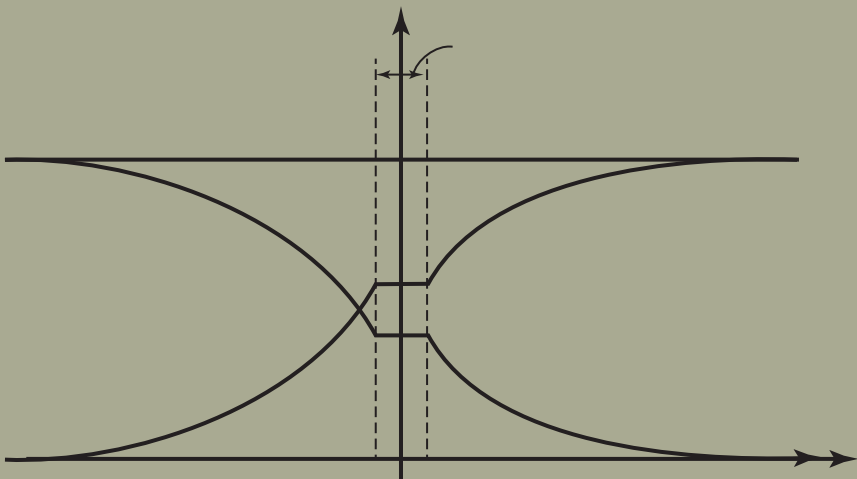


SEEC

SEMICONDUCTOR ELECTRONICS EDUCATION COMMITTEE
Tomo 2

Electrónica física y modelos de circuitos de transistores

P. E. Gray • D. DeWitt • A. R. Boothroyd • J. F. Gibbons



EDITORIAL REVERTÉ

Electrónica física y modelos de circuitos de transistores

Semiconductor Electronics Education Committee, Tomo 2

Paul E. Gray
Massachusetts Institute of Technology

David DeWitt
International Business Machines Corp., Poughkeepsie, N. Y.

A. R. Boothroyd
The Queen's University of Belfast anteriormente en el
Imperial College, Londres

James F. Gibbons
Stanford University



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:

Physical Electronics and Circuit Models of Transistors

Edición original en lengua inglesa publicada por:

JOHN WILEY & SONS, INC., NEW YORK

Authorized translation from English language edition published by John Wiley & Sons, Inc., New York.

Copyright© 1970 Education Development Center, Inc. Newton, Massachusetts, Agente exclusivo para los derechos de traducción en castellano y portugués: Trans-Editions, Inc., New York City, New York. Agente exclusivo para los derechos en otras lenguas: John Wiley & Sons, Inc. New York. Ninguna parte del material cubierto por este título de propiedad literaria podrá reproducirse en forma alguna sin el previo permiso por escrito del Educational Development Center Inc.

Edición en español:

© Editorial Reverté, S. A.

Edición en papel, 1992:

ISBN 978-84-291-3440-7 Obra completa

ISBN 978-84-291-3442-1 Tomo 2

Edición e-book (PDF), 2023:

ISBN 978-84-291-9030-4

Versión española por:

Dr. Roberto Plana Abadía

Doctor en electrónica por la Universidad de Toulouse.

Licenciado en Ciencias Físicas y profesor de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona

Revisada por:

Dr. Julián Fernández Ferrer

Catedrático de Física de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

Tel: (34) 93 419 33 36

08029 Barcelona. España

reverte@reverte.com

reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo público, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

PROPÓSITO

Es bien patente en la actualidad la importancia de los transistores y de otros dispositivos semiconductores. El subsiguiente desarrollo de los circuitos electrónicos en miniatura ha hecho desaparecer la línea divisoria entre el “dispositivo” y el “circuito”, con lo que nos ha hecho cada vez más importante el comprender profundamente la relación existente entre la Física interna y la estructura de un dispositivo y sus posibilidades en el funcionamiento del circuito. Además, la pequeñez de los dispositivos semiconductores y su funcionamiento eficaz hacen posible por primera vez una integración más íntima entre los aspectos teóricos y de laboratorio del proceso educativo.

Con el fin de preparar un nuevo material educativo que reflejase estos desarrollos, se formó a finales de 1960 un grupo conocido por Semiconductor Electronics Education Committee (SEEC). Está compuesto por universitarios e industriales unidos por facultativos del Electrical Engineering Department del Massachusetts Institute of Technology, actuando como presidente el profesor C. L. SEARLE y como director técnico el profesor R. B. ADLER. El comité emprendió la producción de un curso de Electrónica de semiconductores con varias metas, destinado principalmente a ser utilizado en las universidades en un tercer o cuarto curso.

El éxito del curso de Física para bachillerato conseguido por el Physical Science Study Committee (PSSC) llevó al SEEC a creer que el mismo tipo de combinación empleado en él (texto, experimentos de laboratorio

y películas, complementándose) sería el camino más práctico para proporcionar uniformemente una instrucción de gran calidad en el amplio campo de materias que se aborda. Se esperó que esta disposición llevaría a una amplia aplicabilidad del curso en el mundo académico, así como en ciertas actividades de ejercicio profesional en la industria y el gobierno. Este libro es uno de la serie SEEC, cuyos tomos se consignan a continuación:

- Tomo 1 *Introducción a la Física de los Semiconductores*, R. B. ADLER, A. C. SMITH y R. L. LONGINI.
- Tomo 2 *Electrónica física y modelos de circuitos de transistores*, P. E. GRAY, D. DEWITT, A. R. BOOTHROYD y J. F. GIBBONS.
- Tomo 3 *Propiedades de circuito elementales de los transistores*, C. L. SEARLE, A. R. BOOTHROYD, E. J. ANGELO, JR., P. E. GRAY, y D. O. PEDERSON.
- Tomo 4 *Características y limitaciones de los transistores*, R. D. THORNTON, D. DEWITT, E. R. CHENETTE y P. E. GRAY.
- Tomo 5 *Circuitos multietapa de transistores*, R. D. THORNTON, C. L. SEARLE, D. O. PEDERSON, R. B. ADLER y E. J. ANGELO, JR.
- Tomo 6 *Circuitos digitales de transistores*, J. N. HARRIS, P. E. GRAY y C. L. SEARLE.
- Tomo 7 *Manual de medidas y circuitos fundamentales de transistores*, R. D. THORNTON, J. G. LINVILL, E. R. CHENETTE, H. L. ABLIN, J. H. HARRIS y A. R. BOOTHROYD, J. WILLIS y C. L. SEARLE.

