

CIRCUITOS INTEGRADOS DE MICROONDAS: HIBRIDOS E MONOLÍTICOS - TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO

José Kléber da Cunha Pinto

Laboratório de Microeletrônica da E.P.U.S.P.
Departamento de Engenharia de Eletricidade
C.P. 8174 - CEP.01000 - Telef.211.2122 R/255
São Paulo - SP - Brasil

Inicialmente serão enumerados os vários tipos de circuitos integrados de microondas, em termos de tecnologia e processos de fabricação, serão analisados suas principais vantagens e desvantagens em sua utilização.

Descreveremos as estruturas básicas, modos de propagação, materiais utilizados e etapas mais importantes na construção dos circuitos integrados híbridos em filme fino e monolíticos de microondas.

Finalmente serão citadas algumas aplicações, julgadas importantes para as tecnologias citadas e descritas as atividades do LME-EPUSP no campo dos circuitos integrados híbridos e monolíticos de microondas nos últimos dois anos.

Tecnologia, Filmes Finos, Híbridos

CLASSIFICAÇÃO DOS CIRCUITOS DE MICROONDAS

Refletindo, em parte, a evolução das estruturas planares utilizadas em microondas, e em parte a tecnologia utilizada no processamento dos circuitos, podemos classificá-los em três grandes categorias:

- circuitos impressos em substratos especiais,
- circuitos integrados híbridos (Filme Fino e Espesso),
- circuitos integrados monolíticos de microondas.

Antes de detalharmos as tecnologias empregadas na fabricação dos circuitos integrados de microondas descreveremos as principais características de cada categoria.

Circuitos impressos em substratos especiais

Os circuitos impressos de microondas surgiram por volta de 1956, quando a evolução dos dispositivos de microondas exigiram uma maior integração dos componentes utilizados em altas frequências. Este tipo de circuito pode ser descrito como um circuito impresso obtido a partir de processos fotolitográficos convencionais onde o substrato dielétrico deve atender uma série de requisitos básicos para justificar seu emprego em frequências de microondas, tais como:

- reduzido fator de perdas ($tg\delta$);
- pequenas tolerâncias em sua espessura;
- elevada estabilidade térmica e química;
- elevada uniformidade em sua constante dielétrica;
- Ótimo acabamento superficial dos metais que recobrem as duas faces do substrato, de modo a aumentar a resolução final do circuito.

Atualmente os substratos empregados neste tipo de circuito são flexíveis e cobreados de ambos os lados. Na tabela I estão relacionados alguns substratos disponíveis no mercado internacional, assim como algumas características julgadas importantes.

Após o processo fotolitográfico, os componentes ativos e passivos são soldados no circuito utilizando - se ferros-de-solda praticamente convencionais.

TABELA I

Material	Fabricante	Constante Dielétrica ϵ_r	Fator de Dissipação em 10 GHz	Tolerância na espessura
CUFLON (Teflon)	Polyflon Co.	2,10	$4,5 \times 10^{-4}$	$\pm 10\%$
DUROID Microfita 5880 PTFE	Rogers Co.	2,25	7×10^{-4}	$\pm 3\%$
DI-CLAD Microfibra PTFE	Keene Co.	2,60	8×10^{-4}	$\pm 3\%$
REXOLITE Estireno-Fibra de Vidro	American Co.	2,50	7×10^{-4}	$\pm 10\%$
EPSILAM-10 Teflon-Cerã mica	Rogers Co. 3M	10,0	2×10^{-4}	$\pm 10\%$

Tabela II

SUBSTRATOS	Constante Dielétrica (Intervalo)	Tangente do Ângulo de $(\tan \delta)$	Rugosidade da Superfície (μm)	Condutividade Térmica ($\text{W/cm } ^\circ\text{C}$)
Alumina 96%	9,0a9,5	$\approx 6 \times 10^{-4}$	0,60	0,28
Alumina 99,5%	10	$\approx 1 \times 10^{-4}$ (7GHz)	0,10	0,30
Safira (Cristal)	10,5	$\approx 1 \times 10^{-4}$ (10 GHz)	0,025	0,40
Berília (BeO)	6,5	$\approx 1 \times 10^{-4}$	0,025	2,50
Quartzo (SiO ₂)	3,6a3,8	1×10^{-4}	0,025	0,01
Vidro	5,0a6,0	2×10^{-3}	0,025	0,01
Ferrita	15,0	2×10^{-4}	0,3	0,03

