

RESISTIVIDADES

La resistividad de los conductores crece con la temperatura. Los metales tienen gran cantidad de electrones de valencia libres, por tanto son buenos conductores de la electricidad. En los metales sólo existen corrientes de arrastre para electrones.

La resistividad de los semiconductores varía fuertemente con pequeñas concentraciones de impurezas, añadidas intencionalmente o no. Por eso los valores publicados varían considerablemente entre las distintas fuentes. En los dispositivos electrónicos, distintas zonas se impurifican (dopan) de forma selectiva, consiguiendo zonas con distinta conductividad. Si el dopado hace que la cantidad de electrones predomine sobre los huecos, tenemos un semiconductor de tipo N. Si predominan los huecos, el semiconductor es de tipo P.

La resistividad de los aislantes varía con la pureza del material, y el estado de sus superficies, incluso varía con la cantidad de tiempo sometida a una diferencia de potencial. Son aislantes, los materiales con enlaces covalentes o iónicos, ya que tienen normalmente los electrones fijos (no hay ni electrones, ni huecos que transporten la corriente eléctrica).

En la tabla de la derecha se da, para Germanio, Silicio y Arseniuro de Galio, la concentración atómica, la permitividad relativa, el ancho de la banda prohibida (gap), la concentración intrínseca (n_i) y las movilidades para electrones (μ_N) y huecos (μ_P).

Conductores (273,2 K y 373,2 K)

| | | | |
|----|------|--------|----------------------|
| Ag | 1,47 | 2,08 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Cu | 1,55 | 2,23 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Au | 2,05 | 2,88 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Al | 2,50 | 3,55 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Zn | 5,5 | 7,8 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Co | 5,6 | 9,5 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Ni | 6,2 | 10,3 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Fe | 8,9 | 14,7 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Pt | 9,81 | 13,6 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Sn | 11,5 | 15,8 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Cr | 12,7 | 16,1 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Ga | 13,6 | 27,2 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Pb | 19,2 | 27 | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| As | 26 | - | $(10^{-8} \Omega m)$ |
| Hg | 94,1 | 103,65 | $(10^{-8} \Omega m)$ |

Semiconductores (298 K)

| | | |
|-----------|------------------------------|--------------|
| C amorfo | $\sim 6 \cdot 10^{-5}$ | (Ωm) |
| C grafito | $\sim (3-60) \cdot 10^{-6}$ | (Ωm) |
| Ge | $\sim (1-500) \cdot 10^{-3}$ | (Ωm) |
| Se | $\sim 0,1$ | (Ωm) |
| Si | $\sim (1-600) \cdot 10^{-1}$ | (Ωm) |

Aislantes (298 K)

| | | |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Agua (destilada) | $10^2 - 10^5$ | (Ωm) |
| Marfil | 10^6 | (Ωm) |
| Mármol | $10^7 - 10^9$ | (Ωm) |
| Madera | $10^8 - 10^{11}$ | (Ωm) |
| Plástico: Nylon | $10^8 - 10^{13}$ | (Ωm) |
| Silicona (goma) | 10^9 | (Ωm) |
| Plástico: Poliuretano | $10^9 - 10^{12}$ | (Ωm) |
| Papel (seco) | $\sim 10^{10}$ | (Ωm) |
| Aceite mineral | $> 10^{10}$ | (Ωm) |
| Diamante | $10^{10} - 10^{11}$ | (Ωm) |
| Porcelana | $10^{10} - 10^{12}$ | (Ωm) |
| Mica | $10^{11} - 10^{15}$ | (Ωm) |
| Vidrio (Pirex) | 10^{12} | (Ωm) |
| Si ₃ N ₄ | $\sim 10^{12}$ | (Ωm) |
| SiO ₂ | $10^{12} - 10^{14}$ | (Ωm) |
| Plástico: PVC (rígido) | $5 \cdot 10^{12} - 10^{13}$ | (Ωm) |
| Ebonita | $10^{13} - 10^{15}$ | (Ωm) |
| Plástico: Polipropileno | $10^{13} - 10^{15}$ | (Ωm) |
| Cera de Parafina | $10^{13} - 10^{17}$ | (Ωm) |
| Plástico: Acrílicos | $> 10^{13}$ | (Ωm) |
| Plástico: PET | $10^{15} - 10^{17}$ | (Ωm) |
| Plástico: Poliestireno | $10^{15} - 10^{19}$ | (Ωm) |

