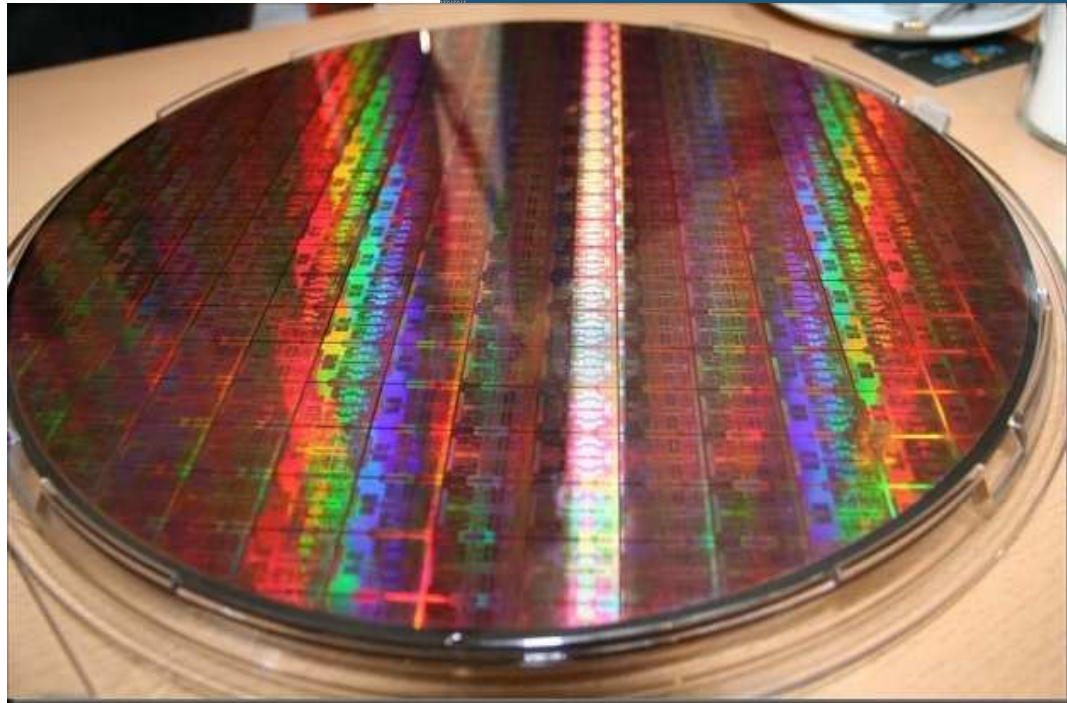


2010

Tecnologías de Radiofrecuencia



Antonio Pérez Pérez
Carmelo Jiménez Briso
David Albanés Bonillo
Juan Carlos del Cerro

INDICE

1. Introducción.
 - 1.1 Microondas.
 - 1.2. Generación.
 - 1.3. Usos.
 - 1.4 Tecnologías usadas en la transmisión.
2. Evolución de las tecnologías.
3. Tecnología MIC (Microwave Integrated Circuits).
 - 3.1. Lineas Stripline.
 - 3.2. Tecnología MPC.
 - 3.3. Lineas Microstrip.
 - 3.2. Comparativa Stripline-Microstrip.
 - 3.2. Tecnología HMIC.
 - 3.2. Lineas Finline.
4. Tecnología MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits).
 - 4.1. Historia
 - 4.2. Fabricación
 - 4.3. Ventajas y desventajas de la tecnología MMIC
 - 4.4. Aplicaciones de la tecnología MMIC
 - 4.5. Encapsulado
 - 4.6. Fallos que afectan a los dispositivos MMIC
 - 4.7. Efectos generales en los MMIC
 - 4.8. Fuentes de errores en los MMIC
 - 4.9. Metodología de diseño y verificación de los MMIC
 - 4.10. Simulación de los MMIC
 - 4.11. Metodología típica del diseño
5. Tecnología CMOS.
 - 5.1. Introducción.
 - 5.2. Funcionamientos.
 - 5.3. Historia.
 - 5.4. Ventajas de CMOS.
 - 5.5. Inconvenientes de CMOS.
 - 5.6. Aplicaciones de CMOS.
 - 5.7. Amplificadores de potencia CMOS.
6. Comparación entre tecnologías.
 - 6.1. Prestaciones.
 - 6.2. Relación producción / coste.

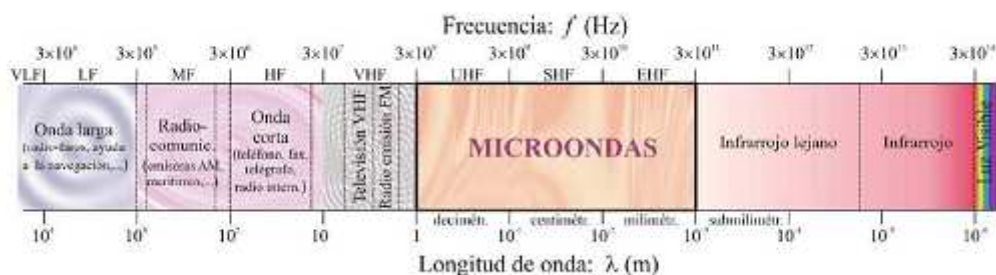
1. INTRODUCCIÓN

El presente documento está desarrollado para servir de guía básica sobre el ámbito de las comunicaciones por RF (radiofrecuencia), en él se explica la evolución y las tecnologías, métodos y aplicaciones más conocidas de la comunicación por RF. Además de una historia resumida de estas tecnologías, se hará una comparación entre ellas analizando sus ventajas e inconvenientes.

1.1. MICROONDAS

Se refiere a microondas como las ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencias determinado; generalmente de entre 300 MHz y 300 GHz, que supone un período de oscilación de 3 ns a 3 ps y una longitud de onda en el rango de 1 m a 1 mm.

El rango de las microondas está incluido en las bandas de radiofrecuencia, concretamente en las UHF (ultra-high frequency) en el rango de 0.3 – 3 GHz, SHF (super-high frequency) en el rango de 3 – 30 GHz y EHF (extremely high frequency) entre los 30 GHz y los 300 GHz.



La existencia de ondas electromagnéticas, de las cuales las microondas forman parte del espectro de alta frecuencia, fueron predichas por *Maxwell* en 1864 a partir de sus famosas Ecuaciones de Maxwell.

En 1888, *Heinrich Rudolf Hertz* fue el primero en demostrar la existencia de ondas electromagnéticas mediante la construcción de un aparato para producir ondas de radio.

1.2. GENERACIÓN

Las microondas pueden ser generadas de varias maneras, generalmente divididas en dos categorías: dispositivos de estado sólido y dispositivos basados en tubos de vacío.

Los dispositivos de estado sólido para microondas están basados en semiconductores de silicio o arsenuro de galio, e incluyen transistores de efecto campo (FET), transistores de unión bipolar (BJT), diodos Gunn y diodos IMPATT.

Los dispositivos basados en tubos de vacío operan teniendo en cuenta el movimiento balístico de un electrón en el vacío bajo la influencia de campos eléctricos o magnéticos, entre los que se incluyen el magnetrón, el Klistrón, el TWT y el girotrón.

1.3 USOS

En telecomunicaciones, las microondas son usadas en radiodifusión, ya que estas pasan fácilmente a través de la atmósfera con menos interferencia que otras longitudes de onda mayores.

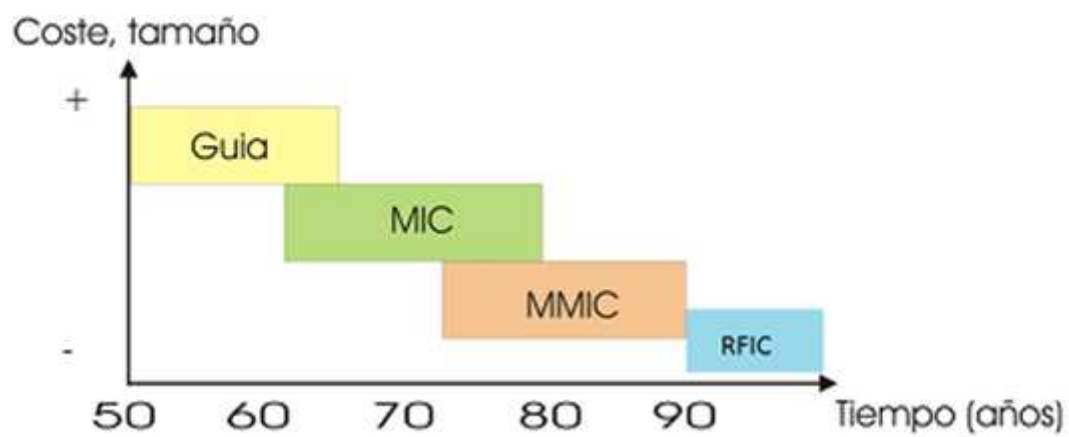
Protocolos inalámbricos LAN, tales como Bluetooth y las especificaciones de Wi-Fi IEEE 802.11g y b también usan microondas en la banda ISM. Algunas redes de telefonía celular también usan bajas frecuencias de microondas.

