

Componentes y Diseño Electrónico

Basil M. Al-Hadithi

Francisco J. Gabiola

ACCI
Asociación Cultural y Científica Iberoamericana

COMPONENTES

Y

DISEÑO ELECTRÓNICO

COMPONENTES

Y

DISEÑO ELECTRÓNICO

Basil M. Al-Hadithi
Doctor Ingeniero Industrial

Francisco J. Gabiola
Doctor Ingeniero de Telecomunicación

2018

ACCI
Asociación Cultural y Científica
Iberoamericana

ACCI ediciones (Asociación cultural y científica iberamericana) apoya la protección del *copyright.*

El *copyright* estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Gracias por comprar una edición autorizada de este libro y por respetar las leyes del *copyright* al no reproducir, escanear ni distribuir ninguna parte de esta obra por ningún medio sin permiso.

© Obra: Componentes y Diseño Electrónico

Primera edición: Mayo 2018

© Autores: Basil M. Al-Hadithi y Francisco J.Gabiola

ISBN: 978-84-17267-93-3

Maquetación: Basil M. Al-Hadithi
Diseño cubierta: Álvaro Cabrero Bertram

© Editado por ACCI ediciones // www. acciedicciones.com

Gestión, promoción y distribución: Vision Netware S.L.
c/ San Ildefonso 17, local, 28012 Madrid. España.
Tlf: 0034 91 5273678 // Email: pedidos@visionnet-libros.com

Disponible en papel y ebook en las principales librerias físicas y online.

Las opiniones expresadas en este trabajo son exclusivas del autor. No reflejan necesariamente las opiniones del editor, que queda eximido de cualquier responsabilidad derivada de las mismas.

Diríjase a CEDRO (Centro Español de derechos Reprográficos, www.cedro.es o por teléfono 91702 1970) si necesita fotocopiar, escanear o utilizar algún fragmento de esta obra. Gracias por comprar una edición autorizada de esta obra y por respetar las leyes del *copyrigth*.

Contenido

Prólogo VII

1. Circuitos con Diodos **1**
1.1. Introducción 1
Ejercicios Resueltos 5

2. Circuitos de Polarización y Amplificación **95**
2.1. Introducción 95
Ejercicios Resueltos 99

3. Amplificadores Diferenciales y Fuentes de Corriente **223**
3.1. Introducción 223
Ejercicios Resueltos 225

4. Amplificador en Alta Frecuencia **297**
4.1. Circuito Equivalente en Pequeña Señal del Transistor Bipolar . . . 297
4.2. Especificaciones de la Respuesta en Frecuencia 298
4.3. Circuito Equivalente en Pequeña Señal del FET 299
4.4. Teorema de Miller 302
4.5. Método de las Constantes de Tiempo en Circuito Abierto: CTCA . 305
Ejercicios Resueltos 307

5. Realimentación en Circuitos Electrónicos **381**
5.1. Función de Transferencia de los Sistemas Realimentados 381
5.2. Topologías, Parámetros Privilegiados 382
5.2.1. Parámetros Característicos de Cuadripolos 382
5.2.2. Topología Paralelo-Paralelo 384
5.2.3. Topología Serie-Serie 385
5.2.4. Topología Paralelo-Serie 386
5.2.5. Topología Serie-Paralelo 386

5.3. Efectos de Carga entre el Amplificador Directo y el Bloque de Realimentación . . . 387
5.3.1. Topología Paralelo-Paralelo . . . 387
5.4. Efecto de la Realimentación sobre las Impedancias de Entrada y Salida . . . 389
5.4.1. Impedancia de Entrada . . . 390
5.4.2. Impedancia de Salida . . . 391
5.5. Parámetros Privilegiados. Método Gráfico . . . 394
5.6. Pasos a Seguir en la Resolución Gráfica . . . 402
5.6.1. Modificación de las Impedancias . . . 405
5.7. Efecto de la Impedancia Interna de la fuente y de la Carga . . . 405
5.7.1. Justificación de la Inclusión de la Carga en el Analisis. Para el caso de Salida Paralelo. . . . 405
5.7.2. Justificación de la Inclusión de la Carga en el Analisis. Para el caso de Salida Serie. . . . 409
Ejercicios Resueltos . . . 412

6. Respuesta en Frecuencia de Amplificadores Realimentados 493
6.1. Criterio de Nyquist de Estabilidad . . . 493
6.1.1. Consideraciones sobre la Representación de la Ganancia de Lazo Abierto $\acute{A}(\omega)\beta$ . . . 493
6.2. Compensación . . . 499
6.2.1. Compensación por Polo Dominante . . . 501
6.2.2. Compensación por Polo-Cero . . . 506
Ejercicios Resueltos . . . 510

7. Osciladores 575
7.1. Frecuencia de Oscilación . . . 579
7.2. Cálculo del Oscilador . . . 579
7.2.1. Cálculo de la Ganancia del Lazo . . . 579
7.3. Osciladores por Desplazamiento de Fase . . . 580
7.4. Oscilador en Puente de Wien . . . 582
7.5. Oscilador Colpitts . . . 583
7.6. Circuito Oscilador de Cristal . . . 586
7.7. Análisis de Osciladores LC. Método de las Tres Impedancias . . . 588
Ejercicios Resueltos . . . 591

8. Filtros Analógicos-Análisis y Síntesis 643
8.1. Función de Transferencia . . . 643
8.2. Respuesta en Frecuencia . . . 644

8.3. Función Atenuación 644
8.4. Filtros, Tipos 644
8.4.1. Filtro Paso Bajo 645
8.4.2. Filtro Paso Alto 645
8.4.3. Filtro Paso Banda 645
8.4.4. Filtro Banda Eliminada 645
8.4.5. Filtro Paso Todo 645
8.5. Banda de Paso y Banda Atenuada. Orden de un Filtro 645
8.6. Diseño de Filtros 646
8.6.1. Especificaciones: 646
8.6.2. Función de Transferencia: 646
8.6.3. Circuito: 646
8.7. Filtros de Primer Orden 647
8.7.1. Expresión General 647
8.8. Filtros de Segundo Orden 648
8.8.1. Expresión General 648
8.8.2. Calculo de Los Polos de la Función de Transferencia 648
8.9. Diseño de Filtros por Teoría de Aproximación 652
8.10. Especificaciones de Características: 653
8.11. Parámetros Discriminación y Selectividad 653
8.12. Función Característica 654
8.12.1. Filtro de Butterworth: 654
8.12.2. Filtro de Tchebycheff: 655
8.13. Otro Tipo de Especificaciones 655
Ejercicios Resueltos 656

Índice Alfabético **701**

Prólogo

Son muchas las novedades que el EEES está incorporando en el proceso formativo de la oferta educativa de las Universidades. El fundamento de la adquisición de competencias persigue favorecer la capacidad real del estudiante para desempeñar las tareas propias de una actividad profesional que beneficie su incorporación al mundo laboral. Es por ello que cada vez sea más habitual la búsqueda de compatibilidad entre actividad laboral y continuidad de estudios. El aprendizaje "blended"(B-Learning) está siendo aceptado como la forma más acertada de satisfacer esta demanda y las actividades formativas no presenciales imponen la elaboración de unos contenidos de calidad que favorezcan la adquisición de competencias por parte de este nuevo perfil de estudiante. Por tanto ya no es suficiente con disponer de contenidos sino que es necesario seguir una estrategia en la que la didactización de los mismos desempeña un papel fundamental.

Como acercamiento a este planteamiento, Componentes y Diseño Electrónico es una novedosa versión integradora de contenidos sobre componentes y circuitos electrónicos que los autores han ido elaborando y publicando a lo largo de estos años. La orientación didáctica se percibe desde el propio prólogo donde se ubica con concreción al estudiante antes de enfrentarse a los contenidos propiamente dichos. Cada uno de los temas hace énfasis en esta idea orientadora por lo que podemos considerar este libro como el precursor de una didactización entendida como adecuación multimedia para su seguimiento a través de una plataforma.

Para la resolución de los ejercicios propuestos se recurre a las técnicas de análisis procedentes de la teoría de circuitos pero sin entrar en la justificación de dicha teoría, simplemente se aplica. De ahí que al usuario de este libro se le suponga no solo conocedor de la teoría de circuitos; deberá además tener cierta soltura en las técnicas básicas del análisis circuital.

Los contenidos están agrupados en ocho grandes temas: Diodos y circuitos con diodos, Circuitos de polarización y amplificación, Amplificadores diferenciales, Respuesta de los amplificadores a la alta frecuencia, Realimentación, Respuesta en frecuencia de amplificadores realimentados, Osciladores y finalmente Filtros.