Propiedades de semiconductores a 300 K

| Semiconductor | Ge | Si | GaAs |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Átomos/cm ³ | $4,42 \cdot 10^{22}$ | $5,0 \cdot 10^{22}$ | $4,42 \cdot 10^{22}$ |
| Cte. dieléctrica relativa | 16,0 | 11,9 | 13,1 |
| Ancho Banda Prohibida (eV) | 0,66 | 1,12 | 1,424 |
| n_i (cm ⁻³) | $2,4 \cdot 10^{13}$ | $1,45 \cdot 10^{10}$ | $1,79 \cdot 10^6$ |
| μ_N [cm ² /(V·s)] | 3.900 | 1.500 | 8.500 |
| μ_P [cm ² /(V·s)] | 1.900 | 450 | 400 |

Ancho de la banda prohibida en electron-voltios, para distintos semiconductores [Gap es directo (D) o indirecto (I)].

En la tabla de abajo se da el valor de la constante dieléctrica relativa (ϵ_r) de algunos materiales. Para tener la constante dieléctrica, se debe multiplicar por la permitividad del vacío (ϵ_0).

| Permitividad relativa ϵ_r | |
|------------------------------------|---------|
| Aire | 1,00060 |
| Aceite | 2-2,2 |
| Papel parafinado | 2,1-2,3 |
| SiO ₂ | 3,9 |
| Mica | 5,6-6,6 |
| Si ₃ N ₄ | 7,5 |
| Porcelana | 6-10 |
| Vidrio | 6-10 |
| Alcohol | 25 |
| Agua | 80-83 |

Existe una correspondencia entre la longitud de onda λ de la luz y la energía del fotón ($E=hc/\lambda$).

Como en los diodos LED, la energía del fotón de luz emitido (casi) corresponde al ancho de la banda prohibida (E_G) o gap, se puede prever el color de la luz emitida por un determinado semiconductor. La tabla de la derecha muestra la relación entre el color de la luz, su longitud de onda y energía del fotón.

λ = Longitud de onda

E = Energía del fotón

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$hc = 1.239,84191 \text{ eV nm}$$

Ancho de la banda prohibida (E_G) y tipo de gap (Directo o Indirecto) a 300 K

| Semiconductor | E_G (eV) | Gap |
|---------------|------------|-----|
| C | 5,47 | I |
| Ge | 0,66 | I |
| Si | 1,12 | I |
| α SiC | 2,996 | I |
| GaAs | 1,42 | D |
| AlAs | 2,13 | I |
| GaP | 2,26 | I |
| InAs | 0,36 | D |
| InP | 1,35 | D |
| CdS | 2,42 | D |
| ZnS | 3,68 | D |

| | Rayos X | λ (nm) | E (eV) |
|--------------|------------|----------------|----------|
| ULTRAVIOLETA | | 10 | 123,98 |
| | UV extremo | | |
| | UV lejano | 200 | 6,20 |
| | UV cercano | 300 | 4,13 |
| VISIBLE | Violeta | 390 | 3,18 |
| | Azul | 455 | 2,72 |
| | Verde | 492 | 2,52 |
| | Amarillo | 577 | 2,15 |
| | Naranja | 597 | 2,08 |
| | Rojo | 622 | 1,99 |
| INFRARROJO | | 770 | 1,61 |
| | IR cercano | | |
| | IR medio | 1500 | 0,83 |
| | IR lejano | 6000 | 0,21 |
| | IR extremo | 40000 | 0,031 |
| | Microondas | 1000000 | 0,0012 |