Circuitos Integrados Híbridos

Os circuitos integrados híbridos, por sua vez podem ser considerados como uma evolução dos circuitos impressos, com a diferença básica de que os elementos ativos e passivos, normalmente não encapsulados, são distribuídos ou confeccionados sobre um suporte físico, em geral um material cerâmico de elevada pureza e baixas perdas de R.F. Nestes circuitos, como nos anteriores os componentes podem ser classificados em duas categorias: discretos e distribuídos.

Os elementos discretos do tipo passivo abrangem os condutores, resistores, capacitores e indutores enquanto os elementos distribuídos, nas mais variadas configurações são constituídos de microlinhas de transmissão em fita (Figura 1).

Estes dois tipos de elementos são obtidos por uma combinação de processos que envolvem: metalização à vácuo, eletrodeposição e fotolitografia no processamento pela tecnologia de Filme Fino e serigrafia, secagem e cura no processamento pela Tecnologia de Filme Espesso [1].

Os componentes discretos ativos, do tipo diodos e transistores, são confeccionados à parte, empregando tecnologia Monolítica e utilizando Silício ou Arseneto de Gálio como substrato semiconductor. Os encapsulamentos utilizados nestes dispositivos são especialmente projetados para altas frequências e são fixados ao circuito básico por microsoldagem ou colagem.

Com ênfase na tecnologia de Filme Fino que vem sendo atualmente desenvolvida no LME-EPUSP, descreveremos a seguir os materiais básicos mais utilizados na construção dos circuitos híbridos de microondas.

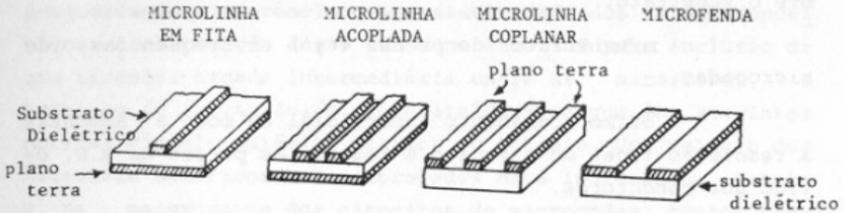
Substratos Dielétricos

Os dielétricos empregados como substratos apresentam-se na forma de lâminas de espessura bem definida, cuja finalidade é a de suporte dos filmes metálicos e meio de propagação das ondas eletromagnéticas. Desta forma devem apresen-

TIPOS DE COMPONENTES EMPREGADOS NOS CIRCUITOS DE MICROONDAS

I - Componentes distribuídos

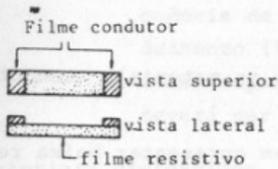
Microlinhas de transmissão



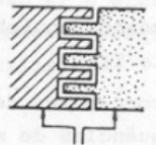
TIPOS DE COMPONENTES EMPREGADOS NO C.I. DE MICROONDAS

II - Componentes concentrados

RESISTORES



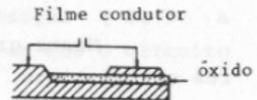
Interdigital



Filme condutor

CAPACITORES

Metal-Óxido-Metal



INDUTORES

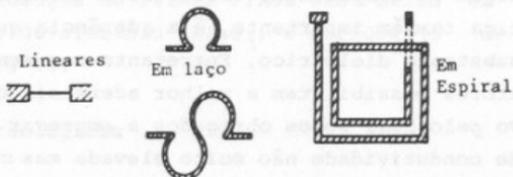


Figura 1 - Tipo de componentes empregados nos circuitos de microondas

tar os requisitos seguintes:

- elevada constante dielétrica, de modo a reduzir as dimensões dos componentes distribuídos confeccionados sobre o substrato.

