



Guía de Ejercicios N° 3: Diodo PN

Datos generales: $\varepsilon_0 = 88.5 \times 10^{-15} \text{ F/cm}$, $\varepsilon_r(\text{Si}) = 11.7$, $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $\phi(n, p = n_i) = 0$.

Parte I: Repaso de juntura PN

1. Para una juntura PN simétrica con $\phi_B = 0.9 \text{ V}$, calcular C'_{j0} , N_D y N_A .
2. Se conoce que la capacidad de una juntura P^+N es $C'_{j0} = 29 \text{ nF/cm}^2$ y que $\phi_B = 840 \text{ mV}$. Hallar ϕ_n , ϕ_p , N_A y N_D .
3. Dada una juntura PN^+ con $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $A = 0.2 \text{ mm}^2$ y $C_{j0} = 21 \text{ pF}$, hallar N_D y ϕ_B .
4. En una juntura fuertemente asimétrica P^+N con $\phi_B = 870 \text{ mV}$, $C'_{j0} = 60 \text{ nF/cm}^2$, ¿cuánto valen aproximadamente los niveles de dopaje N_D y N_A ?
5. Conociendo que para una juntura muy asimétrica $C'_j(V_R = 10 \text{ V}) = 3.17 \text{ nF/cm}^2$ y $C'_j(V_R = 5 \text{ V}) = 4.33 \text{ nF/cm}^2$, hallar el nivel del lado menos dopado.
6. Dada una juntura P^+N de silicio a 300K . Asuma que la intersección de la curva de la figura 1 con el eje horizontal corresponde a un potencial de juntura de 0.855 V y que la pendiente de la recta es $10^{15} (\text{F/cm}^2)^{-2}/\text{V}$. Calcule la concentración de impurezas N_A y N_D de la juntura.

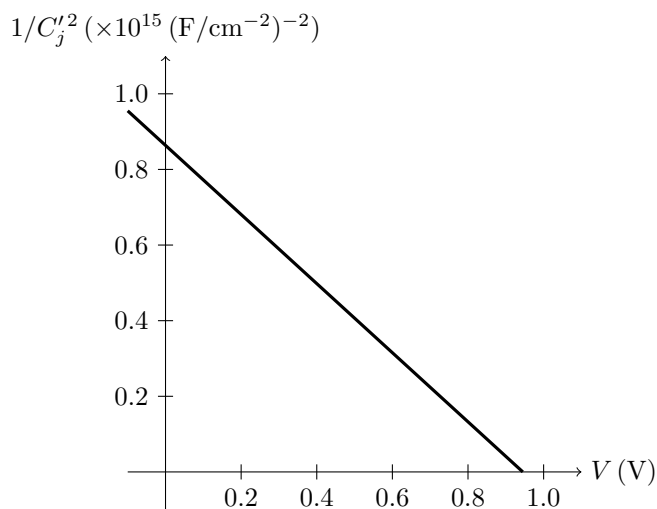


Figura 1

7. Diseñe una juntura PN de silicio con un área de $A = 5.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ tal que a 300K y para una polarización inversa de $V_R = 1.2 \text{ V}$ verifique que el 10% del total de la zona de carga espacial esté en la región N, y que su capacidad de juntura sea 3.5 pF .
 - a) Determine las concentraciones N_D y N_A necesarias.
 - b) Determine el potencial de juntura resultante.
8. Sea una juntura muy asimétrica P^+N , se tienen las siguientes mediciones de capacidad en polarización inversa:

$V_R(\text{V})$	$C'_j(\text{nF/cm}^2)$
1	0.72
2	0.56
3	0.48



- a) ¿Por qué disminuye el valor de la capacidad a medida que aumenta la tensión inversa aplicada?
- b) Obtenga las concentraciones de impurezas N_A y N_D y el potencial de built-in (ϕ_B).