Algunas constantes físicas:

| | |
|---|--|
| Permitividad del vacío: | $\epsilon_0 = 8,854 \ 187 \ 817... \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ |
| Equivalencia entre 0° Celsius y temperatura absoluta: | $0^\circ\text{C} \equiv 273,15 \text{ K}$ |
| Magnitud de la carga del electrón: | $q = 1,602 \ 176 \ 53 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ |
| Equivalencia entre electronvoltio y Julio: | $1 \text{ eV} = 1,602 \ 176 \ 53 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ |
| Constante de Boltzmann: | $k = 8,617 \ 343 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ $kT/q = 25,852 \ 028 \ (T/300\text{K}) \text{ mV}$ |
| Constante de Planck: | $h = 4,135 \ 667 \ 43 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$ |
| Velocidad de la luz en el vacío: | $c = 299 \ 792 \ 458 \text{ m/s}$ $hc = 1239,841 \ 91 \text{ nm eV}$ |

Corrientes en los semiconductores.

Los semiconductores usados en electrónica tienen enlaces atómicos de tipo covalente. Por tanto a temperatura de 0 K, todos los electrones están fijos, y no se dispone de portadores que conduzcan la corriente eléctrica. Conforme se aumenta la temperatura, la energía media de la red cristalina crece, y en particular, la energía media de los electrones. Algunos electrones tendrán más energía que la media, y son éstos los primeros en abandonar los enlaces covalentes. Cuando un electrón abandona un enlace covalente, aparece un electrón "libre" (en realidad aún está sometido a la red cristalina) que es capaz de conducir la corriente eléctrica. El enlace covalente sin electrón queda asociado a una carga positiva, debida a que el átomo propietario del electrón ha perdido una carga negativa. Ese enlace covalente roto, y con carga positiva, lo llamamos "huevo", y puede intervenir en la conducción, pues puede ser utilizado por electrones de los enlaces covalentes próximos para moverse.

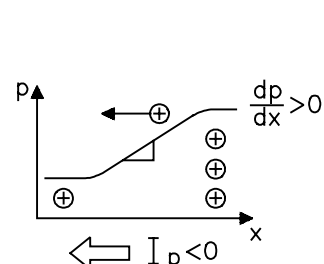
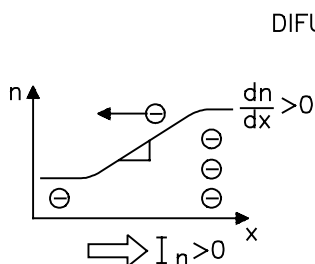
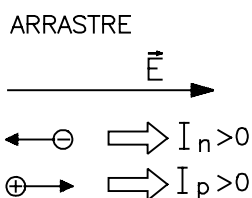
En los semiconductores, la corriente puede ser transportada tanto por electrones, como por huecos. El transporte puede ser debido a la fuerza ejercida por un campo eléctrico ("arrastre"), o bien, por difusión (el movimiento aleatorio de los portadores siempre hace que haya un flujo desde donde hay mayor concentración a donde hay menos).

Semiconductores: (4 tipos de corrientes):
Arrastre y Difusión para Electrones y Huecos.

Corrientes en los Semiconductores *

* Únicamente en la dirección x

| | ARRASTRE | DIFUSION |
|------------|-------------------------|---------------------------------------|
| ELECTRONES | $I_n = A (q n \mu_n) E$ | $+ qA D_n \left(\frac{dn}{dx}\right)$ |
| HUECOS | $I_p = A (q p \mu_p) E$ | $- qA D_p \left(\frac{dp}{dx}\right)$ |



