

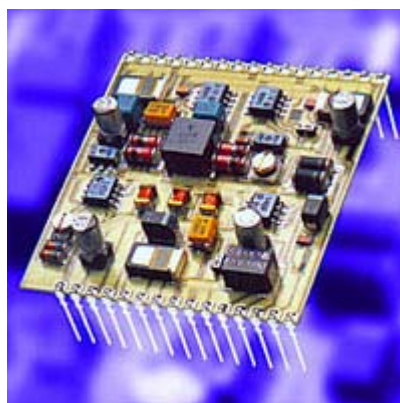
## TEMA 7

# Dispositivos de Microondas IV: Circuitos Integrados

*Esta tecnología supone el paso de la construcción de subsistemas de microondas basados en guías de onda y componentes discretos a la utilización de sustratos y componentes SMD. El objetivo de este capítulo es la descripción de las principales técnicas de integración que se utilizan en alta frecuencia, partiendo de una limitación a la hora de usar los encapsulados típicos de baja frecuencia, lo que da lugar al uso de encapsulados especiales donde la frecuencia y la aplicación lo permiten. Otro aspecto que limita es el propio material de las obleas, puesto que la tecnología de Silicio es sustituida por la de AsGa, u otros sustratos de gran movilidad de electrones como el InP (Fosforo de Indio)*

### **7.1 CIRCUITOS HIBRIDOS**

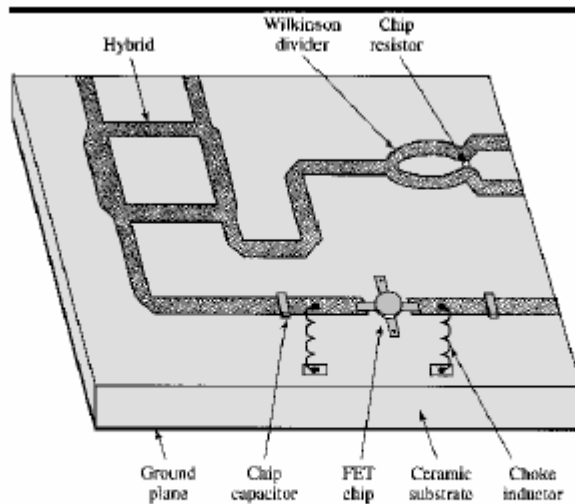
Híbrido, en su significado más general, es cualquier circuito que usa más de una tecnología para llevar a cabo el concepto de circuito integrado. Por ejemplo, en la electrónica clásica son muy utilizados los circuitos híbridos cerámicos, en los que el sustrato (cerámico, por ejemplo alúmina con  $\epsilon_r = 9$ ) es básico para una buena disipación térmica dada su gran conductividad térmica y los componentes se colocan en modo superficial sobre el mismo. Es muy utilizado en sectores como el automóvil, aeroespacial y telecomunicaciones, que necesitan una gran fiabilidad y, por tanto, una buena estabilidad estructural. Estos circuitos híbridos se insertan en los de fibra de vidrio como un componente de inserción más. Veamos un ejemplo:



Fuente: <http://www.okwelectronics.com/products/customhybrid.html>

Las pistas se fabrican por serigrafado de tintas conductoras sobre el sustrato cerámico, los componentes se posicionan por medio de máquinas pick-and-place estándares y el proceso de soldadura es por medio de curado en horno de refusión (reflow).

En la imagen siguiente tendríamos un ejemplo de circuito híbrido, ya de microondas



◆ Layout of a hybrid microwave integrated circuit.

Source : David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 1998.

, en el que se observa que el concepto de “integrado” se aplica al hecho de que haya tecnología planar, sustrato cerámico y/o dieléctrico y líneas de transmisión, junto con componentes discretos adheridos conductivamente y/o soldados a las pistas. En estos circuitos de microondas podemos destacar los siguientes aspectos:

- Los sustratos son la base sobre la que se realizan el resto de procesos, y pueden ser o bien cerámicos, alúmina o cuarzo, o bien fibra de PTFE (teflón). Las constantes dieléctricas varían entre 2 y 10 y las tangentes de pérdidas  $tg\delta$  son del orden de 0,002 a 0,005. La FR4 habitualmente usada en RF tiene una  $tg\delta$  del orden de 0,04.

- Las pistas se crean a partir del sustrato, utilizando unos fotolitos con la imagen del trazado y un posterior proceso fotográfico-químico que acaba en un dorado electrolítico de cierto espesor, varias veces mayor que la profundidad de campo, para minimizar las pérdidas disipativas. Como vemos este proceso nos permite implementar circuitos como los híbridos de -3 dB en el propio circuito, pero claro, la precisión de fabricación tiene que ser muy grande. Un orden de precisión en los 10  $\mu\text{m}$  es suficiente para trabajar en 20 GHz, para lo que necesitamos procesos limpios, constantes y bien definidos.

- La pasta de soldar se coloca automáticamente sobre las partes metálicas que lo necesitan por un proceso dosificador o serigráfico.

- Los componentes se colocan de forma automática en máquinas de inserción SMD o manualmente cuando no están encintados.

- La conexión al exterior o entre circuitos diferentes se hace por un procedimiento denominado como BONDING, que consiste en utilizar hilos (o chapitas) de oro o dorados para soldarlos a los pads dorados eutécticamente por ultrasonido.

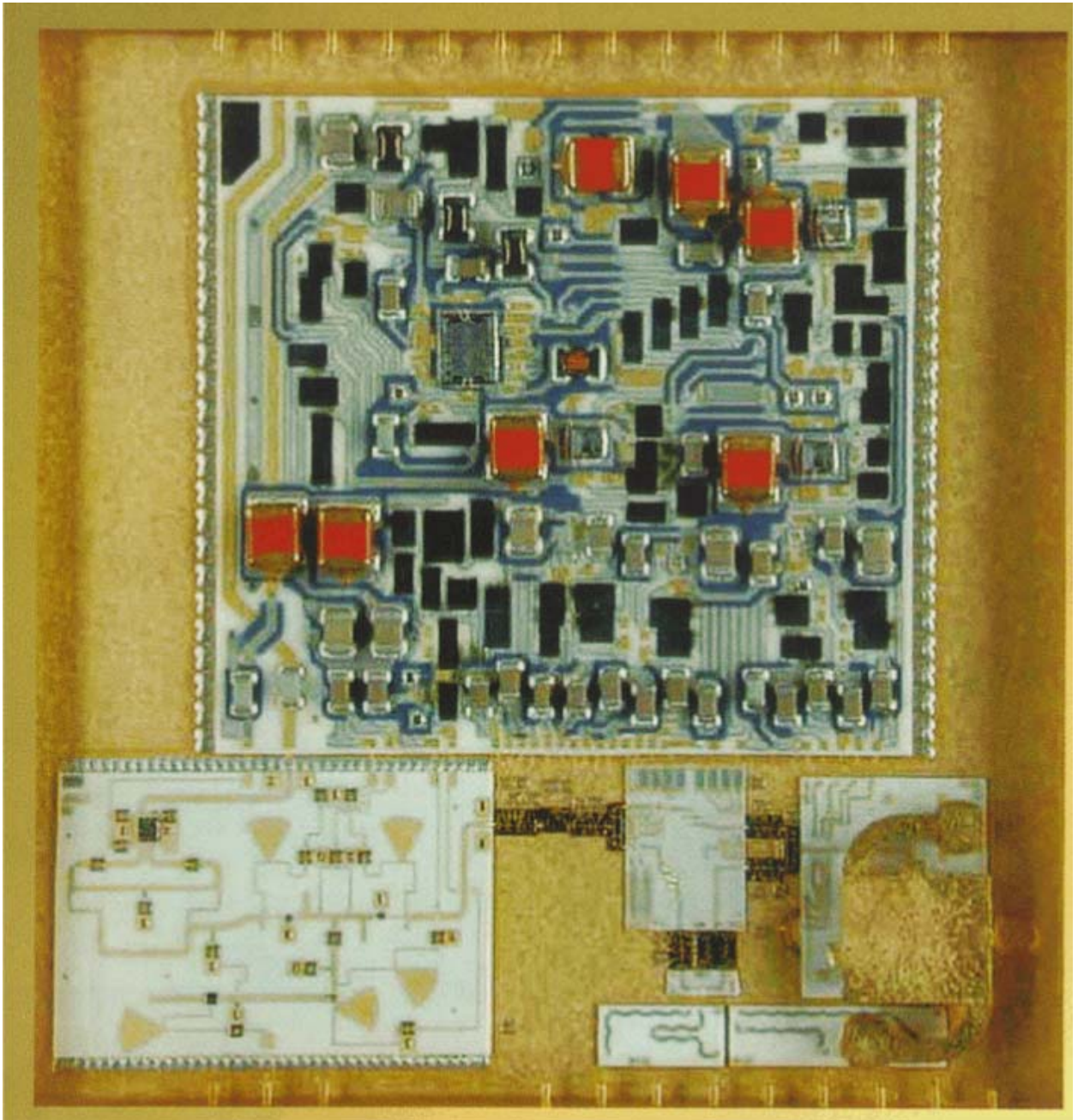
- El último proceso en la fabricación de circuitos híbridos sería el ajuste de sus características, que normalmente incluye una sintonización fina manual para compensar las variaciones de valor y de fabricación de la placa.

Como vemos es un proceso largo, en algunas fases bastante artesanal y, por tanto, caro. Vamos a ver un ejemplo real.

La siguiente imagen correspondería a parte de un conjunto integrado híbrido de alta frecuencia, que implementa un circuito de comunicación punto a punto en 58 GHz. Este concepto sustituiría a métodos más tradicionales en base a guías onda y subconjuntos conectorizados interconectados por coaxiales rígidos o semirrígidos. La ventaja en tamaño es

considerable y también de fabricación puesto que la técnica de soldadura utilizable es la estándar de refusión de pasta de estaño en horno.

En la figura podemos ver el circuito híbrido de baja frecuencia en la parte alta, y los de alta frecuencia en la parte de abajo, incluyendo varios MMIC o circuitos integrados monolíticos. Un vistazo al layout y al tamaño de los componentes nos hace fácil la distinción. Aguzando un poco la vista, podemos ver otra de las características de estos circuitos: la interconexión entre placas se hace a base de lo que se denomina en inglés como “**bonding**”,



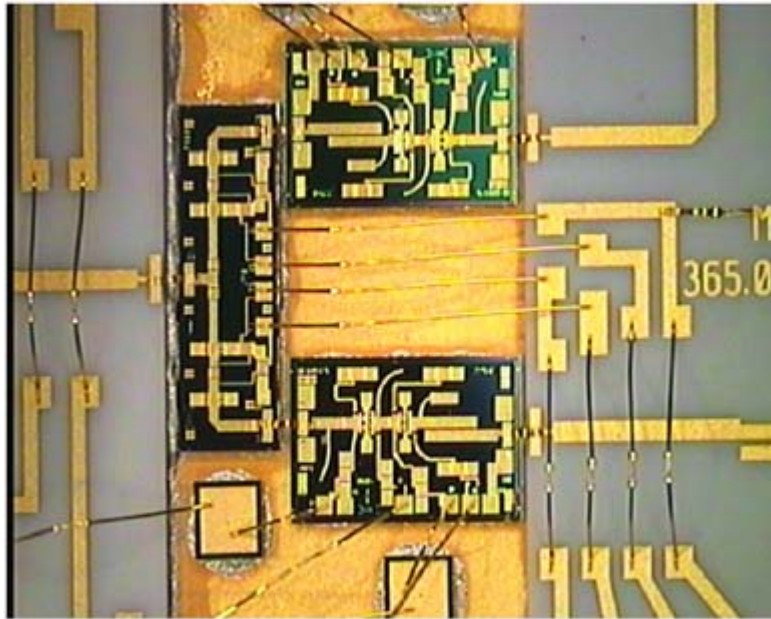
Fuente: *LMDS applications and RF Radio links based on SMD module Technology*, Microwave Engineering Europe May 2003.

