



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL



DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES DE INFORMACIÓN

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Programa de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información

DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

TEORIA Y PROBLEMAS

ING. TARQUINO SÁNCHEZ A. MBA.

POLITECNICA

NACIONAL

EDICION 2006



◀ La ciencia es el único bien del hombre, no hay éxito sin requerir un esfuerzo.



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información

DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

ING. TARQUINO SÁNCHEZ A. MBA.

QUITO, AGOSTO 2006

INDICE

CAPITULO I: NIVELES Y BANDAS DE ENERGIA

1.1. Teoría atómica de la conducción.	1
1.1.1. Teoría atómica.	1
1.1.2. Teoría de bandas de energía de los sólidos.	2
1.1.3. Estructura de los conductores según la teoría de bandas.	4
1.2. Movilidad y Conductividad.	5
1.3. Semiconductores.	7
1.3.1. Semiconductor intrínseco o puro.	7
1.3.2. Semiconductor extrínseco o dopado.	8
1.3.3. Conductividad en un semiconductor extrínseco o dopado.	9
1.3.4. Propiedades eléctricas del silicio y del germanio.	10
1.3.5. Difusión.	11

CAPITULO II: EL DIODO SEMICONDUCTOR

2.1. Unión P – N.	13
2.2. Polarización Directa.	14
2.3. Polarización Inversa.	17
2.4. Diodos Emisores de Luz.	20
2.5. Dependencia de la característica estática del diodo con la temperatura.	21
2.6. Circuito equivalente del diodo.	22
2.6.1. Diodo ideal.	23
2.6.2. Primera aproximación.	23
2.6.3. Segunda aproximación.	24
2.7. Recta de carga.	27
2.8. Problemas resueltos.	29
2.9. Problemas propuestos.	38

CAPITULO III: CIRCUITOS CON DIODOS

3.1. Recortadores de voltaje.	40
3.2. Sujetadores o fijadores de voltaje.	45
3.3. Sujetadores serie – paralelo.	48
3.3.1. Problemas resueltos.	49
3.4. Multiplicadores de voltaje.	52
3.5. Dobladores de media onda.	52
3.6. Dobladores de onda completa.	54
3.7. Multiplicadores en cascada.	55
3.8. Rectificación.	56
3.8.1. Rectificación de media onda con carga resistiva.	56
3.8.2. Componentes medias.	58
3.8.3. Componentes rms.	60
3.8.4. Eficiencia de rectificación.	63
3.8.5. Factor de rizado.	64
3.8.6. Voltaje pico inverso (V.P.I.)	65
3.9. Rectificador de onda completa.	65
3.9.1. Rectificador de onda completa con toma central.	66
3.9.2. Rendimiento de rectificación.	68
3.9.3. Factor de rizado.	68
3.9.4. Voltaje pico inverso (V.P.I.)	69

3.9.5. Angulo de Conducción.	69
3.9.6. Rectificador de Onda completa tipo puente.	69
3.10. Problemas resueltos.	71
3.11. Problemas propuestos.	75

CAPITULO IV: FILTROS

4.1. Filtros por condensador.	79
4.1.1. Filtro por condensador con rectificador de 1/2 onda.	79
4.1.2. Análisis aproximado del rizado.	82
4.1.3. Filtro por condensador con rectificador de onda completa.	85
4.1.4. Descomposición en series de Fourier.	88
4.1.5. Filtro por inductancia en serie.	91
4.1.6. Filtro L – C, o de sección L.	94
4.1.7. Filtro en L múltiple.	98
4.1.8. Filtro π .	100
4.1.9. Problemas resueltos.	102
4.1.10. Problemas propuestos.	106

CAPITULO V: REGULADORES DE VOLTAJE CON DIODOS ZENER

5.1. Diodo Zener.	108
5.2. Circuito equivalente del diodo Zener.	109
5.3. Diodo Zener como regulador de voltaje.	110
5.4. Otras aplicaciones del diodo Zener.	113
5.5. Problemas resueltos.	115
5.6. Problemas propuestos.	126

CAPITULO VI: TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNTURA (T.B.J.)

6.1. Generalidades.	127
6.1.1. Estructura y simbología.	127
6.1.2. Características de las capas semiconductoras.	128
6.1.3. Polarización del transistor.	128
6.1.4. Funcionamiento del Transistor bipolar.	129
6.1.5. Configuraciones del T.B.J.	129
6.1.6. Característica Estática del T.B.J.	131
6.1.7. Característica de amplificación de corriente.	134
6.1.8. Amplificación de voltaje.	139
6.1.9. Corrientes de fuga.	139
6.1.10. Especificaciones máximas T.B.J.	140
6.1.11. Polarización y estabilidad térmica del T.B.J.	141
6.2. Circuito de autopolarización.	144
6.2.1. Circuito de autopolarización con resistencia de emisor.	146
6.2.2. Ejercicios resueltos.	150
6.3. Circuitos equivalentes del Transistor, análisis AC.	155
6.3.1. Parámetros [Y].	155
6.3.2. Parámetros [T].	156
6.3.3. Parámetros [H].	157
6.3.3.1. Circuitos equivalentes híbridos.	157
6.3.3.2. Determinación gráfica de los parámetros [H].	158
6.3.3.3. Variación de los parámetros [H] con respecto a la corriente de colector y a la temperatura.	160

