



- 11.1 Introducción
- 11.2 La unión p-n en equilibrio
- 11.3 Polarización del diodo
- 11.4 Curva característica del diodo
- 11.5 Aplicaciones del diodo
- 11.6 El transistor de unión
- 11.7 Cuestiones y problemas

Objetivos

- Comprender cualitativamente los fundamentos físicos de la unión *p-n* en equilibrio y polarizada.
- Conocer la curva característica *I-V* de los diodos.
- Saber utilizar las distintas aproximaciones del diodo para resolver circuitos con diodos.
- Entender cualitativamente el funcionamiento del transistor de unión.
- Conocer algunas aplicaciones de diodos y transistores.

11.1 Introducción

La unión entre un semiconductor *p* y otro *n* es el elemento básico del que depende el funcionamiento de casi la totalidad de los dispositivos basados en semiconductores. A partir de las propiedades de los semiconductores, y los procesos de difusión y desplazamiento de portadores de carga, desarrollaremos de forma cualitativa el comportamiento de la unión *pn*, tanto en equilibrio como polarizada. La unión *pn* es en sí misma un dispositivo denominado diodo, del que estudiaremos su comportamiento, y su utilización en algunas aplicaciones.

Por otro lado, estudiaremos también en este capítulo el transistor, que es uno de los principales dispositivos de semiconductores empleados en amplificación y en conmutación. Describiremos también de forma cualitativa los mo-

vimientos de cargas en el interior del transistor de unión y veremos algunas de sus aplicaciones.

11.2 La unión $p-n$ en equilibrio

Los semiconductores extrínsecos de tipo p y de tipo n tienen poca utilidad por sí mismos, sin embargo, debido a las propiedades físicas de los mismos, estudiados en las lecciones anteriores, la unión de un semiconductor de tipo p con otro de tipo n presenta la importante característica de facilitar el paso de la corriente eléctrica en un sentido y no en el contrario lo que la hace muy útil en numerosas aplicaciones de las que veremos algunos ejemplos en este capítulo. La unión $p-n$ es el elemento básico y fundamental de toda la electrónica de semiconductores, y decimos que está en equilibrio cuando no está conectada a un circuito o no está polarizada, lo cual vamos a analizar en esta sección. En la siguiente sección estudiaremos la unión $p-n$ polarizada.

Vamos a estudiar, en primer lugar, de forma cualitativa los fundamentos físicos que caracterizan la unión $p-n$: la distribución de los portadores de carga, la densidad volumétrica de carga ρ , el campo eléctrico \vec{E} , y la diferencia de potencial de contacto V_0 que están presentes en la denominada zona de transición de la unión $p-n$.

A la temperatura de 0 K los portadores de carga, electrones libres en la zona n y huecos en la zona p , están ligados a sus respectivos átomos, pero a temperatura ambiente los dos tipos de portadores están libres para la conducción eléctrica, y como se muestra en la Figura 11-1, debido a los importantes gradientes de concentración de huecos y electrones libres en la zona de la unión, huecos de la zona p pasan por difusión hacia la zona n y electrones de la zona n pasan a la zona p .

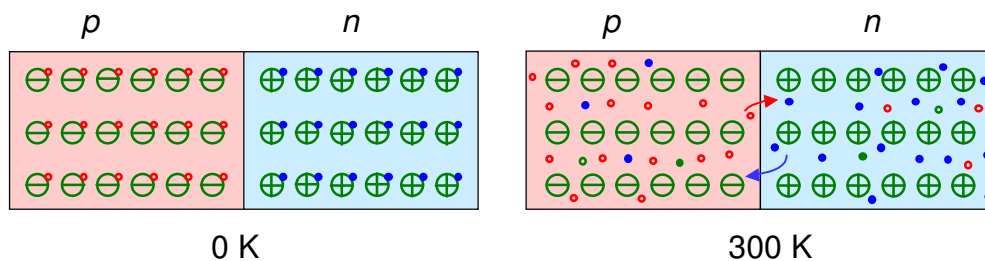


Figura 11-1. Esquema de la unión $p-n$ sin polarizar a 0 K y a temperatura ambiente. Los círculos vacíos representan los huecos, los círculos rellenos los electrones libres o de conducción y los círculos con signo + ó - en su interior las impurezas donadoras ó aceptoras respectivamente

Al pasar electrones libres a la zona p donde hay muchos huecos éstos tienen una probabilidad muy alta de recombinarse, ocurriendo lo mismo con los huecos que pasen de la zona p a la zona n . Así, en la zona de la unión, muchos huecos y electrones se recombinan, quedando una estrecha zona, denominada **zona de transición** con una distribución neta de carga eléctrica ρ debida a la presencia de los iones de las impurezas y a la ausencia de huecos y electrones. Esta distribución de carga crea una diferencia de potencial denominada potencial de contacto y un campo eléctrico \vec{E} , como se muestra en la Figura 11-2, que produce corrientes de desplazamiento, que equilibran a las de difusión, al estar el circuito abierto. En la Figura 11-2 y sucesivas, los límites en la zona de transición se denotan por x_p y x_n .

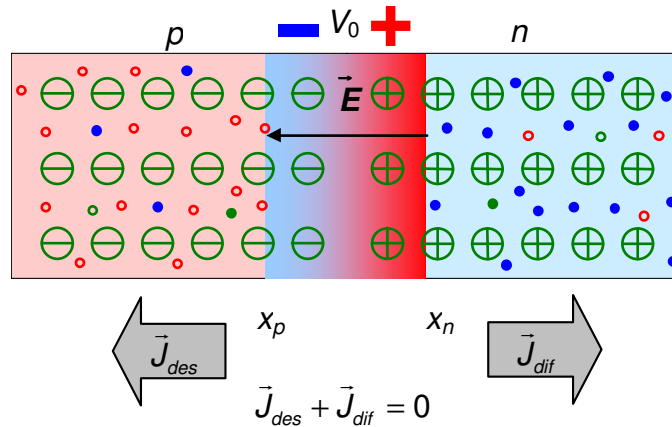


Figura 11-2. Unión p - n sin polarizar, mostrando la zona de transición, el campo eléctrico, el potencial de contacto y las corrientes de difusión y de desplazamiento

Concentración de los portadores de carga en la unión

La variación de la concentración de los portadores de carga, huecos y electrones libres, en la unión es como se muestra en la Figura 11-3 en el caso de que la concentración de impurezas aceptoras N_A de la zona p sea aproximadamente igual a la de impurezas donadoras N_D en la zona n . En los puntos alejados de la unión, las concentraciones de portadores de carga son las correspondientes al semiconductor n o p en equilibrio. En el caso de que la concentración de impurezas sea mucho mayor que la concentración intrínseca, estas concentraciones vienen dadas por:

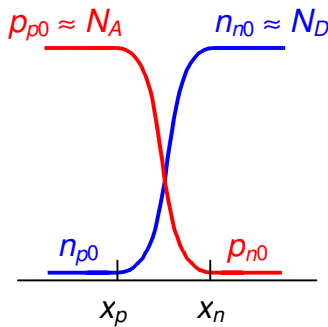


Figura 11-3. Variación de la concentración de los portadores en la unión p - n en equilibrio

$$p_{p0} \approx N_A, \quad n_{p0} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$n_{n0} \approx N_D, \quad p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

En la zona de transición, existen gradientes de concentración. Estos gradientes de concentración dan lugar a un movimiento de huecos desde la zona p a la zona n , y a un movimiento de electrones desde la zona n a la zona p . Todo ello da lugar a una densidad de corriente de difusión de la zona p a la n , y por tanto de una intensidad de corriente por difusión de la zona p a la n .

Distribución volumétrica de carga en la zona de transición

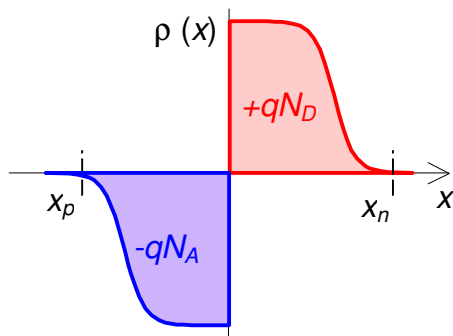


Figura 11-4. Distribución volumétrica de carga en la zona de transición

Los huecos que se difunden hacia la zona n se recombinan con los electrones allí existentes en exceso y viceversa, de forma que, en la zona de transición, la concentración de portadores de carga (p y n) es prácticamente nula, quedando dicha zona cargada con los iones de las impurezas; de donde resulta una densidad volumétrica de carga ρ que es negativa en el lado p de la unión y positiva en el lado n , tal como se muestra en la Figura 11-4.

Campo eléctrico en la zona de transición

La distribución dipolar de las cargas origina un campo eléctrico en la zona de transición, dirigido desde la zona n a la zona p , como se muestra en la Figura 11-2 y Figura 11-5.

Debido a la existencia del campo eléctrico aparece una corriente de desplazamiento en la dirección del campo eléctrico. Así, en la unión $p-n$ en equilibrio o en circuito abierto, el módulo de dicha corriente de desplazamiento es igual al módulo de la corriente de difusión, y como son de sentidos opuesto la corriente eléctrica total (desplazamiento + difusión) es nula.

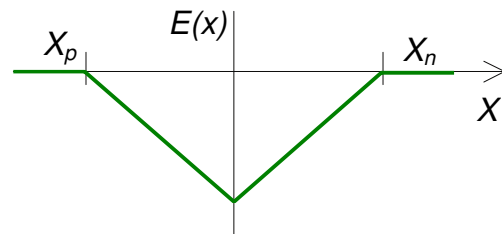


Figura 11-5. Campo eléctrico en la zona de transición

Diferencia de potencial de contacto

La existencia del campo eléctrico en la zona de transición implica la existencia también de una diferencia de potencial en la zona de la unión. Este potencial, denotado por V_0 en la figura se denomina "**potencial de contacto**", y representa la diferencia de potencial entre los extremos de la zona de transición en circuito abierto y en equilibrio. Este potencial, a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, es de unos $0,7\text{ V}$ para diodos de silicio, y de unos $0,3\text{ V}$ para diodos de germanio.

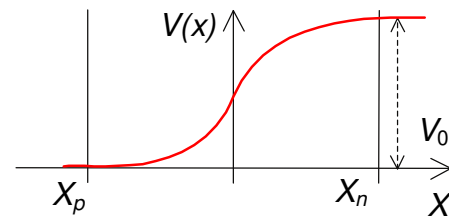


Figura 11-6. Diferencia de potencial de contacto

El potencial de contacto no genera tensión capaz de producir corriente, sino que constituye una barrera de potencial que se opone a la difusión de los portadores mayoritarios. Para entender esta idea con más claridad recordemos que las cargas positivas se mueven de las zonas de mayor a las de menor potencial, y las cargas negativa a la inversa. En la zona p los portadores mayoritarios son los huecos y como la zona n está a mayor potencial que la zona p , esta diferencia de potencial dificulta o impide el movimiento de los huecos de la zona p a la n . Lo mismo ocurre con el movimiento de los electrones de la zona n a la p .