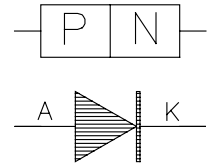
| |
|---|
| <p>Conductividad</p> $\sigma_n = q n \mu_n$ $\sigma_p = q p \mu_p$ $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$ |
| <p>Resistividad</p> $\rho = \frac{1}{\sigma}$ |

n = Concentración de electrones
 p = Concentración de huecos
 q = Valor absoluto de la carga del electrón
 A = Area
 σ = Conductividad
 ρ = Resistividad
 μ = Movilidad
 D = Cte. de Difusión
 E = Campo Eléctrico
 T = Temperatura (K)
 k = Cte. de Boltzmann

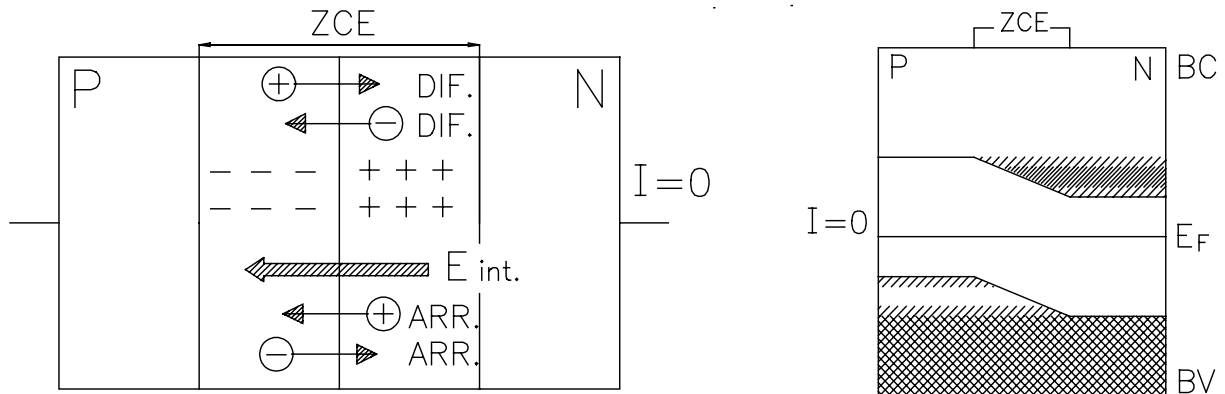
| |
|---|
| <p>Relación de Einstein</p> $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = \frac{D_p}{\mu_p}$ $kT/q = 25,852 \left(\frac{T}{300K}\right) \text{ mV}$ |
|---|

Unión PN

- ① Unión PN sin polarización aplicada.
- ② Unión PN con polarización directa (o positiva).
- ③ Unión PN con polarización inversa (o negativa).

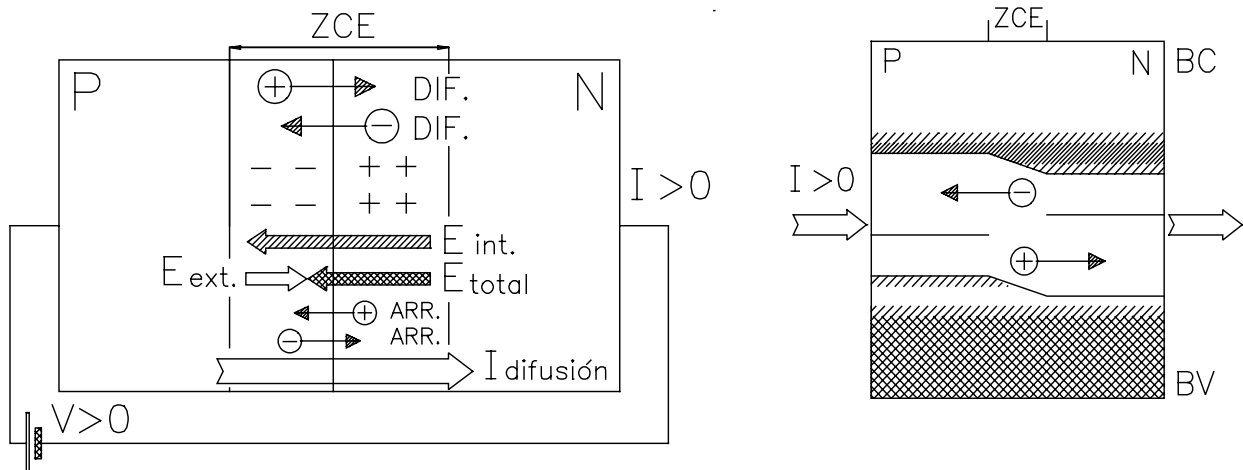


① Unión PN sin polarización aplicada.



