
**INTRODUCCION A LOS DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES:
PRINCIPIOS Y MODELOS**



INTRODUCCIÓN A LOS DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES: PRINCIPIOS Y MODELOS

Pedro Julián



Editorial de la Universidad Nacional del Sur

Serie: Docencia
Colección Ciencias y Tecnología

Julián, Pedro

Introducción a los dispositivos semiconductores: principios y modelos. - 2a ed. - Bahía Blanca: Editorial de la Universidad Nacional del Sur. Ediuns, 2012. 224 p.; 30x21 cm.

ISBN 978-987-1620-81-4

1. Ingeniería Eléctrica. 2. Semiconductores. 3. Capacitores. I. Título
CDD 621.315

Fecha de catalogación: 07/03/2012



Editorial de la Universidad Nacional del Sur
www.ediuns.uns.edu.ar
ediuns@uns.edu.ar



**Red de Editoriales de
Universidades Nacionales**

LIBRO UNIVERSITARIO ARGENTINO

No se permite la reproducción parcial o total, el alquiler, la transmisión o la transformación de este libro, en cualquier forma o por cualquier medio, sea electrónico o mecánico, mediante fotocopias, digitalización u otros métodos, sin el permiso previo y escrito del editor. Su infracción está penada por las leyes 11.723 y 25.446.

Queda hecho el depósito que establece la Ley 11.723
Bahía Blanca, Argentina, 2012.
© 2012, EdiUNS.

*A aquellos que hoy no están,
y que, con sus vidas, me mostraron el camino:*

*Mis padres, Haydée y Félix,
y Alfredo Desages*

*A quien camina conmigo hoy,
mi esposa Ana Laura;
y a nuestros pequeños hijos,
que nos siguen*

Índice general

Prefacio	VII
1. Modelos de Circuitos Eléctricos	1
1.1. Bloques constitutivos de modelos	2
1.1.1. Resistores	2
1.1.2. Capacitores	2
1.1.3. Inductores	3
1.1.4. Memristores	4
1.1.5. Fuentes independientes	5
1.1.6. Fuentes controladas	6
1.1.7. Convenciones	6
1.2. Clasificación de modelos	6
1.2.1. Modelos según la amplitud	6
1.2.2. Modelos según la frecuencia	8
1.2.3. Construcción de modelos	12
2. Introducción a los semiconductores	17
2.1. Bandas de Energía en Silicio	17
2.2. Equilibrio Térmico	21
2.3. Dopado	25
2.3.1. Dopado Tipo N	26
2.3.2. Dopado Tipo P	31
2.3.3. Compensación	33
2.4. Mecanismos de conducción	35
2.4.1. Arrastre	35
2.4.2. Difusión	40
2.4.3. Resistividad de una lámina de Silicio	44
2.5. Potenciales relativos en Silicio	46
A. Conducción: Conceptos Auxiliares	49
A.1. Tiempo de tránsito	49
A.2. Efecto Hall	49
B. Electroestática	51
C. Potenciales de contacto	53

3. Juntura Semiconductora y Diodos	55
3.1. Descripción Cualitativa	55
3.2. Electroestática de la Juntura	56
3.3. Modelo de DC	62
3.3.1. Ley de la Juntura	63
3.3.2. Solución en directa	65
3.3.3. Solución en inversa	68
3.3.4. Desviaciones del comportamiento ideal	70
3.4. Modelo Lineal Incremental	72
3.5. Modelo de AC	74
3.5.1. Capacidad en inversa	74
3.5.2. Capacidad en directa	77
3.6. Mecanismos de ruptura inversa	79
3.6.1. Efecto Túnel	80
3.6.2. Avalancha	80
4. Capacitor MOS	83
4.1. Descripción Cualitativa	83
4.2. Electroestática del capacitor MOS	84
4.2.1. Potencial de Banda Plana	84
4.2.2. Acumulación	85
4.2.3. Vaciamiento	88
4.2.4. Inversión	91
4.3. Modelo de AC	95
4.4. Otras configuraciones	97
4.4.1. Capacitor MOS sobre un sustrato P y gate P	98
4.4.2. Capacitor MOS sobre un sustrato N y gate N	98
4.4.3. Capacitor MOS sobre un sustrato N y gate P	100
5. Transistor MOS	103
5.1. Descripción cualitativa	103
5.2. El transistor NMOS	103
5.2.1. Principio básico de funcionamiento	103
5.2.2. Modelo referido al Sustrato	106
5.2.3. Modelo referido al Source	116
5.2.4. Desviaciones del comportamiento ideal	119
5.3. El transistor PMOS	122
5.3.1. Principio básico de funcionamiento	122
5.3.2. Modelo referido al Sustrato	123
5.3.3. Modelo referido al Source	127
5.3.4. Desviaciones del comportamiento ideal	130
5.4. Modelo lineal incremental	131
5.4.1. MLI referido al sustrato	131
5.4.2. MLI referido al source	136
5.5. Modelo de AC	138
5.5.1. Capacidad de gate	138
5.5.2. Capacidad de junturas	140
5.5.3. Capacidad de solapamiento	142
5.5.4. Límite de validez del modelo de AC	143

