

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CIRCUITOS INTEGRADOS DE MICROONDAS
USANDO METALIZAÇÃO DE COBRE OU
DE CROMO-OURO EM SUBSTRATO DE
ALUMINA

MARCOS REGUEIRA

Orientador - Prof. Dr. ATTÍLIO JOSÉ GIAROLA

Tese de Mestrado apresentada
à Faculdade de Engenharia da
Universidade Estadual de Cam
pinas.

AGOSTO - 1981

R265c

4093/BC

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais Osmar e Wanda

SUMÁRIO

Neste trabalho foram apresentadas duas tecnologias possíveis de serem utilizadas na fabricação de microlinhas de transmissão, para integração de circuitos de microondas. A primeira, de uso mais diversificado, é a de evaporação de Cromo e Ouro, e a segunda é a de deposição química de Cobre, de realização mais fácil e barata. Foram construídos circuitos nas duas tecnologias e comparados os resultados, observando-se valores de atenuação ligeiramente menores para os circuitos de Cobre. Por outro lado os circuitos de Cromo-Ouro apresentaram melhor aderência ao substrato de alumina.

Este trabalho permitiu a verificação de que a deposição química de Cobre abre novos horizontes para a construção de microlinhas de transmissão como alternativa à evaporação de Cromo-Ouro até agora utilizada mas que se caracteriza como sendo de alto custo.

INDICE

CAPÍTULO I -

1.1 - Introdução	1.1
Referências Bibliográficas	1.9

CAPÍTULO II - MICROLINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 - Introdução	2.1
2.2 - Tipos de Microlinhas	2.2
2.3 - Cálculo de Microlinhas de Transmissão	2.7
2.4 - Projeto do Circuito	2.9
2.5 - Construção das Máscaras	2.13
Referências Bibliográficas	2.16

CAPÍTULO III - TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

3.1 - Introdução	3.1
3.2 - Substratos para Circuitos Integrados de Microondas	3.2
3.3 - Substrato utilizado no Trabalho	3.11
3.4 - Materiais utilizados na Evaporação	3.12
3.5 - Materiais utilizados na Deposição Química	3.13
Referências Bibliográficas	3.14

CAPÍTULO VI - EQUIPAMENTOS CONSTRUÍDOS PARA O TRABALHO

6.1 - Introdução	6.1
6.2 - Suporte de lâmina para o Evaporador	6.2
6.3 - Cuba para Banhos Eletrolíticos	6.4
6.4 - Medidor de Aderência de Filmes	6.8
6.5 - Suporte para testes e medidas dos dispositivos	6.11
Referências Bibliográficas	6.14

CAPÍTULO VII - AVALIAÇÃO

7.1 - Introdução	7.1
7.2 - Comparação Resultados Obtidos	7.3
7.3 - Considerações Gerais	7.7
Referências Bibliográficas	7.9

CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

APÊNDICE A

CAPÍTULO I

1.1 - Introdução

O objetivo deste trabalho, é a realização de microlinhas construídas em ouro e em cobre, e a comparação entre os dois métodos envolvidos na construção.

Entende-se como microlinha de transmissão, ao conjunto formado por uma linha condutora e um plano de terra paralelo a ela, separados por uma lâmina de material dielétrico. Este conjunto permite uma grande redução nas dimensões do circuito, pois usualmente os substratos utilizados, tem altos valores de constante dielétrica relativa.

No Brasil a técnica de construção de circuitos integrados para microondas existe desde 1972, quando Pinto [1] defendeu tese sobre um oscilador a diodo túnel, acoplado a uma microlinha de transmissão. Neste trabalho foi utilizada a já consagrada técnica de metalização por evaporação a vácuo de cromo e ouro sobre o substrato dielétrico. No que se refere à técnica de construção propriamente dita, o seu trabalho compreendeu os seguintes passos: limpeza de cerâmica de alta pureza, evaporação a vácuo de filmes de cromo e ouro, eletrodeposição de ouro e fotogração nos filmes depositados.

No âmbito mundial, existem incontáveis trabalhos so

bre o assunto, abrangendo todas as faixas de frequências, com uma gama extensa de utilizações. Wheeler, [2] e [3] apresentou em 1964 e 1965 trabalhos que se tornaram básicos para todos os estudos na área. Seus cálculos basearam-se em linhas com a geometria apresentada na Fig. 1.1.

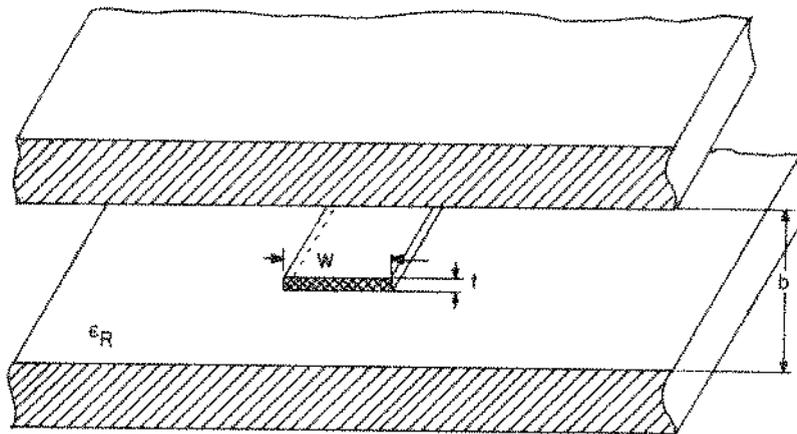


Fig.1.1 - Geometria das linhas estudadas por Wheeler em [2] e [3].

Embora as linhas realizadas neste trabalho tenham a geometria mostrada na Fig.1.2, os resultados dos cálculos de Wheeler podem ser usados, mediante pequenas modificações.

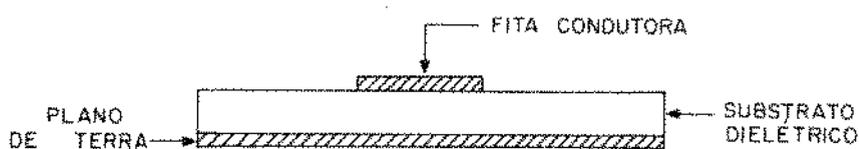
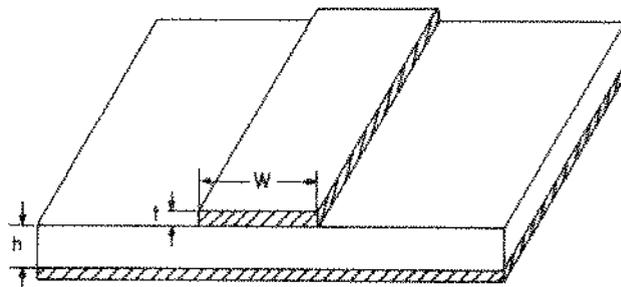


Fig.1.2 - Geometria das linhas construídas neste trabalho.

Antes, em 1952, Assapourian [4] apresentou uma teoria simplificada das microlinhas, que foi o primeiro trabalho publicado sobre o assunto. Há uma grande discordância entre as medidas práticas e os resultados teóricos obtidos a partir deste método, discordâncias estas que não existem nos resultados obtidos a partir dos trabalhos de Wheeler. Este, em 1977, novamente apresentou um trabalho sobre o assunto, agora já trabalhando com linhas do tipo da Fig.1.2.

Com a necessidade, sempre crescente do desenvolvimento de dispositivos de estado sólido nas frequências de microondas, o uso de métodos comuns de construção de circuitos, que envolvem guias de ondas e circuitos coaxiais deixa muito a desejar, pois as dimensões dos componentes são muito menores do que as dimensões do circuito. Descontinuidades podem ser criadas, as quais afetam a qualidade do sistema.

Usando-se microlinhas, as dimensões dos condutores tornam-se da mesma ordem de grandeza que os terminais dos componentes, diminuindo-se bastante as descontinuidades. A resistência a choques mecânicos é também muito maior, aumentando a confiabilidade, e permitindo assim o seu uso em aplicações militares e espaciais, onde necessita-se de grande robustez e insensibilidade às variações da temperatura a que estão sujeitos normalmente estes dispositivos.

Existem diversas técnicas para a construção destas microlinhas. Em baixa frequência, até aproximadamente 1 GHz utiliza-se o método de construção de circuitos impressos fazendo-se uma máscara negativa do circuito, e utilizando-se como substrato, placa de fibra de vidro cobreada nos dois lados. Um servirá para a construção da linha, o outro será o plano de

terra.

À medida em que a frequência aumenta, já não é mais possível o uso deste dielétrico, pois as perdas tornam-se inaceitáveis. Podem ser utilizados então alguns tipos de plásticos, conhecidos pelas suas marcas comerciais, como a "EPSILAM 10" e o "TEFLON". A partir daí, começa a utilização das cerâmicas dielétricas. A mais utilizada para aplicações em Microondas de frequência acima de 3 GHz é a Alumina, uma cerâmica constituída de óxido de Alumínio.

A Alumina existe em diversos graus de pureza, que influem decisivamente no desempenho do circuito, pois as perdas são relacionadas com a concentração de impurezas. Outro fator importante é que embora o tamanho médio dos grãos constituintes seja maior com o aumento da pureza, a rugosidade diminui. Podemos verificar na Fig.1.3 a influência da rugosidade do substrato nas perdas do circuito. Segundo Sobol, [5] devemos ter uma rugosidade média menor do que 5 micro polegadas se quisermos um aumento de 5 por cento nas perdas, devido à rugosidade do substrato, quando trabalhamos na Banda X. Para frequências maiores, as perdas são também crescentes limitando muito os substratos que podem ser utilizados acima de 10 GHz. Nesta frequência, já torna-se uma opção razoável o uso de substratos de safira, que tem menor rugosidade do que a Alumina.

Os circuitos de alta frequência podem ser construídos de dois modos: monolíticos ou híbridos. Nos circuitos monolíticos os dispositivos ativos são crescidos no próprio substrato dielétrico e os passivos são depositados nele ou também crescidos. Nos circuitos híbridos os dispositivos ativos são depositados no substrato que já contém os dispositivos passivos. A vantagem dos circuitos monolíticos está na grande densidade de componentes que esta técnica permite. Como nos circuitos de Microondas são muito raras as aplicações onde isto se exige, a grande maioria dos circuitos é do tipo híbrido construído sobre substrato de alumina.

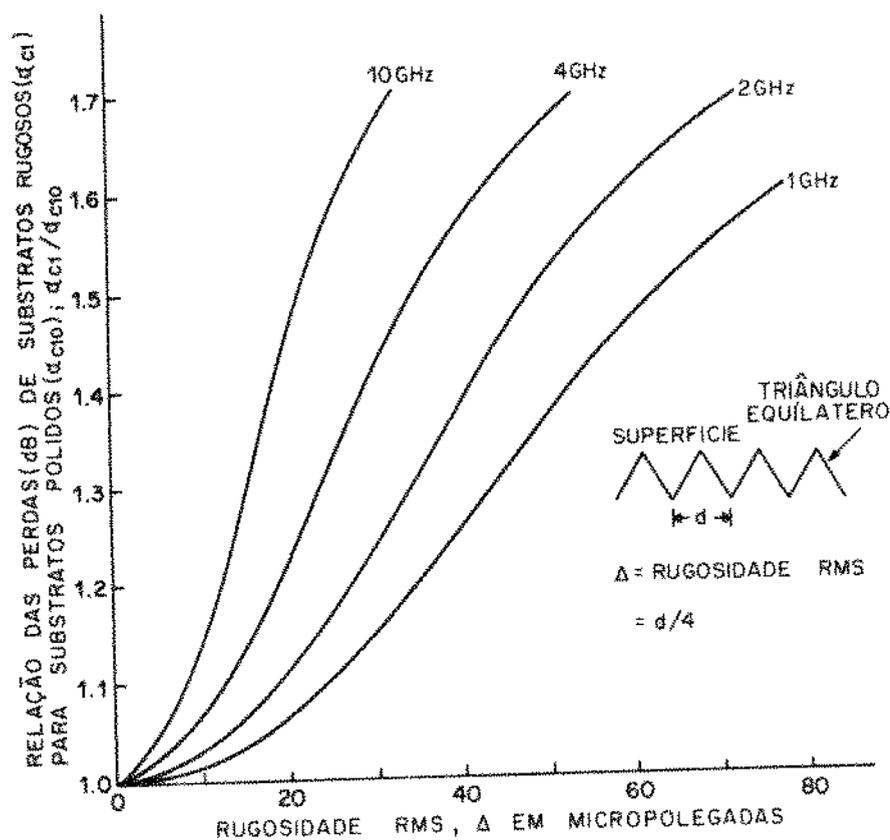


Fig.1.3 - Relação entre as perdas de microlinhas construídas sobre substrato rugoso e substrato polido em função da rugosidade.

A tecnologia híbrida permite o uso de muitas variedades de dispositivos, e elimina muitas das dificuldades da tecnologia monolítica. A faixa de utilização dos circuitos híbridos vai de 1 a 30 GHz.

Existem dois métodos de construção dos circuitos híbridos: o método de filme fino e o de filme espesso. Estes nomes não nos indicam muito, pois como veremos nos capítulos seguintes a espessura das linhas estará sempre dentro da faixa 3 a 5 vezes a profundidade de penetração pelicular para a frequência de utilização do circuito.

Os circuitos de filme espesso são construídos com pastas que contêm partículas de metal, usualmente prata e ouro que as tornam condutoras. Estas pastas quando aplicadas com a técnica "Silk-Screen" ou aplicadas em toda a superfície e depois

decapadas quimicamente nos locais desejados, vão formar os condutores do circuito desejado. Os problemas maiores dos circuitos construídos em filme espesso são: a pasta não adere bem em substratos polidos, pois a sua aderência deve-se principalmente a agentes físicos. Com isto, temos que utilizar substratos mais rugosos, o que acarreta um drástico aumento das perdas conforme vimos na Fig.1.3.

A resolução das bordas do circuito não é boa, principalmente quando construídos com "Silk-Screen" que é o mais utilizado devido ao seu baixo custo e facilidade de construção. Isto, acarreta perdas por irradiação das linhas. Este problema é diminuído fazendo-se a decapagem quimicamente. Portanto, este método apresenta uma séria limitação em frequência quando exigimos baixas perdas.

O outro método de construção de circuitos híbridos, é o de filme fino. Sobre um substrato qualquer, depositamos por evaporação térmica, evaporação por canhão eletrônico ou deposição por "Sputtering", uma fina camada de metal, geralmente ouro. A espessura final desejada é obtida por eletrodeposição de ouro sobre esta camada prévia. Aqui nos deparamos com o principal inconveniente deste método, que é o custo. Uma característica comum aos processos de deposição acima citados é o desperdício da matéria prima envolvida, no caso o ouro.

Como o material depositante evapora em todas as direções precisaríamos colocar substratos, em toda a volta da fonte para recolhermos o máximo possível do material. Esta colocação acarreta outros problemas secundários como tempo e dificuldades de posicionamento. Como a aderência dos filmes depositados por este método deve-se além da ligação física a uma ligação química também, podemos utilizar substratos polidos sem problemas maiores. A qualidade da superfície do metal depende fundamentalmente do substrato.

Portanto quando trabalhamos com substratos de baixa rugosidade, poderemos ter boa definição de linhas, principalmente se o foto resiste utilizado na decapagem for especial para

microeletrônica. Isto permite frequências de trabalho dos circuitos numa faixa extremamente grande, alcançando para os circuitos comerciais 50 GHz, num futuro bem próximo.

No método alternativo que é estudado neste trabalho, a deposição química de cobre reúne todas as vantagens do acima exposto com a eliminação do seu maior problema que é o custo. A aderência dos filmes é menor, porém não chega a constituir problema sério, pois permanece num valor satisfatório para a aplicação. Outra vantagem é a eliminação completa de maquinário especializado, ou caro. Tudo o que é necessário a este método é barato e de fácil aquisição.

Para que pudéssemos demonstrar praticamente os problemas e vantagens inerentes a cada método, foi realizado com auxílio de computador o projeto de um filtro rejeita faixa com a frequência central de 10 GHz. Esta fase envolveu os procedimentos de cálculos das larguras das fitas para as impedâncias desejadas, cálculos do comprimento da onda deslocando-se nas linhas de largura calculada anteriormente, a constante dielétrica relativa afetiva para cada caso, e a velocidade de fase da onda, também em cada caso. A seguir foi construída a máscara em "RubyLit" do dispositivo em tamanho dez vezes maior. Foi efetuada a foto redução e construção da máscara em uma lâmina "High Resolution Plate".

O mesmo dispositivo foi construído em filmes diferentes: um foi obtido por evaporação por canhão eletrônico de ouro, e o outro por deposição química de cobre. Em ambos os casos o substrato foi o mesmo. Alumina tipo 772 da American Lava Corporation com 99,5% de Al_2O_3 .

As medidas foram efetuadas no intervalo de 9 GHz a 11 GHz com o "Sweep Oscillator" e "Sweep Amplitude Analyzer" ambos fabricados pela Hewlett - Packard. Estas medidas revelaram ligeira vantagem para o dispositivo construído com filme de cobre. Os resultados destas medidas são apresentados no capítulo 7.

O método de deposição química de cobre embora tenha sido estudado há bastante tempo por, Schneble, [6] que patenteou um método em que são utilizadas soluções bem parecidas com as que foram utilizadas neste trabalho, somente despertou o interesse de pesquisadores da área de microondas a poucos anos atrás com o trabalho de Mahapatra, [7] que relatou bons resultados do método em um trabalho comparativo com linhas em ouro.

Sard, [8] em 1970 num trabalho bastante profundo sobre os aspectos físicos-químicos da deposição, investigou com microscópio eletrônico a deposição de cobre a partir de soluções quase iguais às usadas aqui, apenas com alguma variação na concentração dos compostos. As perdas das linhas de cobre, chegaram a ser 35% menores das que as das linhas de ouro. A razão principal disto, parece residir na melhor condutividade que o cobre apresenta em relação ao ouro. Esta redução das perdas é importante na medida que permite a realização de circuitos mais complexos e/ou em aplicações que envolvem altas potências de microondas.

Nos próximos capítulos, abordaremos detalhadamente os métodos aqui comentados, seus problemas, vantagens, seu potencial de utilização em microondas da Banda X e o que pode ser feito para minimizar os problemas. Também serão comentadas as possibilidades presente e futuras de cada um dos métodos, verificando-se o que melhor se adapta às nossas possibilidades e necessidades.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - Pinto, J.K.C.; " *Oscilador a diodo túnel, acoplado a micro-linha de transmissão*".
Tese de doutoramento Escola Politécnica U.S.P. 1972.
- [2] - Wheeler, H.A.; " *Transmission-line properties of Parallel Wide Strips by a Conformal Mapping approximation*".
IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,
Vol MTT - 12, p.280, Maio 1964.
- [3] - Wheeler, H.A.; " *Transmission-line properties of parallel Strips Separated by a dielectric Sheet*".
IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques,
Vol MTT- 13, p.172, Março 1965.
- [4] - Assadourian, F.; " *Simplified Theory of Microstrip Transmission Systems*".
Proc. IRE, Vol 40, p.1651, Dezembro 1952.
- [5] - Sobol, H.; " *Applications of Integrated Circuit Technology to Microwave Frequencies*".
Proceedings of the IEEE, Vol.59, nº 8, Agosto 1971.
- [6] - Schngble, F.W.; " *Electroless Plating of Copper*".
U.S. Patent nº 3.033.703 de 08/05/1962.
- [7] - Mahapatra, S.; e Prasad, S.N.; " *A new electroless method for low-loss Microwave Integrated Circuits*".
IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol CHMT - 1, nº 4, Dezembro 1978.
- [8] - Sard, R.; " *The Nucleation, Growth, and Structure of electroless copper deposits*". Journal of the Electrochemical Society,
Vol 117, nº 7, Julho 1970.

CAPÍTULO II - MICROLINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 - Introdução

Este trabalho visa a construção de microlinhas, linhas de transmissão constituídas de camadas metálicas depositadas em um substrato dielétrico, com possibilidade de uso em circuitos integrados híbridos para microondas e ondas milimétricas de sistemas de estado sólido de rádio transmissão. Suas principais vantagens são: sua simplicidade e a realização de estruturas planas. O projeto de circuitos integrados com microlinhas requer o uso de métodos computacionais para o cálculo da impedância, da atenuação, do comprimento da onda guiada e do Q da linha não carregada. Estes parâmetros podem ser calculados a partir da constante dielétrica efetiva e da impedância característica da linha no ar correspondente. Os parâmetros do projeto da linha são dados por um programa para computador desenvolvido no Laboratório de Eletrônica e Dispositivos por Saviani [1] e que usa relações desenvolvidas por A.J. Giarola [2].

Após termos todos os parâmetros da linha calculados, inicia-se a construção da máscara em "RUBYLIT" a qual depois será fotografada e reduzida para a realização da máscara numa "High Resolution Plate" (HRP). Teremos então a máscara pronta para o seu uso no processo de construção da microlinha.