Estos libros han tenido, en Estados Unidos, al menos una "edición preliminar" y algunos más de una. Las ediciones preliminares se utilizaron como ensayo en algunas de las actividades de formación industrial y de los colegas participantes, aprovechando los resultados como base para una revisión.

Es casi imposible enumerar todas las personas que han contribuido al SEEC. Sin embargo, algunas de ellas o han sido miembros activos del Comité desde su constitución, o han contribuido de manera importante desde entonces. Debemos considerarlas como "miembros constituyentes" que merecen mención especial.

Por parte de las Universidades

California, Berkeley: D. O. PEDERSON

Imperial College, Londres: A. R. BOOTHROYD ¹

Iowa State: H. L. ABLIN ²

M.I.T.: R. B. ADLER, P. E. GRAY, A. L. MCWHORTER, C. L. SEARLE,
A. C. SMITH, R. D. THORNTON, J. R. ZACHARIAS, H. J. ZIMMERMANN
(Research Laboratory of Electronics), J. N. HARRIS (Lincoln Laboratory)

Minnesota: E. R. CHENETTE.

New Mexico: W. W. GRANNEMANN

Polytechnic Institute of Brooklyn: E. J. ANGELO, JR.

Stanford: J. F. GIBBONS, J. G. LINVILL.

U.C.L.A.: J. WILLIS

Por parte de las industrias

Bell Telephone Laboratories: J. M. EARLY, A. N. HOLDEN, V. R. SAARI

Fairchild Semiconductor: V. R. GRINICH

IBM: D. DEWITT

RCA: J. HILIBRAND, E. O. JOHNSON, J. I. PANKOVE

Transitron: B. DALE,³ H. G. RUDENBERG ⁴

Westinghouse Research Laboratories: A. I. BENNET, H. C. LIN, R. L. LONGINI ⁵

La dirección de las operaciones del SEEC está en manos de Educational Services, Inc. (abreviadamente ESI), Watertown, Mass., corporación no lucrativa que surgió de las actividades del PSSC y que en la actualidad se ha comprometido a varios proyectos educativos a diferentes niveles. Además de llevar la dirección general, ESI ha dado toda clase de facilidades para preparar las películas SEEC. Éstas son películas sonoras de 16 mm y una duración de 20 a 40 minutos, destinadas a complementar las materias y experimentos de laboratorio que se presentan en los diferentes libros. Se dispone ya de las dos películas siguientes:

“Zona energética prohibida y luz de recombinación en el germanio” — J. I. PANKOVE y R. B. ADLER

“Portadores minoritarios en los semiconductores” — J. R. HAYNES y W. SHOCKLEY

¹ Posteriormente en la Queen's University, Belfast.

² Posteriormente en la University of Nebraska, Department of Electrical Engineering.

³ Posteriormente en Sylvania Corp.

⁴ Posteriormente en A. D. Little, Inc.

⁵ Posteriormente en Carnegie Institute of Technology, Department of Electrical Engineering.

Otras dos películas se hallan en preparación: una trata de la unión *pn* y la otra de la relación existente entre la estructura física, los procesos de fabricación y el funcionamiento de los transistores en los circuitos. Mientras se ultima la distribución comercial, las películas existentes pueden obtenerse (en compra o alquiler) directamente de los Educational Service, Inc., 47 Galen Street, Watertown, Mass.

El comité se ha preocupado también de producir material de laboratorio para ser empleado junto con los libros y las películas. En los libros se cita este material y puede obtenerse más información del ESI.

La preparación del programa SEEC completo, incluidos todos los libros, fue financiada primeramente por un crédito que la Ford Foundation hizo al Massachusetts Institute of Technology, con el fin de mejorar la formación de técnicos, y posteriormente por nuevos créditos hechos al ESI por la National Science Foundation. Agradecemos profundamente estos apoyos.

CAMPBELL L. SEARLE

Director, SEEC

RICHARD B. ADLER

Director técnico, SEEC

PRÓLOGO

Este texto ha sido escrito bajo la premisa de que los diseñadores y los utilizadores de dispositivos semiconductores a unión necesitan entender las importantes relaciones entre la estructura y el comportamiento interno del dispositivo, sus características de circuito y sus posibilidades. Debido a las ventajas de pequeño tamaño, mejor comportamiento y precio moderado, la implantación de los circuitos electrónicos tiende hacia una mayor integración de circuitos, con todo o parte del *circuito* fabricado en el mismo proceso que produce el *dispositivo semiconductor activo*. En este *arte naciente*, los diseñadores del circuito, del dispositivo y del proceso de fabricación deben trabajar en equipo. Es por ello de desear que cada miembro del equipo tenga conocimiento de las posibilidades y limitaciones de cada uno de sus colegas.

Este libro tiene cuatro objetivos:

- (1) Proporcionar una sólida comprensión del comportamiento físico interno de los diodos a unión y de los transistores.
- (2) Obtener modelos aproximados de circuito que caractericen al dispositivo en ciertas condiciones limitadas de funcionamiento.
- (3) Proporcionar el conocimiento de las limitaciones inherentes a los diferentes modelos de circuito y de las relaciones entre los varios modelos.
- (4) Mostrar cómo los parámetros de los modelos de circuito dependen de la estructura física del dispositivo, de su punto de funcionamiento eléctrico y de su temperatura.

Aunque creemos que este libro se basta a sí mismo, hemos de indicar que fue concebido como perteneciente a una serie que cubre la electrónica del transistor desde su constitución física hasta las consideraciones para el diseño de circuitos. Se pretende que esta serie proporcione un conocimiento claro y completo de *un* dispositivo de incuestionable importancia tecnológica: el transistor. Dado que este objetivo no caracteriza normalmente a un primer curso de electrónica, los autores ven la utilidad de la serie completa de libros como un “segundo contacto” con la electrónica. Sin embargo, presentando varios textos separados, tal como éste, esperamos haber dado una flexibilidad suficiente para poder hacer uso de este material, en todo o en parte, desde los primeros cursos de universidad hasta un nivel profesional o de postgraduado.