Estos temas pretenden cubrir con casos prácticos los grandes temas en los que suelen articularse los Contenidos de Electrónica Analógica que se imparte en las ingenierías.

El Tema 1 está orientado al diseño de dispositivos semiconductores de unión pn y más concretamente al diseño de diodos y de circuitos que contienen este componente. Se plantean circuitos rectificadores, recortadores, limitadores,..., en definitiva, circuitos de gran señal, por lo que al diodo se le modela como interruptor en sus tres posibles aproximaciones. Se incluyen también ejercicios con diodos zéner, siendo utilizado en general como dispositivo regulador.

En el Tema 2 se encontrarán ejercicios basados en el transistor bipolar, el FET de unión, el MOSFET de deplexión y el MOSFET de enriquecimiento. Se trata de circuitos amplificadores monoetapa y multietapa donde se practica tanto la polarización como el análisis de señal. En el caso de la polarización se hace hincapié en el estudio analítico así como en el gráfico. Los FET se utilizan tanto en zona activa como en zona óhmica, si bien en este último caso se hace la aproximación de considerarlas resistencias lineales en todo el margen de funcionamiento.

Respecto a los amplificadores multietapa, si bien se hace más énfasis en etapas acopladas en continua, también se plantean amplificadores acoplados en alterna. Otro tema de interés que el estudiante encontrará en este capítulo es la respuesta de los amplificadores a la baja frecuencia. Aprovechando los condensadores de acoplo del generador al amplificador y del amplificador a la carga y aplicando el Método de las Constantes de Tiempo en Cortocircuito se procede a la estimación de la frecuencia de corte inferior de varios circuitos amplificadores.

En el Tema 3 se trata en exclusiva el amplificador diferencial. A pesar de ser un amplificador multietapa que han sido tratados en el tema anterior, dada su importancia como elemento básico sobre el que se construyen los circuitos integrados, se ha considerado oportuno darle un tratamiento separado. Se trata de circuitos amplificadores diferenciales polarizados con fuentes de corriente en configuraciones discretas e integradas. El método de resolución se apoya en el Teorema de Bartlett que permite analizar únicamente medio circuito, por lo que acaba llegándose a la conclusión de que los análisis circuitales en pequeña señal son muy similares a los realizados en los ejercicios del capítulo anterior.

El Tema 4 se centra en el análisis de amplificadores a alta frecuencia. Para su resolución se parte de los circuitos equivalentes en pequeña señal-alta frecuencia de los transistores y se recurre al teorema de Miller y al Método de las Constantes de Tiempo en Circuito Abierto, que de una forma aproximada permite hacer una estimación de las limitaciones en ancho de banda que presentan los amplificadores. El lector podrá encontrar analizadas con detalle las configuraciones de amplificadores más habituales y comprenderá que la razón de ser de algunas de

ellas es justamente conseguir un mayor ancho de banda.

En el Tema 5 se presentan técnicas para analizar circuitos amplificadores realimentados negativamente. Partiendo de una breve descripción de las distintas topologías que pueden presentar estos circuitos y de un pequeño recordatorio de teoría cuadripolar se determinan los parámetros privilegiados que facilitarán la resolución. El análisis de estos circuitos se realiza bajo la consideración de que se encuentran trabajando a frecuencias medias.

En el Tema 6 el estudiante encontrará aplicaciones en las que se analiza la influencia de la realimentación en la respuesta en frecuencia de los amplificadores. Se plantea el dilema entre potenciar la ganancia o hacerlo con el ancho de banda. A partir del criterio de estabilidad de Nyquist se evoluciona hacia un método para determinar la estabilidad de un amplificador basado en los diagramas de Bode, mucho más próximo a las técnicas del diseño electrónico. Se analizan técnicas de compensación empleadas en los amplificadores integrados que garantizan cualquier tipo de realimentación.

En el Tema 7 se tratan los circuitos osciladores. De los distintos planteamientos con los que se puede analizar este tipo de circuitos, se ha optado por aquel que supone retomar el concepto de estabilidad en circuitos realimentados, es decir, los osciladores se considerarán circuitos realimentados, pero en este caso positivamente. Se analizan los osciladores más populares y se introduce una técnica de análisis para los osciladores LC basado en el método de las tres impedancias que facilita notablemente el diseño.

Finalmente, el Tema 8 está dedicado al análisis y diseño de filtros analógicos. Filtros paso bajo, paso alto, paso banda y banda eliminada, filtros de primer y segundo orden. Se verá cómo aplicar la teoría de la aproximación para obtener funciones de transferencia de filtros a partir de las especificaciones definidas de forma gráfica. Se realizarán implementaciones concretas de filtros Butterworth, Tchebycheff, y Sallen-Key.

Los autores
Madrid, Mayo de 2018

Capítulo 1

Circuitos con Diodos

1.1. Introducción

Los ejercicios que se proponen en este primer capítulo se basan en circuitos con diodos. En general, se trata de rectificadores y recortadores, es decir, circuitos de gran señal, por lo que al diodo debe modelarse como interruptor en sus tres posibles aproximaciones. Según este modelo el diodo queda caracterizado con *la tensión umbral* (representada por una fuente de tensión continua V_γ) y la *resistencia interna en directa* (representada por una resistencia R_D). Puesto que tensión umbral y resistencia interna dependen de parámetros tecnológicos del diodo, se puede conseguir en un mismo ejercicio obtener características circuitales a partir de parámetros tecnológicos y, al revés, a partir de características circuitales obtener parámetros tecnológicos.

El utilizar una u otra aproximación será lo que permita que "entren en juego" más o menos parámetros. Es por esta razón por lo que la primera aproximación, aquella en la que al diodo se le modela como una fuente constante de $V_\gamma = 0\ V$ cuando está en directa y como un circuito abierto cuando está en inversa, no se utilizará.

Entendiendo por parámetros tecnológicos aquellos relacionados con los materiales semiconductores, los dopantes y las dimensiones físicas, será en las aproximaciones segunda y tercera en las que intervengan (o puedan intervenir) todos ellos. Recuerde que en la tercera aproximación al diodo se le modela como una fuente constante V_γ en serie con una resistencia R_D cuando está en directa y como un circuito abierto cuando está en inversa, y en la segunda aproximación al diodo se le modela como una fuente constante V_γ cuando está en directa y como un circuito abierto cuando está en inversa.

Por todo lo dicho, para poder resolver los ejercicios propuestos en este capítu-

lo, además de manejar con soltura las técnicas propias del análisis de estos circuitos, deberá tener claros los conceptos de semiconductor intrínseco, extrínseco, concentración de impurezas aceptoras, donadoras, zona de carga espacial, zona neutra, resistividad, conductividad. Así mismo, deberá saber deducir /interpretar /aplicar las expresiones que relacionan entre sí todos estos parámetros, algunas de las cuales, para facilitar el trabajo, se indican a continuación

- *Resistencia:*

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S} = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$$\begin{aligned} \sigma &: \textit{conductividad del material} \quad (\Omega \cdot m)^{-1} \\ \rho &: \textit{resistividad del material} \quad (\Omega \cdot m) \\ S &: \textit{sección} \quad (m^2) \\ l &: \textit{longitud} \quad (m) \end{aligned}$$

- *Conductividad del material:*

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p$$

$$\begin{aligned} q &: \textit{carga del electrón} \quad (1,6 \cdot 10^{-19}\ C) \\ n &: \textit{concentración de electrones} \quad (cm^{-3}) \\ \mu_n &: \textit{movilidad de electrones} \quad \left(1500\ \frac{cm^2}{V \cdot seg}\ \textit{a}\ 300K\right) \\ p &: \textit{concentración de huecos} \quad (cm^{-3}) \\ \mu_p &: \textit{movilidad de huecos} \quad \left(475\ \frac{cm^2}{V \cdot seg}\ \textit{a}\ 300K\right) \end{aligned}$$

- *Ley de acción de masas:*

$$n \cdot p = n_i^2$$

$$n_i \;:\; \textit{concentración intrínseca} \quad (1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}\ \ a\ 300K)$$

- *Neutralidad eléctrica del cristal:*

$$N_D + p = N_A + n$$

$$\begin{aligned} N_D &: \textit{concentración de impurezas donadoras} \quad (cm^{-3}) \\ N_A &: \textit{concentración de impurezas aceptoras} \quad (cm^{-3}) \end{aligned}$$