- reduzido fator de perdas ($\text{tg}\delta$) em frequências de microondas.

- ótimo acabamento superficial de modo a aumentar a resolução final do circuito e reduzir as perdas de R.F. de vido aos condutores.

- boa condutividade térmica

- elevada estabilidade térmica e química.

Os substratos utilizados na tecnologia de filme fino, assim como suas principais características, estão indicados na Tabela II.

Materiais Metálicos

Neste grupo podemos englobar os materiais condutores e resistivos. (Tabela III).

Os materiais condutores devem apresentar baixa resistência ôhmica em frequências de microondas, motivo pelo qual são utilizados materiais de alta condutividade com uma espessura de algumas vezes a profundidade de penetração de modo a reduzir as perdas de R.F. nas estruturas. Além disto, devem ser de fácil remoção por processos químicos e facilitar a soldagem de componentes discretos e terminais. Outra característica também importante, é a aderência que devem ter sobre o substrato dielétrico. Entretanto nem sempre os melhores condutores possibilitam a melhor aderência com o substrato, motivo pelo qual somos obrigados a empregar materiais metálicos de condutividade não muito elevada mas cuja aderência é excelente. Neste caso, os metais ou ligas mais empregadas são: cromo, titânio, níquel-cromo e nitreto de tântalo.

Estes dois últimos podem desempenhar a função de camada de aderência e camada resistiva, por apresentarem boa

estabilidade térmica e baixo coeficiente de variação com a temperatura (TCR).

Entre as camadas, resistiva e condutora, inumeras vezes, há o fenômeno de interdifusão iônica entre os metais, prejudicando a aderência e a resistividade dos filmes depositados. A eliminação deste fenômeno é obtida pela inclusão de uma terceira camada intermediária entre as anteriores, a *barreira de interdifusão*, constituída de algum dos seguintes metais: níquel, paládio, platina ou titânio. Uma relação dos materiais metálicos mais empregados está indicada na Tabela V. Na maior parte dos circuitos de microondas, tanto para elementos concentrados como para elementos distribuídos, preferimos a sequência seguinte (Figura 2)

- Nitreto de tântalo- como filme resistivo numa espessura de 1000 Å para uma resistência pelicular de aproximadamente $50\Omega/\square$
- Ouro - como material condutor, obtido pela sequência de dois processos, deposição por bombardeamento (1.500 Å) e eletrodeposição (de 5 a 10µm) dependendo da frequência em que o circuito deverá ser utilizado.

Materiais Dielétricos

São empregados na confecção de capacitores discretos e nos filmes de proteção, caracterizando-se por possuírem alta rigidez dielétrica, alta constante dielétrica e baixas perdas dielétricas em R.F. Os filmes dielétricos mais empregados na tecnologia de Filmes Finos são: óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e peridóxido de tântalo (Ta_2O_5) Tabela IV.

Processos Tecnológicos

Descreveremos a seguir as principais etapas desenvolvidas no LME - EPUSP para o processamento de um circuito de microondas, pela tecnologia de Filme Fino. (Figura 3).

Tabela III

Material	Resistência Pelicular (ohms/□)	T.C.R. (% C)	Estabilidade	Processo de Obtenção
Cr	10-100	-0,1 a +0,1	baixa	evaporação a vácuo
NiCr	40-400	-0,002 a +0,1	boa	evaporação a vácuo
CrSiO	600-2000	-0,005 a -0,02	regular	evaporação a vácuo
Ti	5-2000	-0,1 a +0,01	excelente	evaporação a vácuo
TaN	4-400	-0,01 a +0,01	excelente	bombardeamento

Tabela IV

Material Dielétrico	Constante Dielétrica Relativa	Rigidez Dielétrica (V/cm)	Processo de Obtenção do Filme Dielétrico
SiO	6 a 8	$4 \cdot 10^5$	Evaporação a Vácuo
SiO ₂	4 a 5	$1 \cdot 10^7$	Deposição química
Al ₂ O ₃	7 a 10	$4 \cdot 10^6$	Anodização ou evaporação
Ta ₂ O ₅	22 a 25	$6 \cdot 10^6$	Deposição por Bombardeamento