En la industria armamentística, se han desarrollado prototipos de armas que utilicen la tecnología de microondas para la incapacitación momentánea o permanente de diferentes enemigos en un radio limitado.

La tecnología de microondas también es utilizada para la navegación, como puede ser el GPS, además de los radares que detectan el rango, la velocidad y otras características de objetos remotos.

1.4 TECNOLOGÍAS USADAS EN LA TRANSMISIÓN

Al inicio, la tecnología de microondas, fue construyendo dispositivos de guía de onda y posteriormente surgió una tecnología híbrida, el circuito integrado de microondas (MIC), para que luego los componentes discretos se construyeran en el mismo sustrato que las líneas de transmisión. La producción en masa y los dispositivos compactos, la llamada tecnología MMIC, pero existen algunos casos en los que no son posibles los dispositivos monolíticos, como es en los RFIC.



2. EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En un inicio los sistemas de comunicaciones de microondas, eran construidos mediante guías de onda, lo cual resultaba muy pesado al momento del diseño y del ensamblaje de todo el sistema. Es así, que al pasar los años los sistemas de microondas evolucionaron a ser sistemas compactos; es decir al uso de circuitos integrados donde estén presentes en una sola placa todos los componentes del sistema.

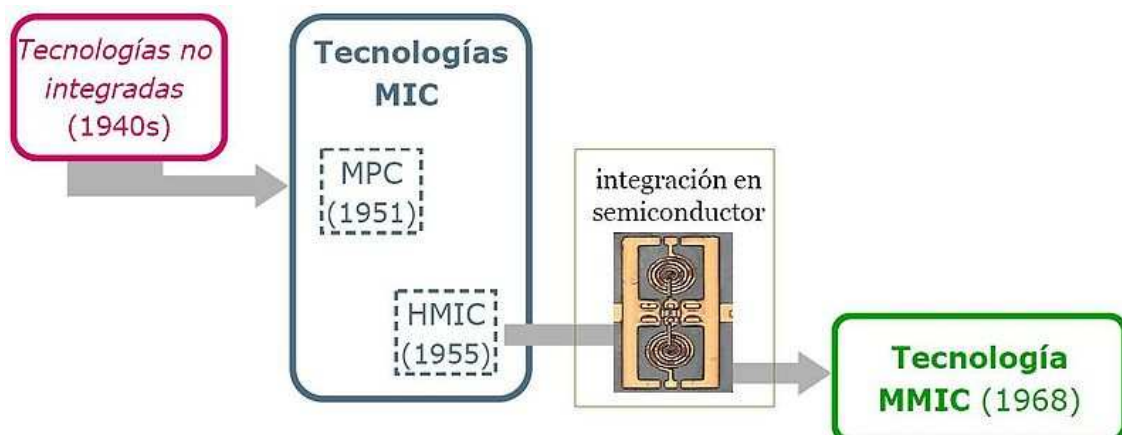
La primera guía de onda fue propuesta por *Joseph John Thomson en 1893* y experimentalmente verificada por *O. J. Lodge en 1894*. El análisis matemático de los modos de propagación de un cilindro metálico hueco fue realizado por primera vez por *Lord Rayleigh en 1897*.

En abril de *1949*, el ingeniero alemán *Werner Jacobi* completó la primera solicitud de patente para circuitos integrados con dispositivos amplificadores de semiconductores. Jacobi realizó una típica aplicación industrial para su patente, la cual no fue registrada.

Más tarde, la integración de circuitos fue conceptualizada por el científico de radares *Geoffrey W.A. Dummer*, que estaba trabajando para la Royal Radar Establishment del Ministerio de Defensa Británico, a finales de la *década de 1940* y *principios de la década de 1950*.

El primer circuito integrado fue desarrollado en *1958* por el ingeniero *Jack Kilby* pocos meses después de haber sido contratado por la firma *Texas Instruments*. Se trataba de un dispositivo de germanio que integraba seis transistores en una misma base semiconductor para formar un oscilador de rotación de fase.

Este descubrimiento trajo consigo multitud de aplicaciones prácticas, como son los diodos de túnel, varactores, etc., pero el verdadero desarrollo fue en la década de los 50, con la llegada de los transistores de microondas (MPC).



En 1951, aparece la tecnología MPC, cuyo significado se puede traducir por circuitos impresos de microondas. Se basaba en la tecnología stripline, que destaca por una línea de configuración planar y un cable coaxial modificado. Destacaban porque eran ligeros, de fácil fabricación y su producción tenía un coste barato. Su sustrato estaba hecho de teflón (PTFE).

En 1952, se crea la tecnología Microstrip, y con ella, se desarrolla otra tecnología, la HMIC, circuitos integrados de microondas híbridos. Las claves fueron el desarrollo de los transistores FET frente a los BJT, ya que eran más pequeños, se podía trabajar a más alta frecuencia e introducían menos ruido. El sustrato estaba compuesto de alúmina. Un punto a destacar es que esta tecnología posee una capa de metalización de sus conductores, líneas de transmisión y componentes discretos, como son resistencias, condensadores, e inductores pegados al sustrato.

La primera evolución hacia la integración de los circuitos de microondas fue la tecnología MIC (Microwave Integrated Circuits) inicialmente elaborados con transistores MESFET de GaAs. Sin embargo, la verdadera integración llegó años después en 1974, cuando Plessey fabricó el primer amplificador MMIC.

Desde su inicio, en la primera mitad de los años 70, y hasta la actualidad, la tecnología MMIC ha progresado en las aplicaciones cubiertas, en las bandas de frecuencia alcanzadas y en la capacidad de integración con otras funciones de baja frecuencia.

En los últimos años la tecnología CMOS ha evolucionado notablemente logrando mejoras en los niveles de integración y velocidad de proceso. Esto aunado a su bajo coste ha permitido la integración de procesadores digitales junto con el procesado analógico de la señal, dando lugar a la implementación de circuitos integrados de modo mixto. Por su parte, los circuitos integrados de Radio Frecuencia (RF) han sufrido un explosivo crecimiento por su extensa aplicación en sistemas de comunicación y equipos inalámbricos. Con respecto a los problemas tecnológicos, que se derivan de la implementación de estos sistemas en tecnología CMOS, cabe destacar el trabajo realizado por Thomas H. Lee. A él se le deben numerosas contribuciones teóricas de tecnología y diseño en este campo.

3. TECNOLOGÍA MIC

Las siglas MIC provienen de Microwave Integrated-Circuit (Circuitos Integrados de Microondas). Esta tecnología se basa, generalmente, en la transmisión de ondas a través de líneas impresas. Se hará en esta sección hincapié en los dos tipos de líneas de transmisión más representativas de esta tecnología: las stripline, y las microstripline, además de mencionarse un tercer tipo, finline, por considerarse también de interés.

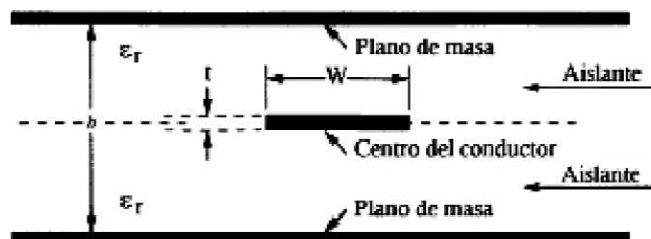
3.1 LINEAS STRIPLINE:

Stripline es un tipo de línea de transmisión para modos TEM (Transversal Electro- Magnéticos) utilizada en electrónica de comunicación. Su invento se atribuye a Robert M. Barrett, del Centro de Investigación de la Fuerza Aérea de Cambridge en la década de 1950. Como se podrá observar, consiste en una modificación del coaxial hacia una estructura planar.

Un circuito con stripline está constituido por una tira plana de metal que se inserta entre dos líneas de tierra. El material aislante del sustrato forma un dieléctrico. El ancho de la tira, el espesor del sustrato y la permitividad relativa del sustrato determinan la impedancia característica de la tira, la cual constituye la línea de transmisión.