- *Densidad de corriente:*

$$J = \sigma \cdot E + q \cdot \left(D_n \cdot \frac{dn}{dx} - D_p \cdot \frac{dp}{dx} \right) \quad (A/m^2)$$

$$\begin{aligned} E &: \textit{campo electrico} \quad \left(\frac{V}{cm}\right) \\ D_n &: \textit{coeficiente de difusión para los electrones} \quad \left(\frac{cm^2}{seg}\right) \\ D_p &: \textit{coeficiente de difusión para los huecos} \quad \left(\frac{cm^2}{seg}\right) \end{aligned}$$

- *Densidad de carga neta:*

$$\begin{aligned} \rho(x) &= q \cdot (N_D(x) - N_A(x) + p(x) - n(x)) \simeq \\ &\simeq q \cdot (N_D(x) - N_A(x)) \end{aligned}$$

- *Campo eléctrico en el lado n:*

$$E(x) = -\frac{q \cdot N_D}{\varepsilon} \cdot (w_n - x) \quad 0 < x < w_n$$

$$\varepsilon \;:\; \textit{constante dieléctrica del medio} \quad \left(\frac{F}{cm}\right)$$

- *Campo eléctrico en el lado p:*

$$E(x) = -\frac{q \cdot N_A}{\varepsilon} \cdot (x + w_p) \quad -w_p < x < 0$$

- *Potencial de la unión:*

$$\psi_0 = \frac{K \cdot T}{q} \cdot ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right)$$

- *Penetración de la zona de carga espacial en el lado n:*

$$w_n = w \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (\psi_0 - V) \cdot N_A}{q \cdot N_D \cdot (N_A + N_D)}}$$

- *Penetración de la zona de carga espacial en el lado p:*

$$w_p = w \cdot \frac{N_D}{N_A + N_D} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (\psi_0 - V) \cdot N_D}{q \cdot N_A \cdot (N_A + N_D)}}$$

Encontrará también ejercicios con diodos zéner, fundamentalmente en aplicaciones de circuitos reguladores, es decir, el diodo zéner polarizado en inversa y modelado como fuente de tensión (tensión zéner) o como fuente de tensión (tensión zéner) en serie con resistencia cuya pendiente determinará el margen de regulación.

Ejercicios Resueltos

Ejercicio 1.1

En el circuito de la figura 1.1 los diodos D_1 y D_2 se han fabricado dopando silicio con $5 \cdot 10^{12}$ átomos de fósforo y con $2,5 \cdot 10^{13}$ átomos de galio. Los diodos tienen una sección de 25 mm^2, siendo la longitud de la *zona P* de 2 mm y la longitud de la *zona N* de 1 mm.

Datos del circuito : $V_1 = 10\ V,\ I_1 = 20\ mA,\ R_1 = 100\ \Omega$

Datos del *Si* a 300K : $n_i = 1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$,
$\mu_n = 1500\ cm^2/V \cdot seg$
$\mu_p = 475\ cm^2/V \cdot seg$,
$\epsilon = 1,04 \cdot 10^{-12}\ F/cm$

Otros datos : $q = 1,6 \cdot 10^{-19}\ C$,
$V_T = \dfrac{KT}{q} = 25\ mV\ (300K)$

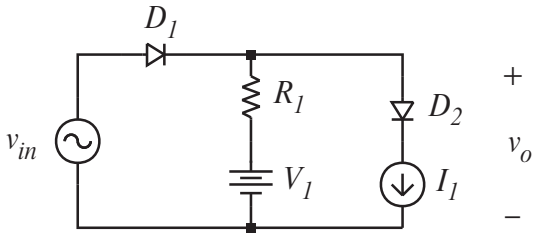


Figura 1.1

A) Calcule los parámetros eléctricos de los diodos: tensión umbral (V_γ) y resistencia interna en directa (R_D).

El fósforo es pentavalente, por lo que al dopar el silicio con fósforo se está dopando con impurezas donadoras cuya concentración según los datos del enunciado es

$$\begin{aligned} N_D &= \frac{N^o\ átomos}{l_n \cdot S_n} = \\ &= \frac{5 \cdot 10^{12}}{0,1\ cm \cdot 0,25\ cm^2} = \\ &= 2 \cdot 10^{14}\ cm^{-3} \end{aligned}$$

El galio es trivalente, por lo que al dopar el silicio con galio se está dopando con impurezas aceptoras cuya concentración según los datos del enunciado es

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{N^o\ átomos}{l_p \cdot S_p} = \\ &= \frac{2,5 \cdot 10^{13}}{0,2\ cm \cdot 0,25\ cm^2} = \\ &= 5 \cdot 10^{14}\ cm^{-3} \end{aligned}$$

De aquí se obtiene el potencial de la unión *pn* que es prácticamente igual a la tensión umbral del diodo

$$\begin{aligned} V_\gamma \simeq \psi_0 &= V_T \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} = \\ &= 25\ mV \cdot \ln \left(\frac{5 \cdot 10^{14}\ cm^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{14}\ cm^{-3}}{(1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3})^2} \right) = \\ &= 0,5\ V \end{aligned}$$

De los valores numéricos de los dopajes se concluye que tanto la *zona P* como la *zona N* están fuertemente dopados por lo que las concentraciones de portadores mayoritarios serán,

- *Zona N:*

$$N_D >> n_i \quad \rightarrow \quad n_n \simeq N_D = 2 \cdot 10^{14}\ cm^{-3}$$

- *Zona P:*

$$N_A >> n_i \quad \rightarrow \quad p_p \simeq N_A = 5 \cdot 10^{14}\ cm^{-3}$$

y las concentraciones de portadores minoritarios,

- *Zona N:*

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = 1,05 \cdot 10^6 \ cm^{-3} << n_n$$

- *Zona P:*

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = 4,2 \cdot 10^5 \ cm^{-3} << p_p$$

Debido al carácter fuertemente dopado de ambas zonas, la contribución a la conductividad de los portadores minoritarios puede considerarse despreciable,

- *Zona N:*

$$\begin{aligned} \sigma_n &= q \cdot n_n \cdot \mu_n + q \cdot p_n \cdot \mu_p \simeq \\ &\simeq q \cdot n_n \cdot \mu_n = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \ C \cdot 2 \cdot 10^{14} \ cm^{-3} \cdot 1500 \ cm^2/V \cdot seg = \\ &= 0,048 \ (\Omega \cdot cm)^{-1} \end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned} \sigma_p &= q \cdot p_p \cdot \mu_p + q \cdot n_p \cdot \mu_n \simeq \\ &\simeq q \cdot p_p \cdot \mu_p = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \ C \cdot 5 \cdot 10^{14} \ cm^{-3} \cdot 475 \ cm^2/V \cdot seg = \\ &= 0,038 \ (\Omega \cdot cm)^{-1} \end{aligned}$$

En directa no hay zona de carga espacial por lo que las longitudes de las zonas neutras coincidirán con l_n y l_p.

- *Zona N:*

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{l_n}{\sigma_n \cdot S} = \\ &= \frac{0,1 \ cm}{0,048 \ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,25 \ cm^2} = \\ &= 8,3 \ \Omega \end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{l_p}{\sigma_p \cdot S} = \\ &= \frac{0,2\ cm}{0,038\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,25\ cm^2} = \\ &= 21,05\ \Omega \end{aligned}$$

y la resistencia interna del diodo en directa queda,

$$\begin{aligned} R_D &= R_n + R_p = \\ &= 8,3\ \Omega + 21,05\ \Omega = \\ &= 29,35\ \Omega \end{aligned}$$

B) Considere en este apartado que v_{in} es una fuente constante de valor $v_{in} = -5\ V$ y, además suponga que con una corriente de $20mA$ el diodo D_2 se encuentra en directa. En estas condiciones y considerando la segunda aproximación para los diodos, calcule v_0 especificando claramente el estado del diodo D_1.

En una primera aproximación se considerará que el diodo D_1 no conduce (se comporta como un circuito abierto) y, por lo tanto, toda la corriente de I_1 circula por la rama de la resistencia R_1.

En estas condiciones,

$$v_0 = 10\ V - 100\ \Omega \cdot 20\ mA = 8\ V$$

es decir, se comprueba que el diodo D_1 se encuentra en inversa comportándose como un circuito abierto.

C) Si se cambia la fuente de tensión continua de $-5\ V$ por una fuente sinusoidal $v_{in} = 20\ V_{pp}$, represente la señal de salida $v_0(t)$ especificando los períodos de conducción de cada diodo. Para ello siga considerando a los diodos en segunda aproximación.