Merece destacar en la foto el resumen de todo lo que hemos citado previamente.

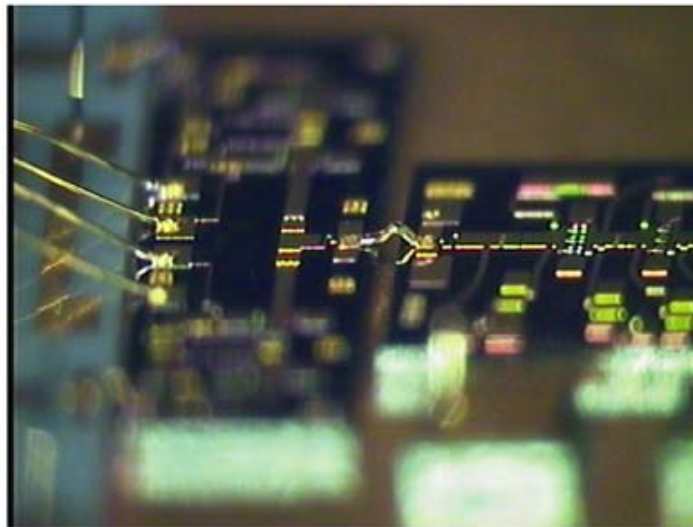
A continuación, vemos partes de lo anterior con más detalle: se pueden observar el detalle de interconexión a base de bonding entre los circuitos MMIC sin encapsular (un switch y dos amplificadores), los circuitos de sustrato cerámico alúmina de 0,127 mm y los condensadores de desacoplo de microondas. Los hilos de bonding son de 30  $\mu\text{m}$  de diámetro.

## Tema 7 – Circuitos Activos de Microondas IV: Circuitos Integrados

Las interconexiones entre MMIC se hacen con cintas o chapitas en lugar de hilos como se ve en la siguiente figura.



*Fig. 2: Electrical interconnects*



*Fig. 3: Typical RF ribbon bonds (sideview)*

Fuente: [www.imaps.org/adv\\_micro/2001nov\\_dec/2.html](http://www.imaps.org/adv_micro/2001nov_dec/2.html)

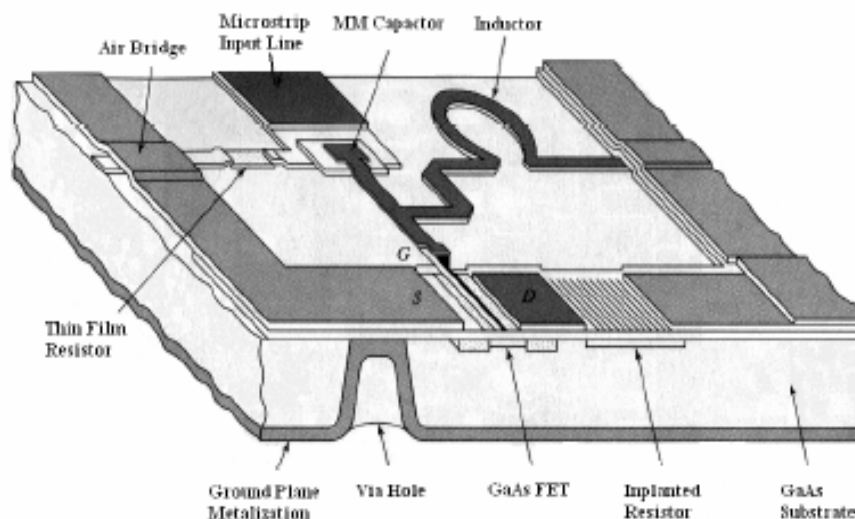
Este es un tipo de tecnología que, en el rango máximo de 50 GHz, tiende a ser sustituida en la medida de lo posible por la de circuitos integrados encapsulados, que es más barata (por menor mano de obra) y cada vez más ampliamente utilizada en frecuencias de microondas.

A medida que aumenta la comercialización de circuitos integrados MMIC encapsulados, cobra más importancia el uso de sustratos baratos y de calidad y el control de los materiales y procesos usados en el ensamblado de los circuitos híbridos.

Vale como ejemplo de una realización práctica el circuito transmisor de un transceiver VSAT, sistema que explicamos en el Tema siguiente.

## 7.2 CIRCUITOS INTEGRADOS MONOLITICOS: MMIC.

Si damos un paso más e integramos los componentes discretos en el mismo sustrato en una estructura habitualmente multicapa, pasamos al concepto de Monolítico, del cual podemos ver un ejemplo en la figura,



◆ Layout of a hybrid monolithic microwave integrated circuit.

Source : David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 1998.

En este caso los componentes **crecen desde o se implantan sobre** el sustrato por medio de sucesivos procesos de litografía y deposición, con los que se superponen capas metálicas, dieléctricas y resistivas, dando lugar a un esquemático completo integrado en un chip y a posteriori se encapsula de una forma estándar dando lugar a las economías de escala que abaratan las funciones electrónicas.

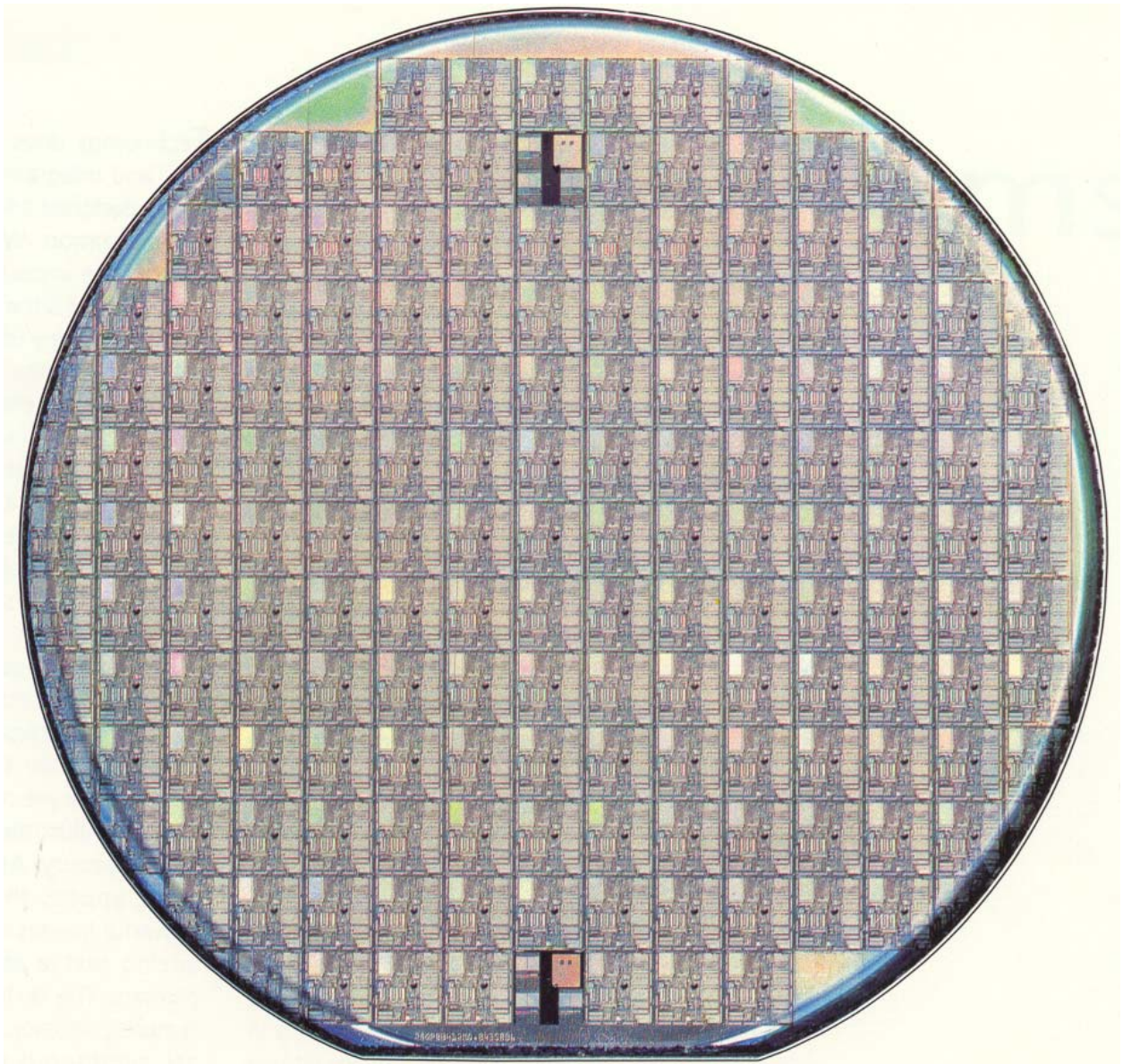
Este tipo de tecnología está siendo profusamente empleada en toda la tecnología wireless y de telefonía móvil tan en boga, aunque en este caso el sustrato es silicio y la tecnología es, en su gran mayoría, CMOS. Hoy en día la máxima frecuencia de trabajo está alcanzando los 10 GHz y, por tanto, podemos decir que está “invadiendo” poco a poco lo que hasta hace poco era exclusivo de las tecnologías de microondas. Vamos a dar un vistazo rápido a esta tecnología CMOS.

### 7.2.1 Tecnología CMOS y BiCMOS en RF.

Vamos a hacer un repaso por estas tecnologías, no para analizarlas en profundidad pero sí para tener una idea de las dimensiones micro y nanométricas involucradas. El material soporte es el Silicio monocristalino (Si) sobre el que se ejecutan procesos físico-químicos que incluyen la difusión, oxidación, deposición y fotolitografía.

Este conjunto de procesos realizado sobre obleas pulidas de Silicio, con rugosidades por debajo de los 20 nm y de diámetros del orden de los 200 a 300 nm hace que con un lote de 50 de ellas agrupadas, y con 100 circuitos en cada una, se puedan fabricar miles de circuitos integrados iguales simultáneamente, lo que explica el bajo costo de los mismos.

En la figura vemos una oblea con cerca de 100 circuitos individuales. Cada uno de ellos puede contener del orden de entre 500k y 2M transistores.



