

Elementos Activos Semiconductores

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Elementos Activos
Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez
Semestre II-2019

Tabla de Contenidos

Tema 1. Fundamentos de Semiconductores

Clase 1: Semiconductores Intrínsecos	3-24
Clase 2: Teoría de Bandas de Energía	25-46
Clase 3: Semiconductores Extrínsecos	47-72
Clase 4: Arrastre y Difusión	73-92

Tema 2. Contactos M-S y S-S

Clase 5: Deformación de Bandas	93-112
Clase 6: Contactos M-S	113-131
Clase 7: Contactos S-S: Unión PN	132-153

Tema 3. El Diodo

Clase 8: El Diodo: Modelos CD y CA	154-173
Clase 9: El Diodo: Aplicaciones I	174-189
Clase 10: El Diodo: Aplicaciones II	190-202

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

2

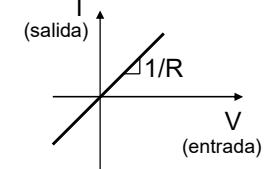
Clase 1 Semiconductores Intrínsecos

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Elementos Activos
Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez
Semestre II-2019

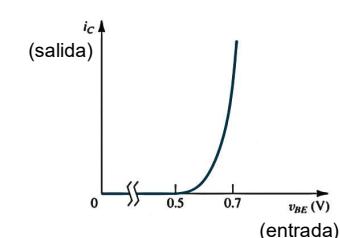
Elementos pasivos y activos

- Elementos pasivos: no controlan el flujo de corriente
 - Dispositivos lineales
 - Corriente de salida es proporcional a tensión de entrada

Parameter	Resistance (R)	Capacitance (C)	Inductance (L)
Symbol			
Equation	R	$\frac{1}{j\omega C}$	$j\omega L$



- Elementos activos: controlan el flujo de corriente
 - Dispositivos no lineales
 - Amplificación
 - Rectificación
 - Regulación
 - Interruptores



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

4

Clasificación de los Elementos

- Los elementos se agrupan de acuerdo a las propiedades metálicas como metales, no metales o semiconductores (metaloïdes).

Periodo	1A	2A	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B								
Grupo →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																He	
2	Li	Be																
3	Na	Mg																
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	
5	Rb	Sr	Y	Zr	41	42	43	44	45	46	47	48	In	Sn	51	52	I	
6	Cs	Ba	Hf	Ta	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	Xe	
7	Fr	Ra	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	
Lantánidos	57	58	59	Pr	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
Actinídos	89	90	91	U	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

5

Semiconductores

- Conductividad $\sigma = 10^{-6} \dots 10^{-2}$ S/cm
- Semiconductores elementales:
 - Elementos semiconductores más importantes: silicio y germanio (grupo IV de tabla periódica)
 - Compuestos binarios:
 - Compuestos III-V: AlP, AlAs, GaN, GaP, **GaAs**, InAs, InP
 - Compuestos II-VI: ZnO, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe
 - Compuestos ternarios: **AlGaAs**, GaAsP, HgCdTe, etc.
 - Compuestos cuaternarios: InGaAsP, AlGaNAs, etc.
 - Aleaciones: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$
- Aplicaciones:
 - Transistores, circuitos integrados: Si, SiGe, GaAs
 - Diodos emisores de luz (LEDs): GaAs, GaN, GaP
 - Lasers (AlGaInAs, InGaAsP, GaAs, AlGaAs)
 - Detectores lumínicos (Si, InGaAsP, CdSe, InSb, HgCdTe)

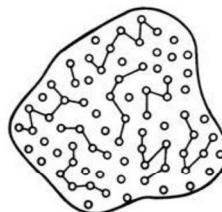
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

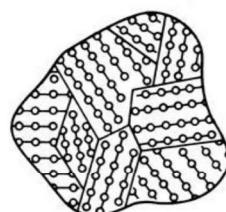
6

Sólidos Cristalinos

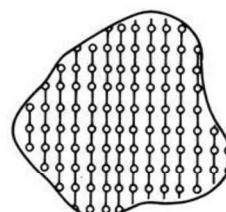
Clasificación de sólidos: amorfos, policristalinos y cristalinos



Sólidos amorfos:
átomos no siguen
ningún orden, no
forman estructura
ordenada regular



Policristalinos:
segmentos cristalinos,
no estructura regular
en todo el material



Sólidos cristalinos:
átomos forman una
estructura regular en
todo el material

El grado de cristalinidad determina propiedades y aplicación del material

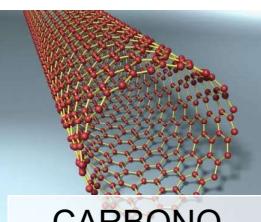
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

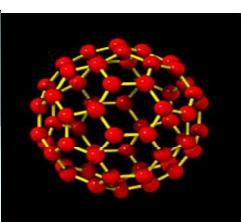
7

Consecuencias de la Cristalinidad

El grado de cristalinidad de un sólido creado a partir de un mismo elemento determina sus características



CARBONO



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

8

Semiconductores Cristalinos

- Semiconductores utilizados principalmente en estado cristalino
 - Material ultrapuro
 - Ordenamiento regular de átomos en todo el cristal
- Silicio:
 - Semiconductor dominante en microelectrónica
 - Abundancia (28% del peso de la corteza terrestre)
 - Posibilidad de obtención de material de alta pureza
 - 99.999999% para silicio de grado semiconductor
 - Excelentes propiedades aislantes de SiO_2



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

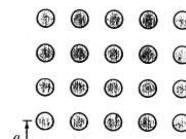
ITCR - Elementos Activos

9

Celdas Unitarias

- La celda unitaria es una porción del cristal que puede ser utilizada para replicar la totalidad del cristal original completo.
 - No son necesariamente únicas: para un mismo cristal pueden existir distintas celdas unitarias con diferentes geometrías.
 - Celda unitaria primitiva: la mínima celda unitaria posible.

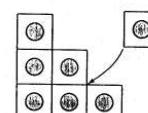
En dos dimensiones



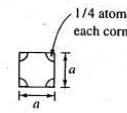
(a)



(b)

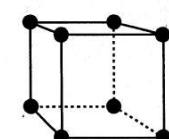


(c)

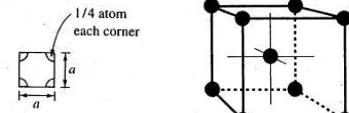


(d)

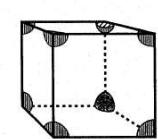
En tres dimensiones



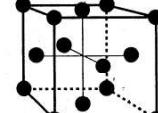
(a) Simple cubic



(b) Pedantically correct simple cubic



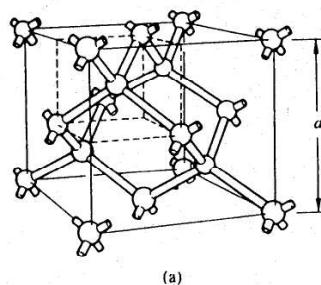
(c) bcc



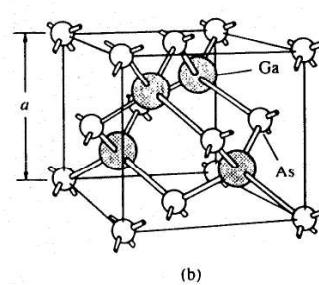
(d) fcc

Silicio

- El silicio presenta una estructura de tipo fcc (face centered cubic), cúbica centrada en las caras
 - Para los semiconductores mostrados, hay 8 átomos por celda unitaria
- Celdas unitarias: unidad de volumen con un ordenamiento de átomos que, repetida en el sólido, forma la estructura del cristal



Estructura cristalina del diamante (silicio, germanio)



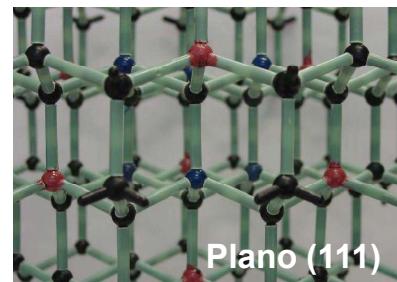
Estructura cristalina de zinc blenda (zinc blende) (GaAs, ZnS)

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

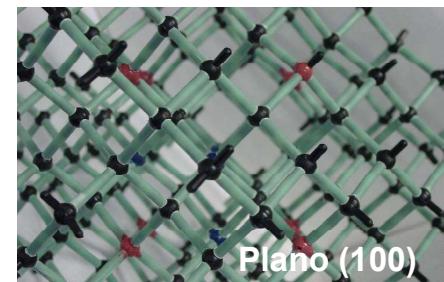
ITCR - Elementos Activos

11

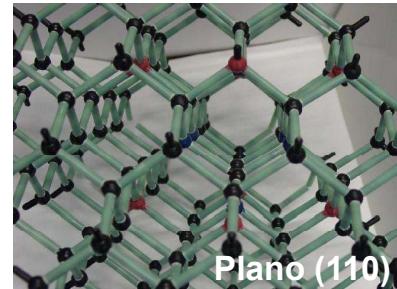
Cristal de Silicio



Plano (111)



Plano (100)



Plano (110)

- Orientación del cristal afecta
 - Proceso de fabricación de circuitos integrados
 - Comportamiento de los dispositivos fabricados
- Notación: índices de Miller

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

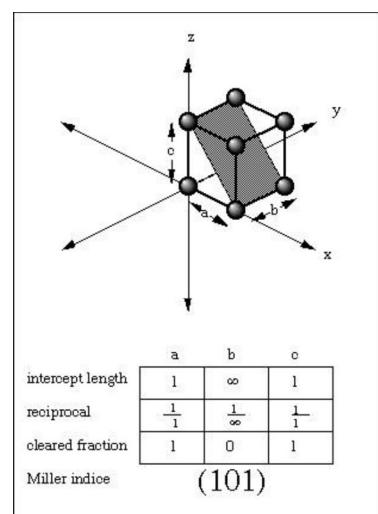
12

Índices de Miller

Notación vectorial para describir la orientación del cristal

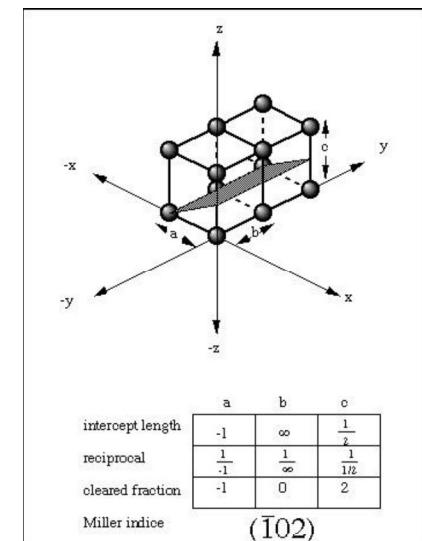
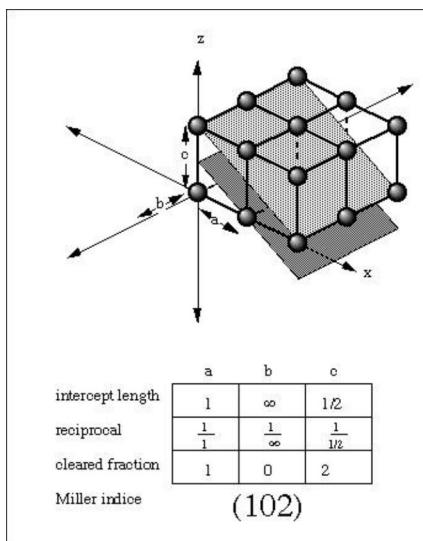
Pasos para determinar los índices:

1. Anotar el punto donde el plano interseca cada uno de los ejes
2. Tomar el recíproco de cada intersección
3. Eliminar las fracciones multiplicando por un número entero
4. Escribir el resultado en orden xyz, colocando entre paréntesis
5. Los números negativos se escriben con una línea sobre el número



Índices de Miller

Ejemplos:

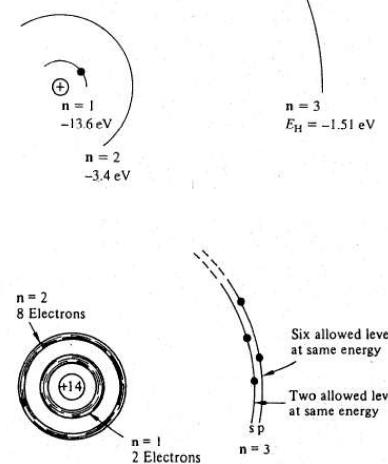


El Átomo de Hidrógeno y de Silicio

- El átomo de hidrógeno tiene un electrón y un protón
 - El electrón orbita alrededor del núcleo con niveles de energía definidos
 - Si el electrón pasa de un nivel a otro, absorbe energía o libera energía (medida en eV)
 - $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- El átomo de silicio tiene 14 electrones
 - 10 permanecen fuertemente ligados al núcleo
 - 4 electrones externos se denominan *electrones de valencia*

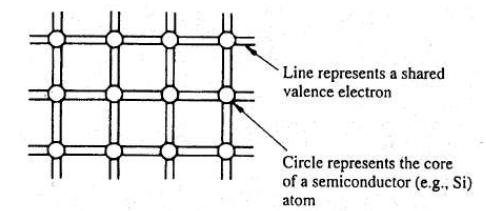
La energía está cuantizada:

$$E_H = -\frac{m_0 q^4}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar n)^2} = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



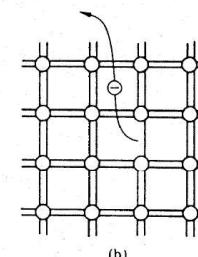
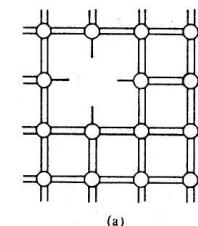
Modelo de Enlaces

- Describe los átomos y enlaces
 - Círculo: átomo
 - Línea: enlace covalente
- Cada átomo Si tiene 4 enlaces
 - Se cumple regla del octeto
 - Cuatro electrones propios
 - Cuatro electrones compartidos



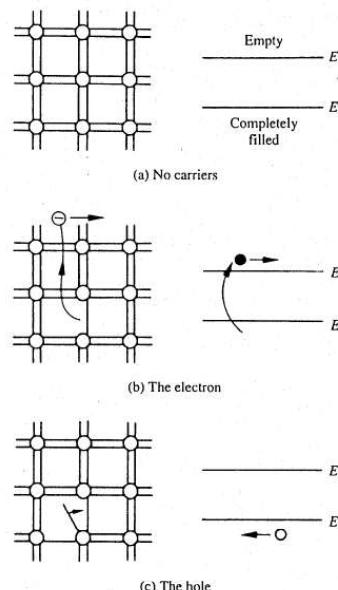
A una temperatura T = 0 K, todos los electrones forman enlaces

Átomo Faltante



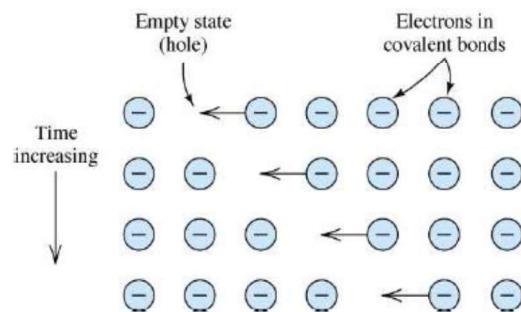
Generación Térmica de Portadores de Carga

- En estado de equilibrio a $T = 0 \text{ K}$, todos los átomos de silicio forman enlaces con sus cuatro vecinos más cercanos
 - Banda de valencia está llena
 - Banda de conducción está vacía
- Cuando se eleva la temperatura, algunos enlaces se rompen. El electrón que se libera pasa directamente a la banda de conducción, quedando **libre para moverse por todo el cristal**.
- El enlace roto deja un espacio vacío en la red del cristal, que puede ser ocupado por otro electrón. Este espacio vacío es un hueco en la banda de valencia, y también queda **libre para moverse por todo el cristal**.



Corriente de Huecos

- El movimiento de portadores de carga libres (electrones y huecos) causa un flujo de corriente en el semiconductor



Conforme los electrones se mueven a la izquierda para llenar un hueco, el hueco se mueve a la derecha \Rightarrow equivale a una corriente de huecos

La corriente de huecos tiene la misma dirección que la corriente técnica

El Concepto de Hueco

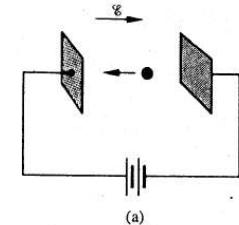
- El concepto de hueco es una representación de un enlace roto
- Enlace roto representado por una partícula de carga positiva, con igual magnitud de carga que el electrón
- Electrones y huecos interactúan en el proceso de conducción de corriente de huecos, por lo que se denominan **portadores de carga**
- Masa efectiva* de hueco 2.3 veces mayor que la de electrón

*Masa efectiva: toma en cuenta el efecto del potencial del cristal y permite tratar a la partícula como si fuera una partícula libre en el vacío

Masa Efectiva de los Portadores de Carga

- Si se aplica un campo eléctrico \mathcal{E} uniforme en el vacío, un electrón se mueve como consecuencia de una fuerza:

$$F = -q\mathcal{E} = m_0 \frac{dv}{dt}$$

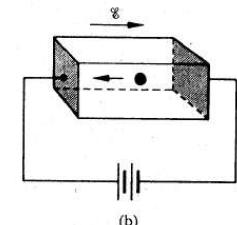


- Donde es la masa del electrón.
- Esto es válido para un electrón en el vacío.

- Para electrones en sólidos, la fuerza no se puede calcular tan fácilmente
 - Fuerzas electrostáticas con otros electrones
 - Colisiones de electrones con el cristal

- Se define la **masa efectiva** del electrón:

$$F = -q\mathcal{E} = m_n^* \frac{dv}{dt}$$



Masa Efectiva de los Portadores de Carga

- Lo mismo sucede con los huecos
 - Un hueco se desplaza libremente a través del cristal
 - El hueco experimenta una “fuerza” debido al campo eléctrico
 - El hueco es una “partícula” que también tiene masa efectiva
- La masa efectiva para electrones y huecos en distintos materiales:

Table 2.1 Density of States Effective Masses at 300 K.

Material	m_n^*/m_0	m_p^*/m_0
Si	1.18	0.81
Ge	0.55	0.36
GaAs	0.066	0.52

- Donde m_0 sigue siendo la masa del electrón en el vacío

$$m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Ejemplo: Concentración Intrínseca de Portadores de Carga

Ejemplo. Calcule la concentración intrínseca de portadores para el silicio ($E_g=1.12 \text{ eV}$) para una temperatura de 300 K.

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi m_e k T}{h^2} \right)^{3/2} \cdot e^{\frac{-E_g}{kT}}$$

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi (1.18 \times 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.504 \times 10^{-23} \text{ J/K})(300 \text{ K})}{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})^2} \right)^{3/2} \cdot e^{\frac{-1.12 \text{ eV}}{(8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(300 \text{ K})}}$$

Análisis dimensional:

$$[n_i] = \left(\frac{(\text{kg})(\text{J/K})(\text{K})}{(\text{J} \cdot \text{s})^2} \right)^{3/2} \cdot e^{\frac{\text{eV}}{(\text{eV/K})(\text{K})}} = \left(\frac{\text{kg}}{\text{J} \cdot \text{s}^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^1 = \left(\frac{\text{kg}}{(\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2) \cdot \text{s}^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$[n_i] = \left(\frac{1}{\text{m}^2} \right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{1}{\text{m}^3} \right)$$

Resultado: $1.1135 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} = 1.1135 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Concentración Intrínseca de Portadores de Carga

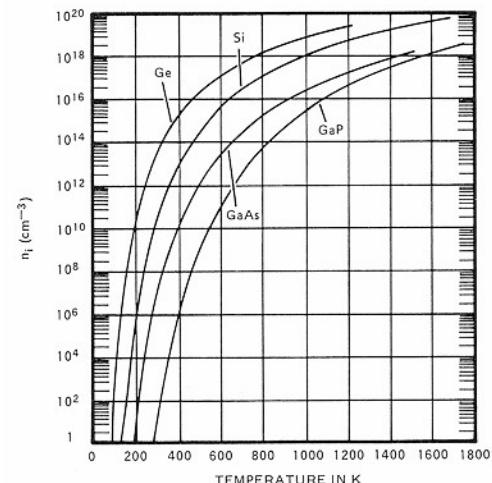
La concentración de portadores en el silicio **intrínseco** (sin dopar) es:

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi m_e k T}{h^2} \right)^{3/2} \cdot e^{\frac{-E_g}{kT}}$$

Donde:

- m_e : masa efectiva del electrón
- k : constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)
- T : temperatura en Kelvin
- E_g : Energía de la banda prohibida (1.12 eV para Silicio)

Nota: $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$



Ejemplo: Cantidad de Átomos Si en 1 cm³

Para el silicio en estado intrínseco, la densidad es 2.33 g/cm^3 , la masa molar es 28.09 g/mol y el número de Avogadro es 6.02×10^{23} átomos/mol. Calcule:

1. La cantidad de átomos de silicio que hay en un trozo de 1 cm^3 .
2. La cantidad de enlaces existentes en ese trozo de silicio de 1 cm^3 .
3. La proporción de enlaces rotos en comparación con enlaces totales, a temperatura ambiente.

$$2.33 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times \frac{1 \text{ mol}}{28.09 \text{ g}} \times \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos}}{1 \text{ mol}} = 4.99 \times 10^{22} \text{ átomos/cm}^3$$

$$4.99 \times 10^{22} \text{ átomos} \times \frac{4 \text{ enlaces}}{1 \text{ átomo}} = 1.996 \times 10^{23} \text{ enlaces}$$

$$\frac{1.996 \times 10^{23} \text{ enlaces}}{10^{10} \text{ electrones libres}} = 1.996 \times 10^{13} \text{ enlaces/electrón}$$

Esto significa que hay un solo enlace roto (electrón libre) en 2×10^{13} enlaces

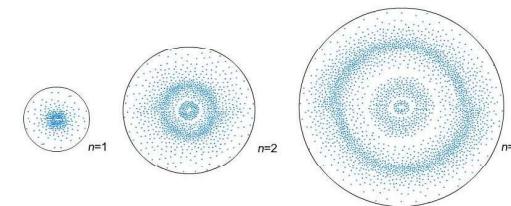
Clase 2

Teoría de Bandas de Energía

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Elementos Activos
Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez
Semestre II-2019

Modelo Atómico de Bohr

- Fundamentos:
 - Principio de cuantización (quantum)
 - Niveles discretos de energía
 - Electrones pertenecen a un determinado nivel
 - Principio de exclusión de Pauli
 - Dos electrones no pueden tener los mismos números cuánticos
- Los electrones existen en niveles de energía caracterizados por el número cuántico principal $n \rightarrow$ relacionado con distancia al núcleo y energía del nivel

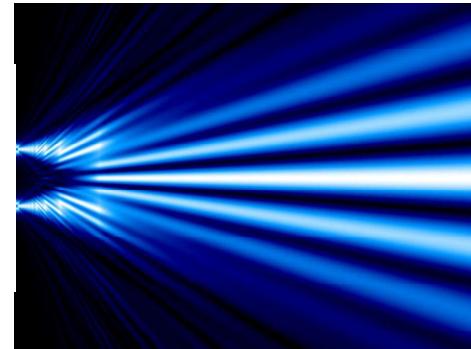
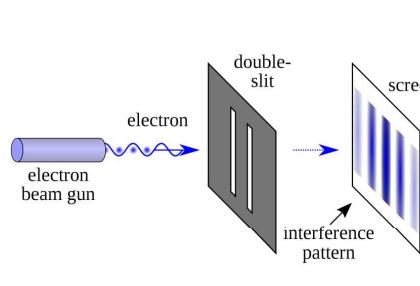


Ecuación de DeBroglie

- Describe propiedades de la materia a través de una longitud de onda

$$\lambda = h/mv$$

- Experimento de la “doble rejilla” con electrones:



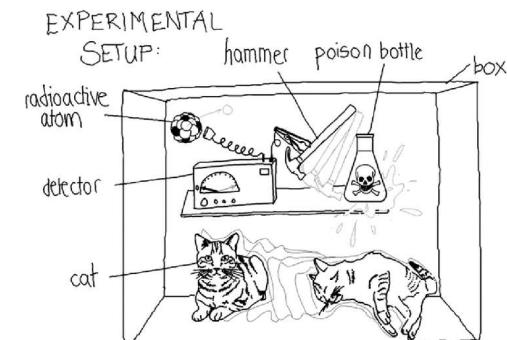
Ecuación de Schrödinger

- El experimento de la doble rejilla produce dos resultados diferentes, dependiendo de cómo se observa el electrón (onda o partícula)
 - **Electrón como onda:** patrón de interferencia
 - **Electrón como partícula:** no hay interferencia, sólo dos franjas

Para efectos prácticos se asume que el electrón es **ambas** a la vez.

Experimento mental: **El gato de Schrödinger**

- Átomo con 50% probabilidad de activar el detector
- Un observador desde afuera, sin abrir la caja, no sabe si el gato está vivo o muerto: el gato está en **AMBOS** estados a la vez.