2.2 - Tipos de Microlinhas

Existem diversos tipos de microlinhas, dependendo da sua forma e do modo de obtenção das linhas. Apesar desta diversidade de tipos, todas elas apresentam as seguintes características:

a) a forma completa do condutor pode ser depositada e processada em um único substrato dielétrico, o qual tem um único plano de terra.

b) Dispositivos passivos ou ativos que tenham terminais de ligação do tipo de fio ou de lâminas podem ser soldados diretamente aos condutores sobre o substrato dielétrico.

c) Os dispositivos e componentes incorporados em circuitos integrados híbridos são acessíveis para medições.

Segundo Schneider [3] existem oito (8) tipos básicos de microlinhas de transmissão: microlinha comum, microlinha imersa no substrato, microlinha comum com proteção, microlinha comum com furo no substrato, microlinha comum invertida, microlinha suspensa, microlinha blindada e microlinha de ranhura. A figura 1 mostra todos estes tipos.

A configuração que iremos utilizar neste trabalho será a microlinha comum. Esta microlinha é constituída por uma linha de dois condutores onde, pelo menos, um é uma linha plana de pequena espessura em relação ao substrato. Para mais estabilidade mecânica, a linha é depositada em um substrato dielétrico, o qual normalmente suporta também um plano de terra. Esta é a configuração da Figura 1 a. Porém, uma linha de dois condutores paralelos deste tipo pode necessitar algumas modificações devido ao que segue:

a) Uma blindagem de rádio frequência pode ser necessária para eliminar perdas por radiação. As dimensões desta blindagem e a condutividade do material da blindagem devem ser escolhidas de modo tal que a excitação dos modos elétricos transversos, modos magnéticos transversos e as ressonâncias na caixa se

jam anuladas.

b) A proximidade da interface ar-dielétrico pode levar à excitação de ondas superficiais. Este problema pode ser resolvido escolhendo-se o substrato com baixa constante dielétrica relativa, ou escolhendo um produto frequência-espessura da linha suficientemente pequeno. Isto também pode ser resolvido removendo-se a interface ar-dielétrico para uma região distante, como na microlinha da figura 1 b.

c) Pode ser necessária uma passivação da superfície para proteger-se o substrato de contaminantes atmosféricos se este for um semiconductor. É o caso da figura 1 c.

d) Dispositivos de estado sólido como diodos IMPATT, GUNN e LSA podem exigir sua ligação em paralelo na microlinha. Isto é obtido com um furo no substrato conforme a figura 1 d. Isto permite a ligação do dispositivo entre os dois condutores da microlinha.

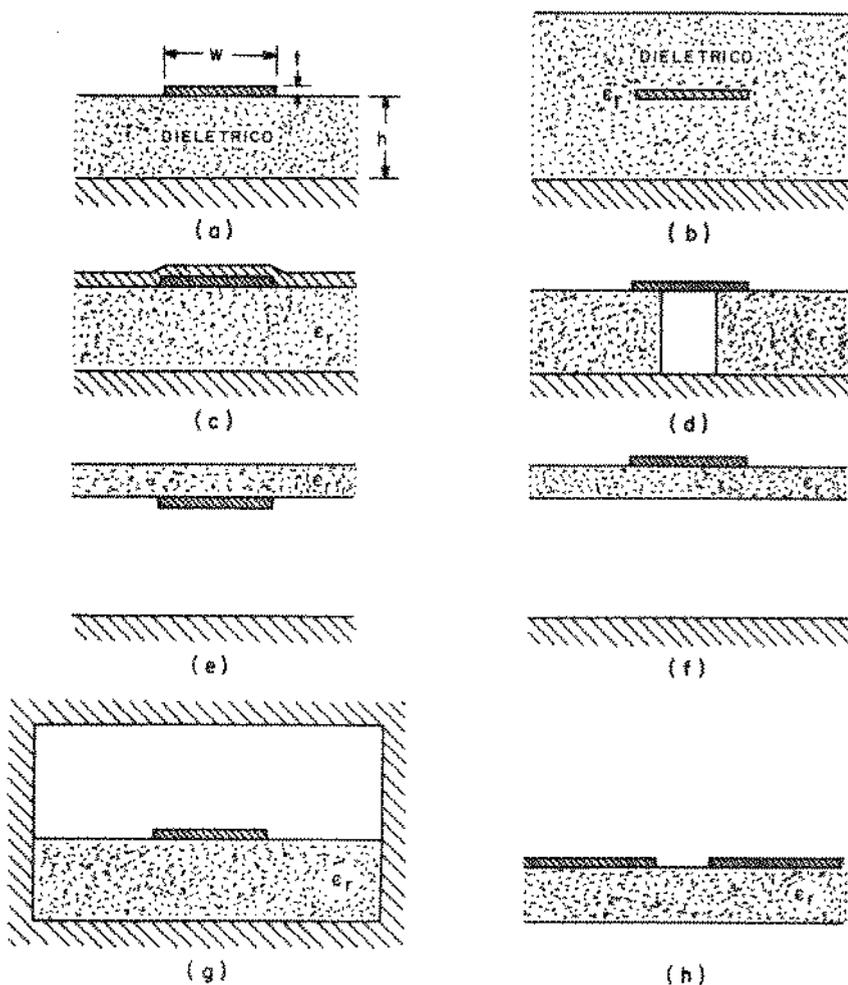


Fig 1 - Tipos básicos de Microlinhas: a) comum, b) imersa no substrato, c) com proteção, d) com furo no substrato, e) invertida, f) suspensa, g) blindada, h) de ranhura segundo Schneider [3].

Pinto, em seu trabalho Oscilador a Diodo tunel acoplado a uma microlinha de transmissão [4] diz que as microlinhas de transmissão podem ser consideradas como resultado de evolução de uma linha coaxial que sofreu um achatamento de seus condutores tendo em seguida um dos planos de terra se afastado para o infinito e após isto foi colocado um substrato dielétrico entre o condutor e o plano de terra.

A figura 2 mostra esta evolução.

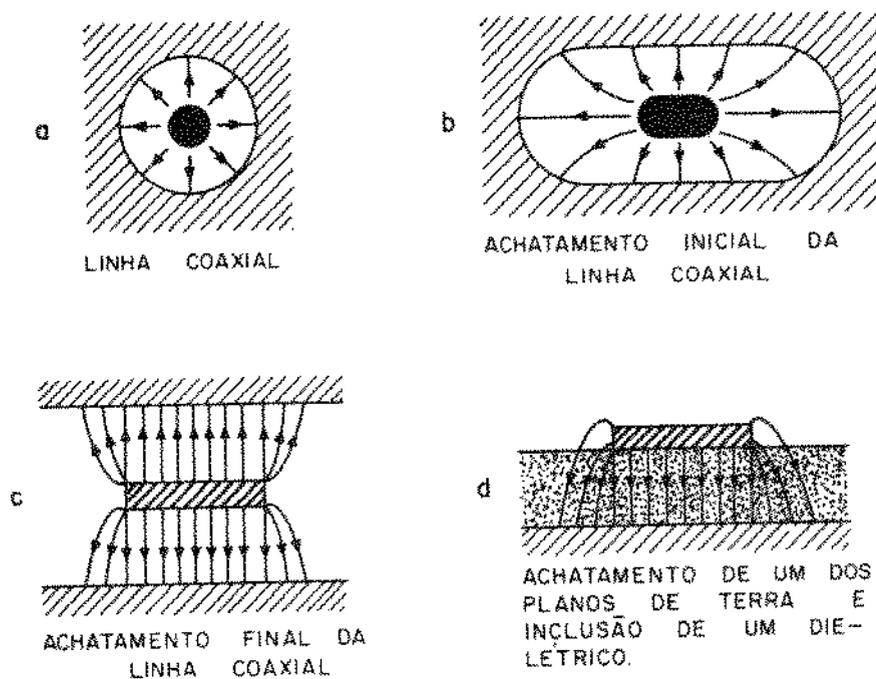


Fig. 2 - Evolução de uma linha coaxial até a transformação em uma microlinha de transmissão segundo Pinto [4]

Pinto [4] cita também outra vantagem das microlinhas: todos os elementos condutores, mesmo com impedâncias diferentes, podem ser construídos em um único substrato dielétrico.

Para o projeto de microlinhas, do tipo da figura 1a são necessários os seguintes parâmetros: impedância, atenuação, Q sem carga, comprimento de onda e constante de propagação. Este projeto é efetuado considerando que:

a) O modo de propagação pode ser considerado como o modo eletromagnético transverso.

b) As perdas nos condutores são consideradas predominantes, podendo ser desprezadas as perdas no dielétrico.

c) A permeabilidade magnética relativa do substrato é $\mu_r=1$.

Na figura 3 é mostrada a secção transversal de uma linha hipotética para auxiliar o estudo da microlinha comum, cuja secção transversal é mostrada na figura 4. Uma constante dielétrica efetiva para levar em consideração a não-homogeneidade dielétrica da linha comum é normalmente calculada por métodos computacionais.

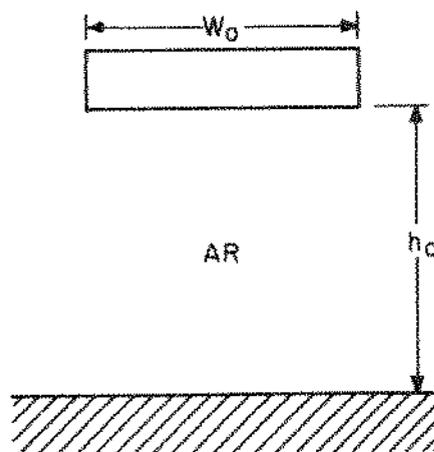


Fig.3 - Linha hipotética para auxiliar o estudo da microlinha comum.

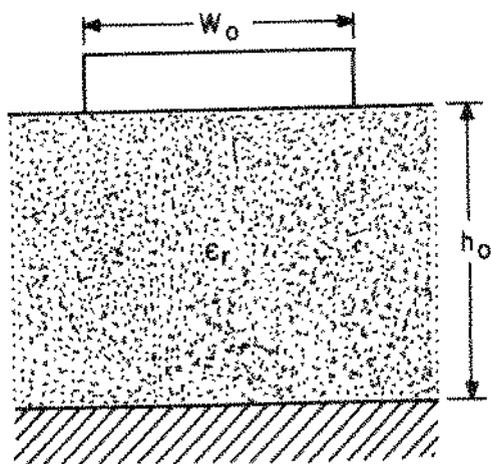


Fig.4 - Microlinha Comum.

2.3 - Cálculo de Microlinhas de Transmissão

O modelamento de microlinhas de transmissão é dificultado pela existência da transição ar-substrato. Esta transição acarreta as seguintes dificuldades:

- A propagação não se processa mais pelo modo TEM.
- O modelamento matemático é mais complexo, exigindo métodos computacionais para a sua obtenção.

Existem diversos trabalhos na parte de projeto e análise de microlinhas e estes baseiam-se basicamente nos seguintes métodos, segundo Saviani [1]: Mapeamento conforme, Técnicas Variacionais, Técnicas generalizadas de Wiener-Hoff, Equação integral, Análise de Fourier, Diferenças finitas, Casamento de modos, Função de Green, Momento, Modelo híbrido e ajustamento de curvas.

Giarola [2] desenvolveu o método que permite a obtenção de relações empíricas para a impedância de microlinhas. Estas relações foram utilizadas por Saviani [1] em seu programa "MICROLINHA-ANALISE E SÍNTESE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM MICROFITAS ACOPLADAS OU SIMPLES USANDO AS RELAÇÕES DE A.J. GIAROLA". Este programa está disponível no computador PDP-10 do CCUEC da UNICAMP na área 3010,3205 com a denominação MICLIN.

Eis as instruções dadas por Saviani para a utilização do "Microlinha".

" Durante uma execução, diversas microfitas podem ser calculadas, bastando para isto especificar o código adequado. Para linhas acopladas, uma única execução é necessária para analisar o modo par e ímpar de propagação.

Entrada: ID, Er, A, B no formato (A3, 3G)

ID... "SLS" para síntese de linha simples

"SLA" para síntese de linha acoplada

"ALS" para a análise de linha simples

"ALA" para a análise de linha acoplada
"FIM" para finalizar a execução

Er...permissividade elétrica relativa do
substrato

A... W/H para análise de microfita

Zo_e para a síntese

B... s/h para a análise e

Zo_o para a síntese

Saída: Os valores da permissividade elétrica efetiva e da velocidade de fase, bem como da impedância característica no caso da análise e das dimensões W/h e s/h para o caso da síntese .

A listagem dos resultados obtidos no programa " MICROLINHA" encontra-se reproduzida no apêndice A.

2.4 - Projeto do Circuito

Para a verificação prática das vantagens de cada método foi decidida a construção de um circuito nas duas tecnologias. A escolha deste circuito foi feita baseada nos seguintes fatores: facilidade de projeto e construção, e possibilidade de comparação com dados confiáveis. Em função disso foi decidida a construção de um filtro rejeita faixa para frequência intermediária ou também chamado filtro de polarização, cujas características acham-se representadas no livro Stripline Circuit Design de Harlan Howe JR [5]. A representação do filtro acha-se na figura 5 e na figura 6 mostramos a representação deste filtro construído sobre uma alumina de 25,4 X 25,4 mm.

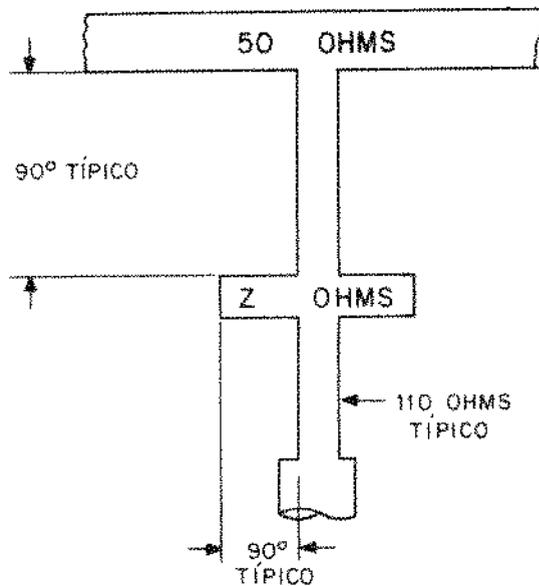


Fig.5 - Filtro Rejeita faixa construído para comparação entre os métodos de construção.

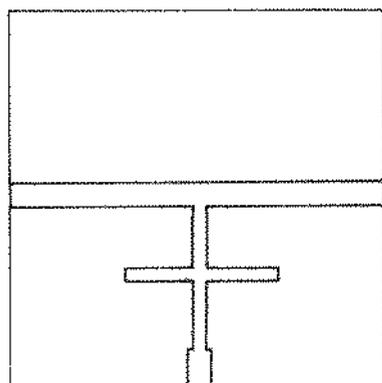


Fig.6 - Filtro rejeita faixa construído sobre a alumina de 25,4 X 25,4 mm.

As características publicadas por Howe para este filtro acham-se representadas na figura 7.

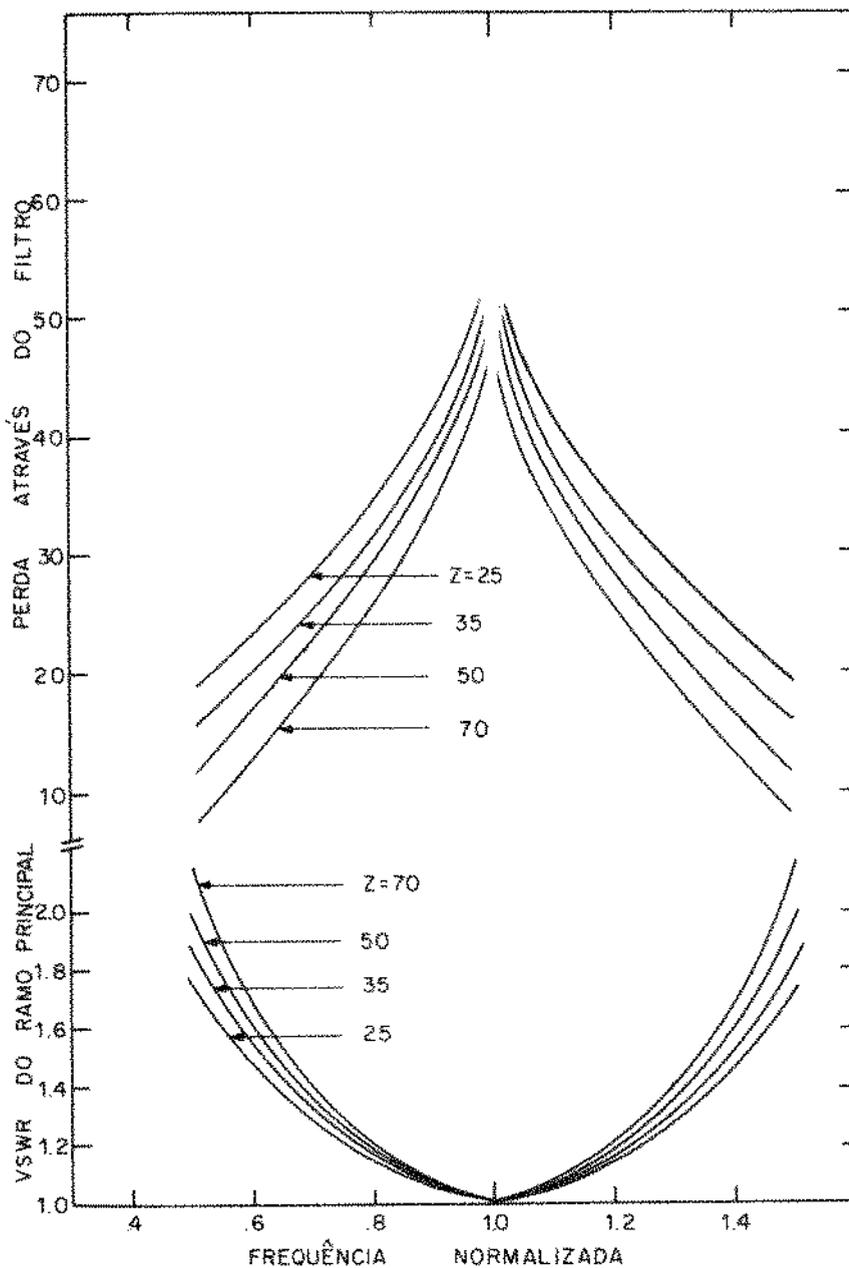


Fig. 7 - Características do filtro rejeita faixa de um elemento paralelo (Segundo Howe [5].)

Como podemos observar na figura 7, as características deste filtro, com um elemento paralelo, não representam alguma coisa especial, porém, como falamos acima, o nosso objetivo é comparar os resultados obtidos com os filtros construídos com as duas tecnologias entre si e com estes resultados teóricos pu

blicados.

Para a impedância do toco foi escolhido o valor de 70Ω o qual permite um maior Q do circuito. As dimensões deste filtro foram calculadas pelo programa computacional de Saviani [1] e foram os seguintes os valores obtidos no projeto, considerando como substrato a alumina tipo 772 da Alumina Lava Corporation, que tem a constante dielétrica relativa igual a 9,8 para a frequência de 10GHz:

Impedância da Linha = 50Ω

$$\epsilon_R \text{ eff} = 6,70630$$

$$\text{Velocidade} = 1,14117 \cdot 10^{11} \text{ mm/s}$$

$$W/H = 1,51927$$

Impedância da Linha = 70Ω

$$\epsilon_R \text{ eff} = 6,39114$$

$$\text{Velocidade} = 1,18585 \cdot 10^{11} \text{ mm/s}$$

$$W/H = 0,44519$$

Impedância da Linha = 110Ω

$$\epsilon_R \text{ eff} = 6,07573$$

$$\text{Velocidade} = 1,21624 \cdot 10^{11} \text{ mm/s}$$

$$W/H = 0,10360$$

portanto, temos os seguintes valores de $\lambda/4$:

$$\text{para } 50\Omega \quad \lambda/4 = 2,852925 \text{ mm}$$

$$70\Omega \quad \lambda/4 = 2,964625 \text{ mm}$$

$$110\Omega \quad \lambda/4 = 3,040600 \text{ mm}$$

Considerando a espessura do substrato como 0,625 mm temos os seguintes valores de W:

para 50Ω $W = 0,94954$
70 Ω $W = 0,27824$
110 Ω $W = 0,06475$

Na figura 8 temos a representações do filtro conforme calculado acima

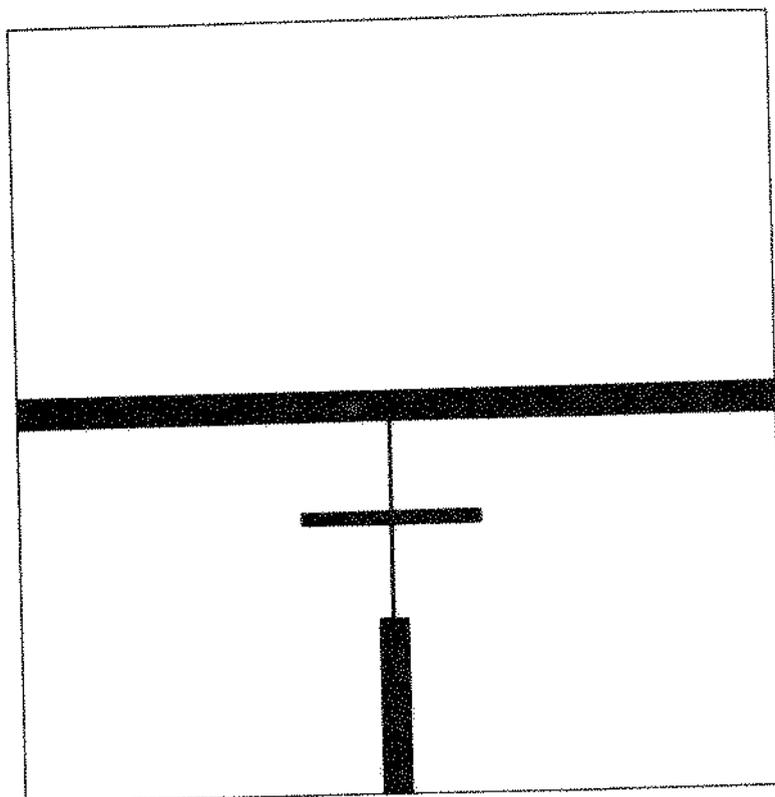


Fig.8 - Representação do filtro rejeita - faixa em escala 4: 1.