Este libro, como los otros de la serie SEEC, se limita a los diodos a unión y a los transistores. Nuestra principal justificación para haber excluido el resto de dispositivos semiconductores es la creciente necesidad que sentimos de una exposición que trate *un dispositivo* con detalle suficiente para que los estudiantes se familiaricen con su estructura interna y sus características para empezar a aplicarlo en diseños de cierta complejidad. En adición a esto, está bien comprobado que un conocimiento profundo del transistor facilita en gran manera la comprensión del resto de los dispositivos semiconductores a unión.

Debido a nuestra creencia de que los efectos físicos de segundo orden se comprenden mejor después de un tratamiento preliminar de las propiedades de circuito, el presente libro se orienta hacia la física electrónica *de primer orden* y modelos de circuito de diodos y transistores. Otro libro de esta serie el tomo IV *Características y Limitaciones de los Transistores*, por R. D. Thornton, D. DeWitt, E. R. Chenette y P. E. Gray, presenta en detalle los importantes efectos de segundo orden que a menudo determinan las últimas limitaciones del comportamiento del dispositivo.

Siguiendo la costumbre tradicional, se han incluido varios problemas al final de la mayor parte de los capítulos. Algunos de estos problemas ilustran desarrollos analíticos que de otro modo se hubieran incluido en el texto. Otros son ejercicios que contribuirán a que el estudiante tenga confianza en su habilidad en la *utilización* de las técnicas descritas en el texto.

Se supone que los lectores de este libro han estudiado los principios de circuitos electrónicos incluyendo la teoría lineal de cuadripolos y el uso de generadores dependientes. También se asume que se conoce el mecanismo de la conducción eléctrica en los semiconductores, incluyendo:

- (a) La posibilidad de dos modos distintos de conducción eléctrica asociada con el movimiento de los electrones en un sólido, que

- conduce a los conceptos de *huecos* y *electrones de conducción* como portadores de corriente.
- (b) Los medios metalúrgicos y de medio ambiente que hacen variar el número de cada clase de portadores presentes en un semiconductor.
 - (c) Las propiedades dinámicas de los portadores, es decir los procesos de *arrastre* en un campo eléctrico, *difusión* en un gradiente de concentración y *generación* y *recombinación* de pares electrón-hueco.

Estas materias fundamentales se tratan adecuadamente en otro volumen de esta serie, el tomo I *Introducción a la Física del Semiconductor*, por R. B. Adler, A. C. Smith y R. L. Longini.

Los autores indicados al pie son deudores a todos los miembros del SEEC por su apoyo, su guía y su crítica. Su ayuda en la preparación de los capítulos, formulación de las exposiciones técnicas, y revisión crítica y corrección de las ediciones preliminares han sido de la mayor importancia para alcanzar los objetivos y dar forma al contenido de este libro. Somos también deudores de Lawrence Castro, John Kassakian y Alton Tripp, quienes como estudiantes del M.I.T trabajando con nosotros durante el verano en el SEEC, realizaron la mayor parte de las medidas, fotografías de osciloscopio y cálculos utilizados en este libro.

Paul E. Gray
David DeWitt
A. R. Boothroyd
James F. Gibbons

Cambridge, Massachusetts
Mayo de 1964

ÍNDICE ANALÍTICO

- 1 Dispositivos semiconductores de unión, 1**
 - 1.0 Introducción, 1
 - 1.1 Diodos de unión, 1
 - 1.2 Transistores de unión, 3
- 2 Funcionamiento físico de los diodos de unión pn , 8**
 - 2.0 El diodo de unión pn abrupta, 8
 - 2.1 Unión pn en equilibrio, 9
 - 2.2 Efecto de una tensión de polarización en la unión pn , 14
 - 2.3 Análisis de la capa de carga espacial, 18
 - 2.4 Uniones pn graduales, 27
- 3 Comportamiento en c.c. de los diodos de unión pn , 32**
 - 3.0 El diodo de unión pn idealizado, 32
 - 3.1 Distribución y circulación de las cargas en el diodo idealizado, 33
 - 3.2 Distribución y circulación de los portadores minoritarios, 38
 - 3.3 Ecuación del diodo de unión pn idealizado, 43
 - 3.4 Distribuciones y corrientes de los portadores mayoritarios, 51
- 4 Otros efectos en los diodos de unión pn , 58**
 - 4.0 Limitaciones del modelo idealizado, 58
 - 4.1 Caída de tensión en las regiones neutras, 59
 - 4.2 Generación y recombinación de portadores en la capa de carga espacial, 60

- 4.3 Divergencias respecto a la corriente inversa de saturación, 62
- 4.4 Disrupción en la unión, 64
- 4.5 Contactos óhmicos, 70
- 4.6 Recombinación superficial en los diodos de base delgada, 73
- 5 Comportamiento dinámico de los diodos de unión *pn*, 78**
 - 5.0 Efectos dinámicos en los diodos, 78
 - 5.1 Dinámica de los portadores minoritarios en exceso, 79
 - 5.2 Transitorios de conmutación del diodo de unión, 82
 - 5.3 Comportamiento del diodo de unión con señales sinusoidales de poca amplitud, 90
 - 5.4 Cambios dinámicos en la carga almacenada en la capa de carga espacial, 93
- 6 Modelos con constantes localizadas para los diodos de unión, 100**
 - 6.0 Introducción, 100
 - 6.1 Modelo con constantes localizadas para un diodo de unión, 101
 - 6.2 Empleo del modelo con constantes localizadas, 115
- 7 Estructura y funcionamiento de los transistores, 123**
 - 7.0 Introducción, 123
 - 7.1 Funcionamiento del transistor en el modo activo, 127
 - 7.2 El transistor como amplificador, 134
 - 7.3 Modelos de circuito activados por corriente, 138
 - 7.4 Modelo dinámico de circuito para señales de poca amplitud, 140
- 8 Modelos de transistor para señales de poca amplitud, 150**
 - 8.0 Introducción, 150
 - 8.1 Tensión de señal en el colector y modulación de la anchura de la base, 150
 - 8.2 Resistencia de base-signal continua de gran amplitud, 157
 - 8.3 Efectos de la resistencia de base en las señales de poca amplitud, 164
 - 8.4 Modelos para señales de poca amplitud que incluyen la capacidad de la carga espacial, 170
- 9 Modelo de Ebers-Moll para la característica tensión-intensidad de un transistor, 176**
 - 9.0 Funcionamiento no lineal del transistor, 176
 - 9.1 Comportamiento interno en c.c. del transistor idealizado, 177
 - 9.2 Características volt-ampere en c.c., 185
 - 9.3 Regiones de funcionamiento, 189