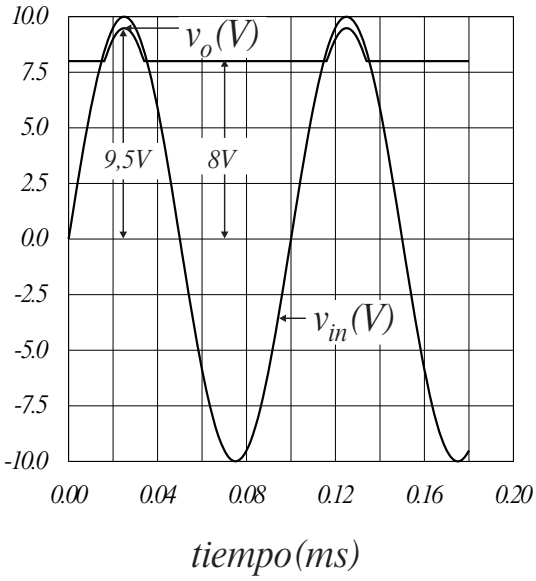


Figura 1.2

Mientras v_{in} está por debajo de 8 V el diodo D_1 está en inversa (circuito abierto) por lo que a la salida se tiene una tensión constante de 8 V.

Cuando v_{in} alcanza $8,5$ V el diodo D_1 se pone en directa y comienza a conducir por lo que la señal de salida sigue a la de entrada.

Cuando en la entrada hay 10 V_p en la salida habrá

$$10\ V_p - 0,5\ V = 9,5\ V$$

La representación gráfica de las señales de entrada y salida puede verse en la figura 1.2

Ejercicio 1.2

En el circuito de la figura 1.3 los diodos D_1 y D_2 se han fabricado dopando silicio con una concentración de $10^{15}\ cm^{-3}$ de impurezas donadoras y con una concentración de $10^{16}\ cm^{-3}$ de impurezas aceptoras. Los diodos tienen una sección de 2 mm^2, siendo la longitud de la *zona P* de 2 mm y la longitud de la *zona N* de 4 mm.

$$\begin{aligned}
\textbf{Datos del circuito} &: V_D = 2\ V,\ R_L = 100\ \Omega \\
\textbf{Datos del } Si \textbf{ a 300K} &: n_i = 1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}, \\
&\quad \mu_n = 1500\ cm^2/V \cdot seg \\
&\quad \mu_p = 475\ cm^2/V \cdot seg, \\
&\quad \epsilon = 1,04 \cdot 10^{-12}\ F/cm \\
\textbf{Otros datos} &: q = 1,6 \cdot 10^{-19}\ C, \\
&\quad V_T = \frac{KT}{q} = 25\ mV\ (300K)
\end{aligned}$$

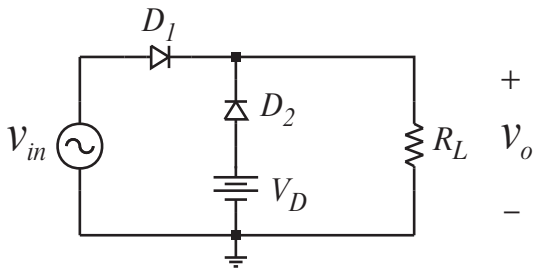


Figura 1.3

A) Calcule los parámetros eléctricos de los diodos: tensión umbral (V_γ) y resistencia interna en directa (R_D).

El potencial de la unión *pn* que es prácticamente igual a la tensión umbral del diodo puede obtenerse directamente

$$V_\gamma \simeq \psi_0 \quad = \quad V_T \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) =$$

$$\begin{aligned} &= 25\ mV \cdot \ln\left(\frac{10^{16}\ cm^{-3} \cdot 10^{15}\ cm^{-3}}{(1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3})^2}\right) \simeq \\ &\simeq 0,6\ V \end{aligned}$$

De los valores numéricos de los dopajes dados en el enunciado se concluye que tanto la *zona P* como la *zona N* están fuertemente dopados por lo que las concentraciones de portadores mayoritarios serán,

- *Zona N:*
$$N_D >> n_i \quad \rightarrow \quad n_n \simeq N_D = 10^{15}\ cm^{-3}$$
- *Zona P:*
$$N_A >> n_i \quad \rightarrow \quad p_p \simeq N_A = 10^{16}\ cm^{-3}$$

y las concentraciones de portadores minoritarios,

- *Zona N:*
$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = 2,1 \cdot 10^5\ cm^{-3} << n_n$$
- *Zona P:*
$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = 2,1 \cdot 10^4\ cm^{-3} << p_p$$

Debido al carácter fuertemente dopado de ambas zonas, la contribución a la conductividad de los portadores minoritarios puede considerarse despreciable,

- *Zona N:*

$$\begin{aligned} \sigma_n &= q \cdot n_n \cdot \mu_n + q \cdot p_n \cdot \mu_p \simeq \\ &\simeq q \cdot n_n \cdot \mu_n = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 10^{15}\ cm^{-3} \cdot 1500\ cm^2/V \cdot seg = \\ &= 0,24\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned}\sigma_p &= q \cdot p_p \cdot \mu_p + q \cdot n_p \cdot \mu_n \simeq \\ &\simeq q \cdot p_p \cdot \mu_p = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 10^{16}\ cm^{-3} \cdot 475\ cm^2/V \cdot seg = \\ &= 0,76\ (\Omega \cdot cm)^{-1}\end{aligned}$$

En directa no hay zona de carga espacial por lo que las longitudes de las zonas neutras coincidirán con l_n y l_p.

- *Zona N:*

$$\begin{aligned}R_n &= \frac{l_n}{\sigma_n \cdot S} = \\ &= \frac{0,4\ cm}{0,24\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,02\ cm^2} = \\ &= 83,3\ \Omega\end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned}R_p &= \frac{l_p}{\sigma_p \cdot S} = \\ &= \frac{0,2\ cm}{0,76\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,02\ cm^2} \simeq \\ &\simeq 13,2\ \Omega\end{aligned}$$

y la resistencia interna del diodo en directa queda,

$$\begin{aligned}R_D &= R_n + R_p = \\ &= 83,3\ \Omega + 13,2\ \Omega = \\ &= 96,5\ \Omega\end{aligned}$$

B) Considere que v_{in} es un generador sinusoidal de valor $5V_p$. Considerando la primera aproximación para los diodos dibuje la forma de

onda resultante a la salida indicando claramente en qué intervalos conduce cada diodo.

Para tensiones $v_{in} > 2\ V$ el diodo D_1 se encuentra en directa comportándose en primera aproximación como un cortocircuito y el diodo D_2 en inversa, comportándose como un circuito abierto, por lo que para tensiones $v_{in} > 2\ V$ puede decirse que la salida "sigue" a la entrada.

Para tensiones $v_{in} < 2\ V$ el diodo D_1 se encuentra en inversa comportantándose como un circuito abierto y el diodo D_2 en directa, comportándose como un cortocircuito, por lo que para tensiones $v_{in} < 2\ V$ en la salida aparece un nivel continuo de $2\ V$.

En la figura 1.4 pueden verse representadas las señales de entrada y salida.

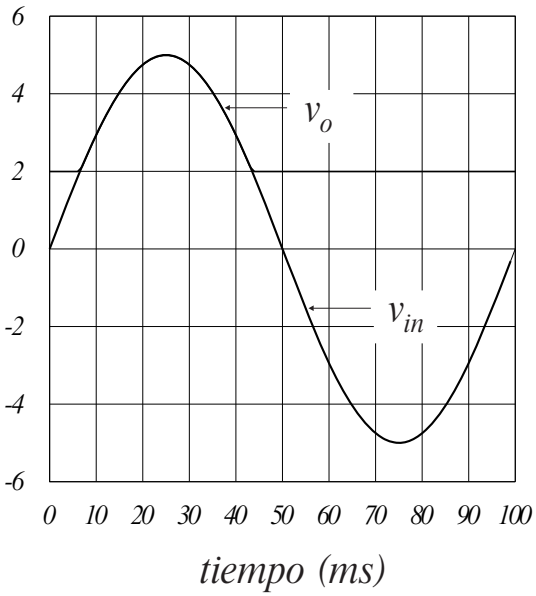


Figura 1.4

C) Para el instante en que la tensión de entrada pasa por el mínimo, calcula la corriente que circula por el diodo en directa y la tensión que soporta el que está en inversa. ¿Cuál es la potencia total disipada por el circuito?. Para resolver este apartado utilice la tercera aproximación.

