

Profesor: Dr.-Ing. Paola Vega Castillo

Capítulo 2. Contactos

2.1 Contactos metal-semiconductor

Cuando un trozo de metal y un material semiconductor entran en contacto físico, se forma una unión o contacto metal-semiconductor.

Los contactos metal-semiconductor se clasifican en contactos óhmicos y contactos Schottky, dependiendo de la diferencia de energía entre la función de trabajo del metal y la función de trabajo del semiconductor. Ambos tipos de contacto se discutirán a continuación.

2.1.1 Contacto Schottky

El contacto Schottky, también conocido como contacto rectificante, se caracteriza por conducir corriente en una sola dirección.

La condición para obtener un contacto Schottky es:

$$\phi_m > \phi_s \text{ para semiconductores tipo } n$$

$$\phi_m < \phi_s \text{ para semiconductores tipo } p$$

A continuación se considerará el caso de un metal en contacto con semiconductor n .

Primeramente se toma el nivel de vacío como nivel de referencia para ambos materiales.

Puesto que los electrones tienden a ocupar estados de menor energía, con $\phi_m > \phi_s$ la banda de conducción del metal se encuentra a un nivel de energía menor que el de la banda de conducción del semiconductor. Ya que $E_{CS} > E_{CM}$, electrones del semiconductor n pasan al metal. Estos electrones son cedidos por los átomos donadores del material n , dejando átomos donadores ionizados tras su paso al metal. Esto se produce en la cercanía de la interfaz (unión), de forma tal que el semiconductor n está cargado positivamente cerca de la interfaz.

Los electrones desplazados del material n se ubican en la banda de conducción del metal en la región cercana a la interfaz. El flujo de electrones del material n al metal continúa hasta que los niveles de Fermi del metal y del semiconductor se alinean, logrando así condiciones de equilibrio en el sistema

Profesor: Dr.-Ing. Paola Vega-Castillo

metal-conductor. En condiciones de equilibrio (sin ninguna perturbación), el sistema alcanza una corriente neta de cero y los niveles de Fermi se alinean y están planos, es decir, no hay doblamiento de bandas.

Cuando los electrones se desplazaron al metal se redujo la concentración de electrones libres en la superficie del semiconductor en la interfaz. Este proceso se conoce como agotamiento (reducción de la concentración de portadores de carga mayoritarios). De esta forma, en la región cercana a la interfaz se presenta una carga positiva debido a los dopantes ionizados inmóviles. Esta región se conoce como zona de carga espacial.

Al mismo tiempo, los electrones que emigraron al metal tienden a mantenerse en la superficie del metal cercana a la interfaz debido a la atracción de los donadores ionizados en el material n . Las cargas de la zona de carga espacial dan origen a un campo eléctrico dirigido del material n al metal. Este campo eléctrico genera una corriente que contrarresta el paso de electrones del semiconductor al metal, dando lugar a una corriente neta cero y estableciendo el equilibrio en el contacto. El campo eléctrico se manifiesta como una caída de tensión en el contacto, conocida como potencial de contacto. En el diagrama de bandas de energía del sistema, este campo se expresa como un doblamiento de bandas del semiconductor en la región cercana a la interfaz.

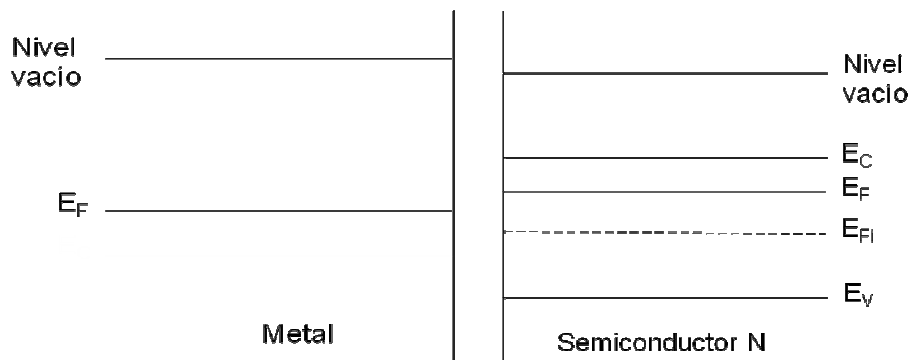


Figura 2.1. Diagrama de bandas de energía de un contacto Schottky antes del contacto