Existe un flujo continuo de huecos desde el lado P (mayor concentración de huecos) hacia el lado N, por difusión (Dif.). Similarmente existe un flujo de electrones desde el lado N al P. Ese flujo queda balanceado por electrones y huecos que son arrastrados (Arr.) por el campo eléctrico (E_{int}) de la zona de carga espacial (ZCE), en sentido contrario.

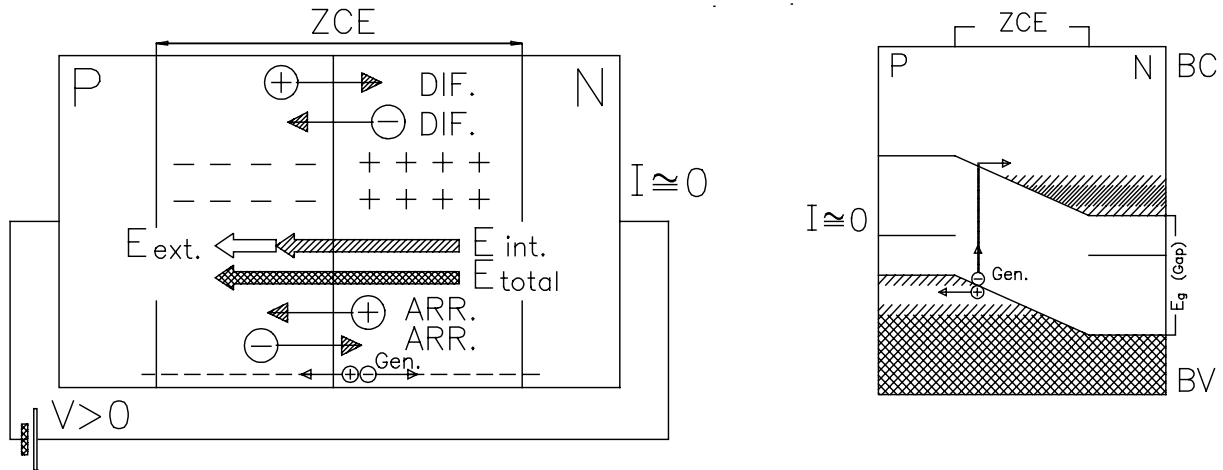
② Unión PN con polarización directa (o positiva).



Sometemos a la unión PN a una polarización directa, es decir, positivo de la batería conectado al lado P de la unión, y el negativo al lado N. El efecto producido, es el de crear un campo eléctrico en la zona de carga espacial (E_{ext}), que se opone al campo interno E_{int} . El resultado es un campo eléctrico total E_{total} en la zona de carga espacial (ZCE), que es menor que el campo que había sin polarización (E_{int}). Se reducen las corrientes de arrastre (de huecos y electrones) que compensaban las corrientes de difusión (de huecos y electrones). Por tanto, aparece un flujo neto de huecos desde el lado P hacia el N, y de electrones desde el lado N hacia el P. Estos dos flujos dan lugar a una corriente de difusión ($I_{difusión}$) que fluye desde el lado P al N.

Al reducir el campo eléctrico de la zona de carga espacial, ésta se estrecha.

③ Unión PN con polarización inversa (o negativa).