6.3.3.4. Análisis del T.B.J. para pequeña señal.	161
6.3.3.5. Relación entre h_{fe} y β	172
6.3.3.6. Expresiones de ganancia de corriente y voltaje usando parámetros [T] del transistor.	172
6.3.3.7. Cálculo de los capacitores	174
6.4. Recta de carga dinámica y estática para la configuración en emisor común.	175
6.4.1. Análisis de DC.	176
6.4.2. Rectas de carga dinámicas (AC).	176
6.5. Amplificador en colector común.	185
6.5.1. Análisis con parámetros [T]	187
6.6. Amplificador en base común.	188
6.7. Propiedades de las configuraciones.	194
6.8. Problemas resueltos.	196
6.9. Problemas propuestos.	201
CAPITULO VII: TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO (FET)	
7.1. Transistor de efecto de campo de juntura (JFET)	203
7.1.1. Construcción de JFET de canal N.	203
7.1.2. Funcionamiento.	204
7.1.3. Características del drenador.	206
7.1.4. Características del drenador del JFET.	207
7.1.5. Características de transferencia del JFET.	207
7.1.6. Polarización y rectas de carga del JFET.	208
7.1.7. Circuito con autopolarización.	210
7.1.8. Circuito equivalente (AC) del JFET.	213
7.1.9. Configuraciones de amplificadores con FET.	216
7.1.10. Análisis de pequeña señal (análisis AC).	217
7.1.11. Problemas resueltos.	221
CAPITULO VIII: APLICACIONES DE LOS TRANSISTORES BIPOLARES EN CONDICIONES NO LINEALES	
8.1. Modos de conducción.	224
8.1.1. Modo de conducción NO.	225
8.1.2. Modo de conducción SI.	227
8.2. Respuesta transitoria.	228
CAPITULO IX: AMPLIFICADOR OPERACIONAL	
9.1. Amplificador operacional básico	230
9.1.1. Amplificador diferencial con entrada de un solo extremo	231
9.1.2. Operación con entrada diferencial	233
9.2. Amplificador operacional ideal	234
9.2.1. Características del amplificador operacional ideal	235
9.2.2. Método de análisis	236
9.2.3. El amplificador inversor	236
9.2.4. El amplificador no inversor	240
9.3. Resistencia de entrada de un circuito amplificador operacional con retroalimentación.	244
9.3.1. Entradas combinadas invertida y no invertida	245
9.4. Amplificaciones lineales con amplificadores operacionales	246

9.4.1.	Multiplicador de ganancia constante inversor	246
9.4.2.	Amplificador no inventor	246
9.4.3.	Seguidor unitario	247
9.4.4.	Diferencial	247
9.4.5.	Circuito de impedancia negativa	247
9.4.6.	Circuito diferenciador o derivador	248
9.4.7.	Circuito integrador	250
9.5.	Amplificador operacional práctico	252
9.5.1.	Introducción	252
9.5.2.	Ganancia de tensión en lazo abierto	253
9.5.3.	Tensión de desplazamiento en la entrada	253
9.5.4.	Corriente de polarización de entrada	254
9.5.5.	Corriente de desplazamiento	255
9.5.6.	Rechazo en modo común	258
9.5.7.	Razón de rechazo en modo común	259
9.5.8.	Desplazamiento de fase	259
9.5.9.	Razón de cambio	259
9.5.10.	Modelo mejorado para el amplificador operacional	260
9.5.11.	Resistencia de salida	261
9.6.	Aplicaciones no lineales de los amplificadores operacionales	261
9.6.1.	Amplificador operacional como comparador de tensiones	262
9.6.2.	Disparadores de Schmitt	262
9.6.3.	Disparador de Schmitt inversor	264
9.6.4.	Caso general	265
9.6.5.	Detector de cruce de cero	266
9.6.6.	Detector de pico	267
9.6.7.	Rectificador de precisión	268
9.6.7.1.	Rectificador inversor de media onda	268
9.6.7.2.	Rectificador de onda completa	270
9.6.8.	Aestable	271
9.6.9.	Monoestable	272
9.6.10.	Circuito limitador de amplitud	273
9.6.10.1.	Limitador de amplitud simétrico	273
9.6.11.	Aplicación	276
9.6.11.1.	Generador de funciones	276
9.6.11.2.	Circuito generador de onda cuadrática	277
9.7.	Amplificador operacional real	277
9.7.1.	Empaque de los amplificadores operacionales	277
9.7.2.	Requerimiento de potencia	278
9.7.3.	Amplificador operacional 741	279
9.8.	Problemas resueltos	279
9.9.	Problemas propuestos	285

CAPITULO X: ELEMENTOS DE CUATRO CAPAS

10.1	El Tiristor.	297
10.1.1	La familia de los triostores	297
10.2	El tiristor SCR	297
10.2.1	Estructura y símbolo	297
10.2.2	El SCR bajo tensión	298
10.2.3	El SCR bajo tensión directa	298
10.2.4	Cómo se activa el tiristor	300
10.2.5	Curva característica del SCR	301

