CONSTANTES

Constante	**Valor**
q	$1{,}602\ x\ 10^{-19} C$
m_0	$9{,}109\ x\ 10^{-31} kg$
k	$1{,}381\ x\ 10^{-23} \frac{J}{K} = 8{,}617\ x\ 10^{-5}\ eV\ K$
h	$6{,}626\ x\ 10^{-34}\ Js = 4{,}136\ x\ 10^{-15} eV\ s$
ϵ_0	$8{,}85\ x\ 10^{-12} \frac{F}{m} = 88{,}5 \frac{fF}{cm} = 8{,}85\ x\ 10^{-14} \frac{F}{cm}$
$\epsilon_r(Si)$	$11{,}7$
$\epsilon_r(SiO_2)$	$3{,}9$
ϵ_S	$\epsilon_0\ \epsilon_r$
T_{amb}	$27°\mathrm{C} = 300K$
$1eV$	$1{,}602\ x\ 10^{-19} J$

Propiedad	**Descripción**	**Silicio (Si)**	**Germanio (Ge)**	**Arseniuro de Galio**
$n_i[cm^{-3}]$	Concentración intrínseca de portadores	10^{10}	$2\ x\ 10^{13}$	$2\ x\ 10^{6}$
$\mu_{n_0}\left[\frac{cm^2}{Vs}\right]$	Movilidad de los e^- a T_{amb}	1450	3900	9000
$\mu_{p_0}\left[\frac{cm^2}{Vs}\right]$	Movilidad de los h^+ a T_{amb}	500	2300	460
$E_g[eV]$	Energía de bandgap	1,12	0,66	1,42
m_n^*	Masa efectiva de los e^- a T_{amb}	$1{,}1\ x\ m_0$	$0{,}56\ x\ m_0$	$0{,}068\ x\ m_0$
m_p^*	Masa efectiva de los h^+a T_{amb}	$0{,}56\ x\ m_0$	$0{,}29\ x\ m_0$	$0{,}47\ x\ m_0$

En la cátedra se considera mucho menor hasta 100 veces menor, de forma similar 100 veces mayor para mucho mayor.

N_D es dopaje Donor, de valencia V de la tabla periódica (Nitrógeno, Fósforo, Arsénico, etc…). Ceden un electrón, aumentando la concentración de electrones.
N_A es dopaje Aceptor, de valencia III de la tabla periódica (Boro, Aluminio, Galio, etc…). Aumentan la concentración de huecos.

FÍSICA DE SEMICONDUCTORES

Densidad de carga $[\rho] = \frac{C}{cm^3}$

$$\rho = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_x}{\partial x}$$

Campo eléctrico $[E] = \frac{C}{cm^2}$

$$E_f = E_0 + \int_{x_0}^{x_f} \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{\Delta V}{L}$$

Concentración intrínseca $[n_i] = cm^{-3}$

$$n_i = 2\left(\frac{2\pi \sqrt{m_n^* m_p^*} kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

Concentración de portadores mayoritarios $[n_0] = [p_0] = cm^{-3}$

$$n_0 = \left(\frac{N_D - N_A}{2}\right) + \sqrt{\frac{(N_D - N_A)^2}{4} + n_i^2}$$

$$p_0 = \left(\frac{N_A - N_D}{2}\right) + \sqrt{\frac{(N_A - N_D)^2}{4} + n_i^2}$$

Ley de acción de masas

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

Conductividad $[\sigma] = (\Omega cm)^{-1}$

$$\sigma = q(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p)$$

Resistividad $[\rho] = \Omega\, cm$

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Movilidad (para el Silicio) $[\mu] = \frac{cm^2}{Vs}$

$$\mu_n = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\mu_p = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{5}{2}}$$

Coeficiente de difusividad $[D] = \frac{cm^2}{s}$

$$D_n = \frac{L^2}{2\tau_c} = \mu_n V_{th}$$

$$D_p = \frac{L^2}{2\tau_c} = \mu_p V_{th}$$

Siendo $L \coloneqq longitud\ del\ material,\ \tau_c \coloneqq tiempo\ entre\ colisiones.$