Derivación de la Ecuación de Schrödinger

$$E = P.E. + K.E.$$

$$E = V + \frac{1}{2}mv^2$$

Momento: $\rho = mv$

$$E = V + \frac{\rho^2}{2m}$$

$$\Psi = e^{i(kx-\omega t)}$$

$$\frac{d\Psi}{dx} = ike^{i(kx-\omega t)} = ik\Psi$$

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = i^2k^2e^{i(kx-\omega t)} = -k^2\Psi$$

$$\text{DeBroglie: } k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\rho}{\hbar}$$

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = \frac{-\rho^2}{\hbar^2}\Psi$$

$$-\hbar^2 \frac{d^2\Psi}{dx^2} = \rho^2\Psi$$

Ecuación de Schrödinger

Describe la probabilidad de encontrar un electrón en un lugar en el espacio

$$E = V + \frac{\rho^2}{2m}$$

$$E\Psi = V\Psi + \frac{\rho^2}{2m}\Psi$$

$$E\Psi = V\Psi + \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2}$$

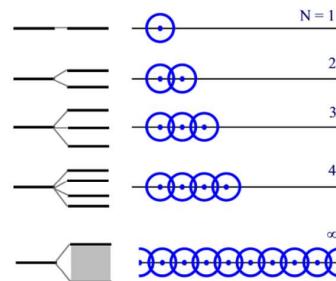
$$E\Psi = \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} + V\Psi$$

$$E\Psi = \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2\Psi + V\Psi$$

La solución de esta ecuación en tres dimensiones da como resultado **niveles discretos de energía y regiones de probabilidad de ocupación (orbitales)**

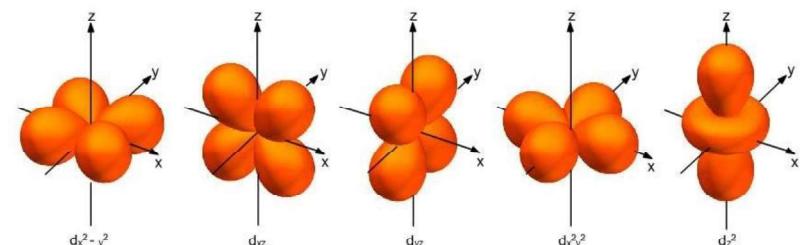
Formación de Bandas de Energía

- Cuando los átomos se aproximan unos a otros, los niveles de energía se desdoblan en niveles de energía muy próximos = bandas de energía
- Bandas: conjunto de niveles de energía electrónicos
 - regiones de probabilidad de encontrar al electrón
 - 3 bandas: conducción, valencia y prohibida

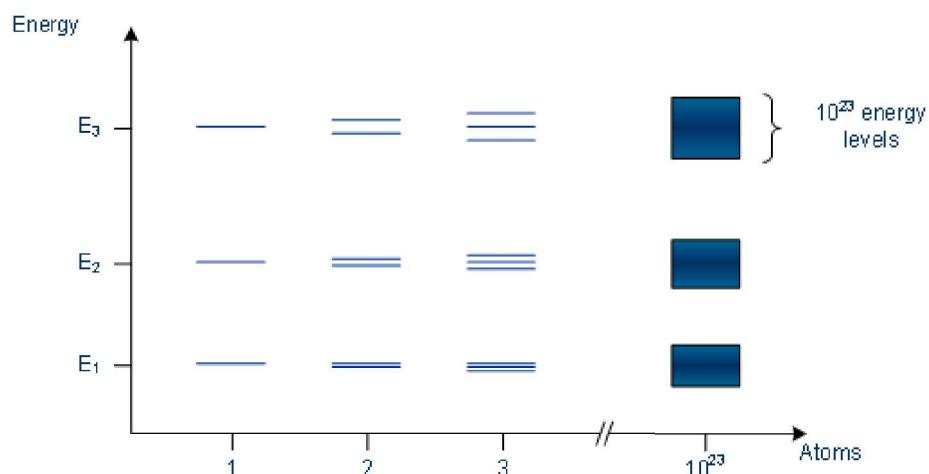


Orbitales: Regiones de Probabilidad de Ocupación

- Los niveles contienen orbitales
 - Regiones de alta probabilidad de encontrar al electrón
 - Soluciones de la ecuación de Schrödinger
- El número cuántico magnético está relacionado con la orientación del orbital en el espacio



Formación de Bandas de Energía



Formación de Bandas de Energía

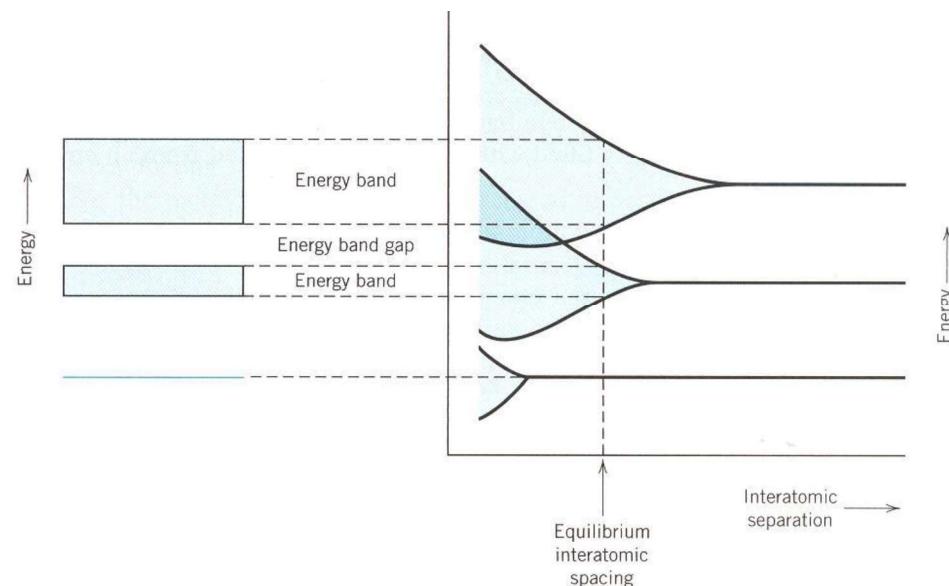
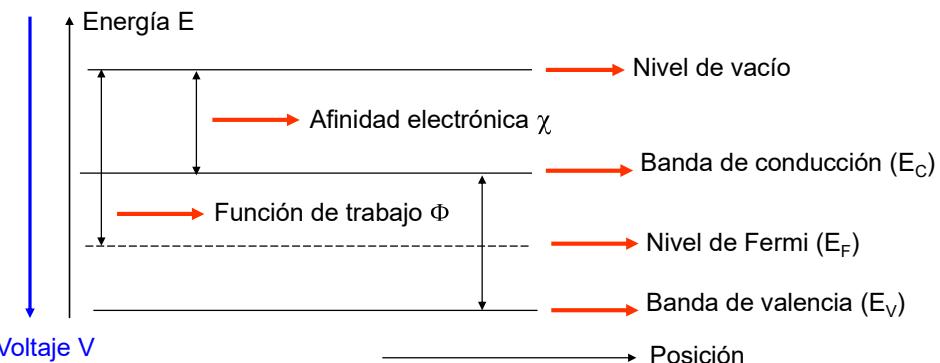


Diagrama de Bandas de Energía

- Diagrama de bandas = energía en función de la posición
- En un diagrama de bandas, $V = E / -q \rightarrow$ definido para un electrón
- Estructura básica de un diagrama de bandas de energía de un semiconductor

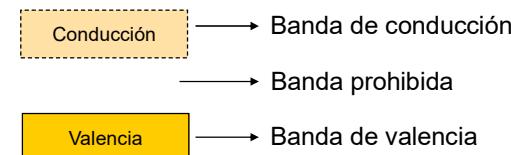


- La función de trabajo varía con el dopado.

Diagrama de Bandas de Energía

- Nivel de vacío:
 - Nivel de referencia (cero)
 - Nivel de energía a la cual un electrón se ha liberado del material, es decir, no está ligado al sólido
- Afinidad electrónica:
 - energía que un electrón en la banda de conducción debe ganar para convertirse en un electrón liberado del material
 - Definida para semiconductores
- Función de trabajo:
 - Diferencia de energía entre el nivel de vacío y el nivel de Fermi
- Nivel de Fermi intrínseco:
 - Nivel de Fermi intrínseco ubicado aproximadamente en la mitad de la banda prohibida
 - Dopado modifica el nivel de Fermi de un material intrínseco de acuerdo con la intensidad y el tipo de impureza

Modelo de Bandas de Energía



- **Banda de valencia:**
 - nivel de energía más alto que está lleno a 0 K
 - electrones no participan en conducción
 - Electrones de esta banda forman enlaces con otros átomos
- **Banda prohibida:**
 - Brecha energética (energy gap)
 - banda de estados prohibidos para el electrón
 - energía necesaria para mover un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción
- **Banda de conducción:**
 - nivel de energía separado de la banda de valencia por la banda prohibida
 - electrones participan en conducción

Clasificación de Materiales – Modelo de Bandas

- Bandas de energía del material definen propiedades eléctricas, ópticas y térmicas
 - Clasificación de acuerdo con propiedades eléctricas

Conductores



Semiconductores



Aislantes

Conducción

Dióxido de hafnio HfO_2

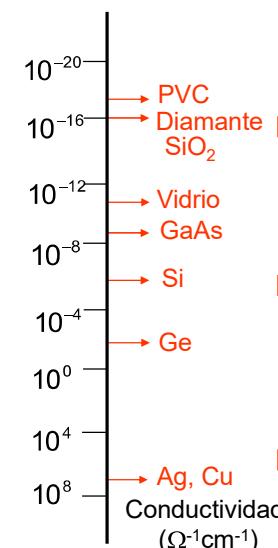
Valencia

- Ancho de banda prohibida muy pequeño o traslape de bandas
- Cobre, Aluminio, Oro

- Banda prohibida = 1-3 eV
- Silicio, Germanio, compuestos como GaAs, InP

- Banda prohibida = 8-9 eV
- Diamante, dióxido de silicio (SiO_2), nitruro de silicio (Si_3N_4)

Clasificación de Materiales



Aislantes:

- electrones fuertemente ligados al núcleo
- muy alta resistencia
- Ej: SiO_2 (banda prohibida $\approx 8\text{eV}$), diamante (5.46-6.4eV)

Semiconductores:

- enlaces covalentes
- la resistencia puede disminuirse por medio de dopado
- Ej: Si (banda prohibida 1.12eV), Ge (0.67eV)

Conductores:

- electrones débilmente ligados al núcleo
- baja resistencia
- Ej: Ag, Cu, Au, Al

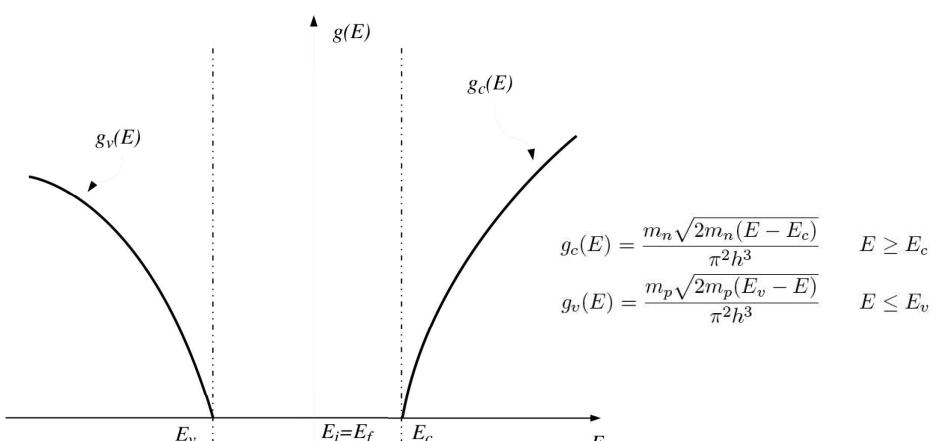
*Nota: $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$

Parámetros de Referencia para Materiales Comunes

- La afinidad electrónica se define para semiconductores
- La banda prohibida es una constante de los semiconductores
- Los metales tienen una función de trabajo constante
- La función de trabajo de los semiconductores depende del dopado

Afinidad electrónica de semiconductores	Silicio	4.05 eV
	Germanio	4.13 eV
	GaAs	4.07 eV
Banda prohibida de semiconductores	Silicio	1.12 eV
	Germanio	0.66 eV
	GaAs	1.424 eV
Función de trabajo de metales	Plata	4.26 eV
	Aluminio	4.28 eV
	Oro	5.1 eV
	Cromo	4.5 eV
	Molibdeno	4.6 eV
	Níquel	5.15 eV
	Tungsteno	4.55 eV

Densidad de Estados



- En cada nivel de energía **existe** una cierta cantidad de estados disponibles para ser ocupados por los electrones (o huecos).
- $g_c(E)$: densidad de estados en banda de conducción, $g_V(E)$: banda valencia

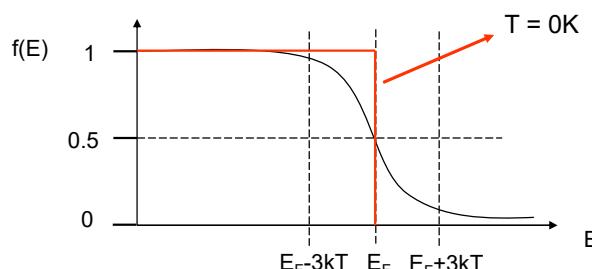
Nivel de Fermi

E_F : valor de energía en el que la probabilidad de ocupación del estado electrónico es de 50%

- Distribución de Fermi-Dirac: probabilidad de ocupación de un estado electrónico de energía E

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}}$$

k: constante de Boltzmann, 8.617×10^{-5} eV/K
T: temperatura (K)



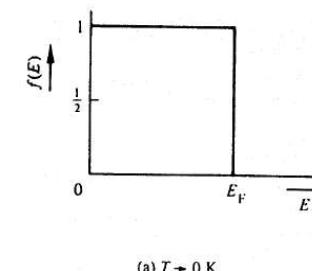
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

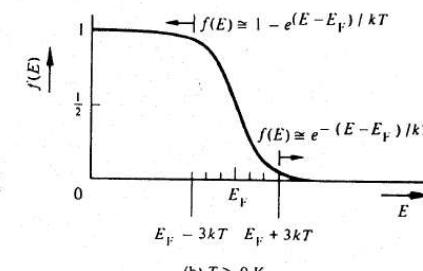
Nivel de Fermi

- La función de Fermi toma distintas formas dependiendo de la temperatura:

- Para T = 0 K, la función toma valores de 0 y 1
 - 0 : cero probabilidad de ocupación de electrones
 - 1 : total probabilidad de ocupación de electrones
- Esto significa que por debajo de E_F todos los estados están llenos, y por encima de E_F todos los estados están vacíos
- Para T > 0 K, la función se curva y la probabilidad es continua.

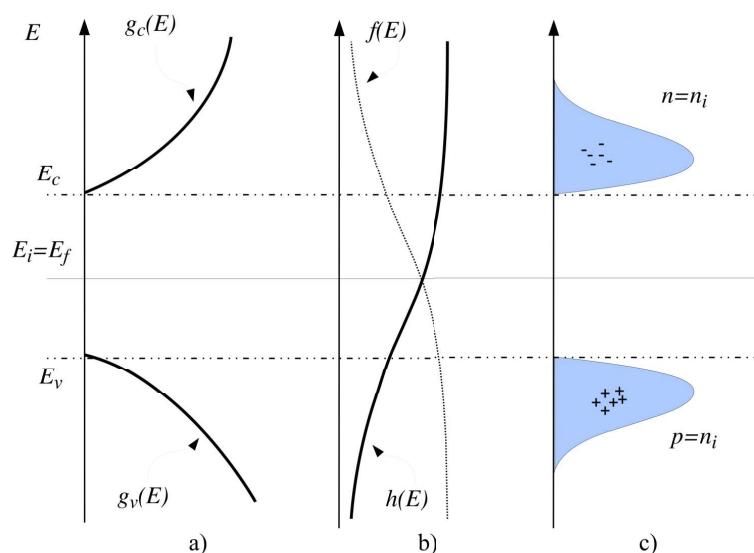


(a) $T \rightarrow 0$ K



(b) $T > 0$ K

Portadores en Silicio Intrínseco



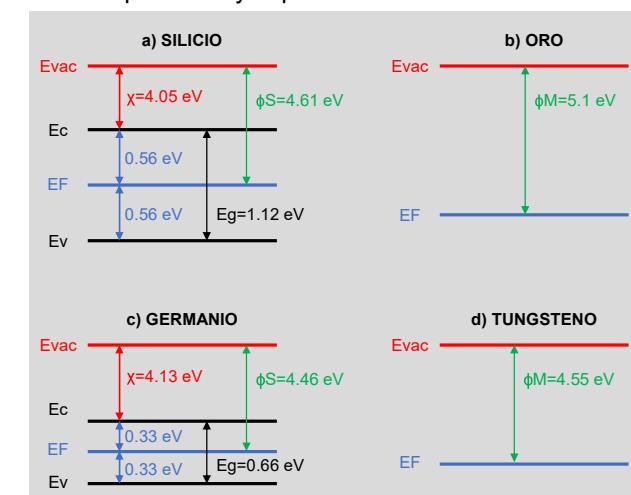
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

Ejemplo: Diagramas de Bandas de Energía

Dibuje el diagrama de bandas de energía de los siguientes materiales, indicando los valores numéricos para la función de trabajo, afinidad electrónica, energía de la banda prohibida y la posición del nivel de Fermi.

- Silicio
- Oro
- Germanio
- Tungsteno



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

Ejemplo: Nivel de Fermi y Probabilidad de Ocupación

En una muestra de silicio intrínseco a temperatura ambiente, la probabilidad de ocupación de electrones en un determinado nivel de energía E_x es del 58%.

- Determine la posición de ese nivel de energía con respecto al nivel de Fermi intrínseco.
- Calcule la probabilidad de ocupación de huecos en ese mismo nivel de energía mencionado.
- Dibuje el diagrama de bandas de energía, indicando el nivel energético que tiene la probabilidad de ocupación de electrones propuesta.
- Si la muestra de silicio intrínseco está a $T = 0$ K, indique la probabilidad de ocupación de electrones que existe en el nivel de energía calculado anteriormente.

Ejemplo: Nivel de Fermi y Probabilidad de Ocupación

- Partiendo de la probabilidad de ocupación:

$$f(E) = 0.58 = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

$$1 + e^{(E-E_F)/kT} = \frac{1}{0.58}$$

$$e^{(E-E_F)/kT} = \frac{1}{0.58} - 1$$

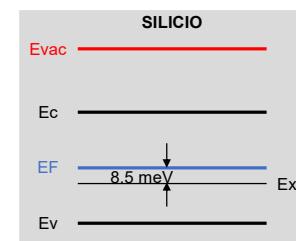
$$(E - E_F)/kT = \ln 0.72$$

$$(E - E_F) = kT \ln 0.72$$

$$(E - E_F) = -8.5 \text{ meV}$$

El nivel de energía está 8.5 meV por debajo del nivel de Fermi.

- El diagrama de bandas de energía queda como se indica (se muestra la posición del nivel de energía E_x):



- A una temperatura $T = 0$ K, $f(E) = 1 = 100\%$ porque E_x está por debajo del nivel de Fermi.

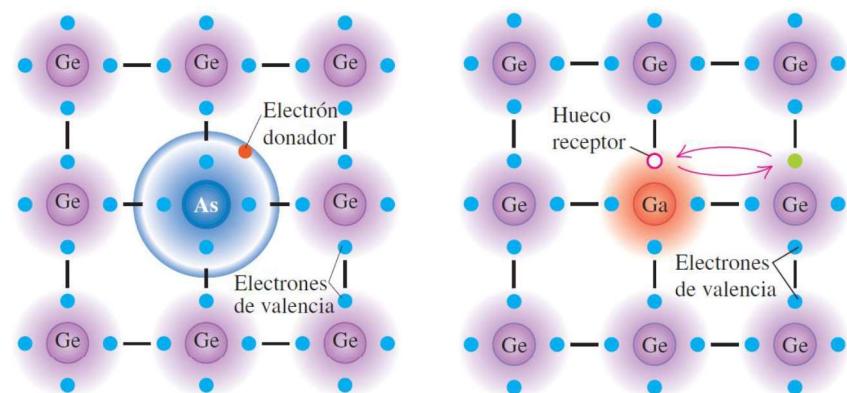
- La probabilidad de ocupación de huecos en ese mismo nivel de energía es:

$$h(E) = 1 - f(E) = 0.42 = 42\%$$

Clase 3 Semiconductores Extrínsecos

Dopado en Materiales Extrínsecos

- Dopado: Introducción de impurezas (átomos) substitucionales en un material INTRÍNSECO (puro) para modificar su conductividad eléctrica



Los materiales dopados se conocen como materiales EXTRÍNSECOS

Portadores Mayoritarios y Minoritarios

- Existen dos portadores de carga en semiconductores:
 - Electrones
 - Huecos
- En un material extrínseco, se distingue entre portadores mayoritarios y minoritarios con base en la concentración de portadores
- Portadores mayoritarios: portadores presentes en mayor número en el semiconductor:
 - huecos en semiconductor P
 - electrones en semiconductor N
- Portadores minoritarios: portadores presentes en menor número en el semiconductor:
 - electrones en semiconductor P
 - huecos en semiconductor N

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

49

Resumen de Definiciones

- **Dopantes:** átomos de impureza específicos que se añaden a los semiconductores en dosis controladas, con la intención deliberada de incrementar las concentraciones de electrones o de huecos.
- **Semiconductor intrínseco:** semiconductor no dopado consistente en material semiconductor extremadamente puro, que contiene cantidades insignificantes de átomos de impureza; un semiconductor cuyas propiedades son inherentes al mismo.
- **Semiconductor extrínseco:** semiconductor dopado; un semiconductor cuyas propiedades están controladas por los átomos de impureza añadidos.
- **Donador:** átomo de impureza que incrementa la concentración de electrones; dopante tipo n.
- **Aceptor:** átomo de impureza que incrementa la concentración de huecos; dopante tipo p.
- **Material tipo n:** material dopado con donadores; un semiconductor que contiene más electrones que huecos.
- **Material tipo p:** material dopado con aceptores; un semiconductor que contiene más huecos que electrones.

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

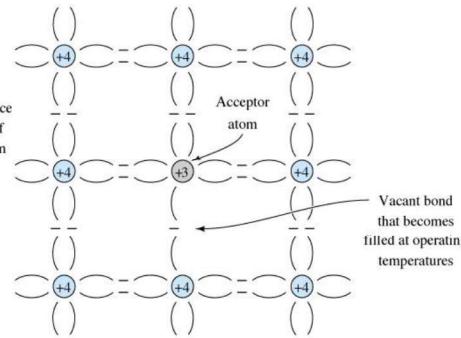
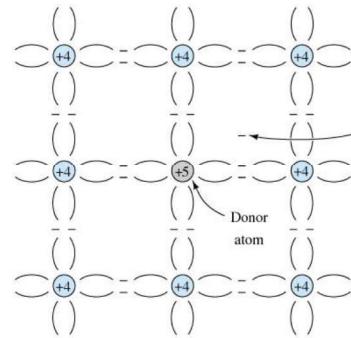
ITCR - Elementos Activos

50

Dopado

Donadores: 5 electrones de valencia (As, P, Sb) = semiconductor de tipo N

Aceptores: 3 electrones de valencia (B, In) = semiconductor de tipo P



El dopado NO ALTERA la neutralidad eléctrica del material

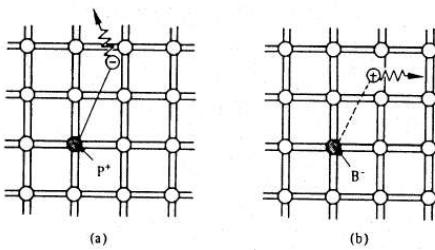
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

51

Dopantes Comunes para Silicio

- Átomos de la columna V aportan electrones
- Átomos de la columna III aportan huecos



- Los dopantes más comunes para Silicio se muestran en la tabla:

Donadores	Aceptores
P	B
As	Ga
Sb	In
	Al

El material permanece eléctricamente neutro porque el número de electrones es igual al número de protones para ambos casos.