Tabela V

Material	Resistividade Relativa ao Cobre	Efeito Pelicular em 2 GHz (μm)	Expansão Térmica	Aderência ao Substrato	Processo de Obtenção do filme condutor
Ag	0,95	1,4	21	pobre	Evaporação a Vácuo ou Bombardeamento
Cu	1,00	1,5	18		
Au	1,36	1,9	15		
Al	1,60	1,9	26		
Cr	7,60	4,0	8,5	boa	Evaporação a Vácuo ou Bombardeamento
Ta	9,10	4,5	6,6		
Ti	27,70	7,8	9,0		
Mo	3,30	2,7	4,6	regular	Bombardeamento
W	3,20	2,8	6,0		
Pt	6,20	3,6	9		Evaporação a Vácuo ou Bombardeamento
Pd	6,20	3,6	11		

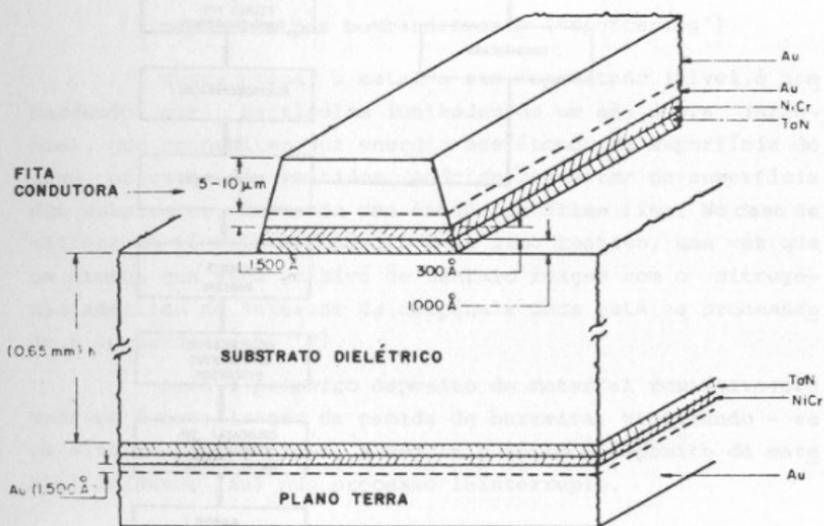


Figura 2 - Representação esquemática da estrutura de uma microlinha de transmissão em fita.

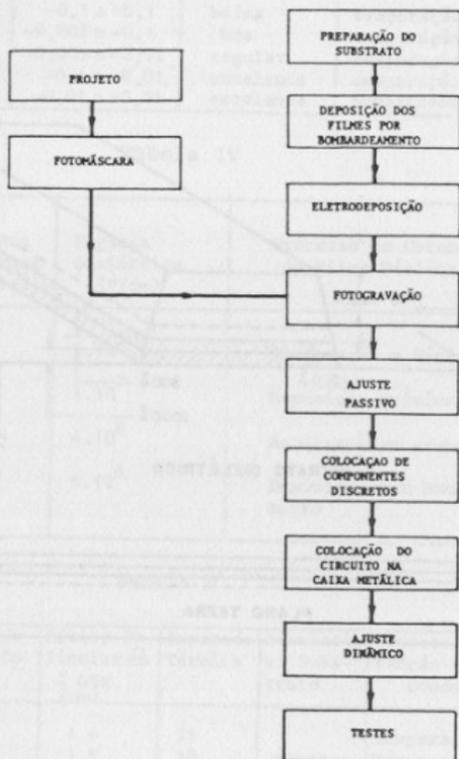


Figura 3 - Etapas de fabricação de um circuito integrado de microondas pela tecnologia de Filme Fino.

Preparação dos substratos

Esta etapa consiste na:

- escolha do substrato dielétrico;
- corte e perfuração, utilizando pontas de diamante ou ultra-som com pó de material abrasivo;
- limpeza da lâmina através de solventes desengraçantes, banhos de água deionizada e freon, seguindo do processo de secagem.