Este doblamiento de bandas representa una barrera de potencial para los electrones del metal, impidiéndoles el paso hacia la región n . Esta barrera de potencial se conoce como barrera Schottky y se calcula como:

$$\phi_B = \phi_m - \chi$$

Igualmente los electrones del semiconductor encuentran una barrera de energía impidiendo su paso hacia el metal; esta se conoce como potencial de contacto. El potencial del contacto visto por los electrones del semiconductor es:

$$V_{bi} = \phi_m - \phi_s$$

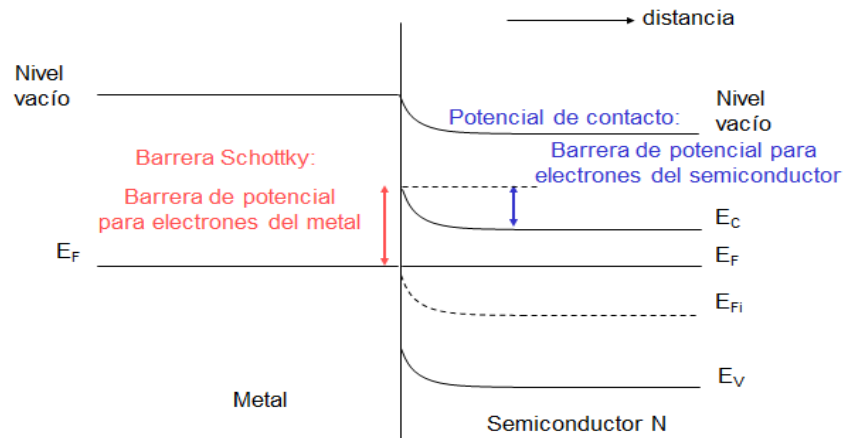


Figura 2.2. Diagrama de bandas de energía de un contacto Schottky después del contacto

Puesto que en condiciones electrostáticas el campo en el interior de un metal es cero, se tiene que en el metal no hay doblamiento de bandas de energía, es decir, el metal es equipotencial. Adicionalmente, el campo tiende a cero fuera de la zona de carga espacial.

2.1.1.1 Contacto Schottky con polarización inversa

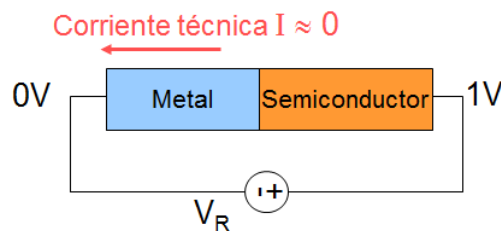


Figura 2.3. Contacto Schottky con polarización inversa

La figura 2.3 muestra un contacto Schottky con polarización inversa. Para comprender la influencia de la polarización inversa, deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los niveles de Fermi se mantienen alineados en equilibrio.
- La afinidad electrónica del semiconductor no cambia, así como la función de trabajo del metal.
- El nivel de Fermi intrínseco, la banda de conducción y la banda de valencia pueden sufrir doblamiento.

La polarización inversa aumenta la barrera de potencial para los electrones y el ancho de la zona de carga espacial, ya que contribuye a agotar el material n cerca de la unión. Esto se refleja en el diagrama de bandas como un incremento en el doblamiento de bandas, como muestra la figura 2.4.