Este potencial de contacto no se puede medir con un voltímetro conectado a los terminales del diodo, pues aparecen otros potenciales de contacto metal–semiconductor en las conexiones, de forma que la suma de las caídas de potencial es cero.

El valor del potencial de contacto, se puede obtener a partir de la ecuación 10-7 que proporciona la diferencia de potencial en un semiconductor con dopado no uniforme:

$$V_0 = V_{xn} - V_{xp} = V_T \ln \frac{\rho_{xp}}{\rho_{xn}}$$

Tal y como ya se ha comentado, en el caso de que la concentración de impurezas sea mucho más grande que la concentración intrínseca, la concentración de huecos en la zona p viene dada por:

$$\rho_{xp} \approx N_A$$

y en la zona n :

$$\rho_{xn} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

Con lo cual,

$$V_0 = V_{xn} - V_{xp} = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad V_T = 0,026 \text{ V a } 300 \text{ K} \quad \text{Ecuación 11-1}$$

Como se ve en esta expresión, la diferencia de potencial de contacto depende de las concentraciones de impurezas en las zonas p y n y de la concentración intrínseca. A su vez, puesto que la concentración intrínseca está relacionada con la anchura de la banda prohibida y la temperatura (ver Ecuación 10–3), la diferencia de potencial de contacto depende también de estas dos variables. Puesto que N_A y N_D son más grandes que n_i la diferencia de potencial de contacto es positiva, de modo que la zona n está a más potencial que la zona p .

Ejemplo 11-1

Calcula la diferencia de potencial en la unión pn de un diodo de germanio, dopado con antimonio en una concentración de $4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ en su zona n , y con indio en una concentración de $3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ en su zona p , a 300 K.

Solución

$$V_0 = V_{xn} - V_{xp} = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0,026 \cdot \ln \frac{3 \cdot 10^{22} \cdot 4 \cdot 10^{22}}{2,36 \cdot 10^{19}} = 0,379 \text{ V}$$

11.3 Polarización del diodo

Polarización directa

Vamos a realizar un estudio cualitativo del comportamiento de la unión $p-n$ al aplicarle una diferencia de potencial externa.

Si conectamos la fuente de tensión continua como se indica en la Figura 11-7, es decir, el borne positivo a la zona p y el negativo a la zona n , dicha conexión recibe el nombre de "polarización directa".

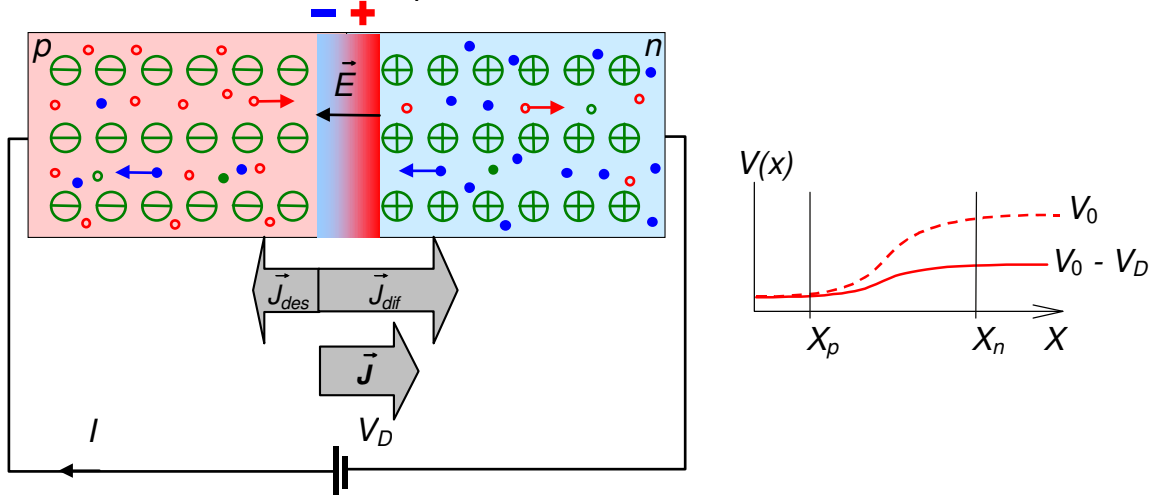


Figura 11-7. Polarización directa de la unión $p-n$

La polarización de la tensión aplicada es opuesta a la correspondiente al potencial de contacto, lo que provoca una disminución del campo eléctrico en la unión y una reducción en la altura de la barrera de potencial:

$$V' = V_0 - V_D$$

En esta expresión V' representa la caída de potencial en la zona de la unión, V_0 el potencial de contacto, y V_D es la tensión aplicada mediante la fuente de alimentación.

Como resultado se facilita la difusión de mayoritarios, los electrones libres se mueven con más facilidad del lado n hacia el lado p de la unión, mientras que los huecos se mueven del lado p al n . Esto constituye una inyección de portadores minoritarios en cada zona. Si aumentamos V_D hasta que iguale a V_0 , entonces $V' = 0$, y no hay ninguna barrera de potencial, ni campo eléctrico que se oponga a la difusión y si se sigue aumentando V_D entonces la barrera de potencial y el campo eléctrico son favorables a la difusión de mayoritarios y la corriente aumenta exponencialmente como se muestra en la Figura 11-9. Esta corriente se denomina "**corriente directa**". Dado que al pasar la corriente por el diodo, éste disipa calor, en la práctica V_D no puede ser mucho mayor que V_0 ya que éste podría fundirse.

Polarización inversa

Supongamos que se conecta una fuente de tensión continua con el polo negativo a la zona p y el polo positivo a la zona n , como se muestra en la Figura 11-8. Este tipo de conexión se llama "polarización inversa" y es tal que presenta la misma polaridad que la capa dipolar de la unión, produciendo, por tan-

to, un desplazamiento de huecos de la zona n , donde son minoritarios, hacia la zona p y de electrones de la zona p hacia la zona n , ensanchándose, en consecuencia, la zona de transición y aumentando el campo eléctrico y la barrera de potencial:

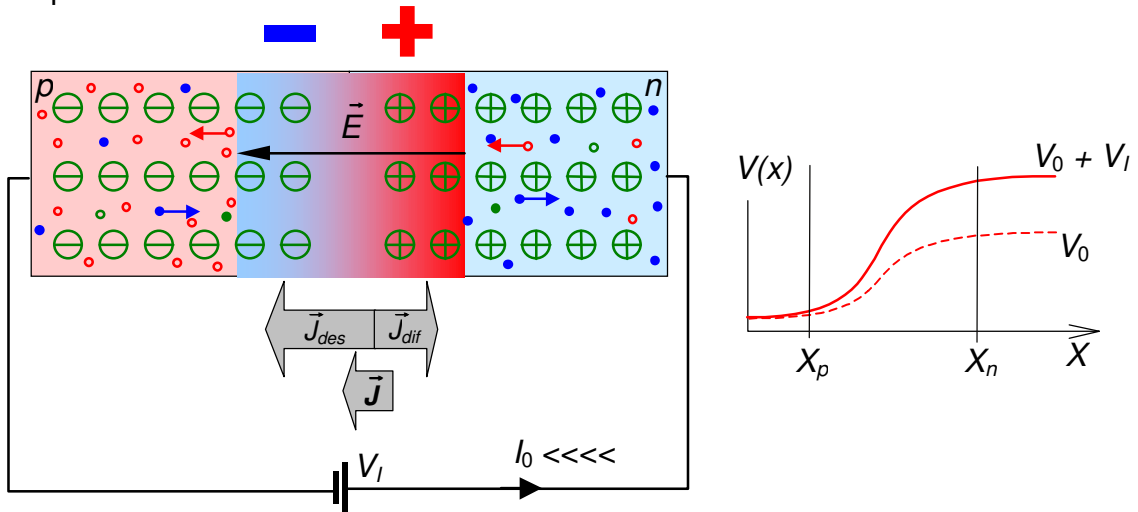


Figura 11-8. Polarización inversa de la unión $p-n$

$$V' = V_0 + V_I$$

En esta expresión V' representa la caída de potencial en la zona de la unión, V_0 el potencial de contacto, y V_I es la tensión aplicada mediante la fuente de alimentación.

El resultado de aplicar V_I es que fluye una pequeña corriente I_0 , debida únicamente a los pares electrón–hueco que se generan en el cristal como resultado de los enlaces que se rompen por efecto térmico; dicha corriente se llama “**corriente inversa de saturación**”, I_0 .

11.4 Curva característica del diodo

Si representamos gráficamente la intensidad en un diodo como función de la diferencia de potencial en sus bornes, obtenemos una gráfica como la que se muestra en la Figura 11-9, denominada “curva característica del diodo”.

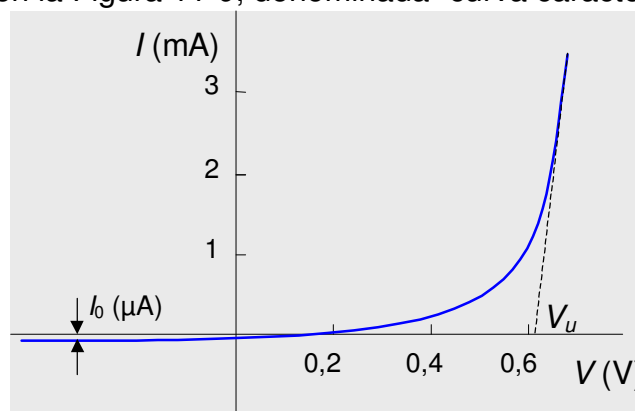
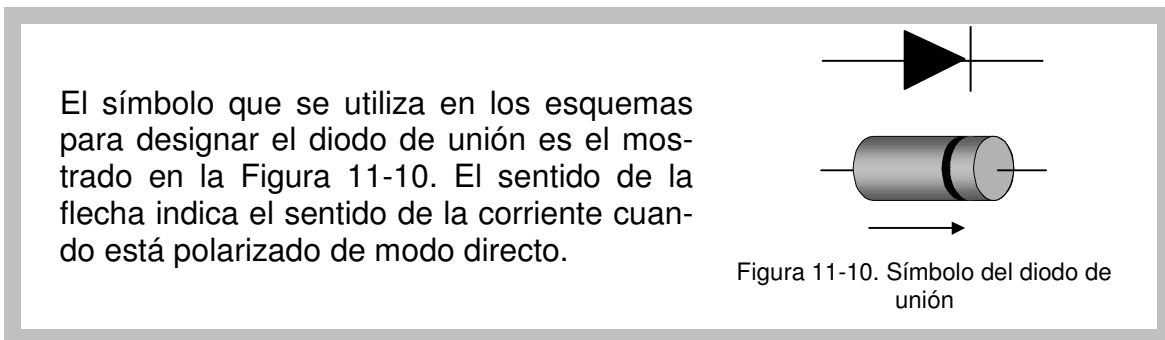


Figura 11-9. Curva característica de un diodo de unión

En esta curva vemos:

- Para tensiones negativas (polarización inversa) la corriente en el diodo es muy pequeña, del orden de microamperios. Dada la escala de la gráfica utilizada no se aprecia dicha corriente, pero hay que recordar que no es nula.
- Para tensiones positivas (polarización directa), aparece una corriente en el diodo. La intensidad crece de forma exponencial.