Para $v_{inMIN} = -5\ V < 2\ V$ se ha concluido en el apartado anterior que

D_1 estará cortado (polarizado en inversa) y D_2 en conducción (porlarizado en directa). Considerando la tercera aproximación el circuito equivalente a analizar es el representado en la figura 1.5

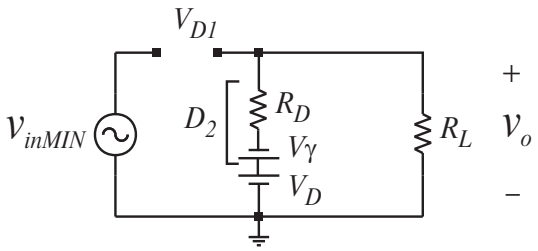


Figura 1.5

Del análisis de dicho circuito se obtiene que

$$\begin{aligned} I_{D2} &= \frac{V_D - V_\gamma}{R_L + R_D} = \\ &= \frac{2\ V - 0,6\ V}{100\ \Omega + 96,5\ \Omega} = \\ &= 7,1 mA \end{aligned}$$

Por otro lado y aunque D_1 al estar en inversa se comporta como un circuito abierto, la tensión inversa en sus bornas es

$$\begin{aligned} V_{D1} = v_{inMIN} - v_0 &= v_{inMIN} - R_L \cdot I_{D2} = \\ &= -5\ V - 100\ \Omega \cdot 7,1\ mA = \\ &= -5,71\ V \end{aligned}$$

Finalmente, para calcular la potencia total disipada basta observar en el circuito de la figura 1.5 que toda la corriente es suministrada por la fuente de continua $V_D = 2\ V$, es decir,

$$\begin{aligned} P_{total} &= V_D \cdot I_{D2} = \\ &= 2\ V \cdot 7,1\ mA = \\ &= 14,2\ mW \end{aligned}$$

Ejercicio 1.3

En el circuito limitador de la figura 1.6 el diodo D_2 es un diodo de silicio que se ha dopado con $5 \cdot 10^{16}$ átomos de fósforo y con $2,5 \cdot 10^{13}$ átomos de galio. El diodo tiene una sección de $25mm^2$, siendo la longitud de la *zona P* de $1mm$ y la longitud de la *zona N* de $2mm$

$$\begin{aligned}
\textbf{Datos del circuito} &: R_1 = 100\ \Omega,\ V_1 = 5\ V \\
\textbf{Datos del } Si \textbf{ a 300K} &: n_i = 1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}, \\
&\quad \mu_n = 1500\ cm^2/V \cdot seg \\
&\quad \mu_p = 475\ cm^2/V \cdot seg, \\
&\quad \epsilon = 1,04 \cdot 10^{-12}\ F/cm \\
\textbf{Otros datos} &: q = 1,6 \cdot 10^{-19}\ C, \\
&\quad V_T = \frac{KT}{q} = 25\ mV\ (300K)
\end{aligned}$$

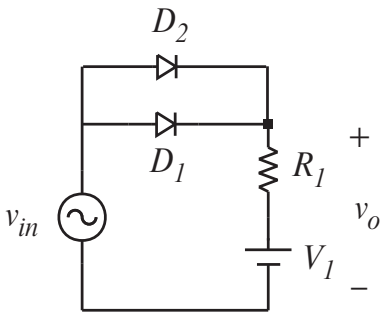


Figura 1.6

A) Calcule los parámetros eléctricos del diodo D_2: tensión umbral ($V_{\gamma 2}$) y resistencia interna en directa (R_{D2}).

El fósforo es pentavalente, por lo que al dopar el silicio con fósforo se está dopando con impurezas donadoras cuya concentración según los datos del enunciado es

$$N_D = \frac{N^o\ átomos}{l_n \cdot S_n} =$$

$$= \frac{5 \cdot 10^{16}}{0,2\ cm \cdot 0,25\ cm^2} = \\ = 1 \cdot 10^{18}\ cm^{-3}$$

El galio es trivalente, por lo que al dopar el silicio con galio se está dopando con impurezas aceptoras cuya concentración según los datos del enunciado es

$$N_A = \frac{N^o\ átomos}{l_p \cdot S_p} = \\ = \frac{2,5 \cdot 10^{13}}{0,1\ cm \cdot 0,25\ cm^2} = \\ = 1 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}$$

De aquí se obtiene el potencial de la unión *pn* que es prácticamente igual a la tensión umbral del diodo

$$V_{\gamma 2} \simeq \psi_0 = V_T \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) = \\ = 25\ mV \cdot \ln\left(\frac{1 \cdot 10^{15}\ cm^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{18}\ cm^{-3}}{(1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3})^2}\right) = \\ = 0,73\ V$$

De los valores numéricos de los dopajes se concluye que tanto la *zona P* como la *zona N* están fuertemente dopados por lo que las concentraciones de portadores mayoritarios serán,

- *Zona N:*

$$N_D >> n_i \quad \rightarrow \quad n_n \simeq N_D = 1 \cdot 10^{18}\ cm^{-3}$$

- *Zona P:*

$$N_A >> n_i \quad \rightarrow \quad p_p \simeq N_A = 1 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}$$

y las concentraciones de portadores minoritarios,

- *Zona N:*

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = 2,1 \cdot 10^2 \ cm^{-3} << n_n$$

- *Zona P:*

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = 2,1 \cdot 10^5 \ cm^{-3} \ << p_p$$

Debido al carácter fuertemente dopado de ambas zonas, la contribución a la conductividad de los portadores minoritarios puede considerarse despreciable,

- *Zona N:*

$$\begin{aligned} \sigma_n &= q \cdot n_n \cdot \mu_n + q \cdot p_n \cdot \mu_p \simeq \\ &\simeq q \cdot n_n \cdot \mu_n = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \ C \cdot 1 \cdot 10^{18} \ cm^{-3} \cdot 1500 \ cm^2/V \cdot seg = \\ &= 240 \ (\Omega \cdot cm)^{-1} \end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned} \sigma_p &= q \cdot p_p \cdot \mu_p + q \cdot n_p \cdot \mu_n \simeq \\ &\simeq q \cdot p_p \cdot \mu_p = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \ C \cdot 1 \cdot 10^{15} \ cm^{-3} \cdot 475 \ cm^2/V \cdot seg = \\ &= 0,076 \ (\Omega \cdot cm)^{-1} \end{aligned}$$

En directa no hay zona de carga espacial por lo que las longitudes de las zonas neutras coincidirán con l_n y l_p.

- *Zona N:*

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{l_n}{\sigma_n \cdot S} = \\ &= \frac{0,2 \ cm}{240 \ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,25 \ cm^2} = \\ &= 3,3 \ m\Omega \end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{l_p}{\sigma_p \cdot S} = \\ &= \frac{0,1\ cm}{0,076\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,25\ cm^2} = \\ &= 5,26\ \Omega \end{aligned}$$

y la resistencia interna del diodo en directa queda,

$$\begin{aligned} R_{D2} &= R_n + R_p = \\ &= 3,3\ m\Omega + 5,26\ \Omega \simeq \\ &\simeq 5,26\ \Omega \end{aligned}$$

A continuación se pretende analizar el funcionamiento de los diodos D_1 y D_2. D_1 es un diodo de germanio con $V_{\gamma 1} = 0,3\ V$ y para D_2 considerará que $V_{\gamma 2} = 0,7\ V$ independientemente del resultado obtenido en el apartado anterior. Considerando la segunda aproximación para los dos diodos, dibuje la forma de onda resultante a la salida indicando claramente en qué intervalos conduce cada diodo; considere los siguientes casos:

B) $v_{in} = 10\ V_{pp}$**,** $f = 50\ Hz$

En este caso los dos diodos están polarizados en inversa, comportándose como circuitos abiertos, por lo que la tensión de salida será un nivel continuo igual a $V_1 = 5\ V$

C) $v_{in} = 20\ V_{pp}$**,** $f = 50\ Hz$

D_1 comenzará a conducir cuando $v_{in} > V_1 + V_{\gamma 1} = 5\ V + 0,3\ V = 5,3\ V$. Cuando D_1 entre en conducción someterá a D_2 a una tensión de $0,3\ V$ entre terminales, por lo que D_2 no conduce nunca, es decir, siempre estará cortado. La señal de entrada y salida para este caso está representada en la figura 1.7

