



Guía de Ejercicios N^o 3: Diodo PN

Constante	Valor
q	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
m_0	$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
k	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV K}$
h	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV s}$
ϵ_0	$8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 88,5 \text{ fF/cm}$
$\epsilon_r(\text{Si})$	11,7
$\epsilon_r(\text{SiO}_2)$	3,9

Parte I: Principio de funcionamiento

- Dibujar de manera cualitativa los perfiles de concentración de portadores a ambos lados de una juntura PN en las siguientes situaciones: i) en equilibrio térmico, ii) en polarización directa, iii) en polarización inversa. ¿Que fenómeno de corriente predomina en cada caso?
- Dado un diodo con una región P dopada con $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ y una región N dopada con $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$:
 - Grafique la concentración de portadores minoritarios ($p_n(x_n)$ y $n_p(x_p)$) en los bordes de la región de vaciamiento en función de la tensión aplicada, para tensiones en el rango $-0,4 \text{ V} < V_D < 0,8 \text{ V}$. Utilice escala lineal para el eje de tensiones y escala logarítmica para el eje de concentraciones.
 - ¿Hasta qué tensión V_D aplicada considera que es válida la hipótesis de bajo nivel de inyección?
- Para un diodo PN de silicio,
 - Considerando que la recombinación se produce sólo en la superficie de contacto, explique por qué en las regiones QNR la distribución de portadores debe ser una función lineal.
 - A partir de la condición de contorno en la superficie de contacto y en los límites de la región SCR, halle la expresión de la corriente I_D vs. V_D . Remarque todas las hipótesis o aproximaciones que utilice.
 - Sabiendo que el area del dispositivo es $A = 0,1 \text{ mm}^2$, $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ y que $N_D \gg N_A$, determine los parámetros constructivos del diodo de modo que para una tensión aplicada $V_D = 650 \text{ mV}$ la corriente I_D sea igual a 10 mA . Aclare todas las aproximaciones o suposiciones que considere necesarias.
 - Dado este diodo N⁺P: ¿Cuál es la corriente predominante en la SCR, la de huecos o la de electrones? Justificar. Dibujar el corte lateral de la juntura indicando el mecanismo de transporte de este portador en cada región del diodo.
- Sobre un diodo PN de juntura simétrica se aplica una tensión $V_D = 0,8 \text{ V}$. Sabiendo que $\phi_B = 0,9 \text{ V}$, $D_p = 2,5 \text{ cm}^2/\text{s}$, $W_n = 10 \mu\text{m}$, sección $25 \mu\text{m}^2$ y despreciando el ancho de la zona desierta calcular la corriente de huecos que circula.
- Se quiere diseñar un diodo con corriente de saturación inversa $I_o = 5 \times 10^{-17} \text{ A}$. El proceso de fabricación empleado da como resultado los siguientes parámetros: $W_p = 0,5 \mu\text{m}$, $W_n = 1 \mu\text{m}$, $N_A = 2,5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $D_n = 5 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ y $D_p = 5 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$.
 - Considerando que $W_p \gg x_p$ y que $W_n \gg x_n$, ¿Cuál debería ser el área A del diodo de modo de obtener $I_o = 5 \times 10^{-17} \text{ A}$? Suponiendo que el diodo tuviera sección cuadrada, ¿Cuánto medirían sus lados?



- b) Verifique que para $V_D = 650 \text{ mV}$ se satisface la hipótesis de bajo nivel de inyección. Para esta tensión aplicada calcule la corriente que circulará por el diodo.
 c) ¿Qué porcentaje de esa corriente se debe a huecos y qué porcentaje a electrones?

