

# Unidad Temática N° 1

## Dispositivos Electrónicos

Ing. Luis A. Guanuco



Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Córdoba

10 de abril de 2025

# Tabla de contenidos

1 Estructura atómica

2 Tipos de materiales

3 Corriente en semiconductores

4 Diodo

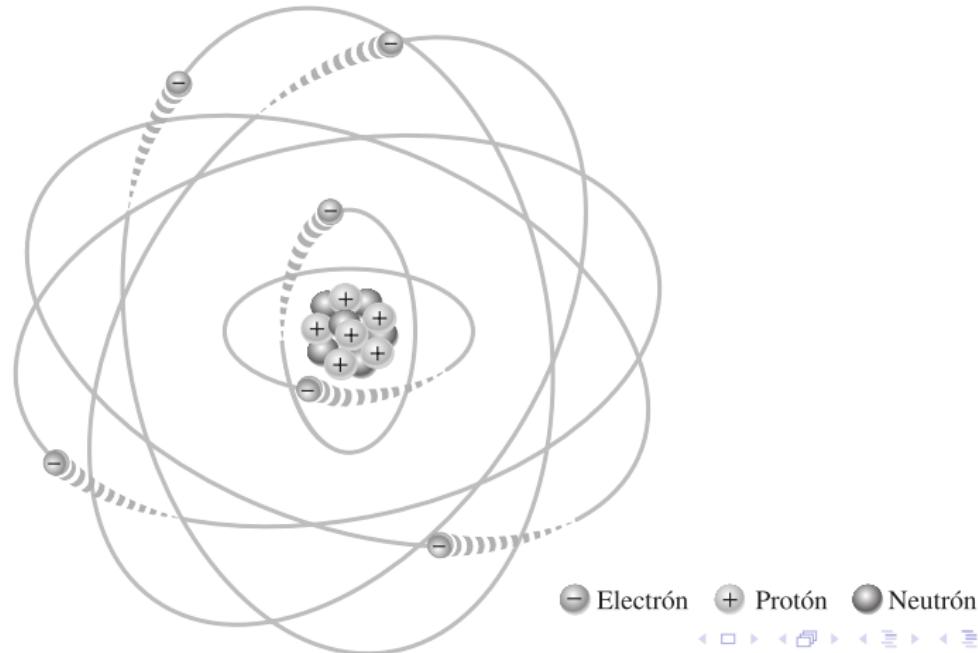
5 Polarización de un diodo

## Sección 1

# Estructura atómica

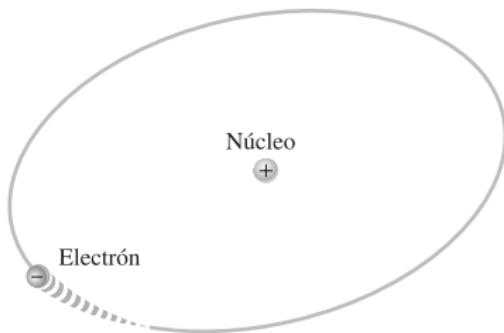
# Estructura atómica

Un átomo es la partícula más pequeña de un elemento. De acuerdo con el modelo de Bohr, los átomos tienen una estructura de tipo planetario que consta de un núcleo central rodeado por electrones que describen órbitas.

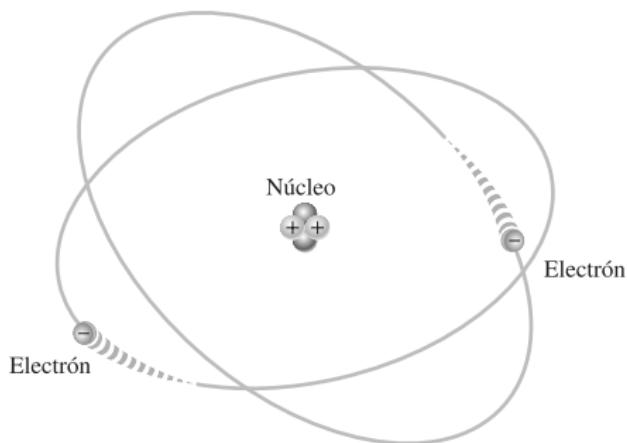


# Estructura atómica

Cada tipo de átomo tiene un cierto número de electrones y protones que los distinguen de los átomos de todos los demás elementos.



Átomo de hidrógeno



Átomo de helio

# Tabla periódica

**GROUP**

|    |    |   |
|----|----|---|
| 1  | H  | 2 |
| Li | Be | 3 |
| Na | Mg | 4 |
| K  | Ca | 5 |
| Rb | Sr | 6 |
| Cs | Ba | 7 |
| Fr | Ra | 8 |

**PERIOD**

|    |                       |    |                   |    |                      |    |                  |    |                   |    |               |    |                   |    |                   |    |                   |    |                   |    |                  |    |                  |    |                       |    |                     |    |                   |    |                  |    |                    |    |                  |
|----|-----------------------|----|-------------------|----|----------------------|----|------------------|----|-------------------|----|---------------|----|-------------------|----|-------------------|----|-------------------|----|-------------------|----|------------------|----|------------------|----|-----------------------|----|---------------------|----|-------------------|----|------------------|----|--------------------|----|------------------|
| 1  | Hydrogen<br>1.008     | 2  | Beryllium<br>8.98 | 3  | Magnesium<br>22.99   | 4  | Calcium<br>40.08 | 5  | Nickel<br>58.93   | 6  | Iron<br>55.85 | 7  | Chromium<br>52.00 | 8  | Titanium<br>47.88 | 9  | Vanadium<br>50.94 | 10 | Scandium<br>44.96 | 11 | Yttrium<br>88.91 | 12 | Thulium<br>135.0 | 13 | Praseodymium<br>140.9 | 14 | Dysprosium<br>162.5 | 15 | Europium<br>152.0 | 16 | Terbium<br>158.9 | 17 | Neptunium<br>237   | 18 | Plutonium<br>244 |
| 2  | Lanthanides           | 3  | Actinides         | 4  | Rutherfordium<br>260 | 5  | Dubnium<br>268   | 6  | Singeenium<br>270 | 7  | Bh            | 8  | Hs                | 9  | Mt                | 10 | Ds                | 11 | Rg                | 12 | Cn               | 13 | Nh               | 14 | Fl                    | 15 | Ho                  | 16 | Er                | 17 | Fm               | 18 | Ytterbium<br>178.9 |    |                  |
| 3  | Metalloids            | 4  | Actinides         | 5  | Actinides            | 6  | Actinides        | 7  | Actinides         | 8  | Actinides     | 9  | Actinides         | 10 | Actinides         | 11 | Actinides         | 12 | Actinides         | 13 | Actinides        | 14 | Actinides        | 15 | Actinides             | 16 | Actinides           | 17 | Actinides         | 18 | Actinides        |    |                    |    |                  |
| 4  | Other Metals          | 5  | Actinides         | 6  | Actinides            | 7  | Actinides        | 8  | Actinides         | 9  | Actinides     | 10 | Actinides         | 11 | Actinides         | 12 | Actinides         | 13 | Actinides         | 14 | Actinides        | 15 | Actinides        | 16 | Actinides             | 17 | Actinides           | 18 | Actinides         |    |                  |    |                    |    |                  |
| 5  | Transition Metals     | 6  | Actinides         | 7  | Actinides            | 8  | Actinides        | 9  | Actinides         | 10 | Actinides     | 11 | Actinides         | 12 | Actinides         | 13 | Actinides         | 14 | Actinides         | 15 | Actinides        | 16 | Actinides        | 17 | Actinides             | 18 | Actinides           |    |                   |    |                  |    |                    |    |                  |
| 6  | Alkaline Earth Metals | 7  | Actinides         | 8  | Actinides            | 9  | Actinides        | 10 | Actinides         | 11 | Actinides     | 12 | Actinides         | 13 | Actinides         | 14 | Actinides         | 15 | Actinides         | 16 | Actinides        | 17 | Actinides        | 18 | Actinides             |    |                     |    |                   |    |                  |    |                    |    |                  |
| 7  | Non-metals            | 8  | Actinides         | 9  | Actinides            | 10 | Actinides        | 11 | Actinides         | 12 | Actinides     | 13 | Actinides         | 14 | Actinides         | 15 | Actinides         | 16 | Actinides         | 17 | Actinides        | 18 | Actinides        |    |                       |    |                     |    |                   |    |                  |    |                    |    |                  |
| 8  | Halogens              | 9  | Actinides         | 10 | Actinides            | 11 | Actinides        | 12 | Actinides         | 13 | Actinides     | 14 | Actinides         | 15 | Actinides         | 16 | Actinides         | 17 | Actinides         | 18 | Actinides        |    |                  |    |                       |    |                     |    |                   |    |                  |    |                    |    |                  |
| 9  | Noble Gases           | 10 | Actinides         | 11 | Actinides            | 12 | Actinides        | 13 | Actinides         | 14 | Actinides     | 15 | Actinides         | 16 | Actinides         | 17 | Actinides         | 18 | Actinides         |    |                  |    |                  |    |                       |    |                     |    |                   |    |                  |    |                    |    |                  |
| 10 | He                    | 11 | Ne                | 12 | Ar                   | 13 | Cl               | 14 | F                 | 15 | Neon<br>20.18 | 16 | Oxygen<br>16.00   | 17 | Fluorine<br>19.00 | 18 | Helium<br>4.003   |    |                   |    |                  |    |                  |    |                       |    |                     |    |                   |    |                  |    |                    |    |                  |

**Atomic Number**

**Symbol**

**Name**

**Average Atomic Mass**

**Periodic Table Labels:**

- Alkali Metals
- Alkaline Earth Metals
- Transition Metals
- Other Metals
- Metalloids
- Non-metals
- Halogens
- Noble Gases
- Lanthanides
- Actinides

# Capas y órbitas de los electrones

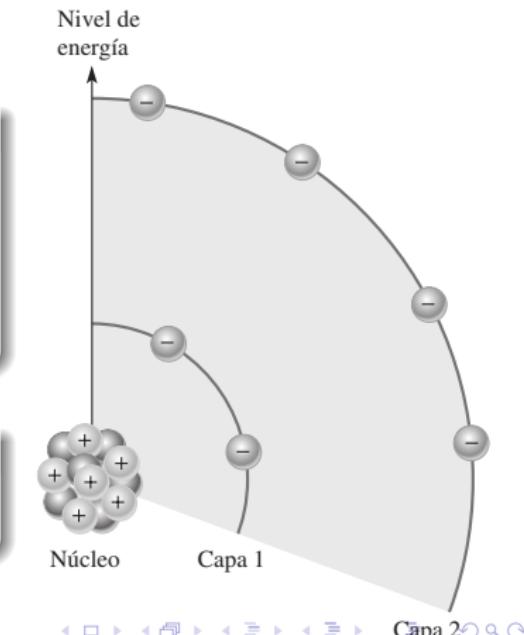
Los electrones giran alrededor de un átomo a ciertas distancias de él. Los electrones cercanos al núcleo tienen menos energía que aquellos que describen órbitas más distantes.

## Niveles de energía...

cada distancia discreta (órbita) al núcleo corresponde a cierto nivel de energía. En un átomo, las órbitas se agrupan en bandas de energía conocidas como *capas*.

## Número de electrones en cada capa...

$$N_e = 2n^2$$

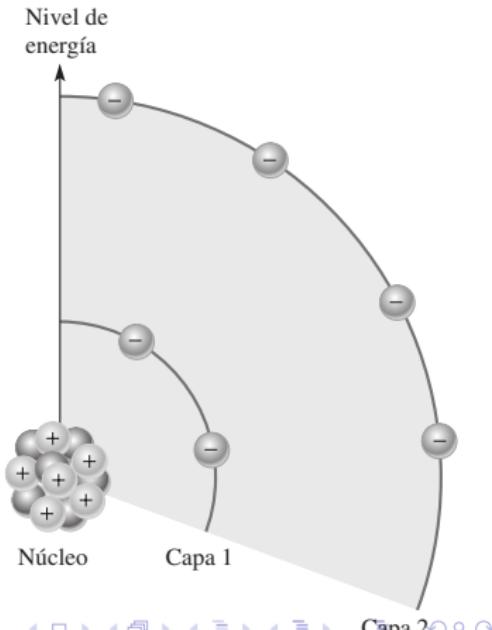


# Capas y órbitas de los electrones

Los electrones giran alrededor de un átomo a ciertas distancias de él. Los electrones cercanos al núcleo tienen menos energía que aquellos que describen órbitas más distantes.

## Pregunta...

¿Cuántos electrones máximo puede existir en la cuarta capa de un átomo?



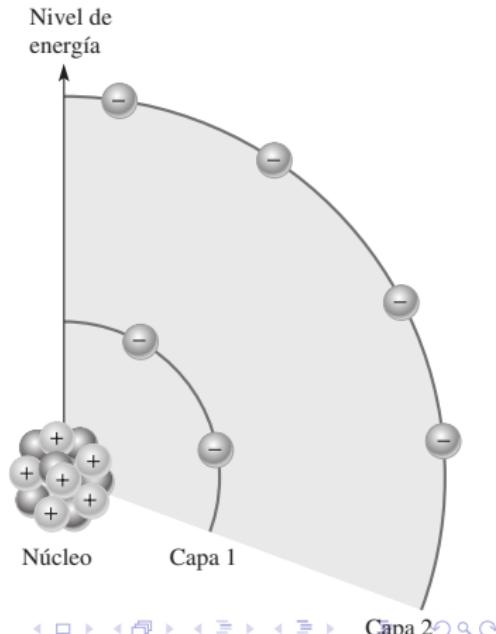
# Capas y órbitas de los electrones

Los electrones giran alrededor de un átomo a ciertas distancias de él. Los electrones cercanos al núcleo tienen menos energía que aquellos que describen órbitas más distantes.

Pregunta...

¿Cuántos electrones máximo puede existir en la cuarta capa de un átomo?

$$N_e = 2n^2 = 2(4)^4 = 2(16) = 32$$



# Electrones de valencia

Los electrones que describen órbitas alejadas del núcleo tienen más energía y están flojamente enlazados al átomo que aquellos más cercanos al núcleo. Esto se debe a que la fuerza de atracción entre el núcleo cargado positivamente y el electrón cargado negativamente disminuye con la distancia al núcleo.