Tensión térmica

$$V_{th} = \frac{kT}{q}$$

Para T_{amb}, se toma $V_{th} = 25{,}9mV$

Velocidades de arrastre $[\boldsymbol{v^{arr}}] = \frac{\boldsymbol{cm}}{\boldsymbol{s}}$

$$v_n^{arr} = -\mu_n E$$

$$v_p^{arr} = \mu_p E$$

Densidades de corriente de arrastre $[J^{arr}] = \frac{A}{cm^2}$

$$J_n^{arr} = -n_0 q \mu_n E = n_0 q \mu_n E$$

$$J_p^{arr} = p_0 q \mu_p E = p_0 q \mu_p E$$

Densidad de corriente de arrastre total $[J_{total}^{arr}] = \frac{A}{cm^2}$

$$J_{total}^{arr} = J_n^{arr} + J_p^{arr} = q\left(n_0\mu_n + p_0\mu_p\right)E = \sigma E = \frac{1}{\rho}E$$

Densidades de corriente de difusión $\left[J^{dif}\right] = \frac{A}{cm^2}$

$$J_n^{dif} = qD_n \frac{\partial n(x)}{\partial x}$$

$$J_p^{dif} = -qD_p \frac{\partial p(x)}{\partial x}$$

Densidad de corriente de difusión total $\left[J_{total}^{dif}\right] = \frac{A}{cm^2}$

$$J_{total}^{dif} = J_n^{dif} + J_p^{dif}$$

Densidad de corriente total $[J_{total}] = \frac{A}{cm^2}$

$$J_{total} = J_{total}^{arr} + J_{total}^{dif}$$

Corriente $[I] = A\ (Ampère)$

$$I_{total} = J_{total}\ x\ Area = \frac{\Delta V}{R}$$

Resistencia $[R] = \Omega$

$$R = \frac{L}{A\,\sigma}$$

Potenciales de juntura $[\emptyset] = mV$

$$\emptyset_B = \emptyset_n(x) - \emptyset_p(x)$$

Relación de Boltzmann $[\emptyset] = mV$

$$0 \leq \emptyset_n = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = 25.9mV\ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \leq 550mV$$

$$0 \geq \emptyset_p = -\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = -25.9mV\ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \geq -550mV$$

Regla de los 60mV

$$\emptyset_n = 60mV\log_{10}\left(\frac{n_0}{n_i}\right)$$

$$\emptyset_p = -60mV\log_{10}\left(\frac{p_0}{n_i}\right)$$

Potencial de Juntura $[\emptyset_B] = mV$

$$\emptyset_B = \emptyset_n - \emptyset_p = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \leq 1{,}1V$$

Hipótesis de cuasi-equilibrio

Se puede considerar que los electrones y huecos se distribuyen de manera uniforme en el semiconductor y que las corrientes eléctricas son el resultado de pequeñas perturbaciones en este equilibrio local. Se refiere a la situación en la que las tasas de reacciones opuestas, como la generación y la recombinación de portadores de carga, son iguales en una región del material. En otras palabras, esto significa que los portadores de carga, como los electrones y los huecos, están en equilibrio térmico y eléctrico en esa región.

JUNTURA PN

Límites de la región de vaciamiento (o región de carga espacial, SCR)

$$x_{n_0}[cm] = \sqrt{\frac{2\,\epsilon_s\,\emptyset_B\,N_A}{q(N_A+N_D)N_D}}$$

$$x_{p_0}[cm] = \sqrt{\frac{2\,\epsilon_s\,\emptyset_B\,N_D}{q(N_A+N_D)N_A}}$$

$$x_{d_0}[cm] = x_{n_0} + x_{p_0} = \sqrt{\frac{2\,\epsilon_s\,\emptyset_B\,(N_A+N_D)}{q\,N_A\,N_D}}$$

En una juntura PN simétrica vale que $N_A = N_D \Rightarrow x_{p0} = x_{n0}$

Campo eléctrico (máximo, es decir en la juntura metalúrgica) $[E_0] = \frac{N}{C}$

$$|E_0| = |E_{max}| = \sqrt{\frac{2\,q\,\emptyset_B\,N_A\,N_D}{\epsilon_s}}$$

El campo eléctrico de ruptura es el campo eléctrico máximo que puede soportar un medio antes de romperse.

Campo eléctrico máximo en una juntura fuertemente asimétrica

$$N_A \gg N_D \Rightarrow |E_0| \approx \sqrt{\frac{2\,q\,\emptyset_B\,N_D}{\epsilon_s}} \propto \sqrt{N_D}$$

$$N_D \gg N_A \Rightarrow |E_0| \approx \sqrt{\frac{2\,q\,\emptyset_B\,N_A}{\epsilon_s}} \propto \sqrt{N_A}$$

Polarización

Al aplicar una tensión V, las ecuaciones anteriores se modifican simplemente reemplazando $\emptyset_B \to \emptyset_B - V$.