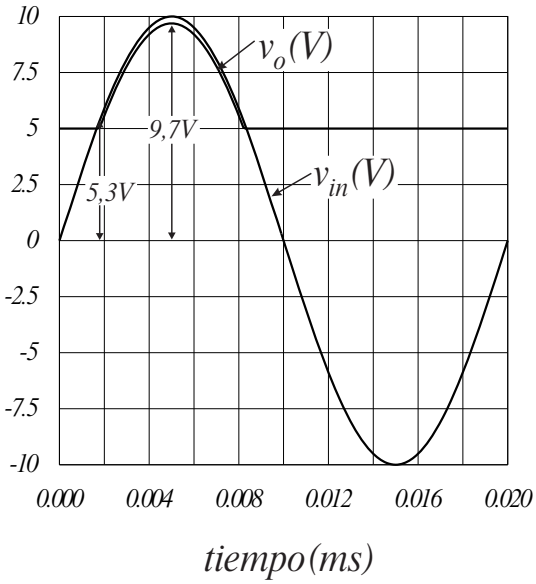


Figura 1.7

D) Para el instante en que $v_{in} = 10\ V$, calcule la corriente que circulará por el diodo en directa. En este caso considere el diodo D_1 en tercera aproximación con $R_{D1} = 50\ \Omega$

Para este valor de v_{in} el diodo D_1 está en directa y el diodo D_2 cortado por lo que considerando la tercera aproximación el circuito a analizar es el representado en la figura 1.8

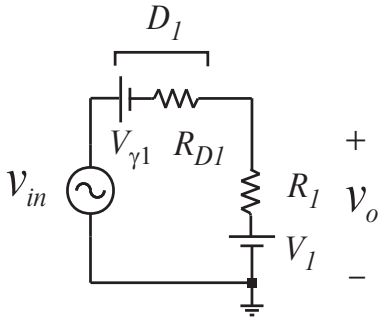


Figura 1.8

de cuyo análisis se obtiene la ecuación

$$v_{in} = V_{\gamma 1} + V_1 + I_D \cdot (R_{D1} + R_1)$$

y, por lo tanto,

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{v_{in} - V_{\gamma 1} - V_1}{R_{D1} + R_1} = \\ &= \frac{10\ V - 0,3\ V - 5\ V}{50\ \Omega + 100\ \Omega} = \\ &= 31,3\ mA \end{aligned}$$

Ejercicio 1.4

En el circuito de la figura 1.9 los tres diodos se han fabricado dopando silicio con $4 \cdot 10^{14}$ átomos de fósforo y con $3 \cdot 10^{13}$ átomos de galio. Los diodos tienen una sección de 2 mm^2, siendo la longitud de la *zona P* 5 mm y la longitud de la *zona N* de 2 mm

Datos del circuito	:	$v_{in} = 10\ V_{pp},\ R_L = 10\ K\Omega,$
		$R_1 = 10\ K\Omega,\ V_D = 3\ V$
Datos del *Si* a 300K	:	$n_i = 1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3},$
		$\mu_n = 1500\ cm^2/V \cdot seg$
		$\mu_p = 475\ cm^2/V \cdot seg,$
		$\epsilon = 1,04 \cdot 10^{-12}\ F/cm$
Otros datos	:	$q = 1,6 \cdot 10^{-19}\ C,$
		$V_T = \dfrac{KT}{q} = 25\ mV\ (300K)$

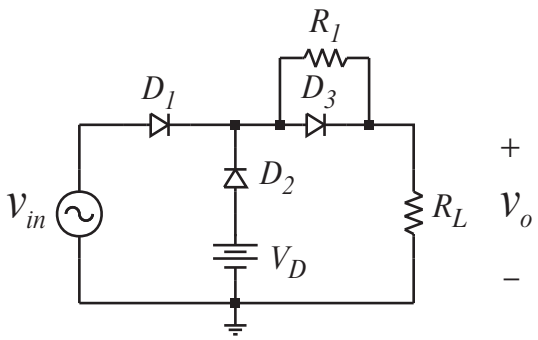


Figura 1.9

A) Calcule los parámetros eléctricos de los diodos: tensión umbral (V_γ) y resistencia interna en directa (R_D).

El fósforo es pentavalente, por lo que al dopar el silicio con fósforo se está dopando con impurezas donadoras cuya concentración según los datos del enunciado es

$$\begin{aligned} N_D &= \frac{N^o\ átomos}{l_n \cdot S_n} = \\ &= \frac{4 \cdot 10^{14}}{0,2\ cm \cdot 0,02\ cm^2} = \\ &= 1 \cdot 10^{17}\ cm^{-3} \end{aligned}$$

El galio es trivalente, por lo que al dopar el silicio con galio se está dopando con impurezas aceptoras cuya concentración según los datos del enunciado es

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{N^o\ átomos}{l_p \cdot S_p} = \\ &= \frac{3 \cdot 10^{13}}{0,5\ cm \cdot 0,02\ cm^2} = \\ &= 3 \cdot 10^{15}\ cm^{-3} \end{aligned}$$

De aquí se obtiene el potencial de la unión *pn* que es prácticamente igual a la tensión umbral del diodo

$$\begin{aligned} V_\gamma \simeq \psi_0 &= V_T \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) = \\ &= 25\ mV \cdot \ln\left(\frac{1 \cdot 10^{17}\ cm^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}}{(1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3})^2}\right) = \\ &= 0,7\ V \end{aligned}$$

De los valores numéricos de los dopajes se concluye que tanto la *zona P* como la *zona N* están fuertemente dopados por lo que las concentraciones de portadores mayoritarios serán,

- *Zona N:*

$$N_D >> n_i \quad \rightarrow \quad n_n \simeq N_D = 1 \cdot 10^{17}\ cm^{-3}$$

- *Zona P:*

$$N_A >> n_i \quad \rightarrow \quad p_p \simeq N_A = 3 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}$$

y las concentraciones de portadores minoritarios,

- *Zona N:*

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = 2,1 \cdot 10^3 \ cm^{-3} << n_n$$

- *Zona P:*

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = 7 \cdot 10^4 \ cm^{-3} << p_p$$

Debido al carácter fuertemente dopado de ambas zonas, la contribución a la conductividad de los portadores minoritarios puede considerarse despreciable,

- *Zona N:*

$$\begin{aligned} \sigma_n &= q \cdot n_n \cdot \mu_n + q \cdot p_n \cdot \mu_p \simeq \\ &\simeq q \cdot n_n \cdot \mu_n = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \ C \cdot 1 \cdot 10^{17} \ cm^{-3} \cdot 1500 \ cm^2/V \cdot seg = \\ &= 24 \ (\Omega \cdot cm)^{-1} \end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned} \sigma_p &= q \cdot p_p \cdot \mu_p + q \cdot n_p \cdot \mu_n \simeq \\ &\simeq q \cdot p_p \cdot \mu_p = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \ C \cdot 3 \cdot 10^{15} \ cm^{-3} \cdot 475 \ cm^2/V \cdot seg = \\ &= 0,228 \ (\Omega \cdot cm)^{-1} \end{aligned}$$

En directa no hay zona de carga espacial por lo que las longitudes de las zonas neutras coincidirán con l_n y l_p.

- *Zona N:*

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{l_n}{\sigma_n \cdot S} = \\ &= \frac{0,2 \ cm}{24 \ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,02 \ cm^2} = \\ &= 0,42 \ \Omega \end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{l_p}{\sigma_p \cdot S} = \\ &= \frac{0,5\ cm}{0,228\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,02\ cm^2} = \\ &= 109,6\ \Omega \end{aligned}$$

y la resistencia interna del diodo en directa queda,

$$\begin{aligned} R_D &= R_n + R_p = \\ &= 0,42\ \Omega + 109,6\ \Omega = \\ &= 110\ \Omega \end{aligned}$$

B) Considerando la segunda aproximación para los diodos dibuje la forma de onda resultante a la salida, indicando claramente en qué intervalos conduce cada diodo.

Mientras la tensión de entrada v_{in} no fuerce en los cátodos de D_1 y D_2 una tensión superior a $2,3\ V$ ($V_D - V_{D2} = 2,3\ V$) el diodo D_1 permanecerá en circuito abierto y a la salida se verá una tensión constante de valor

$$\begin{aligned} v_0 &= V_D - V_{D2} - V_{D3} = \\ &= 3\ V - 0,7\ V - 0,7\ V = \\ &= 1,6\ V \end{aligned}$$

Esta situación permanecerá hasta que v_{in} alcance los $3\ V$ ($2,3\ V + V_{D1}$). A partir de ese instante de tiempo el diodo D_1 entra en conducción, la tensión en los cátodos de D_1 y D_2 es superior a $2,3V$ ($v_{in} - V_{D1}$), el diodo D_2 deja de conducir (circuito abierto) y la salida sigue a la entrada con una diferencia de tensión $v_{in} - V_{D1} - V_{D3}$ adquiriendo en el máximo un valor de $3,6\ V$ ($5\ V_p - 0,7\ V - 0,7\ V$).