Parte II: Principio de funcionamiento y polarización

9. Dado un diodo con una región P dopada con $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ y una región N dopada con $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$:
 - a) 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.
 - b) ¿Hasta qué tensión V_D aplicada considera que es válida la hipótesis de bajo nivel de inyección?
10. 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: $W_p = 0.5 \mu\text{m}$, $W_n = 1.0 \mu\text{m}$, $N_A = 2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 4.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $D_n = 5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ y $D_p = 5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.
 - a) 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?
 - d) Recordando la relación de Einstein, y considerando que en el lado P los portadores minoritarios que se difunden son los electrones, y que en el lado N los portadores minoritarios que se difunden son los huecos, explique a partir del gráfico de movilidad vs. concentración de dopantes por qué en este caso $D_n = D_p$.
11. 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 $-18.5 \text{ V} < V_D < 0.8 \text{ V}$.
12. Para un diodo PN de silicio,
 - a) 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.
 - b) 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.
 - c) Sabiendo que $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 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.
13. 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.
14. ¿Cuáles son los efectos de la temperatura en la corriente del diodo? ¿Cómo cambia la curva I-V del dispositivo?
15. Para el circuito de la figura 2 donde $R = 100 \Omega$, considerando el modelo de orden 0 con $V_{D(ON)} = 0 \text{ V}$ del diodo, grafique para $-5 \text{ V} < V_X < 5 \text{ V}$:

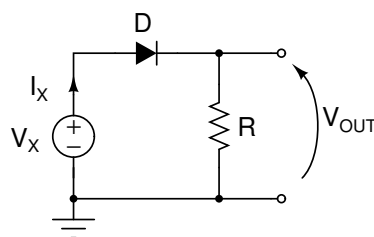


Figura 2

- La corriente I_X en función de la tensión V_X .
 - La tensión V_{OUT} en función de la tensión V_X .
 - Repita considerando $V_{D(ON)} = 0.7 \text{ V}$.
 - Repita considerando ahora el modelo de orden 1 del diodo con $V_{D(ON)} = 0.7 \text{ V}$ y $R_D = 5 \Omega$.
16. Para el circuito de la figura 3, 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 $V_{D(ON)} = 0.7 \text{ V}$.

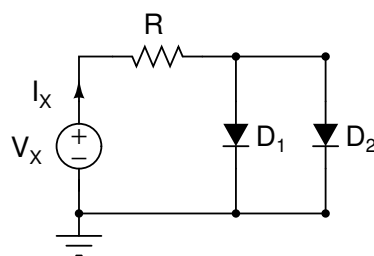


Figura 3

17. Un estudiante de ingeniería perdió el cargador de su celular, cuya tensión de salida era de 2.1 V . El estudiante intenta comprar un cargador nuevo, pero no encuentra ninguno con tensión de salida menor a 3 V . Entonces, este estudiante decide usar sus conocimientos de electrónica y construye el circuito de la figura 4 donde los tres diodos son idénticos, $V_{CH} = 3 \text{ V}$, $R = 100 \Omega$ y $V_{D(ON)} = 0.7 \text{ V}$. Asumiendo $I_{OUT} = 0$:
- Determine qué corriente de saturación inversa (I_o) deben tener los diodos para que el circuito funcione correctamente.
 - Calcule la nueva tensión de salida si la tensión del cargador es de hecho 3.1 V .
18. (Rectificador de media onda) Para el circuito de la figura 2 donde $R = 100 \Omega$, considerando el modelo de orden 0 del diodo y $V_{D(ON)} = 0 \text{ V}$, y considerando que ahora $V_X(t) = V_0 + v \sin(2\pi f t)$ con $V_0 = 0 \text{ V}$, $v = 4 \text{ V}$, $f = 1 \text{ kHz}$:
- Grafique en función del tiempo la tensión de salida $V_{OUT}(t)$.
 - Grafique en función del tiempo la corriente $I_X(t)$.
 - Repita para $V_0 = \pm 0.5 \text{ V}$, $\pm 1 \text{ V}$, $\pm 4 \text{ V}$.
 - Repita considerando $V_{D(ON)} = 0.7 \text{ V}$.
19. (Rectificador de onda completa) Para el circuito de la figura 5 donde $R_L = 100 \Omega$, y considerando que todos los diodos son idénticos, V_{IN} es la tensión de línea (220 V_{eff} , 50 Hz) y $R_L = 100 \Omega$:
- Grafique en función del tiempo la tensión sobre cada uno de los diodos.
 - Grafique en función del tiempo la corriente sobre R_L .
 - Grafique en función del tiempo la tensión de salida V_{OUT} .

