



## Guía de Ejercicios N<sup>o</sup> 3: Diodo PN

Constante	Valor
$q$	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
$m_0$	$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
$k$	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV K}$
$h$	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV s}$
$\epsilon_0$	$8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 88,5 \text{ fF/cm}$
$\epsilon_r(\text{Si})$	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  $10 \text{ mA}$ . Aclare todas las aproximaciones o suposiciones que considere necesarias.
  - Dado este diodo N<sup>+</sup>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
$I_D(\text{A})$	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-3}$

- 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  $-5 \text{ V} < V_X < 5 \text{ V}$ :

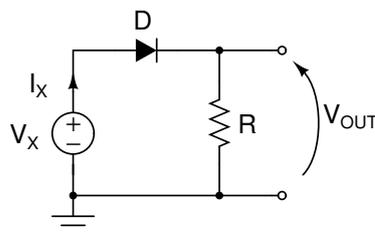


Figura 1

- 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  $V_{D(ON)} = 0,7 \text{ V}$ .

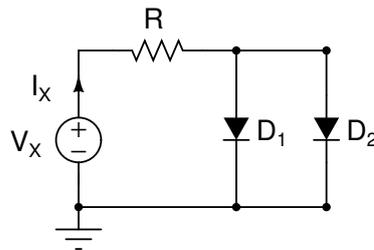


Figura 2

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  $R = 1 \text{ k}\Omega$ .

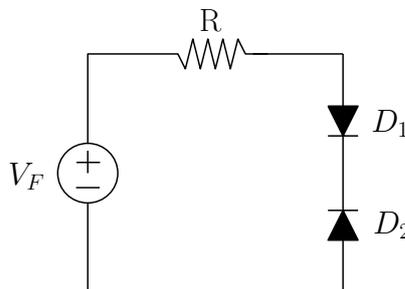


Figura 3

### 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 ( $\tau_{Tp}$ ) y el tiempo de transito de los electrones a través de la región p-QNR ( $\tau_{Tn}$ ).
  - 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  $1 \text{ mV}$ ?
  - ¿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  $200\ \text{mV}$ .

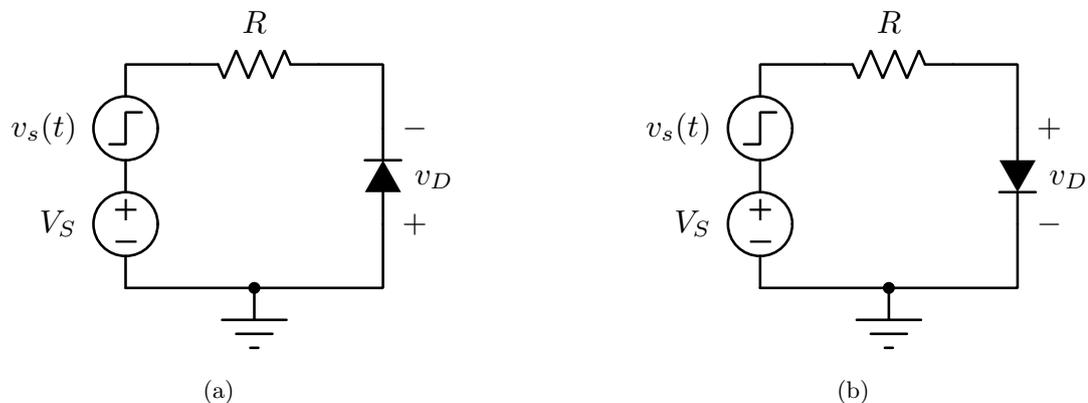


Figura 4



### 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?

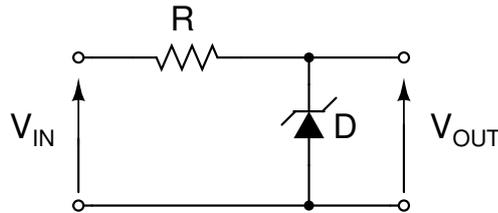


Figura 5

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  $9\text{ V}$ . 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
$I_D[\text{A}]$	$6,5 \times 10^{-15}$	$516 \times 10^{-6}$

- Determinar el valor de la corriente  $I_0$ , las concentraciones  $N_A$  y  $N_D$  y el valor de  $\phi_B$ .
  - Dicho diodo se **polariza en directa** mediante una fuente de  $5\text{ V}$  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:  $V_{IN} = 7,5\text{ V}$ ;  $|V_Z| = 5,6\text{ V}$ ;  $|I_{Zmin}| = 2\text{ mA}$ ;  $|I_{Zmax}| = 6\text{ mA}$ ;  $T = 300\text{ K}$ .

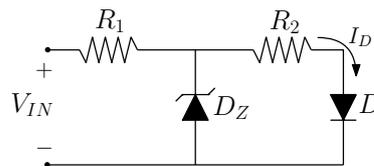


Figura 6



24. Se tiene un diodo de juntura PN<sup>+</sup> 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  $P_x$ .

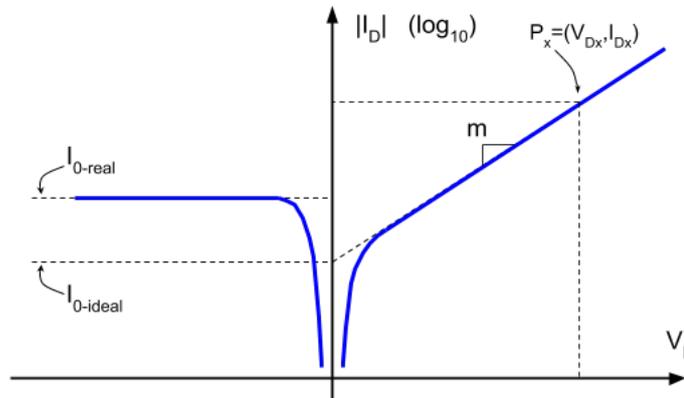


Figura 7