6. Transistores Bipolares	147
6.1. Descripción Cualitativa	147
6.2. Modelo de DC del transistor PNP	148
6.2.1. Región de conducción activa directa	148
6.2.2. Región de conducción activa inversa	156
6.2.3. Región de saturación y el modelo de Ebers-Moll	160
6.2.4. Modelos Simplificados	165
6.2.5. Desviaciones del comportamiento ideal	170
6.3. Modelo de DC del transistor NPN	173
6.3.1. Región de conducción activa directa	173
6.3.2. Región de conducción activa inversa	179
6.3.3. Región de saturación y el Modelo de Ebers-Moll	183
6.3.4. Modelos Simplificados	186
6.4. Modelo Lineal Incremental (MLI)	188
6.5. Modelo de AC	192
6.5.1. Capacidad de vaciamiento	192
6.5.2. Capacidad de carga de la base	192
6.5.3. Límite de validez del modelo de AC	193
A. Modelos de SPICE	197
A.1. Fuentes	197
A.1.1. Fuentes independientes	197
A.1.2. Fuentes dependientes	197
A.2. Dispositivos pasivos	197
A.2.1. Resistencias	197
A.2.2. Capacitores	198
A.2.3. Inductores	198
A.2.4. Inductores mutuos	198
A.3. Dispositivos semiconductores	198
A.3.1. Diodo	199
A.3.2. Transistores bipolares	200
A.3.3. Transistores MOS	201

Prefacio

A partir de los años setenta, la tecnología de circuitos integrados basada en transistores Complementarios Metal-Oxido-Semiconductor (CMOS) superó en utilización a la tecnología basada en transistores bipolares de juntura. Desde ese momento la tecnología CMOS se convirtió en el pilar del diseño de circuitos integrados modernos, tanto analógicos como digitales. Los contenidos curriculares de las carreras de ingeniería electrónica en los países líderes en diseño electrónico se adaptaron a la nueva tecnología. En Argentina, así como en la mayoría de los países de hispanoamérica, este cambio no se dio, manteniéndose en los cursos básicos el enfoque previo basado en transistores bipolares y componentes discretos.

Este libro se basa en más de diez años de experiencia en el dictado de las materias “Dispositivos Semiconductores” y “Análisis y Diseño de Circuitos Digitales”, materias de tercer y quinto año respectivamente, de la carrera de Ingeniería Electrónica, de la Universidad del Sur, desde el año 1999 hasta la fecha; y refleja también la experiencia adquirida a través de la enseñanza de los cursos de la Escuela Argentina de Micro-Nanoelectrónica, Tecnología y Aplicaciones (EAMTA), llevada a cabo desde el año 2006 hasta la fecha.

El objetivo central de este libro es proveer el material básico en castellano para la enseñanza inicial a nivel de grado de microelectrónica para carreras de ingeniería electrónica e ingenierías afines.

El alcance del libro comprende la descripción de los dispositivos básicos microelectrónicos, desde una perspectiva útil para un diseñador de circuitos. El libro tiene como objetivo introducir la electrónica de estado sólido, proveyendo los modelos básicos que más adelante el estudiante requiere para abordar el diseño de etapas básicas de circuitos integrados, tanto analógicas como digitales. Se describen los principios y modelos de cuatro dispositivos fundamentales: la juntura semiconductor, el capacitor MOS, el transistor MOS y el transistor bipolar de juntura. Para todos los dispositivos mencionados se describen los principios básicos de operación y se desarrollan las ecuaciones que modelan su comportamiento en corriente continua (DC), señalando claramente los rangos de funcionamiento. Estos contenidos proveen la base para el cálculo de puntos de operación (polarización) de circuitos en cursos posteriores. A continuación se desarrollan los modelos lineales incrementales, es decir, aquellos modelos destinados a representar el dispositivo en un pequeño entorno de un punto de trabajo. Estos modelos son la base para el análisis de circuitos en pequeña señal, que incluye cálculo de ganancia, sensibilidad, impedancia, etc. Por último, se derivan las expresiones de las cargas eléctricas acumuladas para cada uno de los distintos dispositivos, y se desarrollan las expresiones de las capacidades asociadas teniendo en cuenta la región de operación. La inclusión de las capacidades de los dispositivos es fundamental para el análisis y diseño frecuencial de circuitos (AC), en particular de filtros.