## Definición...

En la capa más externa de un átomo existen electrones con un alto nivel de energía y están relativamente enlazados al núcleo. Esta capa más externa se conoce como la capa de **valencia** y los electrones presentes en esta capa se llaman *electrones de valencia*.

Estos electrones de valencia contribuyen a las reacciones químicas y al enlace dentro de la estructura de un material y determinan sus propiedades eléctricas.

# Ionización

Cuando un átomo absorbe energía de una fuente calorífica o luminosa, por ejemplo, las energías de los electrones se elevan. Los electrones de valencia poseen más energía y están ligeramente enlazados al átomo que los electrones internos, así que pueden saltar con facilidad a órbitas más altas dentro de la capa de valencia cuando el átomo absorbe energía externa. Si un átomo de valencia adquiere una cantidad suficiente de energía puede escapar con facilidad de la capa externa y la influencia del átomo. La partida de un electrón de valencia deja a un átomo previamente neutro con un exceso de carga positiva (más protones que electrones).

## Definición...

El proceso de perder un electrón de valencia se conoce como **ionización** y el átomo cargado positivamente resultante se conoce como *ion positivo*.

# Tabla de contenidos

1 Estructura atómica

2 Tipos de materiales

3 Corriente en semiconductores

4 Diodo

5 Polarización de un diodo

## Sección 2

# Tipos de materiales

# Clasificación de los materiales

Todos los materiales están compuestos por átomos; éstos contribuyen a las propiedades eléctricas de un material, incluida su capacidad de conducir corriente eléctrica. Estos se clasifican en:



(a) Aislante



(b) Conductor



(c) Semiconductores

Figura: Clasificación de materiales

# Clasificación de los materiales

**Aislantes** no conduce corriente eléctrica en condiciones normales. Los electrones de valencia están estrechamente enlazados a los átomos.



# Clasificación de los materiales

**Aislantes** no conduce corriente eléctrica en condiciones normales. Los electrones de valencia están estrechamente enlazados a los átomos.

**Conductores** conduce corriente eléctrica fácilmente. La mayoría de los metales son buenos conductores. Los mejores conductores son materiales de sólo un elemento. Tienen electrones de valencia flojamente enlazados y terminan convirtiéndose en electrones libres.



# Clasificación de los materiales

**Aislantes** no conduce corriente eléctrica en condiciones normales. Los electrones de valencia están estrechamente enlazados a los átomos.



**Conductores** conduce corriente eléctrica fácilmente. La mayoría de los metales son buenos conductores. Los mejores conductores son materiales de sólo un elemento. Tienen electrones de valencia flojamente enlazados y terminan convirtiéndose en electrones libres.

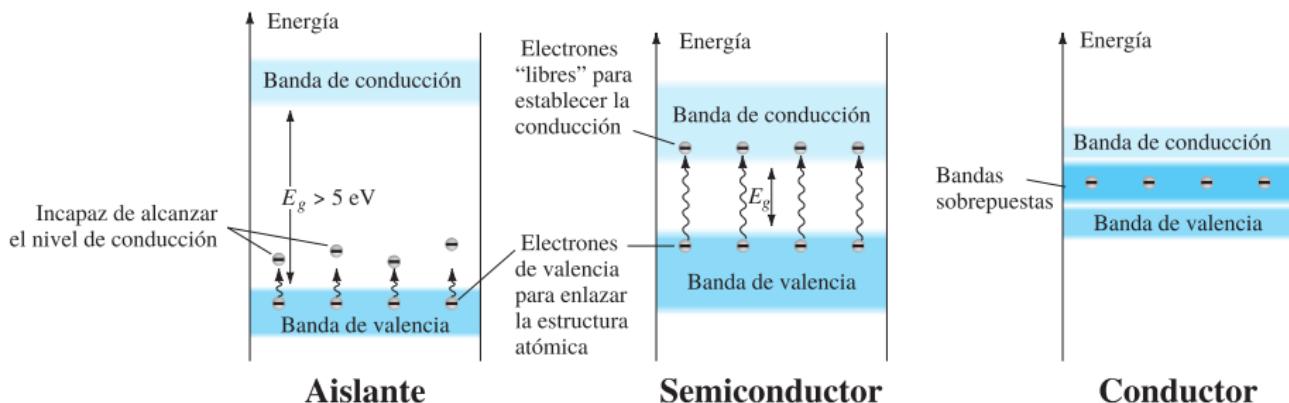


**Semiconductores** se encuentran entre aislantes y conductores, en lo que respecta a su capacidad de conducir corriente eléctrica. Los semiconductores de un solo elemento están caracterizados por átomos con *cuatro electrones de valencia*.



# Bandas de energía

Recuerde que la capa de valencia de un átomo representa una *banda de energía* y que los electrones de valencia están confinados a dicha banda. Cuando un electrón adquiere suficiente energía adicional para abandonar la capa de valencia se convierte en un *electrón libre*. El electrón ahora se encuentra en lo que se conoce como *banda de conducción*.



# Bandas de energía

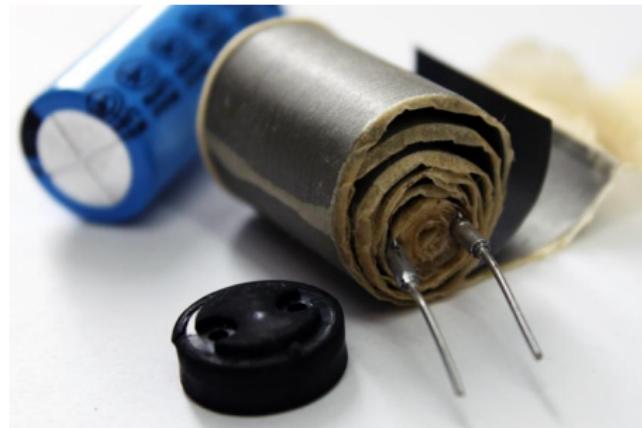
Pregunta...

¿Un material aislante nunca podrá conducir corriente eléctrica?

# Bandas de energía

Pregunta...

¿Un material aislante nunca podrá conducir corriente eléctrica?



# Comparación de átomos semiconductor-vs-conductor

El electrón de valencia del átomo de cobre “siente” una fuerza de atracción de +1, en comparación con un electrón de valencia del átomo de silicio, que “siente” una fuerza de atracción de +4.

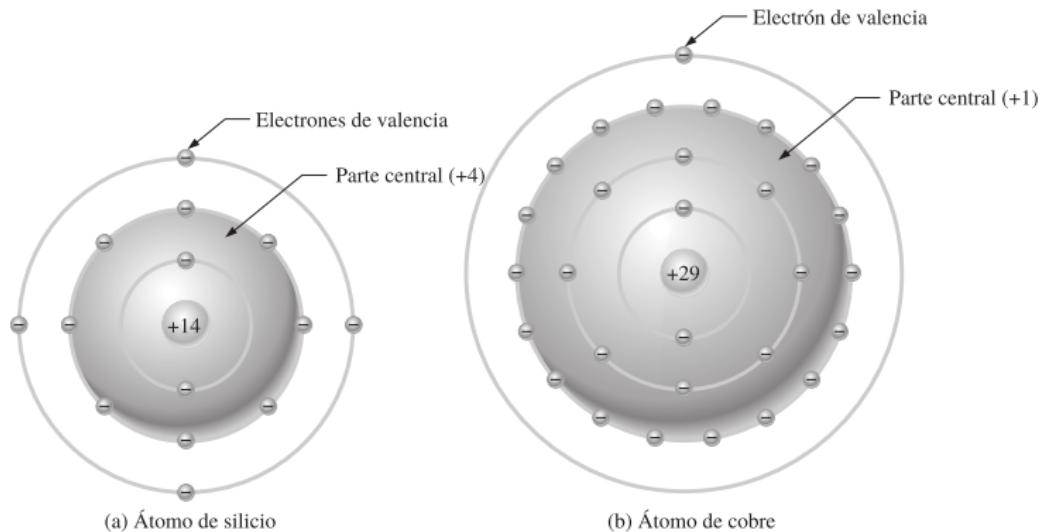


Figura: Comparación de las estructuras atómicas del Silicio y el Cobre.

# Comparación de átomos semiconductor-vs-conductor

El electrón de valencia del cobre se encuentra en la cuarta capa, que está a mayor distancia de su núcleo que el electrón de valencia del silicio, residente en la tercera capa.

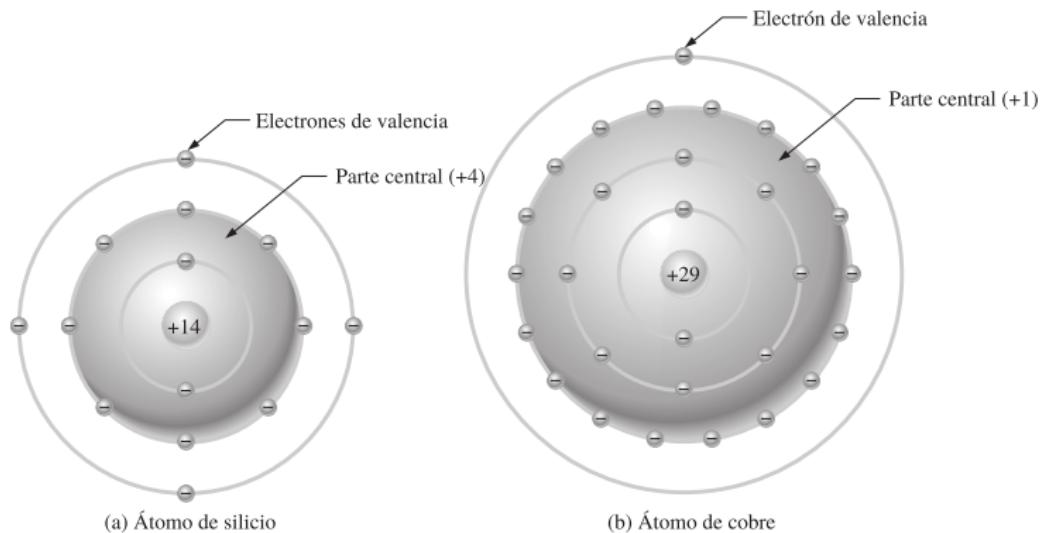


Figura: Comparación de las estructuras atómicas del Silicio y el Cobre.

# Comparación de átomos semiconductor-vs-conductor

Esto significa que es más fácil que los electrones de valencia del cobre adquieran suficiente energía adicional para escapar de sus átomos y convertirse en electrones libres que los del silicio.

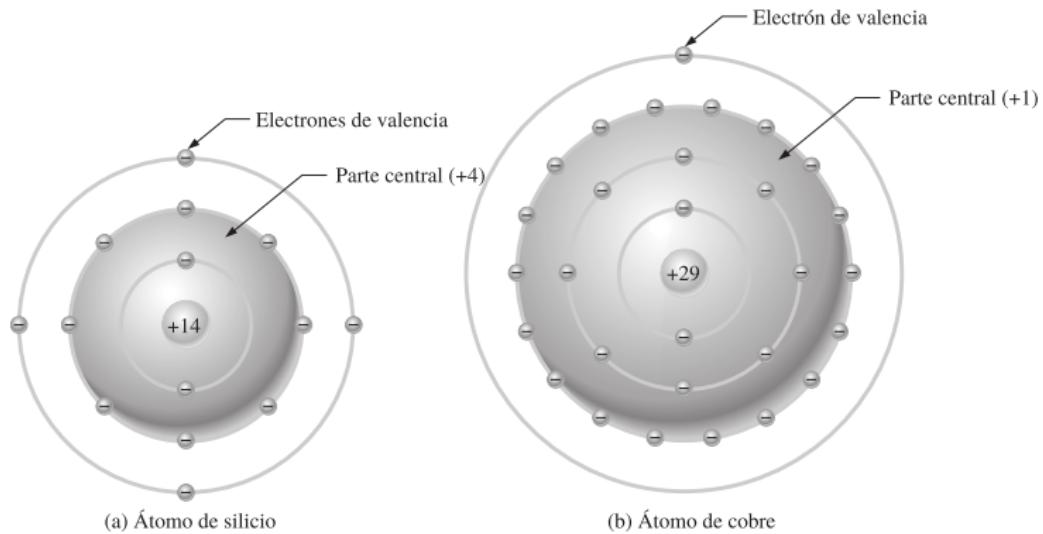
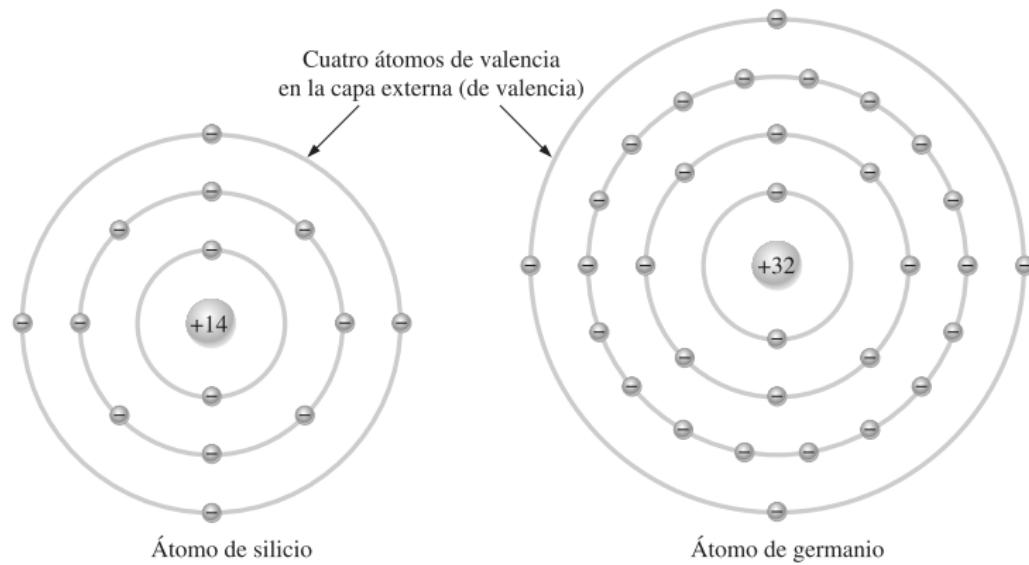


Figura: Comparación de las estructuras atómicas del Silicio y el Cobre.