En resumen,

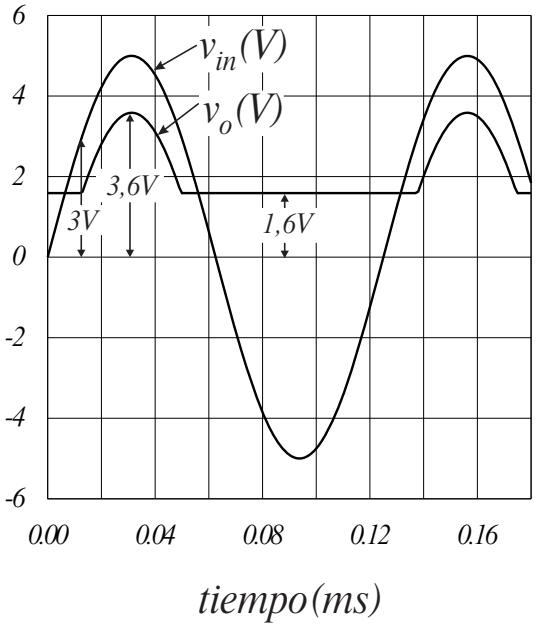


Figura 1.10

- para $v_{in} < 3\ V$ D_1 no conduce, D_2 conduce, D_3 conduce
- para $v_{in} > 3\ V$ D_1 conduce, D_2 no conduce, D_3 conduce

La representación gráfica de las señales de entrada y salida puede verse en la figura 1.10

C) Calcule el valor de la corriente I_{R_1} en el instante en que V_{in} es $5\ V$

Para $v_{in} = 5\ V$ el diodo D_3 está en conducción y la tensión en sus terminales es de $0,7\ V$; teniendo en cuenta que está en paralelo con R_1,

$$\begin{aligned} I_{R_1} &= \frac{V_{R1}}{R_1} = \frac{V_{D_3}}{R_1} = \\ &= \frac{0,7\ V}{10\ K\Omega} = \\ &= 70\ \mu A \end{aligned}$$

Ejercicio 1.5

Se dispone de un diodo cuya tensión umbral es $V_\gamma = 0,7\ V$ y va a emplearse en la construcción del circuito de la figura 1.11. El diodo tiene una sección de $2\ mm^2$, siendo la longitud de la *zona P* de $2\ mm$ y la longitud de la *zona N* de $3\ mm$.

$$\begin{aligned}
\textbf{Datos del circuito} &: R_1 = 200\ \Omega,\ R_2 = 200\ \Omega \\
\textbf{Datos del } Si \textbf{ a 300K} &: n_i = 1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}, \\
&\quad \mu_n = 1500\ cm^2/V \cdot seg \\
&\quad \mu_p = 475\ cm^2/V \cdot seg, \\
&\quad \epsilon = 1,04 \cdot 10^{-12}\ F/cm \\
\textbf{Otros datos} &: q = 1,6 \cdot 10^{-19}\ C, \\
&\quad V_T = \frac{KT}{q} = 25\ mV\ (300K)
\end{aligned}$$

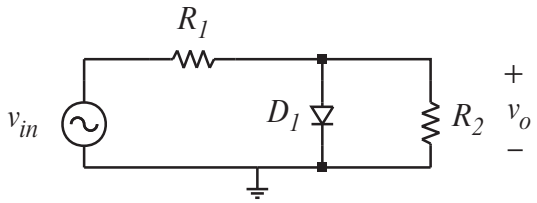


Figura 1.11

A) Sabiendo que $N_A = 4 \cdot N_D$ determine las concentraciones de impurezas, portadores mayoritarios y minoritarios a ambos lados de la unión metalúrgica, así como el valor de la resistencia interna del diodo en directa.

La concentración de impurezas donadoras puede obtenerse a partir del potencial de la unión,

$$\begin{aligned}
V_\gamma \simeq \psi_0 &= V_T \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) = \\
&= V_T \cdot \ln \frac{4 \cdot N_D^2}{n_i^2} \quad \rightarrow
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \quad N_D &= \frac{n_i}{2} \cdot e^{\left(\frac{V_\gamma}{2 \cdot V_T}\right)} = \\ &= \frac{1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}}{2} \cdot e^{\left(\frac{0,7\ V}{2 \cdot 0,025\ V}\right)} = \\ &= 8,7 \cdot 10^{15}\ cm^{-3} \end{aligned}$$

y, por lo tanto, la concentración de impurezas aceptoras será

$$N_A = 4 \cdot N_D \simeq 3,5 \cdot 10^{16}\ cm^{-3}$$

De los valores numéricos se concluye que tanto la *zona P* como la *zona N* están fuertemente dopadas por lo que las concentraciones de portadores mayoritarios serán,

- *Zona N:*

$$N_D >> n_i \quad \rightarrow \quad n_n \simeq N_D = 8,7 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}$$

- *Zona P:*

$$N_A >> n_i \quad \rightarrow \quad p_p \simeq N_A = 3,5 \cdot 10^{16}\ cm^{-3}$$

y las concentraciones de portadores minoritarios,

- *Zona N:*

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = 2,4 \cdot 10^4\ cm^{-3} << n_n$$

- *Zona P:*

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = 6 \cdot 10^3\ cm^{-3} << p_p$$

Debido al carácter fuertemente dopado de ambas zonas, la contribución a la conductividad de los portadores minoritarios puede considerarse despreciable,

- *Zona N:*

$$\begin{aligned}\sigma_n &= q \cdot n_n \cdot \mu_n + q \cdot p_n \cdot \mu_p \simeq \\ &\simeq q \cdot n_n \cdot \mu_n = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 8,7 \cdot 10^{15}\ cm^{-3} \cdot 1500\ cm^2/V \cdot seg \simeq \\ &\simeq 2,1\ (\Omega \cdot cm)^{-1}\end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned}\sigma_p &= q\, p_p \cdot \mu_p + q \cdot n_p \cdot \mu_n \simeq \\ &\simeq q \cdot p_p \cdot \mu_p = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 3,5 \cdot 10^{16}\ cm^{-3} \cdot 475\ cm^2/V \cdot seg \simeq \\ &\simeq 2,7\ (\Omega \cdot cm)^{-1}\end{aligned}$$

Conocidas las conductividades, las resistencias serán,

- *Zona N:*

$$\begin{aligned}R_n &= \frac{l_n}{\sigma_n \cdot S} = \\ &= \frac{0,3\ cm}{2,1\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,02\ cm^2} = \\ &= 7,1\ \Omega\end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned}R_p &= \frac{l_p}{\sigma_p \cdot S} = \\ &= \frac{0,2\ cm}{2,7\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,02\ cm^2} = \\ &= 3,7\ \Omega\end{aligned}$$

y la resistencia interna del diodo en directa queda,

$$\begin{aligned} R_D &= R_n + R_p = \\ &= 7,1\ \Omega + 3,7\ \Omega = \\ &= 10,8\ \Omega \simeq 11\ \Omega \end{aligned}$$

B) Empleando la tercera aproximación para el diodo en directa, escriba la expresión de la recta de carga del circuito para una tensión de entrada continua. Calcule el punto de trabajo del diodo si $v_{in} = 6\ V$.

Las variables tensión (V_D) y corriente (I_D) en el diodo están determinadas por el diodo y por el circuito externo al diodo. La condición impuesta por este último es lo que se denomina *recta de carga* ya que suele ser una ecuación lineal. En el caso concreto del circuito de la figura 1.11 la ecuación de la recta de carga se obtiene aplicando nodos,

$$\begin{aligned} I_{R_1} = I_D + I_{R_2} \quad &\rightarrow \quad \frac{v_{in} - V_D}{R_1} = I_D + \frac{V_D}{R_2} \quad \rightarrow \\ &\rightarrow \quad I_D = \frac{v_{in}}{R_1} - V_D \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \end{aligned}$$

y puesto que $R_1 = R_2$ se puede escribir que

$$I_D = \frac{v_{in}}{R_1} - \frac{2 \cdot V_D}{R_1}$$

Con esta ecuación y la ecuación del diodo quedará definido el punto de trabajo. En este caso concreto y puesto que debe emplearse la tercera aproximación, la ecuación del diodo será,

$$I_D = \frac{V_D - V_\gamma}{R_D}$$

Resolviendo el sistema formado por las dos ecuaciones para el caso en que $v_{in} = 6\ V$ y $R_1 = 200\ \Omega$ se obtiene que

$$\begin{aligned} V_{DQ} &\simeq 0,93\ V \\ I_{DQ} &\simeq 21\ mA \end{aligned}$$

y de forma gráfica puede verse en la figura 1.12

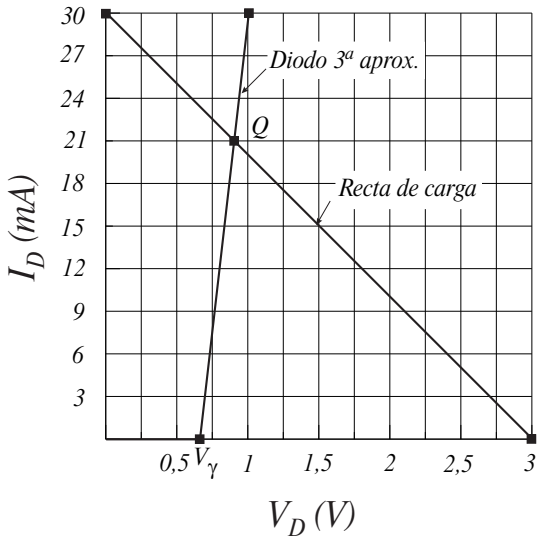


Figura 1.12

comprobando la coincidencia de ambos resultados.