10.2.6	Definición de símbolos	303
10.2.7	Efectos de la variación de i y v	305
10.2.7.1	La derivada de la tensión	305
10.2.7.2	La derivada de la corriente	308
10.2.8	Formas de apagado del SCR	307
10.2.8.1	Interrupción de la corriente de ánodo	307
10.2.8.2	La técnica de conmutación forzada	307
10.2.9	Aplicaciones del SCR.	308
10.2.9	Interruptor estático	308
10.3	El Triac	309
10.3.1	Definición	309
10.3.2	Activado del TRIAC	310
10.4	Tipos de disparo de tiristores	311
10.4.1	Disparo en corriente continua	312
10.4.2	Disparo en corriente alterna	313
10.4.3	Disparo por impulsos o trenes de ondas	314
10.4.3.1	Disparo por impulso único	314
10.5	Circuitos de disparo de tiristores y Triacs	314
10.5.1	Circuito de disparo RC	315
10.5.2	Disparo por UJT	316
10.5.2.1	Determinación práctica del circuito	317
10.5.2.2	Sincronización del UJT	318
10.5.3	Disparo mediante SAS y SBS	319
10.5.4	Disparo por DIAC	320
10.6	Problemas resueltos	321
10.7	Problemas propuestos	332
XI: OPTOELECTRÓNICA		
11.1.	Introducción	335
11.1.1.	El flujo luminoso	336
11.1.2.	La intensidad luminosa	336
11.2.	Dispositivos detectores de luz	336
11.2.1.	El fotodiodo	337
11.2.1.1.	Aplicaciones	338
11.2.2.	Celdas fotoconductoras	339
11.2.2.1.	Aplicaciones	341
11.2.3.	Fototransistores	342
11.2.3.1.	Aplicaciones	343
11.2.4.	SCR activado por luz	343
11.2.4.1.	Aplicaciones	344
11.3.	Dispositivos emisores de luz	344
11.3.1.	Led	344
11.3.1.1.	Aplicaciones	345
11.3.2.	Emisores infrarrojos	345
11.3.2.1.	Aplicaciones	346
11.4.	Acopladores ópticos	346
11.4.1.	Combinación IRED-Fototransistor	347
11.4.2.	Combinación IRED-Fotodarlington	347
11.4.3.	Combinación IRED-LASCR y IRED-Triac	347
11.4.4.	Combinación IRED-Triac-Triac	348
11.4.5.	Ejemplo de aplicación	348
11.5.	Problemas resueltos	349

11.6. Problemas propuestos 353

Anexo 355

Bibliografía 359

1.1. Introducción 363

1.2. Objetivos 364

1.3. Estructura del curso 365

1.4. Metodología 366

1.5. Evaluación 367

1.6. Bibliografía 368

2.1. Señales eléctricas 370

2.2. Señales periódicas 371

2.3. Señales no periódicas 372

2.4. Señales complejas 373

2.5. Operaciones con señales 374

2.6. Ejercicios 375

3.1. Ley de Ohm 377

3.2. Leyes de Kirchhoff 378

3.3. Energía y potencia 379

3.4. Ejercicios 380

4.1. Ley de Ohm 382

4.2. Leyes de Kirchhoff 383

4.3. Energía y potencia 384

4.4. Ejercicios 385

5.1. Ley de Ohm 387

5.2. Leyes de Kirchhoff 388

5.3. Energía y potencia 389

5.4. Ejercicios 390

6.1. Ley de Ohm 392

6.2. Leyes de Kirchhoff 393

6.3. Energía y potencia 394

6.4. Ejercicios 395

7.1. Ley de Ohm 397

7.2. Leyes de Kirchhoff 398

7.3. Energía y potencia 399

7.4. Ejercicios 400

8.1. Ley de Ohm 402

8.2. Leyes de Kirchhoff 403

8.3. Energía y potencia 404

8.4. Ejercicios 405

9.1. Ley de Ohm 407

9.2. Leyes de Kirchhoff 408

9.3. Energía y potencia 409

9.4. Ejercicios 410

10.1. Ley de Ohm 412

10.2. Leyes de Kirchhoff 413

10.3. Energía y potencia 414

10.4. Ejercicios 415

11.1. Ley de Ohm 417

11.2. Leyes de Kirchhoff 418

11.3. Energía y potencia 419

11.4. Ejercicios 420

Introducción

El presente libro obedece a la necesidad propuesta por los estudiantes de las carreras de Ingeniería en Electrónica y Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional, de contar con una obra que resuma los conceptos básicos, análisis y ejercicios propuestos y resueltos de circuitos que utilizan dispositivos electrónicos, además considera algunos criterios básicos de circuitos electrónicos en donde se involucra dispositivos tales como los diodos semiconductores, circuitos con diodos, rectificadores, filtros, reguladores de voltaje DC. de baja potencia, amplificadores con transistores bipolares de juntura, amplificadores con transistores de efecto de campo, y amplificadores con amplificadores operacionales, en su segunda parte trata temas relacionados con los elementos de 4 capas como los tiristores, SCR, UJT, PUT y sus respectivos circuitos de disparo. Finalmente este documento expone temas relacionados con la opto electrónica, en la cual se divide en tres: circuitos emisores de luz, detectores de luz y los opto acopladores.

Este libro esta dedicado a los estudiantes de la Escuela Politécnica Nacional, fruto de largas horas de dedicación a la docencia e investigación en temas relacionados con la Electrónica.