Deposição por bombardeamento ("Sputtering")

Nesta etapa, o metal a ser depositado (alvo), é bombardeado por partículas ionizadas de um gás nobre (Argônio), que transmitem sua energia aos átomos da superfície do alvo, os quais são emitidos, indo se depositar na superfície dos substratos, formando uma camada de filme fino. No caso de nitreto de tântalo o depósito é do tipo reativo, uma vez que os átomos que saem do alvo de tântalo reagem com o nitrogênio admitido no interior da câmara onde está se processando o bombardeamento [2].

Após o primeiro depósito de material resistivo, procede-se à metalização da camada de barreira, utilizando-se um alvo de níquel-cromo, a seguir é feito o depósito do material condutor (Au) num processo ininterrupto.

Eletrodeposição

Na maioria das aplicações, deseja-se obter camadas mais espessas dos filmes condutores, com a finalidade de reduzir as perdas de RF em circuitos de microondas. Utiliza-se, neste caso o processo de eletrodeposição sobre a camada metálica de ouro previamente depositada por bombardeamento. Com esta técnica obtém-se películas condutoras mais espessas, da ordem de 5 vezes a espessura de penetração, evitando-se desperdício de ouro, de elevado custo, que ocorre no processo de metalização à vácuo.

Projeto

Em função das características desejadas para o circuito e dos componentes discretos, que serão utilizados, procede-se ao cálculo do circuito com o auxílio de programas de computação. Como resultado final desta etapa, obtêm-se as coordenadas das máscaras.

Fotomáscara

A partir dos resultados anteriores, confecciona-se, manual ou automaticamente (através de um "plotter"), um desenho ampliado do circuito (20 vezes), sobre um material especial conhecido comercialmente como Rubylith. Esta máscara é depois reduzida por processos fotográficos sobre placas especiais de vidro, de alta resolução e planicidade, obtendo-se a fotomáscara do circuito.

Fotogração

Com o substrato metalizado, normalmente de ambos os lados, e a fotomáscara, passa-se à etapa de fotogração que pode ser subdividida nas seguintes operações:

- limpeza prévia do substrato;
- aplicação de uma película de material fotosensível (fotoresiste), sobre o substrato através de um espalhador especial ("Spinner");
- tratamento térmico do fotoresiste;
- alinhamento da fotomáscara com o substrato, seguido de exposição à luz ultra-violeta, que sensibiliza o fotoresiste nas regiões expostas;

- revelação do fotoresiste, eliminando as regiões que não sofreram ação da luz;
- tratamento térmico do fotoresiste para completa estabilidade e aderência do mesmo;
- aplicação de uma camada protetora de "apiezon" na outra face da lâmina, que atuará como plano terra (caso de microlinhas);
- ataque químico seletivo dos depósitos metálicos não protegidos pelo fotoresiste e "apiezon".

Dependendo da existência no circuito de elementos resistivos ou capacitivos, a etapa de fotogração pode ser repetida inúmeras vezes.

Ajustes

É um processo utilizado na obtenção de elementos passivos com tolerância pré-determinadas. No caso de resistores, emprega-se o processo de oxidação térmica ou anódica, que reduz a área da secção transversal da película resistiva, aumentando lentamente o valor do resistor até o ponto desejado (precisão $\approx 0,1\%$).

Este primeiro ajuste é denominado passivo, enquanto que um outro ajuste, o dinâmico, é realizado com circuito já em funcionamento.

Colocação de componentes discretos

A utilização de componentes discretos, encapsulados ou na forma de "chip", proporciona enorme versatilidade aos CIM, possibilitando a simultaneidade de várias técnicas em um único circuito. Na maioria das vezes, o emprego destes componentes é preferível à fabricação dos mesmos sobre o substrato isolante. É o caso de capacitores, resistores e indutores de elevados valores e pequenas tolerâncias, assim como diodos, transistores bipolares e GaAs-FET, construídos por técnicas monolíticas. Nesta etapa os componentes são montados no circuito fotograçado, e dependendo do tipo de encapsulamento, podem-se empregar os seguintes processos de fixa

xação:

- soldagem por termo-compressão;
- soldagem por ultra-som;
- colagem por epoxi condutor;
- fixação com parafusos, no caso de transistores.