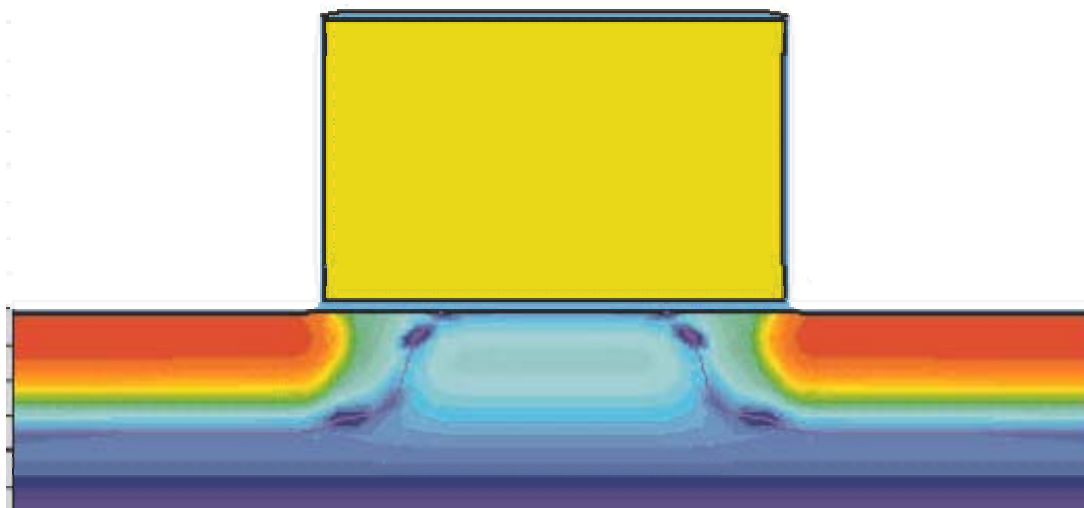
Fuente: <http://studies.ac.upc.edu/FIB/DBVLSI/imagenes.html>

Dentro de esta tecnología, los principales elementos activos que se pueden fabricar son los transistores bipolares de unión (BJT) y los transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET).

El menor tamaño, sencillez de proceso y las mejores características de disipación de energía, han decantado la mayor parte del desarrollo hacia la tecnología CMOS (Complementary MOS = NMOS + PMOS en modo complementario), en la que están implementados la mayoría de los circuitos integrados de velocidades moderadas. En la figura podemos ver el corte transversal de un transistor MOS

La figura muestra el corte transversal de un MOSFET con canal n. Se observa la estructura n (fuente/zona roja) p (puerta/zona azul) n (drenado/zona roja) típica de un transistor. La aplicación de tensión al electrodo puerta (zona amarilla) provocará una inversión superficial bajo el óxido de puerta (zona azul bajo puerta) creando un canal n que pondrá en contacto fuente y drenado (zonas rojas). (Field Effect Transistor FET).

Se pueden encontrar en la Red numerosas figuras e incluso fotografías de dispositivos MOSFET.



Fuente: la Red

Ahora bien, la necesidad de aumentar la velocidad y, por tanto, la frecuencia máxima de funcionamiento de los dispositivos ha empujado al desarrollo de tecnologías como la RF CMOS, BiCMOS (Bipolar-CMOS), HBT (heterounión bipolar transistor) de SiGe e InP, etc. Es un campo extensísimo que no podemos abarcar aquí. Simplemente vamos a dar un cuadro de características básico para ver de qué órdenes de magnitud hablamos. Es un ejemplo de familia extraído del fabricante [www.austriamicrosystems.com](http://www.austriamicrosystems.com), proveedor en este caso del CEIT de circuitos integrados de RF.

### BiCMOS Technology Selection Guide

Process Name	units	BYB	BYE	BYQ	BYS	BYR
Process Type		<b>BiCMOS</b>			<b>SiGe-BiCMOS</b>	
Drawn MOS Channel Length,	$\mu\text{m}$	0.8			0.8	
Drawn Emitter Width	$\mu\text{m}$	0.8			0.8	
Operating Voltage	V	2.5-5.5			2.5-5.5	
Number of Masks		15	16	17	18	19
Number of masking layers		19	20	21	22	23
Number of Metal Layers		2			2	2
Number of Poly Layers		2			3	3
Substrate Type		p			p	
Diffusion Pitch	$\mu\text{m}$	3,8			3,8	
Metal1/2/3 Pitch	$\mu\text{m}$	2.4/2.8/-			2.4/2.8/-	
Poly1 Pitch	$\mu\text{m}$	1,8			1,8	
Thick Metal 4 pitch	$\mu\text{m}$				-	
High Resistive Poly	kOhm/#	-	-	1,2	-	1,2
Poly1/Poly2 Precision Caps	fF/ $\mu\text{m}^2$	-	1,8	1,8	1,8	1,8
Metal 2 / Metal 3 Precision Caps	fF/ $\mu\text{m}^2$	-	-	-	-	-
N/PMOS Channel Length	$\mu\text{m}$	0.66/0.75			0.66/0.75	
N/PMOS Saturation Current	$\mu\text{A}/\mu\text{m}$	420/200			420/200	
HV HBT		> 6.0			> 3.0	

Bvceo	V	> 6.0	> 3.0
Gain		100	100
Transit Frequency	GHz	12	35
Maximum Oscillation Freq. Fmax	GHz	14	

Fuente: [www.austriamicrosystems.com](http://www.austriamicrosystems.com)

Un simple vistazo a las características dimensionales, del orden de la micra, nos indica la extremada limpieza y cuidado con la que se tienen que ejecutar los procesos para conseguir fabricaciones libres de defectos. Para ello se utilizan las llamadas Salas Blancas, con protecciones para los manipuladores del proceso. Como dato ejemplar baste decir que un pelo humano tiene un diámetro aproximado de 50  $\mu\text{m}$ , con lo que ya podemos concluir que su presencia puede ser desastrosa en el entorno de fabricación de integrados.

Hoy en día ya se empiezan a utilizar comercialmente chips basados en procesos de 0,35/0,25/0,18  $\mu\text{m}$  con lo que la capacidad de integración crece constantemente.

Caso de la nueva tecnología de **0,35  $\mu\text{m}$  SiGe-BiCMOS**, las características principales pasarían a:

- Feature Sizes: 0.35 $\mu\text{m}$  gates / 0.40 $\mu\text{m}$  emitters
- Supply Voltage: CMOS 3.3V; periphery up to 5.5V
- Ft > 70 GHz, Fmax > 70 GHz
- Bvceo > 2V

Vemos que alcanzamos  $F_T$  de valores suficientemente alto como para abordar aplicaciones que ya son claramente de microondas. ¿Dónde está el límite frecuencial? Pues, para contestar en pocas palabras, en que para poder extender este tipo de circuitos integrados a frecuencias más altas, se debe mejorar el comportamiento intrínseco de cada componente integrado y esto ya es función directa del sustrato utilizado, en este caso Si. De ahí que a partir de 10 GHz la base pasa a ser de Arseniuro de Galio.

### 7.2.2 Tecnología AsGa: Arseniuro de Galio

El uso de este semiconductor en aplicaciones de alta frecuencia y alta velocidad se basa en la mayor movilidad de los electrones en este material que en el Silicio. De hecho puede tener una movilidad 4 veces mayor para el mismo campo eléctrico aplicado.

Es hasta ahora la tecnología predominante cuando se trata de fabricar circuitos integrados de frecuencias de microondas, pues mientras la tecnología de silicio bipolar y CMOS se queda en el techo de los 10 GHz, con el AsGa podemos llegar hasta los 60 GHz.

La técnica de fabricación es similar a la de Silicio, destacándose estas fases:

- Una primera fase de uso de herramientas de CAD/CAE, con simulación incluida, para diseñar y optimizar el circuito, teniendo en cuenta todos los efectos parásitos debidos a acoplamiento no deseados, efectos de redes de polarización y encapsulado, tolerancia de componentes, etc.

- Se generan las máscaras de fundición del circuito (fotolitografía en escala 10/1 o mayor)

- Como se ve en la figura anterior hay varios niveles en el layout del MMIC, niveles que corresponden a pasos concretos del proceso. Cada paso puede necesitar varias máscaras.

- 1) 1er paso: Se forma la primera capa activa en el sustrato semiconductor, por implantación iónica o por técnicas epitaxiales. Es el primer paso para fabricar todos los transistores FET que participen en el circuito.



- 2) Se generan islas en esta capa activa, por etching o ataque químico de forma que se configuran los electrodos de los elementos activos; así se hacen las fuentes y drenadores de los FET.
- 3) Se añaden los contactos óhmicos para poder conectarse a estas partes activas por medio de una aleación de oro o oro/germanio con el sustrato.
- 4) Se forman las puertas (gates) de los transistores depositando un compuesto de titanio/platino/oro entre fuente y drenador. Así, ya están formados los transistores y se puede hacer una primera evaluación intermedia de la oblea completa.
- 5) Si la evaluación es positiva, se dispone la 1ª capa de metalización, de forma que puedo configurar contactos, líneas de transmisión, bobinas impresas, etc.
- 6) Se forman las resistencias depositando filmes resistivos, y capacidades y recubrimientos depositando filmes dieléctricos.
- 7) Se deposita una segunda capa de metalización para terminar de fabricar los condensadores y los contactos restantes.
- 8) Se reduce el espesor del sustrato cerámico a su dimensión final.
- 9) Se mecanizan las vías de conexión al plano de masa, por atacado químico y posterior metalizado. Estas vías son la conexión, tanto eléctrica como térmica de los elementos activos al plano de masa.
- 10) Se cortan los circuitos individuales de la oblea y se testan.
- 11) Si lo necesita o lo permite, se encapsula todo el conjunto para mayor protección y facilidad a la hora de introducirlo en un proceso de fabricación automatizado.

El proceso se ha presentado simplificado, pues en la realidad los pasos pueden llegar a ser de un centenar. Vemos que son procesos complejos y además hemos de admitir que se producen interacciones entre ellos con lo que el orden en que se dan y su control debe ser estricto.

Las obleas de AsGa se fabrican de una forma muy similar a las de Silicio, pero su tamaño final es menor, debido a que el material AsGa es más blando y frágil, dando lugar a obleas de 7,5 o 10 cm como máximo y además la tecnología está menos desarrollada, debido a que las cantidades de circuitos son mucho menores a nivel mundial que la de circuitos de Si.