Esta gráfica pone de manifiesto que el diodo para tensiones pequeñas prácticamente no conduce, y es necesario alcanzar un cierto valor V_u que se denomina tensión umbral o tensión de codo para que la corriente en el diodo sea grande. Este valor depende del material, y es del orden de 0,3 V para diodos de germanio, y de 0,7 V para diodos de silicio, coincidiendo con el potencial de contacto comentado anteriormente.



Por otra parte, a la hora de realizar cálculos en circuitos, el trabajar con esta curva resultaría muy complejo, de modo que se utilizan diversas aproximaciones de la misma, según las necesidades del problema. A continuación se describen dichas aproximaciones para el diodo.

Primera aproximación o diodo ideal

Como primera aproximación se considera el diodo simplemente como un interruptor: en polarización directa el diodo conduce sin resistencia, y en inversa no conduce. Esta aproximación se muestra en el gráfico mediante la línea de trazo grueso.

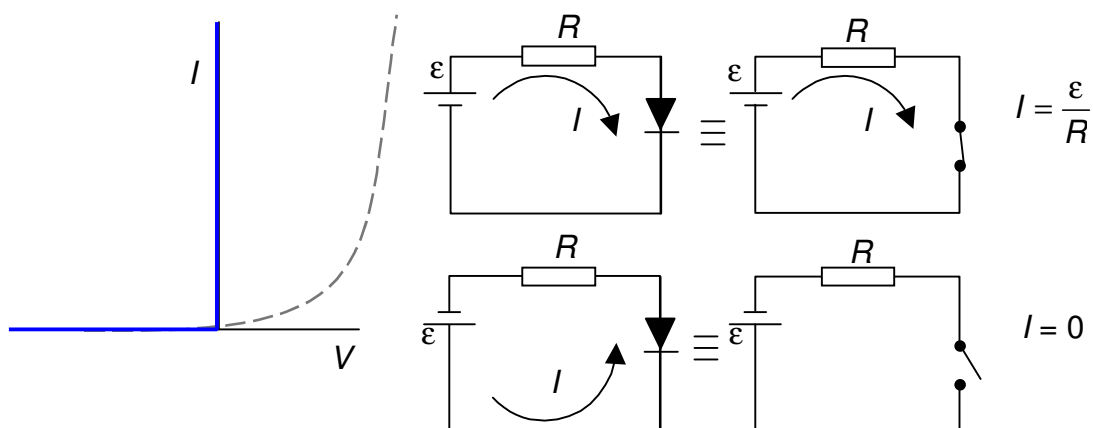


Figura 11-11. Modelización como primera aproximación del diodo

Segunda aproximación

Como segunda aproximación se incluye también la tensión umbral del diodo, denotada por V_u , y que coincide con el potencial de contacto V_0 comentado con anterioridad. En esta aproximación se considera que el diodo conduce sin resistencia por encima de la tensión umbral, y no conduce por debajo de la misma. Esto equivale entonces a considerar un diodo como un interruptor o un diodo ideal en serie con un receptor. Por debajo de la tensión umbral, el interruptor está abierto y no hay corriente, y por encima de la tensión umbral el interruptor está cerrado, y hay una caída de tensión en el diodo igual a la tensión umbral del mismo. Esta aproximación se muestra en el gráfico mediante la línea de trazo grueso.

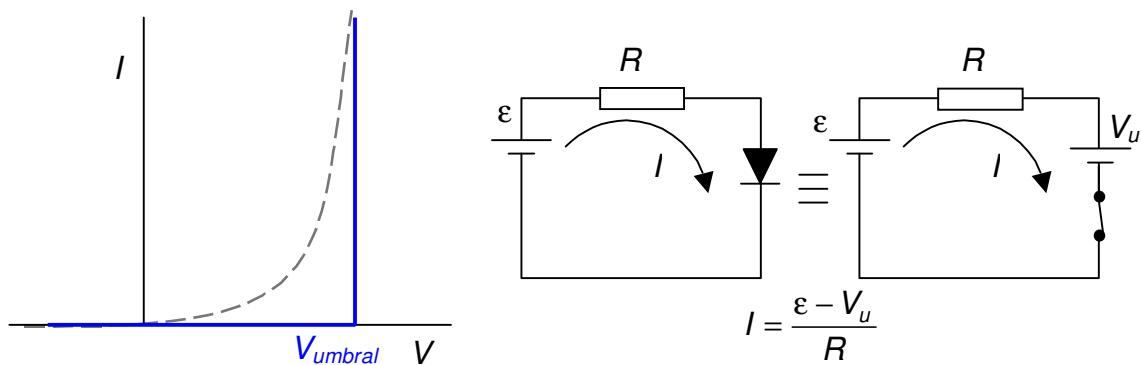


Figura 11-12. Modelización como segunda aproximación del diodo

Tercera aproximación, o aproximación lineal

Por último, en la modelización del diodo se considera también su resistencia interna. En este caso, se modeliza el diodo como un interruptor en serie con el receptor de fuerza contraelectromotriz igual a la tensión umbral del diodo y con una resistencia denominada resistencia interna del diodo. En polarización inversa el interruptor está abierto y no hay corriente, y en directa el interruptor está cerrado, y la caída de tensión en el diodo es igual a:

$$V = V_u + I r_d$$

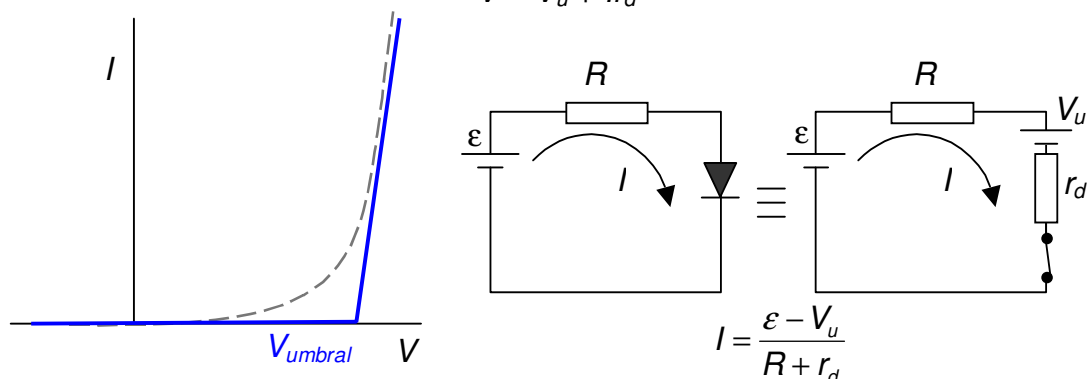
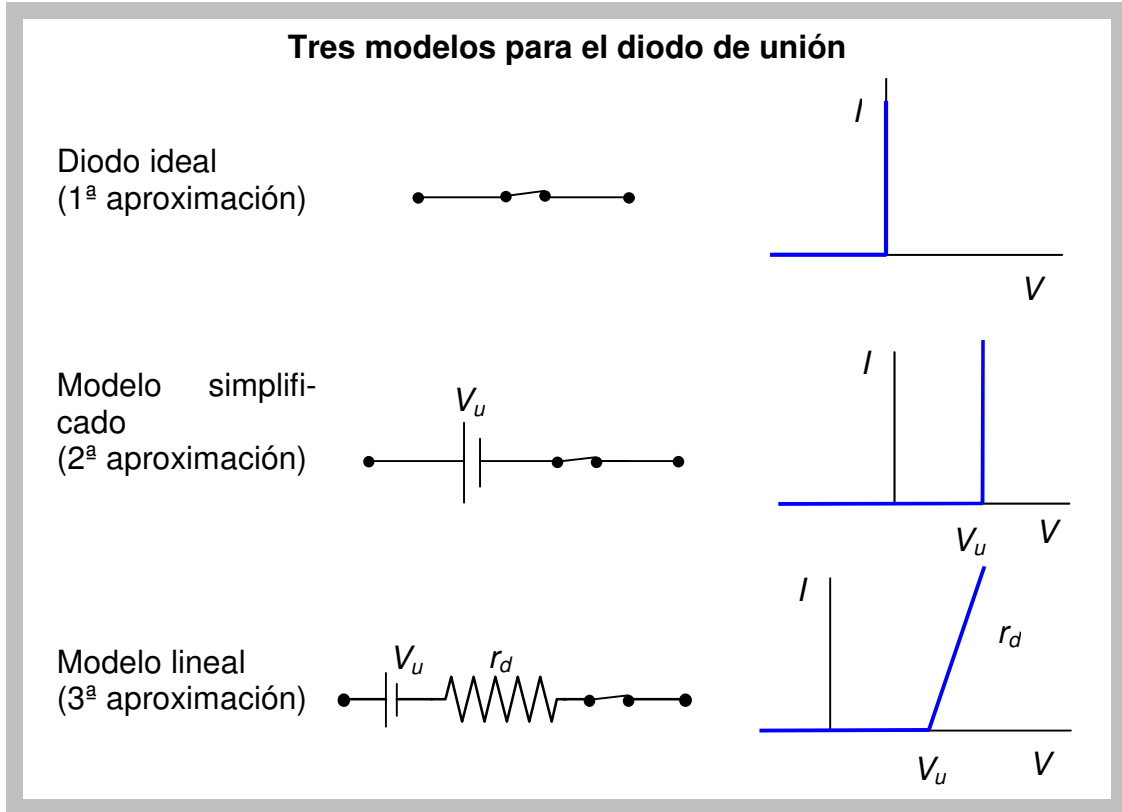


Figura 11-13. Modelización como tercera aproximación del diodo

En esta expresión, r_d representa la resistencia interna del diodo, que es igual a la inversa de la pendiente de la gráfica. De nuevo, esta aproximación se muestra en el gráfico mediante la línea de trazo grueso.

Por último, y como resumen, se muestra un cuadro comparativo de las tres aproximaciones.

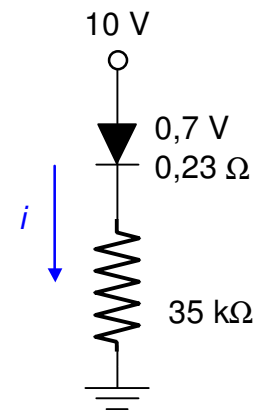


Ejemplo 11-2

Calcula la intensidad que circula por el diodo de la figura, utilizando las tres aproximaciones del diodo.