Hay dos características distintivas acerca del enfoque adoptado en este libro. La primera característica es la utilización de resultados experimentales para ilustrar curvas y características de los dispositivos y circuitos utilizados. De esta manera se pretende que el estudiante se familiarice con valores típicos de corrientes, tensiones y tiempos correspondientes a dispositivos reales de circuitos integrados. La segunda característica es la utilización a lo largo del libro de rutinas de MatlabTM para la visualización de ecuaciones. Esto tiene como objetivo integrar la utilización de herramientas auxiliares

de cálculo al proceso de aprendizaje del estudiante.

Organización El libro está organizado de la siguiente manera.

El Capítulo 1 incluye una breve descripción de los bloques constitutivos de circuitos (resistores, capacitores, inductores, memristores, fuentes independientes y fuentes controladas) y establece el marco conceptual dentro del cual se ubican los modelos de los dispositivos. Se introduce la noción de modelos de acuerdo a la amplitud de la señal, definiendo los modelos globales, locales y lineales incrementales, y la noción de modelos de acuerdo a la frecuencia de la señal, definiendo modelos de DC, de baja frecuencia, de media frecuencia y de alta frecuencia.

El Capítulo 2 comienza con una descripción de las propiedades electrónicas del Silicio, sus bandas de energía y la generación de portadores. Luego se describe el dopado de Silicio mediante la introducción de impurezas y se da una interpretación gráfica del resultado. Esto permite abordar los mecanismos de conducción de portadores en semiconductores: arrastre y difusión; y hallar en ambos casos la expresión analítica de la corriente resultante. Se desarrollan a continuación las leyes básicas de electrostática, y las condiciones de borde en las interfaces entre materiales. Se introduce el concepto de potencial relativo entre materiales, el cual resulta de utilidad para los desarrollos de la juntura semiconductor y del capacitor MOS. En base a los potenciales relativos, se halla la ley de la juntura que establece la diferencia de potencial entre los portadores de dos regiones de Silicio en función de los dopados respectivos. Por último, se hace una breve mención a los potenciales que surgen cuando dos materiales diferentes se ponen en contacto, lo cual resulta relevante para describir la unión entre los dispositivos semiconductores y los restantes componentes circuitales.

El Capítulo 3 introduce la juntura semiconductor. Primero se hace un análisis electrostático sin tensión aplicada y se hallan la densidad de carga, el campo eléctrico y el potencial resultante. Luego, se extiende el análisis al caso en que hay una tensión de DC aplicada y se desarrolla la expresión de la corriente de difusión, utilizando la simplificación de base corta, tanto para el caso de tensión directa como para el de tensión inversa. En base al modelo de DC hallado se deriva el modelo lineal incremental. Para el cálculo del modelo de AC se analiza primero el caso de tensión inversa y se halla la carga de vaciamiento, a partir de la cual se deduce la capacidad correspondiente. Luego, se considera el caso de tensión directa y se halla la carga almacenada, producto de la conducción de los portadores minoritarios, a partir de la cual se deduce la capacidad de difusión. Por último, se describen los mecanismos de ruptura inversa: avalancha y efecto túnel; y sus características particulares.

El Capítulo 4 analiza el capacitor MOS, formado entre un metal y un semiconductor separados por un dieléctrico. El análisis se centra en el desarrollo de la electrostática de esta estructura (utilizando polisilicio fuertemente dopado en lugar de metal) y la derivación de las cargas en juego, en función de la tensión aplicada en terminales, para cada uno de los modos de funcionamiento: acumulación, vaciamiento e inversión. Por motivos didácticos, el análisis se comienza a partir del punto de Banda Plana, donde las cargas a lo largo del capacitor son nulas. A continuación se halla el modelo de AC a partir de la expresión de carga hallada previamente. Por último, se resumen las características principales (valores de las tensiones de Banda Plana y de Umbral, y configuraciones de carga resultantes) cuando los dopados del material del gate y del sustrato cambian de tipo y valor.