*Tarquino Sánchez Almeida
Autor.*

CAPÍTULO

1 NIVELES Y BANDAS DE ENERGÍA



1.1. TEORÍA ATÓMICA DE LA CONDUCCIÓN

En esta sección trataremos de dar una revisión de las propiedades básicas de la materia, con el propósito de obtener una explicación lo suficientemente satisfactoria a los fenómenos moleculares asociados con la conducción en los metales, semiconductores y aislantes.

1.2. TEORÍA ATÓMICA

El modelo que Rutherford sugiere para los átomos, a pesar de ser poco exacto, es bastante útil para describir ciertas características de los mismos:

El átomo consta de dos partes, el núcleo y los orbitales. En el núcleo, que contiene casi toda la masa del átomo, se encuentran los protones (de carga positiva) y los neutrones (cuya carga es nula); en tanto que girando en los orbitales alrededor del núcleo, se encuentran los electrones (de carga negativa). En un átomo neutro y estable, existen igual número de protones y electrones, lo que da como resultado un cuerpo cuya carga neta es cero. Para conseguir la estabilidad del átomo, es decir, para que no enfrentarse a la ambigüedad de que los electrones caigan al núcleo debido a la diferencia de polaridad, se debía suponer que el electrón poseía una energía cinética determinada que le permitiría estar a una distancia dada del núcleo, o en otras palabras, el electrón debía poseer una energía total igual a la suma de su energía potencial eléctrica (debida a su posición respecto al núcleo) y su energía cinética (adquirida por su velocidad).

Según la teoría clásica, el electrón debía moverse aceleradamente alrededor de su respectivo núcleo, radiando así energía de forma continua. Al estar el electrón perdiendo su energía, se iría acercando cada vez más al núcleo, hasta llegar al punto crítico de que el electrón pasaba también a formar parte de él junto con los protones y neutrones. Esta falla en la teoría fue superada por el principio de exclusión de Pauli, que dice: Dos electrones no pueden ocupar o tener el mismo nivel de energía si están en el mismo átomo o aunque fueren de unos diferentes. De este principio, y otras investigaciones se concluyó que la energía del electrón en el átomo es discreta o cuantizada. El átomo se encuentra en un modelo normal o no excitado cuando todos sus electrones ocupan los diferentes estados energéticos permitidos.

ESTRUCTURA ELECTRÓNICA DE LOS ELEMENTOS

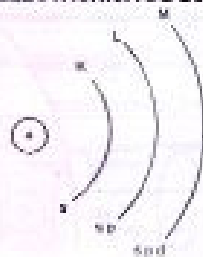


Figura 1.1 Modelo de Rutherford

NIVELES	SUBNIVELES
K: 2 e ⁻	s: 2 e ⁻
L: 8 e ⁻	s: 2 e ⁻
	p: 6 e ⁻
M: 18 e ⁻	s: 2 e ⁻
	p: 6 e ⁻
	d: 10 e ⁻
N: 32 e ⁻	s: 2 e ⁻
	p: 6 e ⁻
	d: 10 e ⁻
	f: 14 e ⁻

Tabla 1.1 Niveles energéticos de un átomo

Los electrones que se encuentran en la última capa de un átomo de un determinado elemento son llamados electrones de valencia, y son los que determinan las propiedades físicas y químicas del material en cuestión que son de nuestro interés, como la conductividad eléctrica, la estructuración cristalina, etc. Con estos criterios preliminares, podemos ahora dedicarnos al estudio de dos materiales semiconductores: el silicio y el germanio.

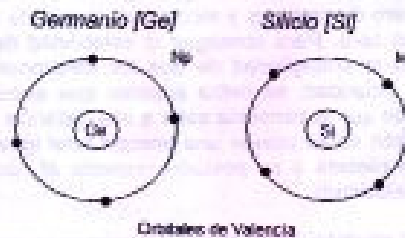


Figura 1.1 Modelos de Rutherford para el Germanio y Silicio

Es de importancia notar que ambos elementos el último nivel correspondiente esta semi-lleno, es decir, tiene solo la mitad de electrones de los que son capaces de recibir.

1.1.2. TEORÍA DE LAS BANDAS DE ENERGÍA DE LOS SÓLIDOS

La siguiente figura es la representación unidimensional de las bandas de energía para el germanio.

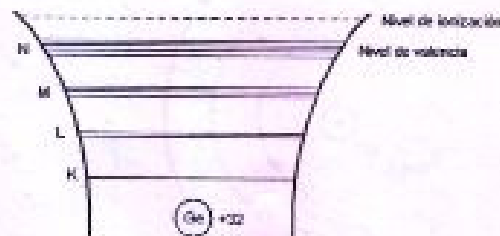


Figura 1.2 Bandas de energía para el Germanio

Si de alguna manera el átomo recibe energía, los electrones de la capa de valencia – nivel n , subnivel p pueden pasar a una capa de mayor valor energético, como el subnivel d o el f , llamados también niveles de excitación. Si la energía entregada al átomo supera determinado valor, el electrón pasa a un nivel de ionización, en el cual el electrón se independiza totalmente de la acción electromagnética que pueda ejercer el núcleo sobre él.

