edemar O. Prado, 2022)

#### 6.- Avances en la Industria Aeroespacial y de Defensa:

- Se espera una mayor utilización de MOSFET de potencia en aplicaciones aeroespaciales y militares, donde se requiere alta confiabilidad, eficiencia y resistencia a condiciones extremas. (Edemar O. Prado, 2022)

En resumen, las tecnologías de MOSFET de potencia de Si, Superión, SiC y GaN seguirán evolucionando para satisfacer las demandas de la industria de la electrónica de potencia, con un enfoque en mejorar la eficiencia, reducir costos, ampliar las aplicaciones en sectores clave y contribuir al desarrollo de sistemas de energía más sostenibles y eficientes. (Edemar O. Prado, 2022)

#### **Análisis estructural de los transistores MOSFET**

El documento "Wide Range Work Function Modulation of Binary Alloys for MOSFET Application" realizado por (Tsui, 2004) explora las características de las aleaciones binarias Ta-Pt y Ta-Ti para la aplicación de electrodos de compuerta en MOSFET. Se destaca la capacidad de modular continuamente la función de trabajo de estas aleaciones, lo que permite ajustarla desde 4,16 eV hasta 5,05 eV. Esta flexibilidad en la modulación de la función de trabajo es crucial para adaptarse a diferentes aplicaciones de dispositivos, como NMOSFETs y PMOSFETs, donde se requieren valores específicos de función de trabajo.

Se menciona que la resistividad de la aleación Pt-Ta es alta y que el estrés térmico generado por una capa gruesa de esta aleación puede producir cargas de óxido. Por lo tanto, se sugiere que una estructura de apilamiento con una capa principal de baja resistividad y bajo estrés, junto con la capa de aleación propuesta para el control de la función de trabajo, como W/Ta-Pt, es preferible para su aplicación real. Además, se discute la importancia de utilizar electrodos de compuerta con una función de trabajo cercana a la mitad de la brecha de energía del silicio para dispositivos FD-SOI, lo que resalta la ventaja de un control preciso de la función de trabajo con el sistema de aleación propuesto. (Tsui, 2004)

El estudio también revela que las aleaciones Ta-Pt y Ta-Ti son termoestables hasta 600 °C en SiO<sub>2</sub>, lo que las hace adecuadas para procesos de reemplazo de compuertas. Se observa que la modulación de la función de trabajo se logra ajustando la composición atómica de la aleación, lo que permite obtener una función de trabajo precisa para diferentes aplicaciones. Además, se discute la importancia de la estabilidad térmica de las aleaciones en relación con la reducción de tensiones térmicas y la pasivación de estados de interfaz, lo que contribuye a la estabilidad de la estructura de apilamiento de compuerta metálica y dieléctrico de alta K. (Tsui, 2004)

La utilización de una estructura apilada de W/Ta-Pt presenta varias ventajas significativas para reducir la tensión térmica y la densidad del estado de interfaz en dispositivos electrónicos. En primer lugar, la diferencia en los coeficientes de expansión térmica entre los materiales utilizados en la estructura apilada, como el tungsteno (W), platino (Pt) y tántalo (Ta), permite mitigar las tensiones térmicas generadas durante los procesos de fabricación y operación del dispositivo. Esta diferencia en los coeficientes de expansión térmica ayuda a minimizar la deformación y el estrés en la estructura, lo que contribuye a una mayor estabilidad y fiabilidad del dispositivo. (Tsui, 2004)

Además, la estructura apilada de W/Ta-Pt ofrece una combinación de capas con propiedades complementarias, donde el tungsteno actúa como el material principal conductor con una baja resistividad, mientras que la aleación Ta-Pt controla la función de trabajo. Esta combinación permite optimizar tanto la conductividad eléctrica como la función de trabajo del electrodo de compuerta, lo que resulta en un mejor rendimiento y eficiencia del dispositivo. Asimismo, al utilizar el tungsteno como capa principal conductora, se logra reducir la resistividad global de la estructura en comparación con las aleaciones Ta-Pt, lo que contribuye a una mejor respuesta eléctrica del dispositivo. (Tsui, 2004)

En resumen, el trabajo destaca la viabilidad y la versatilidad de las aleaciones binarias Ta-Pt y Ta-Ti para la modulación de la función de trabajo en aplicaciones de MOSFET. La capacidad de ajustar la función de trabajo de manera continua, la estabilidad térmica hasta 600 °C y la posibilidad de control preciso hacen de estas aleaciones una opción prometedora para su implementación en dispositivos electrónicos avanzados, ofreciendo soluciones efectivas para adaptarse a diversas necesidades de diseño y rendimiento. (Tsui, 2004)

## PREGUNTAS

1.- ¿Cuál es una ventaja significativa de utilizar una estructura apilada de W/Ta-Pt en dispositivos electrónicos?