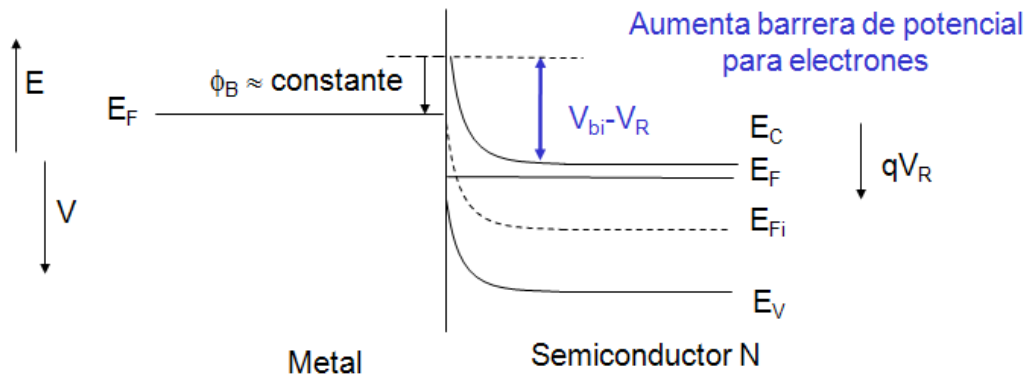


Figura 2.4. Diagrama de bandas de energía del contacto Schottky con polarización inversa

La barrera Schottky se incrementa en V_R ; el potencial de reversa aumenta la barrera. Los electrones requieren entonces de mayor energía para desplazarse de un material a otro, por lo que solamente fluye una pequeña corriente de reversa ($I \approx 0$) del semiconductor al metal a través de la unión. Sólo pueden fluir los electrones con energía mayor a la barrera del metal.

La característica de bloquear la corriente en un sentido, da al contacto Schottky el nombre de contacto rectificador.

2.1.1.2 Contacto Schottky con polarización directa

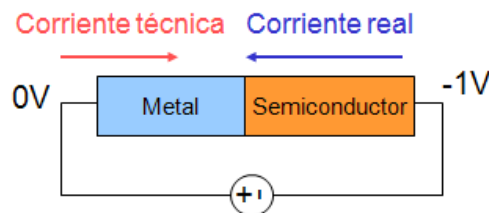


Figura 2.5. Contacto Schottky con polarización inversa

La figura 2.5 muestra un contacto Schottky con polarización directa.

Como se muestra en el diagrama de bandas de energía de la figura 2.6, la polarización directa tiene el efecto de disminuir la barrera de potencial de la unión, atrayendo electrones del semiconductor n al metal y con ello estableciendo un flujo de corriente de polarización directa $I > 0$. Puesto que los electrones fluyen del semiconductor n al metal, la corriente técnica fluye del metal al semiconductor n . De esta manera, el contacto Schottky permite el paso de corriente técnica en la dirección de polarización directa pero bloquea el flujo de corriente en polarización inversa (efecto rectificador). Además, la polarización directa disminuye el ancho de la zona de carga espacial.

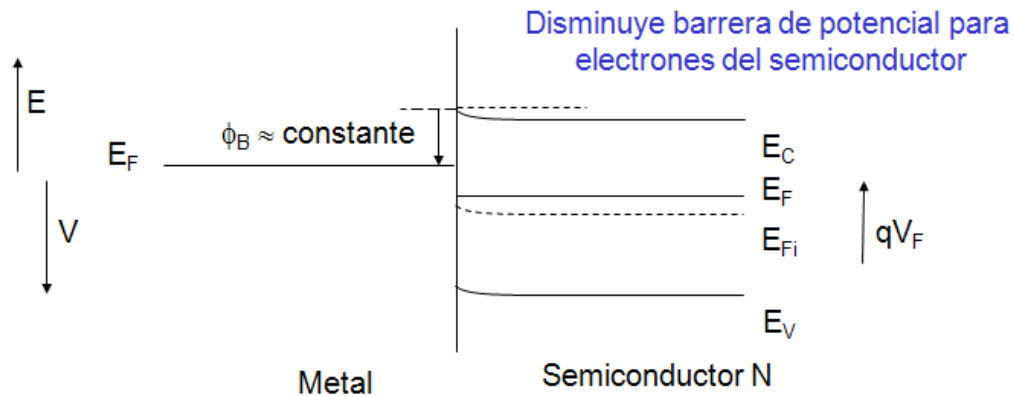


Figura 2.6. Diagrama de bandas de energía del contacto Schottky con polarización directa