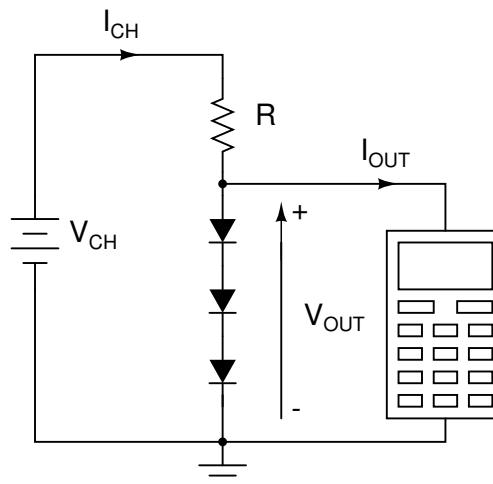


Figura 4

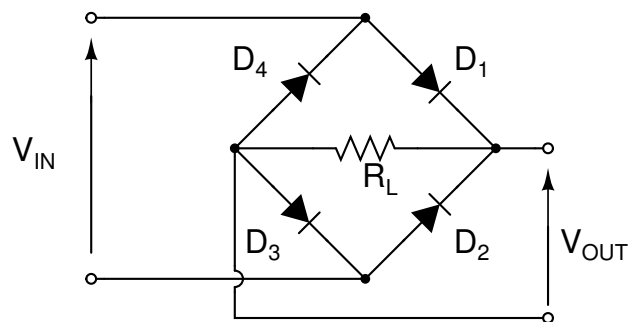


Figura 5

Parte III: Modelo de pequeña señal

20. Un diodo es polarizado con una corriente $I_D = 1 \text{ mA}$.
 - a) Determine cuánto cambia la corriente en el diodo si V_D cambia 1 mV .
 - b) Determine cuál debe ser el cambio en la tensión si la corriente varía un 10% .
21. Se polariza en directa un diodo PN de Silicio utilizando una resistencia de 100Ω y una fuente de tensión de 1 V . Considerando que la fuente de tensión puede tener una variación de 10 mV , determine la variación en corriente utilizando el modelo de pequeña señal para bajas frecuencias.
22. Se polariza en directa un diodo PN de Silicio utilizando una resistencia de $1 \text{ k}\Omega$ y una fuente de tensión de 5 V . Determinar a partir del modelo de pequeña señal para bajas frecuencias, cuál es la máxima variación que puede tener la fuente de tensión si se admite una variación del 1% en la corriente del diodo.
23. Repetir el ejercicio anterior, pero determinando la máxima variación admisible en la fuente de tensión para que el modelo de pequeña señal sea válido.
24. Para el diodo PN del ejercicio 10 polarizado con una tensión $V_D = 720 \text{ mV}$,
 - a) ¿Es posible aplicar la aproximación de “juntura muy asimétrica”?
 - b) 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}).
 - c) Encuentre los valores numéricos de los elementos del modelo de pequeña señal del diodo (r_d , C_j y C_d).



- d) Para esta tensión aplicada, ¿qué capacidad es más significativa, C_j o C_d ?
- e) ¿Por qué razón la capacidad C_j es predominante en polarización inversa, mientras que C_d predomina en polarización directa?
25. Se polariza en directa un diodo PN utilizando una resistencia de $1\text{ k}\Omega$ y una fuente de tensión de 3 V . Hallar el τ_{RC} asociado al nodo del ánodo del diodo cuando se aplica un pequeño incremento de tensión sobre la fuente de tensión. Datos: $C_{j0} = 1.2\text{ fF}$, $\tau_T = 12\text{ ns}$.
26. Un diodo N^+P con $N_D = 10^{19}\text{ cm}^{-3}$, 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 6a 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) ¿Cuál es la corriente predominante, la de huecos o la de electrones?
- d) Encuentre la respuesta temporal de la tensión $v_D(t)$.
- e) Si V_S disminuye a la mitad, ¿cómo se modifica la respuesta temporal de $v_d(t)$?
27. Considere el circuito de la figura 6b, con $V_S = 9\text{ V}$ y una resistencia de valor a elección.
- a) Calcule el valor de la resistencia de manera que circulen 10 mA .
- b) ¿Es válido el modelo de pequeña señal si $v_s(t)$ es un escalón de altura 1 V ?
- c) Identificar y explicar el fenómeno de capacidad que predomina en este caso.
- d) Grafique $v_D(t)$.
28. Se tiene un diodo de juntura P^+N del cual se conoce que $I_s = 1\text{ pA}$, $\tau_{Tn} = 12\text{ ns}$, $\tau_{Tp} = 18\text{ ns}$, $C'_{j0} = 31.4\text{ nF/cm}^2$ y $A = 10\text{ }\mu\text{m}^2$. Este se conecta a un circuito como muestra la figura 6a con $R = 330\text{ }\Omega$.
- 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 $n = 1.5$.
- c) Grafique $v_d(t)$ para los casos anteriores cuando se aplica escalón de tensión $v_s(t)$ de 200 mV .