9.4 Efectos de una base gradual en el comportamiento con señales de gran amplitud, 194

10 Modelos de transistor para conmutaciones dinámicas, 202

10.0 Introducción, 202

10.1 Ideas básicas: Definición según la carga de las propiedades del dispositivo y regulación de la carga, 203

10.2 Modelo de transistor de dos localizaciones, 211

10.3 Condiciones de validez del modelo de dos localizaciones y de las ecuaciones de regulación de la carga, 216

10.4 Ejemplo de utilización del modelo con constantes localizadas para los cálculos en el transitorio, 225

10.5 Representación del almacenamiento de carga en las capas de carga espacial, 232

10.6 Almacenamiento de carga en el colector y en las regiones lejanas de la base, 237

APÉNDICE A Estudio más detallado de la capa de carga espacial de una unión pn , 247

A.0 Introducción, 247

A.1 Capa de carga espacial en equilibrio, 247

A.2 Cambios producidos por una tensión de polarización, 253

APÉNDICE B El campo eléctrico en las regiones neutras de una unión pn , 256

B.1 Campo eléctrico, 256

B.2 Carga espacial, 259

ÍNDICE, 261

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área de la unión
C_i	capacidad incremental de la capa de carga espacial de la unión
C_{ic}	capacidad incremental de la unión colectora
C_{ie}	capacidad incremental de la unión emisora
C_v	carga almacenada no lineal de la capa de carga espacial de la unión
C_{vc}	carga almacenada no lineal de la unión colectora
C_{ve}	carga almacenada no lineal de la unión emisora
D	constante de difusión de los portadores — ver Nota 1
E_g	energía de ionización necesaria para producir un par hueco-electrón, es decir la anchura de la zona energética prohibida
E_{g0}	anchura de la zona energética prohibida extrapolada al cero absoluto
$\mathcal{E}$	campo eléctrico
$\mathcal{E}_0$	campo eléctrico en el límite metalúrgico de una unión pn
f_r	frecuencia a la cual la componente incremental de la intensidad de base que se necesita para cargar el exceso de portadores en la base es igual a la intensidad incremental de colector
g	conductancia incremental de un diodo de unión
g_m	transconductancia incremental de un transistor de unión
H_o, H_C	el parámetro combinancia utilizado en los modelos con elementos de circuito localizados
H_D	el parámetro difusancia utilizado en los modelos con elementos de circuito localizados
I, i	intensidad de corriente eléctrica — ver Nota 2
I_{co}	intensidad de saturación de la unión colectora de un transistor con el emisor en circuito abierto
I_{cs}	intensidad de saturación de la unión colectora de un transistor con el emisor corto-circuitado a la base

I_{ES}	intensidad de saturación de la unión emisora de un transistor con el colector corto-circuitado a la base
I_f	intensidad directa (en sentido favorable) de un diodo de unión
I_r	intensidad inversa (en sentido desfavorable) de un diodo de unión
I_s	intensidad de saturación de un diodo de unión idealizado
J	densidad de corriente. Los subíndices h y e indican densidades de corriente de huecos y de electrones
k	constante de Boltzmann
L	longitud de difusión de los portadores — ver Nota 1
$\mathcal{L}$	longitud característica de la distribución exponencial de impurezas en un transistor de base gradual
L_D	longitud extrínseca de Debye
L_i	longitud intrínseca de Debye
l	anchura total de la capa de vaciamiento de una unión
l_n	anchura de la porción de la capa de vaciamiento en el material de tipo n
l_p	anchura de la porción de la capa de carga espacial en el material de tipo p
M	razón de multiplicación de alud
M_i	factor de capacidad de la capa de carga espacial utilizado en los cálculos para señales de gran amplitud
N	concentración total de impurezas, es decir, el exceso de concentración de donantes respecto a la concentración de aceptadores
N_a	concentración de impurezas aceptadoras
N_A	concentración de aceptadores en el lado de tipo p de una unión pn abrupta
N_d	concentración de impurezas donantes
N_D	concentración de donantes en el lado de tipo n de una unión pn abrupta
n	concentración de electrones — ver Nota 3
n'	concentración de electrones en exceso — ver Nota 3
$n_i, n_i(T)$	concentración de portadores intrínsecos
p	concentración de huecos — ver Nota 3
p'	concentración de huecos en exceso — ver Nota 3
P	amplitud compleja de la concentración de huecos en exceso
q	magnitud de la carga electrónica
q_b, q_B	carga total almacenada de los portadores minoritarios en exceso en la base de un transistor
q_e	carga total almacenada de electrones en exceso
q_F	componente directa de la carga almacenada en la base de los portadores minoritarios en exceso
q_h	carga total almacenada de los huecos en exceso
q_j	carga en cada mitad de la capa dipolar de la región de carga espacial de la unión
q_R	componente inversa de la carga almacenada en la base de los portadores minoritarios en exceso
q_S	carga de saturación almacenada en la base de un transistor
q_{VE}	carga de la capa de carga espacial de la unión emisora medida respecto a la carga correspondiente a $V_{EB} = 0$
q_{VC}	carga de la capa de carga espacial en la unión colectora, medida respecto a la carga correspondiente a $V_{CB} = 0$
R_B	resistencia de base para señales de gran amplitud de corriente continua
r_b	resistencia de base incremental a baja frecuencia
S	el parámetro acumulancia utilizado en los modelos con elementos de circuito localizados
S_r	velocidad de recombinación superficial