Ahora tenemos la unión PN con polarización inversa, es decir, positivo de la batería conectado al lado N de la unión, y el negativo al lado P. Se crea un campo eléctrico adicional en la zona de carga espacial (E_{ext}), cuyo valor depende del valor de la diferencia de potencial de la fuente de tensión. El campo E_{ext} tiene el mismo sentido que el campo interno E_{int} . Por tanto, el campo eléctrico total E_{total} en la zona de carga espacial es mayor que el campo que había sin polarización (E_{int}) (el ancho de la zona de carga espacial aumenta). Esto conllevaría unas corrientes de arrastre (de huecos y electrones) mayores que las de difusión, y podría pensarse que aparecería un flujo neto de huecos desde el lado N hacia el P, y de electrones desde el lado P hacia el N. Realmente sucede así, pero la corriente de arrastre crece poquísimo, casi nada, puesto que el campo eléctrico total (E_{total}) sólo puede llevarse huecos desde el lado N hacia el P, que provienen de la difusión desde el lado P, o los que son del propio semiconductor N (prácticamente inexistentes). El resultado es una corriente prácticamente igual a cero.

Si en polarización inversa se logran crear pares electrón-hueco en la zona de carga espacial (ZCE) los portadores serían arrastrados según el campo eléctrico (E_{total}), con lo cual aparecería una corriente dependiente del número de pares electrón-hueco generados (Gen.). Por tanto, la corriente pequeñísima que circula desde el lado N al P, podría aumentar paralelamente a la ruptura de enlaces covalentes. La generación de pares electrón-hueco, o ruptura de enlaces covalentes puede hacerse:

Térmicamente, puesto que a mayor temperatura, mayor cantidad de electrones tienen la energía suficiente como para abandonar los enlaces covalentes. Esto acarrea que la corriente en inversa de las uniones PN crezca al aumentar la temperatura. Por ejemplo, en diodos de silicio y germanio, la corriente inversa se duplica por cada 10°C de aumento de temperatura.

Con radiación electromagnética o en particular con luz, siempre que la energía del fotón incidente sea superior al ancho de la banda prohibida E_g (gap) (supuesto que el semiconductor sea de gap directo, en otro caso, se necesita más energía para crear un fonón, por conservación de momento). Los diodos de silicio en polarización inversa pueden ser usados para detectar radiación electromagnética, que puede ser luz visible, luz ultravioleta, rayos X y radiación gamma.

Con partículas ionizantes. Basta someter el diodo a un bombardeo de partículas (p.ej. protones, núcleos de helio, etc.) de alta energía. Por ejemplo, en diodos de silicio, cada partícula ionizante puede romper unos 22.000 enlaces covalentes (diodo con espesor de 300 μm).

En las figuras de la derecha, las rayas en BC representan electrones y en la BV la ausencia de rayos huecos, pero no lo contrario.

Ecuación I-V del diodo.

En resumen, una unión PN polarizada en directo conduce una corriente apreciable, pero bajo polarización inversa no conduce, o más precisamente, conduce una corriente inversa de saturación (I_s) muy pequeña (imposible medir con un polímetro normal). Por ejemplo, I_s en diodos de silicio es de algunos nanoamperios.

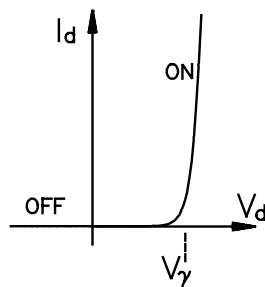
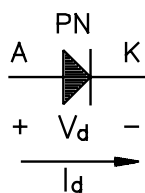
La deducción de la relación teórica entre corriente en el diodo ($I=I_d$) y la diferencia de potencial aplicada en sentido directo ($V=V_d$) fue hecha por Shockley. El factor η fue añadido posteriormente.

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1 \right)$$

Donde q es el valor absoluto de la carga del electrón, k la constante de Boltzmann, y T la temperatura absoluta. El factor de idealidad η aparece debido a corrientes de generación-recombinación en la zona de carga espacial. Aunque η depende del punto de operación, se suele tomar como un promedio. En diodos de silicio y LED, η suele estar próximo a 2. En diodos de Germanio η es igual a 1. A corrientes muy altas, la ecuación de Shockley tampoco describe el comportamiento de un diodo, pues la resistencia de las zonas neutras (de los lados P y N) limita la corriente que circula por el diodo.