Solución

Podemos calcular la intensidad "cerrando el circuito", es decir colocando un generador ficticio de 10 V:

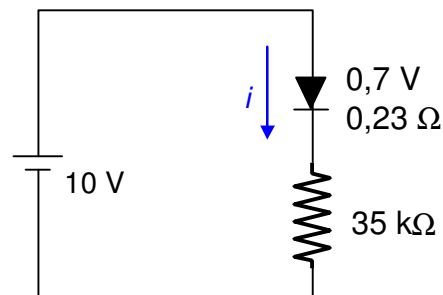


Utilizando la aproximación de diodo ideal,

$$i = \frac{10}{35 \cdot 10^3} = 0,286 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,286 \text{ mA}$$

Considerando la tensión umbral del diodo,

$$i = \frac{10 - 0,7}{35 \cdot 10^3} = 0,265 \text{ mA}$$



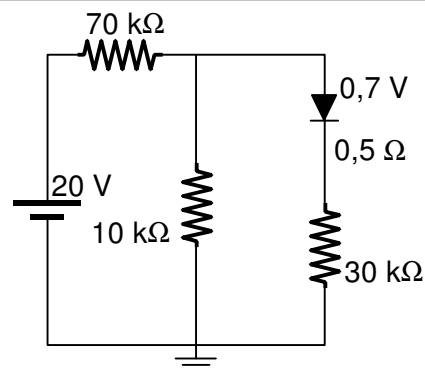
Y teniendo en cuenta también su resistencia interna,

$$i = \frac{10 - 0,7}{35 \cdot 10^3 + 0,23} = 0,2657 \text{ mA}$$

Observa que entre las dos primeras aproximaciones del diodo sí que hay una diferencia significativa. En el último caso, puesto que la resistencia interna del diodo es muy pequeña comparada con la resistencia del circuito, la contribución de la resistencia interna es despreciable.

Ejemplo 11-3

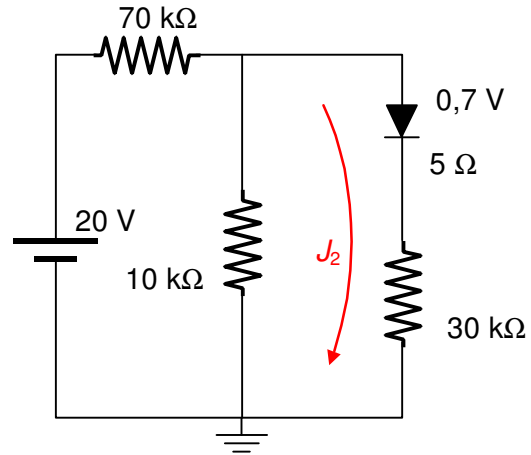
Calcula la intensidad que circula por el diodo de la figura.



Solución

Para calcular la intensidad que circula por el diodo, utilizamos el método matricial de las corrientes de malla, considerando el diodo como un receptor con fuerza contraelectromotriz y resistencia interna, y calculamos J_2 :

$$J_2 = \frac{\begin{vmatrix} 80 & 20 \\ -10 & -0,7 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 80 & -10 \\ -10 & 40,005 \end{vmatrix}} = 46,4 \mu\text{A}$$



Comprueba como ejercicio que se puede despreciar la resistencia interna del diodo.

Influencia de la temperatura

Al aumentar la temperatura, aumenta la concentración intrínseca. Este aumento de portadores mayoritarios y minoritarios, tiene una repercusión directa sobre la corriente inversa de saturación, I_0 , ya que su valor está determinado por la concentración de portadores minoritarios. Recordemos que esta débil corriente se producía como consecuencia de los portadores minoritarios; al aumentar éstos, y ser su aumento más significativo por ser minoría, aumentará I_0 . En la Figura 11-14 se muestra tres curvas características del mismo diodo obtenidas a tres temperaturas distintas donde se aprecia este hecho, así como una pendiente mayor de la curva conforme aumenta la temperatura, como consecuencia de una mayor concentración de portadores.

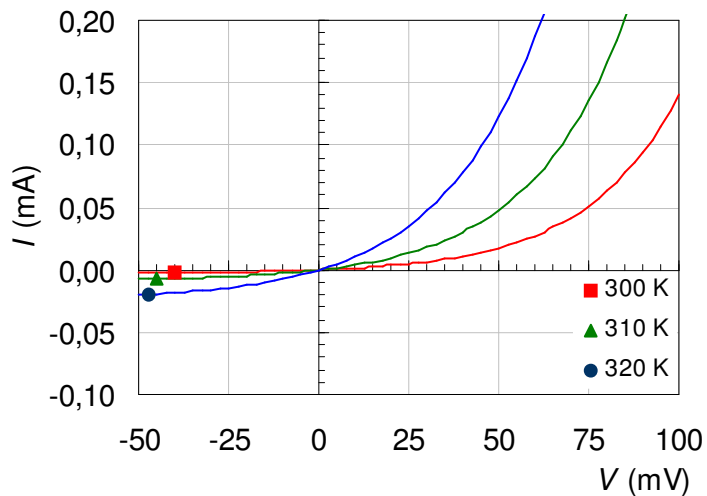


Figura 11-14. Curvas características del diodo a distintas temperaturas

Capacidad de la unión p-n

Tanto en la zona p como en la zona n del diodo, existe una zona con carga libre como consecuencia de las recombinaciones, tal como muestra la Figura 11-4. Esta zona de transición está libre de portadores, y se comporta de mo-

do equivalente a como lo haría un aislante. Nos encontramos entonces con un dispositivo que se comporta igual que un condensador ideal de láminas plano-paralelas cargadas con $-Q$ y $+Q$ y separadas por una distancia igual a la anchura de la zona de transición tal como muestra la Figura 11-15.

Recordemos que la capacidad de dicho condensador era inversamente proporcional a la distancia entre las armaduras, por lo que la capacidad del diodo va a depender de esta separación. Por lo tanto, al modificar la tensión aplicada al diodo, se modifica la anchura de la zona de transición y por consiguiente la capacidad. Tenemos pues un dispositivo cuya capacidad puede controlarse modificando la tensión aplicada a éste.

Los efectos de la capacidad de la unión $p-n$ del diodo se representan mediante un condensador situado en paralelo con el diodo, tal y como se muestra en la parte derecha de la Figura 11-15.

En este hecho se basan unos diodos denominados diodos varactores, que no son más que condensadores de semiconductor con capacidad variable dependiente del voltaje aplicado, y que se utilizan por ejemplo en circuitos de sintonización (de radio, televisión, ...).

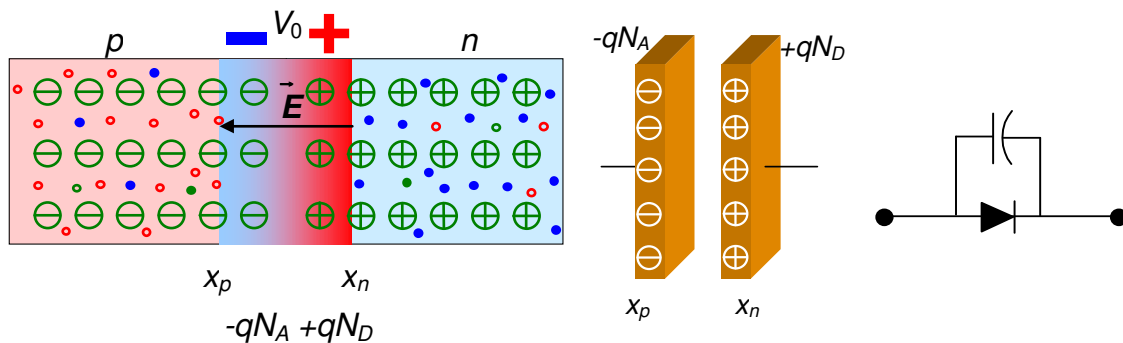


Figura 11-15. Modelización del diodo $p-n$ como condensador

Tiempo de recuperación inverso del diodo

Un diodo $p-n$ polarizado en modo inverso no conduce la corriente como consecuencia de la pequeña concentración de portadores minoritarios (electrones en la zona p y huecos en la zona n). Este hecho posibilita la aplicación del diodo en la rectificación de la corriente alterna, aplicación que se tratará en el apartado 11.5. En esta situación, el diodo debería poder cambiar su estado de polarización directa a inversa de modo instantáneo.

Sin embargo, mientras el diodo está polarizado de modo directo, gran cantidad de huecos procedentes de la zona p han entrado en la zona n , siendo minoritarios en esta zona. El mismo razonamiento puede hacerse con los electrones presentes en la zona p procedentes de la n . Si en esta situación se invierte la polarización del diodo pasando éste a estar polarizado en modo inverso, existirán gran cantidad de portadores minoritarios en cada una de las zonas: es decir, en la zona p se encontrarán electrones procedentes de la zona n y que son por tanto minoritarios en la zona p , del mismo modo que en la zona n se encontrarán huecos procedentes de la zona p y que son por tanto minoritarios en la zona n . Este exceso de portadores minoritarios provocará que el diodo conduzca todavía aunque esté polarizado de modo inverso hasta que sean retirados por el proceso de recombinación.

El tiempo necesario para que el diodo pase del estado de conducción al de no-conducción al cambiarle su estado de polarización, se denomina tiempo de recuperación inverso. Este tiempo varía según el diodo, pero suele valer entre los $10^{-6} - 10^{-9}$ s. Para ilustrar el significado de este tiempo, consideremos un diodo al que alternativamente le estamos cambiando su polarización: sería deseable que pasara instantáneamente de conducir a no-conducir como muestra la Figura 11-16 de la izquierda. En cambio, en la figura de la derecha, observamos que aunque está polarizado en modo inverso todavía conduce: es el tiempo que tardan los minoritarios en recombinarse y por tanto, desaparecer.

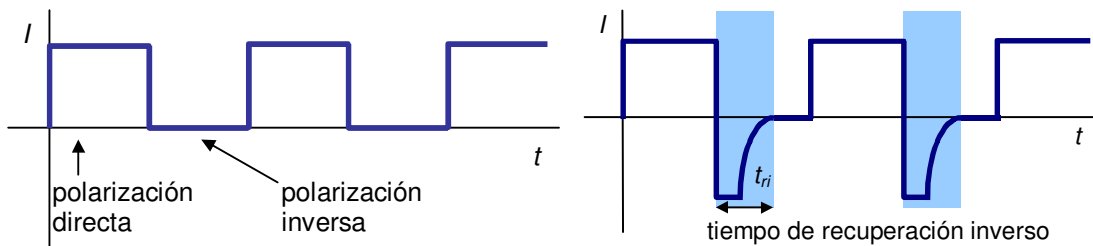


Figura 11-16. A la izquierda se muestra el comportamiento deseable de un diodo rectificador ante una señal alterna cuadrada; el paso de conducir a no conducir es instantáneo. A la derecha, se muestra el comportamiento real de un diodo $p-n$ con un tiempo de recuperación inverso del mismo orden que el periodo de oscilación de la señal.

11.5 Aplicaciones del diodo

Una importante aplicación del diodo consiste en la rectificación de la corriente alterna. En una corriente alterna, el sentido de ésta cambia alternativamente, y es necesario en ciertas aplicaciones, eliminar este hecho convirtiéndola en una corriente continua. Este proceso se denomina rectificación de la corriente alterna. En muchas ocasiones, el proceso no es completo, obteniéndose soluciones parciales. El caso más simple se muestra en la Figura 11-17, donde el diodo está polarizado alternativamente de modo directo y de modo inverso, por lo que dejará pasar la corriente y producirá tensión en la salida sólo en los semiciclos positivos. Este proceso se denomina rectificación de media onda.