2.5 - Construção das Máscaras

Para a realização da polimerização é utilizada uma máscara feita em uma lâmina de vidro altamente polida e que é disponível já foto sensível. Esta máscara é do tamanho natural do dispositivo a ser construído, e, como as dimensões normalmente envolvidas na construção destes dispositivos na faixa de frequência deste trabalho, 10 GHz, e em substratos de Alumina, $\epsilon_r=10$, são bastante pequenas, a máscara original, deve ser feita algumas vezes maior do que o tamanho natural do dispositivo a ser construído. A seguir faz-se a foto-redução desta máscara até chegarmos ao tamanho desejado. O mesmo procedimento é feito para a máscara do plano de terra no caso da construção em cobre.

A partir dos valores de W e de $\lambda/4$ para as três impedâncias utilizadas no filtro foi feito o seu projeto físico. Para a máscara em Rubylit foi escolhida uma ampliação de 10 vezes. Para o coordenatógrafo do LED, no caso um aparelho marca Koradi modelo KDF-D com sistema de posicionamento com controle digital, as distâncias devem ser dadas em termos de pulsos para os motores passo a passo. Com as reduções mecânicas utilizadas nos mecanismos, temos que para um deslocamento de 1 mm necessitamos de 1000 passos. Portanto temos as seguintes quantidades de passos equivalentes às dimensões W e $\lambda/4$.

	W	$\lambda/4$
50	950	2853
70	278	2965
110	65	3040

Deve-se prover a máscara de marcas de alinhamento para o seu correto posicionamento em relação à lâmina de alumina. Foram feitas quatro marcas para posicionarem os vértices da lâmina. A máscara projetada está representada na figura 9 na escala 4 X.

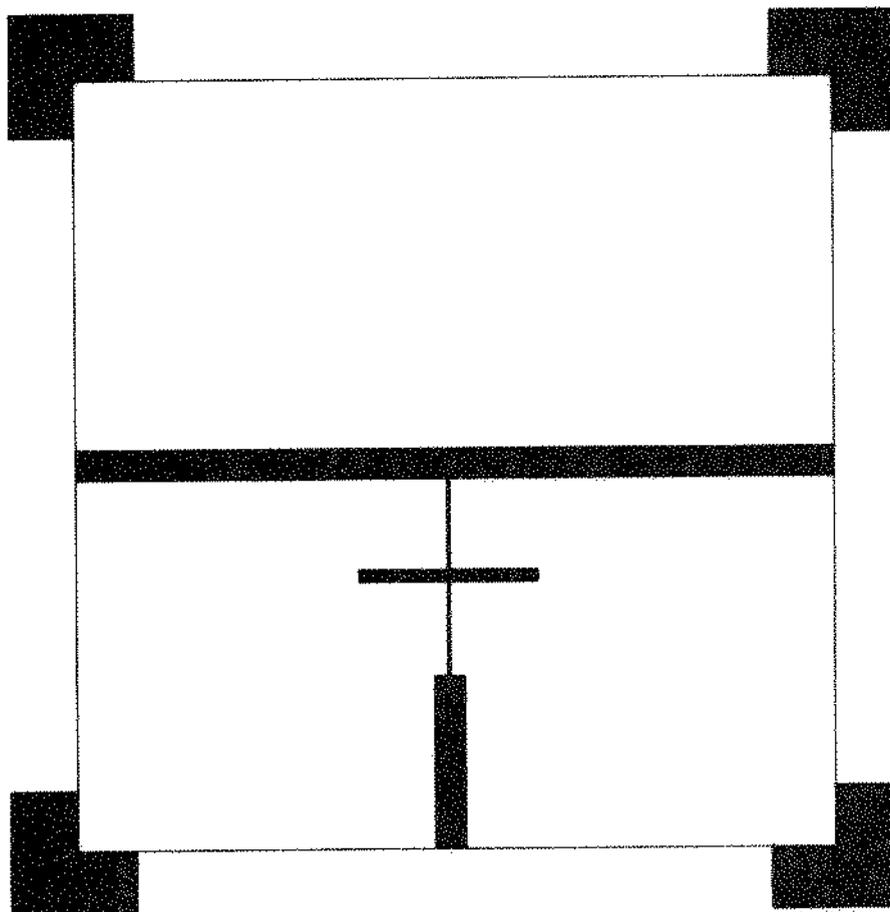
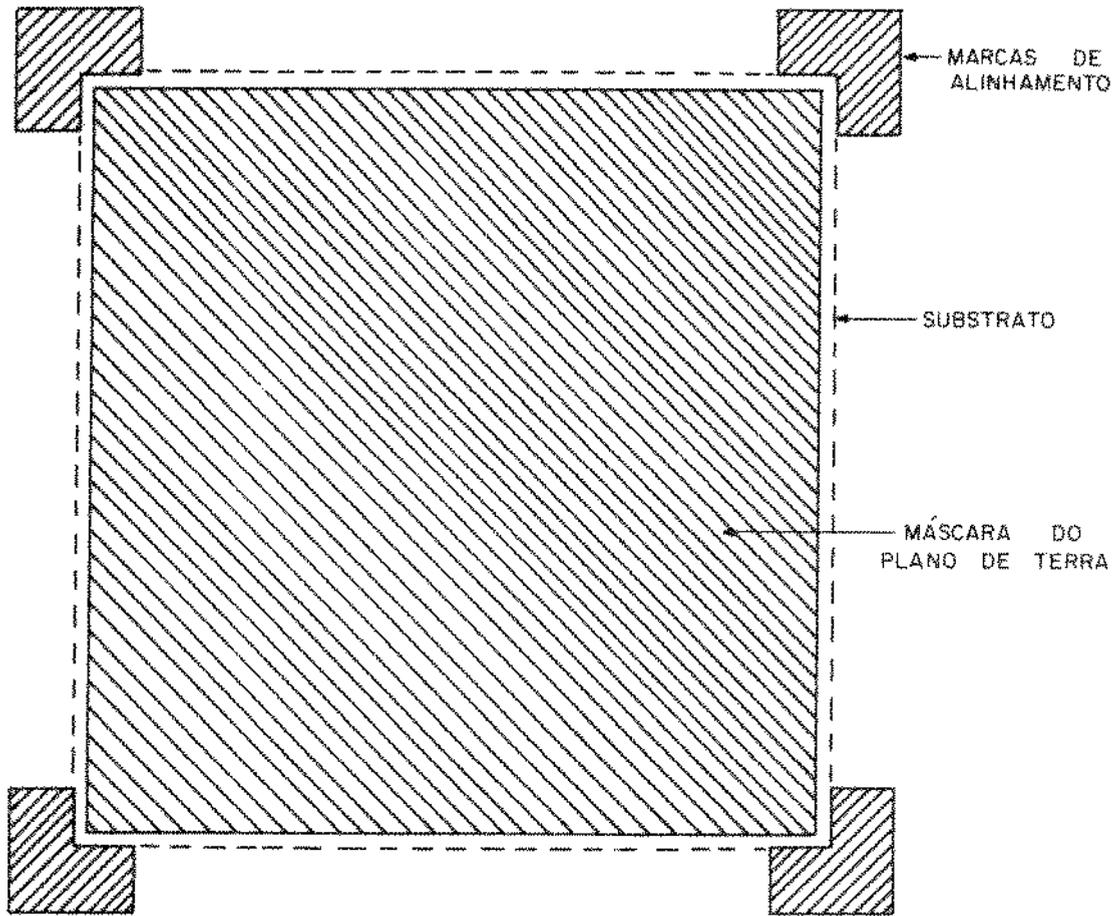


Fig.9 - Máscara em escala 4 X do filtro rejeita faixa. Nota-se as quatro máscaras de alinhamento.

Conforme dissemos antes, é necessária uma máscara para o plano de terra no caso da construção em filme de cobre devido à deposição nas faces laterais da alumina. Na figura 10 representamos esta máscara que também possui as marcas de alinhamento.



OBS: AS ÁREAS HACHURADAS CORRESPONDEM AS PARTES OPACAS DA MÁSCARA.

Fig.10 - Máscara em escala 4 X do plano de terra com as quatro marcas de alinhamento.

BIBLIOGRAFIA

- |1| Saviani, S.S." A LINHA DE MICROFITA NO PAC DO LED".
CODEX Nº RP 006 de 07 de março de 1980 convênio UNI-
CAMP/TELEBRÁS/FTPT/143/76.
- |2| Giarola, A.J." Impedances of Single and Coupled Mi-
crostrip lines"21ST Anual Southwestern I.E.E.E. con-
ference and Exhibition, april 1971.
- |3| Schneider, M.V." Microstrip Lines for Microwave Inte-
grated Circuits".
The Bell System Technical Journal, May-june 1969.
- |4| Pinto, J.K.C." Oscilador a diodo túnel, acoplado a
uma microlinha de transmissão"
Tese de doutoramento Universidade de São Paulo Es-
cola Politécnica USP.
- |5| Howe, H., JR. " STRIPLINE CIRCUIT DESIGN"
Atech House, Dedhan, Massachusetts USA. pag 273.

CAPÍTULO III - TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

3.1 - Introdução

A escolha do substrato para uma determinada aplicação em microondas, sempre é uma decisão que deve ser tomada a partir da análise de um grande número de características. Segundo KEISTER, [1] o substrato ideal deve ter as seguintes características: alta constante dielétrica; baixo fator de perdas; a constante dielétrica deve permanecer constante nas faixas de temperatura e frequência que nos interessam; alta pureza; espessura constante; superfície não rugosa; alta resistividade e rigidez dielétrica; alta condutividade térmica.

Infelizmente, não existe material ao nosso alcance que satisfaça a todos esses requisitos simultaneamente. Devemos então considerar os mais importantes e fazer a nossa escolha baseada nestes aspectos.

KEISTER, [1] desenvolveu um trabalho comparativo entre os diversos tipos de substratos e de condutores. Ele construiu e testou dispositivos sobre dezoito tipos de substratos dielétricos. Estes podem ser classificados em quatro tipos principais: aluminas, beríllias, quartzos e vidros. Os substratos plásticos não são considerados, tendo em vista que nas frequências de teste situados no intervalo entre 7,9 GHz e 12,4 GHz, estes materiais não apresentam características comparáveis com os citados acima.

3.2 - Substratos para Circuitos Integrados de Microondas

Na faixa de trabalho dos dispositivos com as tecnologias descritas nos próximos capítulos, assumem especial importância as características do substrato que vai servir de base ao dispositivo de filme fino. Idealmente o substrato deveria colaborar somente com propriedades mecânicas ao filme, sem interferir com ele, exceto para a adesão adequada. Porém conforme vimos na figura 3 do capítulo 1 o substrato influencia decisivamente no desempenho de circuitos em altas frequências pois a sua rugosidade acarreta desuniformidades nas linhas especialmente variações na largura, pois o foto-resiste ao ser depositado e depois polimerizado, acompanhará as variações do filme. Basicamente a rugosidade do filme é equivalente à do substrato se as condições de deposição forem as ideais. Porém se a deposição for efetuada sem as devidas precauções, o filme deverá ter rugosidade muito maior do que a do substrato, especialmente se durante a evaporação não for observado o tempo ideal para o aquecimento do cadinho com o material evaporante, o que causará pequenas explosões do material acarretando uma deposição irregular com pequenas bolhas.

Ao escolhermos o substrato para uma determinada aplicação, devemos ter em mente os seguintes itens: qualidade da superfície, dureza, composição química, estabilidade química e física, características térmicas, constante dielétrica e custos. Esses fatores costumam influir em um filme fino das maneiras descritas a seguir.

A rugosidade passa a ter, em altas frequências, papel de maior importância, pois relaciona-se diretamente com as perdas. Em vista disto, os substratos com elevada rugosidade somente podem ser utilizados em aplicações de baixa frequência, e portanto fora dos objetivos deste trabalho.

Conforme podemos observar na fig.3 do capítulo 1, a rugosidade do substrato assume papel cada vez mais importante nas perdas do circuito com o aumento da frequência.

Para substratos com a mesma constituição podemos obter menor rugosidade com o polimento da superfície. Este processo apesar de melhorar significativamente a qualidade da superfície, acarreta um grande problema que é o do custo. Uma lâmina de alumina polida pode chegar a custar dez vezes mais do que a lâmina simples. Isto se deve às dificuldades encontradas no polimento, pois as lâminas são geralmente muito duras, chegando a alcançar 9 na escala MOHS para o caso da alumina e 8 para a Beríllia (BeO) que é uma cerâmica de óxido de Berílio.

Um método para reduzir-se a rugosidade da superfície das lâminas é depositar sobre elas uma fina camada de vidro de boas características elétricas. Isto pode melhorar significativamente a rugosidade, porém prejudica a planicidade da superfície, pois não se consegue uma espessura uniforme da camada de vidro, a não ser que se use o polimento. Mas assim voltaremos ao problema dos custos. O problema da planicidade é de essencial importância para a construção do circuito, pois se o foto-resiste for aplicado em uma superfície que apresente uma má planicidade, a distância da camada foto-sensível à máscara HRP, ficará diferente ao considerarmos toda a superfície do dielétrico. Esta diferença aliada ao fato de que a fonte de luz ultravioleta utilizada para polimerizar o foto-resiste não ser pontual criará uma desfocagem, a qual acarretará um contorno irregular das linhas, causando variações na impedância características das mesmas em cada ponto, introduzindo descontinuidades e descasamentos que refletirão em uma maior perda do circuito.

Na tabela I podemos verificar a rugosidade dos principais substratos encontráveis comercialmente e as variações máximas de cada um.

TABELA I - Rugosidade média em μm encontradas nos principais substratos com aplicações em microondas. Segundo KEISTER [1].

SUBSTRATO	RUGOSIDADE (μm)
Alumina 96%	0,62
Alumina 99,5%	0,2-0,50
Alumina 99,6%	0,5-0,25
Alumina 99,7%	0,40
Alumina 99,9%	0,05-2,87
Safira	0,005
Alumina Vitrificada	0,025
Berlita 99,5%	0,45
Berlita Vitrificada	0,025
Quartzo 99,9%	0,006
Vidro Borossilicato	0,006

Nesta tabela podemos verificar a diminuição da rugosidade com o aumento da pureza da alumina. Estes valores variam muito com os fabricantes, e estes foram os valores extremos encontrados.

A estabilidade química é de extrema importância na escolha do substrato. Diversos reagentes, muitas vezes ácidos concentrados, são utilizados durante a construção dos dispositivos. Por exemplo durante a limpeza das lâminas, antes da deposição do filme, são utilizados "Freon TF" e álcool metílico, se já houver uma deposição prévia na lâmina, isto é se a lâmina estiver sendo reaproveitada. Este fato pode ocorrer normalmente pois se o filme depositado não atingir o padrão desejado, poderemos removê-lo facilmente com ácido sulfúrico no caso de filme de cobre, iodo e iodeto de potássio para o ouro e ferriciamento de potássio e hidróxido de sódio para o cromo.

Durante a deposição do cobre, são ainda utilizados a água-régia o ácido nítrico e o clorídico. Portanto, o substrato escolhido deve ser resistente a todos os compostos acima para que tenhamos filmes com boa aderência e estabilidade a longo prazo.

A condutividade térmica é também de muita importância na escolha do substrato. Durante a evaporação, o substrato deve se aquecer a uma temperatura em torno de 200°C para uma melhor aderência e resistividade do filme. Este aquecimento geralmente é fornecido à peça pelo lado oposto ao que vai ser depositado e portanto necessitamos de boa condutividade térmica para chegarmos rapidamente ao equilíbrio térmico da lâmina.

Durante a operação do dispositivo, a condutividade também é importante, pois possibilitará uma maior concentração de componentes ativos ou passivos sobre a lâmina, sem problemas de aquecimentos localizados que criarão tensões mecânicas, havendo a possibilidade de, num caso extremo, ocorrer a ruptura da lâmina. A condutividade térmica varia consideravelmente conforme o material. Na tabela II damos alguns substratos mais conhecidos e os valores médios de condutividade térmica.

TABELA II - Condutividade térmica dos principais substratos cerâmicos utilizados em microondas.

SUBSTRATO	CONDUTIVIDADE TÉRMICA A 25°C g.Cal/(s) (cm ²) ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)
Alumina 85%	0,035
Alumina 90%	0,040
Alumina 96%	0,059
Alumina 99,5%	0,085
Alumina 99,9%	0,093
Berília 96%	0,380
Berília 99,5%	0,670
Safira	0,090

Como podemos verificar, a condutividade térmica aumenta com o aumento da pureza do substrato. A Berília (BeO), apresenta condutividade térmica aproximadamente seis vezes maior do que a alumina. Esta diferença se torna importante quando grande potência é dissipada pelo circuito e requerendo portanto uma rápida transferência do calor pelo substrato.

O coeficiente de expansão térmica deve ser, no caso ideal, igual para o substrato e o filme depositado. Isto garantiria que o dispositivo não sofreria problemas de descolamento do filme com a variação de temperatura. Mas, infelizmente os coeficientes de expansão térmica dos metais normalmente utilizados em microlinhas de transmissão são bem diferentes dos coeficientes dos substratos disponíveis. Esta diferença não assume um caráter muito grave, quando pensamos em termos de variação de temperatura a que estarão sujeitos os circuitos. Somente em aplicações espaciais é que a faixa de temperatura de funcionamento aumenta consideravelmente. Mas, para as aplicações normais em instalações protegidas, como é a maioria dos casos com que nos deparamos, a faixa de variação de temperatura é reduzida e portanto os efeitos decorrentes desta desigualdade de coeficientes tornam-se não significativos. Nas tabelas III e IV damos os coeficientes de expansão térmica dos principais substratos e filmes metálicos.

TABELA III - Coeficientes de expansão térmica para os principais substratos com aplicações em microondas.

SUBSTRATO	COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA ($10^{-6} / ^\circ\text{C}$)
Alumina 85%	5,3
Alumina 90%	6,1
Alumina 96%	6,0 - 6,4
Alumina 99,5%	7,1 - 7,6
Alumina 99,9%	6,5
Berlíia 96%	6,3
Berlíia 99,5%	6,4 - 7,5
Safira	7,9

TABELA IV - Coeficientes de expansão térmica para os principais metais utilizados na construção de microlinhas.

FILMES METÁLICOS	COEFICIENTES DE EXPANSÃO TÉRMICA ($10^{-6} / ^\circ\text{C}$)
Prata	21
Cobre	18
Ouro	15
Alumínio	26
Cromo	90

A dureza mecânica é uma característica importante do substrato pois ele necessita resistir às tensões geradas durante o processo de construção e instalação e também permitir formas complicadas e furos. Aqui nos deparamos com uma dificuldade, pois os substratos possíveis de serem utilizados em microondas, conforme vimos anteriormente, a Alumina e a Berília, apresentam dureza mecânica muito elevada, atingindo 9 na escala MOHS. Isto implica em grande confiabilidade do substrato no referente a vibrações e choques, mas restringe drasticamente a realização de furos ou cortes, que só podem ser feitos com a utilização de brocas e serras diamantadas, pois o diamante é o único material mais resistente do que o substrato. É lógico que isto causa um grande custo de todas as operações mecânicas que normalmente são realizadas em substratos menos duros como o polimento, furação e cortes. Estas operações são particularmente importantes na realização de circuitos híbridos encapsulados. Também na construção de alguns tipos de Circuladores, é necessário substituir uma seção do substrato por um pedaço de ferrita das mesmas dimensões do substrato retirado.