6. Se realizan las mediciones de I_D vs. V_D para un diodo PN obteniéndose los siguientes resultados:

$V_D(\text{mV})$	600	660	720	780
$I_D(\text{A})$	3×10^{-6}	3×10^{-5}	3×10^{-4}	3×10^{-3}

- a) Calcule la corriente de saturación I_o de este diodo.
 b) Sabiendo que la tensión de ruptura del diodo es $V_D = -18 \text{ V}$, y que la corriente del diodo para $V_D = -18,5 \text{ V}$ es $I_D = -500 \mu\text{A}$, grafique la curva I_D vs. V_D para el rango $-18,5 \text{ V} < V_D < 0,8 \text{ V}$.
7. Sea un diodo PN ideal con $I_o = 100 \text{ pA}$. Se pide:

- a) Grafique el valor absoluto de la corriente $|I_D|$ de este diodo en escala semilogarítmica para $V_D \in (-0,8 \text{ V}; 0,8 \text{ V})$. Ayuda: tome el logaritmo de la expresión I_D para anular la exponencial. Se debe usar el valor absoluto de la corriente ya que el logaritmo no admite valores negativos. Observe que en directa fuerte esta curva se aproxima a una recta, mientras que en inversa toma un valor constante.
 b) ¿Cuáles son los efectos de la temperatura en la corriente del diodo? ¿Cómo cambia la curva I-V del dispositivo? Grafique cualitativamente el valor absoluto de la corriente $|I_D|$ en escala semilogarítmica para dos temperaturas a elección $T_1 > 300 \text{ K}$ y $T_2 < 300 \text{ K}$. Compare con el resultado anterior.
 c) ¿Cómo cambia la curva I-V del dispositivo cuando se considera un diodo real? Grafique en escala semilogarítmica el modulo de la corriente $|I_D|$ para $n = 1,5$ e $I_{og} = 20 \text{ nA}$ a temperatura ambiente. Compare con lo obtenido anteriormente.

Parte II: Modelo de Orden 0

8. Para el circuito de la figura 1 donde $R = 100 \Omega$, considerando el modelo de orden 0 con $V_{D(ON)} = 0 \text{ V}$ del diodo, grafique para $-5 \text{ V} < V_X < 5 \text{ V}$:

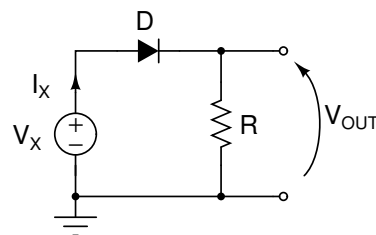


Figura 1

- a) La corriente I_X en función de la tensión V_X .
 b) La tensión V_{OUT} en función de la tensión V_X .
 c) Repita considerando $V_{D(ON)} = 0,7 \text{ V}$.
9. Dado el circuito de la figura 1 con $V_X = 5 \text{ V}$
- a) Hallar la resistencia R tal que la corriente $I_X = 2 \text{ mA}$
- i. Utilizando el modelo de orden 0, considerando $V_{D(ON)} = 0,7 \text{ V}$.
 - ii. Utilizando la ecuación de corriente del diodo sabiendo que $I_o = 0,1 \text{ pA}$.
- b) Suponiendo ahora que $R = 1 \text{ k}\Omega$, hallar la corriente I_X
- i. Utilizando el modelo de orden 0, considerando $V_{D(ON)} = 0,7 \text{ V}$.



- ii. Utilizando la ecuación de corriente del diodo sabiendo que $I_o = 0,1 \text{ pA}$ ¿Es posible hallar una solución analítica en este caso?
- c) En base a los resultados ¿considera que el modelo de orden 0 es una buena aproximación en este caso? ¿Cuál es su utilidad?
10. Para el circuito de la figura 2, los diodos D_1 y D_2 están fabricados en el mismo proceso, con los mismos parámetros, pero con diferente geometría, tal que $A_{D_1} = 2 \times A_{D_2}$. La tensión $V_X = 5 \text{ V}$ y $R = 100 \Omega$. Determine la corriente que circula por cada uno de ellos considerando $V_{D(ON)} = 0,7 \text{ V}$.

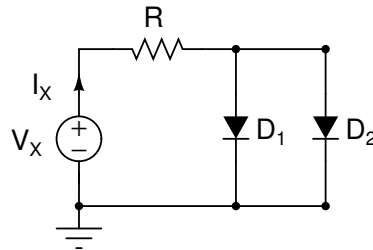


Figura 2

11. Se tiene el circuito de la figura 3, donde los dos diodos se diferencian solamente por haber sido fabricados con distinto material semiconductor, manteniendo iguales entre sí su geometría y niveles de dopaje. De esta manera, se obtienen dos corrientes de saturación inversa distintas para cada uno de ellos: $I_{o_1} = 100 \text{ fA}$ e $I_{o_2} = 10 \text{ fA}$. Hallar la caída de tensión en cada componente si $V_F = 6,3 \text{ V}$ y $R = 1 \text{ k}\Omega$.