Cuando se encuentra dos átomos muy próximos entre sí, formando un enlace covalente, se produce un desdoblamiento de los niveles de energía, al cual se lo aprecia en la siguiente figura:

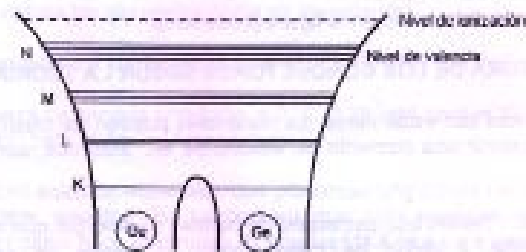


Figura 1.3 Desdoblamiento de los niveles de energía para el Germanio

Este fenómeno se explica con el principio de exclusión de Pauli, puesto que se ve de manera clara que dos electrones no pueden ocupar el mismo nivel energético a la vez, y que mas bien un mismo electrón es capaz de ser compartido entre dos átomos cuando entre los dos existe un nivel de energía común.

Si entendemos el análisis de dos átomos a un conjunto más complejo, como una red cristalina de germanio, vemos que se produce un desdoblamiento uniforme a lo largo de toda la red, y ya no se hablará de niveles de energía, sino de bandas de energía.

Banda de Conducción: Constituye el desdoblamiento de los niveles de excitación de los átomos.

Banda de Valencia: Es el desdoblamiento de los niveles de valencia de los átomos individuales.

Banda Prohibida: Es la región comprendida entre las dos bandas anteriores, y que no puede ser ocupada en ningún instante por los electrones.

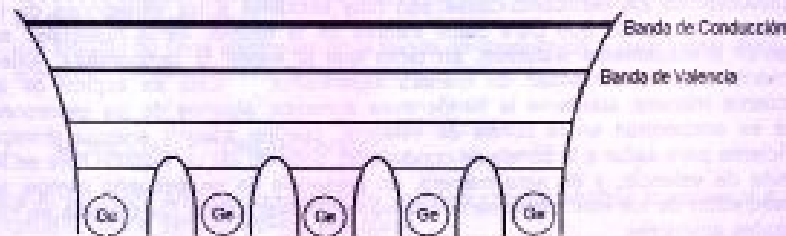


Figura 1.4 Representación de las Bandas de Conducción y Valencia.

Si la banda de valencia está llena, es muy fácil que los electrones pasen de la banda de conducción con la presencia de un campo electromagnético externo que sea lo suficientemente intenso para arrancar los electrones de la banda inferior y llevarlos a la banda superior, y después, debido también a la acción del campo se producirá el movimiento de los electrones a lo largo de la banda de conducción.

Cuando los electrones pasan de la banda de valencia a la banda de conducción, dejan huecos o espacios libres en la banda de valencia, los mismos que pueden ser llenados por electrones vecinos que se encuentran en la misma banda, y así se produce la movilización de los electrones en la banda de valencia.

Todo esto puede ser observado en la figura precedente.

1.1.3. ESTRUCTURA DE LOS CONDUCTORES SEGÚN LA TEORÍA DE BANDAS

De acuerdo entonces con estas ideas, los materiales pueden ser clasificados según su capacidad de conducir una corriente de electrones en: aislantes, semiconductores y conductores.

- **Conductores:** Tienen una estructura de bandas de energía que no presenta una región prohibida, o dicho de mejor forma, la banda de conducción está parcialmente superpuesta a la banda de valencia (Figura 1.5). Los electrones en un material de este tipo, bajo la influencia de un campo eléctrico, pueden adquirir una energía adicional y constituir una corriente considerable. Ejemplos de conductores son la plata, el cobre, el plomo, el níquel y el cromo, con $10^8 < G < 10^9$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹.

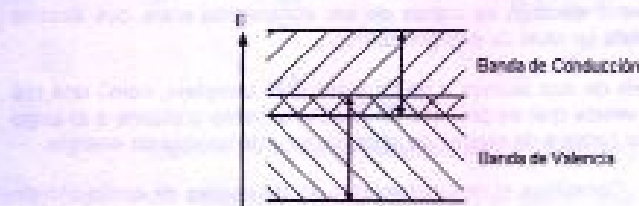


Figura 1.5 Representación de las bandas de Energía de un elemento Conductor

- **Semiconductores:** Se denominan como tales a las sustancias cuya anchura en la región de energía prohibida es relativamente pequeña, esto es, 1 [eV] aproximadamente. Los materiales semiconductores de mayor importancia son el Germanio y el Silicio, como se ha venido indicando. Las características de conducción de los semiconductores son muy sensibles a las variaciones de la temperatura, puesto que para bajos valores de la misma, estos materiales se vuelven prácticamente aislantes, en tanto que al elevar la temperatura, estos aumentan su conductividad de manera significativa. Esto se explica de la siguiente manera: conforme la temperatura aumenta, algunos de los electrones que se encuentran en la banda de valencia, pueden adquirir energía térmica suficiente para saltar a la banda de conducción, dejando así un espacio libre en la banda de valencia, y de esta manera, en presencia de un pequeño campo, la movilización de los electrones sería relativamente fácil, como fue descrita en los párrafos anteriores.

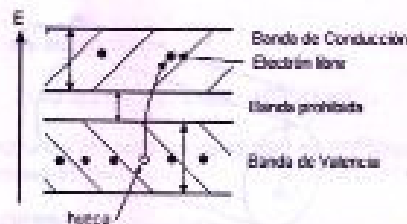


Figura 1.6 Representación de las bandas de Energía de un elemento Semiconductor

Téngase en cuenta los siguientes datos de importancia:

Conductividad para los semiconductores: $10^{-10} < G < 10^3 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$.