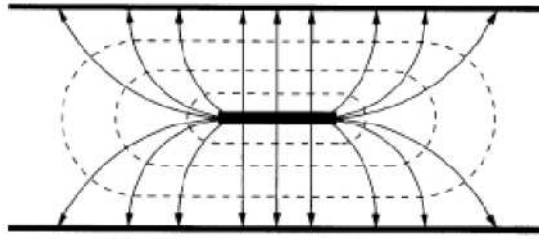
Como se muestra en la figura, el conductor central no tiene que ser equidistante entre las dos líneas de tierra. A su vez, el material dieléctrico puede ser diferente por encima y por debajo del conductor central.

Las dimensiones de este tipo de tecnología se pueden apreciar en la siguiente figura:



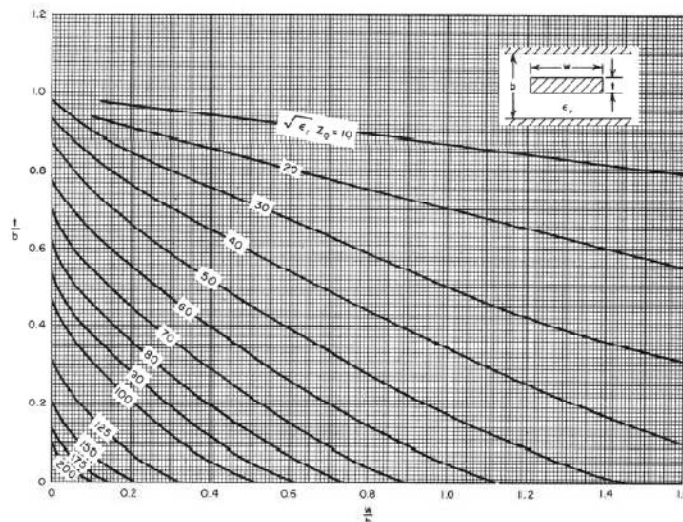
Al igual que el cable coaxial, las líneas stripline no son dispersivas, y no tienen frecuencia de corte.

Para el modo fundamental, la distribución de los campos sería la siguiente:

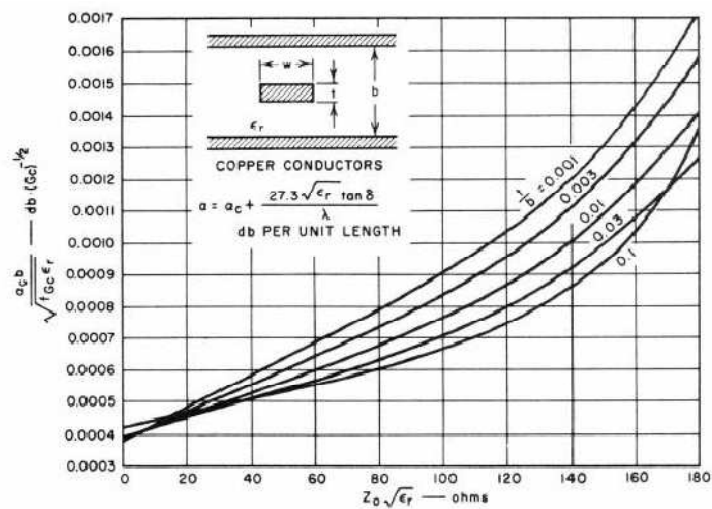


Donde el modo TEM que se propaga a través de la onda se corresponde con la línea discontinua.

La impedancia característica de este tipo de líneas depende, como se ha mencionado, de sus dimensiones y de las características eléctricas del medio, tal y como muestra la siguiente figura:



En cuanto a la atenuación:

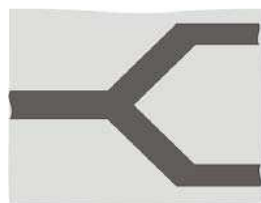


3.2 TECNOLOGÍA MPC.

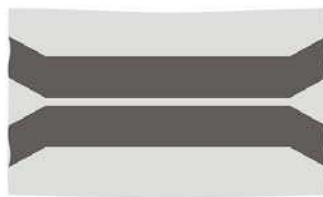
Estas líneas stripline son la clave para las tecnologías MPC (circuitos impresos de microondas), que se caracterizan por sus secciones stripline, que dan lugar a estructuras no dispersivas y con pérdidas mínimas. Estos dispositivos complejos requieren del electromagnetismo como base para su diseño, que es muy versátil debido a la multitud de configuraciones de striplines posibles:



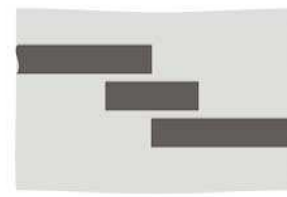
Algunos ejemplos de estos dispositivos podrían ser:



divisor



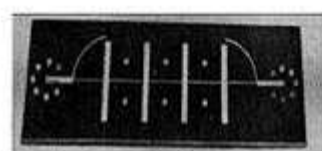
acoplador



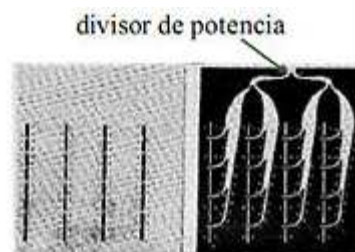
filtro

Las principales propiedades de estos circuitos (MPC) se resumen en su facilidad de fabricación y su bajo coste (originalmente usando sustratos de teflón o PTFE). Además son muy ligeros, miniaturizables y no integran dispositivos activos.

A continuación se muestran dos ejemplos de aplicaciones de esta tecnología basadas en stripline:



Filtro *low-pass*



Antena ranurada

También se puede utilizar en estos circuitos líneas microstrip, que se estudian a continuación.

3.3 LINEAS MICROSTRIP.

Esta tecnología surge en 1952 y tiene como peculiaridad que es un tipo de línea de transmisión eléctrica que pueden ser fabricados utilizando placa de circuito impreso [PCB],

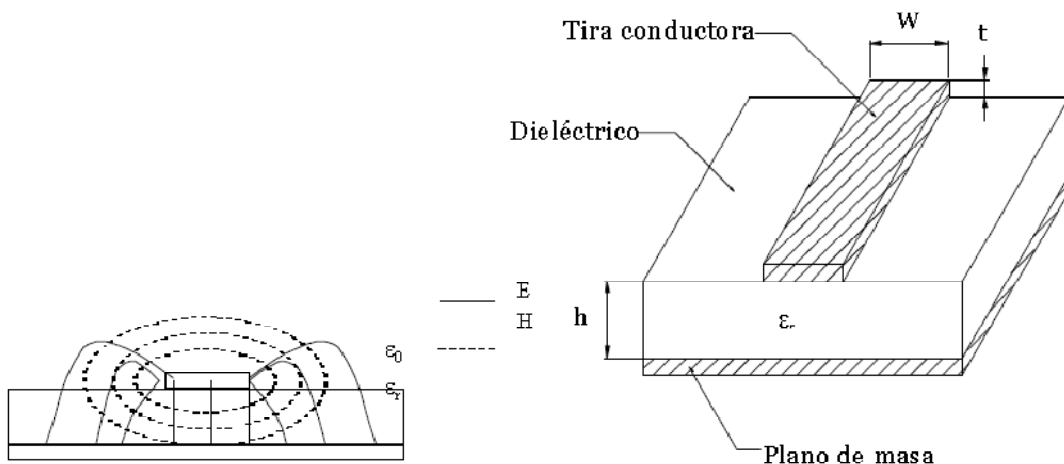
Consiste en una franja de conducción separada de la franja de masa por una capa de sustrato dieléctrico. Componentes de microondas, tales como antenas, acopladores, filtros, divisores, etc., pueden formarse a partir de microstrip, haciendo dicho componente como una metalización sobre el sustrato. El microstrip hasta ahora es más barato que la tecnología tradicional de guía de onda, además de ser mucho más ligero y compacto. Si habláramos de las líneas stripline como una versión planar del coaxial, ahora podemos pensar en la versión planar de la línea bifilar.

Las desventajas de microstrip en comparación con la guía de onda son: su baja capacidad de manejo de energía y el hecho de tener mayores pérdidas. Además, a diferencia del microstrip; no está cerrada, y por lo tanto es susceptible de captar gran cantidad de ruido.