A resistência a choques térmicos é outra característica bastante desejável de um substrato. Nas fases da construção dos dispositivos, tanto no método por evaporação como no método químico, ocorrem choques térmicos de razoável intensidade que poderão provocar fraturas ou induzir tensões mecânicas indesejáveis. Esta característica é particularmente desejável quando trabalhamos com o processo químico de deposição dos filmes, pois nele numa determinada etapa a lâmina que estava a uma temperatura aproximada de 100°C é rapidamente esfriada com água à

temperatura ambiente. As lâminas de Alumina que passaram por este processo resistiram bem a esta brusca variação de temperatura sem que tenham sido notadas trincas ou rachaduras.

Durante a operação do dispositivo, as condições não são tão severas, porém nas aplicações militares ou espaciais, ele deverá suportar uma variação de temperatura muito grande, embora os choques térmicos não sejam tão drásticos.

A pouca porosidade é extremamente importante no processo por evaporação para que minimizemos a desgasificação total do sistema diminuindo assim a contaminação por agentes externos, e o tempo necessário para a obtenção da pressão ótima de trabalho do evaporador. Durante a operação do circuito esta característica é desejável, pois um substrato muito poroso absorverá maiores quantidades de umidade, modificando deste modo as suas características e as do circuito construído.

A precisão mecânica é importante, pois os projetos das linhas, sempre envolvem a espessura do dielétrico, que é um dos fatores que mais diretamente influem no resultado. Desse modo, se o substrato não tiver espessura constante, em cada ponto a impedância da linha variará, o que acarretará descasamentos da impedância, e altas perdas. Como o alinhamento das foto máscaras é feito em uma foto-alinhadora, que é um instrumento de alta precisão, qualquer variação nas dimensões do substrato vai acarretar problemas, desde dificuldades de colocação da lâmina na alinhadora, até o caso extremo de grande ondulação quando não será possível, a fixação do substrato ao suporte, que é feita por intermédio de vácuo forçando a lâmina contra o suporte.

A constante dielétrica relativa assume importância somente em aplicações de baixa frequência ou quando é desejada grande concentração de componentes. Isto se deve de que uma grande constante dielétrica possibilita uma grande redução nas dimensões do circuito. Como o tamanho das linhas é sempre relacionado ao comprimento da onda caminhante nela, quando trabalhamos com frequências baixas de microondas onde normalmen

te teríamos grandes comprimentos de onda, consegue-se uma redução considerável se utilizarmos substratos com uma constante dielétrica elevada. Com isto conseguem-se linhas mais curtas e mais finas possibilitando uma maior concentração em uma determinada área de substrato.

Evidentemente esta redução das dimensões nos leva a um limite em altas frequências, quando as linhas tornam-se extremamente pequenas impossibilitando a ligação elétrica aos conectores, a menos que se usem as técnicas normalmente utilizadas em circuitos integrados de baixa frequência que é a interligação por fios de ouro ou alumínio soldados por pressão ou temperatura. Isto no entanto acarreta descontinuidades que causarão perdas ao circuito. No caso de uma linha de 50Ω construído em um substrato de $0,625\text{mm}$, de espessura e constante dielétrica relativa $9,8$ teremos uma largura de linha de $0,609\text{mm}$ para operação de 10GHz .

Outro fator importante referente à constante dielétrica, é que esta deve ser constante numa faixa razoável de temperaturas e frequências. Isto se deve ao fato de que as mudanças acarretariam descasamentos de impedância e aumento das perdas. Normalmente os substratos obedecem a estes requisitos conforme podemos observar na Tabela V.

TABELA V - Variação da Constante Dielétrica relativa em função da temperatura e da frequência para Alumina e Berílica.

FREQUÊNCIA	ALUMINA 96% Al_2O_3				BERÍLICA 99,5% BeO			
	25°C	300°C	500°C	800°C	25°C	300°C	500°C	800°C
1 MHz	9,3	9,5	10,8	22,4	6,5	6,6	6,9	7,9
1 GHz	9,3	9,4	9,5	-	-	-	-	-
10GHz	9,2	9,3	9,4	9,9	6,5	6,5	6,6	6,8
25GHz	9,0	9,1	9,2	9,3	6,5	6,5	6,5	6,7

Podemos ver que na faixa de temperatura e frequência deste trabalho, $\pm 25^{\circ}\text{C}$ e 10 GHz respectivamente a constante dielétrica relativa se mantém com uma variação tolerável.

O custo do substrato assume grande importância na escolha do substrato ideal para uma determinada aplicação.

De um modo geral todos são caros, porém dependendo do tratamento superficial desejado, o preço pode aumentar diversas vezes.

No método de deposição por evaporação, devido aos altos custos da deposição o substrato não influe tão decisivamente no custo final como no caso da deposição química onde o preço do substrato pode significar até 80% do preço total do dispositivo não encapsulado. É lógico que esta proporção é influenciada diretamente pelo volume de deposição e pelo tipo do substrato escolhido.

3.3 - Substrato utilizado no Trabalho

Levando-se em consideração o exposto acima, foi escolhido o substrato de Alumina tipo 772, American Lava Corporation que apresenta as seguintes características:

Concentração de Al_2O_3	- 99,5%
Dureza	- 9 MOHS
Coefficiente de expansão	
Térmica Linear	- $66 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Condutividade volumétrica	- 0,088 Cal. cm/s.cm ² . ^o C (25 ^o C)
Resistividade dielétrica	- 10^{14}OHM.cm (25 ^o C)
Constante dielétrica	- 9,8 (25 ^o C, 10 GHz)
Fator de dissipação	- 0,00004 (25 ^o C, 10 GHz)
Absorção de água	- 0%
Temperatura máxima de	
utilização	- 1600 ^o C
Dimensões	25,4mm X 25,4mm X 0,625mm.

Para este trabalho, há opção do uso de lâminas de Alumina com 99,9% de Al_2O_3 que distingue-se da utilizada nos seguintes aspectos:

O tamanho dos cristais é aproximadamente 90% menor em

relação à Alumina 99,5%. Isto nos dá uma superfície muito melhor, com uma rugosidade média de 0,5 microns, o que é 50% menor do que a da Alumina utilizada. A condutividade térmica é 9,5% maior, o que permitiria uma maior concentração de componentes e/ou, linhas. No referente à constante dielétrica, fator de dissipação e fator de perdas, as diferenças são insignificantes.

Estas vantagens são obtidas a um custo que pode facilmente chegar ao dobro do preço da Alumina 772. Isto faz com que a nossa decisão torne-se mais difícil pois a diferença de preço é significativa.

Tendo em vista o objetivo do trabalho que é fazer um estudo comparativo entre os dois métodos de deposição, desde que seja utilizado o mesmo substrato nos dois processos é perfeitamente aceitável a comparação que faremos.

Provavelmente caso tivéssemos utilizado o outro substrato, no caso o tipo AD-999 fabricado pela COORS/Ceramics, os resultados teriam sido um pouco melhores mas nada indica que a diferença entre as avaliações dos dois processos se alterasse.

3.4 - Materiais utilizados na Evaporação

Na evaporação os requisitos de pureza dos materiais que são postos em contato com o evaporador são muito grandes. Isto envolve o uso de materiais de alta pureza e uma profunda limpeza destes materiais antes de serem colocados no evaporador.

Para satisfazer estes requisitos, o material evaporante tinha pureza típica nominal declarada pelo fabricante, Balzers, de 99,999% do metal, no caso Cromo e Ouro. Como a evaporação foi por canhão eletrônico, os materiais utilizados estavam na forma granular e foram colocados em cadinhos de grafite, de onde foram evaporados.

O custo destes materiais é extremamente elevado, devido a sua pureza e no caso do Ouro devemos acrescentar as recentes e grandes valorizações deste metal. Isto associado à necessidade de outros materiais como o Nitrogênio líquido, in

flue decisivamente nos custos finais dos dispositivos construídos, só conseguindo-se alguma redução com a colocação do maior número possível de substratos no evaporador, tarefa que envolve a construção de suportes especiais, ao mesmo tempo em que aumenta significativamente a dificuldade de colocação e ajuste das lâminas no evaporador.

A limpeza das lâminas antes da evaporação requer cuidados especiais tanto pelo perigo de contaminação do evaporador, como também para garantir boa aderência do filme. Esta limpeza geralmente envolve o uso de solventes químicos como o "FREON TF", o tricloroetano e o metanol.

3.5 - Materiais utilizados na Deposição Química

O método da deposição química difere fundamentalmente do método por evaporação no tocante às matérias primas envolvidas. Ao contrário da evaporação, o filme é obtido a partir de materiais de fácil aquisição no mercado especializado nacional, e o que é mais importante, a baixo custo.

Quanto à natureza dos reagentes, não é exigida uma pureza especial, sendo suficiente a Para Análise (P.A.). São necessários os seguintes reagentes: Carbonato de Sódio

Trifosfato de Sódio

Ácido Clorídrico

Ácido Nitríco

Cloreto Estanhoso

Cloreto de Paládio

Sulfato de Cobre

Sal de Rochelle

Hidróxido de Sódio

Formaldeido

Dos materiais o que representa custo mais elevado é o Cloreto de Paládio, mas devido ao seu baixo consumo o custo torna-se não significativo numa produção razoável.

A água utilizada é deionizada e com resistividade maior do que 18 Mega Ohms.cm.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - Keister, Frank Z. "An evaluation of materials and processes for integrated microwave circuits".
IEEE. Transactions on Electron Devices,
Vol. ED-15 nº 7 julho 1968.

CAPÍTULO IV - TECNOLOGIA DE CONSTRUÇÃO EM OURO

4.1 - Introdução

O método de deposição de filmes metálicos sobre substratos cerâmicos é muito difundido, sendo bastante conhecidos os trabalhos de Caulton e Sobol [1].

Básicamente, um circuito integrado para microondas com condutores de ouro é constituído por: um substrato cerâmico de alta constante dielétrica, sobre o qual é evaporada, nas duas superfícies maiores, duas finas camadas de ouro. Estas camadas de ouro, assim como as de todos materiais de baixa reatividade química, apresentam problema de aderência ao substrato, o que exige o uso de um outro material, de preferência bom condutor e que apresente baixa migração para o ouro, para ser evaporado formando uma camada de ligação entre o ouro e o substrato. Normalmente, para esta finalidade, utiliza-se o cromo.

Após estas etapas já temos o meio físico necessário à construção do circuito integrado de microondas. Porém não é economicamente viável a obtenção das espessuras de ouro necessárias para a construção do dispositivo utilizando-se somente evaporação, pois este é um método altamente ineficiente. Então, após a evaporação, faz-se um crescimento eletrolítico do filme obtido através da evaporação até chegarmos à espessura ideal para o nosso dispositivo. O método eletrolítico utilizado não apresenta perda (ou desperdício) do metal ao mesmo tem

po que reduz a utilização do evaporador ao mínimo possível possibilitando um aumento na produção.

Após a obtenção do filme metálico na espessura desejada, dá-se início à parte de foto-gravação das lâminas, a partir de uma máscara em "HRP" (High Resolution Plate) ou seja, uma lâmina de vidro altamente polida que já vem de fábrica foto-sensível como um papel fotográfico. É a mesma lâmina utilizada nas máscaras óticas para circuitos integrados, transistores ou diodos.

Esta máscara "HRP" é obtida através da foto-redução de uma máscara maior, construída em "RUBYLITE", ou em fotolito a partir do projeto efetuado normalmente por computador, conforme veremos no Capítulo 7. Estão em desenvolvimento no LED teses que permitirão este projeto mais facilmente, inclusive com o computador gerando diretamente a máscara em "RUBYLITE" ou em fotolito.

Sobre a alumina metalizada é depositada uma camada de foto-resiste que irá ser polimerizado, segundo o desenho que está gravado na máscara "HRP".

Após esta polimerização, têm início os ataques químicos seletivos, que removerão primeiramente o ouro e, após, o cromo.

Teremos então o circuito pronto para os testes finais.

Evidentemente, durante estes processos e, principalmente, após a evaporação e o banho eletrolítico, é feita cuidadosa inspeção nas lâminas, de preferência, reservando-se algumas para o teste de aderência.

Outra medida muito importante é a da resistividade do filme, pois conforme veremos a seguir, a espessura da camada de cromo tem grande influência na resistividade do filme final.

Para garantirmos uma boa aderência do filme, é essencial uma boa limpeza do substrato. Existem diversos métodos que podem ser utilizados porém, o que propicia os melhores resultados nas condições em que foi realizado o trabalho, é sem dúvida o método da limpeza química. Como melhores resultados, devemos entender uma combinação de diversos fatores: qualidade da limpeza obtida, custo, facilidade obtenção de materiais e/ou equipamentos necessários e facilidade da realização.

Segundo Mattox [2], uma superfície limpa é aquela que contém quantidades insignificantes de material indesejável. Vemos, portanto, que este conceito é um tanto flexível e variável em função das necessidades do usuário, ou do tipo de utilização que determinada peça a ser limpa terá.

No nosso caso, a superfície da alumina precisa estar livre de matérias orgânicas, principalmente, pois elas absorvem grandes quantidades de gás, o qual irá sendo liberado gradualmente, dificultando a obtenção do alto vácuo necessário à evaporação e, também a aderência do filme, pois esta camada orgânica, geralmente gorduras, impedirá o contato direto do material evaporante com o substrato.

Um método eficiente para a remoção de gorduras é o uso de muita energia na forma de chama (fogo), que deve ser bem controlada para evitar-se combustão incompleta, o que depositaria resíduos de carbono sobre o substrato. Se usarmos uma chama à uma temperatura adequada, podemos obter uma superfície com níveis de gordura adequados às nossas necessidades, haja visto que o substrato, utilizado, alumina, permite temperaturas de até 1600°C.

Na deposição de filmes metálicos sobre substratos formados por óxidos, como é o caso da alumina (óxido de alumínio), é necessária uma reação química entre o filme e a superfície para uma boa aderência. Metais facilmente oxidáveis aderem bem, como é o caso do alumínio, cromo, tântalo e titânio. Já o ouro e a prata apresentam grande dificuldade, sendo necessária a camada de ligação citada no item 4.1.

O outro fator que influe decisivamente na aderência é a nucleação dos átomos depositados. Esta nucleação depende de diversos fatores: técnica, condições e equipamento de deposição, temperatura e composição química do substrato.

Independente do tipo de mecanismo considerado, é necessário que a superfície esteja livre de contaminantes que possam inibir a interação entre a superfície e os átomos do filme.

As impurezas contaminantes que mais facilmente impedem esta interação são: hidrocarbonetos, ions hidroxil e contaminantes alcalinos.

Para a limpeza química, os compostos mais utilizados são: água deionizada, álcool metílico, tricloroetileno e o "FREON TF". Alguns destes compostos apresentam risco à saúde como o álcool metílico, que é venenoso, e o tricloroetileno, cujos vapores não devem ser respirados.

Tornam-se necessárias portanto instalações adequadas ao uso destes compostos, com exaustão suficiente.

Para o método de deposição por evaporação foi utilizado o seguinte processo de limpeza:

- 1 - Imersão em água deionizada com resistividade $\geq 18 \text{ M } \Omega \cdot \text{cm}$.
..... 5 minutos
- 2 - Imersão em álcool metílico, grau P.A., e aquecimento até a ebulição..... 5 minutos
- 3 - Imersão em álcool metílico, grau P.A. (novo), aquecimento até a ebulição e vibração ultrassônica..... 10 minutos
- 4 - Imersão em "FREON TF", aquecimento até a ebulição e vibração ultrassônica..... 10 minutos
- 5 - Secagem na boca dos fornos de difusão, em fluxo de nitrogênio seco de 2/L Min à temperatura de 200°C...30 minutos

4.3 - Escolha dos Metais a serem Evaporados

Como já falamos no item 4.1, o ouro, assim como a maioria dos metais bons condutores, não apresenta boa aderência ao substrato.

Básicamente, os metais aderem à cerâmica através de ligações químicas e mecânicas. A ligação mecânica requer um substrato rugoso, o que acarreta baixa definição das linhas e aumento nas perdas. A ligação química passa a prevalecer quando temos substratos com rugosidade menor que $0,1\mu\text{m}$. Seu princípio é o seguinte: as partículas de um metal redutor, como o cromo ou o titânio, quando colidem com o substrato aquecido, são oxidadas. Se, na mesma corrida de vácuo, evaporarmos um metal acima desta camada, haverá boa aderência. Portanto, para as nossas aplicações, podemos classificar os metais que nos interessam em dois grandes grupos:

Metais bons condutores - Ag, Cu, Au, Al

Metais semente - Cr, Ta, Ti

Combinando-se estes metais, podemos efetuar diversas combinações de interesse prático:

Cr - Au

Cr - Cu - Au

Cr - Cu

Cr - Cu - Ni - Au

Ti - Pd - Au

Ti - Pt - Au,

todas elas apresentando características distintas e que podem ser resumidas da seguinte forma:

- A camada superior em Ouro é excelente para solda por ultrassom e a em cobre requer soldagem química. O sistema Ti - Pd - Au é estável em altas temperaturas, e o Cr - Au apresentará elevada resistividade se for exposto à altas temperaturas durante períodos muito longos.

- Os sistemas com Tântalo apresentam a possibilidade da produção de capacitores e resistências com um único material.
- O Tântalo é muito estável, podendo ser anodizado para formar filmes dielétricos e, podendo reagir catódicamente para formar filmes resistivos. Os filmes de tântalo são geralmente depositados por deposição catódica (sputtering). Os capacitores com Ta_2N apresentam grande estabilidade e precisão.
- Quando se deseja maior estabilidade das resistências, utiliza-se uma camada como semente de Níquel-Cromo. Temos, portanto, grande variedades de possibilidades, e a escolha de uma delas dependerá das seguintes condições: O uso de elementos passivos no circuito a faixa de temperatura de operação - a compatibilidade com os dispositivos - a obtenção dos equipamentos necessários à execução do filme.

Todas estas combinações de metais apresentam o inconveniente de diminuírem a condutividade do metal bom condutor. Geralmente isto ocorre por causa de migração dos átomos do metal semente ou liga para camada de metal bom condutor. Isto reflete-se nas perdas do circuito.

Sobol [4] nos apresenta duas comparações para o sistema Cr - Au e Ti - Pd - Au, em relação à linha em Ouro. A figura 1 nos dá a relação entre as perdas de uma microlinha cromo-ouro e as perdas de uma microlinha em ouro, em função da espessura da camada de ligação e da frequência. A figura 2 nos dá a mesma relação para o caso do Titânio - Paládio - Ouro. Podemos notar que devemos ter a menor espessura possível do metal de ligação, e nos sistemas com mais que duas camadas, do metal de transição ou de reforço, que é (são) o(s) da(s) camada(s) intermediária(s).

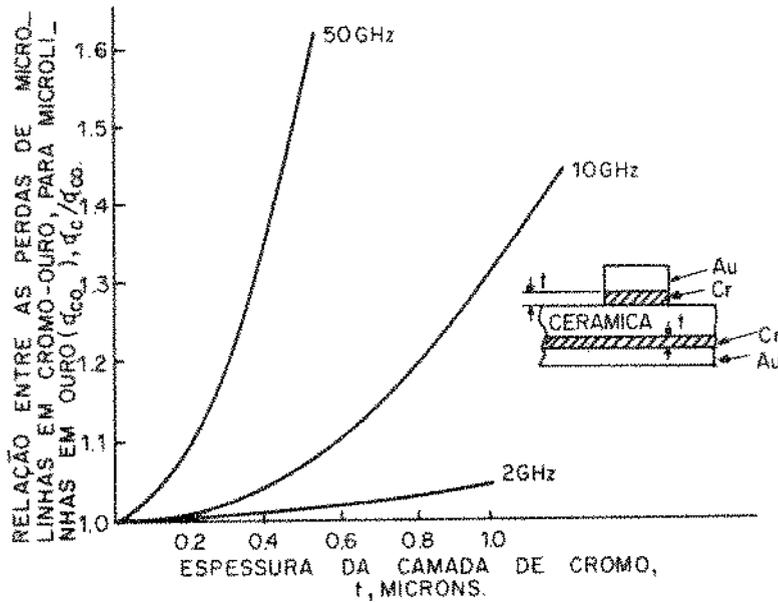


Fig. 4.1 - Relação entre as perdas (dB) das microlinhas Cr - Au e microlinhas em Au, em função da espessura da camada de Cr e da frequência. (segundo Sobol, [4]).