Ancho de banda de energía prohibida, a 0 °C: 1.21 [eV] para el Si, 0.78 [eV] para el Ge, y 1.82 [eV] para el AsGa (Arseniuro de Galio).

- **Aislantes:** Son aquellos materiales que presentan una banda de energía prohibida de considerable amplitud; de tal manera que solo energías en extremo altas podrían hacer saltar a los electrones de una banda a otra para crear la conducción.



Figura 1.7 Representación de las bandas de Energía de un Aislante

El vidrio, el diamante, el SiO_2 , el polietileno, así como el teflón, son materiales aislantes, y su conductividad se encuentra en el rango $10^{-20} < G < 10^{-3} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$.

RESUMEN

- Mientras más ancha es la banda de energía prohibida, más energía se necesita para lograr la conducción.
- Para que un material presente características de conductividad, debe tener electrones excitados en la banda de conducción.
- Un semiconductor debe presentar electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia.
- Un aislante no tiene electrones en la banda de conducción, y para lograr dicho efecto, es necesario elevar la temperatura.

1.2. MOVILIDAD Y CONDUCTIVIDAD

Para el siguiente análisis consideremos un conductor de sección transversal A y de longitud L , donde existen N electrones libres.

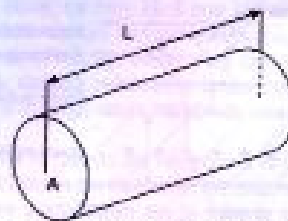


Figura 1.8 Sección transversal de longitud L y área A

Se define como densidad de corriente de conducción a la siguiente relación:

$$j = \frac{I}{A} \quad \text{(Ecuación 1.1)}$$

Donde,

$$j = \frac{q_c}{t} = \frac{Ne}{t} \quad \text{(Ecuación 1.2)}$$

Y por lo tanto,

$$j = \frac{Ne}{At} = \frac{Ne \cdot v}{LA} \quad \text{(Ecuación 1.3)}$$

donde v es la velocidad promedio del electrón en el material. Puesto que se define como concentración de electrones a la relación $n = \frac{N}{LA}$, obtenemos:

$$j = nev = \rho \cdot v \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad \text{(Ecuación 1.4)}$$

En ausencia de un campo eléctrico los electrones se mueven desordenadamente, de tal manera que los flujos de los mismos en todas las direcciones se anulan entre sí, es decir:

$$I_{\text{net}} = 0 \quad \text{(Ecuación 1.5)}$$

Y por el contrario, en presencia de un campo eléctrico, el movimiento de la carga será en una dirección privilegiada, con una velocidad promedio no infinita debida a los choques de los electrones con, los átomos vecinos.

Si E es la intensidad del campo eléctrico, obtenemos de la relación $F = q \cdot E$, que la aceleración de los electrones es $a = \frac{eE}{m}$. Sabemos que $v = at$ es la velocidad que adquieren los electrones hasta chocarse, por lo que resulta claro que la velocidad de los mismos es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético, es decir, $v = \mu \cdot E$. A la constante de proporcionalidad μ se la conoce como movilidad de los electrones. Entonces:

$$j = ne \cdot v = ne \cdot \mu E = \sigma \cdot E \quad \text{(Ecuación 1.6)}$$

La constante recibe el nombre de conductividad, y su inverso $\rho = \frac{1}{\sigma}$ es la resistividad del material.

Conductividad de diferentes elementos:

- Cu $10^8(\Omega.m)^{-1}$, Si $2 \times 10^{-3}(\Omega.m)^{-1}$ y mica $10^{-18}(\Omega.m)^{-1}$.

La concentración de electrones (n) para un conductor es 10^{23} [electrones/m³] y para un aislante es de 10^7 [electrones/m³].

1.3. SEMICONDUCTORES

Los semiconductores son elementos que ocupan el IV grupo de la tabla periódica, y por tanto, tienen 4 electrones de valencia. Esta característica les permite formar una estructura geométrica periódica llamada estructura monocristalina cuando se agrupan un número suficiente de átomos de la misma especie.

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb
Tl	Pb	Bi

Tabla 1.2 Elementos de la tabla Periódica pertenecientes a al III A, IV A y V A

1.3.1. SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO O PURO

Es un semiconductor cuya estructura cristalina es pura, es decir, que alrededor de cada átomo de Si, por ejemplo, se encuentran ligados por medio de enlaces covalentes 4 átomos de igual género.

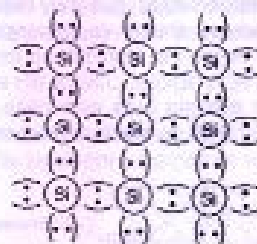


Figura 1.9 Estructura cristalina del Silicio

Es posible que los electrones así dispuestos absorban energía del exterior a partir de causas "naturales", como energía térmica, energía luminosa, etc. Si esto sucede, los electrones se liberan del enlace y pasan a formar parte de un mar de electrones libres, dejando atrás un hueco que eventualmente podría ser ocupado por un electrón vecino. Este hecho recibe el nombre de generación del par electrón-hueco.

Para un semiconductor: n es la concentración de electrones libres, mientras que p es la concentración de huecos. Si el semiconductor es puro, se cumple que $n = p = n_i$, donde n_i es la concentración intrínseca.