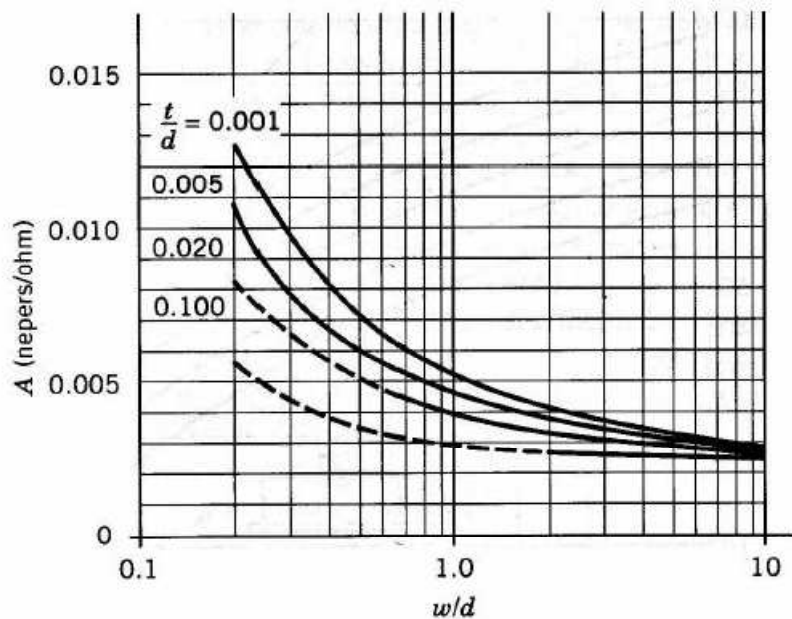
Para abaratar costes, los microstrips pueden ser construidos sobre un sustrato ordinario FR4 (estándar PCB). Sin embargo, se encontró que las pérdidas dieléctricas en FR4 son demasiado elevados a nivel de microondas, y que la constante dieléctrica no está suficientemente bien controlada.

Las líneas de Microstrip también se utilizan en diseños PCB digitales de alta velocidad, donde las señales deben ser enrutadas de una parte a la otra con la mínima distorsión posible, evitando el ruido y las interferencias de radiación.

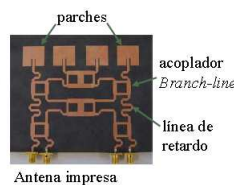
La estructura de una línea de Microstrip, así como la distribución de los campos es la que se muestra a continuación:



Igual que pasaba con las líneas stripline, la impedancia característica de estas líneas depende de sus dimensiones y de su perfil. La curva de atenuación es la siguiente:



La aportación de estas tecnologías a los circuitos MPC se ve limitada debido a las pérdidas (radiación). Actualmente se utilizan metamateriales para la confección de antenas, como la que se muestra en la siguiente figura:



3.4. COMPARATIVA STRIPLINE-MICROSTRIP:

Un simple vistazo a las figuras de la sección nos lleva a concluir que la diferencia entre las líneas microstrip y stripline es que en las primeras la línea de transmisión, en lugar de estar insertada, descansa sobre una capa superficial aparte, separada del plano de masa.

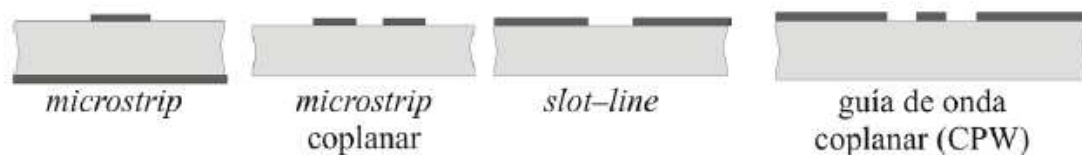
Además las líneas microstrip permiten aislar con mayor facilidad líneas adyacentes, y trabajar en un ancho de banda mucho mayor (debido a la existencia de una sola línea de tierra) para una impedancia y espesor dados. Otra de las ventajas de las líneas de microstrip es que se utiliza un dieléctrico más fino y posee una atenuación menor (aunque las líneas stripline poseen una menor tolerancia). Por último la fabricación de líneas stripline es mucho más difícil (y cara).

Pese a lo anterior, las líneas microstrip pueden contener un menor número de líneas por superficie de oblea (debido a que se deben encerrar más capas), sufren más pérdidas por radiación y tienen una dispersión mayor (aunque baja).

3.5 TECNOLOGÍA HMIC:

El desarrollo de las líneas Microstrip llevó al nacimiento de las tecnologías HMIC (circuitos integrados de microondas híbridos). Las claves fueron el desarrollo de los transistores FET frente a los BJT, ya que eran más pequeños, se podía trabajar a más alta frecuencia e introducían menos ruido. La principal característica de esta tecnología es el uso de líneas de configuración planar para la transmisión y adaptación, y también la inclusión de componentes pasivos.

Existen diferentes alternativas de líneas planares en la tecnología MIC:

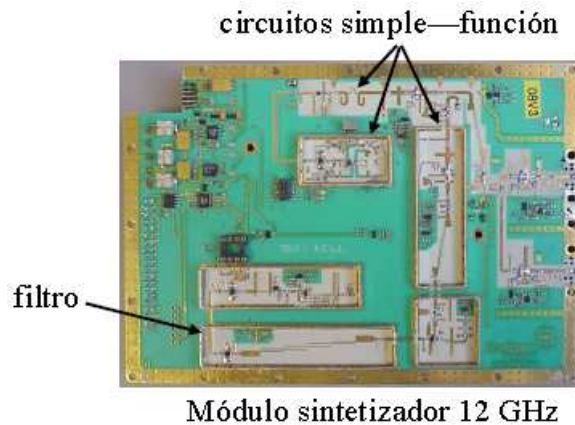


El sustrato estaba originariamente compuesto de alúmina. Un punto a destacar es que esta tecnología posee una capa de metalización de sus conductores, líneas de transmisión y componentes discretos, como son resistencias, condensadores, inductores... pegadas al sustrato (de ahí la denominación de híbrido).

El diseño ahora se lleva a cabo gracias al electromagnetismo aplicado, que lleva al diseño asistido por computador.

Otra característica importante de esta tecnología es la difícil post-mecanización del sustrato utilizado para estos circuitos impresos.

Las principales propiedades de esta tecnología son: su alto grado de miniaturización gracias al uso de sustratos de alta permitividad, su facilidad para la producción a gran escala y su gran nivel de integración (con alta fiabilidad). Una muestra de esta integración es el siguiente módulo sintetizador (multifunción) a partir de un conjunto de circuitos simple-función (sin necesidad de cables para su interconexión):



En lo referente a los procesos implicados en la fabricación de esta tecnología, cabe hablar de los siguientes tres:

Proceso Thin-film (o de fotograbado) que es idóneo para la fabricación en cadena dada su repetibilidad y que permite trabajar en espectro ancho.

Proceso Thick-film (o de serigrafía), de fabricación barata y que permite trabajar en el espectro de las microondas.

Proceso LTCC (Low-Temperature Cofired Ceramic ó de cerámica cocida a baja temperatura), que da lugar a una tecnología multicapa de alta integración y que permite una alta flexibilidad en el diseño.

La estandarización de estos procesos de fabricación, así como el buen comportamiento a altas frecuencias, dieron a la tecnología HMIC una ventaja sobre el resto que la permitió ser la tecnología predominante.

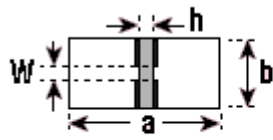
3.6. *FINLINE*:

Otro tipo de línea planar, que no se ha mencionado antes, son las líneas Finlines, cuyo perfil básico es el siguiente:

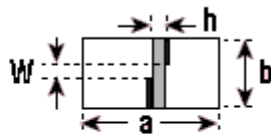


La baja tolerancia y las ruidosas franjas de conducción, incompatibles con los dispositivos híbridos, son problemáticos para el uso de microstrip como líneas para la transmisión de longitudes de onda milimétricas. Para evitar dichos problemas, se introdujo MMW (transmisión por módulos de onda milimétrica).

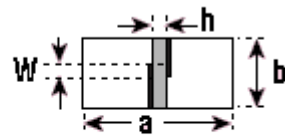
Los medios Finline se combinan con otras estructuras planares (como microstrip o línea coplanar) para formar guías de onda de circuitos integrados muy versátiles que trabajan en el campo eléctrico sobre guías de onda metálicas. Algunos tipos de líneas finline se muestran a continuación:



bilateral



diametral
opuesta



diametral
solapada

4. MMIC

Los circuitos MMI o **MMIC** (Monolithic Microwave Integrated Circuits) son un tipo de circuitos integrados que operan en frecuencias de microondas, es decir, entre 300 MHz y 300 GHz. La técnica de fabricación de los circuitos MMIC se basa en la utilización de líneas de transmisión planares, y se realiza con compuestos de semiconductores compuestos, tales como el arseniuro de galio (GaAs), nitrato de galio (GaN) y el germanio de silicio (SiGe).