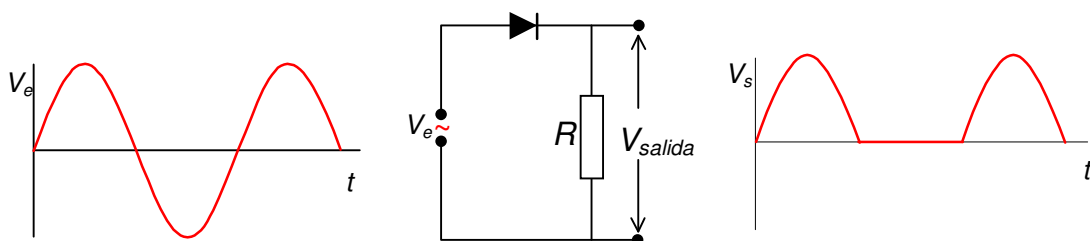


Figura 11-17. Rectificación de media onda

Para rectificar la onda completa se utiliza un puente de diodos como el que se muestra en la Figura 11-18, denominado rectificador de onda completa, donde se introduce la señal de entrada entre los puntos A y B , y se obtiene la señal de salida en bornes de la resistencia (puntos C y D).

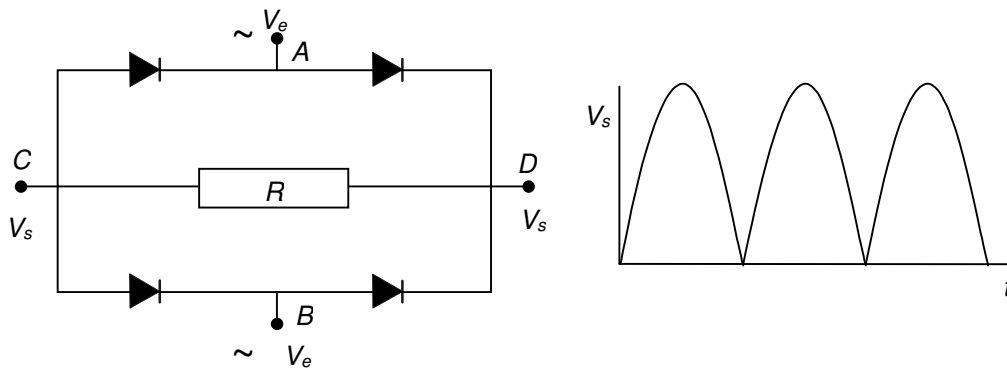


Figura 11-18. Rectificación de onda completa

Consta de cuatro diodos que alternativamente funcionan de dos en dos en modo directo y en modo inverso como muestra el esquema siguiente. Puede observarse que siempre hay dos diodos que permiten el paso de la corriente, mientras los otros dos, al estar polarizados de modo inverso actúan como un interruptor abierto. Obsérvese que la polaridad de los puntos C y D de la salida es la misma manteniéndose invariable en los dos semiciclos.

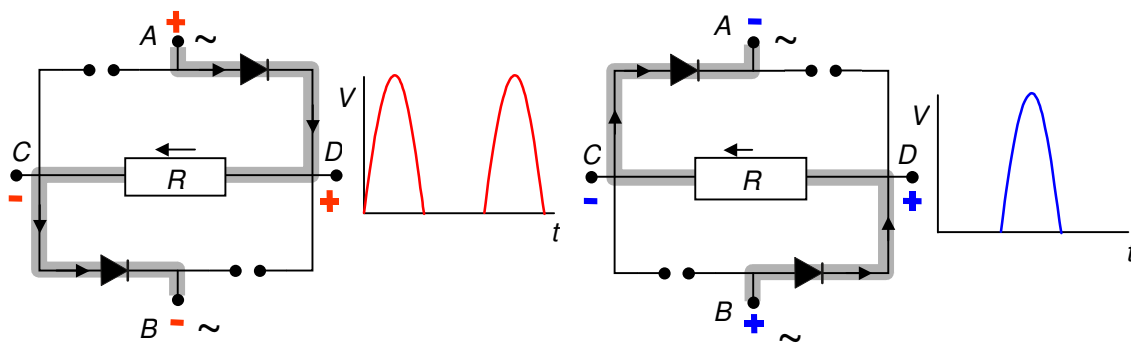


Figura 11-19. Funcionamiento alternativo de los diodos en un puente de diodos. Cada figura muestra la función de cada diodo durante medio ciclo

El resultado final es la rectificación de onda completa. Si además se añade un condensador en paralelo con la resistencia, se puede obtener una tensión aproximadamente constante, con únicamente una pequeña oscilación o rizado próximo a su valor máximo, tal y como se muestra en la Figura 11-20.

La amplitud de dicho rizado depende básicamente de la capacidad del condensador utilizado: cuanto mayor sea esta capacidad, el rizado es más pequeño. Este rizado se puede eliminar por completo utilizando un diodo Zener.

Sin embargo, hemos de tener en cuenta que el diodo presenta un retraso en la respuesta para pasar del estado de conducción al de no-conducción, tiempo que se denomina tiempo de recuperación inverso. Este tiempo suele ser del orden de los ns, por lo que la rectificación de corrientes alternas de alta frecuencia –del orden de los MHz a GHz– puede plantear dificultades.

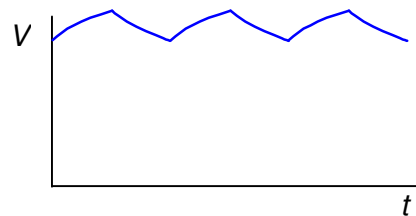


Figura 11-20. Tensión a la salida de un puente de diodos con condensador

Así, en la Figura 11-21 se muestra qué ocurre en una rectificación de media onda de corrientes alternas de distintas frecuencias con un diodo que tiene un tiempo de recuperación inverso de 5 ns.

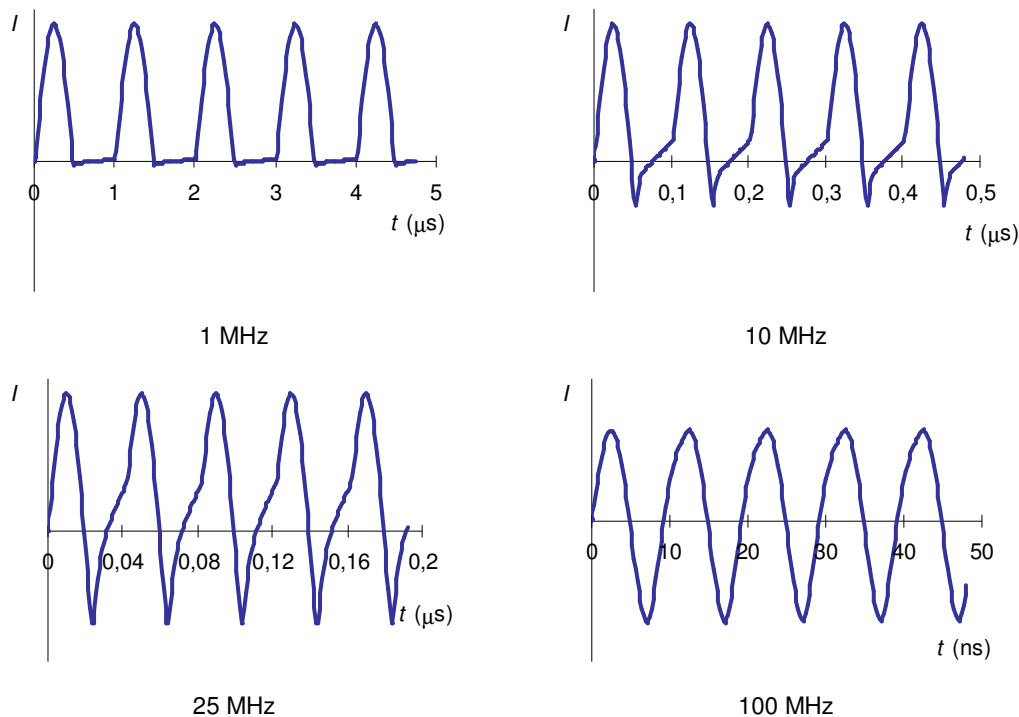


Figura 11-21. Comportamiento de un diodo de unión $p-n$ con un tiempo de recuperación inverso de 5 ns ante corrientes alternas de frecuencias: 1, 10, 25 y 100 MHz. Se ha representado la intensidad a través del diodo frente el tiempo

En el primer caso, el periodo de la señal es 200 veces el tiempo de recuperación inverso, y el efecto es casi imperceptible, mientras que a frecuencias de 100 MHz, el periodo es sólo 2 veces el tiempo de recuperación inverso, y la señal alterna no es rectificada.

Para sortear estas dificultades se utilizan diodos específicos con un tiempo de recuperación inverso significativamente menor, como el diodo Schottky.

11.6 El transistor de unión

Un transistor de unión es un elemento que está compuesto por un semiconductor con tres tipos distintos de dopado, dos de tipo p y uno de tipo n (transistor pnp) o dos de tipo n y uno de tipo p (transistor npn), dispuesto en serie dando lugar a dos uniones pn en serie, tal como se muestra en la Figura 11-22 y Figura 11-23. Un transistor presenta tres terminales para su conexión al circuito, uno por cada uno de los tipos de semiconductor presentes en el mismo. El terminal correspondiente al semiconductor central se denomina *base* del transistor. Los otros dos terminales se denominan *emisor* y *colector*, siendo la concentración de impurezas en el emisor mayor que en el colector. El dopado del colector es a su vez mayor que el dopado de la base. La base de un transistor tiene un espesor muy pequeño, del orden de 0,025 mm siendo la longitud total del transistor del orden de 4 mm. De esta forma, la separación entre las dos uniones pn es muy pequeña.

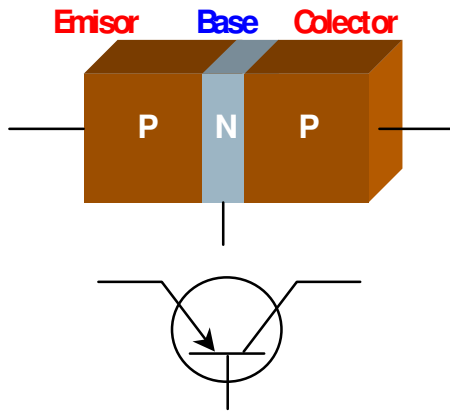


Figura 11-22. Transistor *pn*p

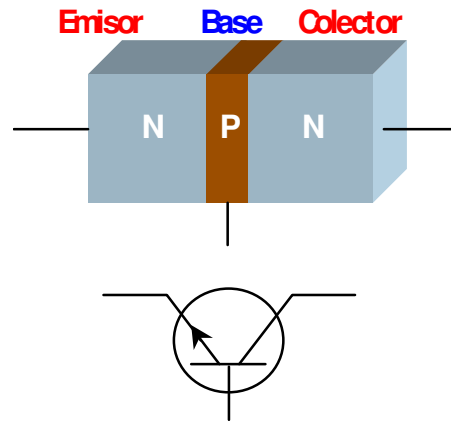


Figura 11-23. Transistor *np*n

A partir de este momento vamos a estudiar el transistor *pn*p. Los resultados obtenidos serán análogos a los que obtendríamos en el supuesto de que el transistor estudiado fuese de tipo *np*n, variando únicamente las consideraciones relativas al signo de las cargas de los portadores y por lo tanto al sentido de las intensidades.