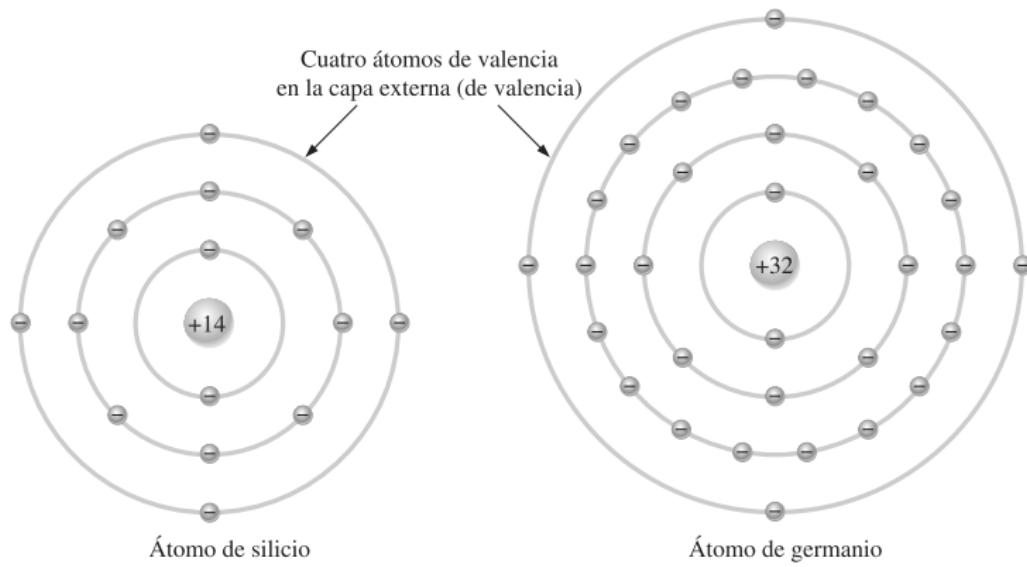
# Semiconductores silicio y germanio

El **silicio** es, por mucho, el material más utilizado en diodos, transistores, circuitos integrados y otros dispositivos semiconductores. Observe que tanto el silicio como el germanio tienen los cuatro electrones de valencia característicos.



# Semiconductores silicio y germanio

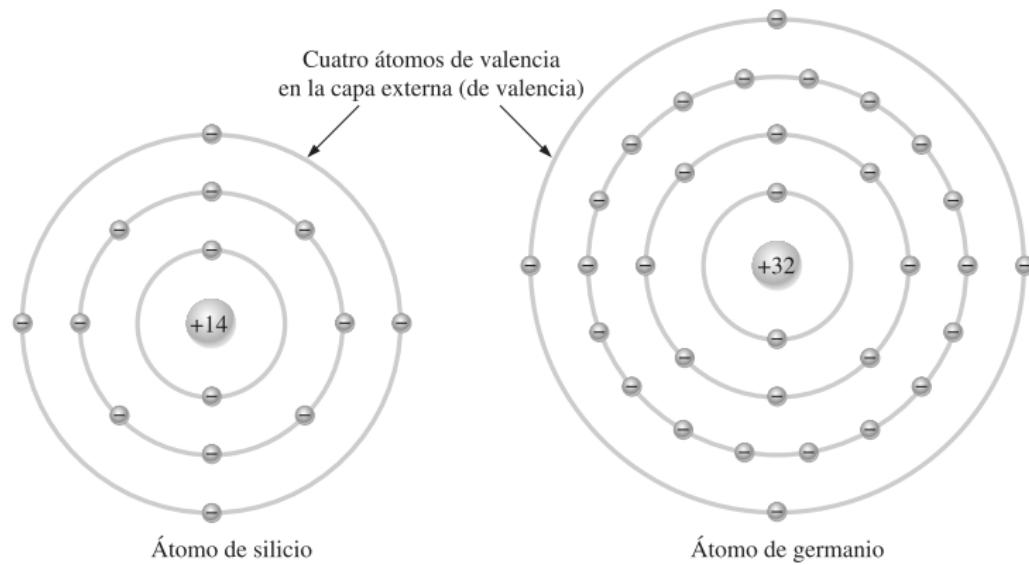
Los electrones de valencia del **germanio** residen en la cuarta capa, mientras que los del silicio están en la tercera, más cerca al núcleo.



# Semiconductores silicio y germanio

Pregunta...

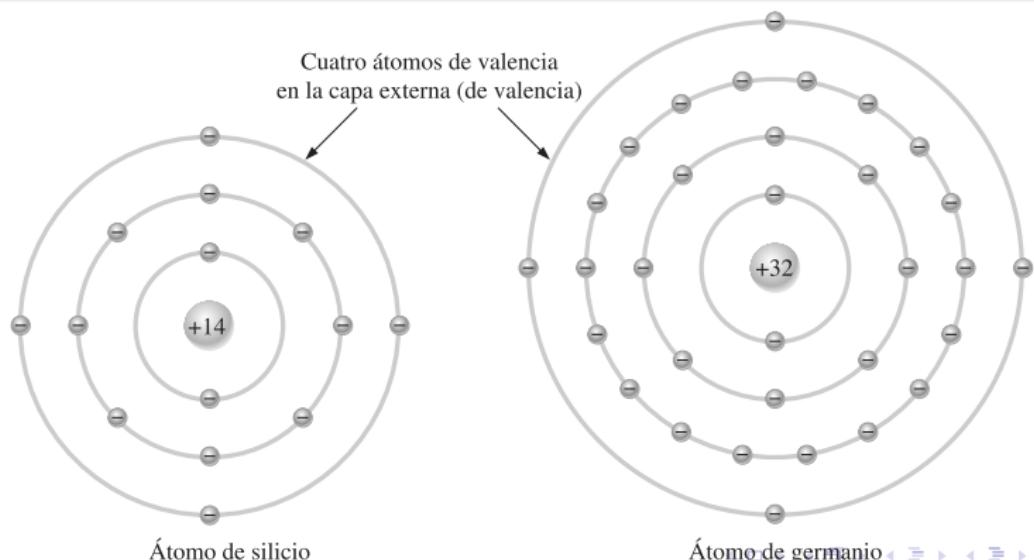
¿Qué relación encuentra entre las capas de valencia del silicio y el germanio, respecto a los electrones de su última capa?



# Semiconductores silicio y germanio

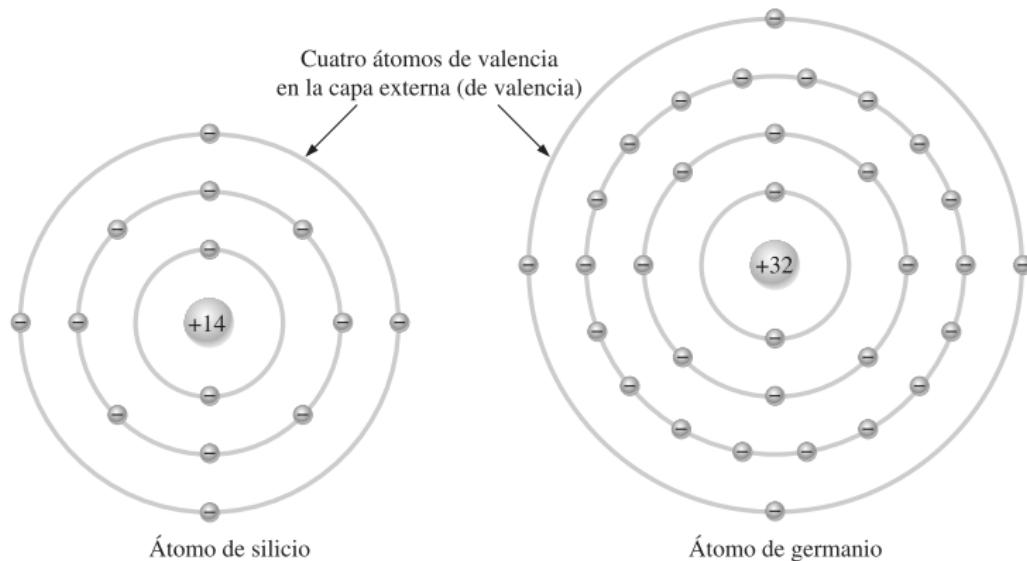
Respuesta:

Los electrones de valencia del germanio se encuentran a niveles de energía más altos que aquellos en el silicio y, por consiguiente, requieren una cantidad de energía adicional más pequeña para escaparse del átomo.



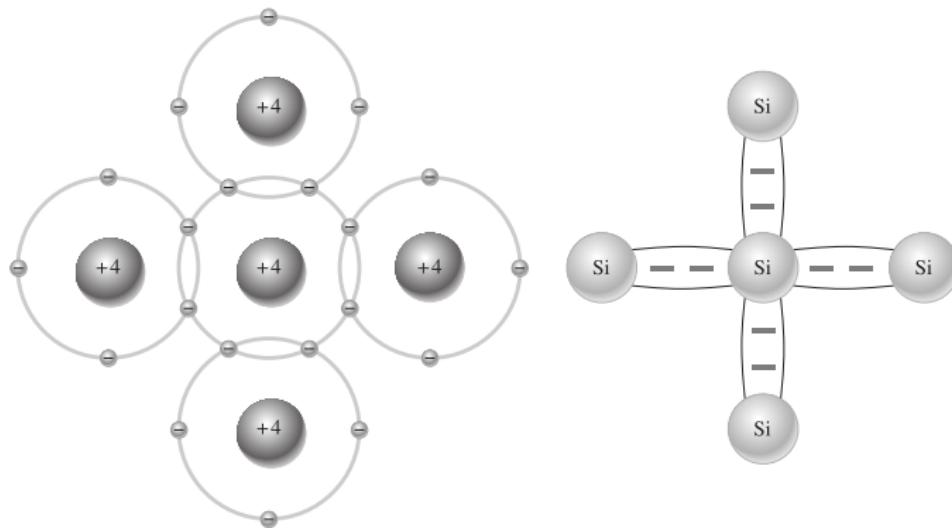
# Semiconductores silicio y germanio

Sí tiene dudas respecto al diagrama de los átomos de silicio y germanio vea el siguiente vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=Nwopk3e3qRM>



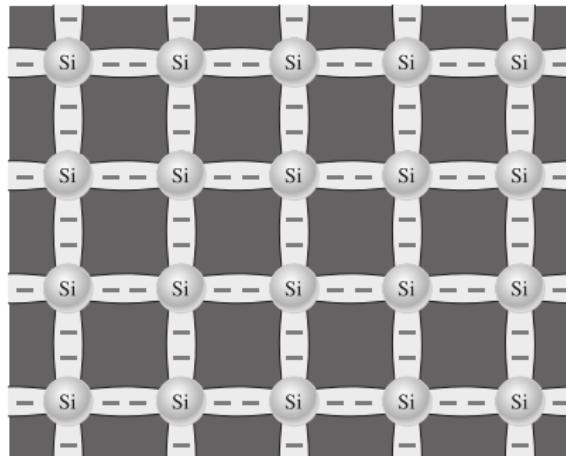
## Enlaces covalentes

Un átomo de silicio (Si), con sus cuatro electrones de valencia, comparte un electrón con cada uno de sus cuatro vecinos. Esto crea efectivamente ocho electrones de valencia compartidos por cada átomo y produce un estado de estabilidad química. Además, compartir electrones de valencia produce enlaces covalentes que mantienen a los átomos juntos.



# Enlaces covalentes

La siguiente figura muestra el enlace covalente de un cristal de silicio **intrínseco**. Un cristal intrínseco es uno que no tiene impurezas. El enlace covalente en el germanio es similar porque también tiene cuatro electrones de valencia.



# Tabla de contenidos

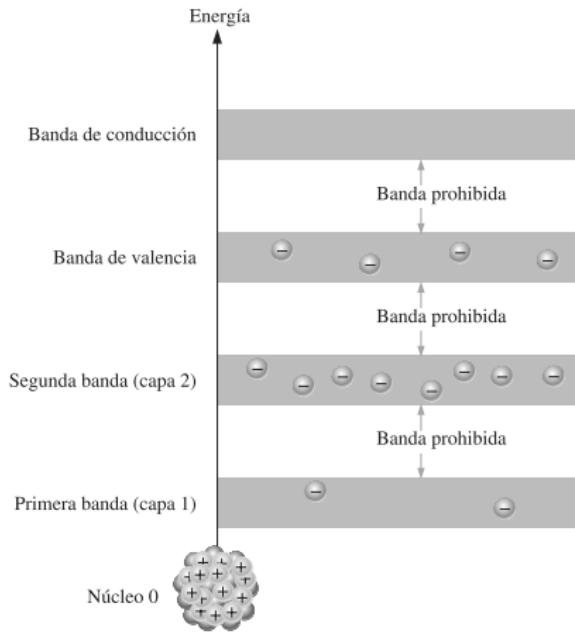
- 1 Estructura atómica
- 2 Tipos de materiales
- 3 Corriente en semiconductores
- 4 Diodo
- 5 Polarización de un diodo

## Sección 3

# Corriente en semiconductores

# Corriente en semiconductores

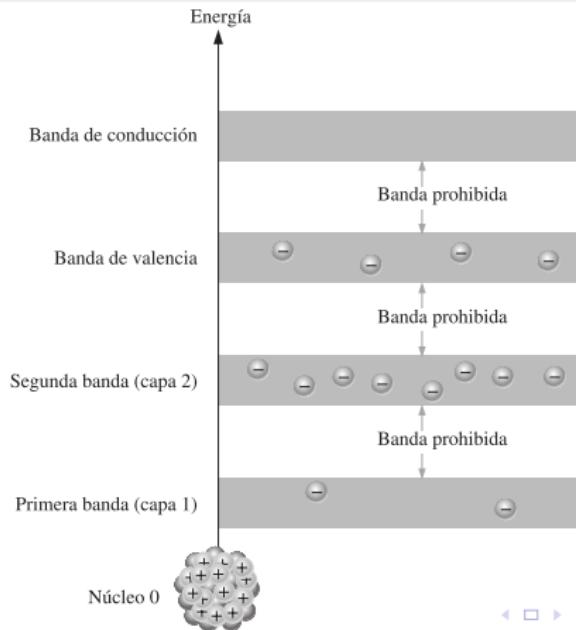
Como aprendió anteriormente, los electrones de un átomo pueden existir sólo dentro de bandas de energía prescritas. La siguiente figura muestra el diagrama de bandas de energía de un átomo no excitado.