De la ecuación $j = n_e \mu E$ y puesto que $\sigma = \frac{j}{E}$ se obtiene:

$$j = n_e \mu_n E + p_e \mu_p E = n_e \mu E (\mu_n + \mu_p) \quad \text{(Ecuación 1.7)}$$

1.3.2. SEMICONDUCTOR EXTRÍNSICO O DOPADO

Si a un cristal puro como los descritos anteriormente ($\sigma = n_e \mu (\mu_n + \mu_p)$), se le añade de manera uniforme cierto tipo de impurezas (como átomos pentavalentes o trivalentes), lo que se obtiene es un semiconductor dopado. Estas impurezas que se agregan es tan solo la proporción de 1 en 10^7 átomos de cristal puro, pueden alterar las bandas de energía de la estructura lo suficiente para cambiar totalmente las propiedades eléctricas del cristal. Hay dos materiales extrínsecos de importancia: el semiconductor tipo n y el semiconductor tipo p.

- **Semiconductor tipo n:** Es fabricado añadiendo a una red cristalina pura, de Germanio o Silicio, elementos que tengan 5 electrones de valencia, tales como el Antimonio, Arsénico, Fósforo, etc.

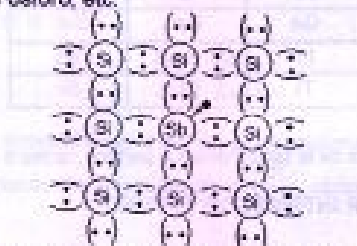


Figura 1.10 Estructura de Silicio dopada con el Sb.

Como se observa en la figura, hay un quinto electrón adicional del Sb que no está formando un enlace covalente particular, que muy fácilmente puede transformarse en electrón libre. Puesto que el átomo de impureza insertado ha donado un electrón a la estructura, se lo denomina átomo donante.

Al analizar los diagramas de energía para este caso, es posible observar que la banda prohibida para los electrones es significativamente menor.

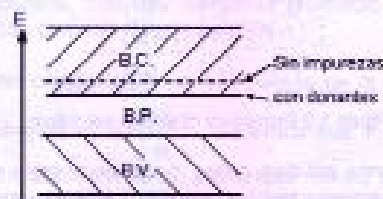


Figura 1.11 Diagrama de bandas de energía de un semiconductor

El resultado es que, a temperatura ambiente, hay un gran número de electrones en el nivel de conducción, por lo que la conductividad del material aumenta. Los electrones libres son en este caso llamados portadores mayoritarios, en tanto que los huecos que eventualmente se producen son llamados portadores minoritarios.

- **Semiconductores tipo p:** Se crean añadiendo átomos que tengan tres electrones de valencia (como el Boro, Galio, etc.) a una base de Silicio o Germanio puro.

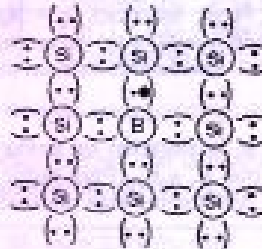


Figura 1.12 Semiconductor formado de Silicio Puro añadiendo Boro

Puesto que la impureza agregada es capaz de aceptar un electrón, se le denomina átomo aceptor. Resulta evidente además que los portadores mayoritarios son los huecos, en tanto que los minoritarios serán los electrones libres.

En el diagrama de energías se obtiene lo siguiente:

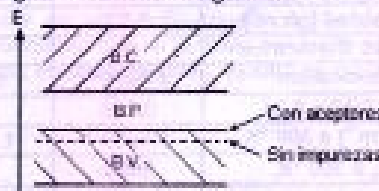


Figura 1.13 Diagrama de Bandas de energía de un átomo aceptor

O en palabras, añadir impurezas aceptoras, aparece justo por encima de la banda de valencia un nivel discreto de energía permitido, llamado nivel del aceptor, que permite la reducción de la banda prohibida de manera considerable.

1.3.3. CONDUCTIVIDAD EN UN SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO O DOPADO

En el equilibrio térmico se cumple la conocida relación de acción de masas: $n \cdot p = n_i^2$. Al aumentar la temperatura (T), la siguiente ecuación es válida:

$$n_i^2 = A_0 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \tag{Ecuación 1.8}$$

Donde:

- T es la temperatura absoluta,
- A_0 es una constante dependiente del material,
- E_g es la energía necesaria para romper el enlace covalente,
- k es la constante de Boltzman.

Sean N_d la concentración de átomos donantes y N_a la concentración de átomos aceptores. Entonces $N_d + p$ será la concentración total de cargas positivas y $N_a + n$ negativas en el semiconductor dopado.

Puesto que un material semiconductor es eléctricamente neutro, se cumple que $N_A + p = N_D + n$.

En el semiconductor tipo n: $N_D = 0$, entonces $n_i = N_A + p_i$. Como p representa a los portadores minoritarios, se tiene que $N_A \gg n_i$. Si queremos averiguar la concentración de huecos en el material tipo n, sustituimos esta aproximación en la ley de acción de masas: $p_i = n_i^2 / N_A$.