- A) Reducción de la resistividad global
- B) Mayor generación de tensiones térmicas
- C) Mayor deformación y estrés en la estructura
- D) Mayor densidad del estado de interfaz

Respuesta correcta: A) Reducción de la resistividad global

2.- ¿Qué función desempeña el tungsteno en la estructura apilada de W/Ta-Pt en un MOSFET?

- A) Controlar la función de trabajo
- B) Actuar como aislante
- C) Aumentar la resistividad global
- D) Minimizar la deformación y el estrés

Respuesta correcta: A) Controlar la función de trabajo

3.- ¿Hasta qué temperatura son termoestables las aleaciones Ta-Pt y Ta-Ti en SiO<sub>2</sub> según el estudio?

- A) 400 °C
- B) 500 °C
- C) 600 °C
- D) 700 °C

Respuesta correcta: C) 600 °C

4.- ¿Para qué tipo de aplicaciones son ideales los MOSFET debido a su capacidad de conmutación rápida?

- A) Aplicaciones de baja velocidad
- B) Aplicaciones de alta velocidad
- C) Aplicaciones de baja potencia
- D) Aplicaciones de baja frecuencia

Respuesta correcta: B) Aplicaciones de alta velocidad.

## **PREGUNTAS**

5.- ¿Qué característica hace que los MOSFET sean útiles en aplicaciones espaciales y nucleares?

- A) Alta sensibilidad a la radiación
- B) Buena tolerancia a la radiación
- C) Baja sensibilidad a la temperatura
- D) Alta sensibilidad al voltaje

Respuesta correcta: B) Buena tolerancia a la radiación

6.- ¿Cuál es uno de los materiales comúnmente utilizados como capa metálica en la estructura básica de un MOSFET?

- A) Platino
- B) Tungsteno
- C) Aluminio
- D) Polisilicio

Respuesta correcta: C) Aluminio

7.- ¿Qué capa actúa como aislante en la estructura básica de un MOSFET?

- A) Capa metálica
- B) Capa de óxido
- C) Semiconductor (substrato)
- D) Capa de silicio dopado

Respuesta correcta: B) Capa de óxido

8.- ¿Qué material se utiliza comúnmente como semiconductor (substrato) en un MOSFET?

- A) Silicio
- B) Platino
- C) Tungsteno
- D) Aluminio

Respuesta correcta: A) Silicio

## **PREGUNTAS**

9.- ¿Cuál es la principal ventaja de utilizar una estructura apilada de W/Ta-Pt en dispositivos electrónicos en términos de rendimiento y eficiencia, según el trabajo de Tsui (2004)?

- A) Mayor generación de tensiones térmicas
- B) Reducción de la resistividad global
- C) Aumento de la deformación y el estrés en la estructura
- D) Mayor densidad del estado de interfaz

Respuesta correcta: B) Reducción de la resistividad global

10.- ¿Cuál es la importancia de la modulación continua de la función de trabajo en las aleaciones binarias Ta-Pt y Ta-Ti para aplicaciones de MOSFET, según el estudio de Tsui (2004)?

- A) Permite ajustar la resistividad global del dispositivo
- B) Facilita la generación de tensiones térmicas
- C) Permite adaptarse a diferentes aplicaciones de dispositivos
- D) Aumenta la sensibilidad a la radiación

Respuesta correcta: C) Permite adaptarse a diferentes aplicaciones de dispositivos

## **RESPUESTAS**

- 1.- A
- 2.- A
- 3.- C
- 4.- B
- 5.- B
- 6.- C
- 7.- B
- 8.- A
- 9.- B
- 10.- C

## REFERENCIAS

Izquierda, M. A. (2018). TEMA 6: TRANSISTORES. MURCIA: Universidad de Murcia.

Leobardo Hernandez Gonzalez, C. A. (2014). Simulacion de MOSFET de potencia en carburo de silicio. *CENIDET*, 20-26.

Universidad de Cantabria. (2020). *El transistor MOS estructura fisica y modelos de circuitos*. Santander: UC.

Coello, K. & Dávila, J. (2015). *Implementación de un programa de dosimetría in vivo en tratamientos de radioterapia con técnicas modernas*. 10.13140/RG.2.2.35537.63842

Gonzalez, I., Bourcier, J., Rudametkin, W., Barais, O., & Fouquet, F. (2016). Implementing multifrontal sparse solvers for multicore architectures with Sequential Task Flow runtime systems. HAL (Le Centre Pour la Communication Scientifique Directe). <https://doi.org/10.1145/0000000.0000000>

Kasap, S. O. (2017). Principles of Electronic Materials and Devices. McGraw-Hill Education.

Llamas, L. (2016). Controlar grandes cargas con Arduino y transistor MOSFET. <https://www.luisllamas.es/arduino-transistor-mosfet/>

Ortiz, C. E. (2007). MOSFET Modeling for Circuit Analysis and Design. John Wiley & Sons.

Roch, E. (2021). Principios y Funcionamientos del Mosfet. Transistores. <https://transistores.info/principios-y-funcionamientos-del-mosfet/>

Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2014). Microelectronic Circuits. Oxford University Press.