# Corriente en semiconductores

Pregunta...

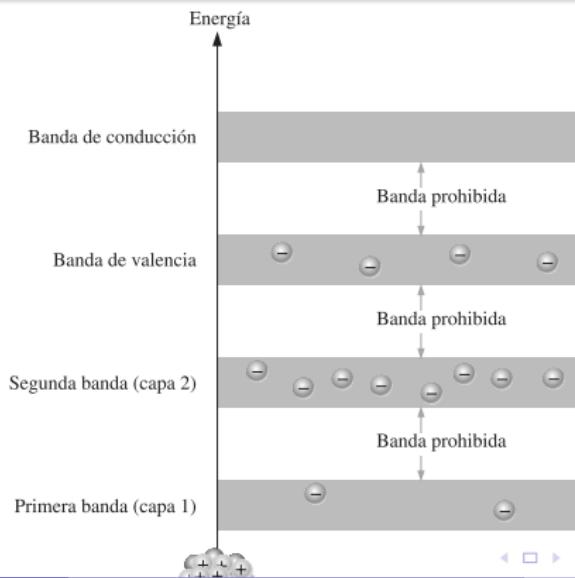
¿En qué condición cree que se encuentra este átomo de silicio para tener cero excitación?



# Corriente en semiconductores

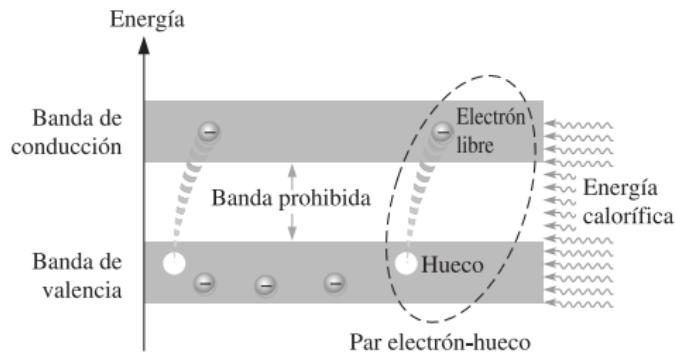
Respuesta:

Esta condición de excitación nula se supone ausencia de energía externa absoluta como puede ser el mismo calor. Es decir, el átomo se encuentra a la temperatura de 0°Kelvin.

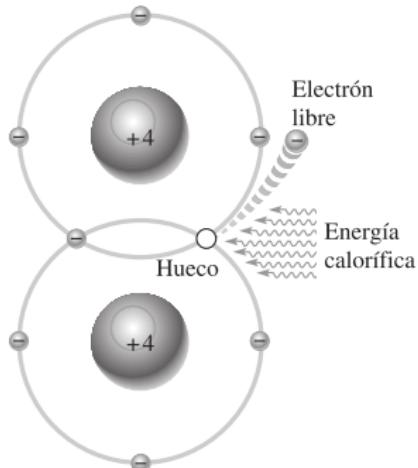


# Electrones de conducción y huecos

Un cristal de silicio intrínseco (puro) a temperatura ambiente tiene energía calorífica (térmica) suficiente para que algunos electrones de valencia salten la banda prohibida desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, convirtiéndose así en electrones libres, que también se conocen como **electrones de conducción**.



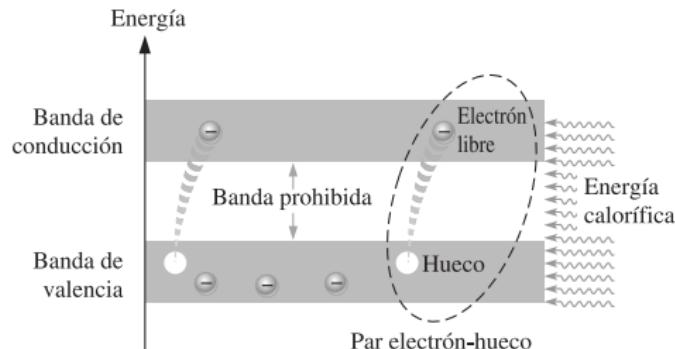
(a) Diagrama de energía



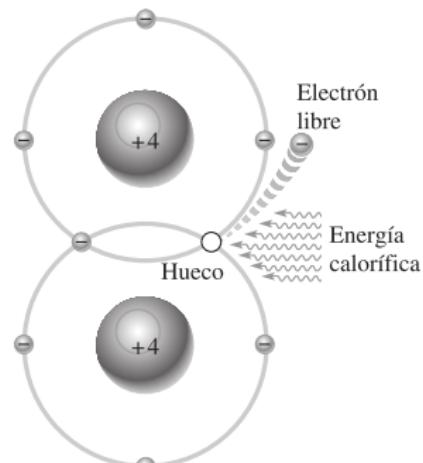
(b) Diagrama de enlaces

# Electrones de conducción y huecos

Cuando un electrón salta a la banda de conducción, deja un espacio vacío en la banda de valencia dentro del cristal. Este espacio vacío se llama **hueco**.



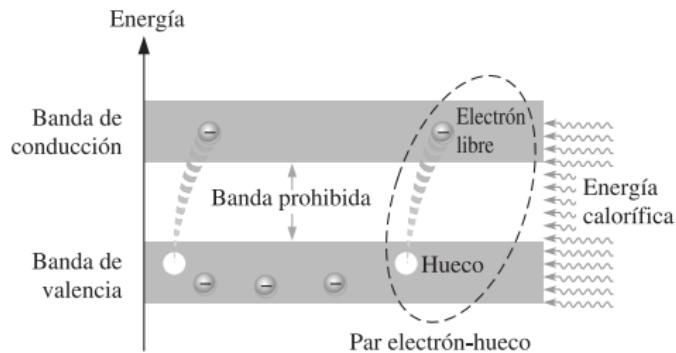
(a) Diagrama de energía



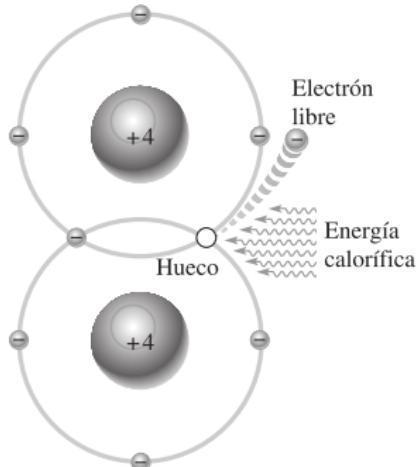
(b) Diagrama de enlaces

# Electrones de conducción y huecos

Por cada electrón elevado a la banda de conducción por medio de energía externa queda un hueco en la banda de valencia y se crea lo que se conoce como **par electrón-hueco**; ocurre una **recombinación** cuando un electrón de banda de conducción pierde energía y regresa a un hueco en la banda de valencia.



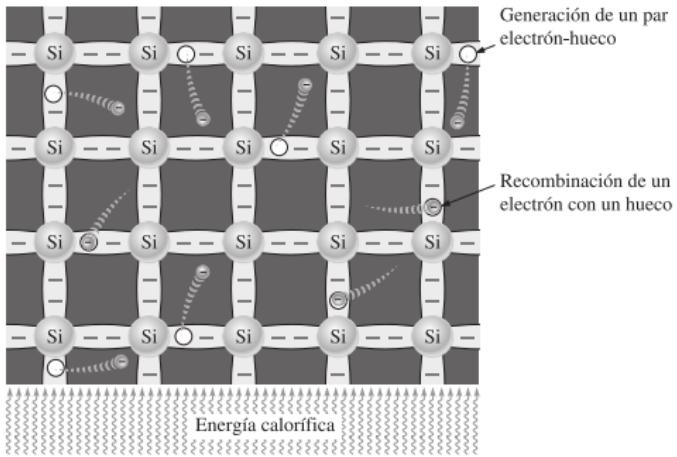
(a) Diagrama de energía



(b) Diagrama de enlaces

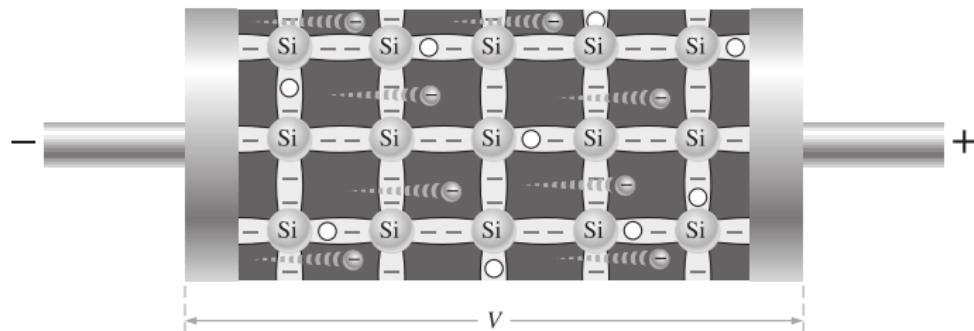
# Electrones de conducción y huecos

Resumiendo, un trozo de silicio intrínseco a temperatura ambiente tiene, en cualquier instante, varios electrones de banda de conducción (libres) que no están enlazados a ningún átomo y en esencia andan a la deriva por todo el material. También existe un número igual de huecos en la banda de valencia que se crean cuando estos electrones saltan a la banda de conducción.



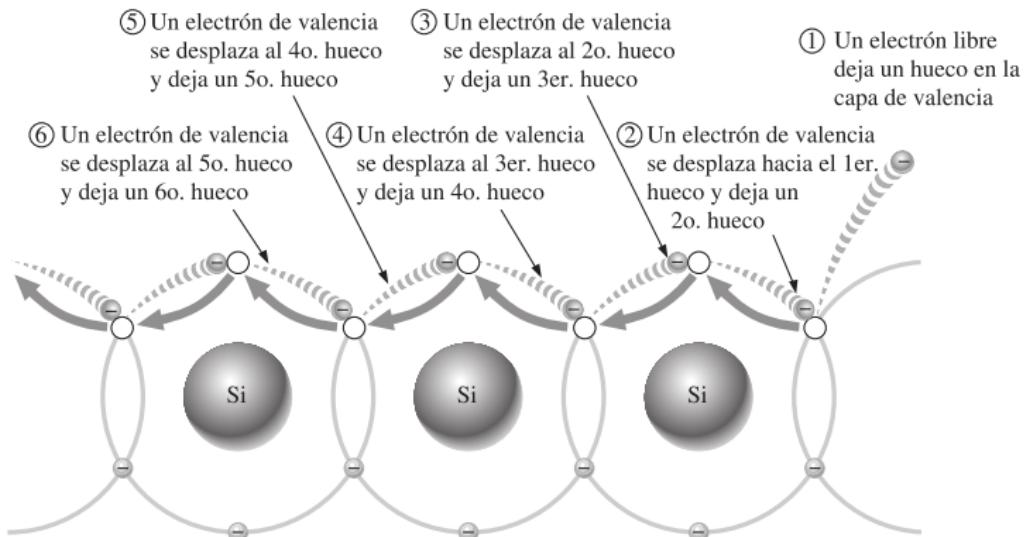
# Corriente de electrón y hueco

Cuando se aplica voltaje a través de un trozo de silicio intrínseco los electrones libres generados térmicamente presentes en la banda de conducción (que se mueven libremente y al azar en la estructura cristalina) son entonces fácilmente atraídos hacia el extremo positivo. Este movimiento de electrones es un tipo de **corriente** en un material semiconductor y se llama *corriente de electrón*.



# Corriente de electrón y hueco

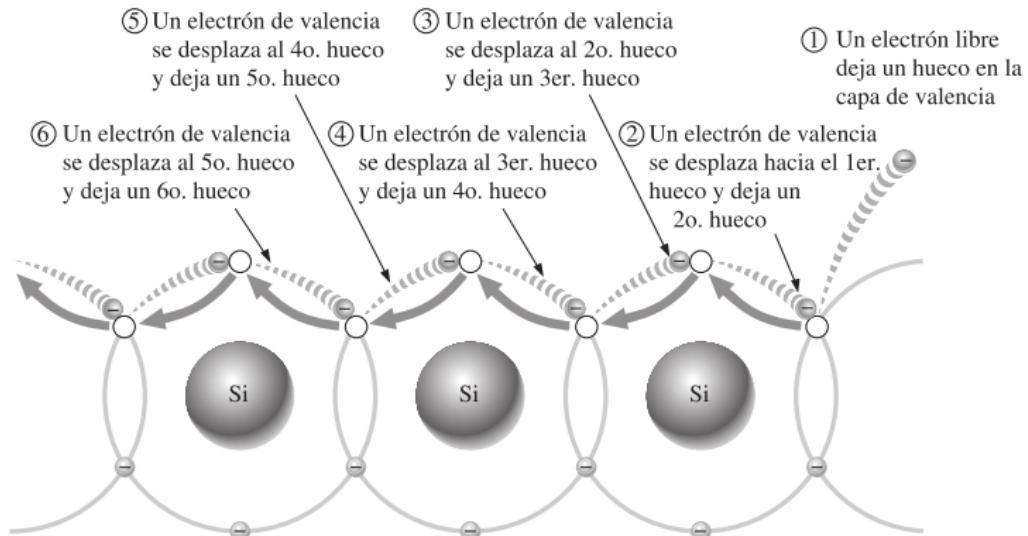
Otro tipo de corriente ocurre en la banda de valencia, donde existen los huecos creados por los electrones libres. Los electrones que permanecen en la banda de valencia siguen estando unidos a sus átomos y no pueden moverse al azar en la estructura cristalina como lo hacen los electrones.



Cuando un electrón de valencia se desplaza de izquierda a derecha mientras deja detrás un hueco, éste se ha movido efectivamente de derecha a izquierda. Las flechas gruesas indican el movimiento efectivo de un hueco.