Además, si se tiene el valor sin polarización se puede obtener el valor con polarización V simplificando la ecuación de la siguiente manera:

$$Y(V) = \frac{Y(0)}{\sqrt{1-\frac{V}{\emptyset_B}}}$$

Capacidad de Juntura por unidad de área $[C_j'] = \frac{F}{cm^2}$

$$C_j' = \frac{\epsilon_s}{x_d(V)} = \sqrt{\frac{q\,\epsilon_s\,N_A\,N_D}{2\,(\emptyset_B - V)(N_A+N_D)}}$$

Capacidad de Juntura por unidad de área en una Juntura muy asimétrica

Predomina el lado menos dopado, es decir:

$$N_A \gg N_D \Rightarrow \; x_{p_0} \ll x_{n_0} \; \Rightarrow C_j'(V) = \sqrt{\frac{q\,\epsilon_s\,N_D}{2\,(\emptyset_B - V)}}$$

$$N_D \gg N_A \Rightarrow \; x_{p_0} \gg x_{n_0} \Rightarrow C_j'(V) = \sqrt{\frac{q\,\epsilon_s\,N_A}{2\,(\emptyset_B - V)}}$$

Capacidad de Juntura $[C_j] = F$

$$C_j = A\,C_j' = A\,\frac{\epsilon_s}{x_d(V)} = A\sqrt{\frac{q\,\epsilon_s\,N_A\,N_D}{2\,(\emptyset_B - V)(N_A + N_D)}}$$

Capacidad de Juntura como pendiente de la curva $\boldsymbol{Q_j\ Vs.V}$

$$C_j = \frac{\partial Q_i}{\partial V}$$

Dado que $\emptyset_B$ corta el eje horizontal cuando $Q_j(V) = 0 \Rightarrow \emptyset_B = V$ con los valores de la tabla se puede hacer una recta tal que:

$$\frac{1}{{C_j'}^2} \approx \frac{2(\emptyset_B - V)}{q\,\epsilon_s\,N_A}$$

$$C_j = C_j' x + b \Rightarrow C_j' = -\frac{2}{\epsilon_s\,q\,N_D}$$

Hipótesis (o aproximación) de vaciamiento

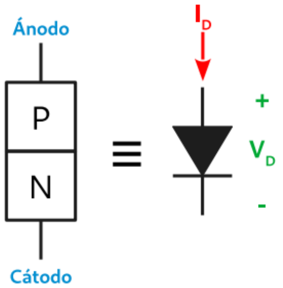
- Las regiones QNR's tienen neutralidad de carga.
- Las SCR están vacías de portadores (región de vaciamiento)
- La transición entre SCR y QNR's es abrupta

Entonces,

Variables	$x < -x_{p_0}$	$-x_{p_0} < x < 0$	$0 < x < x_{n_0}$	$x_{n_0} < x$
$n_0(x)$	$\frac{n_i^2}{N_A}$	$n_0(x) \ll N_A$	$n_0(x)$	N_D
$p_0(x)$	N_A	$p_0(x)$	$p_0(x) \ll N_D$	$\frac{n_i^2}{N_D}$
ρ	0	$-qN_A$	qN_D	0
E	0	$-\frac{q\,N_A}{\epsilon_s}(x + x_{p_0})$	$\frac{q\,N_D}{\epsilon_s}(x - x_{n_0})$	0
ΔV	$\emptyset_p$	$\frac{q\,N_A}{2\,\epsilon_s}(x + x_{p_0})^2 + \emptyset_p$	$-\frac{q\,N_D}{2\,\epsilon_s}(x - x_{n_0})^2 + \emptyset_n$	$\emptyset_n$

DIODO PN (si es ideal $n = 1$)

Referencias



Equilibrio térmico $(V = 0)$

$$|J_{neta}^{arr}| = |J_{neta}^{dif}|$$

Polarización directa $(V > 0)$

$$|E_{SCR}| \downarrow \Rightarrow |J_{arr}| \downarrow \Rightarrow |J_{arr}| < |J_{dif}|$$