Uniones *p-n* del transistor no polarizadas

Las dos uniones *p-n* del transistor, cuando no están polarizadas, se comportan del mismo modo que las uniones *p-n* del diodo: aparece un gradiente de concentraciones en las zonas de unión que produce un campo eléctrico y una diferencia de potencial de contacto. En la Figura 11-24 se aprecia cuáles son las zonas de carga positiva y negativa, las direcciones del campo eléctrico y la diferencia de potencial de contacto.

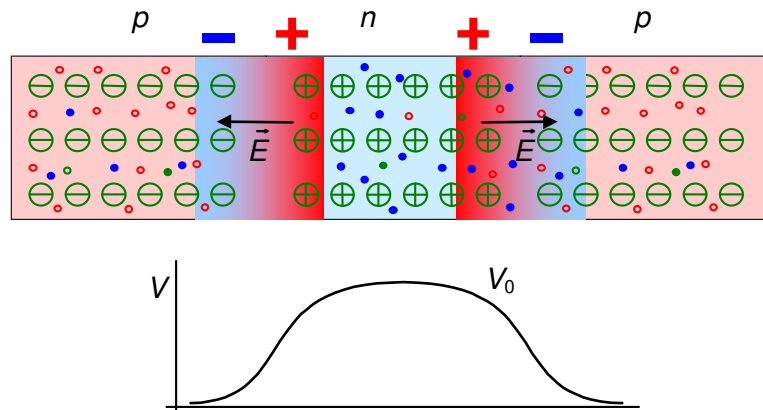


Figura 11-24. Transistor *pn*p no polarizado

Uniones *p-n* del transistor polarizadas

Para polarizar las uniones *p-n* del transistor son necesarias dos fuentes de alimentación. En el caso de situar los bornes positivo de las fuentes de alimentación a los lados *p* de las uniones, polarización directa para ambas uniones, obtenemos un comportamiento análogo al de dos diodos en polarización directa. Las dos zonas de transición se hacen más estrechas, y la diferencia de potencial de contacto se hace menor.

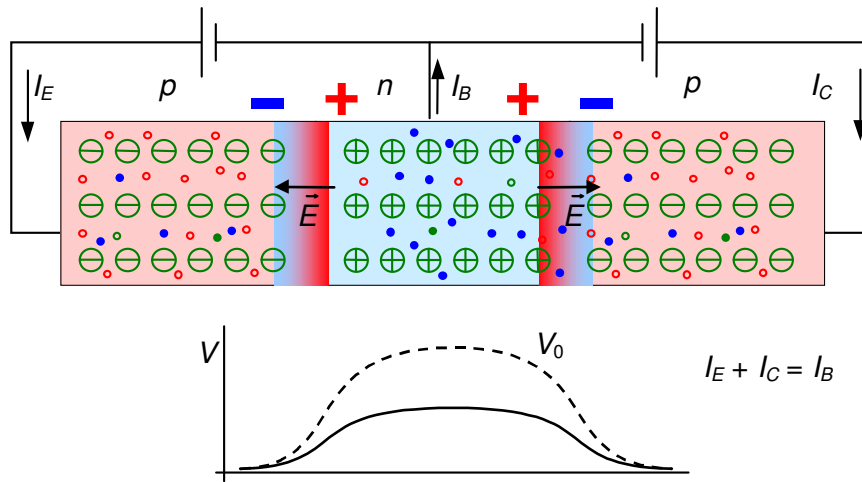


Figura 11-25. Transistor *pnp* polarizado de modo directo en las dos uniones *pn*

Cuando polarizamos de forma inversa las dos uniones *p-n*, conectando los bornes positivos de las fuentes de alimentación al lado *n*, y los negativos al lado *p*, tenemos una situación análoga a la que se obtendría para dos diodos en polarización inversa. Las dos zonas de transición se hacen más amplias, y la diferencia de potencial de contacto se hace mayor.

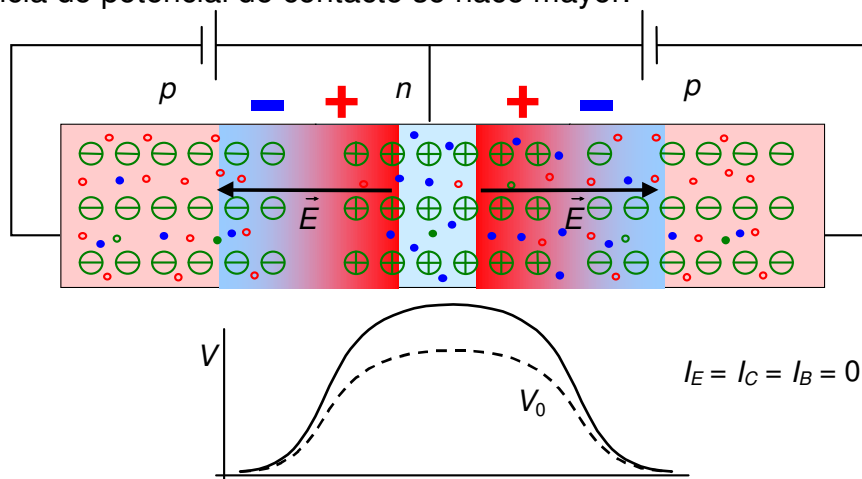


Figura 11-26. Transistor *pnp* polarizado de modo inverso en las dos uniones *pn*

Transistor polarizado en forma activa

Cuando polarizamos una de las uniones *p-n* del transistor en directa, y la otra en inversa, decimos que el transistor está polarizado en forma activa. En este caso, el comportamiento del transistor es radicalmente diferente al de las dos uniones *p-n* independientes.

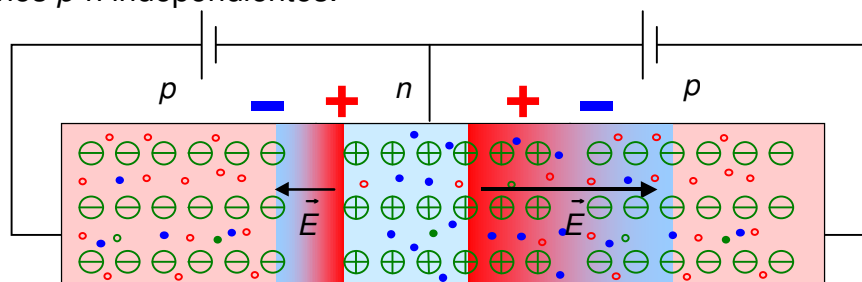


Figura 11-27. Transistor *pnp* polarizado de modo directo y de modo inverso en cada unión *pn* (forma activa)

Si analizamos el movimiento de cargas en el interior del transistor (*pn*p) polarizado en forma activa, observamos la presencia de los siguientes movimientos de cargas:

1. En la unión emisor–base, polarizada en forma directa, debido a la reducción de la barrera de potencial hay un trasvase de huecos que, por difusión, pasan del emisor a la base (I_{pB}), y un trasvase de electrones que pasan de la base al emisor (I_{nB}). Ver Figura 11-28.
2. En la base hay un alto gradiente de concentraciones. Esto implica que habrá una importante corriente de difusión de huecos cruzando la base desde el emisor hacia el colector. Estos huecos serán los provenientes del emisor indicados en el párrafo anterior, I_{pB} .
3. La base, en el transistor *pn*p, es un semiconductor tipo *n*, donde los electrones son portadores mayoritarios. Parte de los huecos provenientes del emisor se recombinarán con electrones de la base originando la aparición de una corriente de electrones, I_{BB} , que entran en la base, provenientes del circuito, para cubrir dichas recombinaciones.
4. En la unión base–colector, polarizada en forma inversa, un campo eléctrico favorable recogerá los huecos que lleguen a la unión y los desplazará hasta el colector ($I_{pB} - I_{BB}$). A través de esta unión, y por efecto del campo eléctrico, habrá a su vez una débil corriente de electrones del colector a la base, I_{nC} .

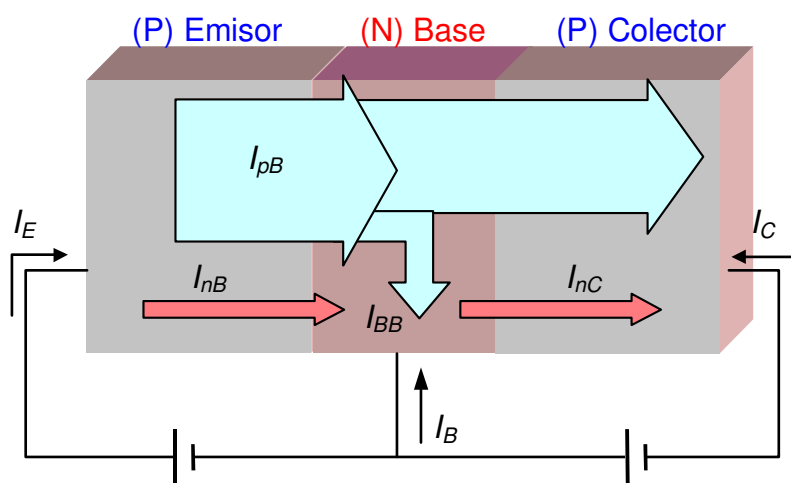


Figura 11-28. Distintas corrientes en el transistor

En la Figura 11-28 se muestra esquemáticamente el movimiento de cargas en el transistor de unión *pn*p descrito. Se ha indicado el sentido de las intensidades (sentido de movimiento de cargas positivas) y una indicación de su magnitud mediante la achura de la flecha. Podemos observar que la principal característica es la presencia de una fuerte corriente de huecos de emisor a colector.

Si estudiamos las intensidades entrantes en el transistor (vamos a considerar como criterio de signo de intensidades el considerar positivas las intensidades entrantes en el transistor) observamos que:

- La corriente de emisor I_E resulta de considerar la corriente de huecos que del emisor pasan a la base más la de electrones que se incorporan al emisor provenientes de la base.

- La corriente de base I_B resulta de considerar la corriente de electrones que se incorporan al emisor desde la base, la que se introduce en la base proveniente del colector y la que resulta de la recombinación de pares electrón hueco en la base.
- La corriente del colector I_C resulta de considerar la corriente de huecos que se incorporan al colector proveniente de la base y la débil corriente de electrones que pasan del colector a la base.