2.1.1.3 Curva característica del contacto Schottky

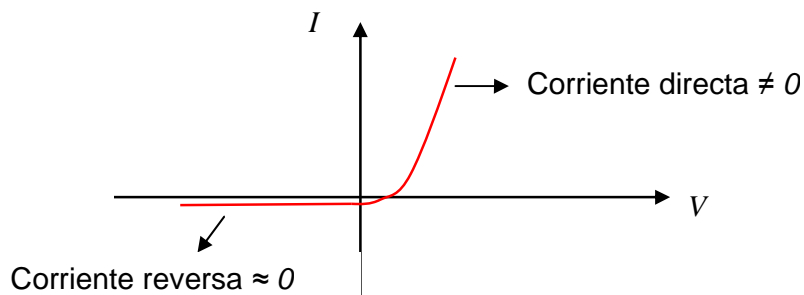


Figura 2.7. Curva característica del contacto Schottky

La figura 2.7 muestra la curva característica (corriente contra voltaje) del contacto Schottky. La curva característica IV está descrita matemáticamente por la ecuación de Schottky, como sigue:

$$I_D = I_s (e^{(V_D/nV_t)} - 1)$$

donde I_s : corriente de saturación de reversa, depende de características físicas del diodo, V_t : voltaje térmico, $n = 1..2$, depende de características constructivas del diodo.

2.1.1.3 Aplicaciones del contacto Schottky

El contacto Schottky encuentra aplicación en el llamado diodo Schottky, el cual es un diodo de alta velocidad y bajo potencial de contacto utilizado en aplicaciones de alta frecuencia.

Un diodo se define como un dispositivo de dos terminales cuya característica corriente-voltaje es no lineal. La figura 2.8 muestra el símbolo del diodo Schottky, con sus dos terminales: ánodo y cátodo.



Figura 2.8. Símbolo del diodo Schottky

La corriente de polarización directa fluye de ánodo y cátodo. La figura 2.9 muestra la dirección de la corriente de polarización directa para un diodo Schottky con semiconductor n y con semiconductor p , respectivamente.

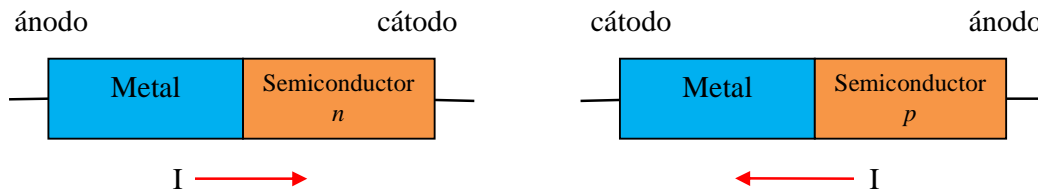


Figura 2.9. Dirección de la corriente de polarización directa en diodos Schottky.

2.1.2 Contacto Óhmico

El contacto óhmico se forma cuando un metal y un semiconductor entran en contacto físico y se cumple que:

$$\phi_m < \phi_s \text{ para semiconductores tipo } n$$

$$\phi_m > \phi_s \text{ para semiconductores tipo } p$$

El contacto óhmico, a diferencia del contacto Schottky, conduce corriente en ambas direcciones sin bloquearla. A continuación se analizará el caso de un metal en contacto con un semiconductor n .

Dado que $\phi_m < \phi_s$, inicialmente hay un flujo de electrones del metal al semiconductor hasta que los niveles de Fermi se alinean, haciendo que el sistema alcance el nivel de equilibrio. Como resultado de la migración de electrones del metal al semiconductor, el metal queda positivamente cargado en la región próxima a la interfaz, mientras que el semiconductor experimenta una acumulación de carga negativa cerca de la interfaz. Esto crea un campo eléctrico dirigido del metal al semiconductor. Así, el potencial de contacto causa un doblamiento de bandas tal que no existe barrera de potencial para el paso de electrones del semiconductor al metal, y la barrera para el paso del metal al semiconductor es muy pequeña. De esta manera, el flujo de corrientes es posible en ambas direcciones.

2.1.2.1 Curva característica del contacto óhmico

La curva característica del contacto óhmico se presenta en la figura 2.10. Como se puede observar, la curva característica corresponde a la de una resistencia, según se concluyó del análisis del diagrama de bandas de energía.