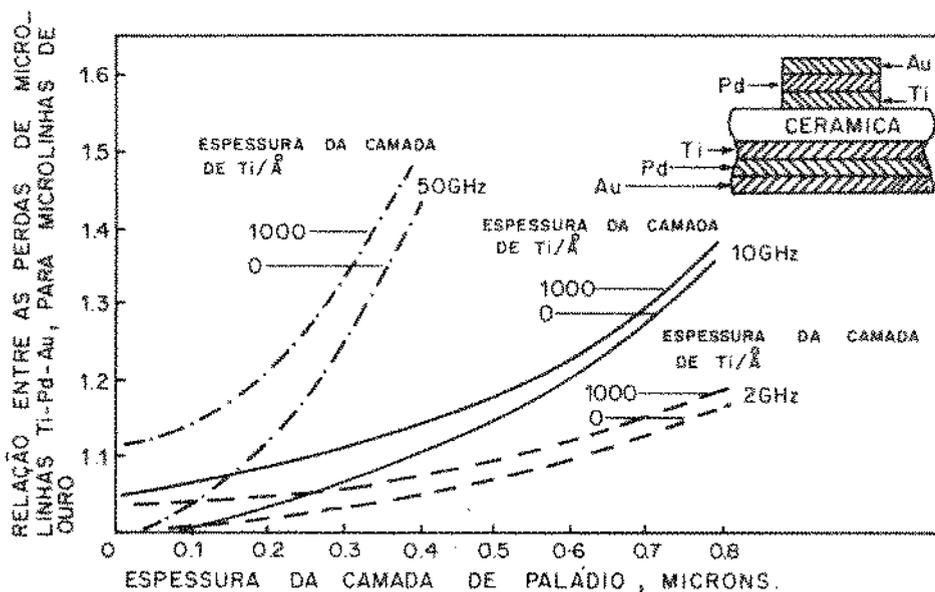


Fig. 4.2 - Relação entre as perdas (dB) das microlinhas Ti - Pd - Au e microlinhas em Au, em função da espessura das camadas de Ti e Pd e da frequência (segundo Sobol, [4]).

Para o nosso trabalho foi escolhida a combinação Cromo - Ouro, devida à maior facilidade de evaporação, e por não se ter previsto o uso de componentes passivos (capacitores e resistências) nem de componentes ativos. A camada final em ouro facilita no tocante à conservação, devido à ausência de oxidação. O problema de aumento de resistividade em alta temperatura também não é importante, pois os dispositivos trabalharão à temperatura ambiente.

4. 4 - Evaporação

Imediatamente após a limpeza e secagem das lâminas , tem início o processo de evaporação. Inicialmente procede-se à colocação dos substratos no interior do evaporador, por intermédio dos suportes descritos no item 6.2. A quantidade destes suportes depende do tamanho da câmara do evaporador. No nosso caso usamos 10 suportes, o que possibilitou a evaporação simultânea em 10 lâminas.

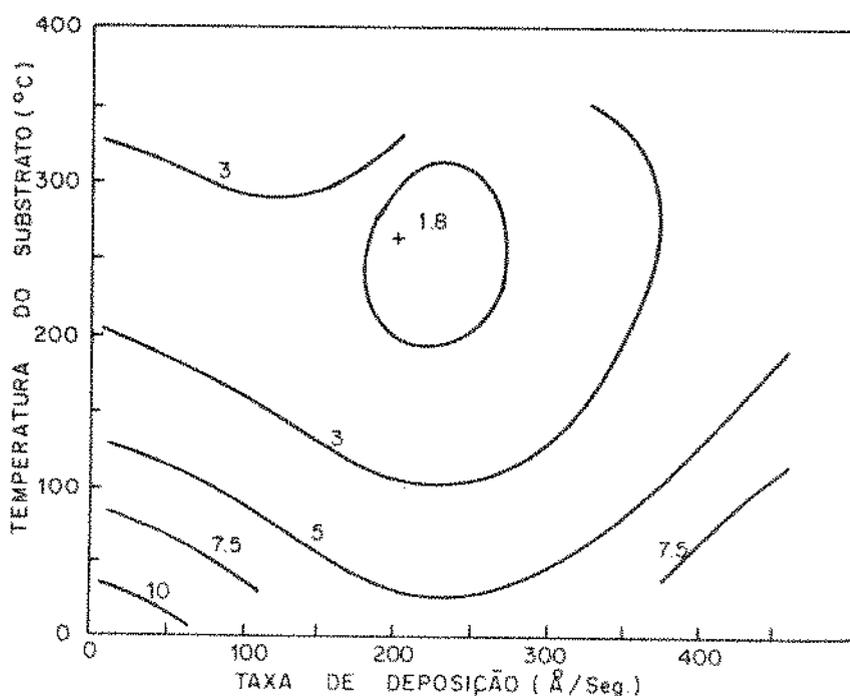
Imediatamente após a colocação das lâminas, fecha-se a câmara e inicia-se o vácuo. Espera-se que a pressão caia até 2.10^{-6} torr, iniciando-se então o aquecimento dos substratos por intermédio do aquecedor colocado no topo da câmara.

Este aquecimento tem dois objetivos: o primeiro é propiciar uma melhor degazeificação das peças, por aumentar a energia cinética das moléculas dos gases absorvidos, facilitando assim o seu despreendimento do substrato. O segundo é criar as condições ideais à evaporação do cromo e do ouro.

Como sabemos, o cromo apresenta uma elevada resistividade, quando comparado ao ouro, isto aliado à grande facilidade de dispersão dos seus átomos nos do ouro, aumenta a resistividade do filme final. Portanto, temos que diminuir ao máximo a espessura do cromo e tentar obter esta camada com a resistividade a menor possível. Esta resistividade depende basicamente de dois fatores que são: temperatura do substrato e taxa de deposição. O mínimo que podemos obter conforme figura 3 é uma

resistividade 1,8 vezes maior do que a resistividade de bloco de cromo. Este valor mínimo pode ser obtido somente nas seguintes condições, segundo estudo de Scow e Thun, [3]: temperatura de 270°C e taxa de evaporação $210\text{\AA}/\text{s}$. Esta temperatura pode ser facilmente obtida, já a taxa de deposição não pode ser obtida com os recursos disponíveis, e nem seria adequada ao nosso uso; exigiria um tempo de vaporação de $0,95\text{s}$ o que é muito difícil de ser controlado.

Analisando-se novamente o gráfico observamos que, mantendo-se a temperatura na faixa de 270°C , podemos observar que obtemos valores de resistividade menores do que tres vezes a resistividade original, em uma grande faixa de valores da taxa de deposição. Com isto foram escolhidas as seguintes condições temperatura = 270°C , taxa de deposição = $10\text{\AA}/\text{s}$, espessura final = 200\AA temperatura de deposição = 20s . Assim, podemos controlar mais facilmente a espessura do filme. Trabalhando nestas condições obtivemos um valor 2,7 vezes maior do que o mínimo, que se mostrou razoável para os nossos propósitos. Para o ouro foi escolhida a mesma temperatura 270°C , taxa de $1,43\text{\AA}/\text{s}$, espessura de 3000\AA o que dá um tempo de deposição de 2100s ou 35 minutos.



Fíg. 4.3 - Relação entre a resistividade do filme de Cromo e a resistividade de bloco do Cromo em função da temperatura do substrato e da taxa de evaporação (segundo Scow e Thun, [3]).

Ao iniciarmos o aquecimento, a pressão sobe por causa da degaseificação, tornando a cair algum tempo depois, tempo este que depende da quantidade de lâminas no evaporador e o tempo que a câmara ficou aberta. No caso a pressão começou a cair novamente 10 minutos após. Quando a pressão cai até 2.10^{-6} torr, pode-se ligar o canhão eletrônico para iniciarmos a evaporação. Quando notarmos um fluxo constante de material evaporado retira-se a placa que tampa o cadinho e inicia-se a deposição no substrato.

Decorrido o tempo calculado tapa-se novamente o cadinho terminando a deposição. Aciona-se em seguida o mecanismo para mudança do cadinho, posicionando-se agora o que contém o ouro. Repete-se o procedimento de evaporação e teremos então uma superfície das lâminas pronta. Espera-se esfriar os substratos e quando eles chegarem a temperatura de 50°C quebra-se o vácuo para mudarmos o lado das lâminas para depositarmos outra superfície. Reiniciamos então todo o procedimento, fazendo-se o vácuo, aquecendo-se as lâminas e evaporando-se o cromo e o ouro. Temos, então, as lâminas prontas para o processo de eletrodeposição do ouro.

4.5 - Caracterização do Filme

Imediatamente após a evaporação, foram feitas medidas da resistividade em cada lâmina. Devido à pequena espessura do ouro evaporado, $\approx 3000\text{Å}$, a influência da camada de Cromo, a resistividade do filme obtido nesta etapa do procedimento é alta, com um valor médio de $783 \text{ m}\Omega.\text{cm}$. Porém, com o aumento da espessura pelo processo eletrolítico a resistividade diminuirá bastante.

Após estas medidas, as lâminas foram observadas no microscópio com um aumento de 5 a 10 vezes para se verificar algum possível defeito na deposição. As lâminas aprovadas nesta caracterização, passaram para a etapa seguinte que é a de eletrodepo-sição do ouro.

4.6 - Eletrodeposição de Ouro

Conforme já foi mencionado no item 4.1, é altamente ineficiente a obtenção da espessura final do ouro pelo método da evaporação por ser um método altamente ineficiente, demorado e caro. Quando falamos que o método é ineficiente, isto deve-se à característica própria dos evaporadores, onde o metal fonte, quando evaporado espalha-se em todas as direções, e é praticamente impossível interceptar-se todos estes feixes de moléculas do metal com as pequenas lâminas usadas neste trabalho, pois isto requeriria a colocação de quase cem lâminas no evaporador e, con-sequentemente, com suportes.

Quando se trabalha com peças maiores, é mais fácil interceptar-se uma grande parte dos feixes de moléculas, pois necessita-se de menor quantidade. Aqui deve-se notar que a quantidade não é em si o maior obstáculo, mas sim a colocação de todas estas peças do evaporador, o que exige um grande intervalo, de tempo em que a câmara do evaporador permanece aberta, contaminando as lâminas e o próprio evaporador. Isto por sua vez, causa um tempo maior para obtenção da pressão ideal e diminui a aderência do filme ao substrato devido à contaminação.

Outro problema é o tempo de deposição. Para a obten-ção de 0,3 μ m de depósito de ouro, demoramos 35 minutos. Portan-to, para a obtenção da camada desejada 6 μ m necessitaríamos de 700 minutos ou 11 horas e quarenta minutos.

O preço do ouro é outro fator importante. Devido ao desperdício de material, o processo torna-se proibitivo pois grande parte do ouro evaporado não é coletado pelos substratos.

Chega-se portanto à conclusão de que o evaporador deve ser utilizado para obter-se a menor espessura possível do ouro, necessitando-se de outro processo para chegarmos à espessura final desejada. O método por nós escolhido foi o da eletrodeposição. Para a realização desta deposição, existem condições que devem ser obedecidas, no referente à pureza, temperatura e agitação de solução. Foi por isto construído um dispositivo que satisfaz a estas condições, e que está descrito no item 6.3.

Para a eletrodeposição de ouro foi utilizada a solução "PUR-A-GOLD 401" da Sel - Rex do Brasil. Esta solução apresenta as seguintes características:

Pureza do depósito	: 99,99%
Dureza (VICKERS)	: 60-80
Resistência de contato	: 0,3mΩ
Densidade	: 19,25
Resistividade a 0°C	: 2,3μΩ/cm
Massa do depósito de 1μm	: 193mg/dm ²

Esta solução deve ser utilizada nas seguintes condições: concentração de ouro: 8-12 g/l

Relação anodo/catodo: 2:1 ou maior

Densidade de corrente catódica: 0,05 a 1,5 A/dm²

ph: 5,6-6,0

Temperatura: 50 a 60 (°C)

Agitação : Moderada a Vigorosa

Taxa de Deposiçãp : 105 a 120 (mg/A,min)

Tempo para depositar 1μm a 0,5A/dm²: 3,2 a 2,8 min.

Ela necessita porém de uma outra solução que sirva de ligação entre o ouro depositado por evaporação e ela. Esta camada de ligação é dada pela solução " AUROBOND" da Sel - Rex do Brasil.

Ela é chamada de " toque" e assegura a boa aderência da camada final. Suas condições de operação são:

Concentração de ouro:	0,5 a 1,5g/l
ph:	5,5 a 6,5
Temperatura:	20 a 30°C
Relação anodo/catodo:	2:1 ou maior
Densidade de corrente catódica:	0,2 a 1,5 A/dm ²
Tempo para depositar 1µm a 1A/dm ² :	20s

A espessura final do filme de Ouro é de 6µm.

Após a realização da eletrodeposição, temos as lâminas prontas para a construção dos dispositivos. Este é, portanto, o momento de efetuarmos uma caracterização completa das lâminas obtidas.

4.7 - Caracterização Final do Filme

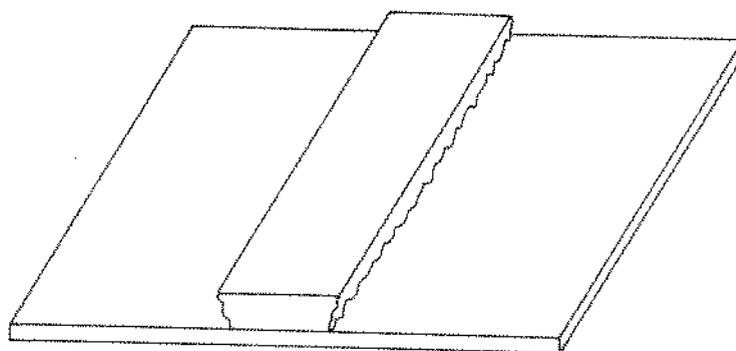
Antes do início da confecção dos circuitos é necessária uma caracterização das lâminas obtidas. Esta caracterização é feita sobre as seguintes características: Resistividade, espessura, aderência e aspecto de filme (falhas). Todas estas características são igualmente importantes para o dispositivo que vier a ser construído e, portanto, se uma lâmina não passar em alguma destas avaliações, deverá ser rejeitada. As lâminas rejeitadas são decapadas por processo químico retirando-se completamente o cromo e o ouro. Assim elas podem novamente ser depositadas como se fossem lâminas novas.

A espessura dificilmente acarreta rejeições pois seu controle durante a realização da deposição é fácil e pode-se trabalhar com uma grande tolerância para mais. O limite inferior é igual a 5 vezes a profundidade de penetração da onda na frequência de funcionamento do dispositivo levando-se em consideração a resistividade da camada de ouro.

Cálculo da profundidade de penetração para onda de 10GHz em filmes de ouro:

$$\delta = \frac{0,079}{\sqrt{f}} \quad ; \quad \delta = \frac{0,075}{\sqrt{10 \cdot 10^9}} \quad ; \quad \delta = 0,78\mu\text{m}$$

O limite superior é especificado principalmente por razões econômicas pois, ao custo atual do Ouro, não podemos realizar filmes de espessura maior do que a calculada acima. Outro fator que influe na espessura máxima é a perda de definição das linhas, quando estas são muito espessas. A solução que remove os metais começa a atacar por baixo do foto-resiste fazendo o que é normalmente chamado de "under-cut." A Figura 4 representa esquematicamente este fenômeno.



EFEITO GRANDEMENTE
AMPLIADO

Fig. 4.4 - Efeitos sobre a resolução das linhas causados pela grande espessura do filme.

Se é fácil o controle da espessura durante a deposição do filme dada pelo medidor do evaporador, na primeira etapa, e calculada em função da corrente, área e tempo de deposição para um determinado valor de massa por Ampere/Hora dada pelo fabricante da solução de eletrodeposição, é muito difícil a medição da espessura do filme no substrato por métodos mecânicos ou óticos. Basicamente, são estes os dois métodos que estão disponíveis para a realização desta medidas. A desvantagem destes dois métodos é que eles necessitam de que o filme a ser medido esteja depositado em um substrato de baixa rugosidade, de preferência sobre vidro altamente polido.

Como já vimos que os vidros não se prestam para aplicações na faixa de frequências deste trabalho resta-nos a possibilidade de colocar algumas lâminas de vidro no processo normal de evaporação, para que possamos fazer algumas medidas por amostragem do lote.

Inicialmente foram feitas deposições somente em lâminas de vidro, para a calibração do medidor do evaporador. Estas medições foram realizadas pelo processo mecânico utilizando-se o " TALISTEP" do Laboratório de Micro Eletrônica da U.S.P.. Este aparelho consta basicamente de um estilete com ponta de diamante que corre sobre o filme a ser medido.

As variações na posição deste estilete são convertidas em sinais elétricos que, convenientemente amplificados, vão acionar um traçador de gráficos. Se tivermos no filme um degrau conforme esboçado na figura 4.4, o aparelho nos dará a medida da espessura do filme. O papel do gráfico é calibrado, sendo que, na posição de máxima sensibilidade, um milímetro nele equivale a 20\AA . Nas nossas aferições foi utilizada a relação $1\text{mm}:400\text{\AA}$. Medimos diversas lâminas e chegou-se a uma espessura média. Desta espessura média e usando-se o valor da espessura do filme indicado pelo medidor do evaporador, foi calculado um fator de correção, que passou a ser aplicado na evaporação.

Estas mesmas medidas foram feitas também pelo processo ótico utilizando-se o microscópio interferométrico marca Leitz do Laboratório de Eletrônica e Dispositivos. Esta medida baseia-se na contagem das franjas causadas pela interferência dos raios luminosos refletidos na superfície do filme e na superfície do substrato. Este método é menos preciso do que o anterior devido à dificuldade de avaliação das frações de distância entre duas franjas, e quando o degrau é muito abrupto à dificuldade de contagem do número total de franjas. Neste método cada distância entre duas franjas adjacentes é equivalente à metade do comprimento de onda da luz utilizada, no caso a luz verde com comprimento de onda igual a 2730\AA .

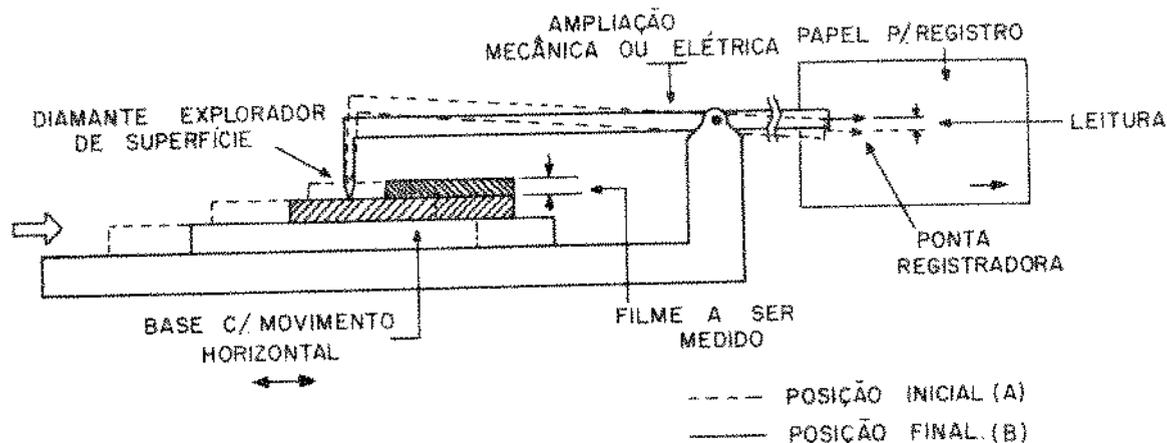


Fig.4.5 - Princípio utilizado pelo medidor de espessura de filmes " TALISTEP".

A resistividade foi medida pelo método das quatro pontas por intermédio de milímetro marca Keitley. Os valores da relação V/I medidos situam-se no intervalo $0,77 \pm 0,01m\Omega$ que, considerando-se a forma da lâmina e a disposição das quatro pontas, nos dá uma resistência específica de $3,5 \pm 0,045m\Omega/\square$. A resistividade para as lâminas com $6\mu m$ de espessura do filme situou-se no intervalo $2,1 \pm 0,3 \times 10^{-6}\Omega \cdot cm$. Este valor está bem próximo dos publicados, como por exemplo os resultados de Pinto [5].

A próxima característica analisada foi a aderência do filme ao substrato. Para isto foi construído o dispositivo descrito no item 6.4. Este dispositivo mede a aderência do filme por intermédio de um bloco de metal que é colado sobre a sua superfície. Medindo-se a força necessária para arrancá-lo e sabendo-se a área do bloco, saberemos a aderência do filme, em g/mm^2 . No nosso caso, os valores obtidos, situaram-se entre 280 e $500g/mm^2$, valores bons e perfeitamente suficientes para a aplicação, onde não existem esforços mecânicos dignos de nota.

A outra característica analisada foi a aparência do filme. Com esta análise podemos facilmente descobrir os maiores problemas como problemas de contaminação do substrato, causando má aderência, falhas na evaporação e no engrossamento eletrolítico. A observação foi efetuada com o microscópio modelo 475003 e Nikon modelo Apophot M, com observação em campo claro e escuro nas ampliações em até 20 vezes.

A análise visual, assim como a medida da resistividade, foi realizada em todas as lâminas, enquanto que as medidas de aderência foram realizadas por amostragem do lote.

Após esta caracterização as lâminas são consideradas prontas para o processo de gravação das microlinhas.

4.8 - Foto Gravação das Microlinhas

Ao iniciarmos esta etapa, temos os substratos revestidos nas duas superfícies maiores com duas camadas de cromo, com espessura aproximada de 200\AA , e duas camadas de ouro, colocadas sobre as anteriores, com espessura de 60000\AA ou $6\mu\text{m}$. As camadas de um lado do substrato, permanecerão intactas, enquanto que nas do outro lado, serão formadas as microlinhas de transmissão. Tendo-se realizado o projeto destas linhas conforme descrito no capítulo 2, iniciamos a construção das linhas propriamente ditas. Esta construção pode ser dividida para fins descritivos nas seguintes operações: limpeza das lâminas, deposição do foto-resiste, polimerização do foto-resiste, revelação do foto-resiste, corrosão do ouro, corrosão do cromo, remoção do foto-resiste.