Todo ello lleva a un costo mayor en los circuitos integrados de AsGa. Otra desventaja reside en la menor conductividad térmica, 2,5 veces menor, de este sustrato respecto al Si; lo que implica una menor capacidad de disipación y por tanto un menor índice de integración. Sumando todo esto, la conclusión es clara: *los circuitos integrados de AsGa son bastante más caros que los de Si.*

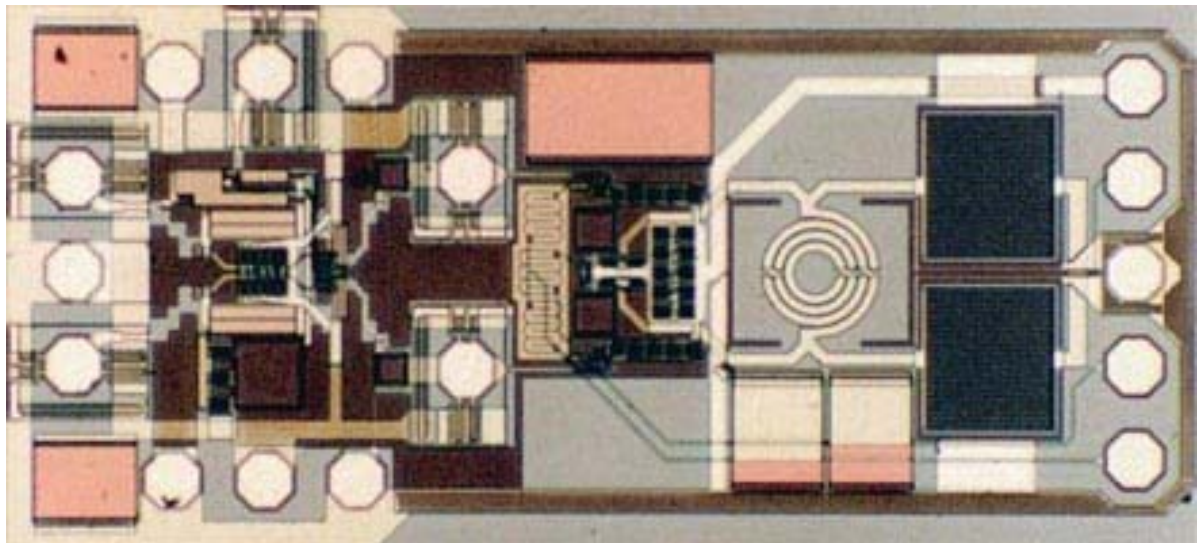
Todas las ventajas que tiene la posibilidad de la integración no hacen desaparecer algunas desventajas evidentes, cómo la enorme importancia de la fase de diseño y la responsabilidad que recae en el programa de CAD/CAE y simulación, teniendo en cuenta que al fabricar el chip no hay vuelta atrás. Por eso más adelante vamos a precisar algo más sobre estas herramientas.

### 7.2.3 Tecnologías SiGe, InP

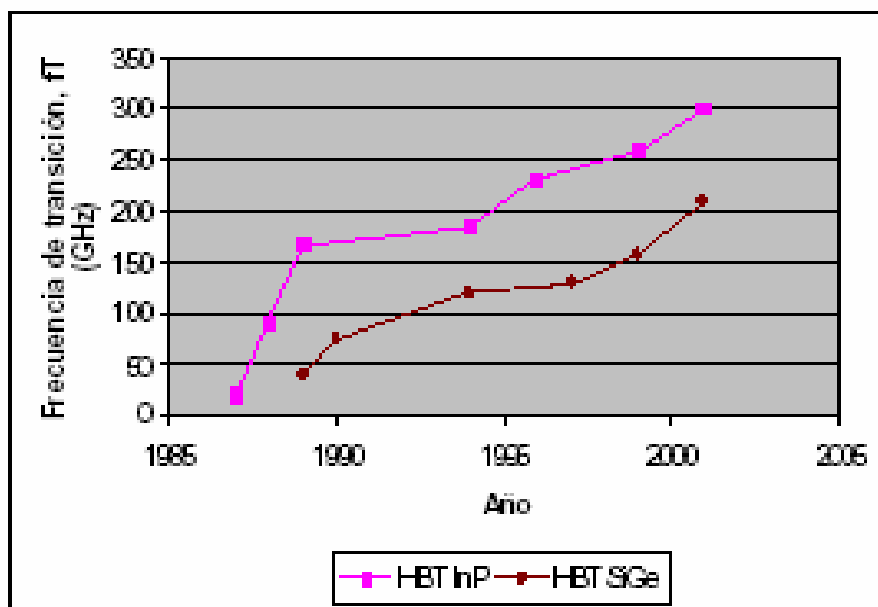
Estas tecnologías empiezan a imponerse como alternativa al AsGa, debido a su menor costo. La de SiGe ya la hemos tocado en el apartado anterior pues no es más que una tecnología BICMOS de Silicio pero con el añadido de una capa de SiGe que hace que la movilidad sea un 70% mayor en los transistores bipolares de heterounión HBT.

**Tema 7 – Circuitos Activos de Microondas IV: Circuitos Integrados**

La figura a continuación corresponde a la tesis doctoral realizada en el CEIT denominada "INTEGRACIÓN DE UN CONVERTOR DE FRECUENCIA PARA TV EN TECNOLOGÍA SiGe 0.8  $\mu\text{m}$ ", del Dr. Erik Hernández, en el que se puede observar claramente el circuito tanque correspondiente al oscilador local, en rango frecuencial de 2 GHz.



En cuanto al InP, es la tecnología de vanguardia de hoy en día en cuanto a velocidades debido a la máxima movilidad de sus electrones. Veamos a continuación una gráfica comparativa de la evolución en el tiempo de las tecnologías SiGe e InP y un cuadro comparativo de prestaciones de dispositivos HBT y HEMT (HFET = transistor de efecto de campo de heterounión), comparados con el máximo conseguido hoy en día con la tradicional de Silicio mejorada.



**Fig.1.** Progress in the maximum reported value of  $f_T$ .

Fuente: InP y SiGe Dos competidores en la carrera de alta velocidad. Lluís Prat Viñas y Pau García-Salvá. Mundo Electrónico Abril 2003

	HEMT-InP	HBT-InP	HBT-SiGe	MOS-Si	Notas
$f_T$	400 GHz	300 GHz	210 GHz	51 GHz	$f_T$ : frecuencia de transición
$f_{max}$	469 GHz	1,1 THz	89 GHz	28 GHz	$f_{max}$ : frecuencia de ganancia de potencia unidad
Amplificador	215 GHz	175 GHz	50 GHz	25 GHz	
Oscilador	213 GHz	134 GHz	58 GHz	26 GHz	
C. Digital	80 Gbps	50 Gbps	-	10 Gbps	Biestables, multiplexores, etc.

Está clara la superioridad del InP, y además tenemos que tener en cuenta la diferente escala dimensional de los dispositivos: mientras en el InP los tamaños son de 1 o 2  $\mu\text{m}$ , en el SiGe ya están en 0,14  $\mu\text{m}$  debido a la mayor madurez de la tecnología del Silicio. Por supuesto que esto hace que el SiGe sea mucho mejor en costo y ahí esta su ventaja, y la tendencia actual a un uso masivo de esta tecnología.

Cara al futuro se vislumbran varias tendencias: la reducción de dimensiones en el InP y AsGa y por tanto su abaratamiento, la nanotecnología electrónica, la nanotecnología molecular, y el salto definitivo a la fotónica.

Como ejemplo, vemos este artículo de 17/10/2003 en el diario EL PAIS,

## **TRANSISTOR MOLECULAR EN MARCHA**

Fuente: EIPaís

Un equipo europeo de investigadores de la Universidad de Copenhague, ha presentado un transistor a partir de una molécula orgánica simple, que podría conducir a la fabricación de mini-ordenadores súper rápidos. El aparato mide tan solo una mil-millonésima parte de metro (un nanómetro), es decir, es cientos de veces más pequeño que un transistor tradicional, y constituye un paso importante hacia la consecución de ordenadores extremadamente pequeños y rápidos.

El transistor "abre perspectivas de futuro fascinantes", puesto que tiene múltiples aplicaciones, desde ordenadores hasta teléfonos móviles, según Thomas Bjoernholm, del Centro de Ciencia de la Universidad de Copenhague. "Con nuestro componente, podemos meter un millón de veces más transistores por unidad, lo que permitirá fabricar en el futuro ordenadores de tamaño muy reducido, más potentes y que van mucho más deprisa", subrayó.

Investigadores de IBM ya habían anunciado en 2001 la puesta en marcha de transistores del tamaño de varios átomos que podrían permitir fabricar ordenadores mucho más delgados y poderosos que los actuales.

Estos transistores están constituidos de nanotubos de carbono, una especie de cilindros de átomos de carbono que miden el equivalente a 10 átomos y son 500 veces más pequeños que los transistores a base de silicio.

### **7.3 HERRAMIENTAS DE DISEÑO Y SIMULACIÓN**

Ya hemos dicho que la fase de diseño de un circuito integrado es crítica, al no haber posterior vuelta-atrás. El paso de la tecnología híbrida a la monolítica implica la obligatoriedad en el uso de los simuladores, sean circuitales o electromagnéticos. A su vez, esto implica la existencia de modelos de componentes suficientemente exactos para poder validar posteriormente las simulaciones.

Hoy en día existen innumerables paquetes de software que incluyen en un entorno estandarizado y bastante similar en todos los casos, todas las opciones de simulación. Muchos de estos paquetes incluyen partes gratuitas con objetivos educativos.

A continuación se enumeran varios fabricantes de estos paquetes software, que son de un empleo exhaustivo en los diseños de circuitos integrados en todo el mundo

[www.cadence.com](http://www.cadence.com)

[www.agilent.com](http://www.agilent.com)

. Sus principales características son:

- Permiten una simulación del circuito que se vaya a implementar, tanto a nivel de esquema, como layout y nivel de sistema

- Permiten también la incorporación de todos los efectos parásitos que se producen al integrar todo el esquema en una tecnología concreta

- Son compatibles con los modelos de los dispositivos que dan los fabricantes o fundidores de circuitos integrados (foundry)

- Generan como salida el total de las máscaras necesarias para ejecutar todo el proceso

## **7.4 ENCAPSULADOS DE ALTA FRECUENCIA**

Una vez fabricado el circuito integrado, es necesario conectarlo de alguna forma al mundo exterior para que pueda formar parte de sistemas más complejos. La técnica básica para esta conexión es el bonding, que une con hilos de oro las partes internas del integrado con los pads que posteriormente se utilizan para realizar el bonding al exterior o al encapsulado.

Si el chip se deja sin encapsular se conecta en modo “die attach”, es decir directamente desde el interior del chip al resto del circuito por medio. Caso de contar con el encapsulado, el circuito integrado puede ser procesado como un componente más en un sistema reflow o refusión estándar.

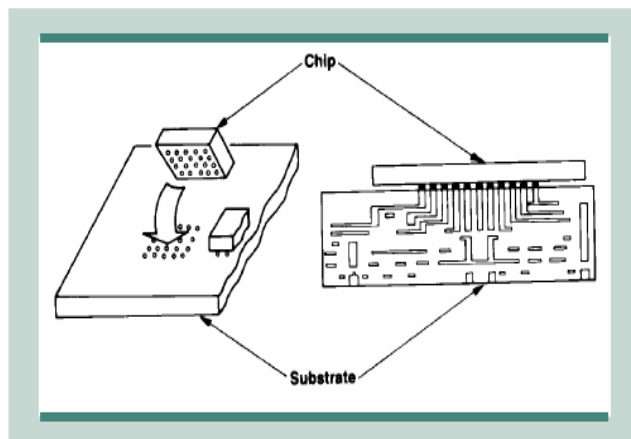
Evidentemente los encapsulados estándares en frecuencias más bajas no son válidos, debido a sus malas características frecuenciales, lo que lleva a diseños específicos, incluso propietarios de los fabricantes de componentes.

Aún así, estos encapsulados de baja frecuencia también han mejorado su comportamiento a través de una técnica más moderna, denominada “*flip-chip*”, que evita el engorroso y caro proceso del bonding, invirtiendo la posición del chip y ensamblándolo directamente al sustrato. Previamente se han depositado en las E/S del chip bolas de pasta de soldadura que permiten soldar el chip por refusión a los pads de los sustratos multicapa. En la figura podemos ver la operación.