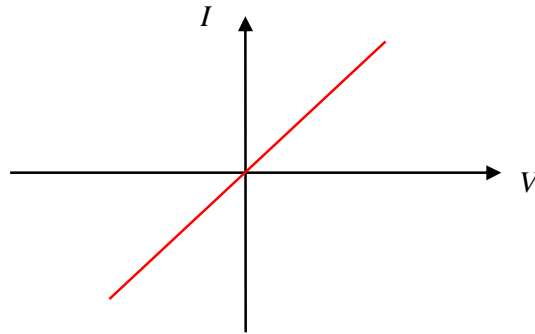


Figura 2.10. Curva característica de un contacto óhmico

2.1.2.2 Aplicaciones del contacto óhmico

El contacto óhmico es de gran importancia en la industria electrónica, puesto que se requiere para el contacto eléctrico (conexión) de los componentes semiconductores. Para lograr este tipo de contacto se enfocan grandes esfuerzos en la ciencia e ingeniería de materiales para lograr interfaces en las que la resistencia de contacto se minimice.

2.2 Contactos semiconductor-semiconductor

El contacto semiconductor-semiconductor se forma cuando dos materiales semiconductores, uno de tipo p y otro de tipo n , entran en contacto físico. Por este motivo, el contacto semiconductor-semiconductor se conoce como unión o junta PN .

Para el análisis del funcionamiento de la unión PN deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El sistema está en equilibrio, es decir, no está afectado por ninguna perturbación. Ejemplo de perturbación son: voltaje, luz, gradientes térmicos, campos magnéticos.
- En la superficie de unión de los materiales (unión metalúrgica), hay un cambio abrupto de dopado, de tipo n a tipo p .

Debido al cambio de tipo de material, al unir dos materiales se presenta un gradiente de concentración de portadores: alta concentración de huecos en el material p y baja en el material n , y alta concentración de electrones en el material n y baja en el material p .

Este gradiente de concentración causa una corriente de difusión de huecos del lado p al lado n y una corriente de difusión de electrones del lado n al lado p . El paso de electrones del material n al material p causa la ionización de donadores en el material n , como sigue:



Similarmente, el paso de huecos del material p al material n causa la ionización de aceptores en el material p , como sigue:



Esta redistribución de portadores de carga causa la formación de una zona de carga espacial (zona de agotamiento) en la cercanía de la interfaz, así como un campo eléctrico dirigido de la zona n a la zona p . Las regiones semiconductores no agotadas se conocen como regiones cuasineutrales.

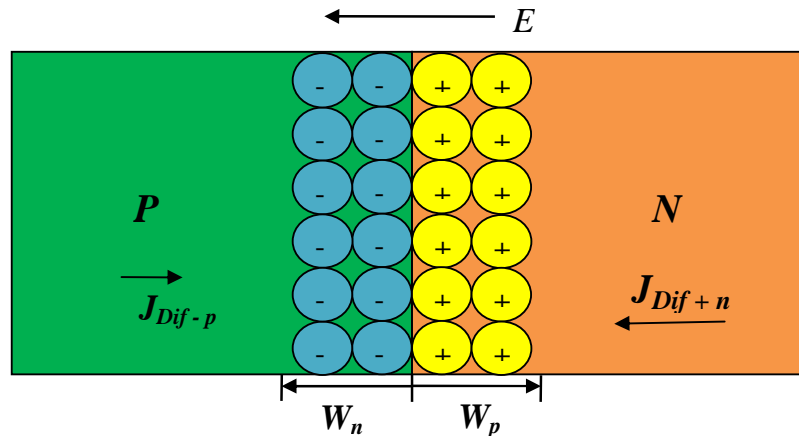
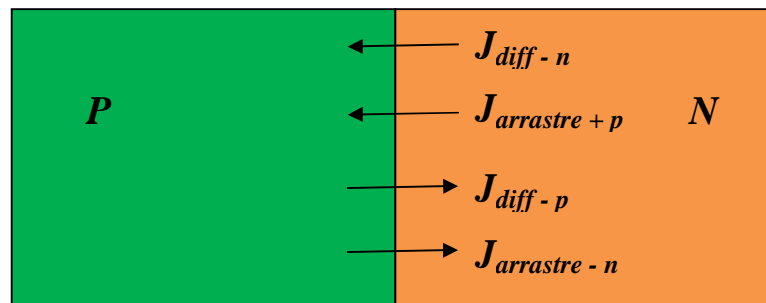


Figura 2.11. Difusión de portadores de carga en la junta PN

Este campo eléctrico genera una corriente de arrastre de dirección contraria a la corriente de difusión, de forma que la contrarresta. La corriente neta a través de la unión es cero.