Energías de ionización de los dopantes en silicio	
Fósforo	0.045 eV
Arsénico	0.050 eV
Boro	0.045 eV
Aluminio	0.060 eV

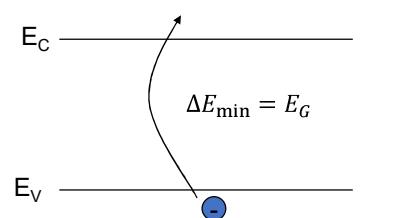
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

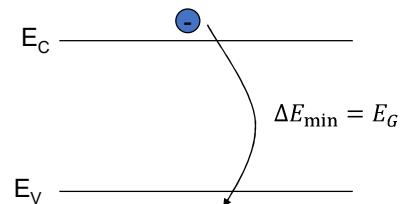
52

Generación y Recombinación en Silicio Intrínseco

- Generación** $G = G_{op} + G_{th}(T)$
 - Transición de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción
 - Genera un hueco en la banda de valencia
 - Creación de pares electrón-hueco



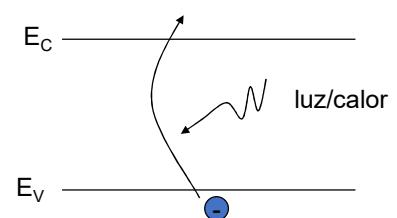
- Recombinación** $R = k \cdot n \cdot p$
 - Transición de un electrón de la banda de conducción a la banda de valencia
 - Elimina un hueco de la banda de valencia
 - Eliminación de pares electrón-hueco



Generación y Recombinación en Silicio Intrínseco

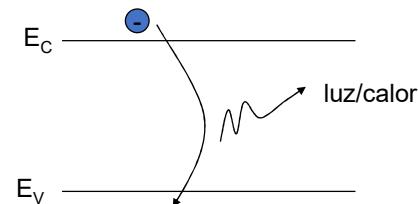
Energía térmica (G_{th})

- Generación térmica directa
 - Ruptura de enlaces debido a vibración causada por temperatura
- Recombinación térmica directa
 - Liberación de calor debido a aniquilación de pares electrón-hueco



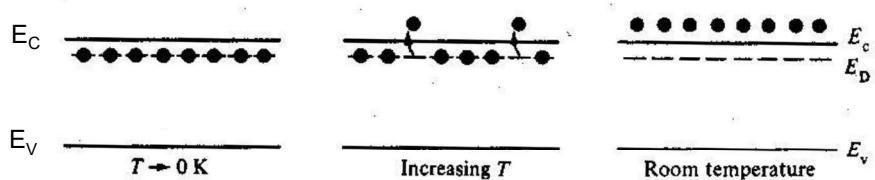
Energía lumínica (G_{op})

- Fotones transfieren energía a un electrón para pasar de banda de valencia a banda de conducción
- Electrones liberan fotones al pasar de banda de conducción a banda de valencia

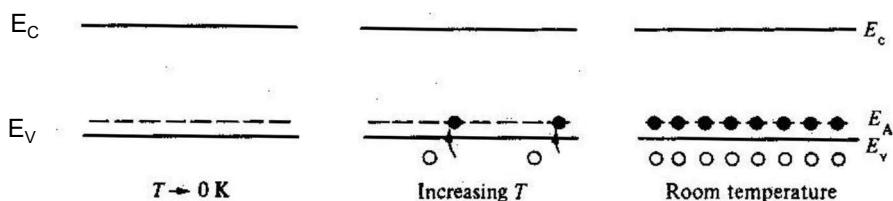


Activación de los Dopantes en Silicio Extrínseco

Semiconductor N: se introducen estados energéticos cerca de la banda E_C



Semiconductor P: se introducen estados energéticos cerca de la banda E_V



Ley de Acción de Masas

- En un semiconductor no degenerado en equilibrio:

$$n_i^2 = n \cdot p$$

n_i : concentración intrínseca de portadores de carga [cm^{-3}]

n : concentración de electrones libres [cm^{-3}]

p : concentración de huecos [cm^{-3}]

$$n_i \approx 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ para Si}$$

- Lo anterior implica que:

- Si la concentración de electrones aumenta con el dopado (donadores), la concentración de huecos disminuye
- Si la concentración de huecos aumenta con el dopado (aceptores), la concentración de electrones disminuye

Concentración de Portadores de Carga

- Material tipo P:

$$p \approx N_A \quad n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

n_{po} : concentración de electrones en material p en equilibrio

p_{po} : concentración de huecos en material p en equilibrio

N_A : concentración de aceptores

- Material tipo N:

$$n \approx N_D \quad p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

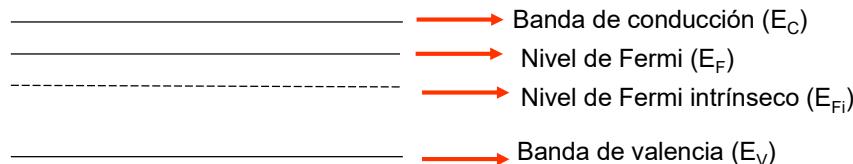
p_{no} : concentración de huecos en material n en equilibrio

n_{no} : concentración de electrones en material n en equilibrio

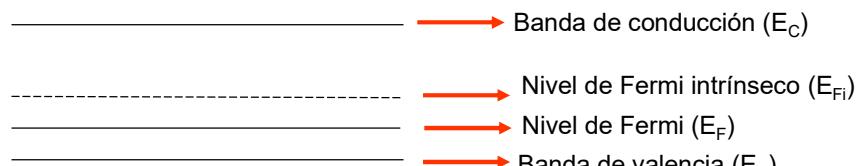
N_D : concentración de donadores

Influencia del Dopado en Nivel de Fermi

- Semiconductor N: nivel de Fermi se acerca a la banda de conducción



- Semiconductor P: nivel de Fermi se acerca a la banda de valencia



Concentración de Portadores de Carga en Función de E_F

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

Diferencia entre nivel de Fermi intrínseco y extrínseco del semiconductor P

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

Diferencia entre nivel de Fermi intrínseco y extrínseco del semiconductor N

La concentración de portadores de carga y el nivel de Fermi están relacionados como sigue:

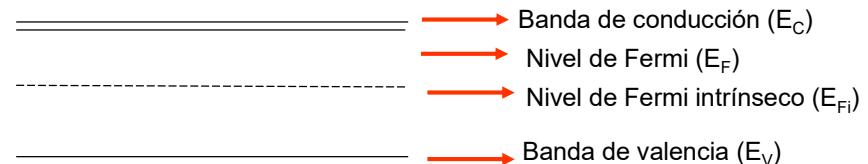
$$n = n_i \cdot e^{\frac{(E_F-E_i)}{kT}}$$

$$n_i \approx 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ para Si}$$

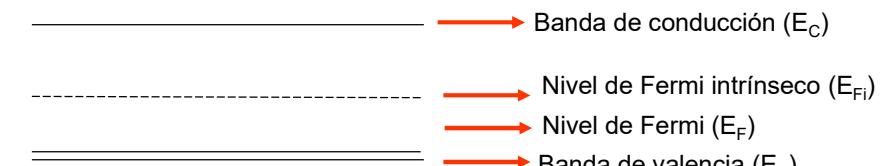
$$p = n_i \cdot e^{\frac{(E_i-E_F)}{kT}}$$

Semiconductores Degenerados

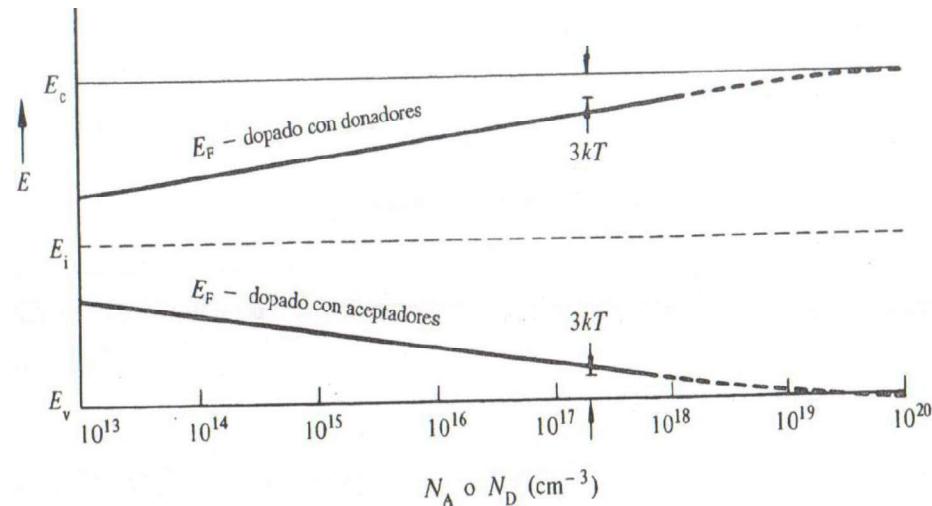
- Semiconductor N degenerado: nivel de Fermi está $<3kT$ de la banda E_C



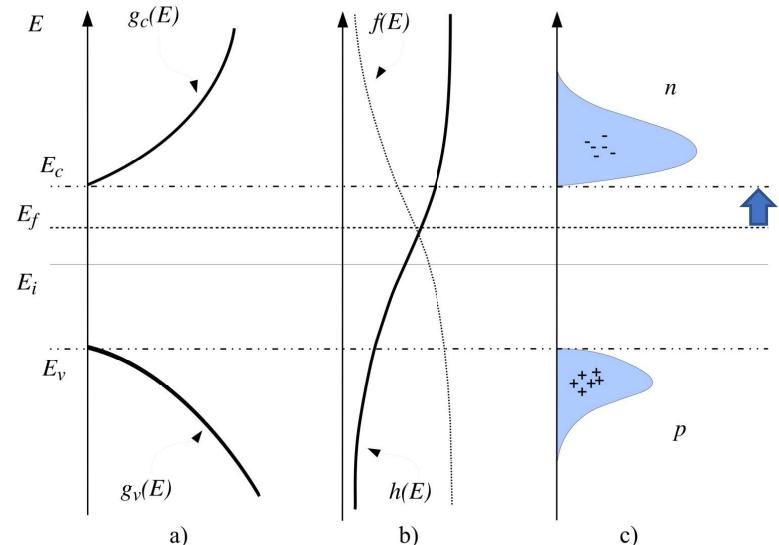
- Semiconductor P degenerado: nivel de Fermi está $<3kT$ de la banda E_V



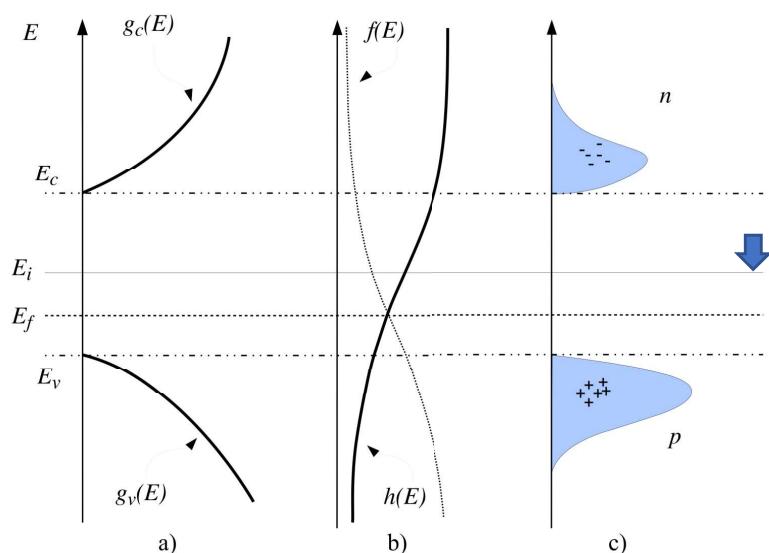
Efecto del Dopado en el Nivel de Fermi



Portadores en Silicio N



Portadores en Silicio P



Ecuación de Neutralidad de Carga

- En un semiconductor en equilibrio térmico, uniformemente dopado y bajo condiciones de dopado no degenerado, se cumple que

$$qp - qn + qN_D^+ - qN_A^- = 0$$

- Lo que es equivalente a

$$p - n + N_D^+ - N_A^- = 0$$

Donde, por definición,

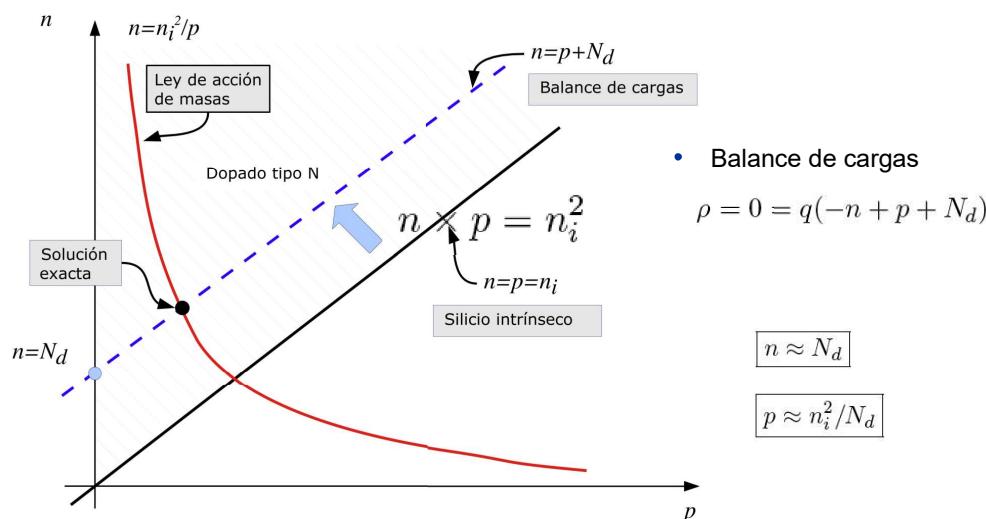
- N_D^+ : número de impurezas donadoras ionizadas/cm³
- N_A^- : número de impurezas acceptoras ionizadas/cm³

A temperatura ambiente, todas las impurezas están ionizadas, por lo que:

$$p - n + N_D - N_A = 0$$

Efecto de Dopado

- Para una oblea con dopado N:



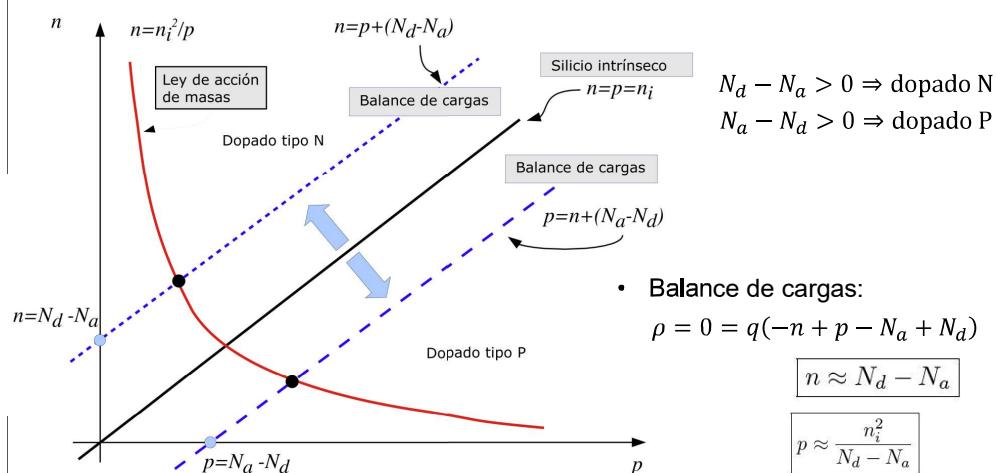
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

65

Compensación

- Consiste en utilizar ambos tipos de dopado P y N
- Se utiliza en fabricación de circuitos integrados, con el propósito de dopar una zona con el tipo de dopado contrario al existente en la oblea



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

66

Efecto de Temperatura en Semiconductores Extrínsecos

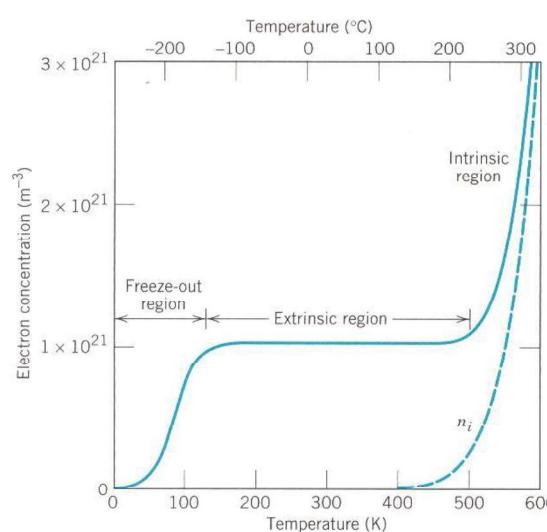
- Temperatura afecta el comportamiento de semiconductores
- Bajas temperaturas: energía térmica insuficiente para ionizar todos los átomos de impurezas
 - Concentración de portadores mayoritarios es menor que concentración de dopado
- Temperaturas medias: energía térmica es suficiente para ionizar todos los átomos de impurezas
- Altas temperaturas: El nivel de Fermi se acerca al nivel de Fermi intrínseco
 - Material se comporta como semiconductor intrínseco
 - n_i en un semiconductor intrínseco aumenta con T
 - Conductividad aumenta con T

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

67

Efecto de Temperatura en Semiconductores Extrínsecos



Semiconductor extrínseco se comporta como intrínseco para altas temperaturas

- $E_F \rightarrow E_{Fi}$, n_i aumenta con T, σ aumenta con T

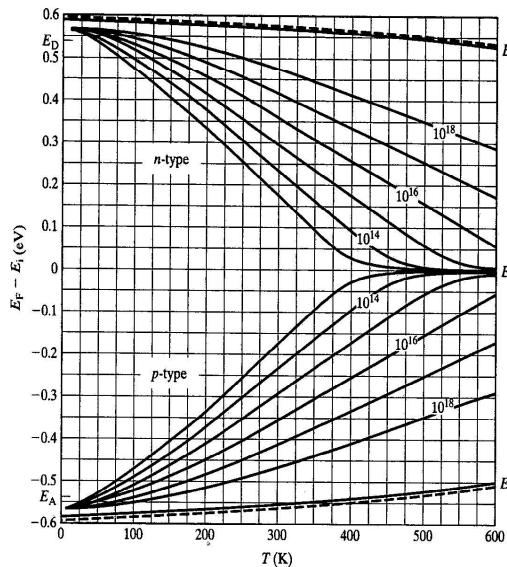
Energías de ionización de los dopantes en silicio	
Fósforo	0.045 eV
Arsénico	0.050 eV
Boro	0.045 eV
Aluminio	0.060 eV

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

68

Efecto de Temperatura en E_F



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

69

Ejemplo: Dopado y Compensación

- a) Una oblea de silicio está dopada con boro, con una concentración de portadores de 10^{15} cm^{-3} . Para este material, determine la posición del nivel de Fermi con respecto al nivel de Fermi intrínseco.

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{N_A}{n_i} = (8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(300 \text{ K}) \ln \frac{10^{15}}{10^{10}} = 297.62 \text{ meV}$$

- b) La oblea del caso anterior se dopa ahora con arsénico, donde se implanta una concentración de átomos de arsénico de $2.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Bajo estas condiciones indique:

- El nivel de dopado efectivo resultante.

$$N_{eff} = N_D - N_A = 2.1 \times 10^{15} - 10^{15} = 1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

- La concentración de portadores (n y p) resultante.

$$\begin{aligned} n &\approx N_D = 1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ p &\approx \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(10^{10})^2}{1.1 \times 10^{15}} = 9.09 \times 10^4 \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

- La nueva posición del nivel de Fermi con respecto a E_i .

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{N_D}{n_i} = \left(8.617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right)(300 \text{ K}) \ln \frac{1.1 \times 10^{15}}{10^{10}} = 300.08 \text{ meV}$$

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

Ejemplo: Ley de Acción de Masas

Para fabricar circuitos integrados, se dopa un oblea de silicio con una concentración de aceptores $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

- a) ¿Cuál es la concentración de portadores mayoritarios en la oblea?

$$p \approx N_A = 10^{15} \text{ huecos/cm}^3$$

- b) ¿Cuál es la concentración de portadores minoritarios en la oblea?

$$n \approx \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(10^{10})^2}{10^{15}} = 10^5 \text{ electrones/cm}^3$$

- c) Si la concentración de huecos se incrementa a $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ por medio de dopado adicional, ¿Cuál es la nueva concentración de portadores minoritarios en la oblea?

$$n \approx \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(10^{10})^2}{10^{16}} = 10^4 \text{ electrones/cm}^3$$

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

70

Ejemplo: Dopado y Compensación

- c) Suponiendo que se hace una segunda implantación iónica con arsénico, donde se quiere aumentar al máximo la conductividad de la muestra:

- Calcule cuál es la concentración máxima de átomos donadores permitida para que el material siga siendo no degenerado.

La condición que se debe cumplir es:

$$E_C - E_F > 3kT$$

Donde la banda de conducción se puede reescribir como $E_i + E_g/2$:

$$E_i + \frac{E_g}{2} - E_F > 3kT$$

Reacomodando términos:

$$E_i - E_F > 3kT - \frac{E_g}{2}$$

Para semiconductores N:

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

La equivalencia queda entonces:

$$-kT \ln \frac{N_D}{n_i} > 3kT - \frac{E_g}{2}$$

$$\ln \frac{N_D}{n_i} < \frac{E_g}{2kT} - 3$$

De donde resolvemos

$$N_D < n_i \cdot e^{\frac{E_g}{2kT} - 3}$$

$$N_D < (10^{10}) \cdot e^{\frac{1.12 \text{ eV}}{2(26 \text{ meV})} - 3}$$

$$N_D < 1.125 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

- d) Dibuje el diagrama de bandas de energía de los tres casos (a, b, c).

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

71

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

72

Clase 4

Arrastre y Difusión

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Elementos Activos
Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez
Semestre II-2019

Arrastre (Drift)

1. En un semiconductor sin campo E, los electrones se mueven de manera aleatoria (movimiento browniano). El flujo neto es cero.

$$I = 0$$

2. Una partícula cargada experimenta una fuerza al ser sometida a un campo eléctrico externo.

$$F = m \cdot a$$

3. Un electrón aislado en presencia de campo eléctrico experimenta aceleración constante: velocidad aumenta.

$$F = -qE = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

4. Dentro de un material, la velocidad que se genera no es la misma por colisiones y fuerzas en el cristal.

$$v_d = \mu \cdot E$$

5. La constante μ_n es la movilidad de los electrones dentro del cristal.

$$\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

6. Lo mismo ocurre con los huecos dentro del cristal, aunque la movilidad μ_p es menor que la de los electrones

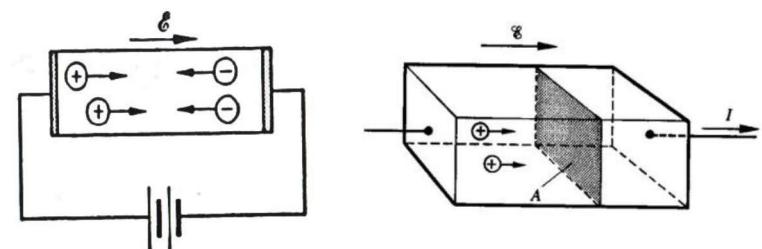
$$\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Transporte de Portadores de Carga

- La corriente eléctrica consiste en el movimiento de cargas
 - Electrones
 - Huecos
 - Iones
- Los átomos de dopado pueden ionizarse como parte del proceso de conducción eléctrica:
 - Los átomos donadores se ionizan positivamente al ceder un electrón para la conducción eléctrica (ND+)
 - Los átomos aceptores se ionizan negativamente al recibir un electrón durante la conducción eléctrica (NA-)
 - En semiconductores, los dopantes ionizados son inmóviles y no contribuyen a la conducción
- Existen dos mecanismos de transporte de portadores de carga
 - Corriente de arrastre, debido a la aplicación de un campo eléctrico
 - Corriente de difusión, debido a gradientes de concentración de portadores de carga

Corriente de Arrastre

- De acuerdo con la Ley de Ohm, la corriente fluye al aplicar un campo eléctrico externo.



$$J_{drift} = \sigma E$$

$$\sigma = (qn\mu_e + qp\mu_h)$$

$$J_{drift} = (qn\mu_e + qp\mu_h)E$$

J: densidad de corriente de arrastre

σ : conductividad

E: campo eléctrico

q: carga del electrón

n: concentración de portador de carga

μ : movilidad del portador de carga

Movilidad y Velocidad de Arrastre

- En ausencia de un campo eléctrico, el electrón presenta un movimiento térmico aleatorio con una velocidad térmica promedio v_t
- Al aplicar un campo eléctrico, el electrón adquiere una velocidad de arrastre determinada por
 v_d : velocidad de arrastre (cm/s)
 μ : movilidad (cm²/Vs)
 E : campo eléctrico (V/cm)
- $\vec{v}_d = \mu \cdot \vec{E}$ para $|E| < 5 \times 10^3$ V/cm
- Para $|E| > 10^5$ V/cm la velocidad de arrastre se satura $\approx 10^7$ cm/s
- Los electrones tienen una movilidad mayor que los huecos en un factor de 2..3 → ante un campo eléctrico, los electrones son 2..3 veces más rápidos que los huecos
- La movilidad está determinada por: masa efectiva, dispersión por impurezas, dispersión por la estructura cristalina

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

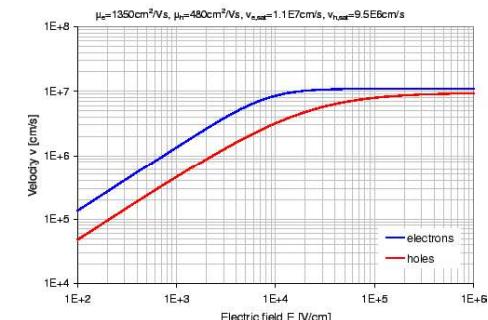
77

Saturación de la Velocidad de Arrastre

- La velocidad de arrastre no puede aumentar de manera indefinida.
 - Colisiones entre los electrones contra los átomos de la red del cristal
 - Fuerzas de atracción/repulsión entre electrón-electrón.
- Este efecto se modela por medio de la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + bE}$$

Donde μ_0 es la movilidad en ausencia de campo eléctrico, E es el campo eléctrico aplicado y $b = \mu_0/v_{sat}$



La velocidad de saturación v_{sat} es una constante determinada de forma experimental. Esto permite reescribir la velocidad de arrastre como:

$$v = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0 E}{v_{sat}}} \times E$$

Ejemplo: Saturación de la Velocidad de Arrastre

Un trozo de Si, $L = 0.2 \mu m$, es sometido a una tensión de 1 V.

Considere $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ y $v_{sat} = 10^7 \text{ cm/s}$.

- a. Determine la movilidad efectiva bajo estas condiciones.

$$E = \frac{V}{L} = \frac{1 \text{ V}}{0.2 \mu \text{m}} = 50 \text{ kV/cm}$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0 E}{v_{sat}}} = \frac{1350}{1 + \frac{1350 \cdot 50 \times 10^3}{10^7}} = 174 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\mu = \frac{1350}{7.75} = 174 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Los dispositivos modernos operan con saturación de velocidad!