s	variable de frecuencia compleja
T	temperatura absoluta
t_s	tiempo de retraso por almacenamiento de un diodo de unión
V, v	tensión entre dos terminales — ver Nota 2
V_a	tensión disruptiva de alud
W	anchura de la región neutra de base en un transistor o diodo de región delgada
x, x', x''	coordenada de posición longitudinal en un modelo unidimensional de diodo o transistor
$\mathcal{Y}$	operador diferencial incremental
y	coordenada de posición transversal en la región activa de base de un transistor; parámetro de admitancia incremental
y_f	admitancia incremental directa o mutua de un transistor con emisor común
y_i	admitancia de entrada incremental de un transistor con emisor común
y_o	admitancia de salida incremental de un transistor con emisor común
y_r	admitancia inversa incremental de un transistor con emisor común
z_b	impedancia de base incremental
α	ganancia incremental de intensidad en corto-circuito con base común
α_F	ganancia de intensidad en corto-circuito con inyección en sentido favorable para señales de gran amplitud, con base común
α_R	ganancia de intensidad en corto-circuito con inyección en sentido desfavorable para señales de gran amplitud, con base común
β	ganancia incremental de intensidad en corto-circuito con emisor común
β_F	ganancia de intensidad en corto-circuito con inyección en sentido favorable para señales de gran amplitud, con emisor común
β_R	ganancia de intensidad en corto-circuito con inyección en sentido desfavorable para señales de gran amplitud, con emisor común
γ	rendimiento de inyección de huecos en una unión pn
Δ	designa una pequeña variación cuando se pone delante de una variable
δ	defecto de recombinación en la base de un transistor y de rendimiento del emisor
δ_b	defecto de recombinación en la base de un transistor
ϵ	permitividad dieléctrica absoluta
η	factor de modulación de la anchura de base
Λ	longitud de difusión compleja — ver Nota 1
μ	movilidad de los portadores de carga — ver Nota 1
ρ	concentración de la carga espacial
τ	vida media de los portadores de carga en exceso — ver Nota 1
τ_{BF}	vida media eficaz en la región de base con inyección en sentido favorable
τ_{BR}	vida media eficaz en la región de base con inyección en sentido desfavorable
τ_F	parámetro regulador de carga con inyección en sentido favorable
τ_R	parámetro regulador de carga con inyección en sentido desfavorable
τ_S	parámetro regulador de carga en la región de saturación
ψ	potencial electrostático
ψ_0	barrera de potencial electrostático en equilibrio térmico en una unión pn (potencial de contacto)
ω	pulsación
ω_T	pulsación a la cual la componente incremental de la intensidad de base que se necesita para cargar el exceso de portadores en la base es igual a la intensidad incremental de colector

Nota 1

Cuando se trata de constantes de difusión, movilidades, vidas medias y longitudes de difusión, los subíndices *e* y *h* se utilizan *referentes a los diodos* para indicar que los parámetros describen, respectivamente, las propiedades dinámicas de los portadores minoritarios electrones o huecos. *Referentes a los transistores*, los subíndices *e*, *b* y *c* se utilizan para indicar que los parámetros se aplican a los portadores minoritarios en las regiones del emisor, de la base y del colector. En los pocos casos en que se utilizan las constantes de difusión o movilidades de los portadores mayoritarios, se emplean dobles subíndices si hay posibilidad de confusión.

Nota 2

Las intensidades y las tensiones en los terminales de los diodos y transistores se designan de la siguiente manera:

Para los diodos:

variables del punto de funcionamiento o de c.c. — letras mayúsculas

variables instantáneas totales — letras minúsculas

variables incrementales — Δ frente a la letra mayúscula

Para los transistores: Los subíndices indican el terminal hacia el que se dirige la corriente o bien el par de terminales donde aparece la tensión

variables del punto de funcionamiento o de c.c. — letras mayúsculas con subíndices en mayúsculas

variables instantáneas totales — letras minúsculas con subíndices en mayúsculas

variables instantáneas incrementales — letras minúsculas con subíndices en minúsculas

amplitudes complejas de componentes incrementales. — letras mayúsculas con subíndices en minúsculas

Nota 3

Cuando se indican concentraciones de portadores, la región semiconductor se señala por un subíndice *n* o *p* para un diodo o por *e*, *b* y *c* para un transistor. El uso de un segundo subíndice *o* denota el valor de la concentración correspondiente en el equilibrio térmico.

DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES DE UNIÓN

1.0 Introducción

Este libro trata de las relaciones entre el comportamiento físico interno de los diodos y de los transistores de unión y sus propiedades como componentes de un circuito eléctrico. Sin embargo, antes de empezar nuestro estudio detallado de la electrónica física de estos dispositivos, describiremos cualitativamente los principios generales de su funcionamiento y las principales características eléctricas de los diodos y de los transistores de unión.

1.1 Diodos de unión

Un diodo de unión pn consiste en un semiconductor que posee una región de material de tipo p y una región de material de tipo n , separadas por una región relativamente delgada de transición de un tipo de conductividad al otro. Esta región de transición puede ser del orden de 10^{-6} a 10^{-4} cm de espesor según sea el método de obtención. La Fig. 1.1 muestra una estructura representativa del diodo. La región de tipo p tiene muchos más huecos que electrones de conducción, mientras que en la región de tipo n los electrones son los portadores mayoritarios. Esta circunstancia conduce a una diferencia señalada en la intensidad de corriente que fluye a través de la unión cuando se invierte la polaridad de la tensión aplicada, y es responsable, en consecuencia, de las características de rectificación de la estructura.

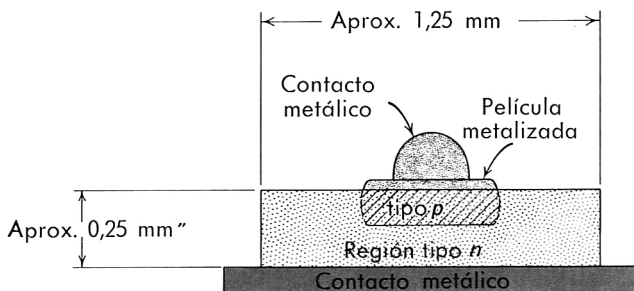


Fig. 1.1. Estructura física de un diodo de unión pn difusa. El diodo se obtiene por difusión de una impureza de tipo p en el material inicial de tipo n . En consecuencia, una parte del semiconductor se convierte en tipo p . Las conexiones eléctricas se efectúan mediante metales que se sueldan, se depositan por vaporización o se unen por compresión al semiconductor.