Las entradas y salidas de los dispositivos MMIC se adaptan, generalmente, con una impedancia característica de 50 ohmios. Esto facilita el uso de dichos dispositivos, así como su uso en forma de cascada, ya que no requieren red de adaptación externa. Adicionalmente, la mayoría de los equipamientos de pruebas de microondas se diseñan para operar en unas condiciones de 50 ohmios.

Los MMIC son dimensionalmente pequeños (desde 1 mm² a 10 mm²) y pueden ser producidos a gran escala, lo que ha facilitado su proliferación en dispositivos de alta frecuencia, como pueden ser los teléfonos móviles.

4.1. Historia

Entre 1930 y 1960 la tecnología de microondas consistía en la utilización de guías de ondas para la creación de circuitos, lo que conllevaba que el proceso de fabricación fuese largo y costoso. La revolución aparece sobre 1960 con la aparición de la tecnología planar y la producción de materiales dieléctricos más baratos y con menos pérdidas, dando lugar a la tecnología MIC (Microwaves Integrated Circuits).

Ésta tecnología evoluciona a los MIC monolíticos (MMIC) cuando en 1975 Ray Pengelly y James Turner publican su estudio "Monolithic Broadband GaAs FET Amplifiers", convirtiéndose así en los padres e inventores de los MMIC. Cuando trabajaban en Plessey diseñaron un amplificador de una sola etapa con una ganancia de 5 dB en la banda X que usaba puertas de escritura óptica de 1 micrón. Usaban sistemas de optimización por ordenador para diseñar su elemento, haciendo uniones de estructuras. El proceso de "backside" todavía no había sido inventado, así que los FET tenían toma de tierra externa.

Los primeros MMIC se fabricaron de Arseniuro de Galio (GaAs), el cual tiene dos ventajas fundamentales frente al Silicio (Si), que es el material tradicional para la fabricación de circuitos integrados: la velocidad del dispositivo y el sustrato semi-aislante. Este tipo de circuito usa una solución cristalina para el dieléctrico y la capa activa. El GaAs es útil gracias a su capacidad para trabajar en altas frecuencias y a que su alta resistividad evita interferencias entre dispositivos. Esto permite la integración de dispositivos activos (radiofrecuencia), líneas de transmisión y elementos pasivos en un único sustrato.

En los años 80, la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación de Defensa (DARPA) empezó a realizar un gran esfuerzo para obtener un mayor desarrollo de los circuitos integrados de microondas para sustituir los tubos, cavidades y dispositivos discretos usados en sistemas de telecomunicación y radar. Bajo contratación de DARPA, Northrop Grumman Corporation (antiguamente TRW) consiguió producir con éxito MMICs de GaAs usando Transistores de Alta Movilidad Electrónica (HEMT) y Transistores Bipolares de Unión Heterogénea (HBT).

En los primeros MMICs, todos los circuitos estaban hechos con GaAs MESFET, diodos IMPATT (Impact Ionization Avalanche Transit Time) y diodos varactores, pero con la maduración de la tecnología GaAs se incrementa el uso de HEMTs, HEMTs y PHEMTs en aplicaciones nicho. En la siguiente tabla se tiene los circuitos usados comúnmente en cada dispositivo, además de los fallos originados en la mayoría dispositivos activos de los MMIC.

En comparación con otras tecnologías de microondas, los MMIC de GaAs ofrece las siguientes ventajas:

- Reducción de tamaño.
- Reducción de costes para volúmenes de producción medio-altos
- Mejora de las características de los sistemas por la inclusión de algunas funciones como lógicas, RF,.. en un único circuito
- Mejora de la reproducibilidad, debido al procesamiento e integración uniforme para todas las partes del circuito.
- Mejora del diseño sin necesidad de realizar numerosas iteraciones, debido a la reproducibilidad y al diseño asistido por ordenador.
- Mayor rango de frecuencias, reduciendo efectos parasitarios en los dispositivos.

4.2. Fabricación

Desde hace unas cuantas décadas, los circuitos de microondas de estado sólido eran fabricados exclusivamente en base a componentes discretos que incluían dispositivos de circuitos activos de semiconductor como transistores y diodos. Incluso hoy, el mercado es compartido entre los antiguos diseños y los nuevos. Mientras que los componentes discretos son hechos en base a tecnologías bipolares de silicio, los circuitos MMIC son hechos principalmente de arseniuro de galio (GaAs).

Los circuitos MMIC ofrecen mejoras de ancho de banda sobre los circuitos hechos en base a componentes integrados. La razón de esto es que se evitan pérdidas eléctricas y capacidades parásitas al poderse colocar las redes de acoplamiento más próximamente a los transistores. Este efecto produce un gran avance en la fiabilidad de las aplicaciones que requieren un gran número de elementos. En estas aplicaciones cada módulo del sistema de arrays puede necesitar cerca de tres chips que incorporen amplificadores de potencia, amplificadores de bajo ruido y desplazadores de fase. Los beneficios de la integración de aplicaciones de microondas hasta ahora han sido exclusivamente para los dispositivos de arseniuro de galio. Una razón de que el

arseniuro de galio haya sido elegido para este tipo de aplicaciones es que este material tiene una alta movilidad de electrones que incrementa el rendimiento de los dispositivos a altas frecuencias. Mientras que los transistores bipolares pueden ser utilizados a frecuencias de microondas, los circuitos integrados que tienen una movilidad de electrones más baja son generalmente inferiores en frecuencias de microondas. La movilidad de los electrones no es el único parámetro a favor del arseniuro de galio. La gran capacidad de aislamiento del arseniuro de galio también debe ser tomada en cuenta. Ordinariamente el material de silicio es varios órdenes de magnitud más conductivo que el arseniuro de galio limitando esta característica la ganancia máxima que puede estar disponible a altas frecuencias por dispositivos de silicio. Este aislamiento inhibe corrientes parásitas entre electrodos de transistores en el mismo chip que de otra forma afectarían su rendimiento como un circuito de microondas integrado.

A fin de aumentar el rendimiento y disminuir la limitación de costes de las tecnologías actuales, esta técnica permite mejorar la fabricación de circuitos monolíticos en silicio que son capaces de operar en frecuencias de microondas se utilizará un sustrato de silicio de alta resistividad, que se obtiene con una técnica de zona flotante que implanta una capa de aislamiento cerca de su superficie superior, preferiblemente SIMOX. Se forja un plano conductivo en el fondo del sustrato y se forja un circuito en la capa activa de silicio que permanece sobre la capa SIMOX de aislamiento.

Las tecnologías que incrementan el rendimiento en altas frecuencias del MICROX comprenden:

- Una superficie inferior de rectificación de contacto.
- Replicación de circuitos usando litografía.
- Bajo coste microstrip.
- Capa de nitrato en el fondo de la oblea durante el procesamiento CMOS.

Este método de fabricación se llama MICROX. Esta técnica conlleva unos costes más de fabricación sobre silicio de circuitos integrados que son operativos a frecuencias de gigahercios. Como toda tecnología basada en silicio, MICROX saca partido de la amplia infraestructura de fabricación que conllevan los dispositivos modernos. Para aplicaciones que necesitan de un gran número de dispositivos como los sistemas de comunicaciones modernos, la implementación de dispositivos MICROX puede hacer disponible grandes cantidades de circuitos integrados para aplicaciones de microondas.

4.3. Ventajas y desventajas de la tecnología MMIC

Posiblemente la principal ventaja de los circuitos integrados de microondas monolíticas (MMIC) para soluciones discretas sea que con esta tecnología se consigue una figura de ruido menor. Otra gran ventaja es la combinación de funciones multicircuitales sin necesidad interconexión cableada, lo que permite la producción de líneas microstrip compactas.

Sin embargo, estas soluciones discretas tienen también sus propias desventajas, especialmente en las aplicaciones portátiles modernas con circuitería compactada y períodos de implantación en el mercado muy cortos. Otra desventaja es que una vez creado el circuito es muy poco ajustable, la mayoría de sus características de funcionamiento no son modificables, por lo que el proceso de diseño ha de ser muy exhaustivo y requiere modelos precisos de física y química para elementos activos y pasivos. Dicho proceso requiere de programas software que permitan sintetizar, analizar y perfilar circuitos lineales y no lineales.

Es por eso que muchos fabricantes poseen “bibliotecas” con modelos existentes, que permiten al diseñador de MMIC saber la actuación esperada por parte de un dispositivo sin tener que caracterizarlo experimentalmente.

Se podrían resumir los beneficios y mejoras de la figura de ruido con las siguientes especificaciones típicas de este tipo de circuitos integrados:

- Mayor linealidad y bajo ruido
- La integración del circuito de corriente, el cual simplifica el diseño de la red de acoplamiento.
- Realimentación interna, la cual facilita la adaptación de impedancias a lo largo de un ancho de

banda mayor.