$L < 10 \text{ nm}$

- b. Calcule la tensión máxima permitida de modo que la movilidad efectiva no sea reducida más de un 10%.

$$0.9\mu_0 = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0 E}{v_{sat}}}$$

$$E = \frac{1}{9} \frac{v_{sat}}{\mu_0} = 823 \text{ V/cm}$$

=> Para un bloque de 0.2 μm se tiene:

$$V = E \times L$$

$$V = 823 \text{ V/cm} \times 0.2 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$V = 16.5 \text{ mV}$$

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

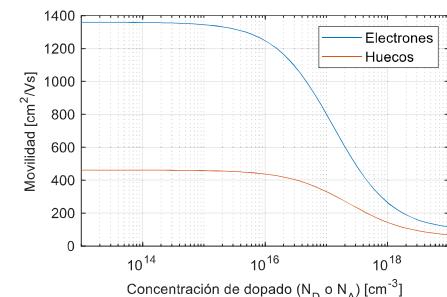
79

Movilidad en Función de la Concentración de Dopado

El efecto del dopado en la movilidad se modela por medio de la ecuación:

$$\mu = \mu_{min} + \frac{\mu_0}{1 + \left(\frac{N}{N_{ref}}\right)^\alpha}$$

Donde N es la concentración total de dopantes: $N_D + N_A$



Valores de referencia para la gráfica (no necesariamente precisos)

Para electrones:

- $N_{ref} = 1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
- $\mu_{min} = 92 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- $\mu_0 = 1268 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- $\alpha = 0.91$

Para huecos:

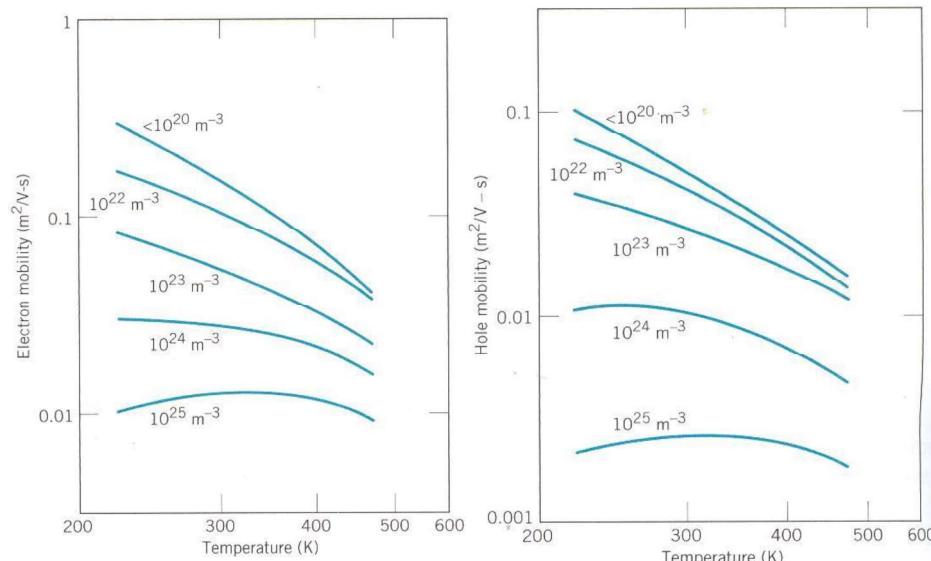
- $N_{ref} = 2.35 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
- $\mu_{min} = 54.3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- $\mu_0 = 406.9 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- $\alpha = 0.88$

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

80

Movilidad en Función de la Temperatura



Resistividad

- La resistividad (ρ) Es un parámetro que mide la ‘resistencia’ inherente del material al flujo de corriente. Es el inverso de la conductividad (σ)
- No depende de las dimensiones físicas del material

$$\mathcal{E} = \rho J$$

Se calcula como:

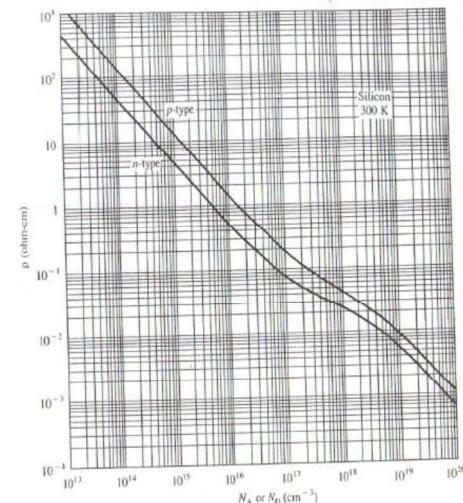
$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}$$

En semiconductores N:

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n}$$

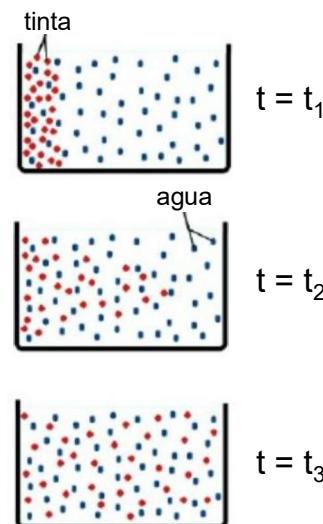
En semiconductores P:

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p p}$$



Difusión (Diffusion)

- Si una gota de tinta cae en un vaso de agua, después de unas horas la concentración de tinta es uniforme en todo el vaso, aunque la concentración inicial estuviera localizada en un único punto.
- Las moléculas de tinta “fluyen” de una mayor concentración a una menor concentración. No son partículas cargadas: el movimiento térmico aleatorio las mueve y distribuye de manera uniforme.
- Lo mismo sucede con los electrones y los huecos: avanzan de mayor a menor concentración debido al movimiento térmico.



Difusión (Diffusion)

Obedece a la ley de Fick:

$$F = -D\nabla\eta$$

- D : Coeficiente de difusión, medido en cm^2/s
- η : Concentración de las partículas que se difunden
- $\nabla\eta$: Gradiente de concentración

El flujo de partículas es proporcional al **gradiente de concentración**. Un gradiente apunta en la dirección de menor a mayor concentración.

El gradiente en tres dimensiones:

$$\nabla\eta = \frac{\partial n}{\partial x}\hat{x} + \frac{\partial n}{\partial y}\hat{y} + \frac{\partial n}{\partial z}\hat{z}$$

Corriente de Difusión

- En el caso de semiconductores

$$J_{dif,n} = q \cdot D_n \cdot \nabla n$$

$$J_{dif,p} = -q \cdot D_p \cdot \nabla p$$

- En una dimensión

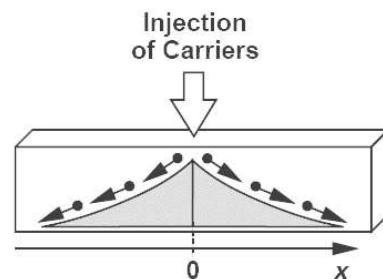
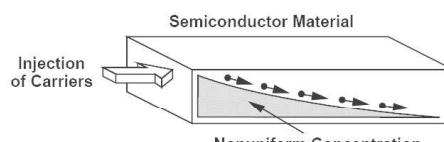
$$J_{dif,n} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \hat{x}$$

$$J_{dif,p} = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} \hat{x}$$

- El coeficiente de difusión es:

$$D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

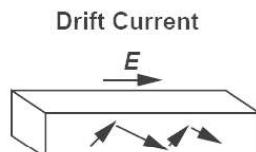


Relación de Einstein

- Relaciona la movilidad con el coeficiente de difusión

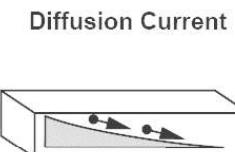
$$D = V_t \cdot \mu$$

$$V_t = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ mV para } T = 300 \text{ K}$$



$$J_n = q \mu_n E$$

$$J_p = q \mu_p$$

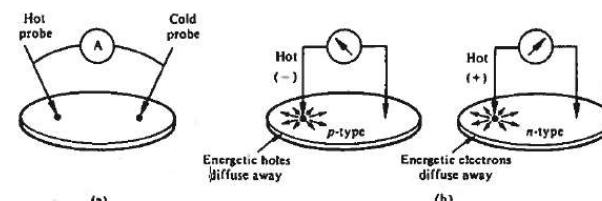


$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_n = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

Experimento de Punta Caliente (Hot Probe)

- Permite determinar si una oblea es de tipo P o de tipo N

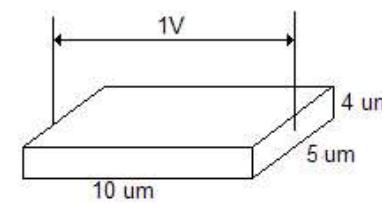


- Si la oblea es tipo P, al tocar con la punta caliente, los huecos se difunden alejándose, produciendo una región ligeramente negativa
- Si la oblea es tipo N, al tocar con la punta caliente, los electrones se difunden alejándose, produciendo una región ligeramente positiva
- El galvanómetro permite detectar estas corrientes con direcciones opuestas

Ejemplo: Arrastre

Una barra de silicio tiene dimensiones $10 \text{ }\mu\text{m} \times 5 \text{ }\mu\text{m} \times 4 \text{ }\mu\text{m}$. La barra está dopada de manera uniforme, con una concentración de huecos 10^{15} cm^{-3} . Se aplica una tensión de 1 V entre las terminales, según se ilustra en la figura. Para estas condiciones, calcule:

- La concentración de portadores de carga minoritarios
- La densidad de corriente J_{drift} y la corriente total en la barra
- La velocidad de arrastre \vec{v}_d de electrones y huecos



- La concentración de portadores se obtiene con la Ley de Acción de Masas:

$$p = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(10^{10})^2}{10^{15}} \\ n = 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

Solución: Arrastre

b) La corriente de arrastre es:

$$J_{drift} = (qn\mu_n + qp\mu_p)E$$

Esto se simplifica debido a que la diferencia entre n y p es 10 órdenes de magnitud. Por lo tanto, se puede despreciar la contribución de los electrones:

$$J_{drift} = qp\mu_p E$$

En este punto se sustituyen los valores, teniendo cuidado de utilizar las unidades correctas para que se puedan cancelar o agrupar:

$$J_{drift} = (1.6 \times 10^{-19} C)(10^{15} cm^{-3})(1380 cm^2/Vs)(1V/10\mu m)$$

Donde $1 \mu m$ equivale a $10^{-6} m$ que a su vez son $10^{-4} cm$:

$$J_{drift} = (1.6 \times 10^{-19} C)(10^{15} cm^{-3})(1380 cm^2/Vs) \left(\frac{1V}{10 \cdot 10^{-4} cm} \right)$$

Evaluando la expresión se obtiene una densidad de corriente:

$$J_{drift} = 220.8 A/cm^2 = 2.208 \mu A/\mu m^2$$

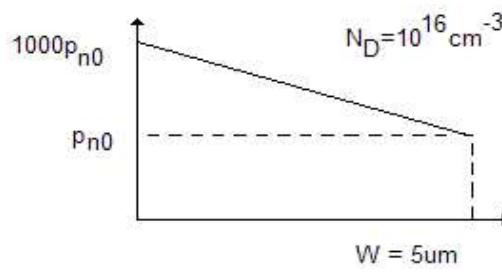
La corriente total de arrastre se obtiene multiplicando por el área:

$$I = J \cdot A = \left(220.8 \frac{A}{cm^2} \right) (5 \times 10^{-4} cm \cdot 4 \times 10^{-4} cm) \Rightarrow I = 44.16 \mu A$$

Ejemplo: Difusión

Se inyectan huecos de manera constante en una región de silicio tipo N. En estado estable, se establece el perfil de concentración de huecos mostrado en la figura. Encuentre:

- La magnitud, dirección y unidades del gradiente de concentración ∇p
- La densidad de corriente de difusión J_{diff}



Solución: Arrastre

c) La velocidad de arrastre es

$$v = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0 E}{v_{sat}}} \times E$$

Donde el término $\frac{\mu_0 E}{v_{sat}}$ indica si es necesario incluir saturación de velocidad. En general, se debe incluir si este término es mayor que 0.1, porque esto haría que el término unitario del denominador varíe más de un 10%.

Para este caso se tiene $E=1V/10\mu m=1 kV/cm$, $v_{sat}=10^7 cm/s$ por lo que

$$\frac{\mu_n E}{v_{sat}} = \frac{1350 cm^2/Vs \cdot 1 \times 10^3 V/cm}{10^7 cm/s} = 0.135$$

$$\frac{\mu_p E}{v_{sat}} = \frac{480 cm^2/Vs \cdot 1 \times 10^3 V/cm}{10^7 cm/s} = 0.048$$

Calculando entonces con saturación de velocidad:

$$v_e = \frac{1350 cm^2/Vs}{1 + 0.135} \times 1 \frac{kV}{cm} = 1.19 \times 10^6 cm/s$$

$$v_h = \frac{480 cm^2/Vs}{1 + 0.048} \times 1 \times 10^3 kV/cm = 4.58 \times 10^5 cm/s$$

Solución: Difusión

El silicio es de tipo N con $N_D = 10^{16} cm^{-3}$ por lo que hay $p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} = 10^4 cm^{-3}$

a) El gradiente de concentración es:

$$\nabla p = \frac{dp}{dx} \hat{x} = \frac{\Delta p}{\Delta x} \hat{x} = \frac{1000p_{n0} - p_{n0}}{0 - 5 \mu m} \hat{x} = \frac{-999p_{n0}}{5 \mu m} \hat{x} = \frac{-999(10^4 cm^{-3})}{5 \times 10^{-4} cm} \hat{x}$$

$$\nabla p = -1.998 \times 10^{10} cm^{-4} \hat{x}$$

b) La densidad de corriente de difusión es de huecos:

$$J_{dif,p} = q \cdot D_p \cdot \nabla p$$

$$J_{dif,p} = (1.602 \times 10^{-19} C) \cdot (12 cm^2/Vs) \cdot (-1.998 \times 10^{10} cm^{-4})$$

$$J_{dif,p} = -3.84 \times 10^{-8} A/cm^2 \hat{x}$$

Clase 5

Deformación de Bandas

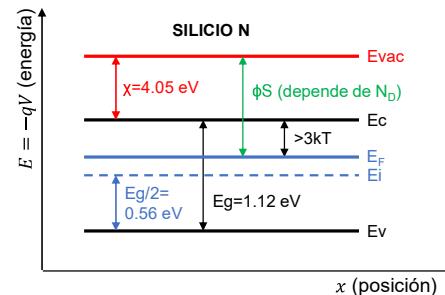
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Elementos Activos
Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez
Semestre II-2019

Deformación de Bandas

- Los materiales estudiados hasta el momento se encuentran en estado de equilibrio térmico (sin tensión aplicada, temperatura constante, sin luz)
- El diagrama de bandas es plano indicando que E no varía con la posición.
- Cuando se asumen condiciones fuera de equilibrio térmico, existe **deformación de bandas o doblamiento de bandas**
- Esto sucede en los siguientes escenarios:
 - Tensión aplicada** en una sección del material
 - Contacto** de dos materiales con distintos niveles de energía
 - Dos metales (efecto Seebeck)
 - Metal-semiconductor (contacto óhmico y contacto Schottky)
 - Semiconductor-semiconductor (unión PN = diodo)

Diagrama de Bandas en Equilibrio

El diagrama de bandas de energía para silicio tipo n no degenerado, en equilibrio térmico y sin luz externa aplicada, se muestra en la figura:



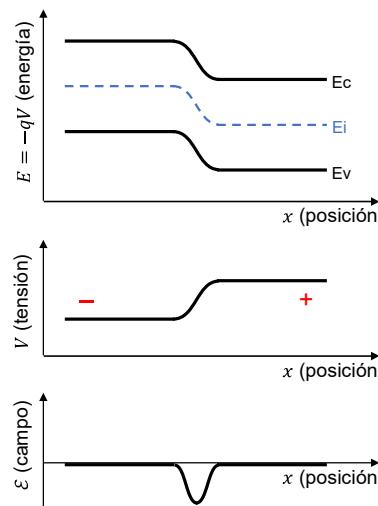
Donde

- Ev: banda de valencia
- Ec: banda de conducción
- Evac: nivel de vacío
- X: afinidad electrónica
- φ: función de trabajo

- Las bandas son planas indicando que la energía es la misma en cualquier posición del cristal.
- La energía está definida para un electrón.
- El eje vertical indica que la energía aumenta.
- El eje vertical indica que el potencial disminuye.

Deformación de Bandas con Potencial Aplicado

Cuando hay un campo eléctrico \mathcal{E} en el semiconductor, el diagrama de bandas se deforma → bandas dependen de la posición x



- Un potencial positivo desplaza las bandas hacia abajo: $E = -qV$

- El potencial se calcula como

$$V = -\frac{1}{q}(E_C - E_{ref})$$

Por lo tanto V es un espejo de la banda de conducción E_C

- El campo eléctrico \mathcal{E} se define como:

$$\mathcal{E} = -\nabla V = \frac{-dV}{dx}$$

De modo que

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \frac{dE_C}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_V}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$

Por lo tanto \mathcal{E} es la primera derivada de la banda de conducción E_C

Deformación de Bandas en Contactos S-S

Al unir dos materiales distintos, los niveles de Fermi se alinean.

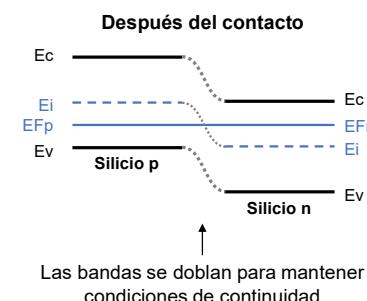
Considere el diagrama de bandas del silicio p y el silicio n por separado.

- Silicio 1: (tipo p: $\phi_{S1} = 4.72$ eV)
- Silicio 2: (tipo n, $\phi_{S2} = 4.50$ eV)

Al unir los dos materiales, existe un intercambio de portadores que alinea los niveles de Fermi de ambos materiales

- Las bandas del Si p suben
- Las bandas del Si n bajan

En estado de equilibrio, después del movimiento de cargas, el nivel de Fermi es constante y totalmente horizontal.



Deformación de Bandas en Contactos M-M

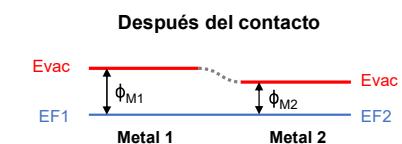
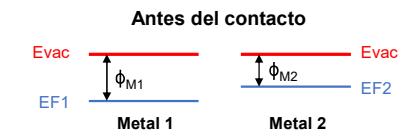
Al unir dos materiales distintos, los niveles de Fermi se alinean.

Considere el diagrama de bandas de dos metales diferentes por separado.

- Metal 1: Au (oro, $\phi_{M1} = 5.1$ eV)
- Metal 2: Al (aluminio, $\phi_{M2} = 4.28$ eV)

Al unir los dos materiales, existe un intercambio de portadores que alinea los niveles de Fermi de ambos materiales

- La función de trabajo en ambos materiales permanece constante



Deformación de Bandas en Contactos M-S

Al unir dos materiales distintos, los niveles de Fermi se alinean.

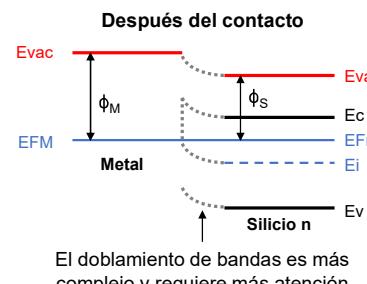
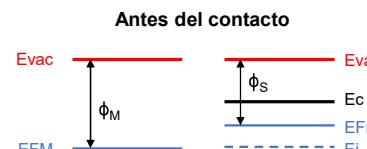
Considere el diagrama de bandas de un metal y un semiconductor

- Metal: Au (oro, $\phi_M = 5.1$ eV)
- Silicio: (tipo n, $\phi_S = 4.50$ eV)

Al unir los dos materiales, existe un intercambio de portadores que alinea los niveles de Fermi de ambos materiales

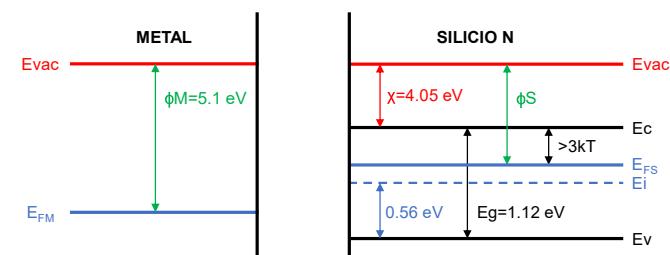
- La función de trabajo en ambos materiales permanece constante

En estado de equilibrio, después del movimiento de cargas, el nivel de Fermi es constante y totalmente horizontal.

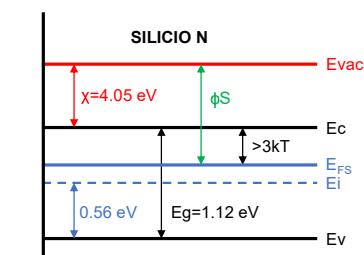


Deformación de Bandas en Contactos M-S

- Un trozo de metal y un trozo de semiconductor se unen sin defectos.
- Los materiales antes del contacto están separados por una barrera.



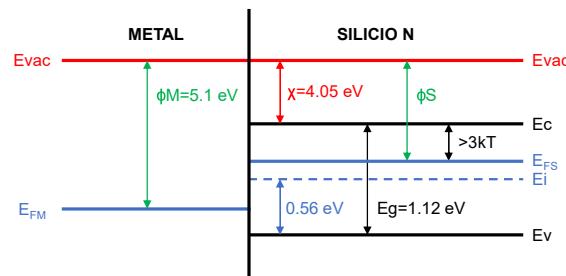
METAL



SILICIO N

Deformación de Bandas en Contactos M-S

- Al unir ambos materiales, el nivel de Fermi del semiconductor se alinea con el del metal → los niveles de energía del semiconductor cambian en la región próxima a la superficie de contacto.



- El desplazamiento de las bandas hacia abajo se debe a que los electrones del silicio tipo n 'saltan' hacia el metal, dejando una **carga positiva** en el semiconductor. Este potencial positivo desplaza las bandas hacia abajo.
- El potencial que se crea se denomina **potencial de contacto**.

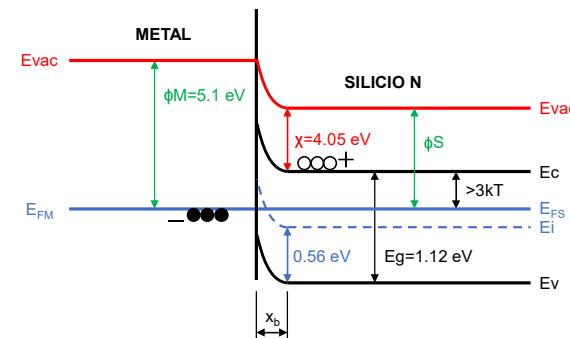
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

101

Deformación de Bandas en Contactos M-S

- En el punto de contacto debe existir continuidad en las bandas.
- Por lo tanto, en el punto de contacto se debe mantener la misma posición inicial que tenía E_{vac} , E_c , E_i , E_v . A partir de ese punto, las bandas se curvan en una distancia x_b .



- La distancia original entre las bandas no se modifica: en el cuerpo de semiconductor a una distancia apropiada (mayor que x_b) se mantienen todas las variables tales como x , ϕ_S , E_g .

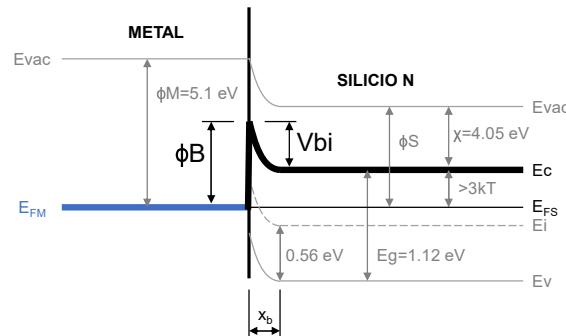
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

102

Deformación de Bandas en Contactos M-S

- Analizando la forma que tiene la banda de conducción, se aprecia que ahora existe una **barrera de potencial** para los electrones a ambos lados.
- Los electrones no pueden pasar de izquierda a derecha, ni de derecha a izquierda, debido a que deben superar dos barreras de potencial.



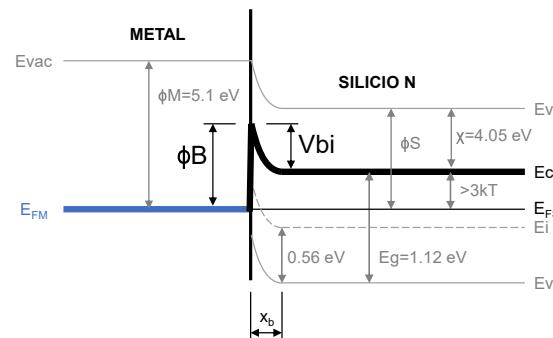
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

103

Potencial y Campo Eléctrico en Contacto M-S

Si las bandas se curvan, es posible graficar el potencial y el campo eléctrico en función de la posición.



Por definición:

$$V = -\frac{1}{q} (E_C - E_{ref})$$

$$\mathcal{E} = -\nabla V = \frac{-dV}{dx}$$

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \frac{dE_C}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_V}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$

A partir de este diagrama de bandas se puede determinar:

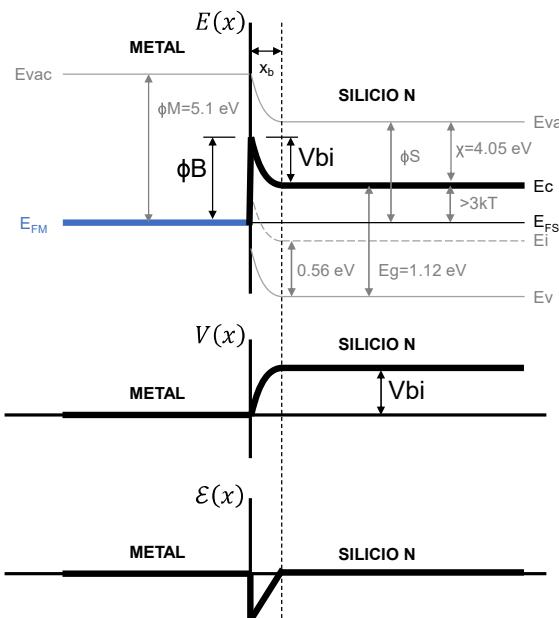
- La forma que tiene V en función de la posición
- La forma que tiene \mathcal{E} en función de la posición

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

104

Potencial y Campo Eléctrico en Contacto M-S



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

105

Barrera Schottky y Potencial de Contacto

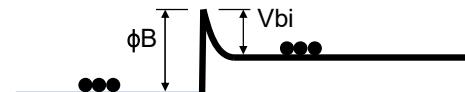
- La barrera Schottky ϕ_B se puede calcular (en eV) como:

$$\begin{aligned}\phi_B &= \phi_M - \chi \\ \phi_B &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_b}{n_i} \right) \\ \phi_B &= 60 \text{ mV} \log \left(\frac{n_b}{n_i} \right)\end{aligned}$$

- El potencial de contacto V_{bi} se puede calcular (en V) como:

$$V_{bi} = -\frac{1}{q} [\phi_B - E_C - E_F]$$

- Este potencial existe en ausencia de tensión externa aplicada.**



- Los electrones del metal NO pueden pasar al semiconductor porque existe una barrera ϕ_B que no se puede superar.
- Los electrones del semiconductor NO pueden pasar al metal porque existe una barrera V_{bi} que no se puede superar.

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

107

Carga: Ecuación de Poisson

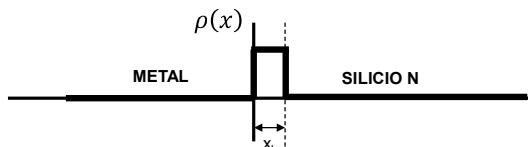
Los electrones que ‘saltan’ del semiconductor al metal dejan una carga eléctrica asociada: positiva en el semiconductor, negativa en el metal

- La carga eléctrica se relaciona con el campo eléctrico por medio de la Ecuación de Poisson:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{q N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

ϵ_0 : permitividad del vacío ($8.85 \times 10^{-14} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}$)
 ϵ_r : permitividad relativa (Si: 11.7, Ge: 16.2)
 ρ : densidad de carga eléctrica [C/cm^{-3}]

- Para el ejemplo estudiado en la diapositiva anterior, la densidad de carga:



Se puede demostrar que el ancho de la región x_b es:

$$x_b = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r (V_{bi} - V_A)}{q N_D}}$$

Donde V_A es el potencial externo aplicado.