Si la tensión aplicada hace a la región de tipo p positiva respecto a la región de tipo n , electrones y huecos tienden a converger hacia la unión. Fluyen de regiones de gran concentración, donde son portadores mayoritarios, pasando a través de la unión a regiones de baja concentración donde son portadores minoritarios. La intensidad de corriente es elevada para una pequeña tensión aplicada, y, debido a la distribución de Boltzmann de las energías de los portadores, tiende a crecer exponencialmente en función de la tensión. Esta polaridad, con la región de tipo p positiva respecto a la región de tipo n , es conocida como *polarización favorable* (también llamada *polarización directa*).

Una importante consecuencia de la polarización favorable es la penetración de los huecos a través de la unión en el material de tipo n , y la penetración análoga de los electrones en el material del tipo p . Esta penetración se extiende sobre una distancia que el exceso de portadores minoritarios puede atravesar antes de desaparecer por recombinación con los portadores mayoritarios presentes. A estas distancias, normalmente del orden de 10^{-3} a 10^{-1} cm, se dice que hay una gran *inyección de portadores minoritarios* a uno y otro lado de la unión.

La situación es bastante diferente si la tensión aplicada hace a la región p *negativa* respecto a la región de tipo n . Huecos y electrones tienden a *separarse* de la unión. No se puede establecer una corriente estacionaria de este tipo a través de la unión a no ser que haya un suministro de huecos del lado de tipo n o de electrones del lado de tipo p , o ambos al mismo tiempo. Entonces los portadores provienen de regiones

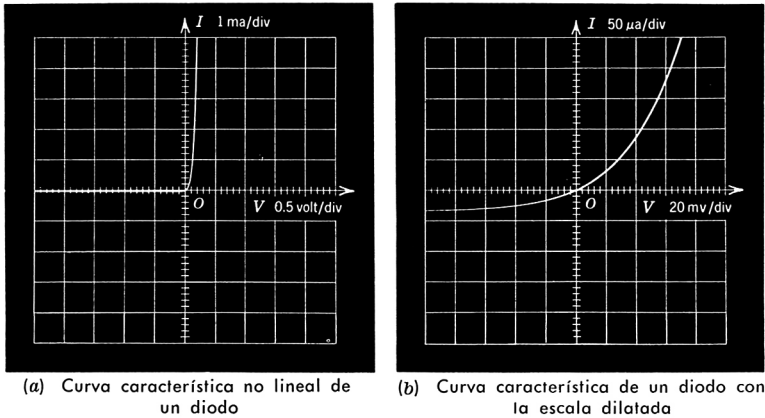


Fig. 1.2. Curvas características tensión-intensidad de un diodo de unión.

de baja concentración, donde son *minoritarios*, y la intensidad es pequeña. Este es el caso de *polarización desfavorable* (o *inversa*) de la unión. Mientras el suministro de portadores minoritarios está limitado por la cadencia a la que se rompen los enlaces por efecto térmico, la intensidad en sentido desfavorable, a la cual llamaremos intensidad inversa es, entre amplios límites, prácticamente independiente de la tensión inversa aplicada. Sin embargo, es extremadamente sensible a los cambios de temperatura debido a que la concentración de los portadores minoritarios, que originan la corriente inversa, depende directamente de la temperatura [a través de $n_i^2(T)$].

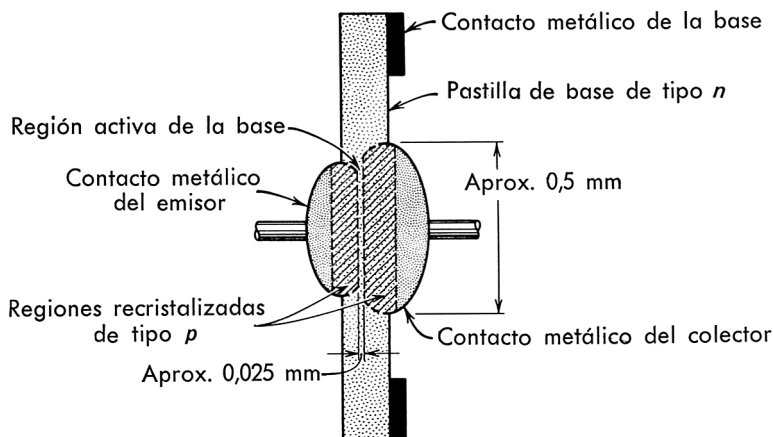
En la Fig. 1.2 se muestra una curva característica tensión-intensidad de un diodo de germanio de unión *pn*. La gran diferencia entre la polarización directa y la inversa se aprecia en la Fig. 1.2a, cuya escala de tensiones es de 0,5 V por división. La Fig. 1.2b, con escalas dilatadas, muestra más claramente el comportamiento del diodo en las proximidades de la polarización nula. Es de notar el gran aumento de intensidad con la polarización directa y la intensidad inversa aproximadamente constante.

1.2 Transistores de unión

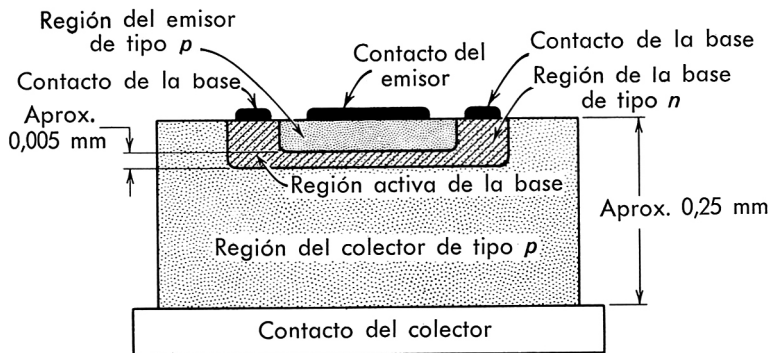
Un transistor de unión tiene como configuración dos uniones *pn* opuestas y una delgada región de tipo *p* o de tipo *n* entre ellas. Las estructuras de dos transistores de unión se muestran en la Fig. 1.3. Se les llama transistores *pnp* en correspondencia con el orden de las capas. La delgada región de tipo *n* entre las uniones, llamada *región activa de base*, es la característica más importante de estas configuraciones físicas.