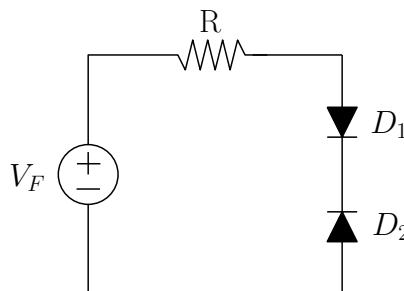


Figura 3

Parte III: Modelo de pequeña señal

12. Para el diodo PN del ejercicio 5 polarizado con una tensión $V_D = 720 \text{ mV}$:
- ¿Es posible aplicar la aproximación de “juntura muy asimétrica”?
 - Considerando que $W_p \gg x_p$ y que $W_n \gg x_n$, calcule el tiempo de transito de los huecos a través de la región n-QNR (τ_{Tp}) y el tiempo de transito de los electrones a través de la región p-QNR (τ_{Tn}).
 - Encuentre los valores numéricos de los elementos del modelo de pequeña señal del diodo (r_d , C_j y C_d).
 - Para esta tensión aplicada, ¿qué capacidad es más significativa, C_j o C_d ?
 - ¿Por qué razón la capacidad C_j es predominante en polarización inversa, mientras que C_d predomina en polarización directa?
13. Un diodo es polarizado con una corriente $I_D = 1 \text{ mA}$. Utilizando el modelo de pequeña señal determine:
- ¿Cuánto cambia la corriente en el diodo si V_D cambia 1 mV ?
 - ¿Cuál debe ser el cambio en la tensión si la corriente varía un 10% ?



14. Se polariza en directa un diodo PN de Silicio utilizando una resistencia de $100\ \Omega$ y una fuente de tensión de $3,3\ \text{V}$. Considerando que la fuente de tensión puede tener una variación de $10\ \text{mV}$, determine la variación en corriente utilizando el modelo de pequeña señal para bajas frecuencias.
15. Se polariza en directa un diodo PN de Silicio utilizando una resistencia de $1\ \text{k}\Omega$ y una fuente de tensión de $5\ \text{V}$. Determinar la máxima variación admisible en la fuente de tensión para que el modelo de pequeña señal sea válido.
16. Un diodo N^+P con $N_D = 1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$, área $A = 0,01\ \text{mm}^2$ y con parámetros $\phi_b = 900\ \text{mV}$ y $\tau_T = 18\ \text{ns}$. Considere el circuito de la figura 4a donde $V_S = 8\ \text{V}$ y

$$v_s(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < t_0 \\ 500\ \text{mV} & \text{si } t \geq t_0 \end{cases}$$

con $t_0 = 1\ \text{ns}$ y $R = 4,7\ \text{k}\Omega$.

- a) Calcular la polarización.
 - b) Hallar el modelo de pequeña señal.
 - c) Encuentre la respuesta temporal de la tensión $v_D(t)$.
 - d) Si V_S disminuye a la mitad, ¿cómo se modifica la respuesta temporal de $v_D(t)$?
17. Considere el circuito de la figura 4b con el diodo del ejercicio 16, con $V_S = 9\ \text{V}$ y una resistencia R .
- a) Calcule el valor de la resistencia de manera que circulen $10\ \text{mA}$.
 - b) Hallar el modelo de pequeña señal ¿Es válido el modelo de pequeña señal si $v_s(t)$ es un escalón de altura $1\ \text{V}$?
 - c) ¿Cuál es el máximo valor de v_s admisible para que el modelo de pequeña señal sea válido?
 - d) Grafique $v_D(t)$.
18. Se tiene un diodo de juntura P^+N del cual se conoce que $I_s = 1\ \text{pA}$, $\tau_{Tn} = 12\ \text{ns}$, $\tau_{Tp} = 18\ \text{ns}$, $C'_{j0} = 31,4\ \text{nF/cm}^2$, $\phi_B = 840\ \text{mV}$, $A = 10\ \mu\text{m}^2$. Éste se conecta a un circuito como muestra la figura 4a con $R = 330\ \Omega$.
- a) Halle el modelo de pequeña señal para $V_S = \{-5\ \text{V}; 5\ \text{V}\}$.
 - b) Repetir el punto anterior pero considerando un factor de idealidad $n = 1,5$ ¿Qué parámetros se ven afectados por este factor?
 - c) Grafique $v_D(t)$ para los casos anteriores cuando se aplica escalón de tensión $v_s(t)$ de $200\ \text{mV}$.