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

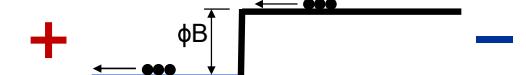
ITCR - Elementos Activos

106

Barrera Schottky y Potencial de Contacto con V aplicada

- Si se aplica una tensión positiva en el metal y negativa en el semiconductor con una magnitud igual a V_{bi} : los electrones pueden fluir de S→M

Polarización Directa



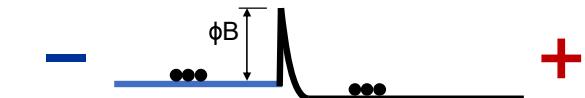
- Si la tensión aplicada excede V_{bi} , los electrones siguen fluyendo:

Polarización Directa



- Si se aplica una tensión positiva en el semiconductor y negativa en el metal la barrera Schottky permanece constante: electrones no fluyen M→S

Polarización Inversa



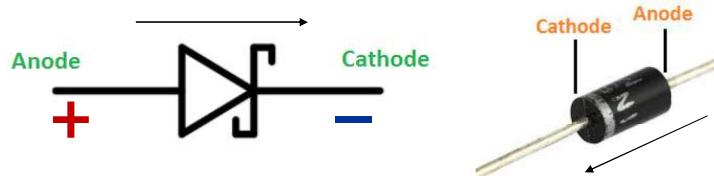
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

108

Diodo Schottky: Ánodo y Cátodo

- El comportamiento que acabamos de describir demuestra que existe un flujo de corriente sólo en una dirección: **contacto rectificante o diodo Schottky**.
- El diodo Schottky tiene dos terminales: un **ánodo** y un **cátodo**
- La corriente técnica (cargas positivas) fluye de ánodo a cátodo



- De acuerdo con las características del contacto estudiado, ¿cuál material forma el ánodo y cuál material forma el cátodo?

Ánodo: Metal

Cátodo: Semiconductor

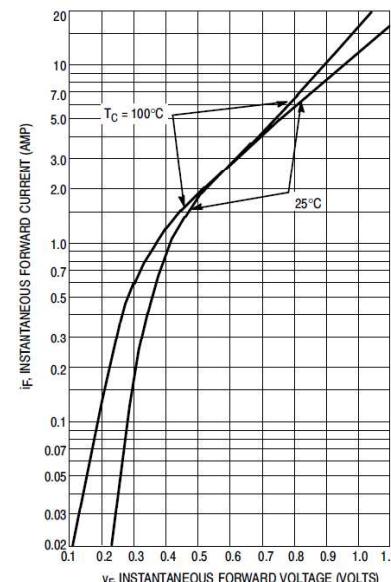
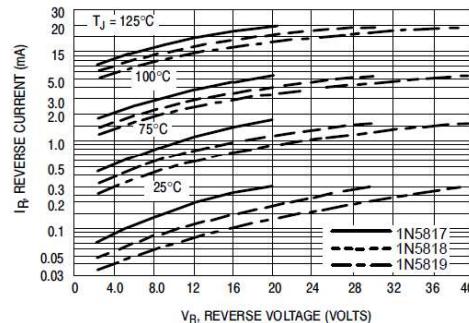
Importante: esto sólo es válido para metal-silicio n con $\phi_M > \phi_S$

Ejemplo: Hoja de Datos 1N5711

Curvas para diodo 1N5711

Diodo Schottky de baja potencia

- Observe la corriente cuando se aplica una tensión de directa $V_F = 1$ V
- Compare con la corriente que se tiene con una tensión de reversa $V_R = 20$ V

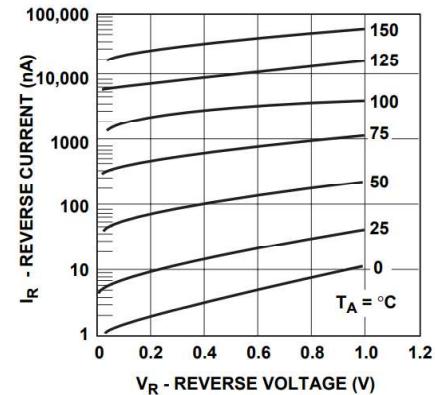
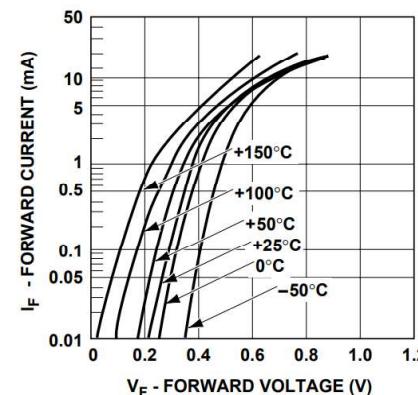


Ejemplo: Hoja de Datos 1N5711

Curvas para diodo 1N5711

Diodo Schottky de baja potencia

- Observe la corriente cuando se aplica una tensión de directa $V_F = 0.6$ V
- Compare con la corriente para una tensión de reversa $V_R = 0.6$ V



Ejemplo: Contacto Metal con Silicio p

- Se tiene un contacto oro-silicio p a temperatura ambiente, donde existe una concentración de átomos dopantes igual a $2.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 - Calcule la posición del nivel de Fermi del silicio
 - Calcule la función de trabajo del silicio
 - Dibuje el diagrama de bandas de energía antes del contacto
 - Determine si las bandas se mueven hacia arriba o hacia abajo
 - Dibuje el diagrama de bandas de energía después del contacto
 - Indique si existe una barrera de potencial para los electrones del metal
 - Indique si existe una barrera de potencial para los huecos del Si
 - Calcule el valor que tienen las barreras de potencial, si hubiera
 - Dibuje por inspección la forma que tiene el potencial V
 - Dibuje por inspección la forma que tiene el campo eléctrico \mathcal{E}
 - Dibuje por inspección la forma que tiene la densidad de carga ρ

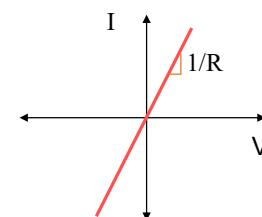
Clase 6

Contactos M-S

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Elementos Activos
Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez
Semestre II-2019

Contactos M-S: Contacto Schottky y Contacto Óhmico

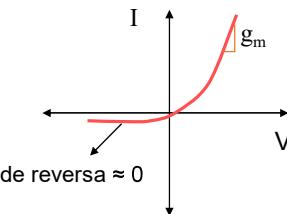
- La unión de un metal con un semiconductor produce contactos con las siguientes curvas características I-V:



Contacto Óhmico

Aplicaciones:

Conexión entre metal y terminales semiconductores de dispositivos electrónicos



Contacto Schottky

Aplicaciones:

Rectificación
Diodos de alta velocidad

Contacto Schottky y Contacto Óhmico

- Al unir un metal con un semiconductor, existen cuatro posibilidades:
 - Metal puede tener Φ_M mayor o menor que Φ_S
 - Semiconductor puede ser de **tipo n** o **tipo p**
- Las cuatro combinaciones posibles se resumen en la siguiente tabla:

Condición	Metal-Semi n	Metal-Semi p
$\Phi_M > \Phi_S$	Schottky	Óhmico
$\Phi_M < \Phi_S$	Óhmico	Schottky

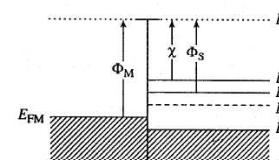
- El contacto Óhmico es un contacto no rectificante**
 - Conducción es posible en ambos sentidos: directo e inverso
 - Se comporta como una resistencia en ambas direcciones
- El contacto Schottky es un contacto rectificante**
 - Conducción es posible en sentido directo (una sola dirección)
 - En sentido inverso no hay posibilidad de conducción

Contacto Schottky y Contacto Óhmico

- Al unir un metal con un semiconductor, existen cuatro posibilidades:

1) $\Phi_M > \Phi_S$

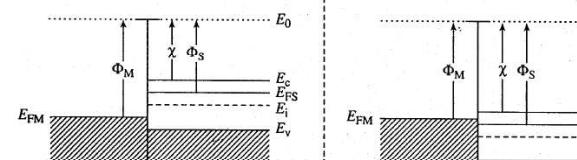
Metal Semiconductor tipo n



Antes del contacto

2) $\Phi_M < \Phi_S$

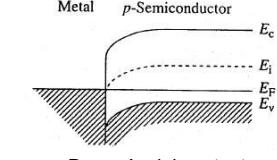
Metal Semiconductor tipo n



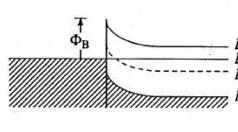
Antes del contacto

3) y 4)

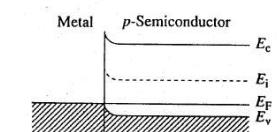
Metal Semiconductor tipo p



Después del contacto

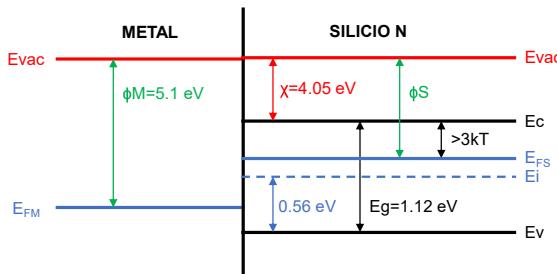


Después del contacto



Después del contacto

Caso 1: Metal-Silicio N $\phi_M > \phi_S$ (Schottky)



Al unir ambos materiales, el nivel de Fermi del metal se alinea con el nivel de Fermi del semiconductor.

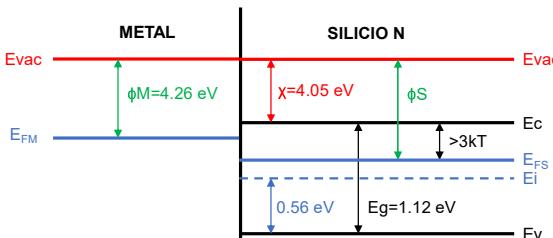
Los niveles de energía del semiconductor cambian, se desplazan hacia **abajo**.

Se produce una diferencia de potencial ϕ_B y se crea el potencial de contacto V_{bi}

Electrones no pueden fluir del metal al semiconductor.

$$\begin{array}{c} \phi_B \\ \downarrow \\ V_{bi} \\ \Phi_B = \Phi_M - \chi \end{array}$$

Caso 2: Metal-Silicio N $\phi_M < \phi_S$ (Óhmico)



Al unir ambos materiales, el nivel de Fermi del metal se alinea con el nivel de Fermi del semiconductor.

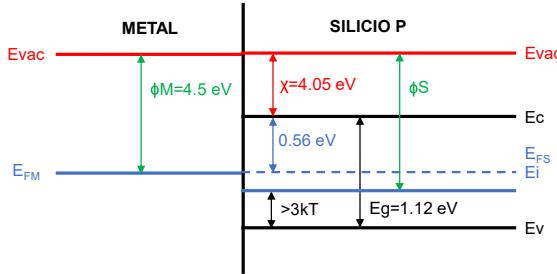
Los niveles de energía del semiconductor cambian, se desplazan hacia **arriba**.

La barrera de potencial es muy pequeña para los electrones del metal. El potencial de contacto no existe

Electrones fluyen en ambas direcciones.

$$\begin{array}{c} \phi_B \\ \downarrow \\ \Phi_B = E_G + \chi - \Phi_M \end{array}$$

Caso 3: Metal-Silicio P $\phi_M < \phi_S$ (Schottky)



Al unir ambos materiales, el nivel de Fermi del metal se alinea con el nivel de Fermi del semiconductor.

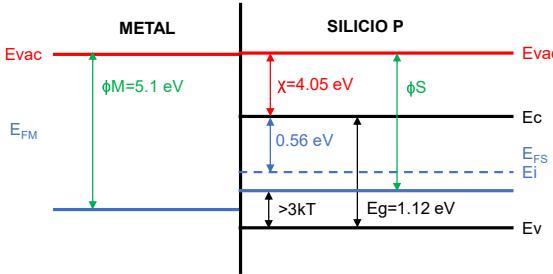
Los niveles de energía del semiconductor cambian, se desplazan hacia **arriba**.

Se produce una diferencia de potencial ϕ_B y se crea el potencial de contacto V_{bi}

Huecos no pueden pasar del metal al semiconductor.

$$\begin{array}{c} \phi_B \\ \downarrow \\ V_{bi} \\ \Phi_B = \Phi_M + \chi - \Phi_S \end{array}$$

Caso 4: Metal-Silicio P $\phi_M > \phi_S$ (Óhmico)



Al unir ambos materiales, el nivel de Fermi del metal se alinea con el nivel de Fermi del semiconductor.

Los niveles de energía del semiconductor cambian, se desplazan hacia **abajo**.

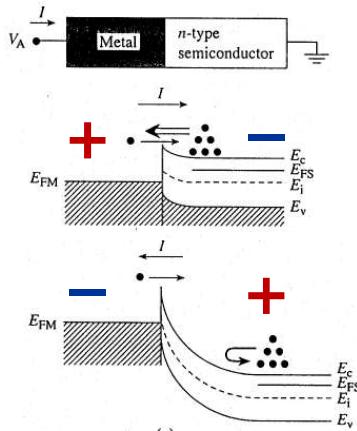
La barrera de potencial es muy pequeña para los huecos del metal.

El potencial de contacto no existe: huecos pasan en ambas direcciones.

$$\begin{array}{c} \phi_B \\ \downarrow \\ \Phi_B = E_G - \chi + \Phi_M \end{array}$$

Contacto Schottky con Tensión Aplicada (M-S tipo n)

- Al aplicar una tensión, los diagramas de bandas se deforman
 - El contacto Schottky bloquea corriente en una dirección
 - El contacto Óhmico permite el paso de corriente en ambas direcciones



Consideré el contacto que se muestra en la figura de la izquierda.

El ancho de la deformación de bandas x_b cambia con la tensión aplicada.

- Si se aplica un potencial V_A positivo (**polarización directa**, como se muestra en la primera figura) las bandas suben y **el ancho de la región x_b disminuye**.
- Si se aplica un potencial V_A negativo (**polarización inversa**, como se muestra en la segunda figura), las bandas bajan y **el ancho de la región x_b aumenta**.

Ancho de la Región de Agotamiento (Schottky M-S tipo n)

La ecuación de Poisson

$$\frac{d\vec{\mathcal{E}}}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{q N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

Integrando a ambos lados:

$$\int_{\varepsilon(x)}^0 d\vec{\mathcal{E}} = \int_x^w \frac{q N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r} dx$$

$$\mathcal{E}(x) = \frac{-q N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r} (w - x)$$

Donde x es una posición arbitraria en el material.

El potencial se obtiene al integrar el campo eléctrico:

$$\frac{dV}{dx} = -\mathcal{E}$$

$$\int_{V(x)}^0 dV = \int_x^w \frac{-q N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r} (w - x) dx$$

$$V(0) - V(x) = \frac{-q N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r} (w - x)^2$$

Se puede despejar el ancho de la zona de agotamiento ($V(w) = V_{bi}$ y $V(0) = V_A$)

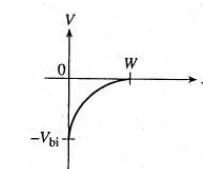
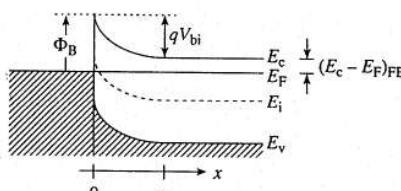
$$w = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_r (V_{bi} - V_A)}{q N_D}}$$

Electrostática en Contacto Schottky (M-S tipo n)

1. Potencial

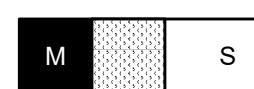
$$E = -qV$$

$$V = \frac{-(E_c - E_{ref})}{q}$$



2. Campo eléctrico

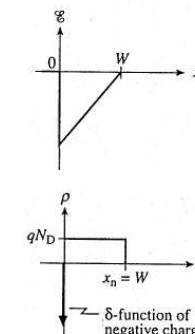
$$\vec{\mathcal{E}} = \frac{-dV}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_c}{dx}$$



La región x_n se conoce como **región de agotamiento**. No hay portadores de carga libres: todos los electrones se pasaron al metal.

$$\Phi_B = \Phi_M - \chi$$

$$V_{bi} = \frac{1}{q} \left[\Phi_B - (E_c - E_{F,FB}) \right]$$



3. Densidad de carga

La ecuación de Poisson

$$\frac{d\vec{\mathcal{E}}}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{q N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

Capacitancia de Directa del Diodo Schottky

Los diodos en reversa son un circuito abierto, y en directa son un corto circuito. Sin embargo, el modelo no ideal del diodo involucra resistencia y capacitancia.

- Cuando se polariza en directa, el diodo Schottky tiene una zona de agotamiento con ancho x_d .
- La densidad de carga existente en la zona de agotamiento es ρ
- La permitividad relativa del silicio es 11.9
- La distancia entre las “placas” paralelas de un condensador es x_d .

Por lo tanto, la capacitancia del diodo Schottky (por unidad de área) es:

$$C_j = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{w} = \frac{q \epsilon_0 \epsilon_r N_D}{\sqrt{2(V_{bi} - V_A)}}$$

$$[C_j] = \left[\frac{F}{m^2} \right]$$

Ejemplo: Diodo Schottky I

Se deposita cobre sobre un sustrato cuidadosamente preparado de silicio n, para formar un diodo Schottky ideal. $\phi_M = 4.65 \text{ eV}$, $\chi = 4.03 \text{ eV}$, $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $T = 300 \text{ K}$. Determine:

- La barrera Schottky ϕ_B
- El potencial de contacto V_{bi}
- El ancho de la región de agotamiento w si $V_A = 0 \text{ V}$
- El valor máximo del campo eléctrico \mathcal{E} si $V_A = 0 \text{ V}$

Referencia: Pierret, p487.

Solución: Diodo Schottky I

Se deposita cobre sobre un sustrato cuidadosamente preparado de silicio n, para formar un diodo Schottky ideal. $\phi_M = 4.65 \text{ eV}$, $\chi = 4.03 \text{ eV}$, $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $T = 300 \text{ K}$. Determine:

- La barrera Schottky ϕ_B

$$\phi_B = \phi_M - \chi =$$

$$\phi_B = 4.65 \text{ eV} - 4.03 \text{ eV}$$

$$\phi_B = 0.62 \text{ eV}$$
- El potencial de contacto V_{bi}

$$E_C - E_F = \frac{E_G}{2} - kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

$$E_C - E_F = 0.56 \text{ eV} - 26 \text{ meV} \ln 10^6$$

$$E_C - E_F = 0.20 \text{ eV}$$

$$V_{bi} = \frac{1}{q} [\phi_B - (E_C - E_F)]$$

$$V_{bi} = \frac{1}{q} [0.62 \text{ eV} - 0.20 \text{ eV}]$$

$$V_{bi} = 0.42 \text{ V}$$
- El ancho de la región de agotamiento w si $V_A = 0 \text{ V}$

$$w = \sqrt{\frac{2(11.9)(8.85 \times 10^{-14})(0.42 - 0)}{(1.6 \times 10^{-19})(10^{16})}}$$

$$w = 0.234 \mu\text{m}$$
- El valor máximo del campo eléctrico \mathcal{E} si $V_A = 0 \text{ V}$

$$\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}(x = 0) = \frac{qN_D(w - 0)}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$\mathcal{E} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})(10^{16})(2.34 \times 10^{-5})}{(11.9)(8.85 \times 10^{-14})}$$

$$\mathcal{E} = 3.59 \times 10^4 \text{ V/cm}$$

Ejemplo: Diodo Schottky II

Se tiene una unión de cromo-silicio con $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Se aplica una tensión $V_A = -5 \text{ V}$ en la terminal del metal.

La terminal del semiconductor está conectada a tierra.

- Calcule V_{bi}
- Calcule el ancho de la zona de agotamiento x_b
- Calcule la magnitud del campo eléctrico en la interfaz ($x=0$)
- Calcule el potencial total existente en el diodo V.
- Calcule la capacitancia de directa por unidad de área.

Referencia: Bart Van Zegbroek <http://ecee.colorado.edu/~bart/book>

Ejemplo: Diodo Schottky II

Se tiene una unión de cromo-silicio con $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Se aplica una tensión $V_A = -5 \text{ V}$ en la terminal del metal.

La terminal del semiconductor está conectada a tierra.

- Calcule V_{bi}

$$\phi_B = \phi_M - \chi$$

$$\phi_B = 4.5 \text{ eV} - 4.05 \text{ eV} = 0.45 \text{ eV}$$

$$E_C - E_F = \frac{E_G}{2} - kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

$$E_C - E_F = 0.56 \text{ eV} - 26 \text{ meV} \ln 10^7$$

$$E_C - E_F = 0.1409 \text{ eV}$$

$$V_{bi} = \frac{1}{q} [\phi_B - (E_C - E_F)]$$

$$V_{bi} = \frac{1}{q} [0.45 \text{ eV} - 0.14 \text{ eV}] = 0.31 \text{ V}$$
- Calcule el ancho de la zona de agotamiento x_b

$$w = \sqrt{\frac{2(11.9)(8.85 \times 10^{-14})(0.31 + 5)}{(1.6 \times 10^{-19})(10^{17})}}$$

$$w = 0.26 \mu\text{m} = 2.6 \times 10^{-5} \text{ cm}$$
- Calcule la magnitud del campo eléctrico en la interfaz ($x=0$).

$$\mathcal{E} = \frac{qN_D(w - x)}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$\mathcal{E} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})(10^{17})(2.6 \times 10^{-5})}{(11.9)(8.85 \times 10^{-14})}$$

$$\mathcal{E} = 4 \times 10^5 \text{ V/cm}$$
- Calcule el potencial total existente en el diodo V.

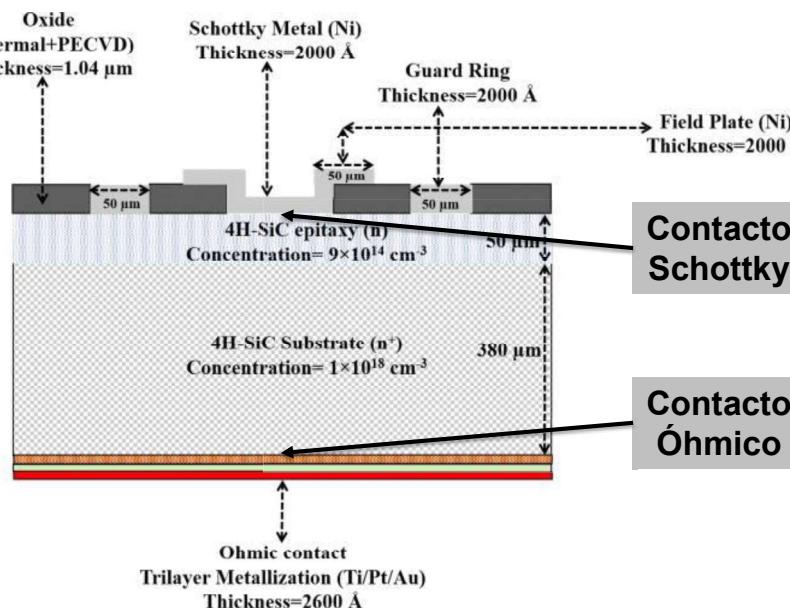
$$V_{total} = V_{bi} - V_A = 0.31 \text{ V} + 5 \text{ V}$$

$$V_{total} = 5.31 \text{ V}$$
- Calcule la capacitancia de directa por unidad de área.

$$C_j = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{w} = \frac{(11.9)(8.85 \times 10^{-14})}{2.6 \times 10^{-5}}$$

$$C_j = 40 \text{ nF/cm}^2$$

Ejemplo: Fabricación de un Diodo Schottky



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

129

Curva Característica del Diodo Schottky

Cuando el diodo Schottky se polariza en directa, la corriente que fluye está dada por la ecuación:

$$I = I_s (e^{qVA/kT} - 1)$$

donde I_s es una constante que describe la corriente de fuga de reversa, y se denomina corriente de saturación del diodo.

La corriente de reversa se calcula a partir de parámetros fundamentales como:

$$I_s \equiv A \mathcal{A}^* T^2 e^{-\Phi_B/kT}$$

$$\mathcal{A}^* \equiv \left(\frac{m_n^*}{m_0} \right) \mathcal{A}$$

$$\mathcal{A} \equiv \frac{4\pi q m_0 k^2}{h^3}$$

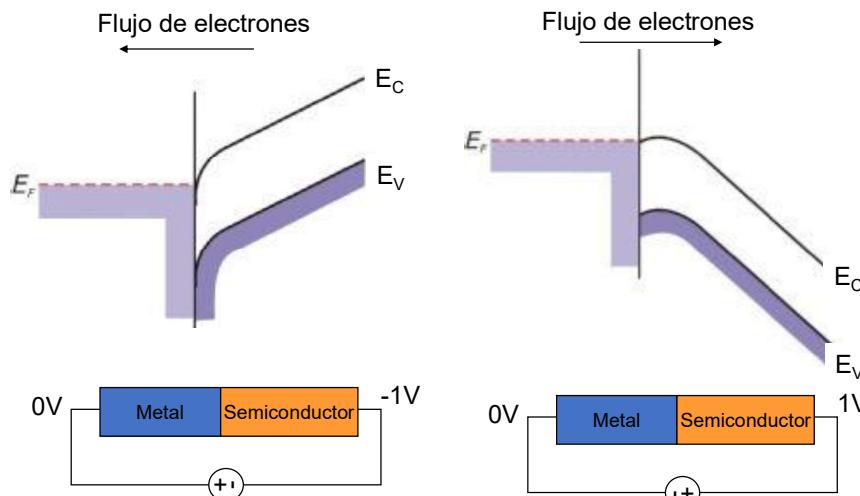
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

130

Polarización del Contacto Óhmico

No hay barrera para flujo de electrones del semiconductor al metal



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

131

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica
Semestre II-2019

Clase 7 Contactos S-S: La Unión PN

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Elementos Activos

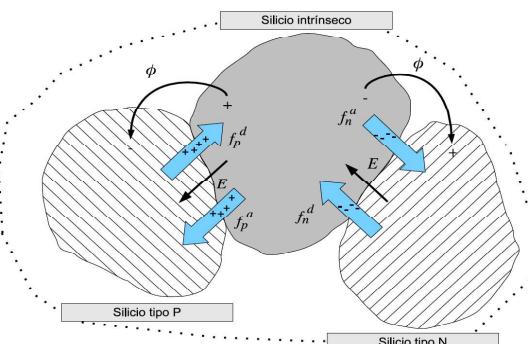
Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez
Semestre II-2019

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

132

Unión de Distintos Tipos de Silicio: Difusión y Arrastre



$$\phi(x_b) = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{n_b}{10^{10}}$$

$$\phi(x_b) = 26 \text{ mV} \cdot \ln \frac{n_b}{10^{10}}$$

$$\phi(x_b) = \frac{26 \text{ mV}}{\log e} \cdot \log \frac{n_b}{10^{10}}$$

$$\phi(x_b) = 60 \text{ mV} \cdot \log \frac{n_b}{10^{10}}$$

- Huecos se difunden de Si P hacia Si intrínseco y se crea un campo E (+ a -)
- Huecos se devuelven de + a - para compensar y equilibrar.
- En equilibrio térmico existe un potencial $\phi(x_b)$

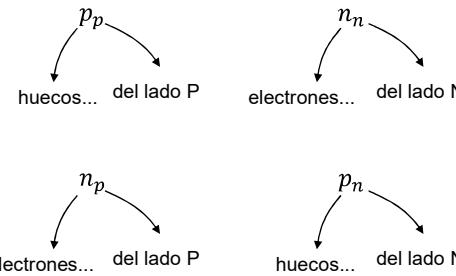
- Electrones se difunden y se crea un campo E del silicio N al silicio intrínseco.
- Para compensar, se crea una corriente de arrastre (de - a +) que estabiliza el flujo de corriente.
- En equilibrio térmico existe un potencial $\phi(x_b)$

La Unión PN

Se unen dos secciones de silicio con dopados complementarios:



Nomenclatura en las ecuaciones:



Movimiento de electrones:

- Los electrones del lado N se mueven al lado P por difusión.
- Queda carga positiva en el lado N, negativa en lado P.
- Se crea un campo eléctrico que va del lado N al lado P.
- Electrones se mueven de vuelta al lado N por arrastre. Ocurre lo mismo con los huecos.