# Corriente de electrón y hueco

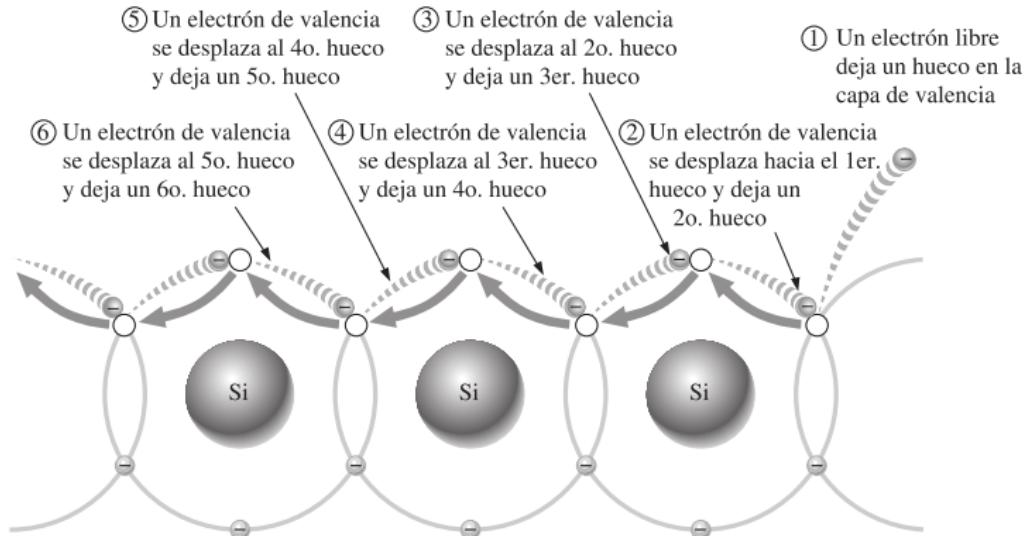
No obstante, un electrón de valencia puede moverse a un hueco cercano con poco cambio en su nivel de energía y por lo tanto deja otro hueco en el lugar de donde vino: el hueco se habrá movido entonces de un lugar a otro en la estructura cristalina.



Cuando un electrón de valencia se desplaza de izquierda a derecha mientras deja detrás un hueco, éste se ha movido efectivamente de derecha a izquierda. Las flechas gruesas indican el movimiento efectivo de un hueco.

# Corriente de electrón y hueco

Aun cuando la corriente en la banda de valencia es producida por electrones de valencia, se llama *corriente de hueco* para distinguirla de la corriente de electrón en la banda de conducción.



Cuando un electrón de valencia se desplaza de izquierda a derecha mientras deja detrás un hueco, éste se ha movido efectivamente de derecha a izquierda. Las flechas gruesas indican el movimiento efectivo de un hueco.

# Corriente de electrón y hueco

## Pregunta...

¿La circulación de corriente en el cobre tiene el mismo comportamiento que el silicio?

# Corriente de electrón y hueco

## Pregunta...

¿La circulación de corriente en el cobre tiene el mismo comportamiento que el silicio?

Los átomos de cobre forman un tipo de cristal diferente en el que los átomos no están enlazados covalentemente entre sí, sino que se componen de un “mar” de núcleos de iones positivos, los cuales son átomos sin sus electrones de valencia. Los electrones de valencia están enlazados a los iones positivos, lo que mantiene a los iones positivos juntos y les permite formar el enlace metálico. Los electrones de valencia no pertenecen a un átomo dado, sino al cristal en conjunto. Debido a que los electrones de valencia en el cobre se mueven libremente, la aplicación de un voltaje produce corriente. Existe sólo un tipo de corriente –el movimiento de electrones libres– porque no existen “huecos” en la estructura cristalina metálica.

# Semiconductores intrínsecos

Los semiconductores más utilizados en la industria electrónica son:

- Silicio (Si)
- Germanio (Ge)

Estos materiales tienen una estructura cristalina y libres de impurezas y se los conoce como *intrínsecos*.

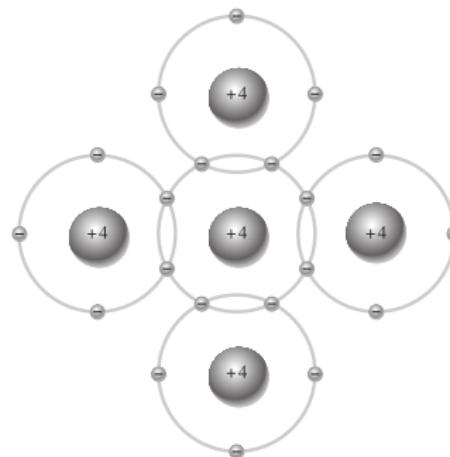


Figura: Estructura cristalina del silicio y sus enlaces covalentes.

# Semiconductores extrínsecos

Los materiales semiconductores en su estado intrínseco no conducen bien la corriente y su valor es limitado. Esto se debe al número limitado de electrones libres presentes en la banda de conducción y huecos presentes en la banda de valencia.

## Dopado

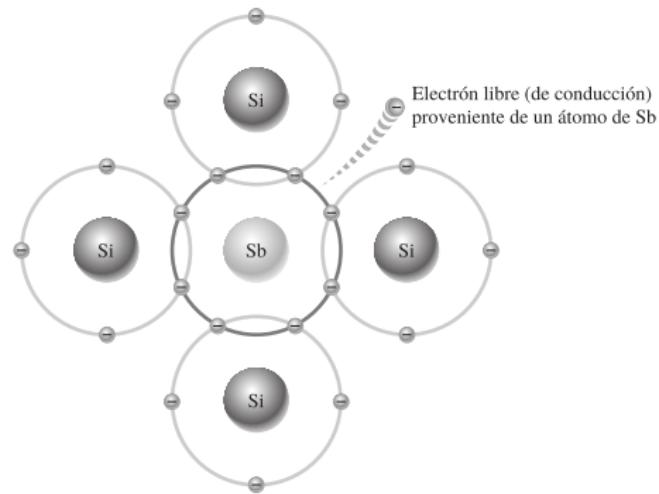
La conductividad del Si y Ge se incrementa drásticamente mediante la adición controlada de impurezas al material semiconductor intrínseco. Los dos portadores de impureza son del tipo *N* y el tipo *P*.

# Semiconductor tipo N

Para incrementar el número de electrones de banda de conducción en silicio intrínseco se agrega átomos de impureza *pentavalente*. Estos son átomos de cinco e<sup>-</sup> de valencia tales como el Arsénico (As), Fósforo (P), Bismuto (Bi) y Antimonio (Sb).

Los electrones se conocen como *portadores mayoritarios* en el material tipo N.

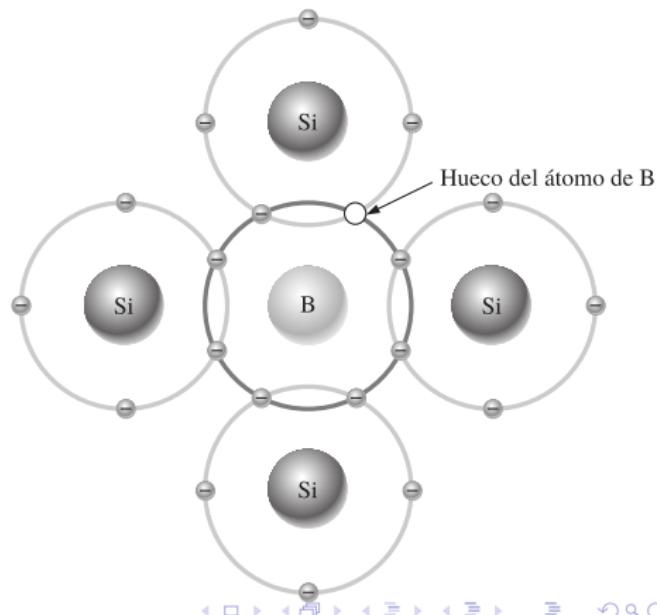
Los huecos en el material tipo N reciben el nombre de *portadores minoritarios*.



## Semiconductor tipo *P*

Para incrementar el número de huecos en el silicio intrínseco, se agregan átomos de impureza *trivalentes*: átomos con tres electrones de valencia tales como Boro (B), Indio (In) y Galio (Ga).

Los huecos son los *portadores mayoritarios* en un material tipo *P*.  
Los electrones de banda de conducción en un material tipo *P* son los *portadores minoritarios*.



# Tabla de contenidos

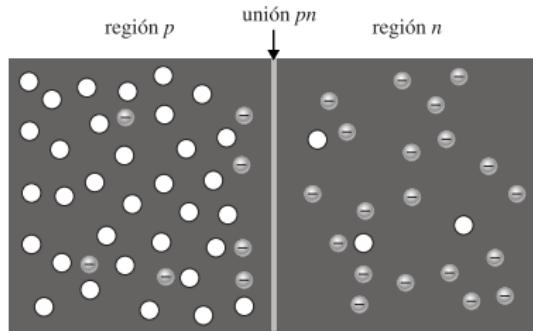
- 1 Estructura atómica
- 2 Tipos de materiales
- 3 Corriente en semiconductores
- 4 Diodo
- 5 Polarización de un diodo

## Sección 4

### Diodo

# Diodo

Si un trozo de silicio intrínseco es dopado de tal forma que una parte es tipo  $n$  y la otra tipo  $p$ , se forma una **unión  $pn$**  en el límite entre las dos regiones y se crea un diodo.



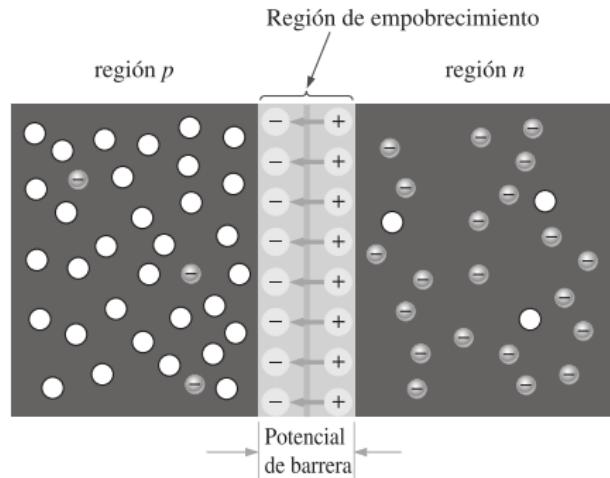
Tenga en cuenta los portadores mayoritarios y minoritarios en cada una de los semiconductores dopados.

Pregunta...

¿Cómo reaccionarán estos portadores en el momento de la unión de ambos tipos de semiconductores?

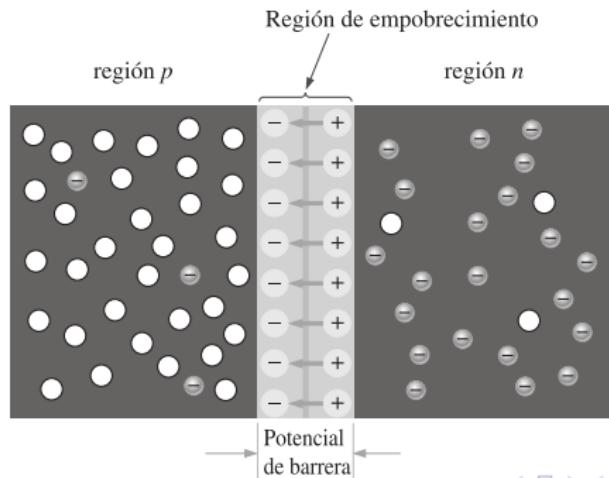
# Formación de la región de empobrecimiento

Los electrones libres en la región  $n$  se mueven aleatoriamente en todas direcciones. En el instante en que se forma la unión  $pn$ , los electrones libres que se encuentran cerca de la unión en la región  $n$  comienzan a difundirse a través de la unión hacia la región  $p$ , donde se combinan con los huecos que se encuentran cerca de la unión.



# Formación de la región de empobrecimiento

Cuando se forma la unión *pn*, la región *n* pierde electrones libres a medida que se difunden a través de la unión. Esto crea una capa de cargas positivas (iones pentavalentes) cerca de la unión. A medida que los electrones se mueven a través de ésta, la región *p* pierde huecos a medida que los electrones y huecos se combinan. Esto crea una capa de cargas negativas (iones trivalentes) cerca de la unión.

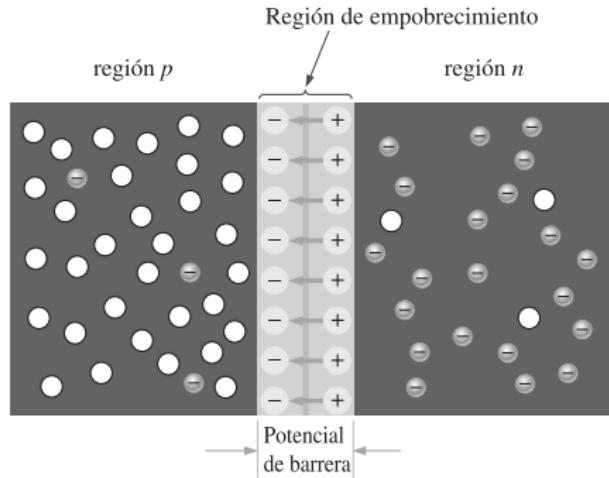


# Formación de la región de empobrecimiento

Estas dos capas de cargas positivas y negativas forman la **región de empobrecimiento**.

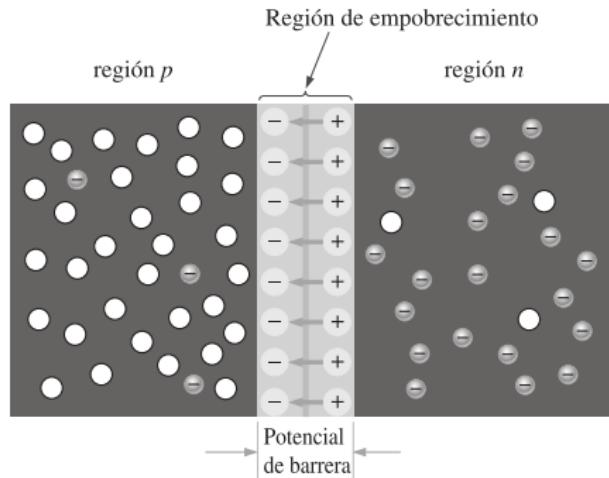
Pregunta...