La curva I-V de un diodo tiene dos regiones claras de funcionamiento: conducción con polarización directa (ON) y sin conducir corriente (OFF).

DIODO



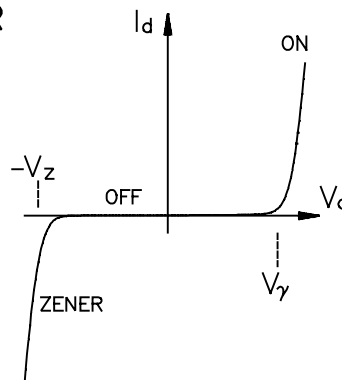
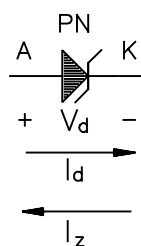
$$I_d = I_s \left(e^{\frac{qV_d}{kT\eta}} - 1 \right)$$

$$\left[\begin{aligned} r_d &= \frac{dV_d}{dI_d} = \eta \frac{kT}{q} \frac{1}{I_d} = \eta \frac{V_T}{I_d} \\ V_T &\equiv \frac{kT}{q} = 25,852 \left(\frac{T}{300K} \right) \text{ mV} \end{aligned} \right]$$

Hemos visto que un diodo bajo cualquier polarización inversa conduce una corriente pequeñísima, que puede crecer en función de la ruptura de enlaces covalentes. Además, si la polarización inversa es suficientemente alta, puede comenzar bruscamente a conducir corrientes mucho mayores. Esta corriente en inverso puede deberse a ruptura por avalancha, o por efecto Zener. A los diodos construidos para conducir de forma segura con polarización inversa se les llama diodos Zener (aunque la ruptura sea por avalancha). Estos procesos de ruptura se describen en la siguiente página.

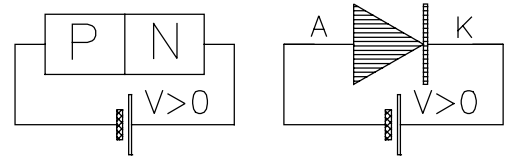
La curva I-V de un diodo zener es similar a la de la figura. Se ven claramente tres regiones de funcionamiento: conducción con polarización directa (ON), sin conducción o en corte (OFF), y conducción con polarización inversa (Zener).

DIODO ZENER



Ruptura en Inversa

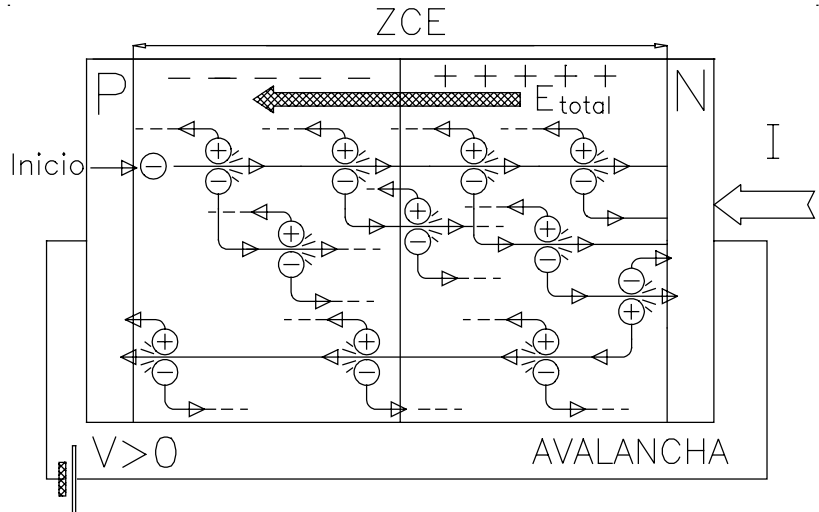
- ④ Ruptura por avalancha
- ⑤ Ruptura por efecto Zener



En silicio, se encuentra que la ruptura Zener ocurre para tensiones inversas menores de 5V. Para tensiones inversas mayores de 6V suele producirse la ruptura por avalancha.