El potencial de contacto V_{bi} a través de la unión se calcula como:

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

y depende de las concentraciones de portadores mayoritarios de cada material, dado que el potencial de contacto es la diferencia de potenciales de Fermi de los materiales p y n .

A temperatura ambiente las uniones *PN* (diodos) de silicio presentan un potencial de contacto de aproximadamente 0.7 V, los diodos de germanio de 0.3V y los diodos Schottky aproximadamente 0.3 V.

2.2.1 Capacitancias de la junta PN:

En la junta PN existen dos capacitancias parásitas:

- Capacitancia de difusión
- Capacitancia de agotamiento

La capacitancia de agotamiento predomina cuando el diodo opera en la región de reversa, y depende de la tensión aplicada.

Sin tensión aplicada, se tiene el valor máximo de la capacitancia de agotamiento. Esta se debe a la existencia de la zona de agotamiento. Un aumento en la tensión de polarización inversa atrae a los portadores de carga mayoritarios hacia la región cuasineutral, es decir, deja a los portadores de carga de los extremos de la zona de carga espacial. Esta carga desplazada causa la ionización de las regiones aledañas a la zona de carga especial, de forma que el ancho de esta zona se amplía.

Dado que la tensión aplicada afecta solamente los extremos de la zona de agotamiento, puede concebirse que la zona de agotamiento se comporta como un dieléctrico de ancho variable y las regiones cuasineutrales, al no estar agotadas, presentan una conductividad mucho mayor, haciéndolas equivalentes a las placas conductoras de un capacitor. De esta forma, la zona de agotamiento y las regiones cuasineutrales forman un capacitor parásito en el cual el espesor del dieléctrico aumenta conforme aumenta la polarización inversa.

Este efecto es aprovechado para la implementación de capacitancias contraladas por tensión, también llamadas varactores (variable capacitor), y es utilizado en circuitos sintonizadores.

Por otra parte, la capacitancia de difusión predomina cuando el diodo opera en la región de polarización directa, aun cuando en estas condiciones la capacitancia de agotamiento aumenta.

Debido a la corriente de difusión, los portadores de carga mayoritarios en las regiones cuasineutrales cruzan la zona de agotamiento hasta encontrarse en el material en el que se convierten en portadores de carga minoritarios. Gracias a esto existe un gradiente de concentración de portadores de carga minoritarios en las regiones aledañas a la zona de agotamiento, donde el pico de concentración se da en la interfaz entre la zona de agotamiento y las regiones cuasineutrales. Al alejarse de la zona de agotamiento, esta concentración disminuye exponencialmente hasta alcanzar los valores de concentración en equilibrio. El exceso de portadores minoritarios es proporcional a la corriente y por ello aumenta conforme aumenta la polarización directa.

Esta carga almacenada cambia en respuesta al voltaje aplicado, creando un efecto capacitivo en el proceso de alcanzar las concentraciones de equilibrio, dado que

$$C = \frac{dQ}{dV}$$

Los portadores de carga minoritarios no continúan acumulándose en toda la región cuasineutral, dado que, por la continuidad de corriente, los portadores minoritarios se inyectan en la misma tasa en la que son extraídos, manteniendo constante la carga acumulada en la región cuasineutral. Esta carga afecta el tiempo de recuperación de reversa del diodo, es decir, el tiempo en que el diodo pasa del estado encendido al apagado. Este tiempo depende de:

- La cantidad de portadores de carga minoritarios en la región cuasineutral aledaña a la zona de agotamiento, es decir, los portadores de carga que se encontraban desplazándose por difusión cuando el diodo estaba polarizado en directa.
- El tiempo medio de vida de los portadores de carga minoritarios, es decir, el tiempo durante el cual los portadores de carga pueden desplazarse sin recombinarse.