¿Por qué se denomina región de empobrecimiento?



# Formación de la región de empobrecimiento

El término *empobrecimiento* se refiere al hecho de que la región cercana a la unión *pn* se queda sin portadores de carga (electrones y huecos) debido a la difusión a través de la unión. Tenga en cuenta que la región de empobrecimiento se forma muy rápido y que es muy delgada en comparación con la región *n* y la región *p*.

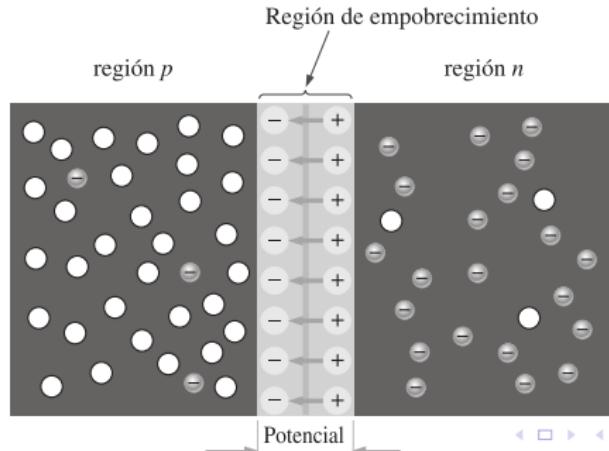


# Formación de la región de empobrecimiento

Después del aumento súbito inicial de electrones libres a través de la unión  $pn$ , la región de empobrecimiento se expande hasta un punto donde se establece el equilibrio y no hay más difusión de electrones a través de la unión.

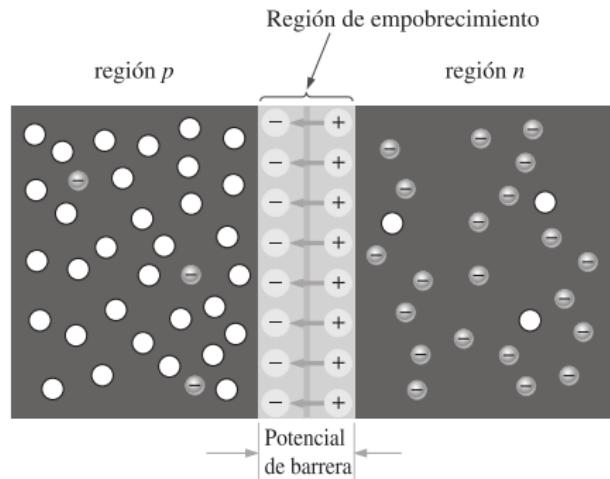
Pregunta...

¿Por qué se establece el equilibrio en la región de empobrecimiento?



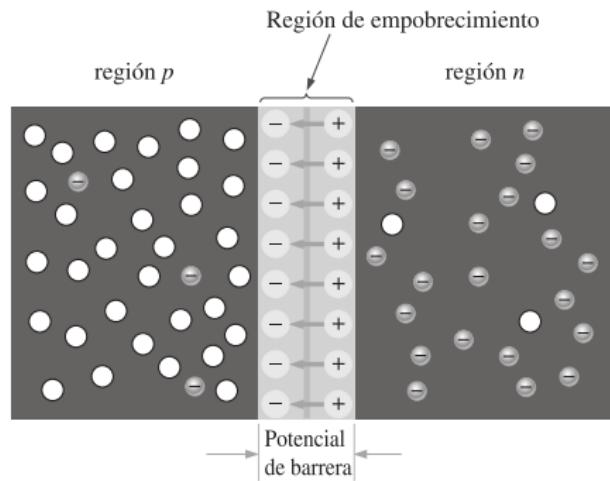
# Formación de la región de empobrecimiento

Conforme los electrones continúan difundiéndose a través de la unión, más y más cargas positivas y negativas se crean cerca de la unión a medida que se forma la región de empobrecimiento. En otras palabras, la región de empobrecimiento actúa como barrera ante el movimiento continuado de electrones a través de la unión.



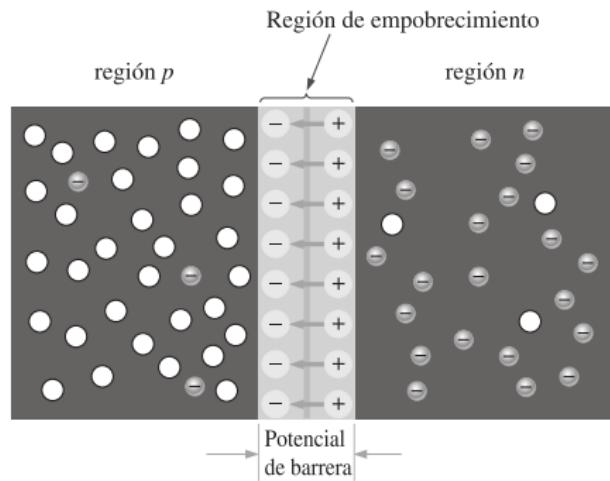
## Potencial de barrera

En cualquier momento que exista una carga positiva y una carga negativa, una cerca de la otra, existe una fuerza que actúa en la carga como lo describe la ley de Coulomb. Las fuerzas entre las cargas opuestas forman un campo eléctrico, como se indica en la figura mediante flechas entre las cargas positivas y las cargas negativas.



## Potencial de barrera

Este campo eléctrico es una barrera para los electrones libres en la región  $n$  y se debe consumir energía para mover un electrón a través del campo eléctrico; es decir, se debe aplicar energía externa para hacer que los electrones se muevan a través de la barrera del campo eléctrico en la región de empobrecimiento.

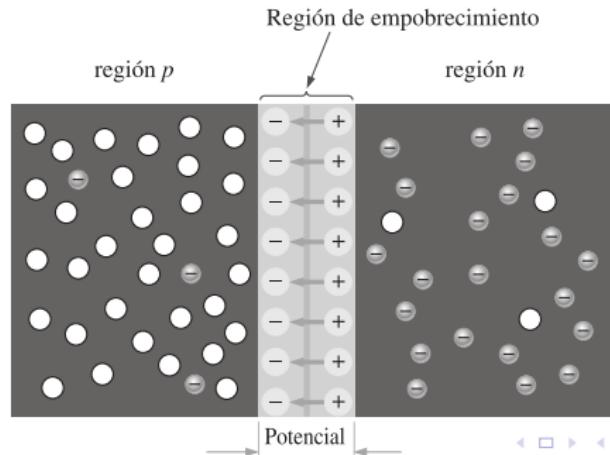


# Potencial de barrera

La diferencia de potencial del campo eléctrico a través de la región de empobrecimiento es la cantidad de voltaje requerido para mover electrones a través del campo eléctrico. Esta diferencia de potencial se llama *potencial de barrera* y se expresa en volts.

## Pregunta...

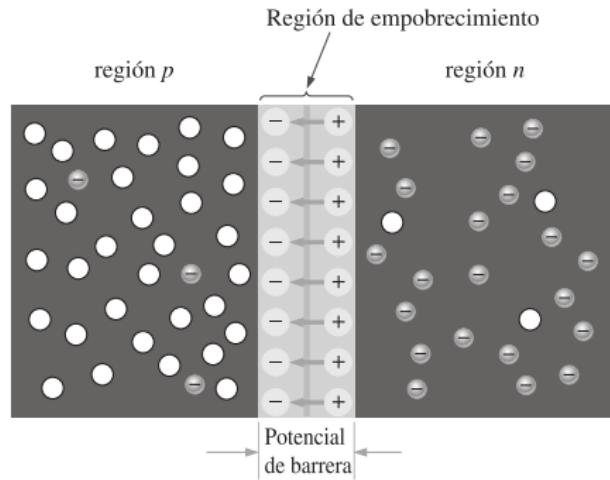
¿De qué depende el potencial de barrera en un diodo?



# Potencial de barrera

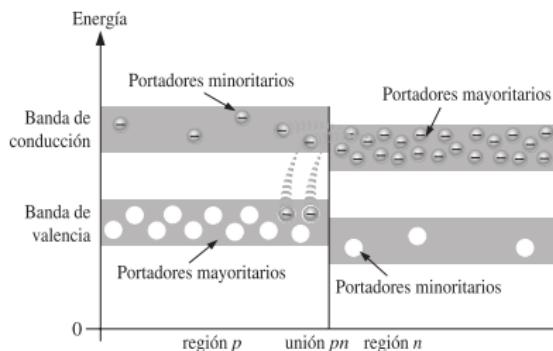
Respuesta:

El potencial de barrera de una unión *pn* depende de varios factores, incluido el tipo de material semiconductor, la cantidad de dopado y la temperatura. El potencial de barrera típico es aproximadamente de 0.7V para el silicio y de 0.3V para el germanio a 25°C.

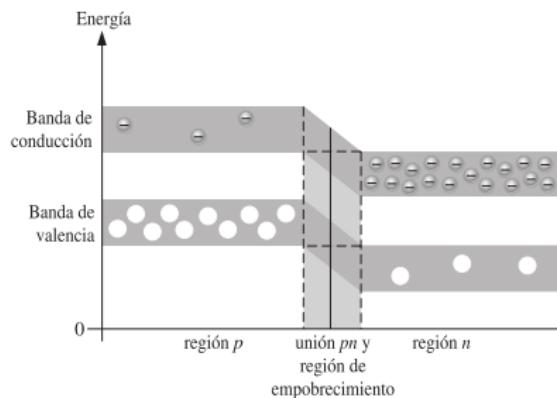


# Diagramas de energías de la unión PN

En el instante de la formación de la unión, las bandas de valencia y conducción de la región n están a niveles de energía más bajos que aquellas de la región p, pero existe una cantidad significativa de traslape.



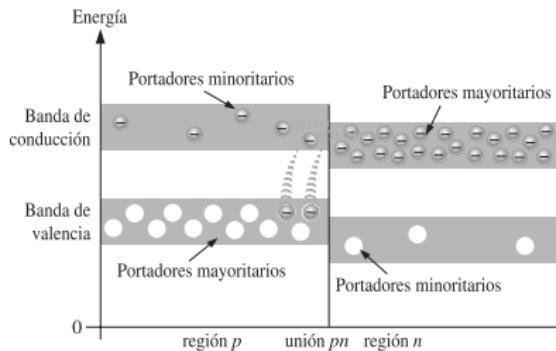
(a) En el instante de la formación de la unión



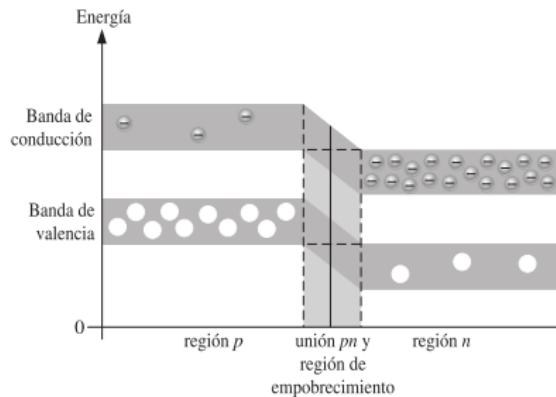
(b) En equilibrio

# Diagramas de energías de la unión PN

Los electrones libres en la región  $n$  que ocupan la parte superior de la banda de conducción en función de su energía pueden difundirse con facilidad a través de la unión (no tienen que adquirir energía adicional) y temporalmente se convierten en electrones libres en la parte inferior de la banda de conducción de la región  $p$ .



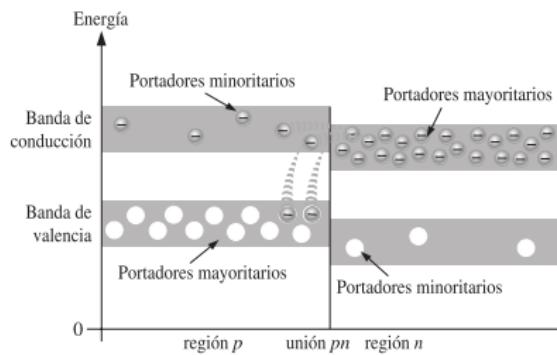
(a) En el instante de la formación de la unión



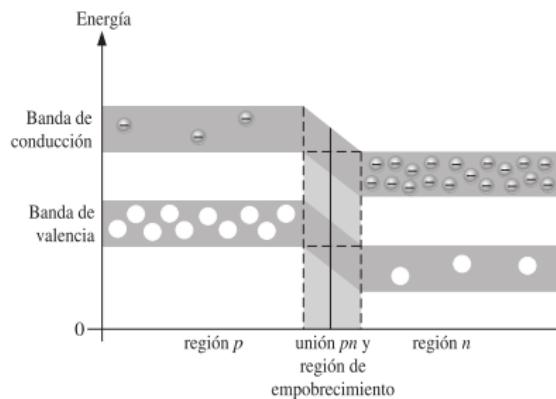
(b) En equilibrio

# Diagramas de energías de la unión PN

A medida que continúa la difusión, la región de empobrecimiento comienza a formarse y el nivel de energía de la banda de conducción de la región  $n$  se reduce. La reducción del nivel de energía de la banda de conducción en la región  $n$  se debe a la pérdida de electrones de alta energía que se han difundido a través de la unión hacia la región  $p$ .