En el semiconductor de tipo p, la situación es similar: $N_D = 0$, entonces $p_i = N_D + n_i$. Puesto que $p_i \gg n_i$, se tiene que $N_D \approx p_i$. Para hallar la concentración de electrones libres en el material de tipo p, sustituimos este resultado en la ley de acción de masas para obtener:

$$n_i = n_i^2 / N_D \quad \text{(Ecuación 1.9)}$$

1.3.4. PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL SILICIO Y DEL GERMANIO

PARÁMETRO	Ge	Si
Nº Atómico	32	14
Peso Atómico	78.6	28.1
Densidad [g/cm ³]	5.32	2.33
Const. Dieléctrica	16	12
Átomos/cm ³	4.4×10^{22}	5×10^{22}
Eg [eV] a 0 °K	0.785	1.21
Ni [cm ⁻³] a 300 °K	2.5×10^{13}	1.5×10^{10}
μ_n a 300 °K	3800	1300
μ_p a 300 °K	1800	500
Const. de dif. De n	99	34
Const. de dif. De p	47	13

Tabla 1.3. Valores de las propiedades eléctricas del Si y Ge

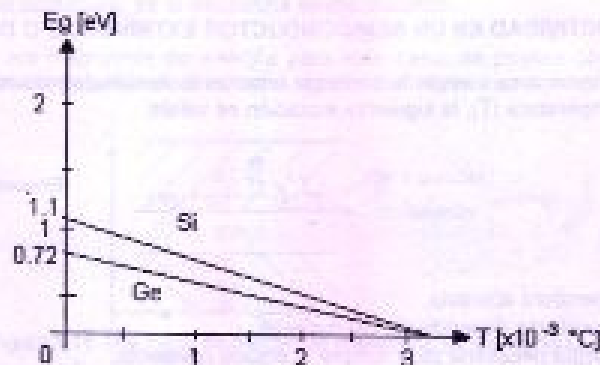


Figura 1.14 Curva de relación entre la energía del Si y Ge en variación a la temperatura

Entre otras propiedades podemos contar con una función que relaciona Eg con la Temperatura:

Ge	$E_g(T) = 0.785 - 2.23 \times 10^{-4} T$
	$E_g(300 \text{ }^\circ\text{K}) = 0.72 \text{ [eV]}$
Si	$E_g(T) = 1.21 - 3.6 \times 10^{-4} T$
	$E_g(300 \text{ }^\circ\text{K}) = 1.1 \text{ [eV]}$

Tabla 1.4 Relación de la E_g teniendo como parámetro de variación la Temperatura.

La constante de movilidad también cambia con la temperatura, de acuerdo con una función del tipo T^{-n} . Para un intervalo de $100 \text{ }^\circ\text{K} < T < 400 \text{ }^\circ\text{K}$, se tienen los siguientes valores de m :

Si: $m_n = 2.5$ y $m_p = 2.7$
Ge: $m_n = 1.66$ y $m_p = 2.33$

Tabla 1.4 Constante de movilidad en función de la Temperatura que varía de $100 \text{ }^\circ\text{K} < T < 400 \text{ }^\circ\text{K}$

1.3.5. DIFUSIÓN

El transporte de carga en un semiconductor no se realiza solamente por el arrastre de los electrones, sino también por un mecanismo denominado difusión. La concentración de partículas en un semiconductor no es uniforme, ésta varía de acuerdo con la posición, razón por la cual también variará la concentración de huecos (o bien de electrones libres), en otras palabras, existirá un gradiente de la densidad de portadores $\frac{d\phi}{dx}$.

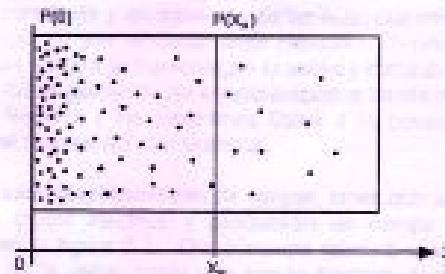


Figura 1.15 Concentración de huecos en un semiconductor con variación de la posición

Sea $j_{p,dif}$ la densidad de corriente de huecos de difusión. Donde D_p es la constante de difusión de huecos [m^2/s].

$$j_{p,dif} = -eD_p \frac{d\phi}{dx} \left[\frac{A'}{s} \right] \quad \text{(Ecuación 1.10)}$$

Puesto que esta constante de difusión y la movilidad son números estadísticos, es posible relacionarlos entre sí:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T = \frac{kT}{e} = \frac{T}{11600} \quad \text{(Ecuación 1.11)}$$

En esta expresión:

- V_T recibe el nombre de voltaje térmico,
- k es la constante de Boltzman,
- T la temperatura absoluta y
- e la carga del electrón.

De esta manera, las densidades de corrientes totales para huecos y electrones libres quedan determinadas respectivamente por las ecuaciones 12 y 13:

Para un semiconductor tipo p:

$$j_p = e\mu_p pE - eD_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{Ecuación 1.12})$$

Para un semiconductor tipo n:

$$j_n = e\mu_n nE + eD_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{Ecuación 1.13})$$

Parámetro	Descripción
I_B	Corriente de base
I_C	Corriente de colector
I_E	Corriente de emisor
β	Ganancia de corriente
$I_C = \beta I_B$	Relación de corrientes



El gráfico muestra la relación entre la corriente de base (I_B) y la corriente de colector (I_C). La ganancia de corriente β es constante, lo que indica un comportamiento lineal del transistor en esta región de operación.