La suma de las tres corrientes será siempre nula (1ª ley de Kirchhoff). En numerosas ocasiones se podrá suponer, a efectos de cálculo, que el único movimiento de cargas existente en el transistor es una corriente de huecos que lo atraviesa de emisor a colector al aproximar a cero el resto de intensidades. En este caso $I_E = I_C = I_{pB}$ e $I_B = 0$.

El estudio comentado anteriormente nos permite intuir que una de las principales características de un transistor es que divide al circuito en dos partes, y que actuando sobre una de ellas (tensión emisor–base) gobernamos la intensidad que introducimos en la segunda (intensidad del colector).

Un transistor *pnp* polarizado en forma activa e instalado en un circuito de la forma indicada en la parte izquierda de la Figura 11-29, es un cuadripolo cuyo comportamiento puede modelizarse tal como se muestra en la parte derecha de la Figura 11-29. A la entrada, el cuadripolo se comporta como un diodo con la polaridad indicada, y a la salida como una fuente de intensidad ideal en la que el valor de la intensidad generada depende de la tensión a la entrada del cuadripolo.

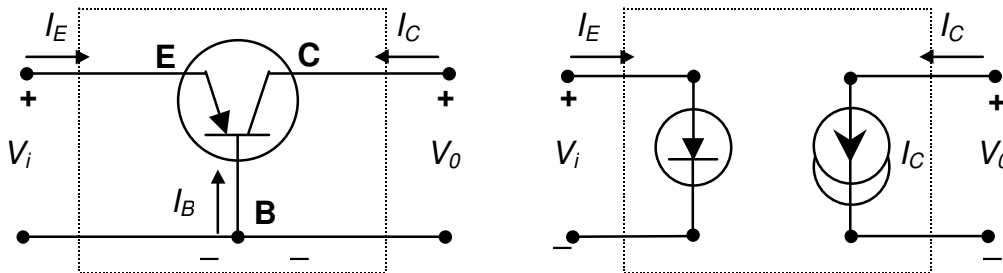


Figura 11-29. Modelización del transistor

Con este modelo reproducimos un comportamiento idealizado del transistor. Existen otros modelos para esta y otras formas distintas de conexión, pero su estudio se sale fuera de los objetivos del presente curso.

El transistor de unión como amplificador

Supongamos un transistor *pnp* conectado, tal como se muestra en la Figura 11-30. Como ya hemos visto, el número de huecos que atraviesan la base vendrá dado fundamentalmente por la facilidad que tengan estos huecos de atravesar la unión emisor–base. Esta barrera está controlada por la tensión emisor–base, V_{EB} , siendo, por tanto, éste el único parámetro externo que controla el valor de la corriente de huecos que atraviesa el transistor. Por ello, la intensidad de colector, I_C , está gobernada por V_{EB} .

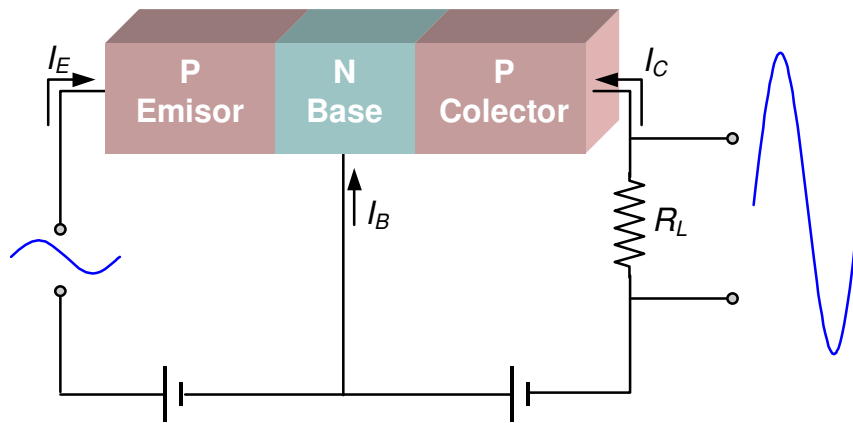


Figura 11-30. El transistor como amplificador

Si conectamos a la salida del colector una resistencia R_L , la diferencia de potencial entre los terminales de esta resistencia será: $V_{AD} = R_L I_C$. Dado que la resistencia R_L es constante, cualquier variación de la intensidad de colector afectará a V_{AD} según la relación:

$$\Delta V_{AD} = R_L \Delta I_C$$

El valor de la intensidad de colector, así como el de su variación, dependen del valor de la tensión emisor–base y de cómo varíe ésta. La relación entre ambos viene dada por la expresión

$$\Delta(-I_C) = g_m \Delta V_{EB}$$

siendo g_m un parámetro denominado transconductancia y que depende del punto de funcionamiento del transistor. Entonces, la variación de la tensión entre los terminales de la resistencia será:

$$\Delta V_{AD} = R_L g_m \Delta V_{EB}$$

Para un mismo incremento de la tensión emisor–base, el valor de la tensión en bornes de la resistencia dependerá de R_L . Cuanto mayor sea R_L mayor será ΔV_{AD} , pudiéndose obtener grandes aumentos de tensión respecto a la tensión aplicada V_{EB} .

Se denomina “factor de ganancia” a la relación existente entre la variación de la tensión a la salida y a la entrada del circuito. En nuestro caso:

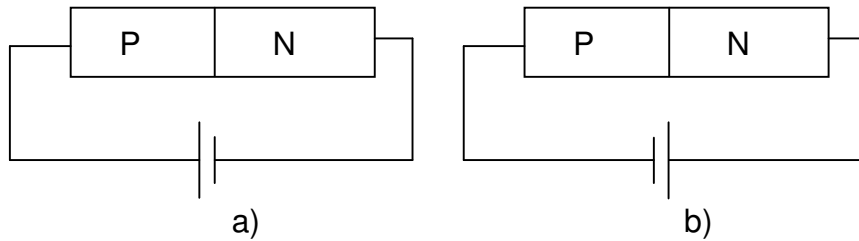
$$\frac{\Delta V_{AD}}{\Delta V_{EB}} = R_L g_m$$

Entonces si, por ejemplo, introducimos una señal senoidal superpuesta a V_{EB} , podremos obtener entre los terminales A y D una señal senoidal mucho mayor superpuesta a la tensión V_{AD} . Habremos obtenido una amplificación de la señal introducida.

11.7 Cuestiones y problemas

1. Explica brevemente porque aparece una diferencia de potencial en una unión $p-n$ en circuito abierto.

2. Sea un diodo $p-n$, polarizado como se indica en las figuras a) y b). Indicar si las siguientes cantidades aumentan o disminuyen en cada caso, comparadas con sus valores en la unión $p-n$ sin polarizar.



	Anchura de la zona de transición	Diferencia de potencial V en la zona de transición	Campo eléctrico en la zona de transición
a)			
b)			

Sol: a) Disminuye. b) Aumenta.

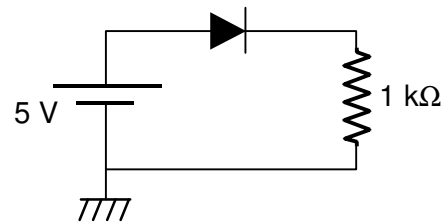
3. ¿En cuál o cuáles de los siguientes casos existe movimiento de cargas por difusión? Justifica la respuesta.

- a) Un conductor homogéneo conectado a una fuente de tensión.
- b) Un semiconductor homogéneo conectado a una fuente de tensión.
- c) Una unión PN (diodo) conectada en forma directa a una fuente de tensión.

Sol: en el caso c).

4. Calcula la corriente que circula por el circuito de la figura, utilizando las tres aproximaciones para el diodo:

- a) Diodo ideal.
- b) Segunda aproximación.
- c) Tercera aproximación.

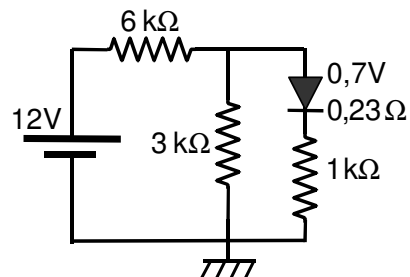


La tensión de codo del diodo es de 0,7 V, y su resistencia de 0,23 Ω .

Sol: a) 5 mA. b) 4,3 mA. c) 4,299 mA

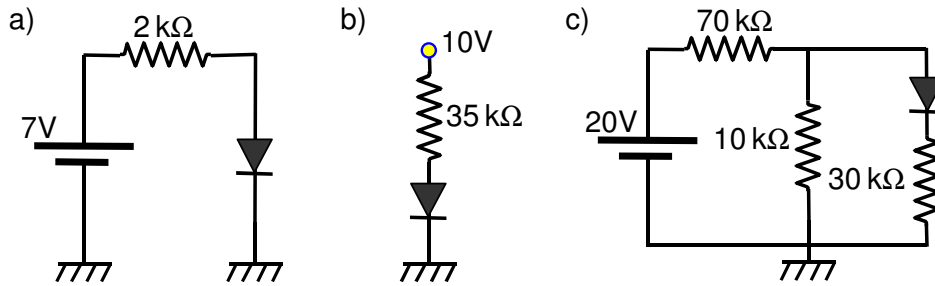
5. Calcula la corriente que circula por la resistencia de 1 k Ω en el circuito de la figura, suponiendo que una tensión de codo para el diodo de 0,7 V, y resistencia de 0,23 Ω

Sol: 1,1 mA.



6. Calcula la corriente en los diodos de los tres circuitos de la figura. Los diodos son de silicio (tensión umbral o de codo de 0,7 V).

¿Qué valores obtendrías si los diodos fueran de germanio (tensión umbral o de codo de 0,3 V)?

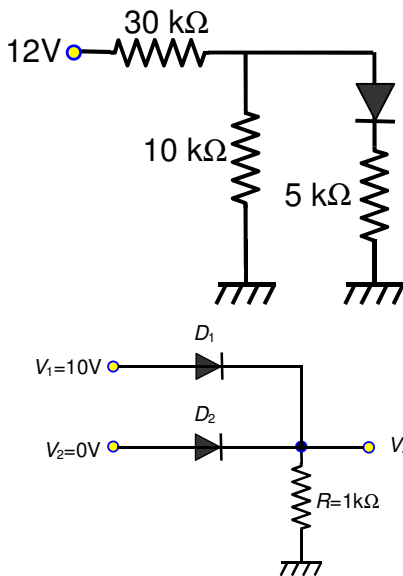


Sol: Diodos de silicio: a) 3,15 mA. b) 0,27 mA. c) 46,5 μ A.
 Diodos de germanio: a) 3,35 mA. b) 0,28 mA. c) 56,8 μ A.

7. Calcula la corriente que circula por el diodo de la figura, sabiendo que se trata de un diodo de Germanio cuya tensión de codo o tensión umbral es de 0,3 V.