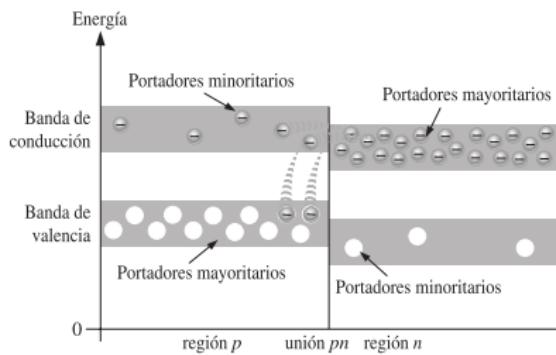
(a) En el instante de la formación de la unión



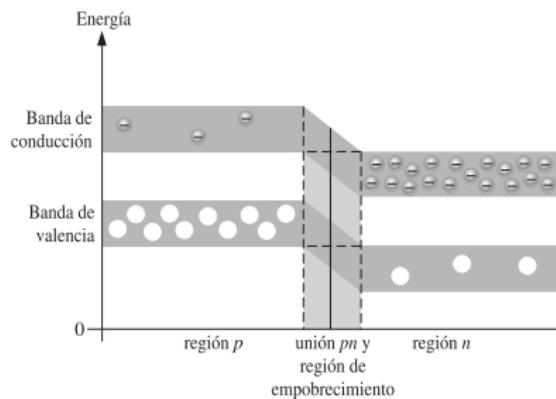
(b) En equilibrio

# Diagramas de energías de la unión PN

Pronto no quedan electrones en la banda de conducción de la región *n* con suficiente energía para atravesar la unión hacia la banda de conducción de la región *p*, como se indica por medio de la alineación de la parte superior de la banda de conducción de la región *n* y la parte inferior de la banda de conducción de la región *p*.



(a) En el instante de la formación de la unión



(b) En equilibrio

# Tabla de contenidos

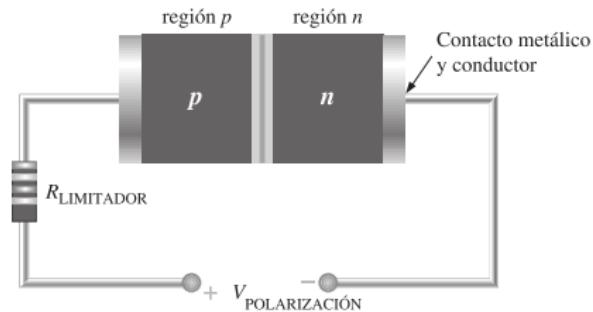
- 1 Estructura atómica
- 2 Tipos de materiales
- 3 Corriente en semiconductores
- 4 Diodo
- 5 Polarización de un diodo

## Sección 5

# Polarización de un diodo

# Polarización en directa

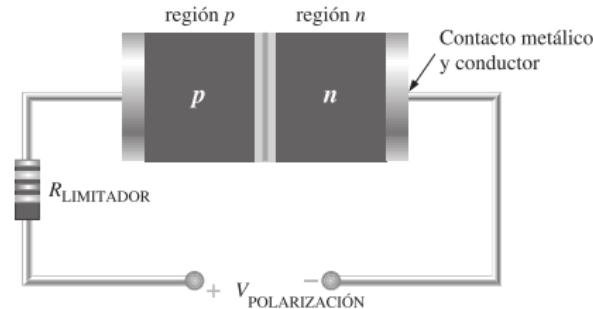
Polarización en directa es la condición que permite la circulación de corriente a través de la unión  $pn$ . En la figura el voltaje de polarización externo se expresa como  $V_{\text{POLARIZACIÓN}}$ . El resistor limita la corriente en condición de polarización en directa a un valor que no dañe al diodo.



# Polarización en directa

Pregunta...

¿Cuáles son las condiciones que debe cumplir el circuito para que el diodo conduzca corriente?

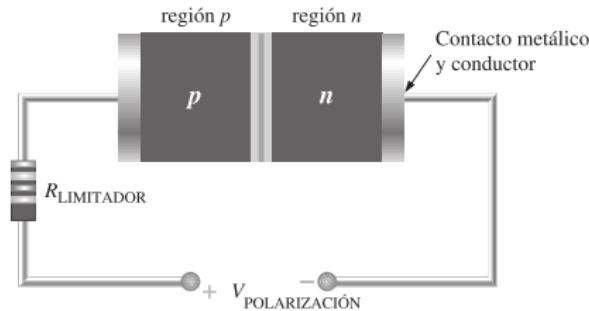


# Polarización en directa

## Pregunta...

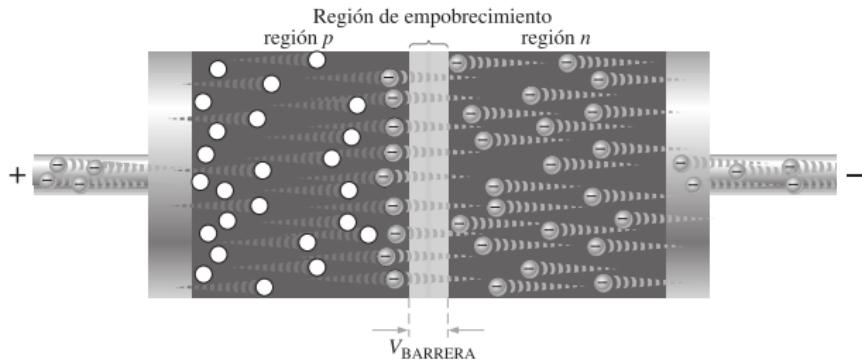
¿Cuáles son las condiciones que debe cumplir el circuito para que el diodo conduzca corriente?

Es necesario que lado negativo de  $V_{\text{POLARIZACIÓN}}$  esté conectado a la región *n* del diodo y el lado positivo esté conectado a la región *p*. Además, que el voltaje de polarización,  $V_{\text{POLARIZACIÓN}}$ , debe ser más grande que el potencial de barrera



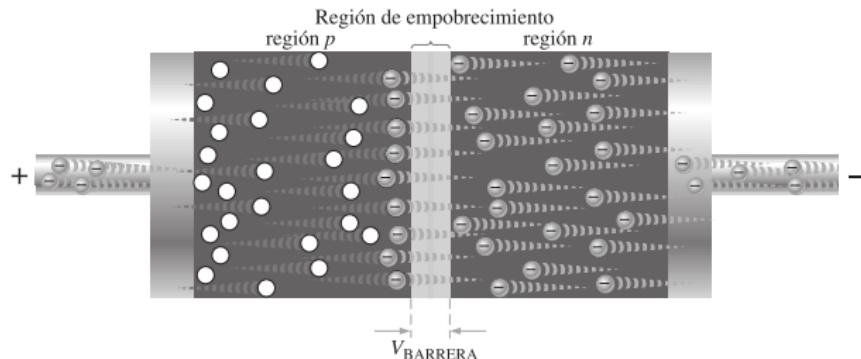
# Polarización en directa

Como las cargas iguales se repelen, el lado negativo de la fuente de voltaje de polarización “empuja” a los electrones libres, los cuales son los portadores mayoritarios en la región *n*, hacia la unión *pn*. Este flujo de electrones libre se llama *corriente de electrones*. El lado negativo de la fuente también genera un flujo continuo de electrones a través de la conexión externa (conductor) y hacia la región *n* como muestra la figura.



## Polarización en directa

La fuente de voltaje de polarización proporciona suficiente energía a los electrones libres para que venzan el potencial de barrera de la región de empobrecimiento y continúen moviéndose hacia la región *p*. Una vez que llegan a la región *p*, estos electrones de conducción han perdido suficiente energía para combinarse de inmediato con los huecos presentes en la banda de valencia.

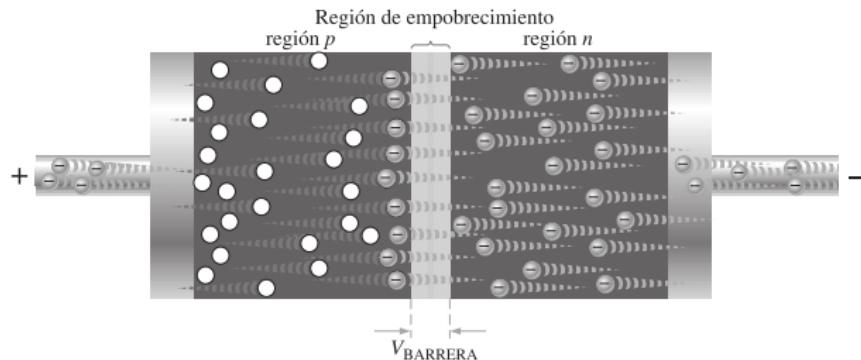


# Polarización en directa

Entonces, los electrones quedan en la banda de valencia de la región *p* simplemente porque perdieron demasiada energía al vencer el potencial de barrera y permanecer en la banda de conducción.

Pregunta...

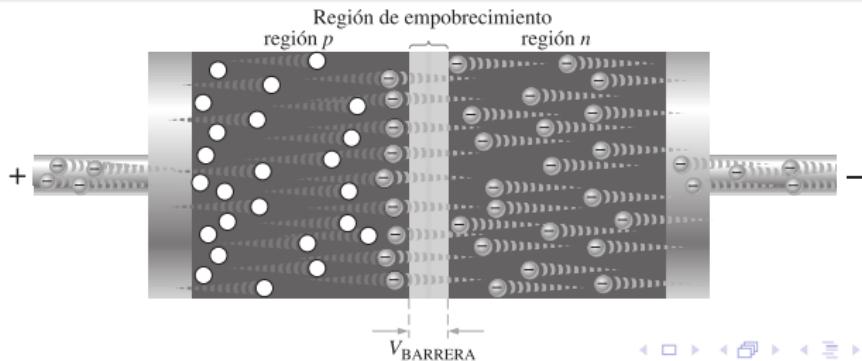
¿Cómo es que en polarización directa hay flujo de cargas (corriente)?



# Polarización en directa

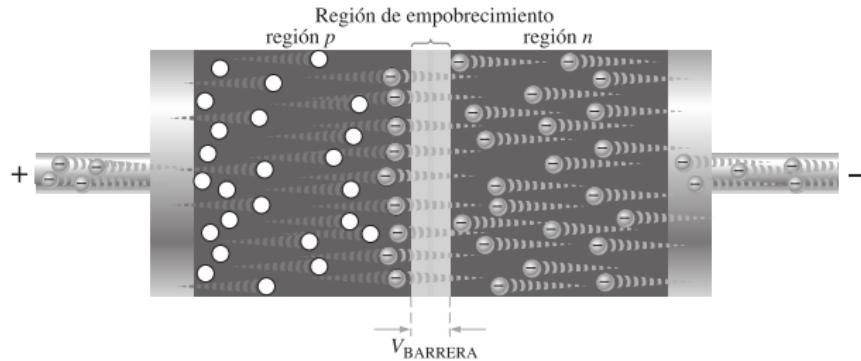
Respuesta:

Como las cargas diferentes se atraen, el lado positivo de la fuente de voltaje de polarización atrae los electrones de valencia hacia el extremo izquierdo de la región *p*. Los huecos en la región *p* proporcionan el medio o “ruta” para que estos electrones de valencia se desplacen hacia la región *p*. Los electrones de valencia se desplazan de un hueco al siguiente hacia la izquierda. Los huecos, que son portadores mayoritarios en la región *p*, efectivamente (no en realidad) se desplazan a la derecha hacia la unión.



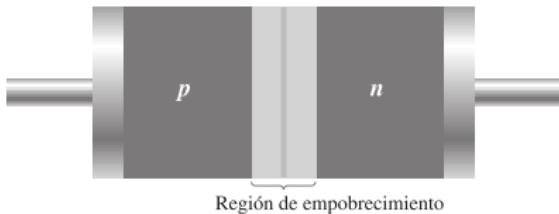
## Polarización en directa

Este flujo efectivo de huecos es la corriente de huecos. También se ve que el flujo de electrones de valencia a través de la región  $p$  crea la corriente de huecos y los huecos son el único medio para que estos electrones fluyan. A medida que los electrones salen de la región  $p$  a través de la conexión externa (conductor) en dirección al lado positivo de la fuente de voltaje de polarización, dejan huecos en la región  $p$ ; al mismo tiempo, estos electrones se convierten en electrones de conducción en el conductor metálico.

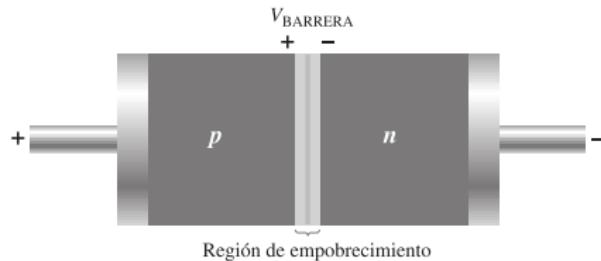


# Efectos en la región de empobrecimiento y potencial de barrera, en polarización directa

A medida que fluyen más electrones hacia la región de empobrecimiento, el número de iones se reduce. Conforme más huecos fluyen hacia la región de empobrecimiento del otro lado de la unión  $pn$ , el número de iones negativos se reduce. Esta reducción de iones positivos y negativos durante la polarización en directa hace que la región de empobrecimiento se estrecha.

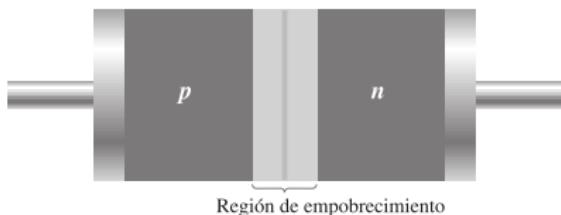


(a) En equilibrio (sin polarización)

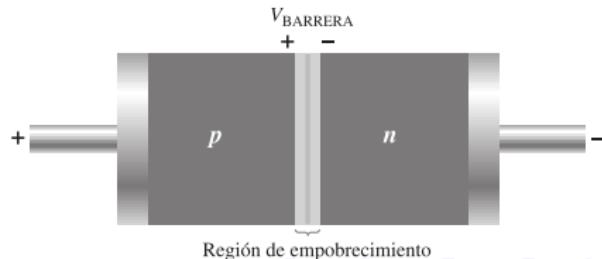
(b) La polarización en directa estrecha la región de empobrecimiento y produce una caída de voltaje a través de la unión  $pn$  igual al potencial de barrera.