En condiciones de equilibrio, la corriente de arrastre es igual a la corriente de difusión (corriente total es cero).

Potencial de Contacto de la Unión PN

El potencial de contacto de un diodo se calcula partiendo de la condición de equilibrio. Para el caso de huecos:

$$|\vec{j}_{drift,p}| = |\vec{j}_{diff,p}|$$

$$q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \vec{E} = q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} \hat{x}$$

$$\mu_p \cdot p \cdot \frac{dV}{dx} \hat{x} = D_p \cdot \frac{dp}{dx} \hat{x}$$

Integrando

$$\int_{x_1}^{x_2} \mu_p dV = \int_{x_1}^{x_2} D_p \cdot \frac{1}{p} \cdot dp$$

$$V(x_2) - V(x_1) = \frac{D_p}{\mu_p} (\ln p(x_2) - \ln p(x_1))$$

La relación de Einstein:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$$

Sustituyendo la relación de Einstein:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

Y sustituyendo las concentraciones:

$$p_p \approx N_A \quad \wedge \quad p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Ejemplo: Potencial de Contacto

Una unión PN de silicio presenta las siguientes concentraciones de átomos dopantes: $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $N_D = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

- Calcule el potencial de contacto del diodo a temperatura $T = 300 \text{ K}$.
- Calcule el potencial de contacto del diodo a temperatura $T = 373 \text{ K}$.

Solución

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{(2 \times 10^{16})(4 \times 10^{16})}{(10^{10})^2} = \frac{kT}{q} \times 29.71$$

- Para una temperatura de 300 K :

$$\frac{kT}{q} = \frac{(8.617 \times 10^{-5} \frac{eV}{K})(300 \text{ K})}{(1 \text{ e})} = 25.851 \text{ mV} \Rightarrow V_{bi} = 768.03 \text{ mV}$$

- Para una temperatura de 373 K :

$$\frac{kT}{q} = \frac{(8.617 \times 10^{-5} \frac{eV}{K})(373 \text{ K})}{(1 \text{ e})} = 32.141 \text{ mV} \Rightarrow V_{bi} = 954.91 \text{ mV}$$

Ejemplo: Concentración de Portadores

Una unión PN de silicio presenta las siguientes concentraciones de átomos dopantes: $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

- a. Determine la concentración de huecos y electrones a ambos lados de la unión, en equilibrio térmico.

Solución

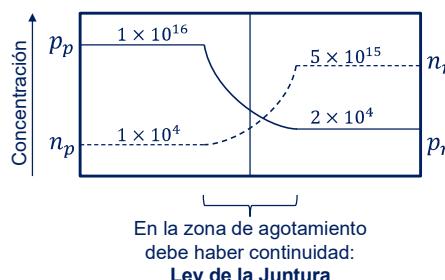
$$p_p \approx N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(10^{10})^2}{10^{16}} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_n \approx N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(10^{10})^2}{5 \times 10^{16}} = 2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

Observe que la concentración de portadores mayoritarios es mucho mayor que la de portadores minoritarios a ambos lados de la unión. De manera gráfica:



Ley de la Juntura

En ambos lados de la juntura existe una concentración definida de electrones. Considerando únicamente los electrones, a ambos lados:

$$\phi_p = V_T \ln \left(\frac{n_p}{n_i} \right)$$

$$\phi_n = V_T \ln \left(\frac{n_n}{n_i} \right)$$

Restando ambos potenciales:

$$\phi_B = \phi_n - \phi_p$$

$$\phi_B = V_T \ln \left(\frac{n_n}{n_i} \right) - V_T \ln \left(\frac{n_p}{n_i} \right)$$

$$\phi_B = V_T \ln \left(\frac{n_n n_i}{n_i n_p} \right)$$

$$\phi_B = V_T \ln \left(\frac{n_n}{n_p} \right)$$

De la última expresión se puede despejar la concentración de electrones del lado n:

$$n_p = n_n e^{-\phi_B/V_T}$$

$$n_p = N_D e^{-\phi_B/V_T}$$

Repetiendo el análisis para huecos:

$$p_n = p_p e^{-\phi_B/V_T}$$

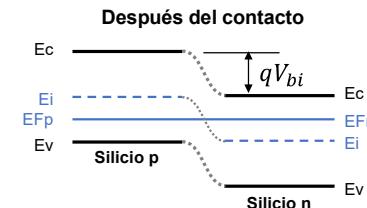
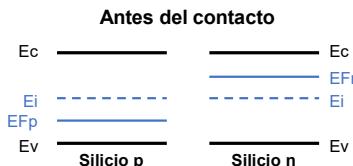
$$p_n = N_A e^{-\phi_B/V_T}$$

Esta es la Ley de la Juntura:

La concentración de portadores minoritarios de un lado de la unión depende de la concentración de portadores mayoritarios del otro lado y de un factor exponencial.

Doblamiento de Bandas en la Unión PN

- Al unir ambos materiales, el nivel de Fermi se alinea
 - Los niveles de energía cambian en ambos semiconductores
 - Huecos pasan de P hacia N
 - Electrones pasan de N hacia P

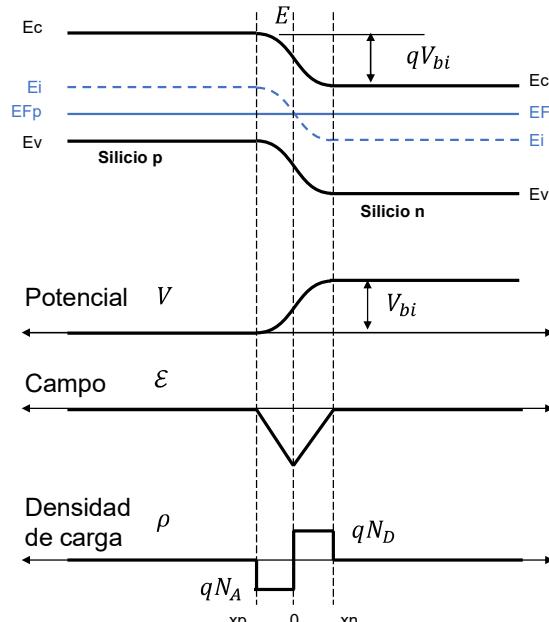


- El potencial de contacto es

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right)$$

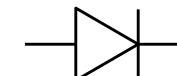
Las bandas se doblan para mantener condiciones de continuidad

Doblamiento de Bandas en la Unión PN



Se forma una barrera de potencial V_{bi} del silicio N → silicio P

Este dispositivo se conoce como **diodo**



Conduce corriente técnica en dirección Si P → Si N

Bloquea la corriente en sentido opuesto

Ancho de la Región de Agotamiento

El ancho de la región de agotamiento de una unión PN en condiciones de equilibrio se calcula como:

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r N_A V_{bi}}{qN_D(N_A + N_D)}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r N_D V_{bi}}{qN_A(N_A + N_D)}}$$

$$x_B = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r V_{bi}}{q} \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}$$

$$x_B = x_p + x_n$$

$$\phi_B = V_{bi}$$

En estas ecuaciones se observa la dependencia del ancho con respecto a las concentraciones de dopado.

El potencial V_{bi} en esta ecuación es el mismo potencial ϕ_B que se calculó para la Ley de la Juntura: la diferencia de los potenciales en ambos lados. Esto es:

$$\phi_B = V_T \ln \left(\frac{n_n}{n_p} \right)$$

$$V_{bi} = V_T \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right)$$

No se debe confundir $V_{bi} = \phi_B$ con la barrera Schottky de las uniones M-S: el diodo NO tiene barrera Schottky.

Ejemplo: Unión PN

Una unión PN está dopada con $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $N_D = 9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

- Determine el potencial de contacto V_{bi}
- Determine la capacitancia en equilibrio $V_R = 0 \text{ V}$ (por unidad de área)
- Determine la capacitancia de reversa para $V_R = 1 \text{ V}$ (por unidad de área)

a) El potencial de contacto es

$$V_{bi} = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 26 \text{ mV} \ln \left[\frac{(2 \times 10^{16})(9 \times 10^{15})}{(10^{10})^2} \right] \Rightarrow V_{bi} = 0.73 \text{ V}$$

b) La capacitancia en equilibrio

$$C_{j0} = \sqrt{\frac{(8.85 \times 10^{-14} \frac{\text{F}}{\text{cm}})(11.9)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3})(9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3})}{2(2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} + 9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3})(0.73 \text{ V})}}$$

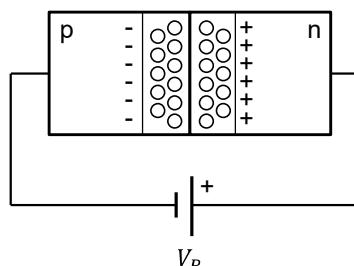
$$C_{j0} = 2.67 \times 10^{-8} \frac{\text{F}}{\text{cm}^2} = 26.7 \frac{\text{nF}}{\text{cm}^2}$$

c) La capacitancia de reversa

$$C_j = \frac{2.67 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2}{\sqrt{1 - \frac{-1 \text{ V}}{0.73 \text{ V}}}} = 1.738 \times 10^{-16} \frac{\text{F}}{\mu\text{m}^2} = 173.8 \frac{\text{pF}}{\mu\text{m}^2}$$

Capacitancia de la Unión PN

Al polarizar la unión PN en reversa:



La zona de agotamiento se ensancha.

Capacitancia:

- Carga entre placas paralelas
- Placas están separadas una distancia $x_p + x_n$

- La capacitancia en equilibrio es:

$$C_{j0} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r q}{2} \times \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \times \frac{1}{V_{bi}}}$$

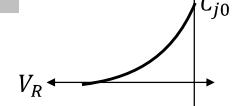
Donde

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$$

$$\epsilon_r = 11.9 \text{ para silicio}$$

- La capacitancia en reversa:

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{V_R}{V_0}}}$$



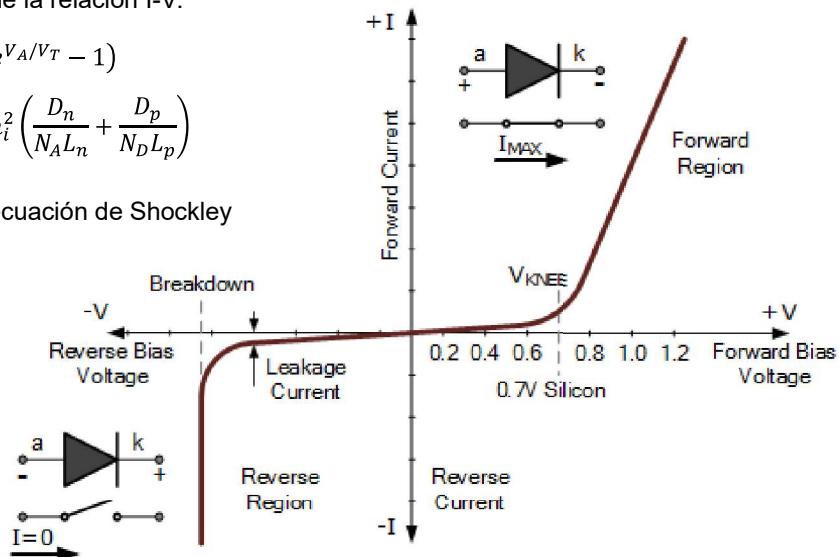
Curva Característica del Diodo de Unión PN

El funcionamiento del diodo se describe por medio de la relación I-V:

$$I_D = I_S (e^{V_A/V_T} - 1)$$

$$I_S = q A n_i^2 \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right)$$

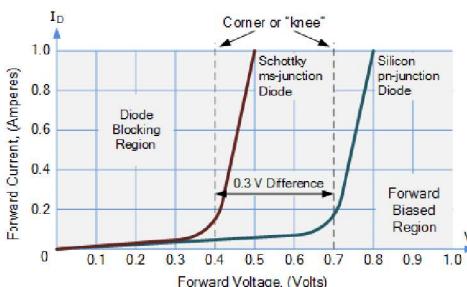
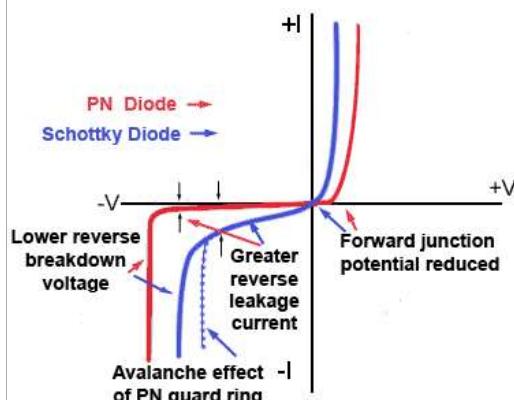
Esta es la ecuación de Shockley



Comparación entre Diodo Schottky y Diodo PN

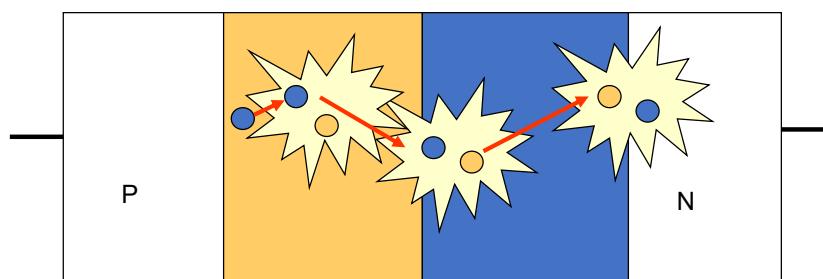
En comparación con el Schottky

- El diodo PN tiene mayor tensión de contacto V_{bi} en comparación con el diodo Schottky.
- El diodo Schottky tiene mayor corriente de fuga en reversa I_S .



Efecto de Avalanche

Efecto de avalanche: portadores minoritarios en la zona de agotamiento son acelerados por el campo eléctrico, creando pares electrón-hueco por medio de ionización por impacto.



- Aumento de portadores de carga libre aumenta la corriente que puede contribuir a la ionización por impacto

Otros Tipos de Diodos

Tipos de diodo

- Diodo PN (normal)
- Diodo emisor de luz (light emitting diode, LED)
- Diodos láser
- Diodo Zener
- Diodo Schottky
- Diodo de avalancha
- Diodo túnel

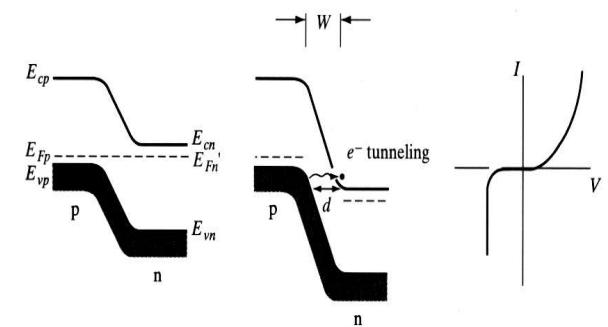
Efecto Zener

Efecto Zener:

Electrones pasan de la banda de valencia del material P a la banda de conducción del material N (generación) y crean altas corrientes en el diodo

Paso de electrones debido a efecto túnel: requiere altos niveles de dopado para disminuir el ancho de la zona de agotamiento

$$E \approx 10^6 \text{ V/cm}$$



Efectos de la Temperatura

- Diodos PN
 - Corriente aumenta con T
 - Aumento en vibración, mayor cantidad de portadores de carga creados por generación térmica
- Diodos operando en región de avalancha
 - Magnitud de voltaje de ruptura aumenta con T
 - Aumento en vibración, aumento en dispersión, disminuye trayectoria media libre, menor energía transferida en colisiones
 - Debe aumentar el campo para crear avalancha
- Diodos Zener
 - Magnitud de voltaje de ruptura disminuye con T
 - Aumento en vibración, aumento en energía de electrones en banda de valencia, facilita ruptura de enlaces
 - Requiere menor energía del campo para extraer electrones de sus posiciones en la red cristalina

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

149

Diodos de Resistencia Negativa

- Resistencia negativa:
 - Resistencia diferencial negativa
 - Al aumentar V, disminuye I
- Diodo túnel (diodo Esaki)
 - Diodo fabricado con semiconductores degenerados
 - Gran deformación de bandas, región de agotamiento angosta
 - Band to band tunneling
 - Aplicación: alta frecuencia
- Diodo Gunn (dispositivo de electrón transferido)
 - Diodo fabricado con semiconductor N, pero con tres capas de diferente concentración de dopado
 - Dos capas de alta concentración; una de baja concentración en el medio
 - Aplicación: alta frecuencia, bajo ruido, consumo de potencia medio

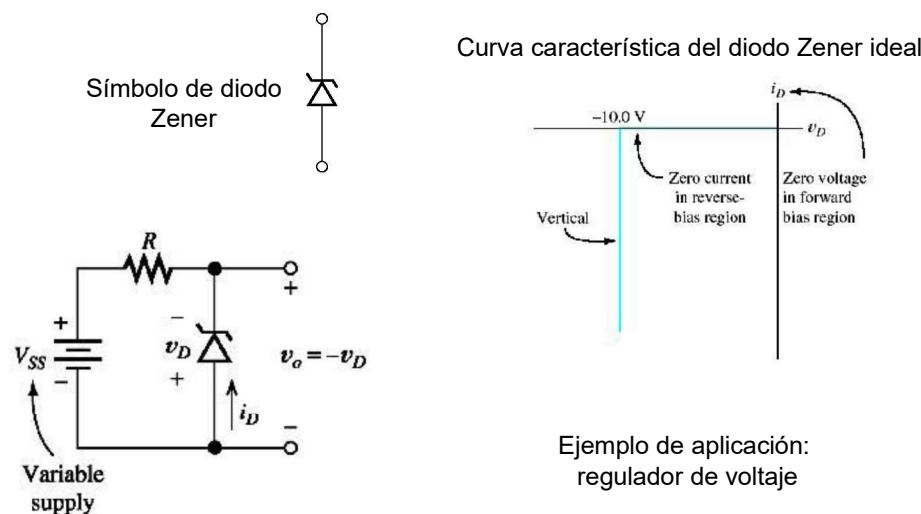
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

150

El Diodo Zener

Los diodos que operan en la región de ruptura (por avalancha o efecto Zener), se conocen como diodos de ruptura y comúnmente como diodos ZENER.



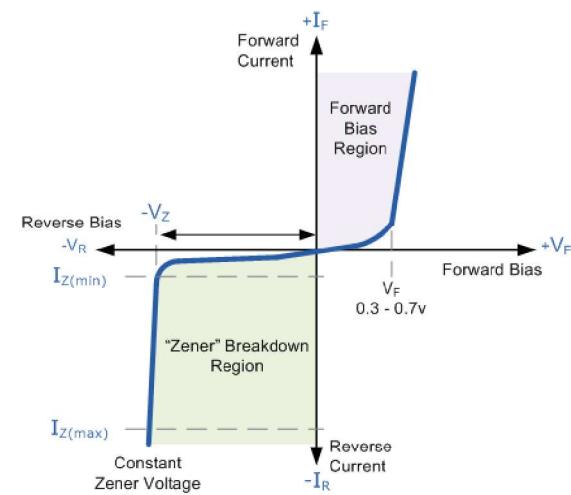
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

151

El Diodo Zener

- El diodo Zener es similar a un diodo convencional, pero está diseñado específicamente para operar en la región inversa (región Zener)



Referencia: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_7.html

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

152

Ejemplo: Diodo Zener como Regulador CD

Se requiere proveer una tensión de alimentación de 5.0 V a partir de una fuente de alimentación de 12 V DC. La potencia máxima nominal PZ de un diodo Zener es de 2 W. Utilizando el circuito regulador mostrado, calcule:

- a) La corriente máxima que fluye a través del diodo.

$$\text{Maximum Current} = \frac{\text{Watts}}{\text{Voltage}} = \frac{2\text{w}}{5\text{v}} = 400\text{mA}$$

- b) El valor mínimo de la resistencia serie RS.

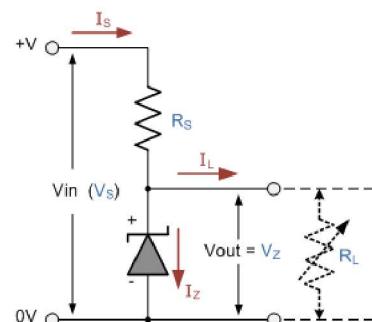
$$R_S = \frac{V_S - V_Z}{I_Z} = \frac{12 - 5}{400\text{mA}} = 17.5\Omega$$

- c) La corriente de carga IL si se conecta una resistencia de 1 kΩ en paralelo con las terminales del diodo..

$$I_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{5\text{v}}{1000\Omega} = 5\text{mA}$$

- d) La corriente que fluye con carga completa.

$$I_Z = I_S - I_L = 400\text{mA} - 5\text{mA} = 395\text{mA}$$



Referencia: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_7.html

Clase 8 El Diodo: Modelos CD y CA

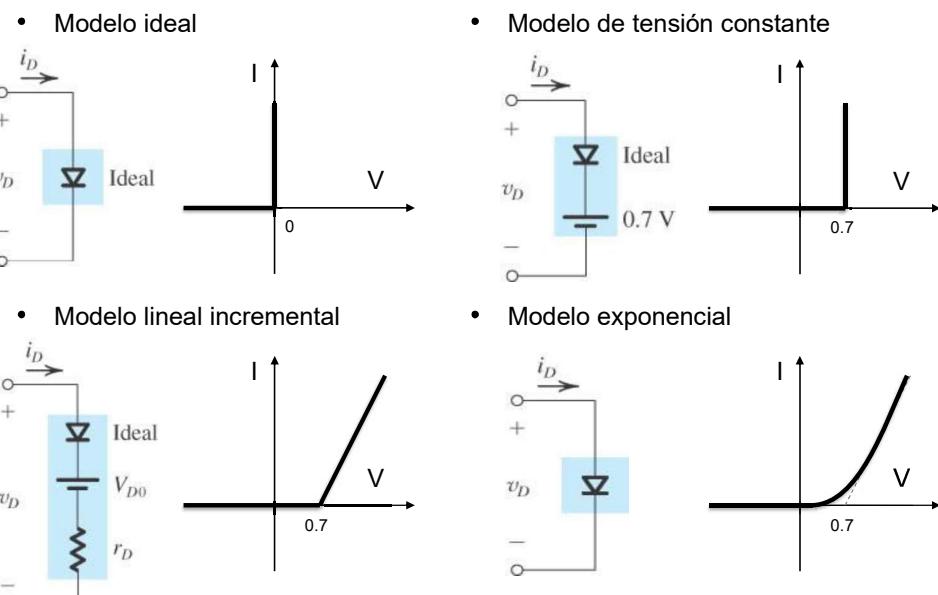
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Elementos Activos

Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez
Semestre II-2019

Modelos CD del Diodo

- El diodo permite el paso de la corriente en una sola dirección.
- Existen cuatro modelos para el diodo:
 - Modelo ideal
 - Modelo de tensión constante
 - Modelo lineal incremental
 - Modelo exponencial
- Cada modelo se utiliza en situaciones diferentes:
 - el modelo ideal permite hacer cálculos rápidos en circuitos rectificadores, sin considerar la tensión de contacto V_{bi} ,
 - el modelo de tensión constante permite hacer cálculos rápidos en la mayoría de circuitos considerando la tensión de contacto V_{bi} ,
 - el modelo lineal incremental se utiliza para cálculos de corriente alterna,
 - y el modelo exponencial permite encontrar el punto de operación exacto de los circuitos con diodos.

Modelos CD del Diodo



Modelo Ideal

Para el circuito de la figura, calcule la corriente que fluye a través del diodo si se utiliza el modelo ideal. Calcule además la potencia que disipa la resistencia, la potencia que disipa el diodo y la potencia que entrega la fuente.

$$V_D = 0 \text{ V}$$

$$V_R = V_S - V_D = 1.5 \text{ V} - 0 \text{ V} = 1.5 \text{ V}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{1.5 \text{ V}}{220 \Omega} = 6.82 \text{ mA}$$

$$P_R = V_R \cdot I_R = 1.5 \text{ V} \cdot 6.82 \text{ mA} = 10.23 \text{ mW}$$

$$P_D = V_D \cdot I_D = 0 \text{ V} \cdot 6.82 \text{ mA} = 0 \text{ W}$$

$$P_S = V_S \cdot I_D = 1.5 \text{ V} \cdot 6.82 \text{ mA} = 10.23 \text{ mW}$$

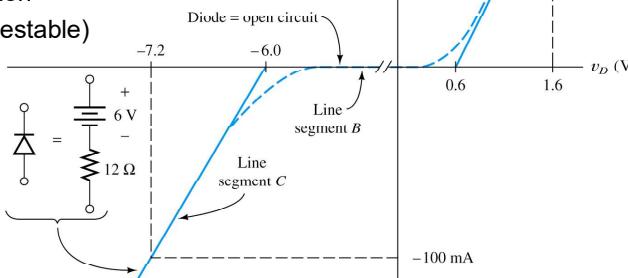
En este modelo, el diodo no disipa potencia.
Toda la potencia cae en la resistencia.