4.8.1 - Limpezas das Lâminas

Para uma boa aderência do foto-resiste, é necessária uma limpeza adequada das superfícies do substrato. Esta limpeza é realizada por intermédio de uma solução de Persulfato de Amônia. Após isto, é feita uma pequena decapagem das camadas superiores de Ouro, emergindo-se a lâmina em uma solu

ção de Iodeto de Potássio e Iodo. Com isto a lâmina está em condições de sofrer a deposição do foto-resiste. O procedimento completo da limpeza é o seguinte:

- 1) Imergir o substrato em uma solução de Persulfato de Amônia 10%;
- 2) Lavar em água deionizada (18 MΩ.cm)
- 3) Imergir o substrato em uma solução constituída por: Iodo-6, 5g; Iodeto de Potássio - 2,8g; Água deionizada-10ml; Alcool Etílico -o necessário para completar 500 ml.
- 4) Lavar em água deionizada (18 MΩ.cm)
- 5) Secagem com jato de Nitrogênio sêco;
- 6) Secagem na boca dos fornos de difusão à temperatura de 150° C.

4.8.2 - Deposição do Foto-resiste

O foto resiste aplicado foi o Kodak Thin Film Resist (KTRF), que é indicado pelo fabricante para aplicações em filmes de ouro. Foram tentados outros foto-resistes como o Kodak Photo Resist (KPR) e o Micro Resist, sem que se obtivesse aderência razoável da camada do foto-resiste ao metal.

As condições de aplicação foram as seguintes: umidade relativa do ar $50 \pm 5\%$, temperatura do ar, $25 \pm 2^\circ$ C. As lâminas foram colocadas na centrífuga de aplicação de foto-resiste, regulada para 3000 RPM durante 30 segundos. O foto resiste foi diluído na proporção recomendada pelo fabricante, filtrado e gotejado na alumina.

Após os 30 segundos necessários à uniformização do

filme, foram retiradas e colocadas em estufa à temperatura de 75°C durante 20 minutos. Temos, portanto, o foto-resiste aplicado em uma das superfícies da lâmina. Devemos repetir o procedimento de aplicação do foto-resiste na outra superfície para completarmos a aplicação. Após a nova aplicação e secagem, podemos proceder à polimerização do foto-resiste.

4.8.3 - Polimerização do K.T.F.R.

A polimerização do foto-resiste também deve ser efetuada em duas etapas, para as duas superfícies da alumina. Esta polimerização foi realizada na Foto-Alinhadora marca Photo Litograf Products modelo 686B do Laboratório de Eletrônica e Dispositivos. O tempo de polimerização é de 5 segundos.

Primeiramente é realizada a polimerização no lado do plano de terra, e portanto a lâmina deve ser colocada na foto-alinhadora sem máscara, para que a luz ultra-violeta atinja toda a superfície da lâmina. Após esta polimerização, é colocada a máscara em H.R.P. descrita no capítulo II.

A seguir, é colocada a lâmina com a outra superfície voltada para a fonte de luz. Procede-se, em seguida, ao alinhamento da máscara com as bordas da lâmina. Quando o alinhamento estiver perfeito, é iniciada a polimerização. Após esta etapa teremos a lâmina com o foto-resiste polimerizado completamente em uma superfície, correspondente ao plano de terra e, na outra, polimerizado nas partes transparentes da máscara, que corresponderão às linhas no circuito final.

4.8.4 - Revelação do K.T.F.R.

Após a polimerização do foto-resiste, falta-nos remover as porções não polimerizadas, para permitir o ataque químico dos metais que estão colocados em baixo. Esta remoção é efetuada por intermédio do revelador de K.T.F.R. Temos então, agora, foto-resiste somente nas partes a serem protegidas do ataque químico, conforme é o nosso interesse. Este foto-resiste é curado em estufa à 75°C durante 30 minutos. Temos, agora a lâmi-

na pronta para a corrosão seletiva do ouro e do cromo.

4.8.5 - Remoção do Ouro

A remoção do ouro é efetuada por intermédio da imersão da lâmina em uma solução de Iodo e Iodeto de Potássio. Muito cuidado deve ser dispensado a esta etapa, principalmente na manipulação, onde deve ser utilizada pinça de plástico para não remover acidentalmente o foto-resiste, e na duração da corrosão que deve ser a mínima possível para evitar-se o under-cut. A constituição da solução é a seguinte: Iodo - 6,5g; Iodeto de Potássio - 2,8g; Água deionizada (18 M Ω) - 10ml; Alcool etílico - o necessário para 50ml de solução. Esta solução permite uma ampla faixa de concentração desde que se mantenha a mesma relação entre o Iodo e o Iodeto de Potássio. Em seguida, procede-se à remoção do Cromo.

4.8.6 - Remoção do Cromo

A remoção do Cromo é efetuada por intermédio da imersão em uma solução de Ferricianeto de Potássio e Hidróxido de Sódio. A realização de solução é a seguinte: preparar uma solução a 33% de Hidróxido de Sódio em água deionizada 18 M Ω (solução 1). Preparar uma solução de 25% de Ferricianeto de Potássio em água deionizada 18M Ω (solução 2). Na hora da realização da remoção misturar uma parte da solução 1 e tres partes da solução 2. A seguir, emergir a lâmina nesta solução até a remoção completa do cromo quando deverá aparecer novamente a superfície da alumina. Teremos então completa a remoção dos metais, e sô nos resta remover o foto-resiste para termos a lâmina pronta.

4.8.7 - Remoção do K.T.F.R

Após a corrosão seletiva do Ouro e do Cromo, podemos retirar o foto-resiste. Esta remoção é efetuada por intermédio do Removedor de Foto-resiste durante 20 minutos à temperatura de 80°C. A seguir lava-se em água deionizada, 18M Ω e seca-se na

estufa. Temos então a lâmina pronta para os testes e medidas, bastando para isto a sua colocação no suporte adequado.

BIBLIOGRAFIA

- |1| Caulton, M. e Sobol, H.; " *Microwave Integrated Circuit Technology - A Survey*"
IEEE Journal of Solid - State Circuits, Vol SC-5
Nº 6, December 1970 292 -303.
- |2| Mattox, D.M., " *Surface Cleaning in thin film Technology.*"
Thin Solid Films, 35 (1978) 81-96
- |3| Scow, k.B.; Thun, R.F.; " *Proceedings Transaction of 9 th National Vacuum Symposium*".
1962, 151
- |4| Sobol, H., " *A review of the technological and electromagnetic Limitations of Hybrid, Circuits for Microwave Applications*". Proceedings IEEE, Fall Electr. Conference. 1971.
- |5| Pinto, J.K.C.; " *Oscilador a diodo tñnel, acoplado a uma microlinha de transmissão*".
Tese de doutoramento, USP 1972.

CAPÍTULO V - TECNOLOGIA DE CONSTRUÇÃO EM COBRE

5.1 - Introdução

Embora o método de deposição de filmes metálicos sobre substratos dielétricos para aplicações em microlinhas seja bem conhecido e seus resultados já amplamente divulgados e testados, até hoje persiste o problema de seu alto custo, intrinsecamente ligado ao custo do evaporador e das matérias primas.

A deposição química dos filmes destinados à confecção de Circuitos Integrados em Microondas (C.I.M) é uma boa alternativa do consagrado método de evaporação. Esta deposição apresenta diversas vantagens, especialmente no que se refere a custos e facilidades de execução.

Segundo Mahapatra e Prasad, [1] podemos esperar valores de perdas em dB até 35% menores das linhas de cobre em relação às de cromo-ouro, para a faixa de frequência deste trabalho, que é em torno de 10 GHz. Outra vantagem do método é que a deposição processa-se nos dois lados do substrato simultaneamente, o que representa grande economia de tempo.

Após a obtenção do filme de cobre, necessitamos executar um processo de eletrodeposição similar ao utilizado no método de evaporação de ouro, não por razões de economia de material, e sim por que o banho utilizado está otimizado para

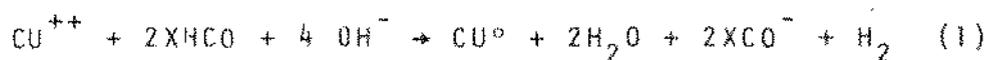
a obtenção de uma espessura de 2,0 μm no substrato de 25,4 mm X 25,4 mm. Esta espessura pode ser aumentada aumentando-se o volume da solução. O metal depositado pode ser o cobre ou o ouro. Porém, como uma das principais razões que fazem deste método uma opção viável em relação ao método de evaporação de ouro é o custo do processo, optamos por analisar o método para a possibilidade mais barata, no caso utilizando o cobre. Os filmes de cobre apresentam a desvantagem de sua maior reatividade química, o que facilita a sua oxidação. Esta desvantagem pode ser contornada pela realização da deposição de uma fina camada de ouro após a obtenção de dispositivo pronto, para eliminar a necessidade da corrosão seletiva entre o cobre e ouro.

A maior desvantagem do método é a menor adesão obtida, mas que não chega a constituir sério obstáculo, pois os valores de aderência encontrados situam-se numa faixa ainda razoável e, nos testes realizados, não foi notado qualquer problema decorrente deste fato.

5.2 - Tipos de Banhos

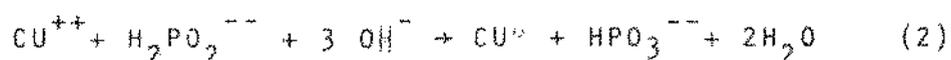
A deposição de cobre no substrato, processa-se por intermédio da redução do cobre em uma solução Alcalina. Esta redução pode processar-se na presença de diferentes agentes, mas os principais e mais conhecidos são: Aldeído, Hipofosfito e Hidrazina.

As reações para os Aldeídos são do tipo:



onde o termo genérico X é o Hidrogênio para os banhos de formaldeído, CH_3 para os de acetaldeído e C_6H_5 para os de benzaldeído.

Para o Hipofosfito teremos:



E, finalmente, com Hidrazina como agente redutor:



Banhos de Aldeídos

A reação geral para os banhos de Aldeídos é a citada acima e dada por (1).

A princípio poderíamos usar os seguintes Aldeídos: Acetaldeído, Benzaldeído e Formaldeído. Porém, o Benzaldeído é insolúvel e, conseqüentemente, não produz depósito. O Acetaldeído é solúvel mas não produz depósitos. O Formaldeído apresenta bons resultados, podendo obter-se taxas de deposição de até 600 mg/h, porém com o aumento desta taxa, a estabilidade e a aderência diminuem. Segundo Fintschenco e Groshart [2] um banho de aldeído pode ser feito com os seguintes reagentes:

Banho I

Sulfato de Cobre (anidro).	20g/l
Hidróxido de Sódio	20g/l
Sal de Rochele	100g/l
Aldeído (X=H, CH ₃ , C ₆ H ₅)	200cc/l

Temperatura de \pm 24°C.

Porém este banho decompõe-se em 120 minutos. A adição de estabilizadores como molibdato de amônia e anidrido acético conseguiu estender a vida do banho para 150 minutos. Este resultado não justifica o emprego destas substâncias. Usando-se soluções mais diluídas, podemos obter um controle mais acurado e, portanto, uma maior estabilidade.

Ainda segundo Fintschenco e Groshart [2] podemos obter tal tipo de banho com:

Banho 2

Sulfato de Cobre	3,6g/l
Hidróxido de Sódio	3,75g/l
Sal de Rochelle	24g/l
Formaldeído	10cc /l

Eles então estudaram o efeito dos componentes do banho na taxa de deposição e, partindo do banho diluído citado acima, variando somente o componente citado, obtiveram as seguintes curvas de variação da taxa de deposição (Figura 1,2 e 3):

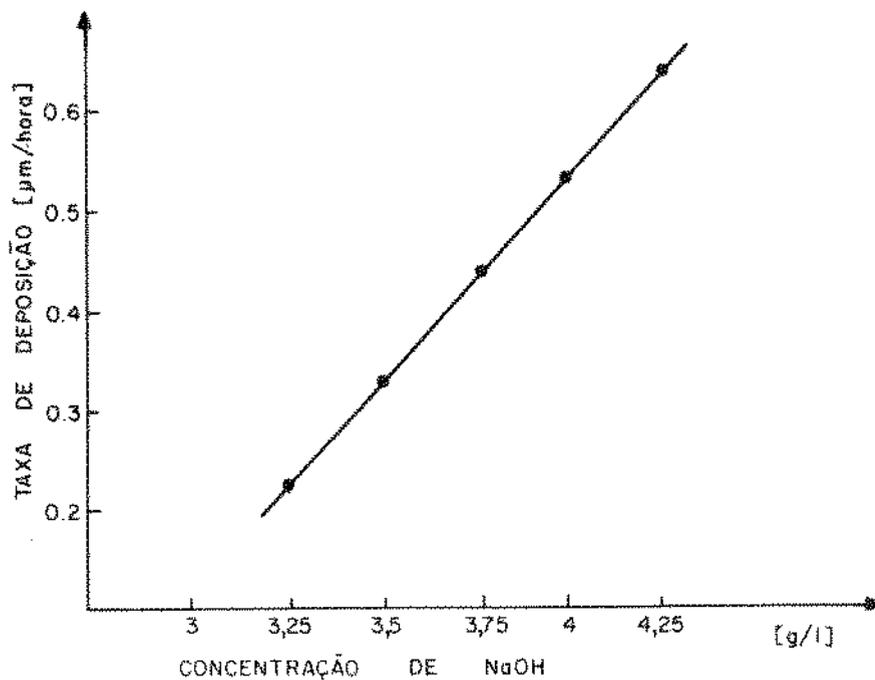


Fig 5.1 - Influência da concentração Hidróxido de Sódio na taxa de deposição para o banho 2 (Resultados por FINTSCHENCO e GROSHART [2]).

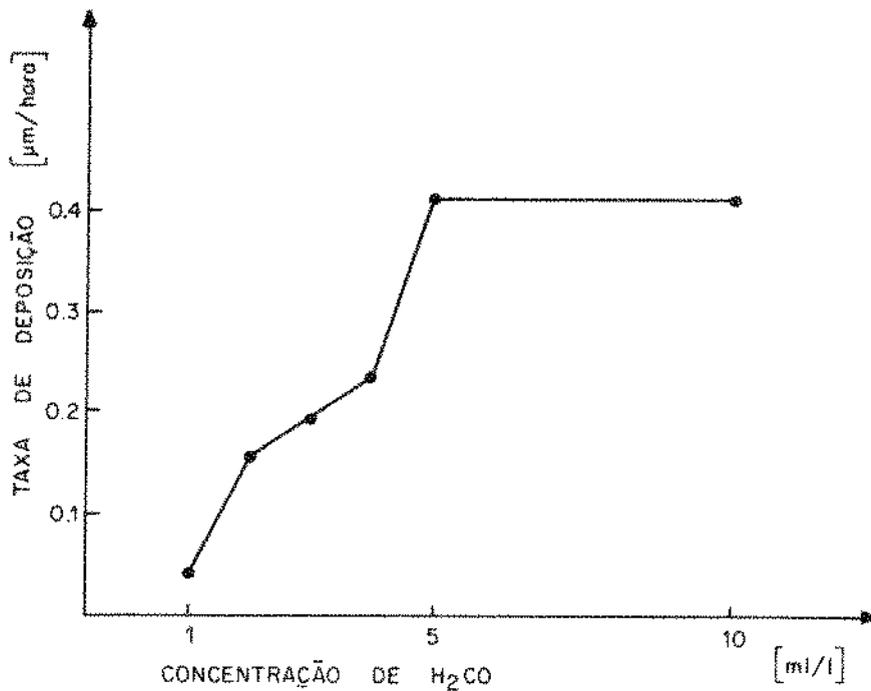


Fig 5.2 - Influência da concentração do Formaldeído na taxa de deposição para o banho 2 (resultados obtidos por FINTSCHENCO e GROSHART |2|).

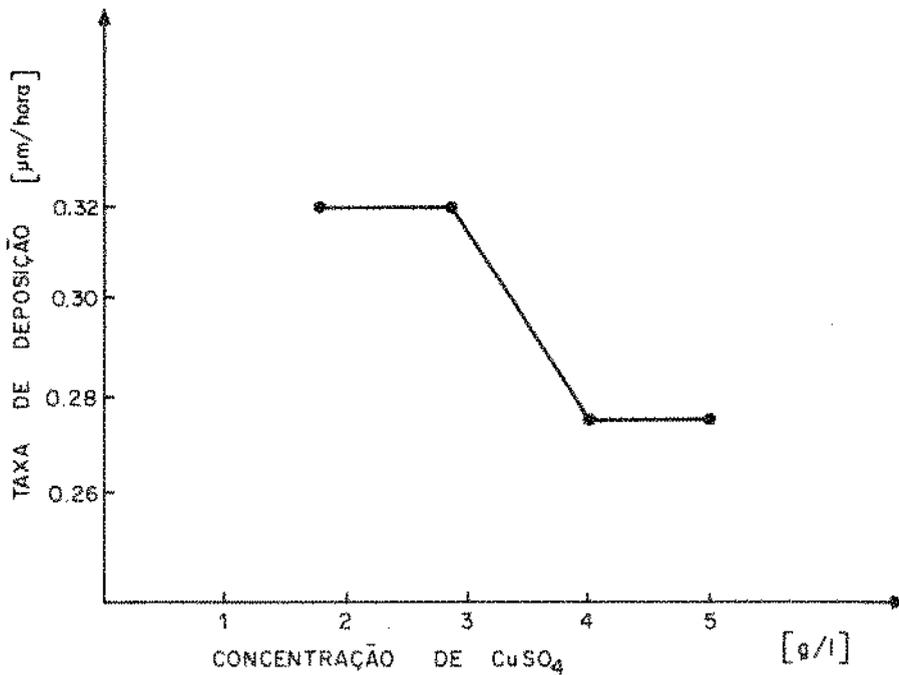


Fig. 5.3 - Influência da concentração do Sulfato de Cobre na taxa de deposição para o Banho 2 (Resultados obtidos por FINTSCHENCO e GROSHART |2|).

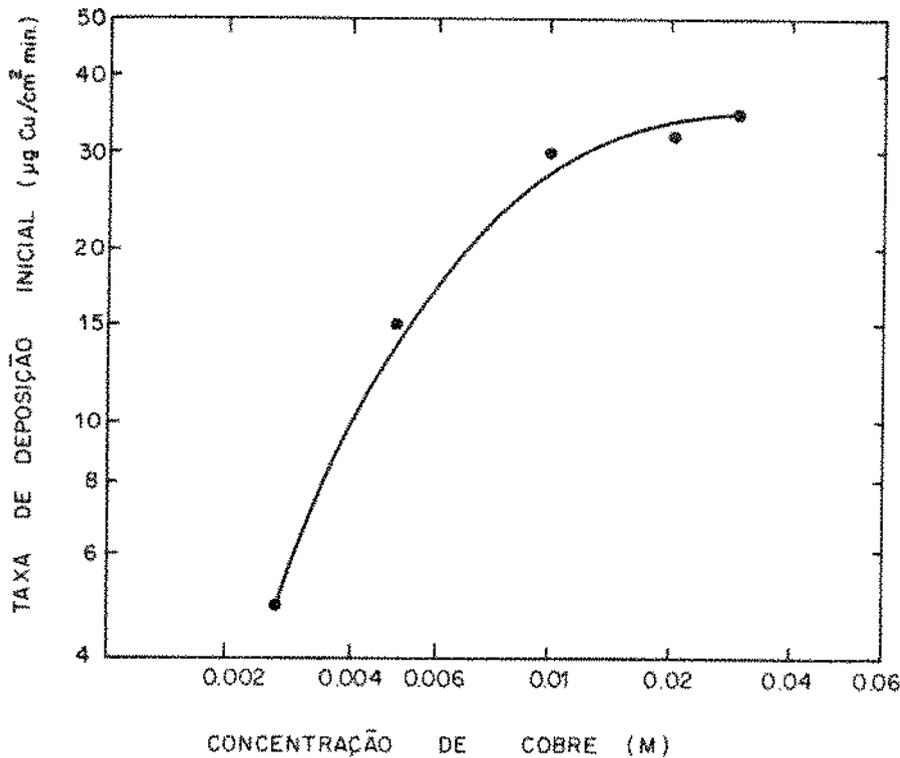


Fig. 5.4 - Taxa inicial de deposição em função da concentração de cobre na solução ($H_2CO = 0,186M$; $NaOH = 0,005M$). Resultados obtidos por Dumesic *et al.* (4).

Podemos notar que o Hidróxido de Sódio é o composto que exerce maior influência para uma maior taxa de deposição, pois a curva resultante da variação do Formaldeído parece estabilizar em algum valor entre 4 e 5 (ml/l), causando uma taxa menor do que a que pode ser obtida com concentrações maiores de Hidróxido de Sódio. Cabe salientar também a grande influência causada por pequenas variações do Hidróxido.