Sea como sea, el bonding se sigue utilizando porque el flip-chip tiene un grave inconveniente: la fiabilidad; el origen del problema está en los diferentes coeficientes de dilatación térmica de los materiales involucrados (cerámicas, semiconductores, fibra de vidrio) que pueden llegar a romper las soldaduras entre chip y sustrato. Hay soluciones para controlar esto a base de materiales intermedios que hagan de transición y absorban los diferentes comportamientos térmicos.

Lo que está claro es que mientras el bonding maneja longitudes de conexión de milímetros, en el flip-chip la magnitud es de decenas de micras, con la consiguiente mejora de comportamiento frecuencial y por tanto de velocidad de proceso. Todas estas técnicas están altamente desarrolladas teniendo en cuenta las economías de escala que se dan en el sector de los PC, contando con procesadores que hoy en día están en el rango de 2-3 GHz: la técnica de

fabricación y encapsulado de los mismos cobra una importancia vital. De ahí que las máquinas de bonding se hayan convertido en el cuello de botella en la fabricación de estos procesadores modernos y se hayan ensayado estos otros tipos de ensamblados directos.



Fuente: *Módulos multichip Tecnología y análisis de costes*. Mundo Electrónico Abril 1999

Todas estas tendencias mejoran los procesos que también sirven para intentar encapsular circuitos integrados en frecuencias de microondas, en el rango de 30, 40 GHz. Veamos algunos tipos de encapsulado utilizados en los circuitos integrados de estas frecuencias.

#### 7.4.1 LGA - Land Grid Array - cerámico y BGA - Ball Grid Array - cerámico

Son dos encapsulados similares, que se basan en la transición desde el chip a la parte inferior del encapsulado donde se encuentran unas bolitas de estaño (BGA) o unas pistas (LAND) que son la que se sueldan al circuito impreso o al sustrato cerámico. En los dos casos el sustrato es cerámico (el BGA también se hace en fibra de vidrio en más bajas frecuencias) y la tapa también lo es.

En la foto tenemos el BGA en la parte superior y el LGA en la inferior, en ambos casos del fabricante Hittite, <http://www.hittite.com>

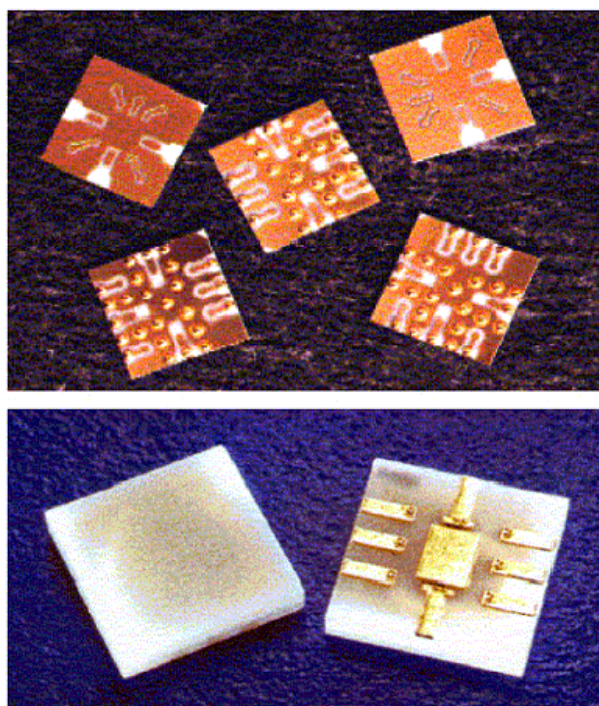


Fig. 5: SingleRF Packages ([www.hittite.com](http://www.hittite.com))

El siguiente es otro ejemplo de este tipo de encapsulado cerámico LGA, válido para una frecuencia de 25 GHz como vemos. En este caso es de un fabricante de EEUU.

**25671DV**  
**DC TO 25 GHz DIVIDE-BY-2 PRESCALER**  
**IN LGA CERAMIC PACKAGE**



**Applications**

- Phase-locked loop (PLL) applications from DC to 25 GHz
- Point-to-point and point-to-multipoint digital radios
- Broadband test and measurement equipment
- Radar, electronic warfare, avionics, and space

**Features**

- Wide frequency range: DC to 25 GHz
- High input power sensitivity: -25 dBm
- Ultra low phase noise: -148 dBc/Hz @ 100 KHz offset
- Supports single-ended or differential operation
- Single +3.0 to +3.4 V power supply
- Low supply current: 65 mA
- Available in LGA ceramic package
- Also available in die form or in QFN plastic package
- Evaluation board available

Fuente: [www.inphi-corp.com](http://www.inphi-corp.com)

El encapsulado mide  $7 \times 7 \text{ mm}^2$  y, como observamos, su estructura es fácilmente acoplable a la soldadura de tipo refusión al contar con pistas metálicas en la base del mismo. Hoy en día los circuitos encapsulados se enfrentan a la barrera de los 40 GHz, límite que se tendrá que superar si de verdad se quiere contar con una tecnología de banda ancha en microondas accesible en costo.

Como ejemplo cuantitativo, constatamos que hoy en día el costo de un circuito integrado LGA de microondas se reparte en un 60% para el chip y 40 % para el encapsulado completo, incluyendo ensamblado y test.

**7.4.2 QFN – Quad Flat No-lead - plástico**

Bajo este epígrafe están surgiendo numerosos encapsulados que sustituyen los habituales terminales externo-laterales de los integrados SMD convencionales, por terminales de soldadura situados en la parte baja de los mismos integrados. Las ventajas son claras: el espacio ocupado es incluso un 40% menor y la potencia disipada puede ser hasta un 66% mayor. Este último factor es muy importante para integrar las etapas de salida de los transceivers necesarios en los modernos sistemas inalámbricos.

También el inconveniente queda claro: las soldaduras realizadas quedan ocultas y por tanto no son visibles a simple vista, con lo que el posible análisis de la situación de la soldadura se debe hacer por medios más sofisticados como los rayos X.

En el rango de los GHz vemos como ejemplo un encapsulado de 3x3 mm<sup>2</sup> de plástico, y por tanto de bajo costo, que en el caso del fabricante del apartado anterior se anuncia como válido para el mismo prescaler de 25 GHz. El número de pines es de 12, pero también existe en el mismo tamaño una versión de 16.

.....*Inphi's prescalers are currently sampling to OEM customers worldwide. These products are offered in a 3 x 3 mm<sup>2</sup> QFN plastic package, in a 7 x 7 mm<sup>2</sup> LGA ceramic package, or in die form. The packaged parts are also available on an evaluation board with SMA connectors for testing purposes. Unit pricing for all three prescaler in the QFN plastic package is \$22 for production quantities of 5,000 units.....*

Fuente: [www.inphi-corp.com/news/press/PrescalerinQFNPlasticRelease\\_Latest.pdf](http://www.inphi-corp.com/news/press/PrescalerinQFNPlasticRelease_Latest.pdf)

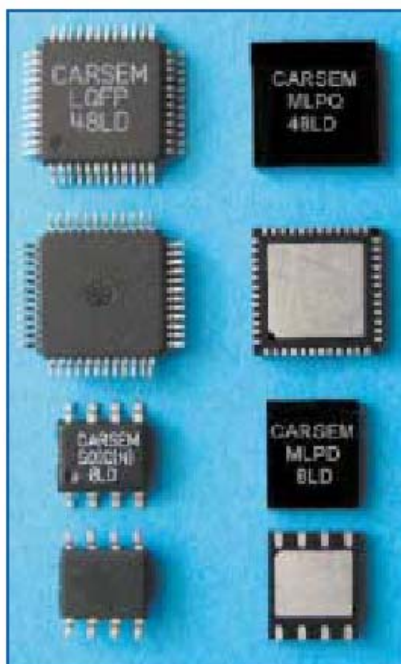
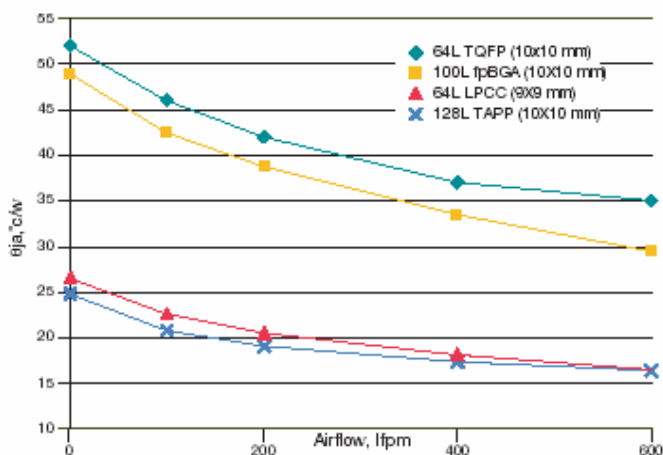


Figure 1. Top and bottom view of a typical QFN package compared to similar QFP and SOIC packages

Fuente: [http://www.carsem.com/news/mlpqfn\\_atcl.pdf](http://www.carsem.com/news/mlpqfn_atcl.pdf)

La inductancia serie propia debida a los pines del encapsulado baja a la mitad en los encapsulados QFN con lo que es fácil inferir su mejor comportamiento en altas frecuencias. Vemos una comparación de encapsulados en la gráfica

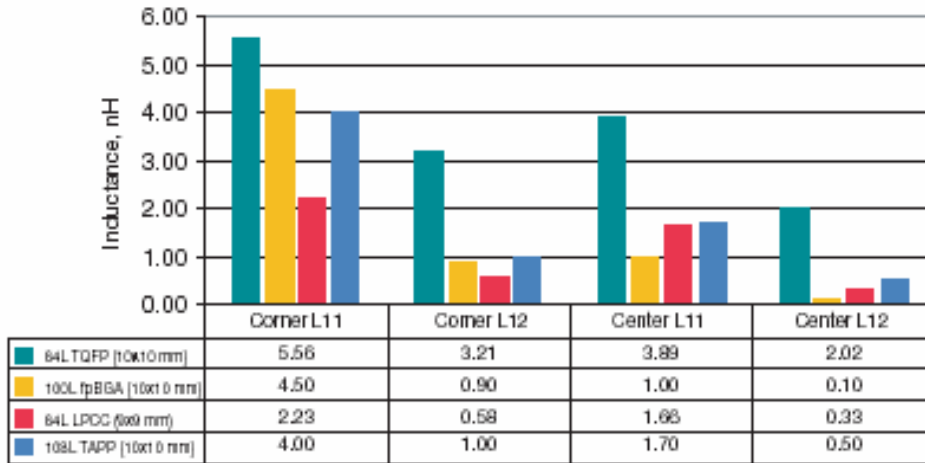
**Thermal Performance**  
*(various package types)*



Fuente: [http://www.asat.com/products/data/LPCC\\_1003.pdf](http://www.asat.com/products/data/LPCC_1003.pdf)

, y en cuanto a comportamiento frecuencial, lo vemos indirectamente con la inductancia serie de varios encapsulados

**Electrical Performance**  
(various package types)



Fuente: [http://www.asat.com/products/data/LPCC\\_1003.pdf](http://www.asat.com/products/data/LPCC_1003.pdf)

Como vemos la tendencia es la de utilizar la misma filosofía que en las fabricaciones masivas de baja frecuencia, con un sustrato de fibra y componentes SMD ensamblables con un proceso de refusión estándar. Objetivo: construir sistemas de comunicación baratos en frecuencias de microondas. Ahora bien, hemos de ser conscientes de que la barrera real a día de hoy está en el rango de 20-30 GHz para poder evitar el caro proceso de conexión por bonding.