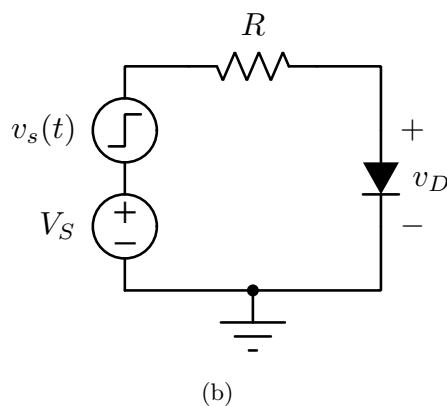
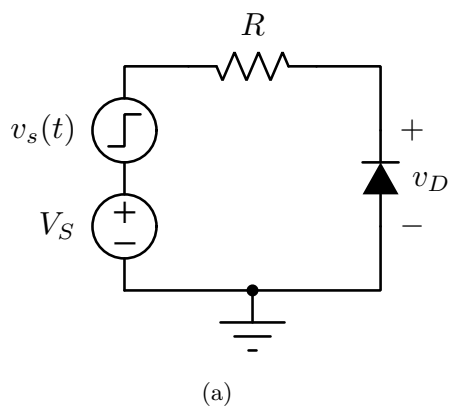


Figura 6



Parte IV: Diodos zener

29. (Opcional) Explique qué es un diodo zener, cómo funciona, cuáles son sus características constructivas para que funcione como tal.
30. (Opcional) Nombre aplicaciones típicas que utilicen diodos zener.
31. Realice una curva I-V de la transferencia de un diodo zener mostrando en la misma sus parámetros característicos.
32. Dado el circuito de la figura 7, donde $V_Z = 6.2\text{ V}$, $V_{IN} = 10\text{ V}$, $I_{R(max)} = 241\text{ mA}$, $I_{R(min)} = 60,5\text{ mA}$:

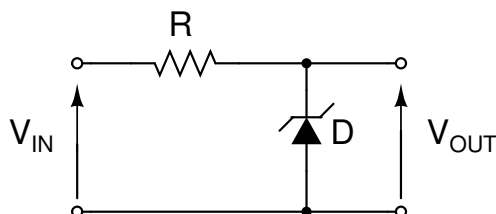


Figura 7

- a) Explique cómo funciona un diodo Zener.
 - b) Calcule un valor de R posible para el caso en que la salida tiene una carga de $10\ \Omega$. ¿Cuál es la mínima y la máxima R que se le puede colocar al circuito?
33. Dado el circuito de la figura 8 siendo $|I_{z,min}| = 1\text{ mA}$, $|I_{z,max}| = 5\text{ mA}$, $V_{NR,min} = 8\text{ V}$ y $V_{NR,max} = 10\text{ V}$, hallar el rango de valores posibles de R_L : ($R_{L,min}$, $R_{L,max}$).

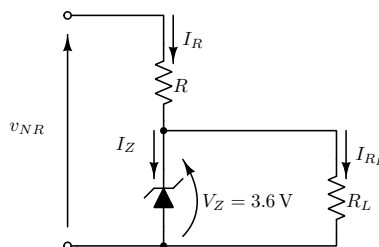


Figura 8

34. 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 ($V_{IN,min}$, $V_{IN,max}$).
35. 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 ($R_{L,min}$, $R_{L,max}$).
36. Se desea utilizar un diodo zener para obtener una tensión constante de $5,6\text{ V}$ a partir de una tensión no regulada $V_{NR} = 10\text{ V} \pm 2\text{ V}$. Hallar el valor máximo y mínimo de la resistencia necesaria considerando que en paralelo al zener se conecta una $R_L = 10\text{ k}\Omega$ y que $I_{Zmin} = 2\text{ mA}$, $I_{Zmax} = 8\text{ mA}$.