El Capítulo 5 desarrolla el transistor MOS en sus dos versiones, el transistor de canal N o NMOS, y el transistor de canal P o PMOS. Ambos análisis, si bien siguen lineamientos completamente paralelos, se desarrollan en forma separada y completa. Para ambos dispositivos se siguen los mismos pasos. Para hallar el modelo de DC, se realiza un análisis electrostático donde se halla la expresión genérica de la corriente del transistor en función de la carga de inversión y su velocidad en un punto arbitrario del canal. Luego se integra esta expresión para hallar la corriente en función de las tensiones entre terminales. En este punto se plantean dos modelos de utilidad: el modelo con las tensiones referidas al sustrato, de interés particular para diseño analógico; y el modelo con las tensiones referidas al source,

de uso masivo, sobre todo en el caso de diseño digital. Las regiones de funcionamiento y sus curvas resultantes se ilustran utilizando datos experimentales medidos sobre circuitos integrados de prueba. El modelo lineal incremental se halla a partir del modelo de DC, considerando las regiones de triodo y saturación. También en este caso se ilustran los modelos resultantes de utilizar el sustrato, o el source, como terminal común. Para hallar el modelo de AC, se calculan las distintas capacidades involucradas: la capacidad del gate, las capacidades de solapamiento y las capacidades de vaciamiento de las junturas de source y drain. Para el caso de la capacidad del gate, se tienen en cuenta las diferencias en función del modo de operación del transistor. Por último, se introduce la frecuencia de transición como el límite aproximado de validez del modelo de frecuencias medias.

El Capítulo 6 desarrolla el transistor bipolar de juntura, en sus dos versiones, el transistor PNP y el transistor NPN. Al igual que en el caso del transistor MOS, ambos análisis se desarrollan en forma separada y completa. Para hallar el modelo de DC, se plantean las expresiones de los niveles de portadores minoritarios en función de las tensiones aplicadas, y se procede a hallar la expresión de las corrientes de emisor, colector y base para los tres casos relevantes: directa activa, reversa activa y saturación. A partir del caso de saturación, que se obtiene como una combinación de los casos de activa directa y activa reversa, se plantea el modelo de Ebers Moll, que captura en forma global el comportamiento del transistor bipolar de juntura. También se plantean versiones simplificadas del modelo de Ebers Moll para los casos de activa directa y saturación, de utilidad para la resolución de puntos de funcionamiento de circuitos con transistores. Las regiones de funcionamiento y sus curvas resultantes se ilustran utilizando datos experimentales. A partir del modelo de Ebers Moll, se deriva el modelo lineal incremental y se introduce el modelo híbrido- π . Para hallar el modelo de AC, se calculan dos capacidades: la capacidad de vaciamiento de la juntura base colector, que se halla en inversa; y la capacidad de difusión, producto de la acumulación de portadores minoritarios en la juntura base-emisor, que se halla en directa. De igual manera que en el caso del transistor MOS, se halla la frecuencia de transición como el límite aproximado de validez del modelo de frecuencias medias.

En la mayoría de los libros de texto, se presenta con mayor énfasis el análisis de los transistores NMOS y NPN, es decir, aquellos cuya conducción se basa en electrones, y se resumen de manera sintética las ecuaciones para los dispositivos PMOS y PNP, es decir, aquellos cuya conducción se basa en huecos. El enfoque adoptado en este libro consiste en presentar los desarrollos completos para todos los dispositivos. La explicación principal se realiza para el caso del transistor NMOS y del transistor PNP (es decir, se prioriza un dispositivo con conducción en base a electrones y otro en base a huecos) mientras que para el caso del transistor PMOS y del transistor NPN se realiza una explicación más sintética, pero manteniendo todos los desarrollos. Este enfoque se adopta a raíz de los mejores resultados observados en el aprendizaje de los estudiantes.

Agradecimientos A los colegas que proveyeron numerosas sugerencias, agregados y correcciones a lo largo de la escritura del libro, especialmente a Andrés Aymonino, Ariel Lutemberg, Félix Palumbo, Carlos Dualibe, Fernando Silveira, Alfredo Arnaud, José Lipovetzky, Santiago Sondón, Alfredo Falcón, Angel Soto, Ariel Arelovich, Martín Di Federico, Omar Lifschitz. A los alumnos de Dispositivos Semiconductores y Análisis y Diseño de Circuitos Integrados de la Universidad Nacional del Sur, en particular a Paola Ceminari, Cesar Panzita y Niria Osterman. A mi amigo Luis Bastán, Director Creativo de BDA (www.bdastyle.com), por el arte de tapa.

A mi esposa Ana Laura y a mis tres hermosos hijos, Valentina, Violeta y Baltasar. Por todo su apoyo, y por toda la atención y tiempo que este libro les quitó.

El sitio web Se ha diseñado un sitio web para el libro, que se haya disponible en la dirección de internet <http://www.gisee.uns.edu.ar/LibroDispositivos>. El sitio contiene material de soporte del libro, que incluye, entre otras cosas, ejercicios para cada capítulo, modelos de dispositivos, fe de erratas,

rutinas de Matlab y transparencias para el dictado de clases. El hecho de poner este material en la web brinda la ventaja de poder actualizar y revisar este contenido periódicamente.