Veámoslo con otro ejemplo real del fabricante franco-alemán United Monolithic Semiconductors UMS, que limita el encapsulado a 20 GHz, pero que como se ve en su página ya está en el rango de 30 GHz con aplicaciones VSAT en banda Ka.

**Plastic QFN Package**

Example of QFN package  
**LPCC**  
With Ground Bonds

ASAT®

0.9mm

JAN '01

ASAT CONFIDENTIAL

**UMS**  
United Monolithic Semiconductors

**Leadless  
Plastic  
Chip  
Carrier**

for  $f < 20$  GHz

All information contained in this document remains the sole and exclusive property of UNITED MONOLITHIC SEMICONDUCTORS and shall not be disclosed by the recipient to third party without the prior consent of UNITED MONOLITHIC SEMICONDUCTORS.

26-Apr-03  
page 17

A Company of:  
EADS Deutschland GmbH  
Thales

Fuente: [www.ums-gaas.com](http://www.ums-gaas.com)



# CHA2066 in QFN package

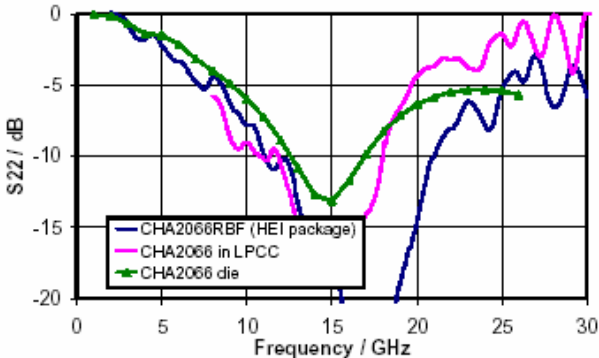
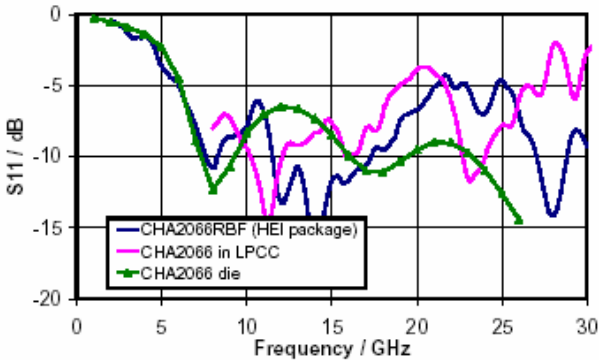
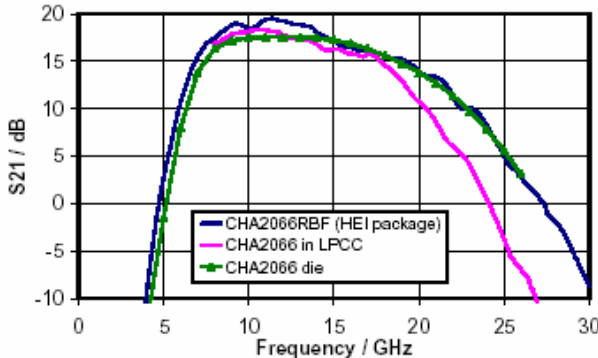
# UMS

United Monolithic Semiconductors



CHA2066 (self-biased low noise amplifier) in ASAT LPCC package

- ◆ Results: good performance shown up to 18 GHz
- ◆ improvement possible with modified motherboard (f < 32 GHz)



All information contained in this document remains the sole and exclusive property of UNITED MONOLITHIC SEMICONDUCTORS and shall not be disclosed by the recipient to third party without the prior consent of UNITED MONOLITHIC SEMICONDUCTORS.

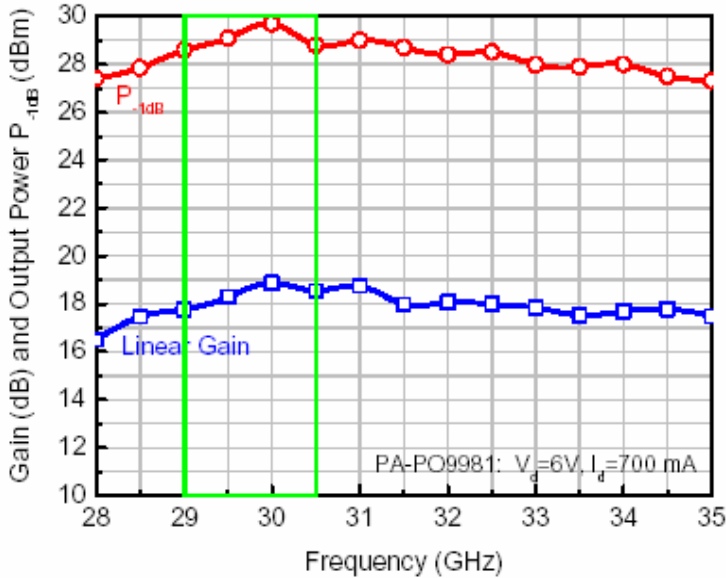
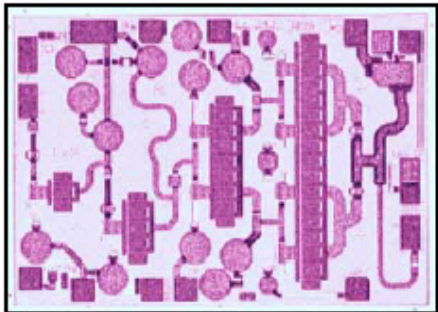
26-Apr-03 page 18

A Company of : EADS Deutschland GmbH Thales

El siguiente paso es la integración de amplificadores en el rango de 30 GHz y con potencias cercanas a 1 vatio, en este tipo de encapsulados, con capacidad de disipar 4,2 vatios. El tamaño del chip es de 2,5 mm<sup>2</sup>. Este es el estado del arte actual en encapsulados de microondas.

- ◆ Pa-PO9981 – PPH25 (2.47 mm<sup>2</sup>) : engineering samples

- $V_{ds} = 6 \text{ Volt} / I_{ds} = 700 \text{ mA}$
- 28-35 GHz
- $G_{linear} = 18 \text{ dB}$
- $P_{-1dB} > 28 \text{ dBm}$



Fuente: [www.ums-gaas.com](http://www.ums-gaas.com)

### 7.5 UNIDADES ENSAMBLADAS DE MICROONDAS: MWU

Se denomina así al conjunto, ensamblado y conectorizado, que funciona en frecuencias de microondas, que contiene MMIC's y circuitos específicos, como los de potencia, y que necesitan un comportamiento muy estable con la temperatura, para garantizar la no rotura de los elementos críticos que se ensamblan e interconectan de una forma bastante delicada (chips en sustratos quebradizos y bondings). En las figuras del apartado 11.1 podemos ver lo que una de estas unidades contiene en su interior,

Este módulo se monta en el interior de una caja metálica, con pasachasis y conectores herméticos de forma que la misma queda perfectamente sellada. El material de esta caja suele ser seleccionado para una expansión térmica compatible con las cerámicas y componentes internos de AsGa.

Un ejemplo concreto puede ser el KOVAR, del cuál vemos unas características básicas:

ELEMENT	Wt. %
Ni	29
Co	17
C	<.01
Fe	Balance

#### Typical Mechanical Properties

	0.2 %		
U.T.S.	Y.S.		
<u>(ksi)</u>	<u>(ksi)</u>	<u>Elongation (%)</u>	<u>Hardness</u>
67	43	36	Rb 72

Como elementos participantes en sistemas más complejos, en los que las MWU no son más que una parte, el ensamblado posterior de estos subconjuntos tiene gran importancia, tanto desde el punto de vista de una correcta disipación del calor, como desde el punto de vista de características eléctricas. De hecho, para las interconexiones se usan cables rígidos o semirrígidos que garanticen un comportamiento frecuencial estable y bajas pérdidas.

Vemos que a estas alturas de la asignatura, empiezan a aparecer cada vez más aspectos interdisciplinarios, de forma que nos hace falta tener conocimientos (o buenos asesores) de Mecánica, de Materiales, de Procesos de fabricación, para poder movernos con seguridad en el terreno de los circuitos prácticos. El siguiente apartado es una nueva manifestación de lo mismo.

### 7.6 TECNOLOGÍA MEMS: MICRO-ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS

Una nueva opción para llevar a cabo funciones electrónicas en frecuencias elevadas es la increíble posibilidad de realizar mecanizados en dimensiones micrométricas. El mecanizado es un proceso estándar en la fabricación de piezas metálicas y plásticas con el que se consiguen realizar todo tipo de perfiles. Las máquinas utilizadas son el taladro, la fresadora y el torno, normalmente en forma de controles numéricos que se programan para, partiendo del material en bruto, fabricar la pieza deseada en sucesivas operaciones.

El sector que más está utilizando los MEMS a nivel de consumo es el de los sensores, entre los que destacan los acelerómetros y los sensores de presión. En la siguiente página web podemos encontrar abundante información. Es de suponer que el costo de los circuitos integrados que incluyen MEMS no puede ser muy elevado dado los sectores para los que se utilizan, incluyendo Juegos, Impresoras, Wireless, etc.

<http://www.st.com/mems/>

Evidentemente al bajar al rango micrométrico las herramientas de fabricación no pueden ser las mismas que en el mecanizado normal, y se pasa a procesos basados en fotolitografía, deposición de capas finas y ataque químico, con lo que “casualmente” estamos hablando del mismo tipo de procesos usados en la fabricación de circuitos integrados.

Pero, ¿cómo casa la tecnología de circuitos integrados con la de los MEMS? Filosóficamente, en ambos casos estamos hablando de miniaturización, con lo que la cosa no parece descabellada. Pero hay una diferencia fundamental: en los MEMS tenemos que esculpir una figura tridimensional y eso, hasta ahora, no lo habíamos visto en los circuitos integrados. La pista puede estar en la posibilidad de manejar diferentes tipos de ataques químicos que interaccionan con zonas del semiconductor dopadas diferentemente, con lo que se pueden llegar a realizar cavidades profundas y huecos en tres dimensiones. Esto es lo que se denomina Bulk Micromachining.

Otra forma sería la deposición de capas finas que formen los dos cuerpos del micro mecanismo: el que actúa libre y el que está sujeto a la estructura. Como paso final se elimina el soporte de los mecanismos para que puedan actuar libremente. Esto se denomina como Surface Micromachining.