- Estabilidad incondicional a lo largo de un mayor rango de frecuencias
- El modo de ganancia FET requiere solo una toma positiva

Todos estos beneficios se traducen en un circuito compacto con un ciclo de diseño menor si se compara con su aproximación discreta, lo cual los hace más apropiados para soluciones portátiles con limitaciones de espacio.

4.4. Aplicaciones de la tecnología MMIC

- Amplificadores MMIC en la banda Ka de banda ancha
 - Amplificador MMIC de ganancia variable y baja distorsión
 - Amplificadores de bajo ruido
 - Mezcladores
 - Osciladores
 - Amplificadores de potencia
-

Los amplificadores de potencia, además, se pueden dividir en varias clases:

- **Etapas clase A:**
- **Etapas clase B:**
- **Etapas clase AB**

4.5. Encapsulado

El encapsulado sirve para integrar el conjunto de componentes que componen el MMIC de forma que se reduzca al mínimo el tamaño, el coste, la masa y la complejidad; se proporcionen interfaces eléctricos y térmicos entre el MMIC y el exterior y se asegure la fiabilidad de los componentes individuales y la del MMIC en conjunto. En resumen, las funciones del encapsulado son proporcionar soporte físico, proporcionar protección mecánica (arañazos, aceleraciones bruscas, etc.), proporcionar protección del ambiente (partículas, radiación, humedad, etc.), proporcionar distribución de energía y de la señal y estabilizar térmicamente el conjunto.

Los encapsulados se pueden dividir en los siguientes grupos básicos.

Encapsulado flip-chip

El análisis de elementos finitos y los estudios experimentales han demostrado que los chips de gran longitud y pequeña altura tienden a fallar más rápidamente que los menos largos y más altos. La fiabilidad de estos flip-chip está determinada por el coeficiente de expansión térmica (CTE) entre el chip y el sustrato cerámico o el circuito orgánico. La diferencia induce tensiones mecánicas y térmicas muy grandes, especialmente en las juntas, donde la distancia es la mayor desde la distancia del punto neutral (DNP) del chip. Esta tensión provoca la aparición de fisuras en las juntas, incrementando la resistencia de contacto, inhibiendo el flujo de corriente y llevando al fallo eléctrico del chip. Por tanto, la desventaja de elegir una altura mayor consiste en introducir una inductancia en serie que degrada la actuación en alta frecuencia e incrementa la resistencia térmica desde el MMIC hasta el portador.

Para mejorar la fiabilidad, se aplica el encapsulado cerca del chip y se conduce por acción capilar en el espacio entre el chip y su portador.

Para compensar la tensión producida, es necesario que haya una buena adherencia entre el material de relleno, el portador y la superficie del chip. Para evitar pérdida de adherencia, se requiere un proceso de ensamblado flip-chip sin flujos. Esto es posible con portadores cerámicos con oro, plata y películas gruesas de paladio-plata y a través de metalización.

Es deseable que no haya bolsas de aire ni vacío, especialmente estos últimos al producir una tensión aún mayor. Por ello, tras el ensamblaje se realiza una revisión acústica microscópica para localizar estos vacíos. El encapsulado también debe ser revisado para buscar microfisuras o fallos de la superficie, que tienen a propagarse en los ciclos térmicos, llevando al mal funcionamiento del chip.

4.6. Fallos que afectan a los dispositivos MMIC

La mayoría de los fallos que pueden afectar a los dispositivos se catalogan en dos categorías: catastróficos y no catastróficos. Estos fallos afectan de igual manera a la fiabilidad y al rendimiento.

4.7. Efectos generales en los MMIC

Estos fallos vienen dados por la degradación en los parámetros característicos de los dispositivos. Su gravedad será determinada por el diseño y la función que desarrolla el MMIC afectado, además de la gravedad de la degradación.

4.8. Fuentes de errores en los MMIC

- Inducción-Interacción-Materiales de los Mecanismos
- Estrés inducido en los Mecanismos
- Fallos inducidos Mecánicamente
- Fallos inducidos por el Medio Ambiente

La primera categoría la podemos subdividir en dos subcategorías:

- Desfallecimiento de los materiales semiconductores y las interacciones metálicas.
- Desfallecimiento del encapsulado e interconexiones.

Los fallos por estrés debidos a un pobre diseño o dispositivos descuidados. La mayoría de los fallos en MMIC son derivados de la sucesión de varios incidentes de las categorías anteriores.

4.9. Metodología de diseño y verificación de MMIC

En general, la documentación disponible debería proveer al cliente interesado de una descripción de los instrumentos de CAD, los pasos de proceso , y métodos de evaluación usados en el proceso de creación. Una documentación típica puede incluir:

- Las capacidades de procesamiento de un conductor
- Diseño, normativa a seguir y herramientas para el layout
- Librerías disponibles
- Herramientas de simulación disponibles
- Dispositivos disponibles y modelos de los diferentes elementos del circuito
- Diagrama de flujo
- Verificación y revisión
- Métodos de evaluación.

4.10. Simulación del MMIC

La simulación del circuito es un paso esencial en el diseño y fabricación de MMICs con propósito de producción. Una simulación puede dar una primera aproximación del circuito funcional realizado bajo unas condiciones de entrada y salida. Actualmente la mayoría de los simuladores incluyen herramientas de optimización que reducen en gran medida el tiempo de diseño e incrementa la probabilidad de éxito. Además la mejora de procesamiento de los ordenadores los recientes avances en desarrollo software y nuevas técnicas software han dado lugar a herramientas de diseño interactivas muy avanzadas.

El desarrollo de un software comercial que integra los diferentes estados de desarrollo de un MMIC como el esquema, capturas de datos, simulación layout, han sido el resultado de los recientes avances tecnológicos de MMIC CAD motivados por las necesidades del mercado. Algunas herramientas de simulación:

- *Compact Software's Microwave Harmonica (r)* es bastante utilizado para el diseño de MMICs de GaAs. Sirve en simulaciones de circuitos de microondas tanto lineales como no lineales, simulándolos con modelos de elementos distribuidos. Los circuitos no lineales se simulan usando técnicas de equilibrado armónico en la interfaz entre las partes lineal y no lineal del circuito. Este simulador también ofrece optimización, análisis estadístico y síntesis de tensión, además de análisis y optimización de oscilador y ruido de fase.
- *The Compact Software Microwave Explorer (r)* es una herramienta de análisis electromagnético en 3-D empleada para simular estructuras pasivas planares en medios abiertos y encapsulados. Se introducen los circuitos con un editor de polígonos integrados. Este paquete incluye una interfaz de gráficos para la visualización de cartas de Smith, gráficas rectangulares y de distribución de corriente.
- *The Compact Microwave Success (r)* es un simulador de bloques que permite examinar información como parámetros S y parámetros de ruido en componentes de radiofrecuencia y microondas. Este programa permite trabajar con mezcladores, filtros, antenas y amplificadores. El paquete también generará los datos en diversos formatos estándar, ofrecer análisis de temperatura, frecuencia, potencia y otras variables definidas por el usuario.
- *HP EEsof's Libra (r)* es otra herramienta de diseño y simulación empleada en MMICs de GaAs lineales y no lineales. Realiza simulaciones en el dominio de la frecuencia usando modelos de elementos utilizados en circuitos de microondas. Los circuitos no lineales se simulan con técnicas de equilibrado de armónicos. *Libra Design Suite (r)* es una herramienta de simulación y trazado desarrollado para el diseño de RF y microondas.

- *Series IV Project Design Environment (r)* es un medio de diseño gráfico. Permite el diseño, simulación, trazado y documentación de sistemas y circuitos de alta frecuencia. Este paquete contiene capacidad de captura de esquemas, simulación en alta frecuencia, simulación electromagnética, simulación de sistemas, trazado de circuitos y una recopilación de bibliotecas de diseño y varias herramientas y enlaces de terceros.
- *Microwave Design System (r)*, de HP/EEsof, se basa en UNIX y sirve para el diseño de circuitos y sistemas de alta frecuencia. Permite simulación lineal y no lineal, análisis de sensibilidad, además de captura de diseño y trazado de circuitos.
- *Mathematica (r)* es un software interactivo para la resolución de problemas matemáticos complejos que permite desarrollar modelos matemáticos de sistemas y componentes de microondas.
- *Microwave Spice (r)* es un simulador en dominio del tiempo parecido al Berkeley Spice (r). Incluye muchos efectos y componentes de microondas, útiles en el diseño de MMICs, sobre todo en el diseño de osciladores de microondas.