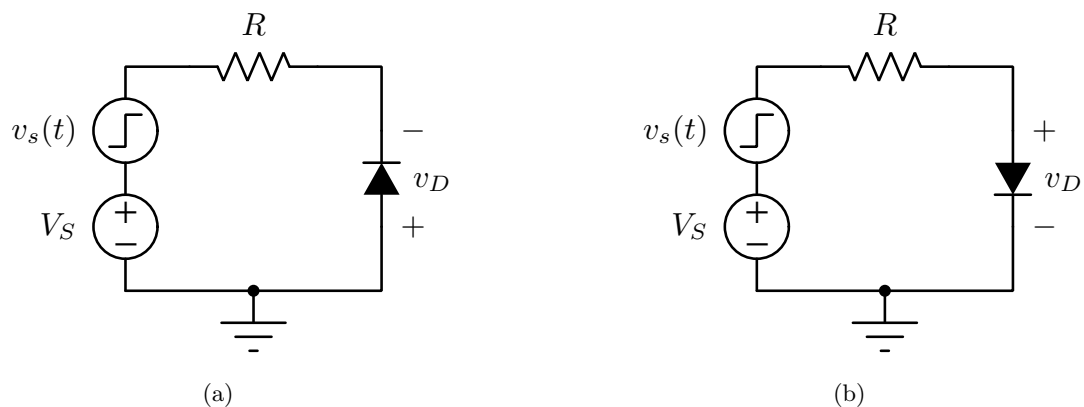


Figura 4



Parte IV: Diodos zener

19. Dado el circuito de la figura 5, donde $V_Z = 6,2\text{ V}$, $V_{IN} = 10\text{ V}$, $I_{R(max)} = 241\text{ mA}$, $I_{R(min)} = 60,5\text{ mA}$.
- Explique cómo funciona un diodo Zener. Realice una curva I-V de la transferencia del mismo mostrando sus parámetros característicos.
 - Calcule un valor de R posible para el caso en que la salida tiene una carga de $100\ \Omega$. ¿Cuál es la mínima y la máxima R que se le puede colocar al circuito?

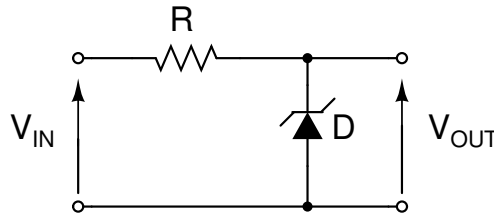


Figura 5

20. Se implementa una referencia de tensión con un diodo zener de $3,9\text{ V}$, $|I_{z(min)}| = 1\text{ mA}$, $|I_{z(max)}| = 5\text{ mA}$ y una resistencia de $330\ \Omega$. Conociendo que la carga es una resistencia de $890\ \Omega$ hallar el rango de valores de tensión no regulada para los cuales puede operar (V_{IN-min} , V_{IN-max}).
21. Se implementa una referencia de tensión con un diodo zener de $5,6\text{ V}$, $|I_{z(min)}| = 1\text{ mA}$, $|I_{z(max)}| = 10\text{ mA}$, una resistencia de $220\ \Omega$ y una fuente de 9 V . Hallar el rango de valores de resistencias que pueden cargar a esta referencia (R_{L-min} , R_{L-max}).