### 7.6.1 Aplicaciones MEMS en Microondas y RF

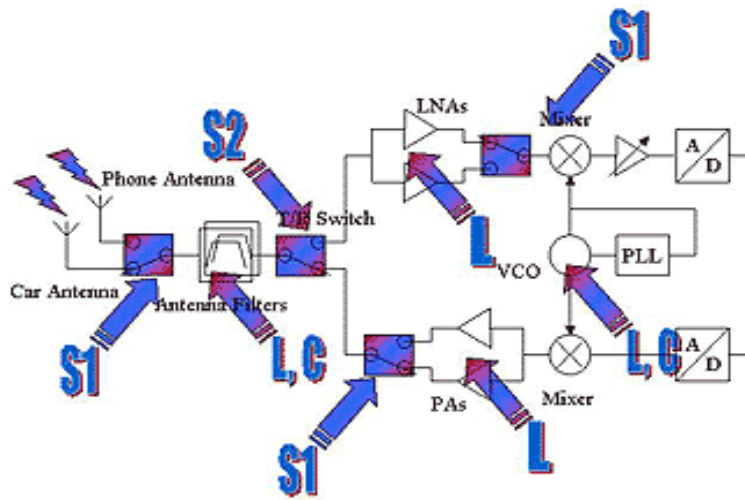
El estado del arte en los MEMS se extiende hacia estas aplicaciones de frecuencias altas, por tanto hablamos de circuitos que se están fabricando como prototipos o primeras series a lo largo del año 2003. Las realizaciones se pueden intuir si pensamos en construir un condensador de placas en el que podamos controlar de alguna forma, ¡la distancia micrométrica entre ellas! Es decir, estaríamos intuyendo un varicap de alta frecuencia con gran aplicación en osciladores variables y filtros ágiles. Quizá el problema estaría en que las vibraciones (entornos móviles) afectarían al valor de capacidad.

Otra aplicación inmediata, y la más desarrollada a día de hoy, sería la que se asocia a su mecánica de actuación: el conmutador. Parece que el componente MEM es un buen candidato para ello. Si construimos un banco de conmutadores podemos hacer osciladores variables de pasos discretos con capacidades y/o bobinas conmutadas.

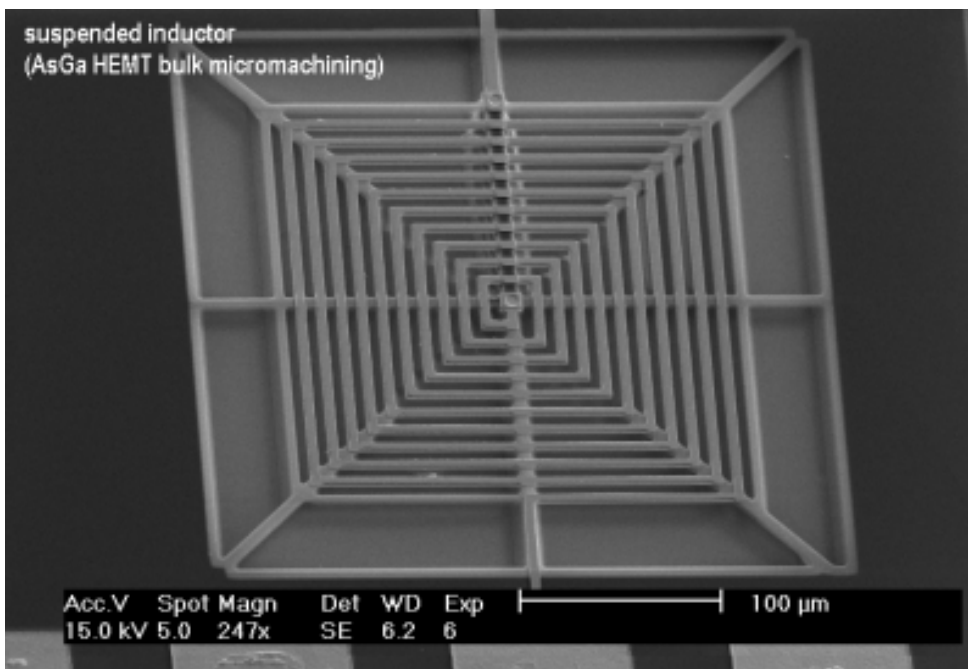
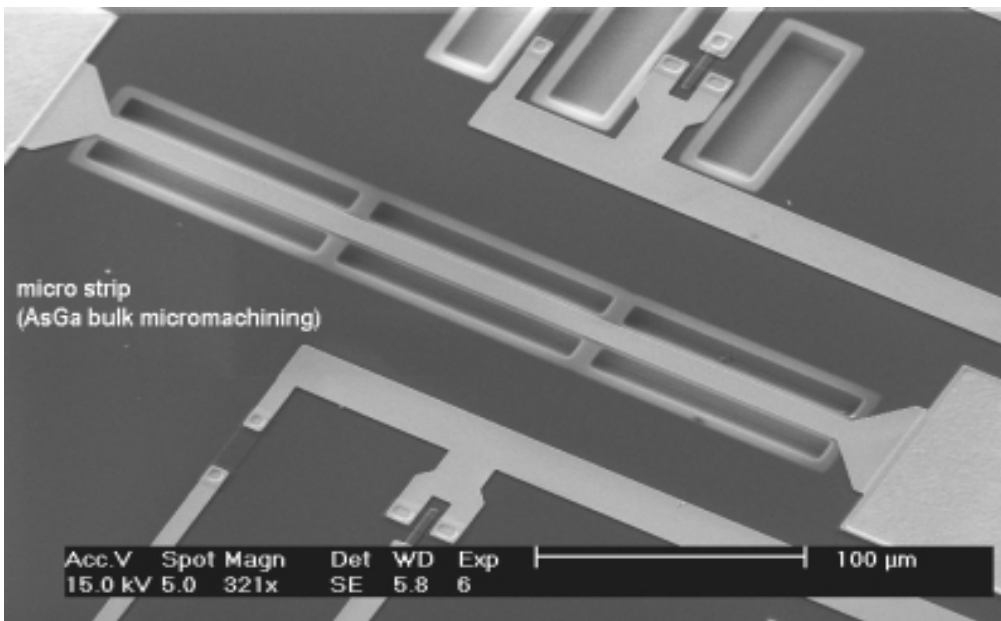
Otra aplicación interesante sería en la mejora de características de los propios componentes integrados. Como ejemplo de estas realizaciones tridimensionales podemos ver en las fotos a continuación, la posibilidad de fabricar elementos suspendidos sobre el sustrato del circuito integrado con lo que mejoramos notablemente la Q de ese elemento y también su rango de utilización en frecuencia.

Además estaría el objetivo final de diseñar y fabricar un front-end completo de comunicaciones inalámbricas sin ningún componente discreto. Como vemos en el diagrama de bloques habría varios bloques en los que participarían los MEMS y teniendo en cuenta el fuerte crecimiento de los sistemas inalámbricos en 2,5 y 5 GHz y su constante abaratamiento, parece que la tendencia de futuro puede ser a utilizar asiduamente estos elementos hoy en desarrollo.

Tenemos citados, condensadores, bobinas y conmutadores.



Fuente: [http://www.techonline.com/community/tech\\_group/analog/feature\\_article/8045](http://www.techonline.com/community/tech_group/analog/feature_article/8045)



Fuente: <http://cmp.imag.fr/products/mems/>

Esta nota técnica corresponde a un prototipo de conmutador MEMS  
<http://www.st.com/mems/>

*Technical Notes of RF switch of SGS-Thomson STM Microelectronics*  
 the moving element in the switch consists of a tiny beam (400 x 50 $\mu$ m) of silicon nitride, clamped at each end. The beam, which includes titanium nitride heating resistors, electrostatic holding electrodes and an aluminum block at each end, is initially separated from the RF signal line that runs underneath it by a 3 $\mu$ m air gap. When a low voltage (2V) is applied to the heating resistors, the different thermal expansions of aluminum and silicon nitride cause the beam to deform ("bimorph effect") until it make mechanical contact with a gold bump on the RF line, closing the switch.

· Once the switch has been turned ON, a voltage is applied to the holding electrodes, producing an electrostatic force that retains the beam in position, allowing the heating current to be turned off. In this way, the new structure combines the benefits of the low voltage power supply and high reliability brought by thermal actuation with the low power consumption of the electrostatic clamping.

· For activation, the switch requires a 20mA current under 2V for around 200 $\mu$ s, resulting in activation energy of 8 $\mu$ J. For the first prototypes, the voltage required to achieve electrostatic hold was 15V and with improved stress control for the beam material this is expected to be reduced to 10V. In terms of reliability, more than 10<sup>9</sup> switching cycles were demonstrated without any failure or contact degradation, while the RF characterizations yielded excellent insertion loss (0.18dB) and isolation (57dB) at the 2GHz frequency of interest in mobile phone applications.

“You fabricate MEMS-based switches with low-loss metallic structures in order to achieve lower insertion losses and higher linearity. The actuation can be electrostatic or electromagnetic. The advantage of an electrostatic actuation is that there is no current consumption. However, the drawback with this approach is the higher actuation voltage (>10V) that is required. The advantages of electromagnetic actuation include a lower actuation voltage. In this case, however, current consumption may be significantly higher. Electro-magnetic actuation also adds slightly more processing complexity, due to the use of magnetic thin films.

*Electrostatic switches offer the most promise as configuration switches (antenna switches or frequency band-selection switches, referred to as S1 in Figure 1), where the key factor is low power consumption. Electromagnetic switches are better candidates for the T/R switch where high switching speed is a key requirement (referred to as S2).”*

Otros ejemplos, ya en fabricación, los podemos ver en las características resumidas a continuación y en la foto con su circuito de prueba.

Strutting onto the market floor as the first 3V-actuated MEMS switch, the DKM812-3 SPDT RF switch manages frequencies up to 6 GHz with a total dc power consumption of less than 3 mW. Maximum input power is 3W with an upper limit for average power of 2W. MEMS technology is said to be responsible for the device's low insertion losses: 0.15 from dc to 1 GHz; 0.25 from 1 to 3 GHz; and 0.3 from 3 to 6 GHz. Maximum VSWRs across the same frequency segments are 1.2:1, 1.3:1, and 1.5:1, respectively. Also across the same bandwidths, minimum isolation figures are, respectively, 30, 25 and 20 dB. Overall linearity is IP3 greater than 65 dBm. The switch resides in 7 x 7 x 1.5 mm JEDEC MO-220 package with the internal switching device in a hermetically sealed CSP. DOW-KEY MICROWAVE, Ventura, CA. (805) 650-0260.



**PRELIMINARY**



**SPDT MEMS DKM812-3 SWITCH 6.0 GHz**

**DESCRIPTION**

The DKM812 is a Single Pole Double-Throw (SPDT) Reflective RF switch that utilizes breakthrough MEMS technology to provide extremely low insertion loss, high linearity, and high isolation in a compact hermetic chip-scale package.

This switch is ideally suited for use in automated test equipment, instrumentation, wireless handsets, wireless LANs, global positioning receivers, broadband wireless access, and other applications where low insertion loss, high linearity, and high isolation are critical. The performance advantages of the DKM812 over GaAs switches enable realization of high-performance multi-mode / multi-band devices.

The DKM812 is specified for operation to 6GHz and is packaged in a compact (7mm x 7mm x 1.5mm) package with an industry-standard footprint (JEDEC MO-220).