As taxas de deposição obtidas por este método à temperatura ambiente são baixas, da ordem de $0,5\mu m/h$. Esta taxa não permite grande velocidade na deposição das lâminas, pois a espessura ideal é de $2\mu m$, antes do engrossamento eletrolítico.

Segundo BHATGADDE e MAHAPATRA [3] a temperatura exerce também grande influência na taxa de deposição, sendo que para o mesmo tipo de banho, podemos ter taxas de deposição até 48 vezes maiores quando executarmos a deposição do cobre a \pm 98°C, que é faixa de ebulição do banho.

Banhos de Hipofosfito

O Hipofosfito não leva a resultados razoáveis como agente redutor, pois ocorre rápida decomposição. FINTSCHENCO e GROSHART [2] estudaram os banhos de Hipofosfito tentando diversas combinações de íons cúpricos e cuprosos em soluções alcalinas, com concentrações variáveis de Hipofosfito. Nenhuma solução apresentou resultados satisfatórios.

Banhos de Hidrazina.

Os banhos de Hidrazina apresentam resultados razoáveis, porém não são usados por causa dos melhores resultados obtidos com os banhos de Formaldeído. Um banho típico de Hidrazina é o seguinte:

Cloreto Cúprico	20g/l
Hidrazina (30%)	5ml/l
Hidróxido de Amonia	50ml/l
Tartarato de Sódio	50g/l
Fosfato de Sódio	10g/l
Molibdato de Amonia	0,49g/l

Esta solução apresenta taxas de deposição entre 0,5 e 1,27 μ m por hora. O Fosfato de Sódio tem influência decisiva na estabilidade do banho pois somente banhos com concentração abaixo de 20g/l, são estáveis por mais de 8 horas. O Molibdato de Amonia é um agente estabilizador, e não influencia na taxa de deposição. Com a adição deste agente, o banho apresenta-se estável pelo dobro do tempo sem a sua presença.

Influência dos Componentes na taxa de Deposição:

Durante a deposição do cobre, podemos considerar o processo como constituído de duas partes principais: A deposição inicial e a final. Isto é feito para o estudo da taxa de deposição, que não é constante, e o mesmo componente da reação pode influir de maneira diversa durante estas duas fases.

A concentração inicial de cobre influencia de maneira não linear na taxa de deposição, enquanto que a concentração final exerce influência linear sobre a taxa, conforme podemos verificar nas figuras 4 e 5. O Formaldeído influencia a taxa de deposição somente na sua fase inicial conforme mostra a figura 6. Na fase final o formaldeído não apresenta influência sobre a velocidade de deposição. O Hidróxido exerce influência maior na fase inicial da deposição, decaindo com o andamento do processo, mas ainda influenciando decisivamente ao final, conforme mostram as figuras 7 e 8.

Devemos salientar que todas as taxas são dependentes do pH, e que a sua faixa ideal situa-se entre 11,3 e 11,9.

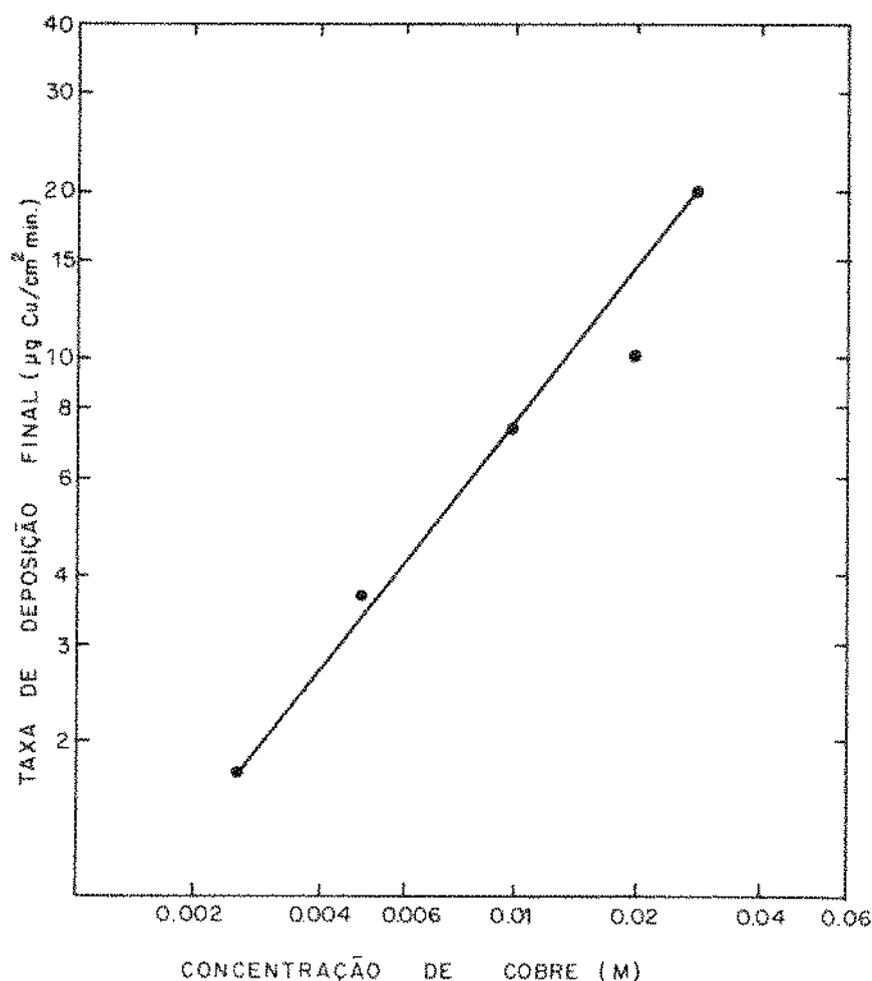


Fig. 5.5 - Taxa final de deposição em função da concentração do cobre na solução ($H_2CO = 0,0186M$; $NaOH = 0,005M$).
 (Resultados obtidos por Dumesic et al [4]).

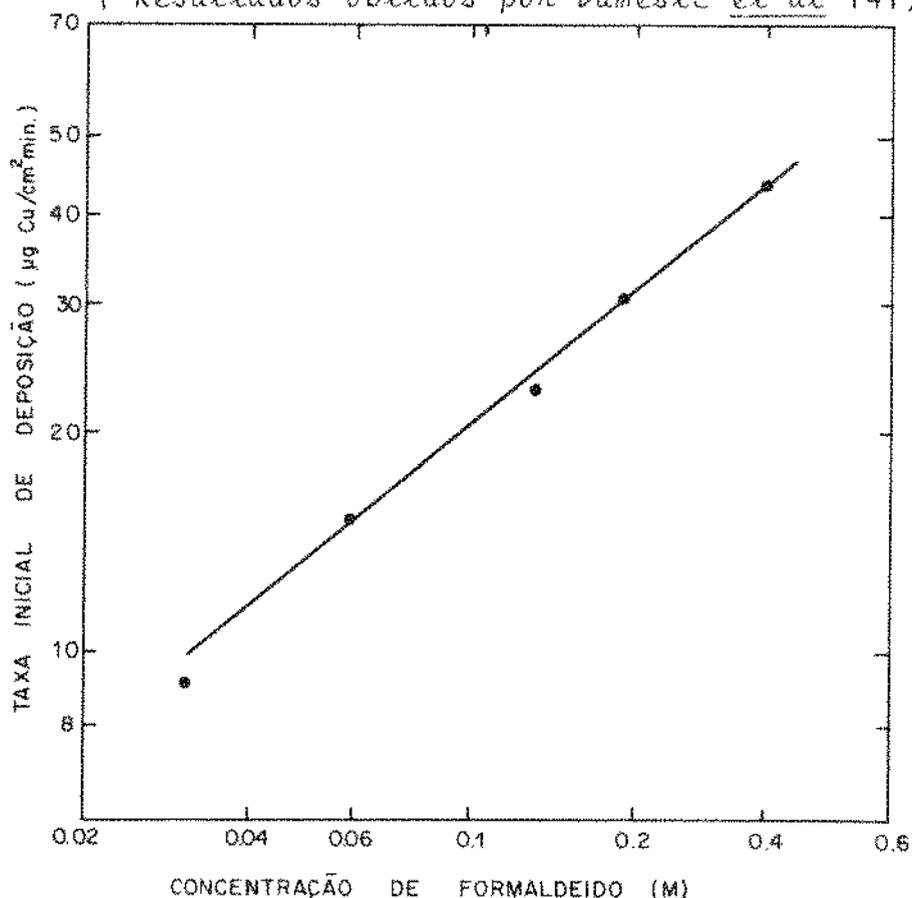


Fig. 5.6 - Taxa inicial de deposição em função da concentração do Formaldeído na solução ($CuSO_4 = 0,2M$; $NaOH = 0,005M$).
 Resultados obtidos por Dumesic et al. [4]).

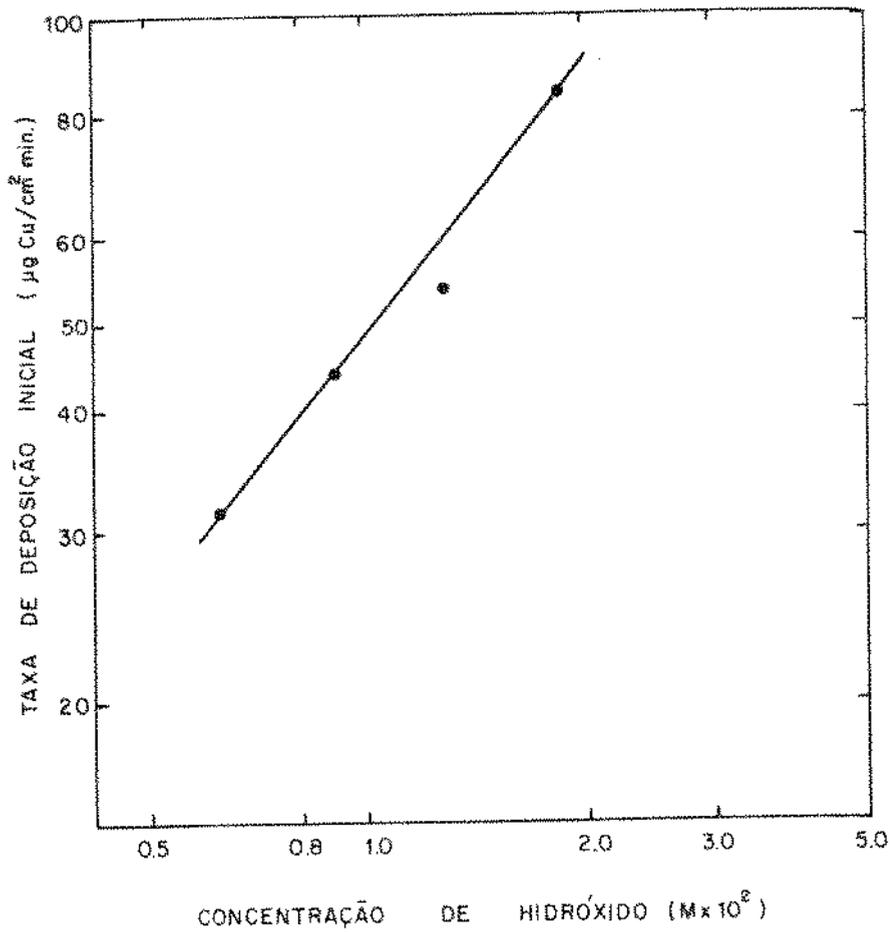


Fig. 5.7 - Influência da concentração inicial do Hidróxido de Sódio na taxa de deposição ($\text{CuSO}_4 = 0,02\text{M}$; $\text{H}_2\text{CO}_3 = 0,186\text{M}$).
Resultados obtidos por Dumesic *et al.* [4]).

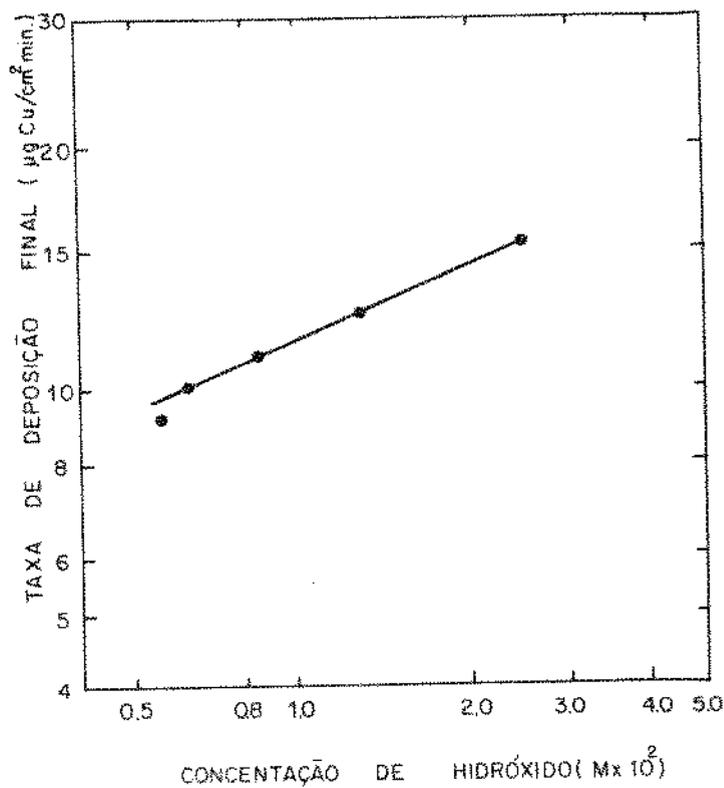


Fig.5.8 - Influência da concentração final do Hidróxido de Sódio na taxa de deposição ($\text{CuSO}_4 = 0,02\text{M}$; $\text{H}_2\text{CO} = 0,286\text{M}$).

Resultados obtidos por Dumesic et al. [4]).

Reações:

O processo utilizado neste trabalho é o recomendado por Bhatgadde e Mahapatra [3]. E a seguinte a constituição das soluções:

Banho 3

Parte 1

Sulfato de Cobre	5g
Sal de Rochelle	11g
Hidróxido de Sódio	2,3g
Água Deionizada	1000ml

Parte 2

Formaldeído (37 -40%)	20ml
Água Deionizada (18MΩ)	980ml

Na hora de utilização do banho toma-se 50 ml da Parte 1 e 10ml da Parte 2. A lâmina é colocada nesta mistura, que é aquecida até o ponto de ebulição, 95°C. Neste processo, os inconvenientes da rápida decomposição do banho são reduzidos, mantendo-se as duas partes do banho separadas até a hora da utilização.

A reação 1 pode ser dividida em termos iônicos para indicar o papel de cada componente do Banho.

4 moles de Hidróxido de Sódio: 2 moles de Formaldeído.

A sensibilização da lâmina é obtida mergulhando-a em solução a 0,2% de Cloreto Estanhoso.

Banho 4

Cloreto Estanhoso	2g
Ácido Clorídrico	5ml
Água Deionizada	995ml

Após a imersão da lâmina nesta solução, haverá um depósito de SnCl_2 na sua superfície. Este Cloreto Estanhoso reagirá com o Cloreto de Paládio contido na solução da camada ativadora:

Banho 5

Cloreto de Paládio	1g
Ácido Clorídrico	5ml
Água Deionizada	995ml

obtendo-se um depósito final de Paládio:



Cuidado deve ser tomado na pesagem do Hidróxido de Sódio pois sendo um composto higroscópico, o peso real do composto ativo será menor, o que influe decisivamente no desempenho do processo.

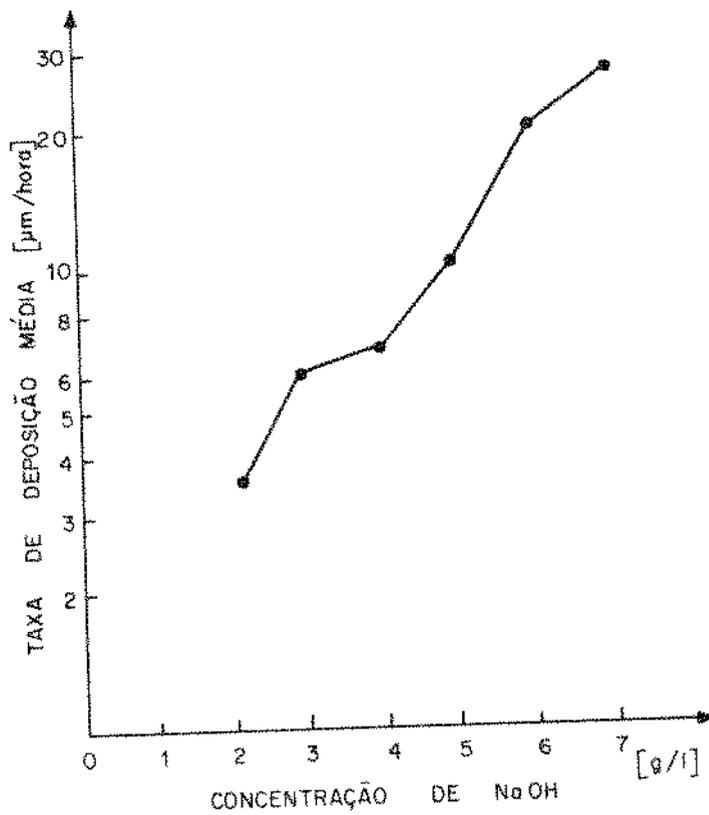


Fig. 5.9 - Curva da taxa de deposição a 95-98°C em uma lâmina de 2 x 1 polegadas versus concentração de NaOH na solução 3. (obtida por Bhatgadde e Mahapatra^[3]).

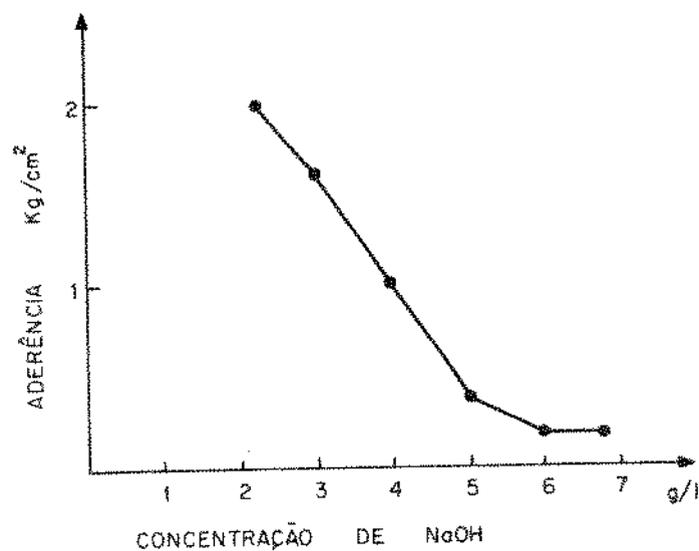


Fig. 5.10 - Curva de aderência versus concentração de NaOH na solução 3. (obtida por Bhatgadde e Mahapatra^[3]).

5.3 - Deposição do Cobre

Nesta etapa, veremos como foi executado o crescimento do filme de cobre nas lâminas de alumina. Na figura 11 mostramos a sequência utilizada neste método.

Normalmente, parte-se para a deposição, com lâminas sem depósito prévio de cobre. Porém se estivermos reutilizando alguma lâmina que foi rejeitada na caracterização do filme, devemos proceder inicialmente à remoção da camada original. Isto é feito com a seguinte sequência:

- 1 - Colocar a lâmina em ácido nítrico concentrado para remover o cobre.
- 2 - Lavar em água deionizada.
- 3 - Remover o paládio remanescente na lâmina mergulhando-a em uma solução de ácido nítrico 1:3 ácido clorídrico.
- 4 - Lavar em água deionizada.

Se o substrato for novo, devem-se seguir os seguintes passos:

- 1 - Desengordurar em tricloroetileno ou "Freon TF".
- 2 - Colocar em uma solução constituída de:

Carbonato de Sódio	25g
Trifosfato de Sódio	25g
Água deionizada	1000ml

- 3 - Lavar em água deionizada
- 4 - Para neutralizar as impurezas alcalinas colocar em uma solução 33ml/l de ácido clorídrico.