Existen muchos más en el mercado dependiendo de las necesidades de diseño que requiera el MMIC. Así, las herramientas de simulación electromagnética pueden emplearse junto a simuladores en dominio del tiempo o de la frecuencia o como simuladores de EM independientes, como *Ansoft Maxwell Eminence (r)*, un simulador en 3-D. Otro ejemplo es *Sonnet (r)*, capaz de aceptar entradas en los formatos de GDSII, HP/EEsof, Cadence, y AutoCAD. Las salidas obtenidas son parámetros S, distribuciones de corrientes y patrones de radiación.

4.11. Metodología típica del diseño

En el mercado competitivo, la reducción de coste en todas las etapas de diseño, fabricación, y de evaluación tienen suma importancia. El empleo de simulación de CAD y herramientas de diseño juega un papel principal en el éxito y producción de un diseño de MMIC

El diseño de un MMIC implica dos etapas críticas: la especificación de funcionamiento, el diseño del circuito y la simulación. Otras funciones como la fabricación y el testeo también deben considerarse durante las etapas de diseño hasta llegar a un producto manufacturable con la alta prestación y el funcionamiento deseado.

Etapas:

- Requerimientos del cliente.
- Estudio de las diferentes tecnologías para el proceso de diseño
- Disponibilidad de elementos para el diseño.
- Coste y compensación de funcionamiento.

5. CMOS

5.1. INTRODUCCIÓN

CMOS es un acrónimo del inglés (*complementary metal-oxide-semiconductor*) y se refiere a un grupo de dispositivos empleado en la fabricación de circuitos integrados. Su principal característica es que están formados por un conjunto de transistores de tipo **PMOS** (*Positive-channel MOS*) Y **NMOS** (*Negative-channel MOS*) configurados de tal forma que, en estado de reposo, el consumo de energía es únicamente el debido a las corrientes parásitas.

Actualmente, la mayoría de los circuitos integrados que se fabrican utilizan la tecnología CMOS. Esto incluye microprocesadores, memorias, DSPs y muchos otros tipos de chips digitales.

Por otro lado, el mundo de las aplicaciones inalámbricas está encaminado hacia la alta conectividad, además de hacia los servicios adicionales gracias a la operación conjunta de varios estándares RF. La principal característica que hace a los CMOS apropiados para la integración de diferentes estándares RF es su capacidad de integración en circuitos a gran escala (más de 1 billón de transistores en un circuito). Esta tecnología se ha expandido también a aplicaciones con requerimientos específicos como la telefonía móvil.

5.2. Funcionamiento

- Cuando la entrada es **1**, el transistor NMOS está en estado de conducción. Al estar su fuente conectada a tierra (**0**), el valor **0** se propaga al drenador y por lo tanto a la salida de la puerta lógica. El transistor PMOS, por el contrario, está en estado de no conducción
- Cuando la entrada es **0**, el transistor PMOS está en estado de conducción. Al estar su fuente conectada a la alimentación (**1**), el valor **1** se propaga al drenador y por lo tanto a la salida de la puerta lógica. El transistor NMOS, por el contrario, está en estado de no conducción.

Otra de las características importantes de los circuitos CMOS es que son *regenerativos*: una señal degradada que acometa una puerta lógica CMOS se verá restaurada a su valor lógico inicial 0 ó 1, siempre y cuando aún esté dentro de los márgenes de ruido que el circuito pueda tolerar.

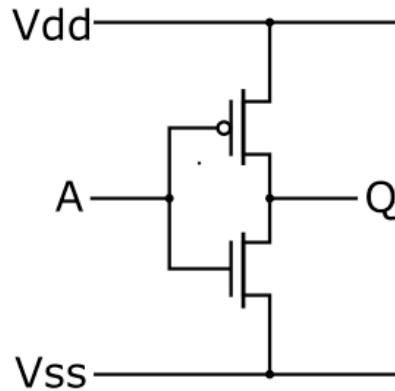


Fig 5.1 Inversor CMOS

5.3. Historia

La tecnología CMOS fue inicialmente desarrollada por Wanlass y Sah, de Fairchild Semiconductor, a principios de los años 60. Sin embargo, su introducción comercial se debe a RCA (Radio Corporation of America 1919-1986), con su famosa familia lógica CD4000. Posteriormente, la introducción de un búfer y mejoras en el proceso de oxidación local condujeron a la introducción de la serie 4000B, de gran éxito debido a su bajo consumo (prácticamente cero, en condiciones estáticas) y gran margen de alimentación (de 3 a 18 V). RCA también fabricó LSI (integración a gran escala) en esta tecnología, como su familia COSMAC de amplia aceptación en determinados sectores, a pesar de ser un producto caro, debido a la mayor dificultad de fabricación frente a dispositivos NMOS.

Pero su talón de Aquiles consistía en su reducida velocidad. Cuando se aumenta la frecuencia de reloj, su consumo sube proporcionalmente, haciéndose mayor que el de otras tecnologías. Esto se debe a dos factores:

- La capacidad MOS, intrínseca a los transistores MOS
- La utilización de MOS de canal P, más lentos que los de canal N, por ser la movilidad de los huecos menor que la de los electrones.

El otro factor negativo era la complejidad que conlleva el fabricar los dos tipos de transistores, obligando a utilizar un mayor número de máscaras. Por estos motivos, a comienzos de los 80, algunos autores pronosticaban el final de la tecnología CMOS, que sería sustituida por la novedosa I^2L (Integrated Injection Logic), entonces prometedora.

Esta fue la situación durante una década, pero a finales de los ochenta, cambia el escenario rápidamente:

- Las mejoras en los materiales, técnicas de litografía y fabricación, permitían reducir el tamaño de los transistores, con lo que la capacidad MOS resultaba cada vez menor.
- La integración de dispositivos cada vez más complejos obligaba a usar un mayor número de máscaras para aislar los transistores entre sí, de modo que no era más difícil la fabricación de CMOS que de NMOS.

A partir de este momento hubo una eclosión de memorias CMOS, pasando de 256x4 bits de la 5101 a 2Kx8 de la 6116 y 8Kx8 en la 6264, superando en capacidad, consumo reducido y velocidad a sus contrapartidas NMOS. También los microprocesadores comenzaron a aparecer en versiones CMOS (80C85, 80C88, 65C02...).

Y aparecieron nuevas familias lógicas, **HC** y **HCT** en competencia directa con la TTL-LS (lógica Transistor-Transistor), dominadora del sector digital hasta el momento.

Para entender la velocidad de estos nuevos CMOS, hay que considerar la arquitectura de los circuitos **NMOS**:

- **Uso de cargas activas.** Un transistor se polariza con otros transistores, y no con resistencias debido al menor tamaño de aquellos. Además, el transistor MOS funciona fácilmente como fuente de corriente constante. Entonces un inversor se hace conectando el transistor inversor a la carga activa. Cuando se satura el transistor, drena toda la corriente de la carga y el nivel de salida baja. Cuando se corta, la carga activa inyecta corriente hasta que el nivel de salida sube. Y aquí está el compromiso: es deseable una corriente pequeña porque reduce la necesidad de superficie en el silicio (transistores más pequeños) y de disipación (menor consumo). Pero las transiciones de nivel bajo a nivel alto se realizan porque la carga activa carga la capacidad MOS del siguiente transistor, además de las capacidades parásitas que existan, por lo que una corriente elevada es mejor, pues se cargan las capacidades rápidamente.
- **Estructuras de almacenamiento dinámicas.** La propia capacidad MOS se puede utilizar para retener la información durante cortos periodos de tiempo. Este medio ahorra transistores frente al bi-estable estático. Como la capacidad MOS es relativamente pequeña, en esta aplicación hay que usar transistores grandes y corrientes reducidas, lo que lleva a un dispositivo lento.

5.4. VENTAJAS DE CMOS

- Elimina la **carga activa**. La estructura complementaria hace que sólo se consuma corriente en las transiciones, de modo que el transistor de canal P puede aportar la corriente necesaria para cargar rápidamente las capacidades parásitas, con un transistor de canal N más pequeño, de modo que la célula resulta más pequeña que su contrapartida en NMOS.
- En CMOS se suelen sustituir los registros dinámicos por **estáticos**, debido a que así se puede bajar el reloj hasta cero y las reducidas dimensiones y bajo consumo de la celda CMOS ya no hacen tan atractivos los registros dinámicos.

Los transistores MOS también se emplean en circuitos analógicos, debido a dos características importantes:

- **Alta impedancia de entrada:** La puerta de un transistor MOS viene a ser un pequeño condensador, por lo que no existe corriente de polarización. Un transistor, para que pueda funcionar, necesita tensión de polarización.
- **Baja resistencia de canal:** Un MOS saturado se comporta como una resistencia cuyo valor depende de la superficie del transistor. Es decir, que si se le piden corrientes reducidas, la caída de tensión en el transistor llega a ser muy reducida.