4 Dispositivos semiconductores de unión

Un transistor utilizado como amplificador opera normalmente con una unión pn , llamada *emisor*, polarizada en sentido favorable, y la otra unión llamada *colector*, polarizada en sentido desfavorable, según se indica en la Fig. 1.4a. Bajo estas condiciones la intensidad de colector es mucho mayor que la intensidad inversa de una unión pn aislada. En efecto, la intensidad de colector es sólo algo menor que la intensidad de



(a) Transistor de unión aleada pnp



(b) Transistor pnp de unión difusa

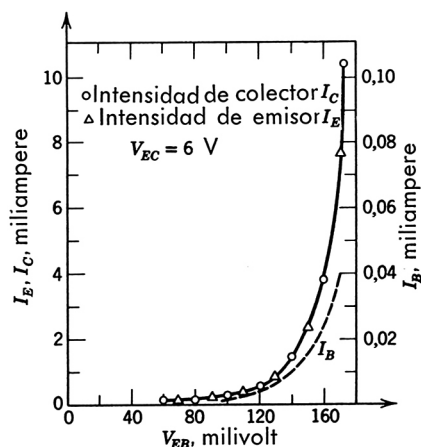
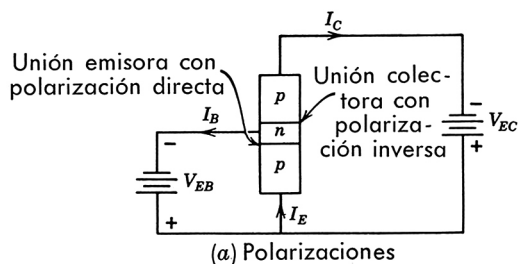
Fig. 1.3. Estructuras físicas de los transistores de unión. La unidad aleada se obtiene por aleación de un metal que contiene gran cantidad de impurezas de tipo p en la pastilla semiconductora de tipo n . Cuando la pastilla se enfría, el semiconductor recrystaliza con una preponderancia de impurezas de tipo p en las regiones recrystalizadas. La unidad difusa se obtiene por difusión de impurezas de tipo n y de tipo p en la región colectora de tipo p . En la Fig. 7.1 se muestran otros esquemas de estas estructuras.

emisor, cuyo valor es elevado y depende mucho de la tensión emisor-base, debido a que la unión emisora está polarizada favorablemente. La figura 1.4b pone de manifiesto cómo las intensidades de emisor y de colector dependen fuertemente de la tensión emisor-base. La intensidad de base, que es simplemente la diferencia entre las intensidades de emisor y de colector, no se puede deducir de estas curvas ya que son aproximadamente iguales. Por ello la intensidad de base se indica separadamente sobre una escala 100 veces mayor. Aunque estas curvas se han obtenido para un valor determinado de la polarización inversa de la unión colectora, los resultados son sustancialmente independientes de ese valor.

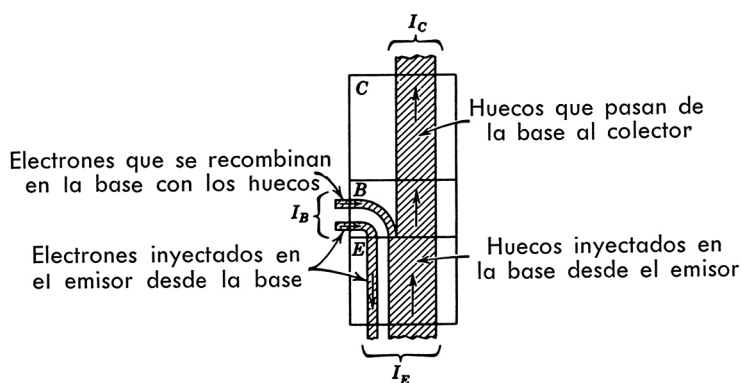
En términos simples la intensidad de colector es casi igual a la intensidad de emisor y depende directamente de la tensión emisor-base. Se llega a esta situación, en primer lugar, debido a que el grado de impurezas en el emisor y en la base se ajusta de modo que la corriente de emisor consista casi enteramente en huecos inyectados en la base (con preferencia a electrones inyectados en el emisor) por la unión emisora polarizada favorablemente; y, en segundo lugar, debido a que casi todos estos huecos inyectados atraviesan la delgada región de base sin recombinarse y son arrastrados a la unión colectora contribuyendo así a la corriente del colector. Es decir, la estructura física del transistor permite la regulación de la intensidad de corriente inversa de una unión *pn* por la polarización directa aplicada a la otra unión *pn*. *El transistor es, por lo tanto, una válvula en la cual la intensidad de colector se regula por la tensión emisor-base.*

Esta regulación se efectúa con muy poca intensidad de base. La intensidad de base que es típicamente de $1/10$ a $1/200$ de la intensidad de colector, proviene de la inyección de electrones de la base al emisor y también de la recombinación en la base de una pequeña fracción de los huecos inyectados en la base por el emisor. Los principales componentes de las intensidades de corriente en los terminales de un transistor se representan esquemáticamente en la Fig. 1.4c.

Se desprende de esta descripción de su funcionamiento que el transistor procura una ganancia de potencia. La potencia consumida en los terminales emisor-base es poca, ya que la unión emisor-base polarizada favorablemente requiere variaciones de tensión relativamente pequeñas para producir grandes variaciones de la intensidad de colector (ver figura 1.4b), y además porque la intensidad de base es pequeña. La potencia que se puede obtener en la carga del colector es en principio elevada debido a que la intensidad de colector es prácticamente independiente del valor de la tensión aplicada a la unión colectora mientras esté polarizada desfavorablemente. La resistencia de carga conectada en serie con el colector puede por tanto tener un valor bastante elevado permitiendo



(b) Intensidades de colector y de emisor en función de la tensión emisor-base



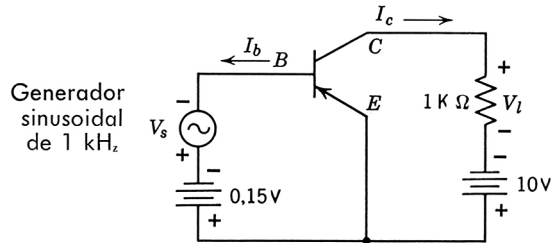
(c) Representación esquemática de las intensidades de corriente en los terminales de un transistor

Fig. 1.4. Transistor de unión *pnp*. Nótese que en (b) la escala de la intensidad de base está dilatada 100 veces.

grandes variaciones de la tensión colector-base. Por ejemplo, si el transistor cuyas características se indican en la figura 1.4b se utiliza en el circuito de la figura 1.5, la razón de la potencia alterna disipada en la carga a la potencia alterna suministrada a la entrada del transistor es del orden de 10^4 . Esta razón puede alcanzar valores de hasta 5×10^4 en un amplificador con un solo transistor.