Modelo Lineal Incremental (MLI)

El modelo aproxima el funcionamiento en la región directa con una línea recta. También permite aproximar región inversa.

- Resistencia estática del diodo R_D
 - Resistencia en el punto de operación Q
 - Se obtiene al dividir tensión entre corriente
- Punto de operación Q
 - Punto de polarización
 - Punto quiescente (estable)
- Resistencia dinámica:

$$r_d = 1/g_m = \left. \frac{v_D}{i_D} \right|_Q$$



Modelo de Tensión Constante

Para el circuito de la figura, calcule la corriente que fluye a través del diodo si se utiliza el modelo de tensión constante con $V_D = 0.7 \text{ V}$. Repita los cálculos de potencia del ejemplo anterior.

$$V_D = 0.7 \text{ V}$$

$$V_R = V_S - V_D = 1.5 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 0.8 \text{ V}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{0.8 \text{ V}}{220 \Omega} = 3.64 \text{ mA}$$

$$P_R = V_R \cdot I_R = 0.8 \text{ V} \cdot 3.64 \text{ mA} = 2.91 \text{ mW}$$

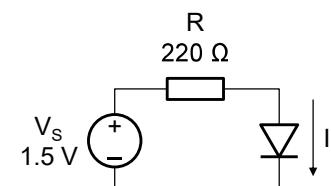
$$P_D = V_D \cdot I_D = 0.7 \text{ V} \cdot 3.64 \text{ mA} = 2.55 \text{ mW}$$

$$P_S = V_S \cdot I_D = 1.5 \text{ V} \cdot 3.64 \text{ mA} = 5.46 \text{ mW}$$

Este modelo es más exacto: observe que ahora la corriente es casi la mitad. El diodo consume una potencia finita, que debe estar dimensionada para ser siempre menor que la potencia nominal del diodo.

Modelo Lineal Incremental (MLI)

Para el circuito de la figura, calcule la corriente que fluye a través del diodo si se utiliza el modelo lineal incremental con $V_{TH} = 0.7 \text{ V}$ y una pendiente $1/52 \Omega$. Encuentre la corriente I_D y la tensión V_D utilizando al menos tres iteraciones.



El modelo lineal incremental:

$$I_D = g_m(V_D - V_{TH})$$

Donde g_m es la transconductancia, que se define como la pendiente de la curva I-V.

Por lo tanto:

$$V_{TH}: \text{tensión de umbral}$$

$$I_D = \frac{1}{52 \Omega} (V_D - 0.7 \text{ V})$$

Para encontrar V_D de manera exacta se debe recurrir al método de solución iterativo, porque como se observa al despejar V_D , la tensión del diodo es función de la corriente que fluye a través de él.

Modelo Lineal Incremental (MLI)

Partiendo de la ecuación del MLI:
 $I_D = \frac{1}{52 \Omega} (V_D - 0.7 V)$

Se despeja la tensión del diodo
 $V_D = (52 \Omega) \cdot I_D + 0.7 V$

Suponiendo que inicialmente la tensión del diodo es $V_{D0} = 0.7 V$, calculamos la corriente I_{D1} a partir de la caída de tensión en R (LVK)

$$I_{D1} = \frac{V_S - V_{D1}}{R} = \frac{1.5 V - 0.7 V}{220 \Omega}$$

$$I_{D1} = 3.64 mA$$

Recalcular la tensión del diodo
 $V_{D1} = (52 \Omega) \cdot (3.64 mA) + 0.7 V$
 $V_{D1} = 889.3 mV$

Con esta tensión calculamos la corriente del diodo I_{D2} en la segunda iteración

$$I_{D2} = \frac{V_S - V_{D2}}{R} = \frac{1.5 V - 0.8893 V}{220 \Omega}$$

$$I_{D2} = 2.78 mA$$

Recalcular la tensión del diodo
 $V_{D2} = (52 \Omega) \cdot (2.78 mA) + 0.7 V$
 $V_{D2} = 844.3 mV$

$$\text{Recalcular la corriente}$$

$$I_{D3} = \frac{V_S - V_{D3}}{R} = \frac{1.5 V - 0.8443 V}{220 \Omega}$$

$$I_{D3} = 2.98 mA$$

$$\text{Recalcular la tensión del diodo}$$

$$V_{D3} = (52 \Omega) \cdot (2.98 mA) + 0.7 V$$

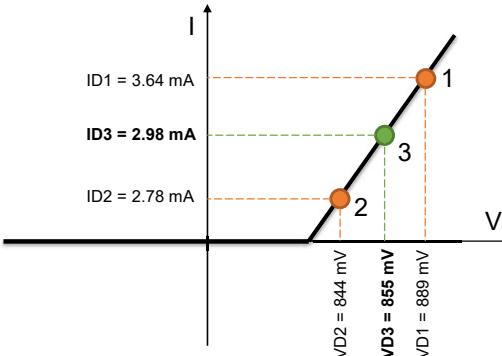
$$V_{D3} = 855.0 mV$$

Modelo Lineal Incremental (MLI)

El método de solución que acabamos de describir parte de una suposición inicial ($V_D = 0.7 V$) y un modelo lineal para realizar una estimación de la tensión real del diodo cuando fluye una corriente.

- En otras palabras, la corriente cambia la tensión que cae en el diodo.
- V_D no es constante con la tensión.

De manera gráfica, lo que acabamos de realizar es encontrar el punto Q:



El punto Q (quiescente) o punto de operación es el punto final al repetir el proceso n iteraciones.

El proceso iterativo se repite hasta que el error entre dos iteraciones consecutivas sea menor que un parámetro ϵ que dependerá de la aplicación.

Modelo Exponencial: Ecuación de Shockley

La ecuación de Shockley permite calcular la corriente que fluye a través de un diodo cuando se aplica un potencial V_D entre sus terminales.

- Es una ecuación exponencial
- Describe el comportamiento de la corriente en polarización directa
- El parámetro I_S es la corriente de fuga en polarización inversa

El procedimiento de solución también es iterativo, similar al proceso que se utilizó para resolver por el MLI.

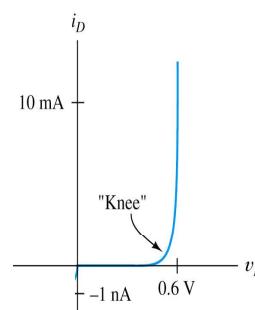
La diferencia es la ecuación para calcular V_D .

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

$$I_S = q A n_i^2 \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right)$$

$$D_n \approx 34 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$D_p \approx 12 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$



Modelo Exponencial: Efecto de Ruptura

- Efecto de Ruptura = breakdown
 - Un voltaje de polarización inversa alto puede causar una alta corriente fluyendo por el diodo

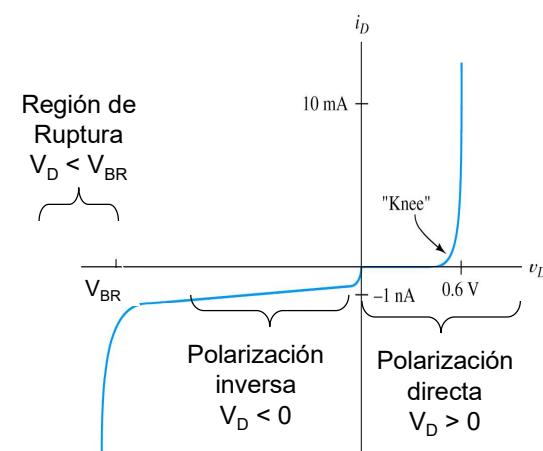
Puede deberse a:

- Efecto Zener
- Efecto de avalancha

Ambos efectos son reversibles

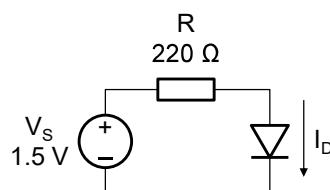
- No daña la unión PN si la potencia no excede la potencia máxima del diodo

En la región inversa, el comportamiento es también exponencial (ecuación de Shockley) y se utiliza para calcular I_D en diodos Zener.



Modelo Exponencial: Ecuación de Shockley

Para el circuito de la figura, calcule la corriente que fluye a través del diodo si se utiliza el modelo exponencial con $I_S = 1 \times 10^{-14} \text{ A}$. Encuentre la corriente I_D y la tensión V_D utilizando al menos tres iteraciones.



El modelo exponencial:

$$I_D = I_S(e^{V_D/V_T} - 1)$$

Donde I_S es la corriente de fuga o corriente de saturación de reversa.

Por lo tanto:

$$I_D = (1 \times 10^{-14} \text{ A})(e^{V_D/26mV} - 1)$$

$$I_D \approx (1 \times 10^{-14} \text{ A}) \cdot e^{V_D/26mV}$$

Para encontrar V_D de manera exacta se debe recurrir al método de solución iterativo, porque como se observa al despejar V_D , la tensión del diodo es función de la corriente que fluye a través de él.

Resumen: Método de Solución Iterativo

1. Asumir una tensión $V_D = 0.7 \text{ V}$ (para diodos de silicio)
2. Calcular la corriente utilizando la ecuación del circuito:

$$I_D = \frac{V_S - V_D}{R}$$

3. Recalcular la tensión del diodo utilizando la ecuación de Shockley:

$$V_D = V_t \ln \frac{I_D}{I_S}$$

4. Repetir 2 y 3 hasta obtener un error aceptable

$$\epsilon = \frac{|I_{D[n]} - I_{D[n-1]}|}{I_{D[n]}} \times 100\%$$

Modelo Exponencial: Ecuación de Shockley

Partiendo de la ecuación exp:

$$I_D = I_S(e^{V_D/V_T} - 1)$$

Se despeja la tensión del diodo

$$V_D = V_T \ln(I_D/I_S)$$

Suponiendo que inicialmente la tensión del diodo es $V_{D0} = 0.7 \text{ V}$, calculamos la corriente I_{D1} a partir de la caída de tensión en R (LVK)

$$I_{D1} = \frac{V_S - V_{D1}}{R} = \frac{1.5 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{220 \Omega}$$

$$I_{D1} = 3.6363 \text{ mA}$$

Recalcular la tensión del diodo con el modelo exponencial:

$$V_{D1} = (26 \text{ mV}) \ln(3.6363 \text{ mA}/10^{-14} \text{ A})$$

$$V_{D1} = 692.10 \text{ mV}$$

Con esta tensión calculamos la corriente del diodo I_{D2} en la segunda iteración

$$I_{D2} = \frac{V_S - V_{D2}}{R} = \frac{1.5 \text{ V} - 0.692 \text{ V}}{220 \Omega}$$

$$I_{D2} = 3.6723 \text{ mA}$$

Recalcular la tensión del diodo

$$V_{D2} = (26 \text{ mV}) \ln(3.6723 \text{ mA}/10^{-14} \text{ A})$$

$$V_{D2} = 692.36 \text{ mV}$$

El error entre ambas iteraciones es

$$\% \epsilon = \frac{V_{Dn} - V_{Dn-1}}{V_{Dn}} \times 100\%$$

$$\% \epsilon = \frac{692.36 - 692.10}{692.36} \times 100\%$$

$$\% \epsilon = 0.0376\%$$

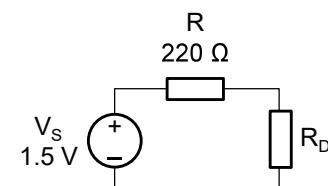
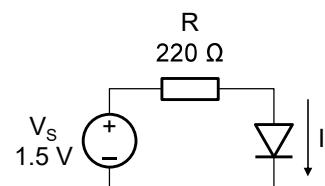
Un error menor al 10% es suficiente.

Resistencia Estática del Diodo

Para todos los casos anteriores, la resistencia estática del diodo se calcula en CD con la siguiente ecuación:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$

Esto quiere decir que el diodo se puede reemplazar por una resistencia finita en **corriente directa**.

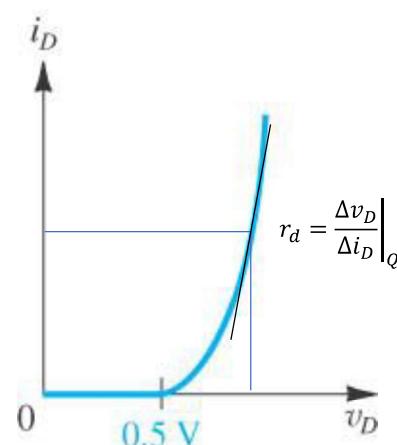


Este modelo también se conoce con el nombre de "análisis de gran señal". Gran señal se refiere a que todas las tensiones y corrientes son de CD.

Modelo de Pequeña Señal (Modelo CA)

- En el punto de operación, una variación pequeña en la tensión v_D produce un cambio pequeño en la corriente i_D .
- Aproximación de pequeña señal:** asumir que la pendiente es constante y que se forma una línea recta (ver expansión de Taylor de una exponencial, truncar después de los primeros dos términos)

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$



- La pendiente de la curva I-V describe una conductancia, el inverso es la **resistencia dinámica** del diodo

- Aproximación es válida para tensiones $v_D < 100 \text{ mV}$ aprox.

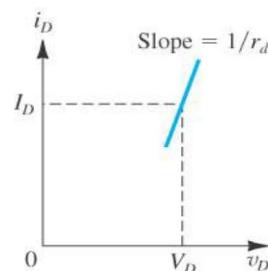
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

169

Resistencia Dinámica del Diodo

La aproximación de pequeña señal permite asumir que la característica I-V es lineal en el punto de operación. Es decir:



$$r_d = \frac{nV_t}{I_D} \quad r_d = \left. \left(\frac{\partial i_D}{\partial v_D} \right) \right|_Q^{-1}$$

r_d : resistencia dinámica del diodo

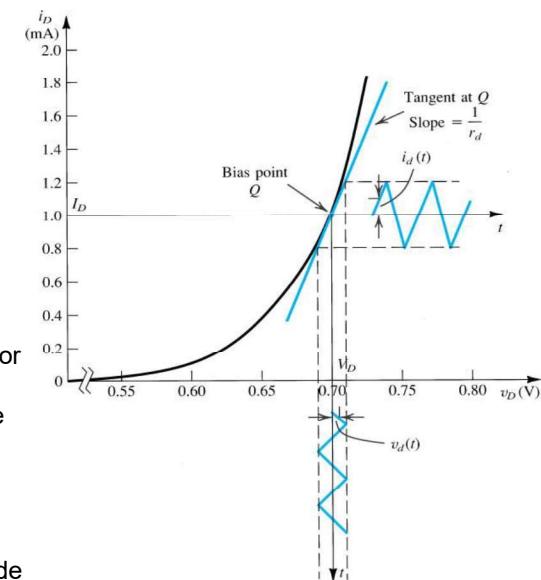
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

171

Modelos del Diodo (Modelo CD y Modelo CA)

- Dos modelos:
 - De gran señal (CD)
 - De pequeña señal (AC)
- Modelo de gran señal:
 - En un punto de operación específico
⇒ punto de operación Q
- Modelo de pequeña señal
 - Pequeña variación alrededor de un punto de operación
 - Considera sólo el efecto de fuentes de CA
- Aplicaciones de modelo de pequeña señal
 - Análisis de CA, respuesta de frecuencia

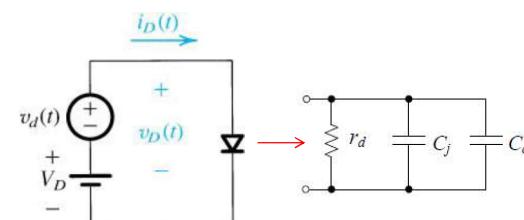


Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

170

Capacitancias del Diodo en Pequeña Señal



Capacitancia de agotamiento

$$C_j = \left. \frac{dq_j}{dV_R} \right|_Q$$

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_{bi}} \right)^m}$$

$$m \approx 0.5$$

C : capacitancia total del diodo

C_j : Capacitancia de agotamiento

C_d : Capacitancia de difusión

C_{j0} : Capacitancia de equilibrio

$$C_{j0} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r q}{2} \times \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \times \frac{1}{V_{bi}}}$$

Capacitancia de difusión

$$C_d = \frac{\tau_T}{V_t} I$$

τ_T : tiempo de tránsito

τ_T : ns...10⁴ ns

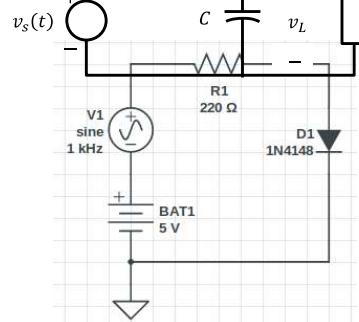
Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

172

Ejemplo: Modelo del Diodo en CD y CA

Con el circuito ideal $i_D(t)$ guiado por $i_L(t)$ en el circuito, donde la fuente de CC tiene una tensión de 5 V y la fuente de CA tiene una amplitud de 10 mV con frecuencia de 1 kHz. El diodo tiene una corriente de fuga $I_S = 1 \times 10^{-14}$ A.



Utilice superposición para determinar los siguientes parámetros:

Gran señal

- La corriente CC del diodo i_D
- La tensión del diodo V_D
- La resistencia estática R_D

Pequeña señal

- La resistencia dinámica
- La corriente CA del diodo i_D

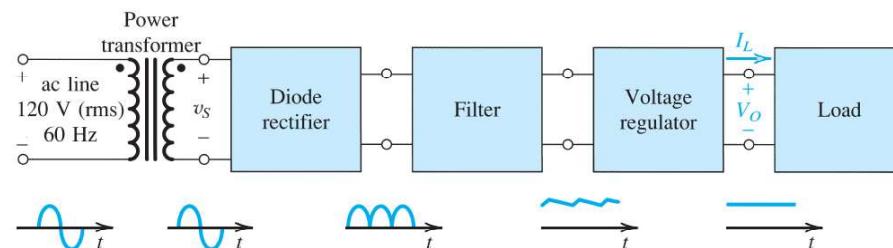
Finalmente construya una gráfica I-V que muestre el punto de operación y la variación de tensión y de corriente en CA alrededor de dicho punto.

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

173

Diagrama de Bloques de una Fuente de Alimentación



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

175

Clase 9 El Diodo: Aplicaciones I

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Elementos Activos

Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez

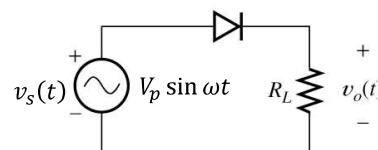
Semestre II-2019

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

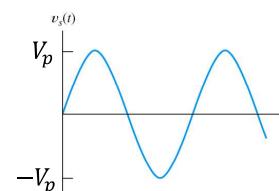
ITCR - Elementos Activos

174

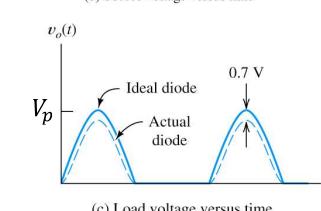
Rectificador de Media Onda



- El diodo conduce la mitad del ciclo.
- La otra mitad, el diodo recorta la señal.



(b) Source voltage versus time



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

176

$$V_{\text{prom}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{\text{out}}(t) dt$$

$$V_{\text{prom}} = \frac{V_p}{\pi}$$

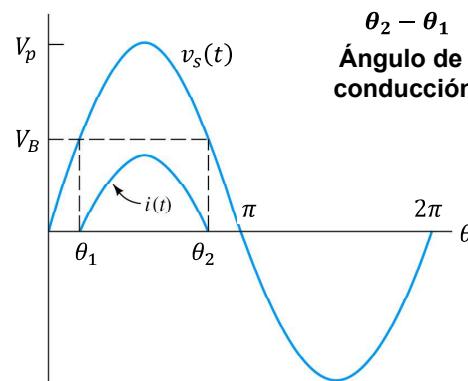
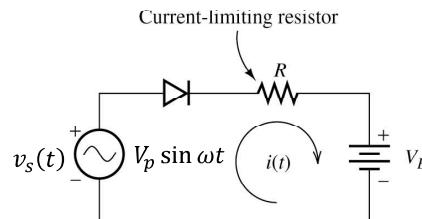
La tensión RMS a la salida:

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_{\text{out}}(t))^2 dt}$$

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V_p}{2}$$

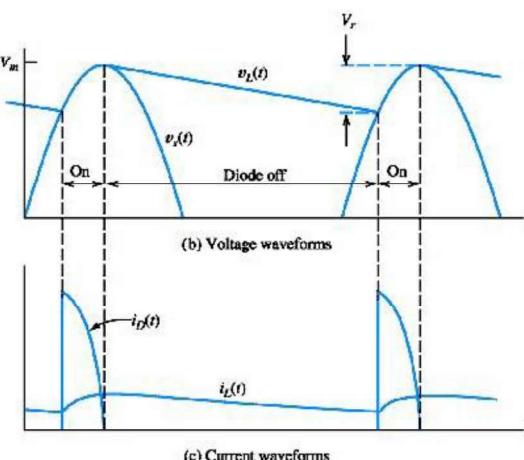
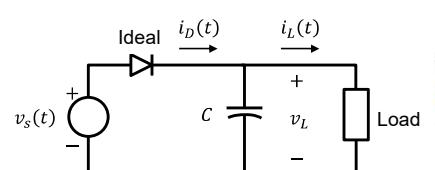
Rectificador de Media Onda con Batería Externa

Si se coloca una fuente de DC en serie en el lazo:



- El diodo (ideal) conduce únicamente cuando la tensión de la fuente supera la tensión de DC de la fuente.
- Este circuito es un cargador de batería: existe corriente sólo si $v_s > V_B$

Rectificador de Media Onda con Filtro



Capacitancia de filtrado

$$C_f = \frac{I_L T}{V_r}$$

Voltaje de carga promedio

$$V_{L\text{prom}} \approx V_p - \frac{V_r}{2}$$

La capacitancia de filtrado se calcula a partir del tiempo de descarga $\tau = RC$ para una caída de tensión V_r

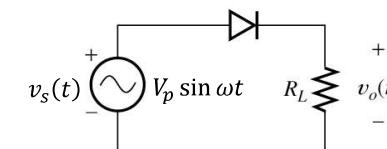
Ejemplo: Rectificador de Media Onda

Considere un circuito rectificador de media onda, utilizando el modelo de diodo ideal. La tensión de entrada es senoidal, con una amplitud de 5 V pico y una frecuencia de 1 kHz. Considere una resistencia de carga R_L de 100 Ω .

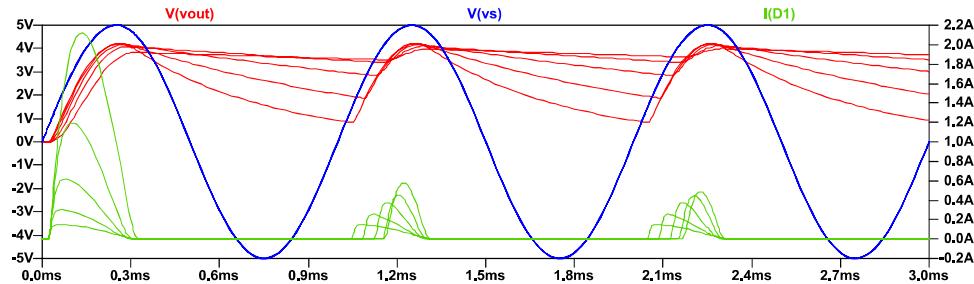
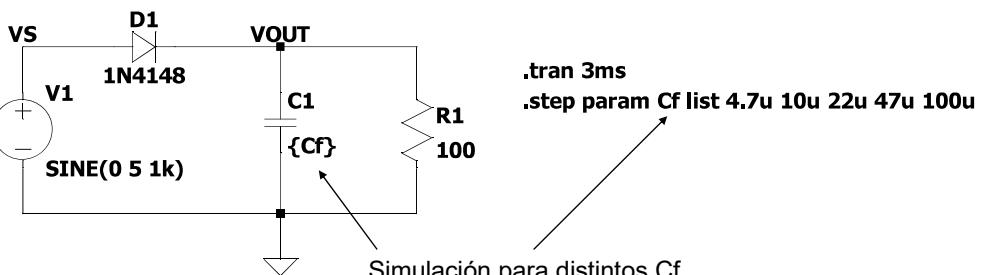
Desarrolle los siguientes puntos:

- Grafique la forma de onda de la tensión en el diodo.
- Grafique la forma de onda de la corriente en el diodo.
- Grafique la forma de onda de la tensión en la salida.
- Calcule los ángulos de conducción y los tiempos de conducción.
- Calcule la tensión promedio y RMS a la salida.

Repita las gráficas y los cálculos para un diodo de 0.7 V.

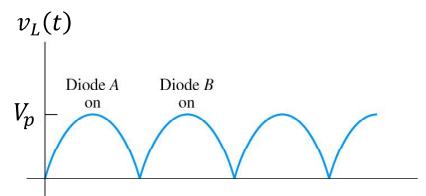
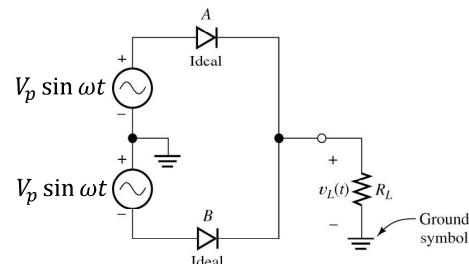


Rectificador de Media Onda con Filtro (Simulación)



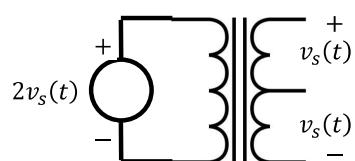
Rectificador de Onda Completa (Dos Diodos)

Esta configuración requiere una fuente de tensión con derivación central.



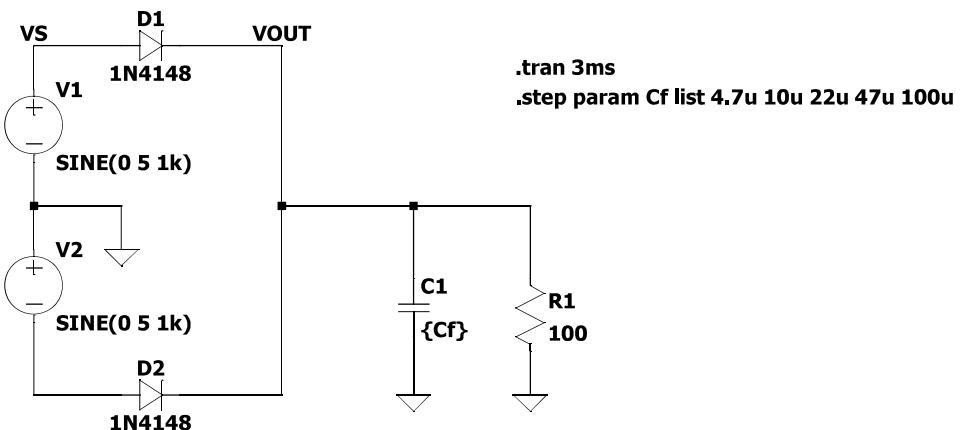
La derivación central se puede obtener con un transformador de derivación.