④ Ruptura por avalancha

Un electrón viajando en la zona de carga espacial de una unión PN polarizada en inversa, gana energía (por el campo eléctrico). El electrón termina por chocar con la red, y en la colisión se liberan un hueco, y un electrón adicional. Estos tres portadores vuelven a ganar energía, a acelerarse por la fuerza ejercida por el campo eléctrico total. Si el ancho de la zona de carga espacial es lo suficientemente grande, se darán nuevas colisiones, que aumentan

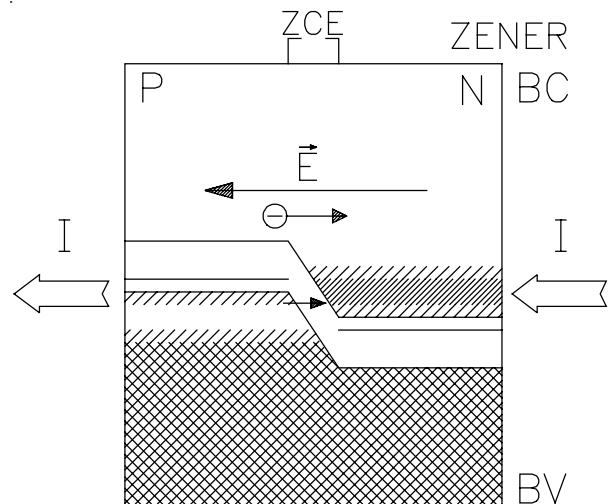


el número de portadores, y por tanto el valor total de la corriente. Los procesos de ruptura de enlaces se dan en la zona central de la zona de carga espacial, donde el campo eléctrico es más alto.

Un aumento de temperatura dificulta la ruptura por avalancha, ya que el aumento de energía media de los electrones provoca colisiones más frecuentes, y por tanto impide que éstos ganen suficiente energía como para romper los enlaces covalentes.

⑤ Ruptura por efecto Zener

El campo eléctrico en la unión es tan alto, que ejerce sobre el electrón una fuerza suficiente como para liberarlo del enlace covalente en que interviene. Se crea un hueco y un electrón, que contribuyen a la corriente. Visto en el diagrama de bandas (figura) un electrón realiza una transición desde la banda de valencia hacia la banda de conducción, atravesando mediante efecto túnel la banda prohibida. Para que se produzca efecto túnel, el ancho de la barrera debe ser del orden de nanómetros, y ello se consigue al incrementar la concentración de impurezas. Además, al reducirse el ancho de la barrera, se hace más difícil la ruptura por avalancha.



Al aumentar la temperatura aumenta el efecto túnel, ya que aumenta la energía térmica media, y por tanto mayor número de electrones chocan contra la barrera.

MODELOS LINEALES DE LOS DIODOS

Debido al término exponencial, el diodo tiene dos tramos muy diferenciados: Con polarizaciones positivas, especialmente por encima de la tensión umbral V_γ , el crecimiento de la corriente es muy rápido (ON). Con polarizaciones negativas, el término exponencial es mucho menor que 1, y por tanto la corriente que circula por el diodo es muy pequeña, e imposible de medir con un polímetro de laboratorio. Se dice que el diodo está en corte (OFF) y no conduce.

Como la ecuación I-V del diodo contiene un término exponencial, resulta complicado su manejo en problemas, por eso se verán algunos modelos lineales que describan de forma simple la curva I-V del diodo. Con diodos Zener se tiene una rama adicional de conducción en inversa, lo que hace que su modelo lineal tenga tres tramos lineales.

MODELOS LINEALES