Además, en polarización directa fuerte

$$C_d \gg C_j$$

Polarización inversa $(V < 0)$

$$|E_{SCR}| \uparrow \Rightarrow |J_{arr}| \uparrow \Rightarrow |J_{arr}| > |J_{dif}|$$

Además, en polarización inversa y directa débil

$$C_d \ll C_j$$

Hipótesis de bajo nivel de inyección

Es necesario que se cumpla para poder utilizar las afirmaciones de arriba. Esta hipótesis implica que el factor limitante de la corriente del diodo es el gradiente de difusión en las regiones cuasi-neutrales. Es decir, que es válido mientras se cumpla que el nivel de exceso de portadores minoritarios en los bordes de la zona desierta sea mucho menor que la concentración de mayoritarios, es decir:

$$n(-x_p) \ll N_A$$

$$p(x_n) \ll N_D$$

Hipótesis (o aproximación) de Cuasi-Neutralidad

Se refiere a la situación en la que la concentración de portadores de carga positivos (huecos) es aproximadamente igual a la concentración de portadores de carga negativos (electrones) en una región del material. Esta aproximación se aplica en situaciones en las que la densidad de impurezas y defectos es baja en comparación con la densidad de portadores de carga intrínsecos del material.

Condiciones de borde

$$n(-x_p) = \frac{n_i^2}{N_A}\, e^{\frac{V_D}{V_{th}}}$$

$$p(x_n) = \frac{n_i^2}{N_D}\, e^{\frac{V_D}{V_{th}}}$$

$$n(-W_p) = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$n(W_n) = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Siendo W_p y W_n los anchos del diodo en las regiones P y N respectivamente.

Hipótesis del diodo corto

La zona cuasi-neutral es tan pequeña que no pueden generarse ni recombinarse portadores en el cuerpo del diodo.

Densidades de corrientes $[J] = \frac{A}{cm^2}$

$$J_n = q\,\frac{n_i^2}{N_A}\frac{D_n}{W_p - x_p}\left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1\right)$$

$$J_p = q\,\frac{n_i^2}{N_D}\frac{D_p}{W_n - x_n}\left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1\right)$$

Corriente que atraviesa el diodo (valido en directa e inversa)

$$I = q\;A\;n_i^2\;\left(\frac{1}{N_A}\frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_D}\frac{D_p}{W_n - x_n}\right)\left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1\right) = I_0\;\left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1\right)$$

Siendo I_0 la corriente de saturación tal que

$$I_0 = q\;A\;n_i^2\;\left(\frac{1}{N_A}\frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_D}\frac{D_p}{W_n - x_n}\right) = A\left(J_n + J_p\right)$$

Recordar que nunca se debe reemplazar con el $V_D(ON)$ del modelo de orden 0, ya que es una aproximación. Si se hiciera todos los diodos del mundo serían iguales prácticamente.

Tensión sobre el diodo (válido en directa e inversa)

$$V_D = n\;V_{th}\ln\left(\frac{I_D}{I_0} + 1\right)$$

Al igual que antes, ya que la expresión en sí es la misma. Nunca se debe usar $V_D(ON)$ del modelo de orden 0.

Tiempos de tránsito de los electrones a través de p-QNR y los huecos a través de n-QNR $[\tau] = s$

$$\tau_{T_n} = \frac{\left(W_p - x_p\right)^2}{2\,D_n}$$

$$\tau_{T_p} = \frac{(W_n - x_n)^2}{2\,D_p}$$

En general, estos tiempos suelen ser datos o los provee el fabricante.

Tiempo de tránsito total $[\tau_T] = s$

$$\tau_T = \frac{\tau_{T_n} I_n + \tau_{T_p} I_p}{I_D} = \frac{q\,A\left(W_p\,n_p + W_n\,p_n\right)}{2\,I_0}$$

siendo $n_p \coloneqq concentración\ de\ electrones\ en\ la\ región\ P\ en\ w_p = \frac{n_i^2}{N_A}$ y $p_n \coloneqq$ $concentración\ de\ huecos\ en\ la\ región\ N\ en\ w_n = \frac{n_i^2}{N_D}$.

Capacidades de difusión $[C_d] = F$

$$\mathrm{C_{d_n}} = \frac{\tau_p}{n\,V_{th}} I_p$$

$$\mathrm{C_{d_p}} = \frac{\tau_n}{n\,V_{th}} I_n$$

Capacidad de difusión total $[C_{total}] = F$

$$C_d = C_{d_n} + C_{d_p} = \frac{\tau_T}{n\,V_{th}}(I_D + I_0)$$

Capacidad de juntura $\left[C_j\right] = F$

Es la misma que la estudiada en la juntura PN, no se ve afectada por el coeficiente de emisión n.