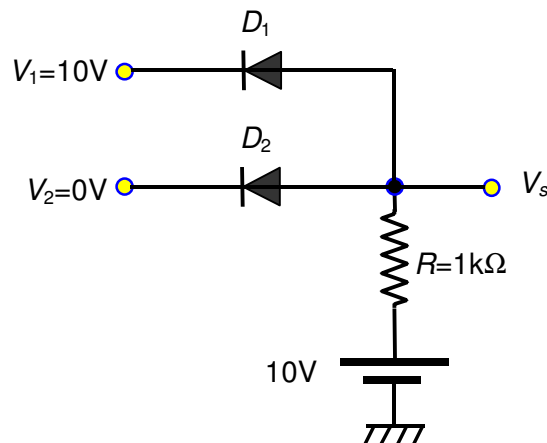
Sol: 0,216 mA.

8. Dado el circuito de la figura, con los valores de la tensión de entrada indicados, calcula la tensión de salida V_S del circuito y las intensidades de corriente que circulan por los diodos. Los diodos D_1 y D_2 son de silicio con una tensión umbral de 0,7 V.



Sol: $V_S = 9,3$ V, $I_1 = 9,3$ mA, $I_2 = 0$.

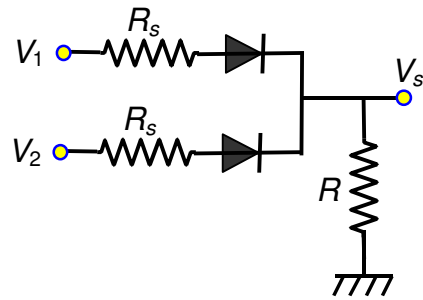
9. Calcula la tensión de salida V_S del circuito para los valores de la tensión de entrada de la figura. Los diodos D_1 y D_2 son de silicio con una tensión umbral de 0,7 V.



Sol: $V_S = 0,7$ V.

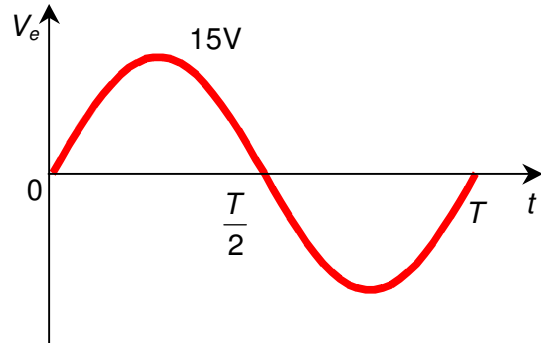
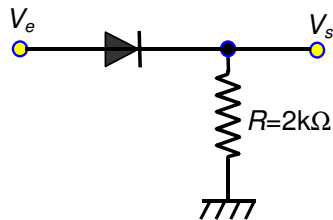
10. Calcula la tensión de salida V_s del circuito de la figura para los siguientes valores de la tensión de entrada ($R \gg R_s$):

- a) $V_1 = V_2 = 0$.
- b) $V_1 = V$, $V_2 = 0$.
- c) $V_1 = V_2 = V$.

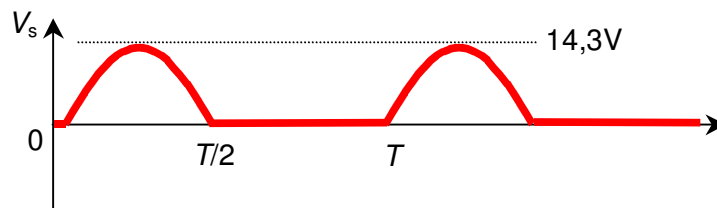


Sol: a) $V_s = 0$. b) $V_s \approx V$. c) $V_s \approx V$.

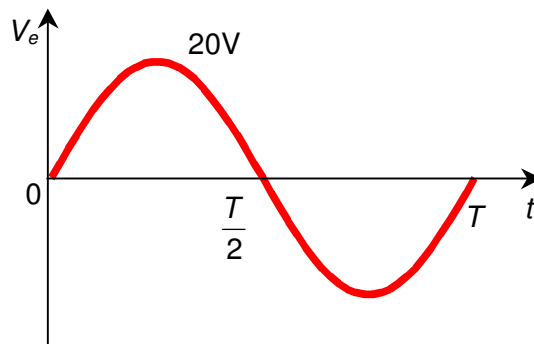
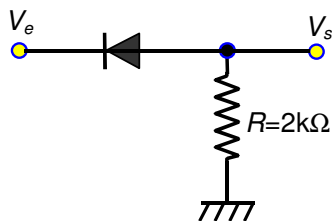
11. Dado el circuito de la figura, calcula la tensión de salida, V_s , para la tensión de entrada, V_e , indicada en la figura. El diodo es de silicio.



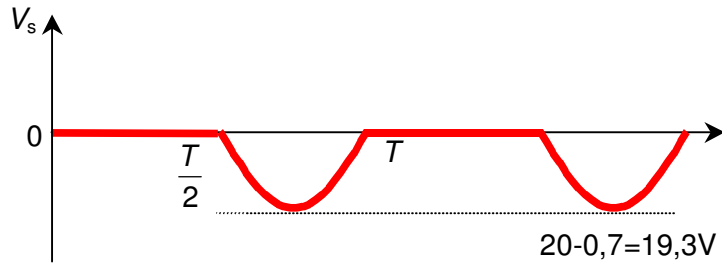
Sol:



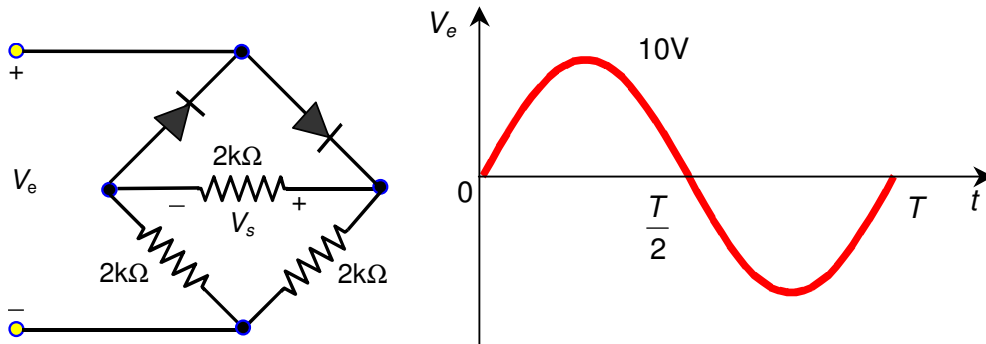
12. Dado el circuito de la figura, calcula la tensión de salida, V_s , para la tensión de entrada, V_e , indicada en la figura. El diodo es de silicio.



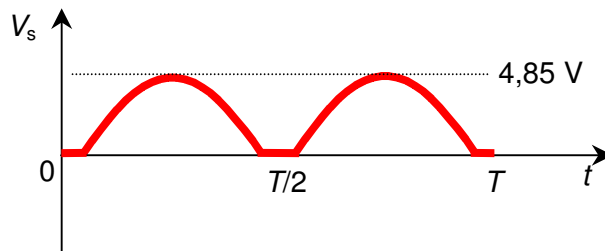
Sol:



13. Calcula la tensión de salida V_s del circuito de la figura, para la tensión de entrada V_e indicada en la figura de la derecha. Los diodos son de germanio.

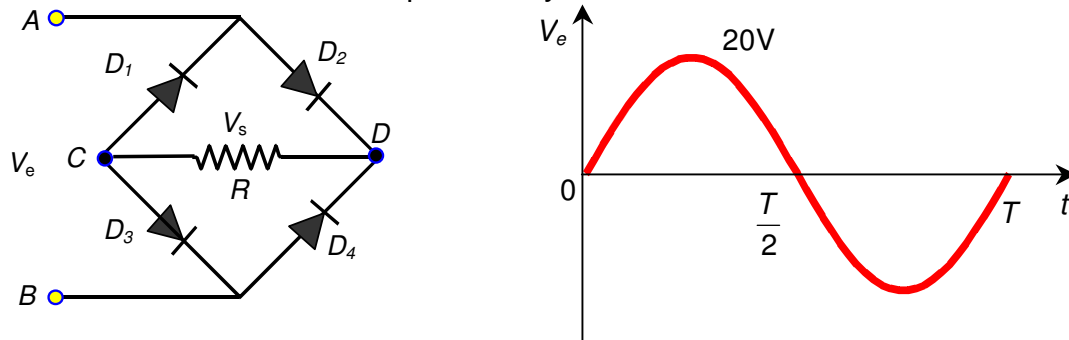


Sol:

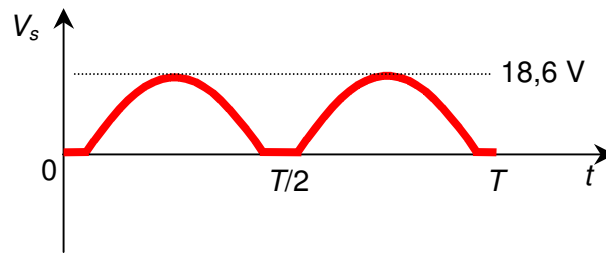


14. Dado el circuito de la figura, calcula la tensión de salida, V_s , para la tensión de entrada, V_e , indicada en la figura.

La tensión de entrada se sitúa sobre los puntos A y B del circuito, y la tensión de salida se toma sobre los puntos C y D .



Sol:



GLOSARIO

Unión p-n. Zona de unión entre un semiconductor tipo p y uno tipo n .

Potencial de contacto. Es la diferencia de potencial existente en la zona de transición de una unión $p-n$ en equilibrio o en circuito abierto. Depende de la concentración de impurezas aceptoras, donadoras y de la concentración intrínseca.

Polarización directa. En un diodo de unión $p-n$, consiste en polarizar el semiconductor tipo p positivamente y el tipo n , negativamente. El diodo conduce.

Polarización inversa. En un diodo de unión $p-n$, consiste en polarizar el semiconductor tipo n positivamente y el tipo p , negativamente. El diodo no conduce.

Corriente inversa de saturación. Débil corriente producida por los portadores minoritarios en una unión $p-n$ polarizada de modo inverso.

Tensión umbral. Es la tensión a partir de la cual el diodo polarizado de modo directo, conduce.

Transistor de unión. es un elemento que está compuesto por un semiconductor con tres tipos distintos de dopado, dos de tipo p y uno de tipo n (transistor pnp) o dos de tipo n y uno de tipo p (transistor npn), dispuesto en serie dando lugar a dos uniones pn en serie.

Bibliografía específica

- Robles, M. y otros, "Física básica de semiconductores" (Paraninfo, Madrid, 1993)
- Adler, R. B.; Smith, A. C.; Longini, R. C, "Introducción a la física de los semiconductores". (Reverté S.A. Barcelona 1981)

- Boylestad, R; Nashelsky, L, "*Electrónica: Teoría de Circuitos*" (Prentice Hall, Mexico 1997)
- Giró y Roca A., Canales M., Rey R, Sesé G, Trullàs J.: "*Física per a estudiants d'informàtica*". Edicions de la Universitat Oberta de Catalunya
- J. Millman y A. Grable "*Microelectrónica*", Editorial Hispano Europea, S.A., Barcelona, 1995.