Esto requiere una fuente AC con el doble de tensión pico.



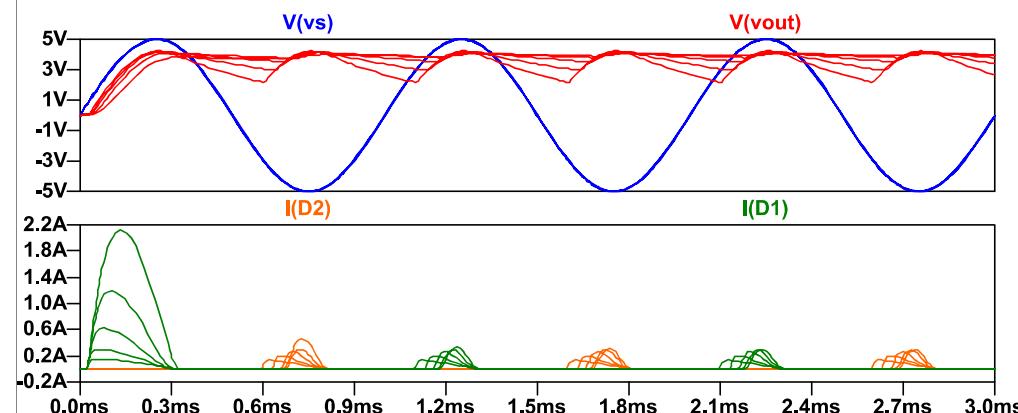
Rectificador de Onda Completa (Dos Diodos) (Simulación)

Repetimos la simulación para el siguiente circuito:



Rectificador de Onda Completa (Dos Diodos) (Simulación)

La simulación muestra los siguientes resultados:

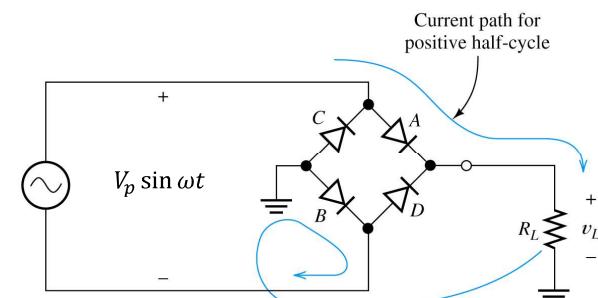


Observe que la tensión de salida ahora tiene el **doble de la frecuencia** en comparación con la señal de entrada.

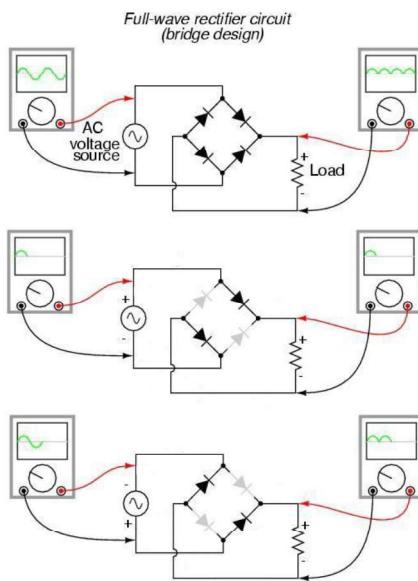
Rectificador de Onda Completa (Puente de Diodos)

En esta configuración no se necesita la derivación central.

- La tensión de salida tiene la misma amplitud de la tensión de entrada (considerando diodo ideal)
- La tensión de salida tiene el doble de la frecuencia de la tensión de entrada.



Rectificador de Onda Completa (Puente de Diodos)



Funcionamiento

1. Esta configuración siempre produce una tensión con polaridad positiva en la carga, aprovechando ambos semicírculos de la tensión de entrada.
2. En el semicírculo positivo de la fuente, dos diodos conducen, mientras que los otros dos diodos restantes están abiertos.
3. En el semicírculo negativo de la fuente, se alternan los diodos para producir la tensión en la misma polaridad.

Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

185

Rectificador de Onda Completa

Para diodo ideal

La tensión promedio a la salida:

$$V_{prom} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{out}(t) dt$$

$$V_{prom} = \frac{2V_p}{\pi}$$

La tensión RMS a la salida:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_{out}(t))^2 dt}$$

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

Condensador de filtrado

$$C_f = \frac{I_L T}{2V_r}$$

Ejemplo

Para un rectificador de onda completa con condensador de filtrado, $V_p=5$ V, $R=1$ kΩ, $f=1$ kHz. Calcule el valor de C_f si el rizo no debe superar el 10% de la tensión de salida.

Respuesta

$$V_r = 0.1 \times 5 \text{ V} = 0.5 \text{ V}$$

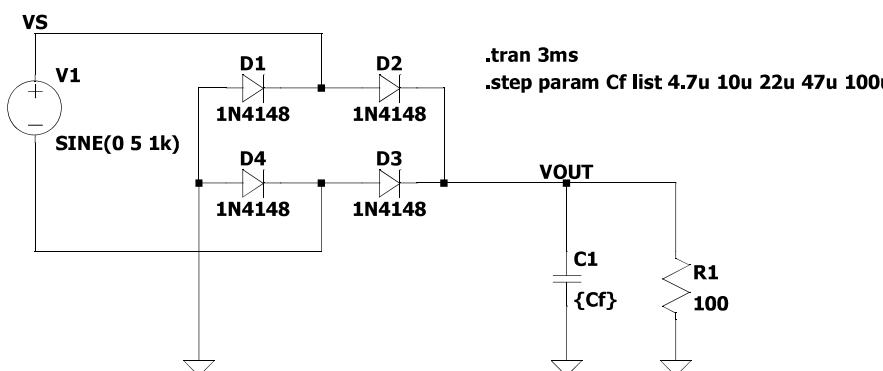
$$I_L = 5 \text{ V} / 1 \text{ k}\Omega = 5 \text{ mA}$$

$$C_f = I_L / (2 \cdot f \cdot V_r) = 5 \mu\text{F}$$

Rectificador de Onda Completa (Puente D) (Simulación)

La simulación de este circuito se muestra a continuación.

- En el semicírculo positivo de VS, conducen los diodos D2 y D4.
- En el semicírculo negativo de VS, conducen los diodos D1 y D3.

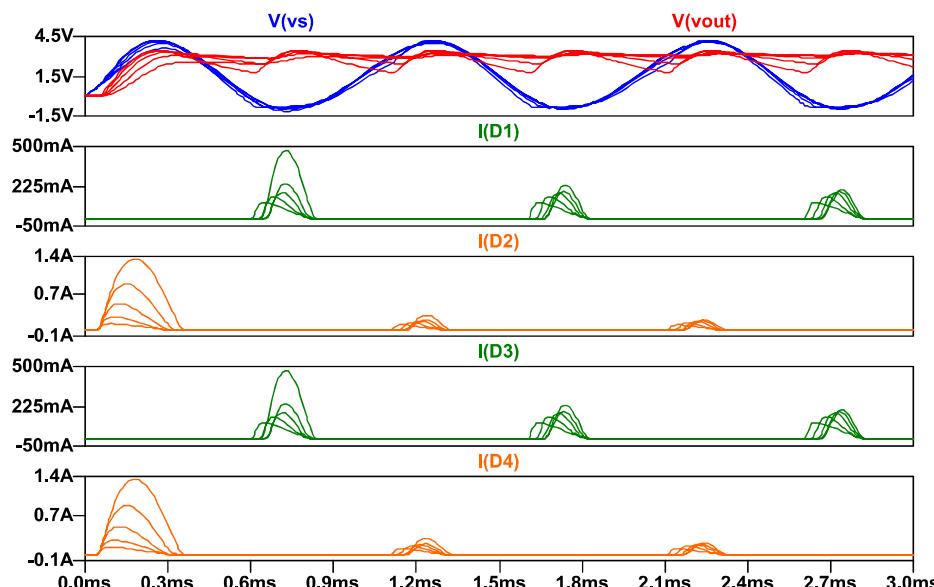


Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

187

Rectificador de Onda Completa (Puente D) (Simulación)



Dr.-Ing. Juan José Montero R.

ITCR - Elementos Activos

188

Ejemplo: Rectificador de Onda Completa (Puente D)

Considere un circuito rectificador de onda completa con puente de diodos, utilizando el modelo de diodo ideal. La tensión de entrada es senoidal, con una amplitud de 5 V pico y una frecuencia de 1 kHz. Considere una resistencia de carga R_L de 100 Ω.

Desarrolle los siguientes puntos:

- Grafique la forma de onda de la tensión en el diodo.
- Grafique la forma de onda de la corriente en el diodo.
- Grafique la forma de onda de la tensión en la salida.
- Calcule los ángulos de conducción y los tiempos de conducción.
- Calcule la tensión promedio y RMS a la salida.
- Calcule el valor del condensador de filtrado de manera que la tensión de rizo no exceda los 0.3 V.
- Considerando el condensador de filtro, proponga una forma de calcular la tensión promedio en la salida asumiendo una caída de tensión exponencial.

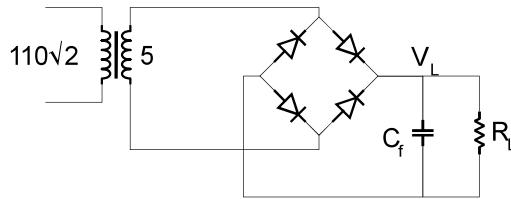
Repita las gráficas y los cálculos para un diodo de 0.7 V.

Clase 10 El Diodo: Aplicaciones II

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Elementos Activos
Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez
Semestre II-2019

Cargador de Batería con Rectificador de Onda Completa

El rectificador de onda completa podría utilizarse para cargar una batería:



Si se requiere suministrar una potencia de 2 W, tensión 3.6 V y rizo menor a 0.2 V:

$$V_p = 3.6 V + 2(0.7 V) = 5V$$

$$C = \frac{I_L}{2V_r f} = \frac{2 W / 3.6 V}{2(0.2 V)(60 Hz)}$$

$$C_f = 23.15 mF$$

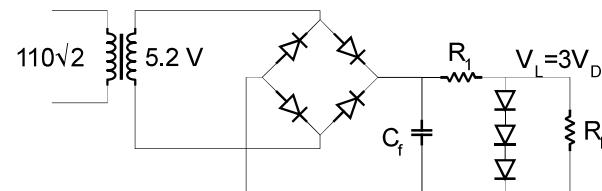
Inconveniente: La tensión de 110 V comercial varía dependiendo de la carga conectada a la red eléctrica en determinado momento del día, por lo que los 5.2 V no son constantes ⇒ la tensión en la resistencia R_L no es constante.

Solución: regulador de tensión

- Tensión de salida estable ante variaciones en tensión pico de entrada.

Regulador de Tensión con Diodos Reales

Considere el siguiente circuito, con tres diodos en serie:



Los tres diodos en serie mantienen la tensión de salida fija:

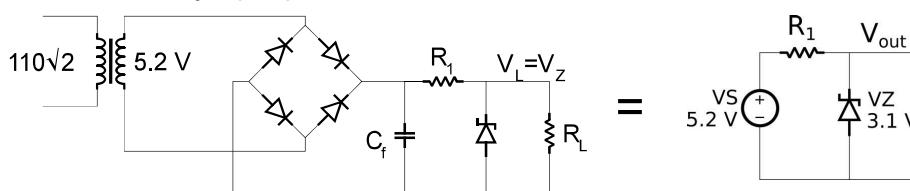
$$V_L \approx 3 \times 0.7 V = 2.1V_{DC}$$

- Si la tensión de la red de CA aumenta un 10%, la tensión en el secundario del transformador también sube un 10%.
- La tensión de los diodos es relativamente constante ($3 \times 0.7 V$)
- Por lo tanto, la caída tensión en la resistencia R_1 debe aumentar.

Esta configuración produce tensiones de salida estables.

Regulador de Tensión con Diodos Zener

En lugar de los tres diodos en serie, se puede utilizar un diodo Zener conectado en reversa. Por ejemplo, para obtener 3.1 V a la salida:



En ambos casos se debe tener cuidado de no exceder la potencia nominal de los diodos que se utilizan.

Para calcular la corriente que circula por el diodo se utiliza la ecuación de Shockley, resolviendo por método iterativo hasta encontrar el punto de operación de CD:

- Tensión del diodo V_D
- Corriente del diodo I_D

$$I_D = I_S(e^{V_D/V_t} - 1)$$

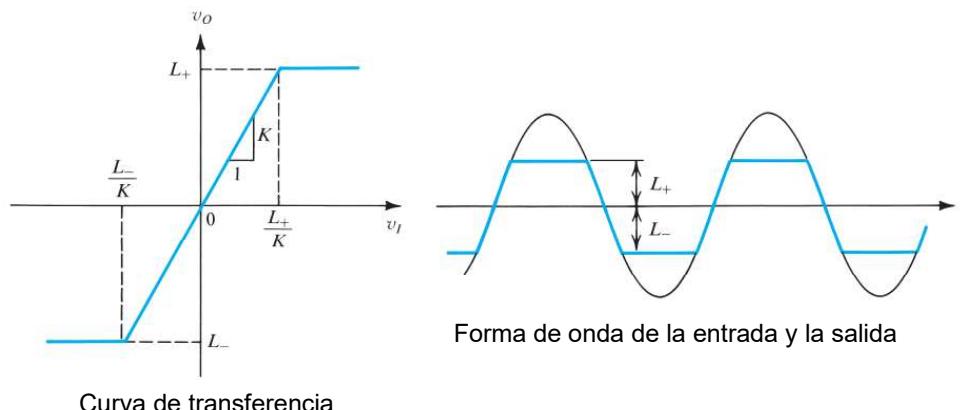
$$V_D = V_t \ln(I_D/I_S)$$

Se necesitan n iteraciones hasta que el error esté por debajo de un nivel aceptable.

Limitador de Tensión (Recortador)

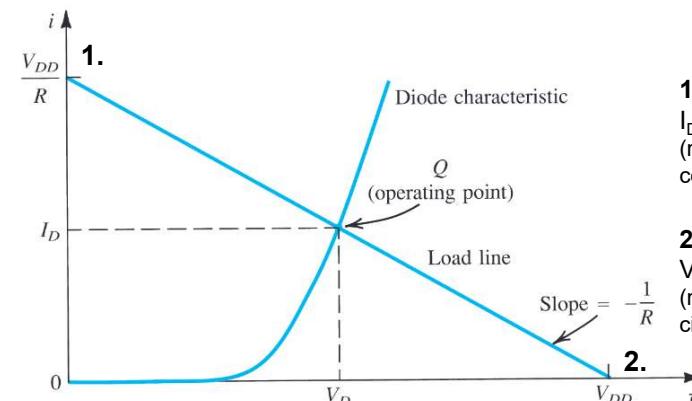
Si un diodo conduce, la caída de tensión en el diodo es relativamente constante. Esto se aprovechó para construir un regulador.

Al reemplazar la fuente de CD por una fuente de CA se obtiene un recortador: un circuito que **limita la tensión de salida a un determinado nivel de CD**.



Solución por Método de Línea de Carga (Método Gráfico)

Dada por la intersección de las siguientes dos curvas:



$$I = I_S(e^{V_D/V_t} - 1)$$

$$I = V_R/R$$

1. Corriente de Norton

$I_D = V_{DD}/R$ para $V_D = 0$ (reemplazar diodo por un cortocircuito)

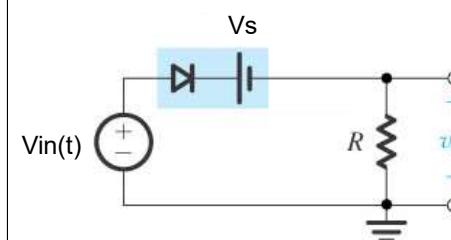
2. Tensión de Thévenin

$V_D = V_{DD}$ para $I_D = 0$ (reemplazar diodo por un circuito abierto)

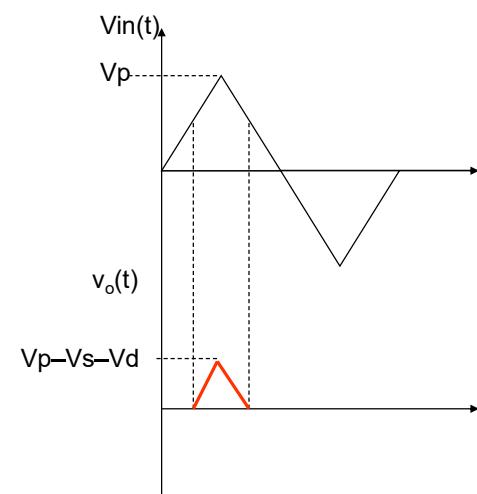
Este método no requiere iterar, pero requiere graficar con suficiente precisión.

<https://www.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-semiconductor-devices/ee-diode/v/ee-diode-graphical-solution>

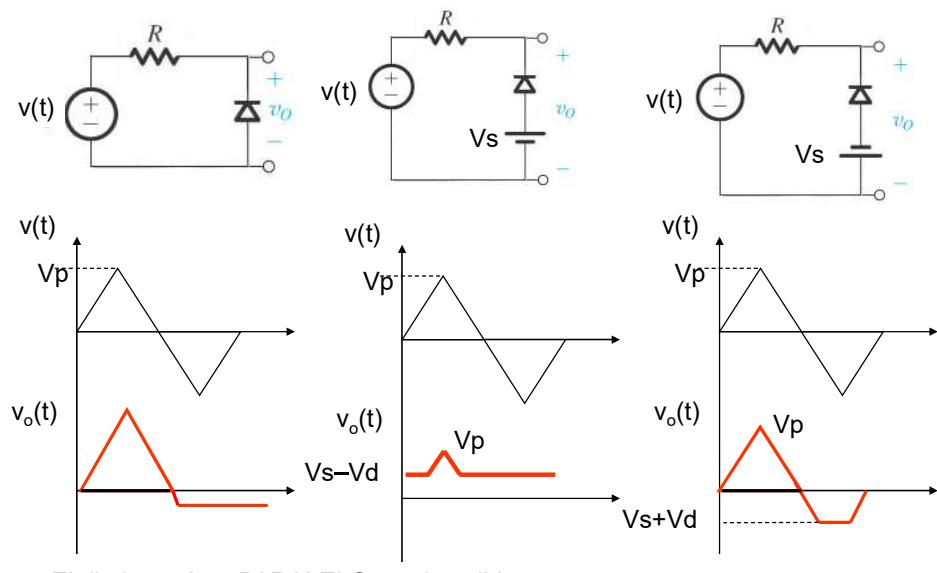
Recortador Serie con Fuente de Tensión



El diodo está en SERIE con la salida

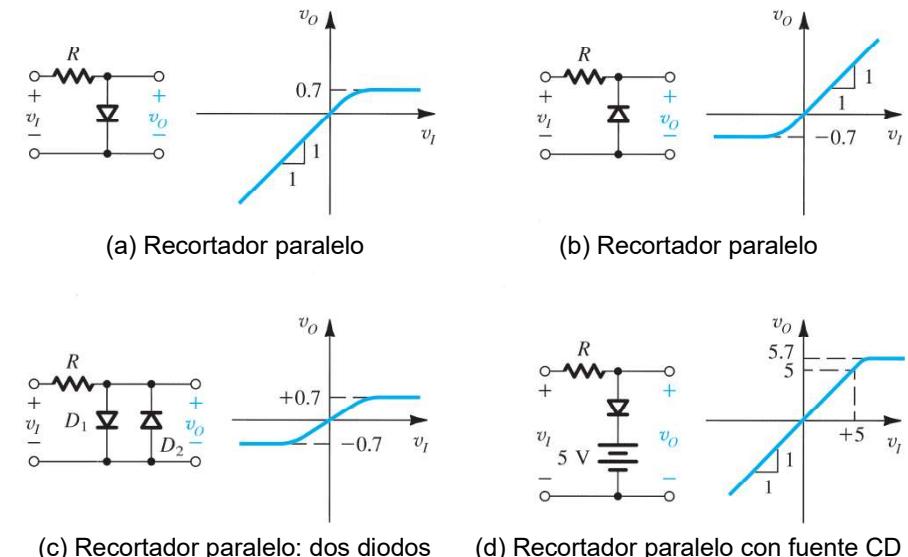


Recortador Paralelo

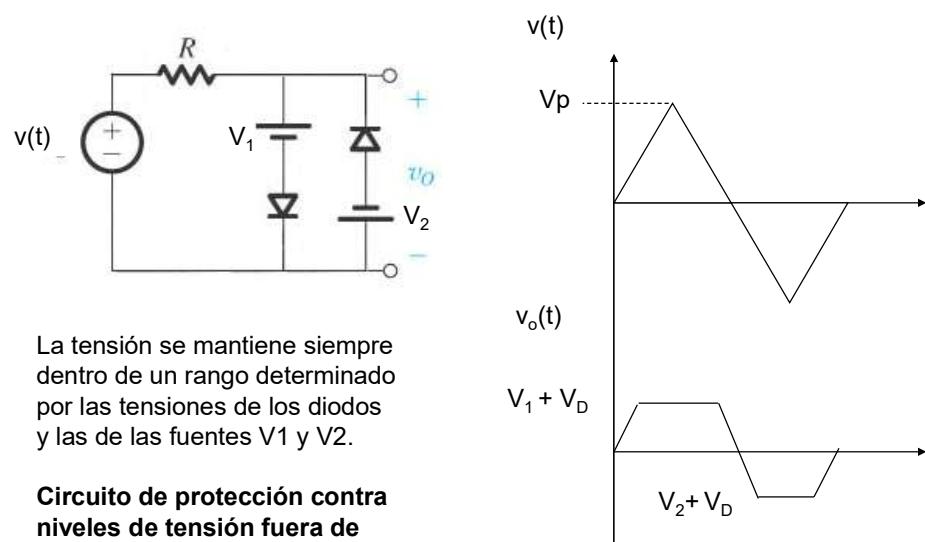


Limitadores de Tensión

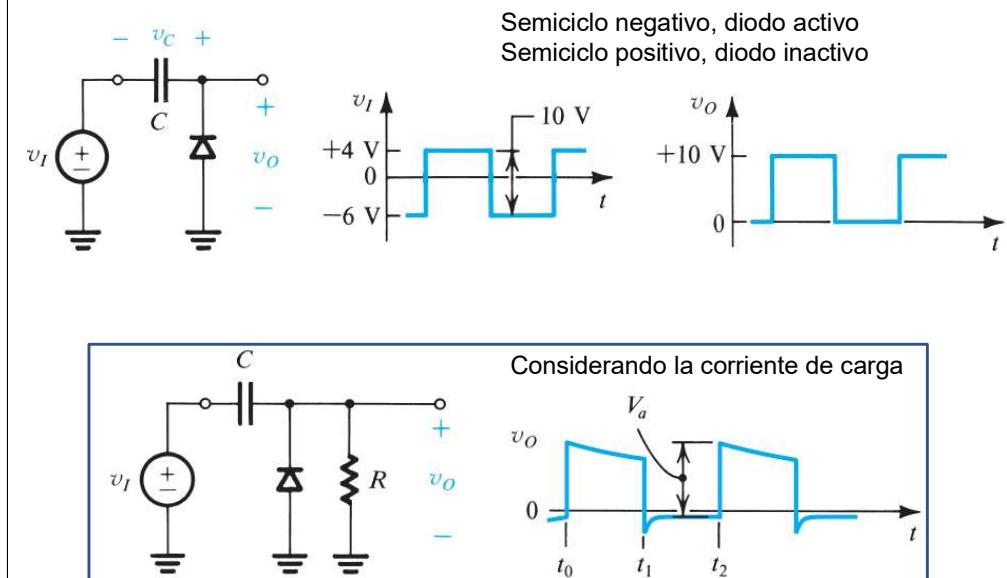
Observe las funciones de transferencia de los siguientes circuitos:



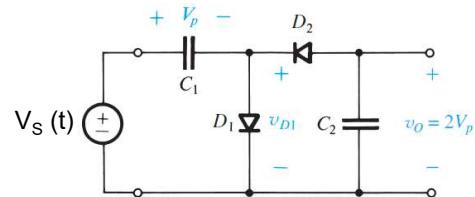
Recortador Paralelo con Dos Diodos y Dos Fuentes



Sujetador de Tensión (Cambiador de Nivel)



Doblador de Tensión

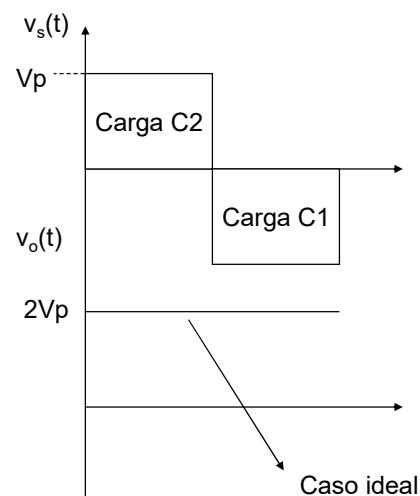


Semiciclo negativo: D1 conduce, C1 se carga al voltaje de la fuente, D2 no conduce

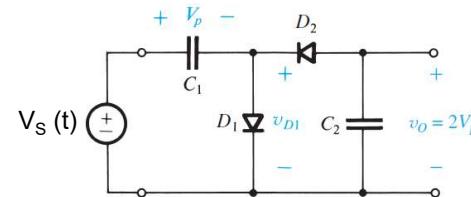
Semiciclo positivo: D1 no conduce, D2 conduce, $V_{C2} = 2 V_p$

En estado estable, la salida es aproximadamente $2V_p$

Caso real: salida es $2V_p - 2V_D$



Doblador de Tensión



Semiciclo negativo: D1 conduce, C1 se carga al voltaje de la fuente, D2 no conduce

Semiciclo positivo: D1 no conduce, D2 conduce, $V_{C2} = 2 V_p$

En estado estable, la salida es aproximadamente $2V_p$

Caso real: salida es $2V_p - 2V_D$