Parte V: Ejercicios integradores

22. Se tiene un diodo de juntura PN **simétrica** basado en silicio del cual se conocen los siguientes datos: $A = 0,1\text{ mm}^2$; $W_p = 10\ \mu\text{m} \gg x_p$; $W_n = 10\ \mu\text{m} \gg x_n$; $C_{j0} = 76\text{ pF}$; $\tau_T = 20\text{ ns}$ y $V_{D(ON)} = 0,7\text{ V}$. Se realizan dos mediciones de la curva $I-V$ del diodo a temperatura ambiente y se presentan en la siguiente tabla:

$V_D[\text{V}]$	-1,2	0,65
$I_D[\text{A}]$	$6,5 \times 10^{-15}$	516×10^{-6}

- Determinar el valor de la corriente I_0 , las concentraciones N_A y N_D y el valor de ϕ_B .
 - Dicho diodo se **polariza en directa** mediante una fuente de 5 V y una resistencia de $470\ \Omega$. Obtener los valores de polarización, dibujar y calcular el modelo de pequeña señal del mismo. Indicar y justificar cuál es el efecto capacitivo que predomina en esta condición.
23. En base al circuito de la figura 6 determinar el rango de valores de R_1 y R_2 para que la corriente que atraviesa al diodo D ($V_{D(ON)} = 0,7\text{ V}$) sea de $I_D = 1\text{ mA}$. Otros datos: $V_{IN} = 7,5\text{ V}$; $|V_Z| = 5,6\text{ V}$; $|I_{Zmin}| = 2\text{ mA}$; $|I_{Zmax}| = 6\text{ mA}$; $T = 300\text{ K}$.

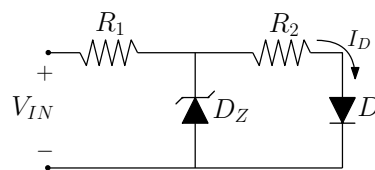


Figura 6



24. Se tiene un diodo de juntura PN⁺ del cual se conocen los siguientes datos: $A = 1 \text{ mm}^2$, $\phi_B = 716 \text{ mV}$, $W_p = 100 \mu\text{m} \gg x_p$, $W_n = 100 \mu\text{m} \gg x_n$. Además, se sabe que el dopaje del lado menos dopado es $N_A < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, de manera que en esa región se puede aproximar $\mu_n \approx 1400 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ y $\mu_p \approx 485 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$. Se realiza una medición de la curva I-V del diodo a temperatura ambiente y se grafican los resultados en la figura 7 en escala semilogarítmica (**atención:** base 10), en donde se conoce $m = 13 \text{ V}^{-1}$, $P_x = (0,65 \text{ V}; 1,64 \text{ mA})$ e $I_{0\text{-real}} = 8,1 \text{ nA}$.
- Calcular el coeficiente de idealidad, la corriente de saturación ideal $I_{0\text{-ideal}}$, las concentraciones de impurezas y explicar cómo se modificaría la curva I_D vs V_D si se aumenta la temperatura. (Ayuda: $\log_b(a) = \log_c(a)/\log_c(b)$).
 - Obtener los parámetros del modelo de pequeña señal (r_d , C_j y C_d) en el punto P_x .

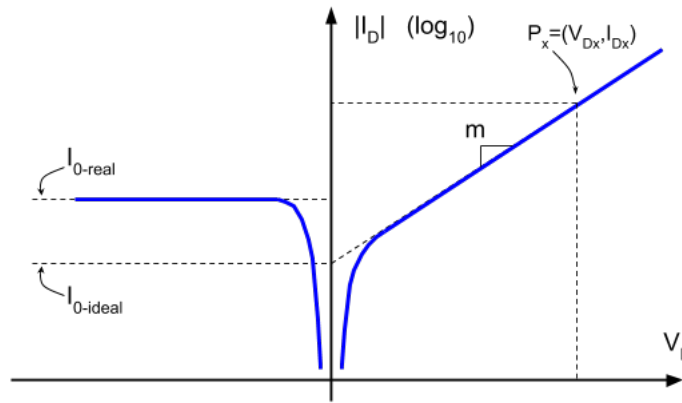


Figura 7