En directa, para tensiones mayores a $\frac{\phi_B}{2}$, y en inversa siempre, la capacidad de juntura suele tomarse como constante (o despreciarse) ya que satura al siguiente valor:

$$C_j = \sqrt{2}C_{j_0}$$

Resolución de ejercicios de polarización de diodo

1. Suponer un régimen (directa o inversa)
2. Determinar el valor de la corriente
3. Verificar que el régimen propuesto es el correcto. Si no lo es, regresar al punto 1.

Modelo de orden 0

Es una aproximación utilizada para resolver más fácilmente los problemas de diodo.

Se considera que:

- Directa:
  $V_D = V_D(ON)$
  $I_D > 0$

- Inversa:
  $V_D \neq V_D(ON)$
  $I_D = -I_0 \approx 0$

Modelo de pequeña señal

La tensión total aplicada sobre el diodo $v_D(t)$, en general es la suposición de una tensión continua V_D y una pequeña señal dependiente del tiempo $v_D(t) = V_D + v_d(t)$.

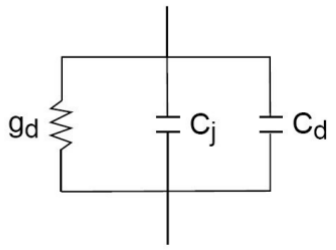
Si $0 < |v_d(t)| < 10mV$, entonces es posible linealizar la exponencial de la corriente $i_d(t)$ en un entorno del punto de reposo, de donde se deduce que la corriente de pequeña señal es:

$$i_d(t) = \frac{I_D + I_0}{n\,V_{th}}\,v_d(t)$$

Luego, se suma a la corriente constante del diodo.

<u>Punto de polarización</u>: Es el punto donde $i_D = I_D + i_d(t)$. Es decir, es el punto en el que la tensión sobre el diodo es igual a la tensión de la fuente continua y la suma de la linealización de la corriente sobre el diodo.

<u>Parámetros de pequeña señal</u>



Conductancia $[g_d] = (\Omega)^{-1}$

$$g_d = \frac{\partial i_D}{\partial v_D}\Big|_{I_D,V_D} = \frac{I_D + I_0}{n\,V_{th}}$$

Resistencia $[r_d] = \Omega$

$$r_d = \frac{1}{g_d}$$

Diodo real

Se debe introducir el coeficiente de emisión n, o factor de idealidad n, puesto que ciertas hipótesis asumidas para hallara la transferencia del diodo en la práctica se dejan de cumplir, como la hipótesis del diodo corto, la de vaciamiento, la de bajo nivel de inyección y la de aproximación de cuasi-equilibrio. Dicho n, puede tomar valores entre 1 y 2.

$$i_D = I_{0_{ideal}} \left(e^{\frac{v_D}{n\, V_{th}}} - 1 \right)$$

Corriente de generación en la zona desierta

$$I_0(gen) = \frac{q\, A\, n_i\, x_d(V)}{\tau_g}$$

$$I_0(real) = I_0(ideal) + I_0(gen)$$

Diodo Zener

$$R_{mín} = \frac{V_{NR,max} - V_Z}{I_{L,mín} + I_{Z,max}}$$

$$R_{max} = \frac{V_{NR,mín} - V_Z}{I_{L,max} + I_{Z,mín}}$$

Constante de tiempo del circuito $[\tau] = s$

$$\tau = RC$$

Recordar que después de τ tiempo la carga en el capacitor habrá alcanzado aproximadamente el 63% de su valor máximo y luego de 5τ el 99,3% de su valor máximo.

Escala logarítmica

Al trabajar con escala logarítmica en base 10, recordar que:

$$\log|I_x| = m\, V_x + I_0$$

Tal que I_d es la corriente del diodo, X_0 una constante, m la pendiente de la recta y V_d la tensión del diodo. Esto sirve para resolver el ejercicio 24 de la guía 3 por ejemplo.

Capacitor

<u>Carga</u>

$$v_c(t) = v_{c_{max}} \left[1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)} \right]$$

<u>Descarga</u>

$$v_c(t) = v_{c_{max}}\, e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)}$$