# Efectos en la región de empobrecimiento y potencial de barrera, en polarización directa

Cuando se aplica polarización en directa, los electrones libres reciben suficiente energía de la fuente de voltaje de polarización para vencer el potencial de barrera, atravesando así la región de empobrecimiento. La energía que requieren los electrones para pasar a través de la región de empobrecimiento es igual al potencial de barrera. En otras palabras, los electrones ceden una cantidad de energía equivalente al potencial de barrera cuando atraviesan la región de empobrecimiento. Esta pérdida de energía produce una caída de voltaje a través de la unión *pn* igual al potencial de barrera ( $0.7V$ )



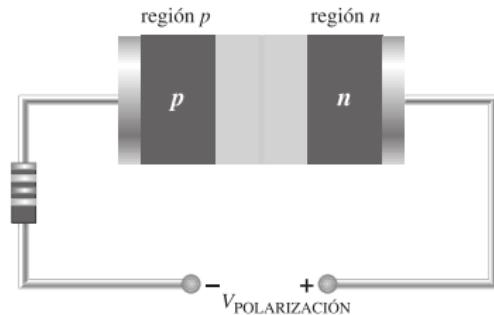
(a) En equilibrio (sin polarización)



(b) La polarización en directa estrecha la región de empobrecimiento

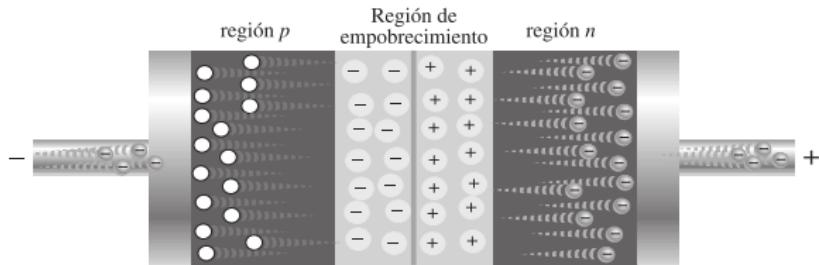
# Polarización en inversa

La polarización en inversa es la condición que en esencia evita la circulación de corriente a través del diodo. Observe que la región de empobrecimiento se muestra mucho más ancha que la condición de polarización en directa o equilibrio.



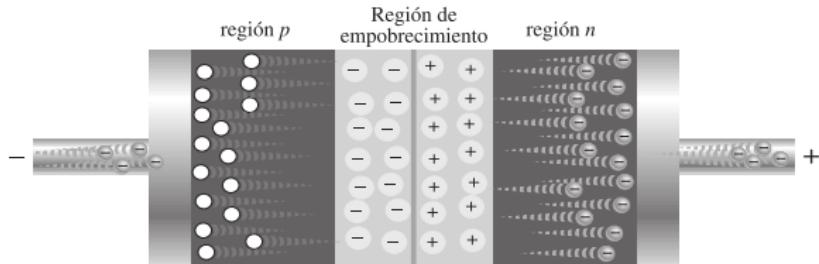
## Polarización en inversa

Como las cargas diferentes se atraen, el lado positivo de la fuente de voltaje de polarización “jala” los electrones libres, los cuales son los portadores mayoritarios en la región  $n$ , lejos de la unión  $pn$ . A medida que los electrones fluyen hacia el lado positivo de la fuente de voltaje, se crean iones positivos adicionales. Esto produce el ensanchamiento de la región de empobrecimiento y el consecuente empobrecimiento de los portadores mayoritarios.



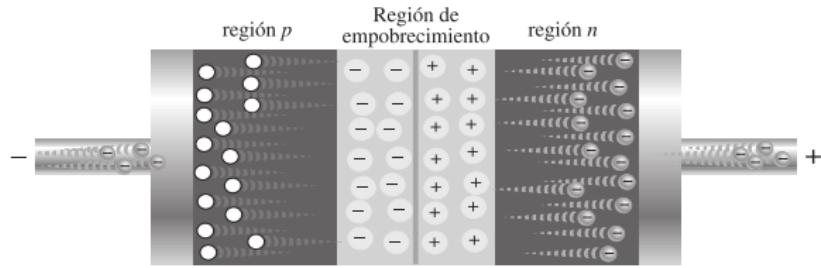
# Polarización en inversa

En la región  $p$ , los electrones procedentes del lado negativo de la fuente de voltaje entran como electrones de valencia y se desplazan de hueco en hueco hacia la región de empobrecimiento, donde crean iones negativos adicionales. Esto ensancha la región de empobrecimiento y agota los portadores mayoritarios. El flujo de electrones de valencia puede ser considerado como huecos que están siendo “jalados” hacia el lado positivo.



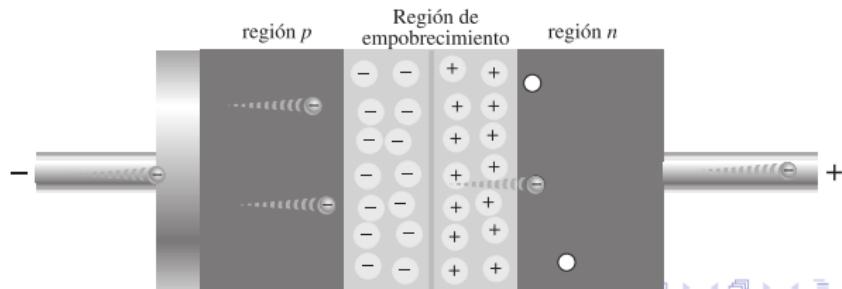
## Polarización en inversa

El flujo inicial de portadores de carga es transitorio y subsiste sólo durante un lapso muy poco después de que se aplica el voltaje de polarización en inversa. Conforme la región de empobrecimiento se ensancha, la disponibilidad de portadores mayoritarios se reduce. A medida que más regiones  $n$  y  $p$  se quedan sin portadores mayoritarios, la intensidad del campo eléctrico entre los iones positivos y negativos se incrementa hasta que el potencial a través de la región de empobrecimiento es igual al voltaje de polarización,  $V_{\text{POLARIZACIÓN}}$ . En ese momento, la corriente de transición en esencia cesa, excepto por una muy pequeña corriente en inversa que casi siempre se puede despreciar.



## Corriente en inversa

La corriente extremadamente pequeña que existe en la condición de polarización en inversa después de que la corriente de transición se disipa es provocada por los portadores minoritarios en las regiones  $n$  y  $p$  producidos por pares de electrón-hueco generados térmicamente. El pequeño número de electrones minoritarios libres en la región  $p$  son "empujados" hacia la unión  $pn$  por el voltaje de polarización negativo. Cuando estos electrones llegan a la región de empobrecimiento ancha, "descienden la colina de energía", se combinan con huecos minoritarios presentes en la región  $n$  como electrones de valencia, fluyen hacia el voltaje de polarización positivo y se crea una pequeña corriente de huecos.

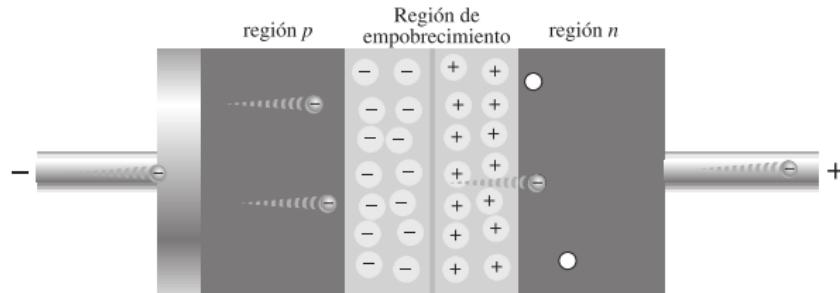


## Corriente en inversa

La banda de conducción de la región p está a un nivel de energía mucho más alto que la banda de conducción en la región n. Por lo tanto, los portadores minoritarios pasan con facilidad a través de la región de empobrecimiento porque no requieren energía adicional.

### Pregunta...

¿Esta corriente inversa (insignificante) se mantendrá para cualquier polarización inversa?



# Ruptura en inversa

## Respuesta:

Normalmente, la corriente en inversa es tan pequeña que se puede despreciar. No obstante, si el voltaje de polarización en inversa externo se incrementa a un valor llamado *voltaje de ruptura*, la corriente en inversa se incrementará drásticamente.

## Ruptura en inversa

El alto voltaje de polarización en inversa proporciona energía a los electrones minoritarios, así que a medida que adquieren velocidad a través de la región *p* chocan con átomos con suficiente energía para sacar a los electrones de valencia de su órbita para enviarlos hacia la banda de conducción. Los electrones de conducción recién creados también contienen mucha energía y repiten el proceso. Si un electrón expulsa a sólo otros dos electrones de su órbita de valencia durante su recorrido a través de la región *p*, los números se multiplican con rapidez. A medida que estos electrones de alta energía pasan a través de la región de empobrecimiento, su energía es suficiente para atravesar la región *n* como electrones de conducción en lugar de combinarse con huecos.

## Ruptura en inversa

La multiplicación de los electrones de conducción recién descrita se conoce como **efecto avalancha** y la corriente en inversa puede incrementarse dramáticamente si no se toman las medidas pertinentes para limitar la corriente. Cuando no se limita la corriente en inversa, el calentamiento resultante daña permanentemente el diodo.

Pregunta...

¿Cómo limitamos la corriente inversa para evitar al ruptura?

# Ruptura en inversa

## Pregunta...

¿Cómo limitamos la corriente inversa para evitar al ruptura?

## Respuesta:

La mayoría de los diodos no son operados en condición de ruptura en inversa, pero si se limita la corriente (por ejemplo mediante la adición de un resistor limitador en serie), el diodo no sufre daños permanentes.

# Educación del Diodo

Se puede demostrar por medio de la física de estado sólido que las características generales de un diodo semiconductor se puede definir mediante la *ecuación de Shockley*.

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

- $I_S$  es la corriente de saturación en inversa
- $V_D$  es el voltaje de polarización en directa aplicado a través del diodo
- $n$  es el factor de identidad, depende de las condiciones de operación y construcción física; varía entre 1 y 2.
- $V_T$  es el voltaje térmico.

# Educación del Diodo

Se puede demostrar por medio de la física de estado sólido que las características generales de un diodo semiconductor se puede definir mediante la *ecuación de Shockley*.

donde,

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

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

*k* es la constante de Boltzmann =  
 $1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$

*T* es la temperatura absoluta en Kelvin  
+ la temperatura en °C

*q* es la magnitud de la carga del electrón  
 $= 1,6 \times 10^{-19} C$

## Ecuación del Diodo

Veamos un ejemplo simple, consideremos una temperatura ambiente de 27°C. Determinar  $V_T$ :

$$T = 273 + 27^\circ C = 300K$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

$$V_T = \frac{(1,38 \times 10^{-23} J/K)(300)}{1,6 \times 10^{-19} C}$$

$$V_T = 25,875 mV \approx 26 mV$$

### Lo importante...

no es en sí las ecuaciones sino entender el origen de las características del diodo y qué factores afectan a su comportamiento.

## Ecuación del Diodo

Sí realizamos un análisis de la ecuación del diodo, podemos ver lo siguiente,

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

Con valores positivos de  $V_D$ , el primer término de la ecuación anterior crecerá con rapidez y anulará por completo el efecto de segundo término. El resultado es el siguiente,

$$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}}$$

Se tiene valores positivos y con un comportamiento exponencial  $e^x$ .

# Ecuación del Diodo

Pregunta...

¿Qué sucederá con valores negativos de  $V_D$ ?

$$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} - I_S$$

# Ecuación del Diodo

Pregunta...

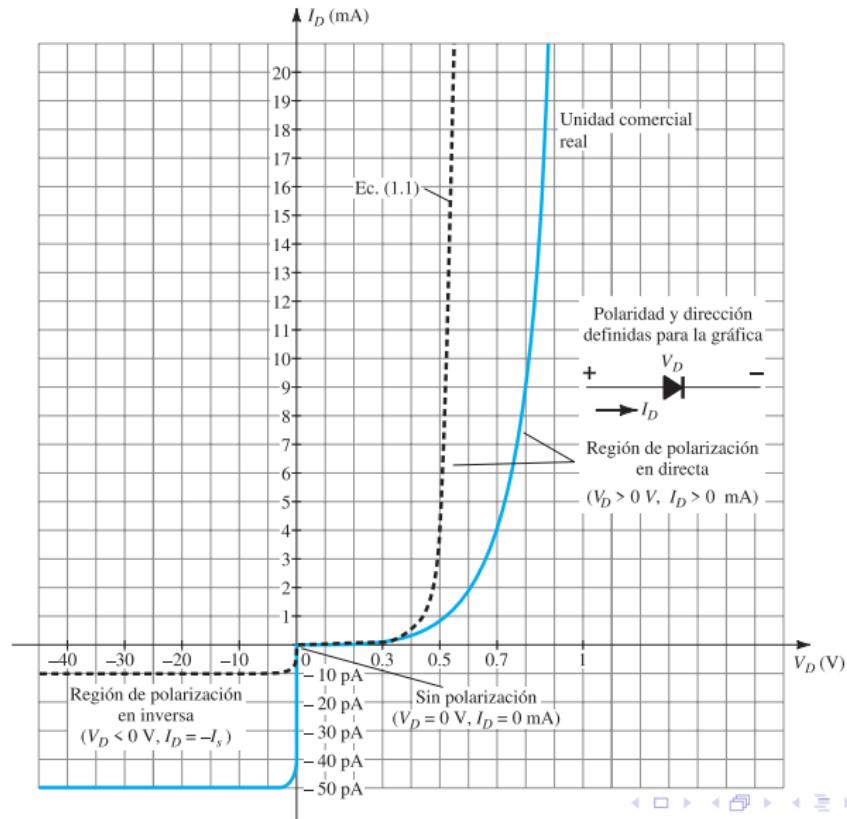
¿Qué sucederá con valores negativos de  $V_D$ ?

$$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} - I_S$$

Con valores negativos de  $V_D$  el término exponencial se reduce con rapidez por debajo del nivel de  $I$  y la ecuación resultante para  $I_D$  es

$$I_D \approx -I_S$$

# Curva característica del Diodo



# Curva característica del Diodo

- La línea puntuada es la curva ideal, teórica pero dista de la curva real (**que Ustedes relevarán en el TP2**). Sobre todo son diferentes debido a las resistencias internas y de contacto del dispositivo.
- La corriente de saturación en inversa ( $I_S$ ) de un dispositivo real es notoriamente mayor que el de la ecuación de Shockley. Esto se debe a efectos que no están incluidos en la ecuación, como la generación de portadores en la región de empobrecimiento y corrientes de fuga superficiales, las cuales son sensibles al área de contacto en la unión.
- La magnitud de la corriente de saturación en inversa es proporcional al área de contacto de la unión.