Estas características posibilitan la fabricación de amplificadores operacionales "Rail to Rail", en los que el margen de la tensión de salida abarca desde la alimentación negativa a la positiva. También es útil en el diseño de reguladores de tensión lineales y fuentes conmutadas.

5.5. INCONVENIENTES DE CMOS

Hay tres problemas principales relacionados con la tecnología CMOS, aunque no son exclusivos de ella:

- **Sensibilidad a las cargas estáticas.** Históricamente, este problema se ha resuelto mediante protecciones en las entradas del circuito. Pueden ser diodos en inversa o zener conectados a masa y a la alimentación, que, además de proteger el dispositivo, reducen los transitorios. Este último método permite quitar la alimentación de un sólo dispositivo.

- **Latch-up:** Consiste en la existencia de un tiristor (conmutador bi-estable que deja pasar por completo o bloquea plenamente el paso de corriente) parásito en la estructura CMOS que se dispara cuando la salida supera la alimentación. Esto se produce con relativa facilidad cuando existen transitorios por usar líneas largas mal adaptadas, excesiva impedancia en la alimentación o alimentación mal desacoplada. El Latch-Up produce un camino de baja resistencia a la corriente de alimentación, de modo que, si no se ha previsto, acarrea la destrucción del dispositivo. Las últimas tecnologías se anuncian como inmunes al Latch-up.
- **Resistencia a la radiación.** El comportamiento de la estructura MOS es sumamente sensible a la existencia de cargas atrapadas en el óxido. Una partícula alfa o beta que atraviese un chip CMOS puede dejar cargas a su paso, cambiando la tensión umbral de los transistores y deteriorando o inutilizando el dispositivo. Por ello existen circuitos "endurecidos" (*Hardened*), fabricados habitualmente en silicio sobre aislante (SOI).

5.6. APLICACIONES DE CMOS

Sensor de imagen: En él, cada píxel tiene su propia conversión de carga a voltaje, y normalmente incluye amplificador, corrección de ruido y circuitos de digitalización por lo que la salida del chip son bits.

Osciladores de onda cuadrada: Estos osciladores presentan ventajas como una buena estabilidad frente a variaciones de voltaje en la fuente, operación sobre un amplio rango de voltaje y frecuencia, y bajo consumo de energía.

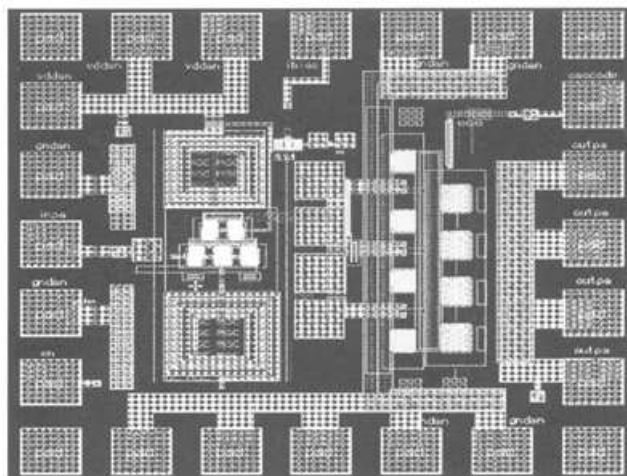
Sensores de temperatura: De consumo ultra-bajo formado por la conexión en serie de varios MOS, lo cual permite una reducción de la alimentación

Amplificadores de potencia para dispositivo Bluetooth: clase AB, operan en la banda ISM de 2.4-2.5Hz y ocupan un área de décimas de milímetros

5.7. AMPLIFICADORES DE POTENCIA CMOS

El diseño de amplificadores de potencia con tecnología CMOS se basa en los siguientes factores:

1. **El reducido voltaje de colapso de las nano-tecnologías.** Esto limita el voltaje máximo de puerta-drenador de transistores, por lo que tienen que operar con una alimentación mas baja, por tanto entregando menos potencia. Además, la tecnología CMOS entrega una ganancia muy baja por etapa. La solución esta en usar muchas etapas, o bien nuevas técnicas de diseño que reduzcan el número de etapas.
2. A diferencia de los sustratos semi-aislantes, en CMOS se utilizan **sustratos altamente dopados**, lo que provoca la interacción de sustratos en los circuitos integrados. Estas fugas en un amplificador de potencia integrado afectan la estabilidad de otros elementos en una cadena de transeptores.
3. Ya que la impedancia de salida en un amplificador de potencia es muy baja, se necesitan unas relaciones de transformación de impedancias altas para realizar la adaptación. Por otro lado, los elementos de salida necesitan una baja pérdida por temperatura ya que por ellos pasan altas corrientes de RF; si se utiliza tecnología CMOS, las pérdidas en el sustrato provocarían una baja calidad en los elementos pasivos de la red de adaptación. Para solucionarlo se suele implementar esta red de adaptación fuera del chip, al igual que la antena.
4. La corriente de salida del amplificador de potencia debe ser alta para lograr una considerable potencia en la carga. Esta corriente puede crear una migración de electrones parásita en el circuito que a su vez disminuye el rendimiento.



The layout of 0.18 μ m CMOS PA for class 1 Bluetooth standard.

6. COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Para comparar estas tecnologías, es necesario hacerlo desde diferentes puntos de vista. Es verdad que con el tiempo se han inventado nuevas tecnologías con mejores prestaciones, pero puede ocurrir que una tecnología más antigua sea más apropiada si se tienen en cuenta ciertos aspectos o situaciones específicas. Por ello, este apartado se dividirá en dos secciones: **prestaciones** y **relación producción/coste**.

6.1. PRESTACIONES

Funciones electrónicas: En los casos en los que los elementos pasivos del circuito sean críticos y la comunicación se realice en banda estrecha, las prestaciones de la tecnología de guía de ondas es muy superior a las de sus descendientes como los circuitos híbridos. Por otro lado, en el caso de circuitos con muchos elementos activos que funcionen en banda ancha, las prestaciones de los circuitos monolíticos son claramente superiores.

Tamaño y peso: En cuanto a dimensiones y peso de los circuitos, la evolución de estas tecnologías ha avanzado hacia circuitos cada vez más pequeños y ligeros. Mientras que los circuitos híbridos son mucho más pequeños que los de guía de ondas, es verdad que su tamaño aumenta conforme aumentan el número de dispositivos activos. Pero si nos fijamos en los circuitos monolíticos, estos son comparativamente menores cuando aumentamos el número de dispositivos activos que los conforman.

Fiabilidad: La fiabilidad de estos circuitos ha ido aumentando de manera lineal con el tiempo, siendo por tanto la tecnología CMOS en circuitos monolíticos la más fiable hasta el momento.

Ciclo de desarrollo: Al aumentar la complejidad de los circuitos con el tiempo, lógicamente su ciclo de desarrollo ha aumentado considerablemente desde los circuitos con guías de onda (3-6 meses) hasta los circuitos monolíticos actuales (9-12 meses).

Aplicaciones: Hasta que no se desarrollaron los circuitos monolíticos, las aplicaciones de esta tecnología siempre fueron destinadas a sistemas analógicos. Hasta la aparición de los MMICs no se utilizaron para comunicaciones digitales.

6.2. RELACIÓN PRODUCCIÓN/COSTE

Accesibilidad y disponibilidad: Hasta la aparición de los MMICs, los materiales para la producción de circuitos RF han sido relativamente fáciles de conseguir. En cuanto a los circuitos integrados en sustrato de GaAs, son materiales algo más difíciles de obtener.

Rendimiento: El rendimiento de estos circuitos normalmente es proporcional al tiempo que llevan en el mercado, ya que cuanto más madura es una tecnología, más se saben aprovechar sus prestaciones. Por ello las guías de onda y los circuitos híbridos tienen un alto rendimiento, mientras que los MMICs y CMOS todavía se encuentran en una fase en el que su rendimiento está aumentando con el tiempo.

Cualificación de los procesos: La cualificación necesaria para diseñar y fabricar estos circuitos también ha ido aumentando con el tiempo. Esto es obvio ya que cada vez se trabaja a escalas más pequeñas y con circuitos integrados más complejos, siendo por tanto los MMICs y la tecnología CMOS las más complejas a la hora de su fabricación.

Coste por circuito: El coste de la producción de circuitos de guías de onda como de MICs ha sido siempre muy elevado. Actualmente con los circuitos integrados completos sobre un único sustrato, este coste disminuye considerablemente en la producción al por mayor.