El símbolo utilizado para representar al transistor en la Fig. 1.5 es la notación normal correspondiente a un transistor *pnp*. La identificación de los tres terminales que se muestra en el diagrama es la misma para los transistores *pnp* o *nnp*. Teniendo en cuenta que para representar los *nnp* la flecha en el emisor señala hacia afuera y no hacia la base. En cada tipo la dirección de la flecha coincide con la dirección de la corriente de emisor en el *modo normal* de funcionamiento (polarización directa de la unión emisora, polarización inversa de la unión colectora).

El análisis del comportamiento del transistor y el desarrollo de los modelos de circuito que caracterizan al dispositivo dependen de una completa comprensión del funcionamiento básico interno. Dado que la acción del transistor es una extensión del comportamiento del diodo de unión *pn*, y requiere un conocimiento profundo de la electrónica física de los diodos, proseguiremos directamente con el estudio de los diodos de unión y pospondremos el del transistor hasta el Capítulo 7.



V_s —Tensión eficaz del generador 1 mV

I_b —Intensidad eficaz de base (componente alterna) 1 μ A

I_c —Intensidad eficaz de colector (componente alterna) 100 μ A

V_i —Tensión eficaz en la carga (componente alterna) 0,1 V

$$\frac{\text{potencia alterna en la carga}}{\text{potencia alterna a la entrada}} = \frac{I_c \times V_i}{I_b \times V_s} = 10^4$$

Fig. 1.5. Amplificador transistorizado típico.

FUNCIONAMIENTO FÍSICO DE LOS DIODOS DE UNIÓN pn

2.0 El diodo de unión pn abrupta

Aunque existen varios procesos básicos para fabricar diodos de unión, el comportamiento físico interno y las propiedades eléctricas de los diodos obtenidos según los diferentes métodos son apreciablemente similares.

Veremos más adelante que las diferencias de detalle que aparecen se relacionan con la distribución de las impurezas donantes y aceptadoras en las proximidades de la unión. Para poner de relieve las características más señaladas de los diodos, sin introducir detalles demasiado complicados que no sean esenciales, se estudiará en primer lugar una *unión pn abrupta*. Se trata de una unión en la que la transición de un semiconductor de tipo p a otro de tipo n tiene lugar en una región de espesor despreciable, "abruptamente".

Las uniones obtenidas por medio de aleaciones poseen regiones de transición de menos de 10^{-6} cm de espesor y se pueden considerar como uniones abruptas.

También se supone que la *unión metalúrgica* o límite entre las regiones de tipo p y tipo n es un plano, que todas las distribuciones de portadores y las corrientes son uniformes en planos paralelos al plano límite y que todas las corrientes son perpendiculares a éste, según se muestra en la Fig. 2.1. Este modelo *unidimensional* corresponde a las estructuras representativas indicadas en las Figs. 1.1 y 1.3, y está justificado en la mayoría de las uniones pn .

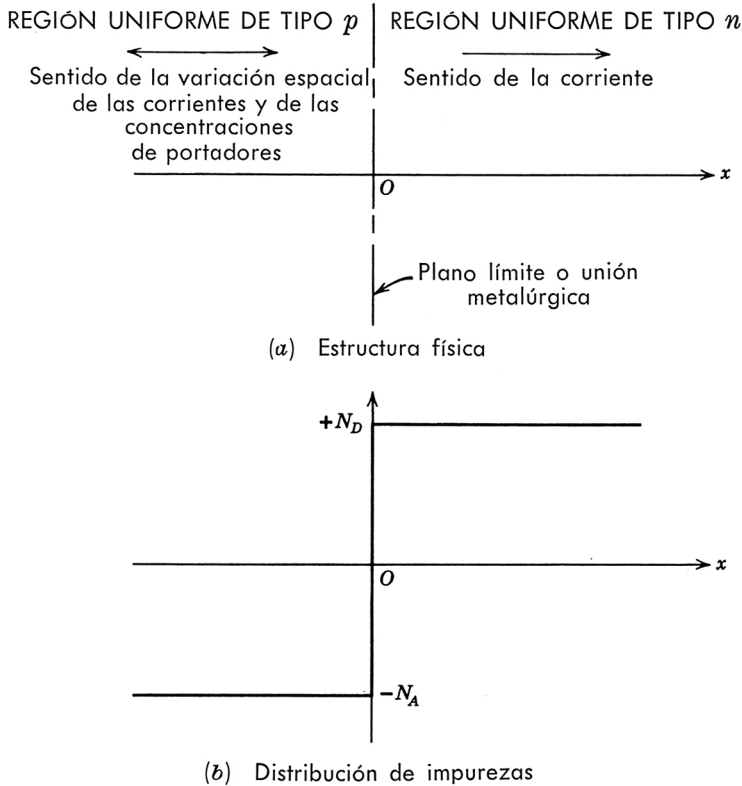


Fig. 2.1. Representación física ideal y distribución de impurezas de una unión pn abrupta.

2.1 Unión pn en equilibrio

Se dice que una unión pn está en equilibrio cuando se encuentra a una temperatura uniforme y no actúan sobre ella factores externos, tales como la luz o una tensión de polarización. Bajo condiciones de equilibrio las corrientes de huecos y de electrones deben anularse en cada punto del semiconductor.

2.1.1 Barrera de potencial en el equilibrio

En un material homogéneo de tipo p y lejos de la unión metalúrgica, las concentraciones de huecos y electrones son uniformes y vienen deter-