Colocação do circuito na caixa

As funções da caixa metálica são: blindagem, proteção contra choques mecânicos, poeira e umidade, devendo apresentar paralelamente alta capacidade de dissipação térmica. Nas interligações com os elementos externos são empregados conectores especiais do tipo coaxial para RF e do tipo "feed-trough" para alimentação D.C.

Os circuitos são fixados nas caixas metálicas, por meio de parafusos ou por processos especiais de soldagem.

Testes

Caracteriza o desempenho e a confiabilidade do circuito, podendo ser divididos em três fases distintas:

- testes de caracterização dos processos, onde são determinados os principais parâmetros de tecnologia utilizada (reprodutibilidade, homogeneidade de espessura, aderência, resistividade dos depósitos, etc...);
- testes de caracterização dos produtos, quando são analisados os resultados obtidos após cada etapa de fabricação especialmente as fases finais de colocação de componentes discretos.
- testes de confiabilidade, onde os circuitos são submetidos a uma série de ensaios em condições extremas de operação a fim de se prever seu desempenho ao longo do tempo. Englobam os testes de vida acelerados, calor úmido prolongado, choque térmico, vibração, impacto e aceleração.

CIRCUITOS INTEGRADOS MONOLITICOS DE MICROONDAS - CIMM

Após o aparecimento dos transistores de microondas do tipo MES-FET, produzidos a partir do GaAs, aliado a crescente tendência a miniaturização dos circuitos, apareceram por volta de 1980, os Circuitos Integrados Monolíticos de Microondas (CIMM), confeccionados inteiramente sobre um único bloco de substrato semiconductor (tipo-semisolante) de preferência GaAs, por processos de implantação iônica, oxidação, metalização a vácuo, eletrodeposição etc... Para se ter uma idéia da configuração apresentada por este tipo de circuito, ilustramos na Figura 4 o desenho esquemático de amplificador monolítico de microondas com todos os elementos concentrados e distribuídos já incorporados ao circuito além do plano terra inferior que é interligado ao superior através de um furo metalizado no semiconductor.

As etapas de fabricação de um CIMM podem ser resumidas nas seguintes etapas:

- *Fabricação dos componentes ativos (GaAs-FET's)*
- *Definição fotolitografica de todo o circuito passivo.*
- *Metalização a vácuo (deposição por bombardeamento) do circuito passivo, normalmente Ti seguido de Au.*
- *Crescimento eletrolítico de Au (normalmente 2µm)*
- *Confeccção dos capacitores do tipo MOM (metal-óxido-metal)*

COMPARAÇÃO ENTRE VÁRIOS TIPOS DE CIRCUITOS DE MICROONDAS

Para finalizar este trabalho, iremos relacionar as vantagens e desvantagens dos circuitos de microondas processados pelas tecnologias aqui enumeradas.