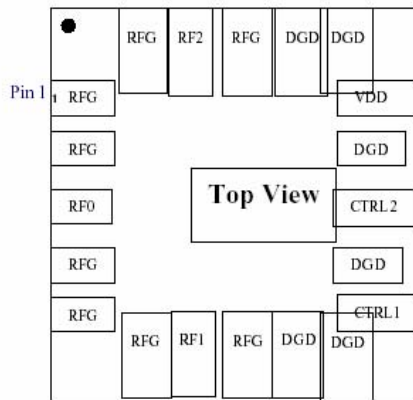
**FEATURES**

- ❖ Small size: 7mm x 7mm x 1.5mm
- ❖ Low-loss:
  - < 0.15 dB @ 1 GHz
  - < 0.30 dB @ 6 GHz
- ❖ High linearity: IP3 > 65 dBm
- ❖ High isolation: 30dB @ 1GHz
- ❖ Low power consumption: 3mW
- ❖ Wide frequency range: DC to 6 GHz

**APPLICATIONS**

- ❖ Automated test
- ❖ Instrumentation
- ❖ Smart Antenna / Antenna diversity
- ❖ Multi-band / multi-mode
- ❖ Cellular / wireless handsets
- ❖ General RF switching

**PACKAGE PIN-OUT**



**PIN DESCRIPTIONS**

Pin Label	Pin Number	Description
RFG	1,2,4,5,6,8,18,20	RF Ground
RF0	3	RF Common
RF1	7	RF In/Out 1
DGD	9,10,12,14,16,17	Digital Ground
CTRL1	11	Control Voltage for RF1
CTRL2	13	Control Voltage for RF2
VDD	15	Supply voltage
RF2	19	RF In/Out 2

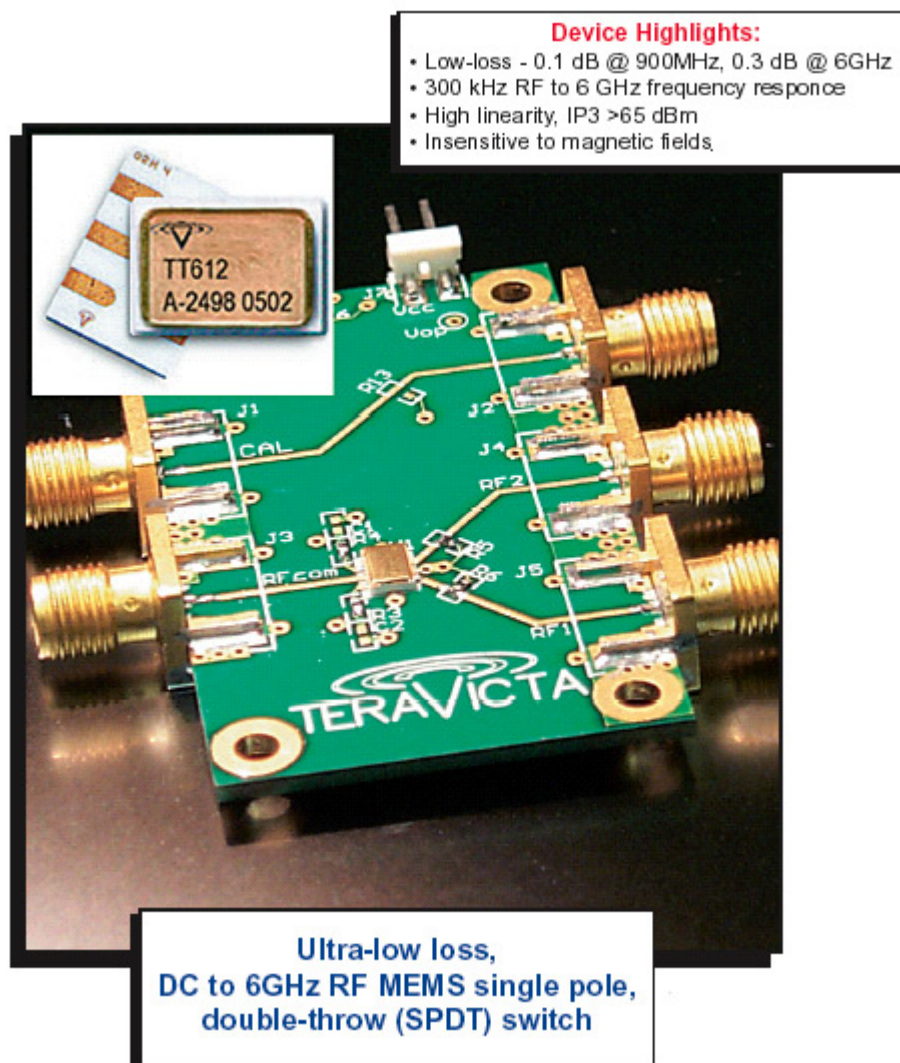
**LOGIC TABLE**

SWITCH STATE	CTRL1	CTRL2
RF0 to RF1	High	Low
RF0 to RF2	Low	High

**ORDERING GUIDE**

Part Number	Operating Temperature Range	Supply & Control Voltage s	Package Description
DKM812-3	-40°C to + 85°	2.7-5.5 V	MO-220

This Information applies to a product under development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice. Dow-Key Microwave assumes no obligation regarding future manufacture unless otherwise agreed to in writing. No responsibility is assumed by Dow-Key Microwave for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Dow-Key Microwave.



Fuente: [www.dowkey.com](http://www.dowkey.com)

Vemos que las características de estos conmutadores son muy buenas y que sus aplicaciones son cada vez más en el rango de electrónica de consumo. De hecho, los fabricantes aseguran que un conmutador en MEMS es más barato que uno de semiconductor en GaAs para las mismas prestaciones.

El caso de los **varicap o capacidades variables en MEMS**, la cosa es algo más compleja puesto que la pieza móvil debe ser capaz de ser controlada de una forma continua y además presenta hoy por hoy, graves problemas a solventar como las altas tensiones continuas necesarias (40 VDC) para generar la variación de capacidad y la alta posibilidad de pull-in del oscilador cuando lo usamos en el circuito tanque de un VCO.

Los mecanismos de accionamiento de la parte móvil pueden ser similares a los conmutadores y también los procesos de fabricación. Si usamos una técnica de cobre grueso depositado sobre aislante de bajas pérdidas podremos fabricar tanto la capacidad variable como la bobina de alta Q con lo que ya tendremos un circuito resonante capaz de trabajar en frecuencias altas de modo ágil. Esto permite la configuración de los sistemas de comunicación para cualquier estándar o frecuencia y explica el gran interés que está despertando esta tecnología de micro-mecanizado.

A continuación podemos ver algunas figuras con el esquema y principio de funcionamiento de una capacidad variable con un actuador térmico.

Abstract

This article describes design and modeling of MEMS-based variable capacitors with rf performance acceptable for microwave and millimeter-wave applications. Appropriately designed thermal actuators are used to move the MEMS capacitor plate vertically to change the air gap between the MEMS plate and the signal line of a coplanar waveguide (CPW). Both series- and shunt-mounted capacitors have been demonstrated. Effect of actuator design on rf performance is investigated by electromagnetic simulation. Experimental results show an air gap change resulting in a capacitance variation with a ratio of 2.7:1. For the shunt-mounted capacitor, the capacitance showed no self-resonance and the equivalent resistance is less than 0.5 Ω in the frequency range up to 40 GHz. The MEMS-based variable capacitors are described with an emphasis on rf design and characterization. In particular, the effects of actuator design on rf performance are discussed in details. © 2001 Published by Elsevier Science B.V.

Keywords: MEMS; Variable capacitor; Microwave; Millimeter-wave

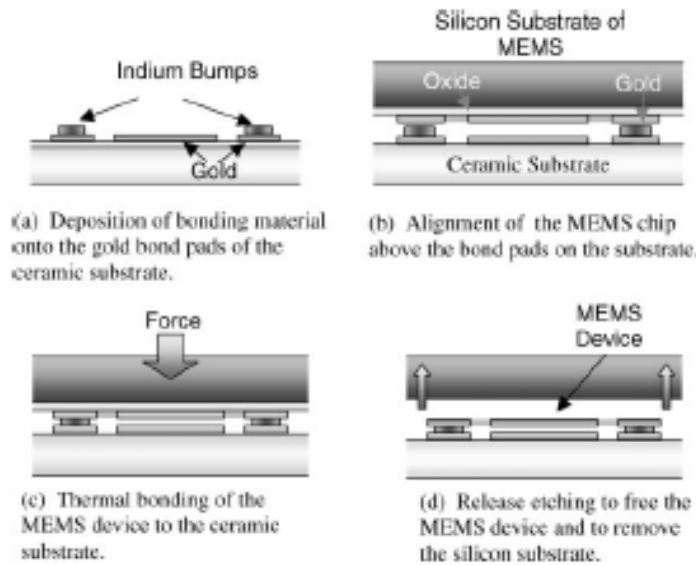


Fig. 2. Various process steps in flip-chip assembly and silicon removal for RF MEMS on Microwave/mm-wave substrates.

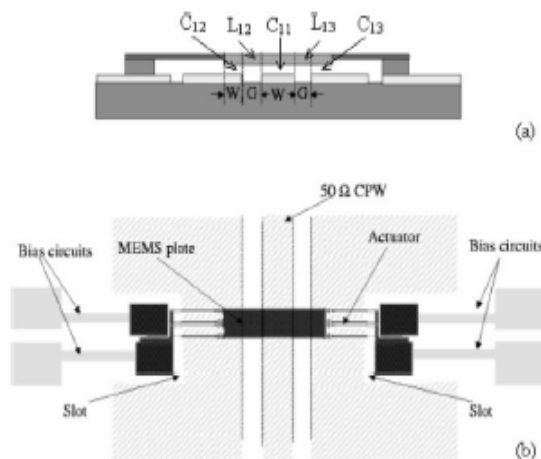


Fig. 13. Simplified structure of MEMS shunt mounted capacitors, (a) longitudinal side view of shunt mounted capacitor, (b) top view of shunt mounted capacitor.

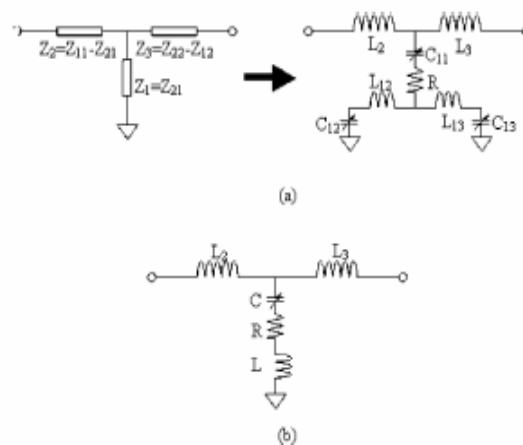


Fig. 15. (a) Lumped-element model of shunt-mounted capacitor and relation between model and Z-parameters without considering actuator effect, and (b) a simplified model of the shunt-mounted capacitor without considering the effect of actuators.

Fuente: MEMS-based series and shunt variable capacitors for microwave and millimeter-wave frequencies. Zhiping Feng, Huantong Zhang, K.C. Gupta, Wenge Zhang, Victor M. Bright, Y.C. Lee. Sensors and Actuators A 91 (2001) 256-265.



## 7.7 BIBLIOGRAFÍA

Microwave Engineering. David M. Pozar. John Wiley & Sons, Inc	[10.1]
<a href="http://www.st.com/mems/">http://www.st.com/mems/</a>	
<a href="http://www.dowkey.com/">http://www.dowkey.com/</a>	
<a href="http://www.wtec.org/loyola/mcc/mems_eu/Pages/Chapter-5.html">http://www.wtec.org/loyola/mcc/mems_eu/Pages/Chapter-5.html</a>	