C) Para una tensión de entrada senoidal $v_{in} = 6\ V_p$, dibuje la señal resultante a la salida en el supuesto de que no esté presente el diodo (circuito abierto) en el circuito. Sobre la señal que acaba de dibujar efectúe las modificaciones que se producirían al conectar el diodo, considerándolo en segunda aproximación. ¿Cuál es la misión que realiza el diodo en el circuito?.

En el caso de que no esté el diodo, el circuito es un divisor de tensión formado por dos resistencias iguales por lo que la señal de salida será exáctamente la mitad de la señal de entrada, es decir, una sinusoide de 3 voltios de pico ($v_0 = 3\ V_p$).

Si ahora se conecta el diodo, el circuito resultante es un *recortador de ciclo positivo*.

Cuando la tensión de salida v_0 es menor que la tensión umbral $V_\gamma = 0,7\ V$ el diodo no conduce (circuito abierto) y el circuito es un divisor de la tensión de entrada por lo que en la salida aparece la señal de entrada atenuada a la mitad.

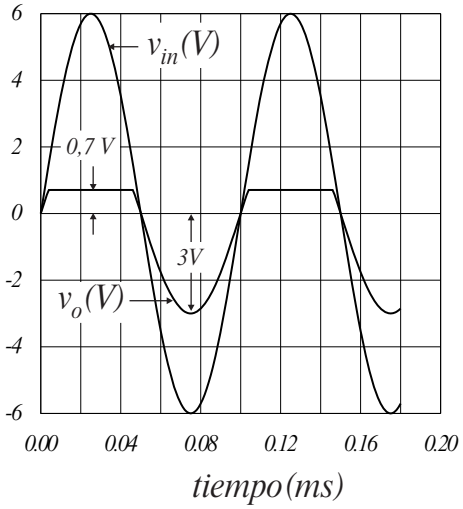


Figura 1.13

Cuando la tensión de salida v_0 alcanza la tensión umbral $V_\gamma = 0,7\ V$ el diodo entra en conducción y en segunda aproximación se comporta como una fuente constante de valor $V_\gamma = 0,7\ V$. A partir de ese momento, aunque siga aumentando la señal de entrada la salida permanecerá constante en $0,7\ V$.

Las señales de entrada y salida pueden verse en la figura 1.13

Ejercicio 1.6

El circuito de la figura 1.14 está basado en un diodo zéner. El diodo tiene una sección 2 mm^2, siendo la longitud de la *zona N* de 4 mm y la longitud de la *zona P* de 2 mm. Además se sabe que la tensión umbral es $V_\gamma = 0,65\ V$, la tensión zéner $V_{Z0} = 4\ V$ y la resistencia zéner $R_Z \simeq 0\ \Omega$. La tensión v_{in} que proporciona el generador es sinusoidal de 4 V_p superpuesta a una tensión continua de 2 V.

$$\begin{aligned} \textbf{Datos del circuito} &: R_S = 100\ \Omega,\ R_L = 100\ \Omega \\ \textbf{Datos del } Si \textbf{ a 300K} &: n_i = 1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}, \\ &\quad \mu_n = 1500\ cm^2/V \cdot seg \\ &\quad \mu_p = 475\ cm^2/V \cdot seg, \\ &\quad \epsilon = 1,04 \cdot 10^{-12}\ F/cm \\ \textbf{Otros datos} &: q = 1,6 \cdot 10^{-19}\ C, \\ &\quad V_T = \frac{KT}{q} = 25\ mV\ (300K) \end{aligned}$$

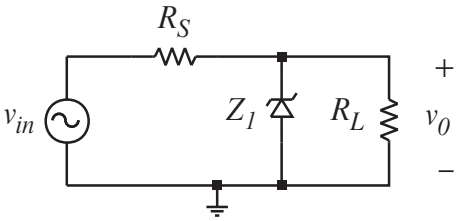


Figura 1.14

A) Sabiendo que el dopaje de la *Zona P* es doble que el de la *Zona N* ¿cuánto vale la resistencia en directa R_D del diodo?.

En primer lugar será necesario obtener la concentración de impurezas para obtener a continuación las conductividades de las zonas neutras.

Sabiendo que $N_A = 2 \cdot N_D$, la concentración de impurezas puede obtenerse a partir del potencial de la unión,

$$V_\gamma \simeq \psi_0 \quad = \quad V_T \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) =$$

$$
\begin{aligned}
& = V_T \cdot \ln \frac{2 \cdot N_D^2}{n_i^2} \quad \rightarrow \\
\rightarrow \quad N_D & = \frac{n_i}{\sqrt{2}} \cdot e^{\left(\frac{V_\gamma}{2 \cdot V_T}\right)} \\
& = \frac{1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}}{\sqrt{2}} \cdot e^{\left(\frac{0,65\ V}{2 \cdot 0,025\ V}\right)} = \\
& = 4,5 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}
\end{aligned}
$$

y, por lo tanto, la concentración de impurezas aceptoras será

$$N_A = 2 \cdot N_D = 9,1 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}$$

De los valores numéricos se concluye que tanto la *zona P* como la *zona N* están fuertemente dopados por lo que las concentraciones de portadores mayoritarios serán,

- *Zona N:*

$$N_D >> n_i \quad \rightarrow \quad n_n \simeq N_D = 4,5 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}$$

- *Zona P:*

$$N_A >> n_i \quad \rightarrow \quad p_p \simeq N_A = 9,1 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}$$

y las concentraciones de portadores minoritarios,

- *Zona N:*

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = 4,7 \cdot 10^4\ cm^{-3} << n_n$$

- *Zona P:*

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = 2,3 \cdot 10^4\ cm^{-3} << p_p$$

Debido al carácter fuertemente dopado de ambas zonas, la contribución a la conductividad de los portadores minoritarios puede considerarse despreciable,

- *Zona N:*

$$\begin{aligned}\sigma_n &= q \cdot n_n \cdot \mu_n + q \cdot p_n \cdot \mu_p \simeq \\ &\simeq q \cdot n_n \cdot \mu_n = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 4,5 \cdot 10^{15}\ cm^{-3} \cdot 1500\ cm^2/V \cdot seg \simeq \\ &\simeq 1,1\ (\Omega \cdot cm)^{-1}\end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned}\sigma_p &= q \cdot p_p \cdot \mu_p + q \cdot n_p \cdot \mu_n \simeq \\ &\simeq q \cdot p_p \cdot \mu_p = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 9,1 \cdot 10^{15}\ cm^{-3} \cdot 475\ cm^2/V \cdot seg \simeq \\ &\simeq 0,7\ (\Omega \cdot cm)^{-1}\end{aligned}$$

En directa no hay zona de carga espacial por lo que las longitudes de las zonas neutras coincidirán con l_n y l_p; por lo tanto, conocidas las conductividades, las resistencias serán,

- *Zona N:*

$$\begin{aligned}R_n &= \frac{l_n}{\sigma_n \cdot S} = \\ &= \frac{0,4\ cm}{1,1\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,02\ cm^2} = \\ &= 18,2\ \Omega\end{aligned}$$

- *Zona P:*

$$\begin{aligned}R_p &= \frac{l_p}{\sigma_p \cdot S} = \\ &= \frac{0,2\ cm}{0,7\ (\Omega \cdot cm)^{-1} \cdot 0,02\ cm^2} = \\ &= 14,3\ \Omega\end{aligned}$$