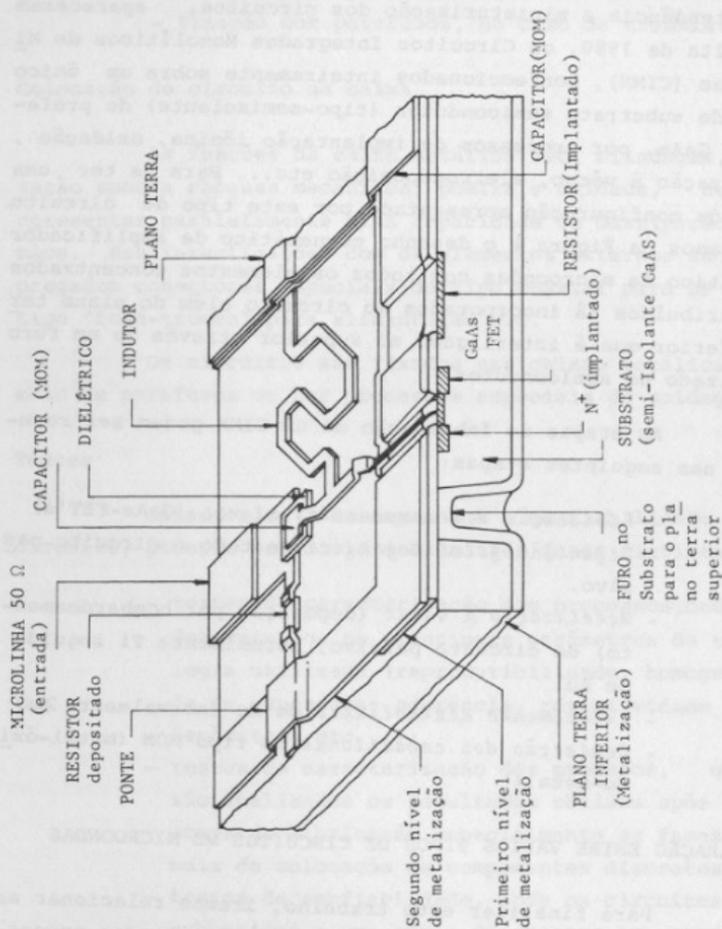


Figura 4 - Desenho esquemático de um amplificador monolítico de microondas construído sobre GaAs.

Circuitos impressos em substratos especiais

Vantagens com relação ao C.I. Híbridos e monolíticos

- Pouco investimento em equipamentos.
- Baixo custo unitário para processamento de poucas unidades.
- Processamento tecnológico muito simples.
- Facilidade de ajuste.
- Facilidade de testes e colocação de componentes na forma miniatura.

Desvantagens

- Resolução não muito elevada (até 100 μ m).
- Circuitos com grandes dimensões.
- Resistores e capacitores devem ser colocados no circuito após sua confecção.
- Dificuldade de colocação de componentes na forma de "chip" ou "beam-lead".

Circuitos Integrados Híbridos

. FILME ESPESSE

Vantagens com relação ao Filme Fino

- Investimento inicial em equipamentos não muito elevado.
- Baixo custo unitário para produção em larga escala.
- Processamento tecnológico mais simples e rápido.
- Ampla gama de valores de resistores devido a utilização de diferentes pastas resistivas em um único circuito.
- Capacidade de dissipação de potência de resistores mais elevada.

Desvantagens

- Impossibilidade de armazenagem das pastas por períodos longos de tempo devido a deteriorização de suas características.
- Resolução e reprodutibilidade inferiores às obtidas em filme fino.
- Coeficiente de variação da resistência com temperatura maiores.

Circuitos Integrados Híbridos

. FILME FINO

Vantagens

- Alta resolução (inferior a $5\mu\text{m}$) e excelente reprodutibilidade (melhor que 5%) dos filmes depositados.
- Facilidade para confecção de circuitos de alta densidade de componentes.
- Menores perdas de R.F., menores níveis de ruído.
- Resistores com menores tolerâncias iniciais.
- Baixos coeficientes de variação de resistência com a temperatura (inferior a $-50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$).

Desvantagens

- Investimento inicial em equipamento elevado.
- Maior complexidade dos processos de fabricação, exigindo pessoal mais especializado.
- Limitação da gama de valores dos resistores, para uma determinada resistência pelicular.
- Resistência com menor capacidade de dissipação térmica.

Circuitos integrados monolíticos de microondas

Vantagens

- Baixo custo.
- Dimensões e peso reduzido (alta compactação).
- Maior confiabilidade e reprodutibilidade.
- Maior flexibilidade circuital.
- Características de banda larga (multi-oitava).

Desvantagens

- Dificuldade no manuseio, ajuste e manutenção.
- Possíveis problemas de acoplamento R.F. entre circuitos.
- Limitações no emprego de dispositivos de elevada potência mas aceita combinação de potência.
- Perdas de R.F. mais elevadas (baixo índice de mérito dos circuitos).
- Relação (circuito ativo/área total) pequena.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - CUNHA PINTO, J.K., MATTEO, A.D., FINARDI, C.A. "Circuitos Integrados Híbridos - Tecnologias de Filme Fino e Filme Espesso". Revista Telebrás, pág. 4-27, dezembro 1982.
- [2] - CUNHA PINTO, J.K., FINARDI, C.A., - "Aplicação da Técnica de Deposição por Bombardeamento para Confecção de Resistores em Filme Fino" - 1º Simpósio de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência - Julho de 1979.