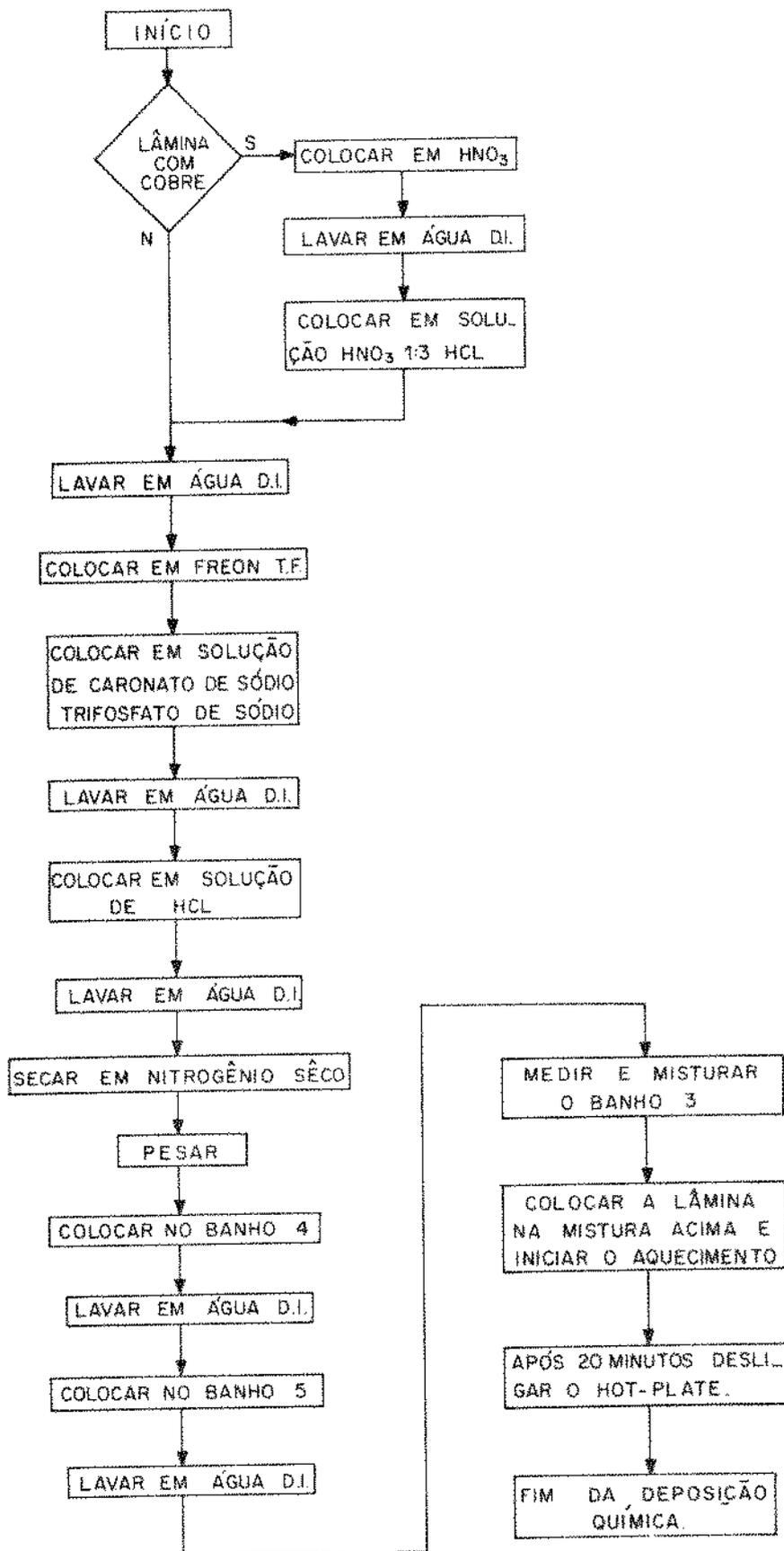
5 - Lavar em água deionizada.

Após estes procedimentos de preparação da lâmina, podemos passar para a deposição propriamente dita. O próximo passo é a sua sensibilização. Isto é feito mergulhando a lâmina no banho 4 por um minuto. A seguir deve-se lavá-la bem em água deionizada. Isto é necessário para assegurar a remoção completa dos íons estanhos das superfícies. Pode ser tentado o uso da água com 0,5 a 2,5 ml de ácido clorídrico (37%) por litro de água. Esta remoção dos íons estanho é necessária pois, a presença destes íons na solução ativadora, pode resultar na sua contaminação e perda da eficiência. Após a lavagem, deve-se mergulhar a lâmina no Banho 5, por um minuto, para realizar a ativação.

Em seguida lavar em água deionizada. Temos agora a lâmina já com a deposição do paládio necessário para a reação do cobre. Podemos resumir os passos desta etapa da seguinte maneira:

- 1 - Pesar a lâmina em balança com resolução mínima de 0,000001 g.
- 2 - Colocar a lâmina no Banho 4 por um minuto
- 3 - Lavar bem em água deionizada.
- 4 - Colocar a lâmina no Banho 5 por um minuto.
- 5 - Lavar em água deionizada.

A seguir deve-se medir 50 ml da parte 1 do banho 3 e 10 ml da parte 2. Misturam-se estas soluções, e coloca-se em um bequer de 100 ml. A lâmina deve ser colocada dentro deste bequer de modo que fique em uma deposição quase vertical, apoiando-se nas paredes laterais do copo. Isto é necessário para que haja uma melhor distribuição do cobre depositado sobre a superfície da lâmina de alumina.



OBS: D.I. = DEIONIZADA

Fig. 5.11 - Diagrama em blocos do processo de deposição química.

Deve-se iniciar o aquecimento deste conjunto, de preferência por intermédio de um "Hot Plate". Deve-se regular a potência deste aquecedor para que a solução leve em torno de 10 minutos para entrar em ebulição. Esta ebulição dá-se em torno de 95°C. Após uns quatro minutos de aquecimento começam-se a notar as primeiras manchas marrons no substrato. São as primeiras ilhas de cobre se formando na sua superfície.

Aproximadamente quinze minutos depois a deposição estará completa. Podemos verificar as diversas fases da deposição pelas cores que o banho apresenta durante o transcorrer do processo. Falaremos sobre isto no ítem seguinte. Para aumentar a espessura do filme devemos aumentar o volume de banho 3 utilizado.

No fim da deposição deve-se retirar o bequer de cima do "Hot-Plate" e esfriá-lo lentamente. Teremos então a lâmina pronta para o engrossamento eletrolítico.

5.4 - Problemas Envolvidos na Deposição

De um modo geral, todas as soluções químicas envelhecem, porém, as envolvidas neste trabalho, apresentam um envelhecimento rápido. Isto prejudica o bom andamento dos trabalhos. De um modo geral, as soluções que foram usadas na deposição têm uma vida útil superior a quatro dias. A solução sensibilizadora é a que apresenta maiores problemas, porém a sua vida pode ser estendida colocando-se um pedaço de Estanho puro na solução.

A solução ativadora de Cloreto de Paládio, não apresentou envelhecimento sensível em dez meses. Cuidado especial deve ser dispensado ao Formaldeído. Devem ser usadas soluções (37 -40%) que tenham na sua constituição 10% de Etanol como agente conservador.

Quanto ao esgotamento das soluções, não mostrou-se crítico pois se fizeram 20 deposições com os mesmos 100 ml das soluções sensibilizadora e ativadora sem problemas. Isto refletiu-se no custo do processo, pois o Cloreto de Paládio apresenta

atualmente um custo de Cr\$ 1000 por grama, mas esta quantidade permite, no mínimo, 200 deposições.

5.4.1 - Deposição Lateral do Cobre

Por este método toda a superfície da alumina é revestida. Isto acarreta um problema que é a remoção do cobre nas superfícies laterais da lâmina.

Ao ser aplicado o fotoresiste com a lâmina colocada na centrífuga (Spinner) pode haver a deposição de fotoresiste nestas superfícies também. Se a polimerização ocorrer nestas partes, não se conseguirá obter a remoção do cobre, causando problemas ao funcionamento do dispositivo. Devem ser usadas máscaras que não permitam a sensibilização luminosa nestas áreas, de modo que o fotoresiste saia normalmente durante a revelação.

5.4.2 - Controle da Temperatura

Quando se executa o processo, deve ser tomado cuidado com a quantidade de calor empregada. Uma ebulição muito violenta causa desfolhamento fácil do filme. Normalmente, após algumas deposições, determina-se facilmente a temperatura a que deve ser ligado o "Hot-Plate", onde é colocada a solução.

O tempo de aquecimento até a ebulição deve ser da ordem de dez minutos. O tempo total de deposição varia com a concentração de Hidróxido de Sódio. Quanto maior a concentração, menor o tempo requerido. Para o Banho 3, o tempo total é de 20 minutos. A cor do banho inicialmente é azul médio, mas quando a deposição começa ela muda rapidamente para verde, chegando a marron no fim da deposição. Se prolongarmos mais o tempo, a solução chegará a ficar quase transparente. O ideal é parar o processo quando a solução estiver marron claro.

5.4.3 - Retirada da Lâmina após o Banho

Imediatamente após o Banho , o Cobre mostra-se com muito pouca resistência mecânica e é facilmente marcado por qualquer objeto que encoste na superfície.

Deste modo, o Becker, com a solução e a lâmina ainda no seu interior, deve ser colocado em uma torneira, de modo que somente um pequeno fluxo de água caia no interior. Este pequeno fluxo é necessário para que a lâmina seja lentamente esfriada. São depois de 5 minutos é que podemos segurá-la com a pinça, sem prejuízos ao cobre.

5.5 - Caracterização Prévia do Filme

Após a obtenção da lâmina, com o cobre depositado quimicamente, devemos efetuar uma caracterização deste depósito, para detectarmos possíveis problemas ocorridos. O mais frequente destes problemas é uma deposição com espessura insuficiente. Isto é detectado efetuando-se a repesagem da lâmina.

Segundo Blum e Hozaboom, [5] podemos aplicar a seguinte fórmula para obtermos a espessura do depósito:

$$\text{Espessura } (\mu\text{m}) = \frac{\Delta m(\text{g}) \times 1120}{\text{Área } (\text{cm}^2)}$$

Como no caso estamos utilizando substratos de 25,4 X 25,4 mm a fórmula fica:

$$\text{Espessura } (\mu\text{m}) = \Delta m(\text{g}) \times 87.$$

Portanto, para a espessura desejada de 2 μm , deveremos ter uma variação de massa em torno de 0,023g.

O próximo passo é a medida de resistividade. Utilizando-se o miliohmetro Keitley medimos, pelo processo das quatro pontas, a relação V/I e encontramos o valor 2,5 \pm 0,2 m Ω . Isto nos dá, para a resistência específica, valores compreendidos no intervalo 11,33 \pm 0,9 m Ω /□, que correspondem a uma resistivi-

dade de $2,2 \pm 0,18 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, para a espessura de $2 \mu\text{m}$.

A espessura do filme ($2 \mu\text{m}$) é insuficiente para a realização do teste de aderência, mas é feita uma cuidadosa verificação da superfície com os microscópio ZEISS modelo 475003 e NIKON modelo APOPHOT M nas ampliações até 15 vezes. Encontrando-se qualquer defeito na superfície, a lâmina deverá ser rejeitada, efetuando-se a remoção do cobre conforme descrito no item 5.3 e reutilizando-a.

5.6 - Engrossamento Eletrolítico

Pela deposição química, obtemos um filme de cobre de espessura média de $2 \mu\text{m}$. É necessário portanto, um engrossamento eletrolítico até chegarmos a uma espessura mínima de 5 vezes a profundidade pelicular da onda no material considerado, que é $0,8 \mu\text{m}$. Deste modo devemos ter uma espessura de $4 \mu\text{m}$.

Como neste caso, um aumento significativo da espessura não acarreta aumento significativo do custo do processo, ao contrário do que ocorre com os filmes de ouro, optou-se por uma espessura de $7 \mu\text{m}$.

Este engrossamento é obtido por intermédio do seguinte banho:

Banho 6

Sulfato de cobre	250g
Ácido Sulfúrico	15ml
Água Deionizada (18mΩ)	100ml

O ácido retira a camada de óxido que se forma na superfície do cobre ao terminar-se a deposição química. Operando-se este banho com 2 anodos de Cobre eletrolítico de 200 cm^2 de área em contato com a solução, obtemos um espessamento de $5,5 \mu\text{m}$ para uma corrente de 150mA durante 25 minutos e área espessada de $51,6 \text{ mm}^2$.

O aparelho utilizado neste engrossamento foi o mesmo utilizado no engrossamento dos filmes de ouro. As modificações necessárias são as seguintes: a) troca de anodos de titânio por cobre eletrolítico; e b) a solução eletrolítica, no caso o banho 6, deve ser utilizada a $25 \pm 5^\circ\text{C}$. Portanto, é desnecessário o seu aquecimento. A agitação continua sendo necessária para uma boa uniformidade do filme. Com isto, obtemos as lâminas com revestimento de cobre na espessura adequada para a construção das microlinhas.

5.7 - Caracterização Final do Filme

Após o engrossamento eletrolítico do filme é a hora de fazer a caracterização completa da camada de cobre. Esta caracterização é feita para as seguintes características: Espessura, resistividade, aderência e aspecto da camada. A espessura, a exemplo do que foi feito na caracterização prévia, ítem 5.5, é avaliada pela variação de massa da lâmina. Toma-se a massa inicial e, medindo-se a massa final, pode-se avaliar a espessura final do filme, aplicando-se o valor da variação da massa (Δm) na seguinte fórmula, segundo Blum e Hogaboon [5]:

$$\text{Espessura (} \mu\text{m)} = \Delta m \text{ (g)} \times 87.$$

Portanto, para a espessura final desejada ($7\mu\text{m}$), a variação da massa de uma lâmina de $25,4 \times 25,4$ mm deverá ser de 0,08g. Como esta espessura está superdimensionada pois, o mínimo necessário, conforme foi mostrado no ítem 5.6, é $4\mu\text{m}$ podemos tolerar espessuras menores que as desejadas, até um valor que depende da finalidade do filme e do critério aplicado. No nosso caso podemos tolerar espessuras calculadas de até $5\mu\text{m}$ para deixarmos uma margem de segurança para o processo de avaliação da espessura.

A próxima característica avaliada é a resistividade. Aqui também foi utilizado o método das quatro pontas para medirmos a relação V/I . Os valores encontrados situaram-se no intervalo $0,65 \pm 0,05\text{m}\Omega$ que, para a geometria e espessura do fil-

me, correspondem a valores da resistência específica de $2,9 \pm 0,22 \text{ m}\Omega/\square$ e a resistividade de $2,06 \pm 0,16 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$.

Após o engrossamento eletrolítico, o aparelho medidor descrito no item 6, já permite a medida da aderência do filme. O procedimento utilizado foi o mesmo descrito no item e chegou-se a um valor da aderência de $25 \pm 5 \text{ g/mm}^2$. Este valor está bem abaixo, aproximadamente 10%, do valor encontrado para os filmes obtidos por evaporação, de cromo e ouro ($\sim 250 \text{ g/mm}^2$). Porém, testes realizados não apontaram qualquer problema causado por esta característica. Parece-nos mais o caso de ser um excelente valor para o filme de ouro do que um mau valor para o filme de cobre.

A análise da qualidade da superfície também foi efetuada pelos mesmos microscópios utilizados nas caracterizações anteriores e foi notado um índice pequeno de rejeições, aproximadamente 5% das lâminas processadas.

5.8 - Aplicação do Foto-Resiste

O foto-resiste utilizado foi o KODAK Photo Resist (KRP), indicado pelo fabricante para aplicações em filmes de cobre. Este foto-resiste não exige condições de aplicação tão controladas como no caso do foto-resiste utilizado nos filmes de ouro (KTFR).

A preparação das lâminas antes da aplicação também é mais simples, sendo necessária apenas uma decapagem das camadas exteriores do filme, para retirarmos o óxido de cobre que provavelmente se acumulou na superfície. A aplicação é realizada na centrífuga. O procedimento completo da preparação para aplicação do KPR é o seguinte:

- 1 - Imergir em uma solução a 15ml/l de ácido sulfúrico durante quinze segundos.
- 2 - Lavar em água deionizada
- 3 - Secar com nitrogênio seco

- 4 - Colocar na boca do forno de difusão a 100°C e fluxo de nitrogênio de 2l/min, durante 30 minutos.

Após estes procedimentos, a lâmina está pronta para a aplicação do KRP. A sequência completa da aplicação do foto-resiste é a seguinte:

- 1 - Colocar a lâmina na centrífuga
- 2 - Gotejar o KPR até cobrir completamente a lâmina.
- 3 - Girar a alumina a 3000RPM durante 30 segundos.
- 4 - Retirar a lâmina e secar em estufa a 80°C durante 30 minutos.

Após a secagem, deve-se repetir os procedimentos 1 a 4 para sensibilizar a outra face da alumina. Assim, teremos a lâmina sensibilizada e pronta para a polimerização do KPR.

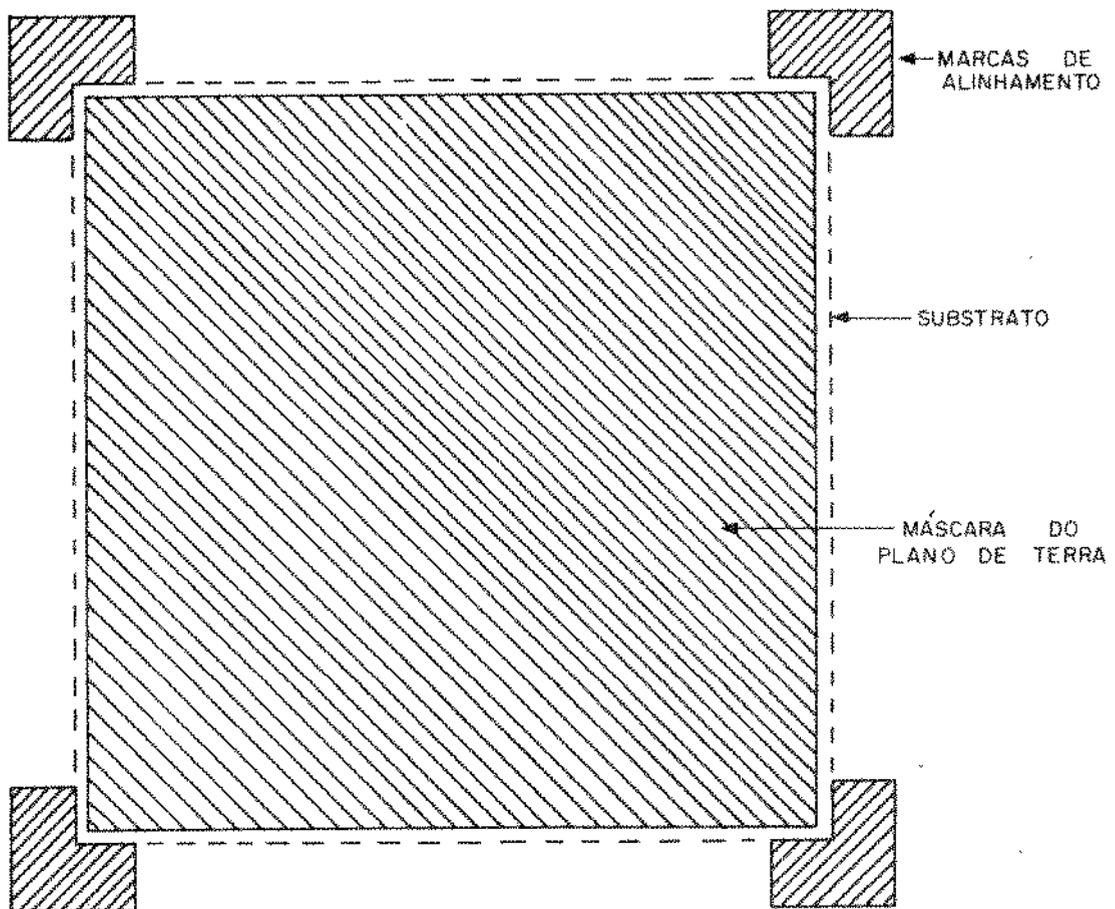
5.9 - Polimerização do KPR

A polimerização do KPR é realizada na foto alinhadora marca Photo-Lithograph Products modelo 686 B do laboratório de Eletrônica e Dispositivos. Neste ponto existe uma diferença grande em relação ao método de evaporação.

Durante a evaporação, a deposição processa-se somente nas duas superfícies maiores do substrato. Porém, na deposição química, toda a lâmina é revestida por cobre havendo a necessidade da remoção do depósito das superfícies laterais para que não haja problema de curtos entre as linhas e o plano de terra, ou que o plano de terra prolongue-se por estas superfícies causando uma aparente diminuição na espessura do substrato, o que iria alterar completamente as características calculadas para o circuito. Como na aplicação do KRP normalmente escorre um pouco para estas superfícies laterais e a fonte de luz ultra-violeta da foto-alinhadora não é pontual, o foto-resiste ali deposi-

tado é polimerizado protegendo o cobre da corrosão e fazendo com que no dispositivo final ainda exista cobre nestas áreas causando os problemas descritos acima.

Para evitarmos isto, é necessário o uso de uma máscara também para o plano de terra que impede a polimerização do foto-resiste nas proximidades das bordas. Deste modo, no dispositivo final, o plano de terra é um pouco menor do que a alumina. A figura 12 nos mostra esta máscara e a figura 13 nos mostra a forma do plano de terra obtido.



OBS: AS ÁREAS HACHURADAS CORRESPONDEM ÀS PARTES OPACAS DA MÁSCARA.

Fig. 5.12 - Máscara em High Resolution Plate utilizada para a polimerização do foto-resiste do plano de terra.

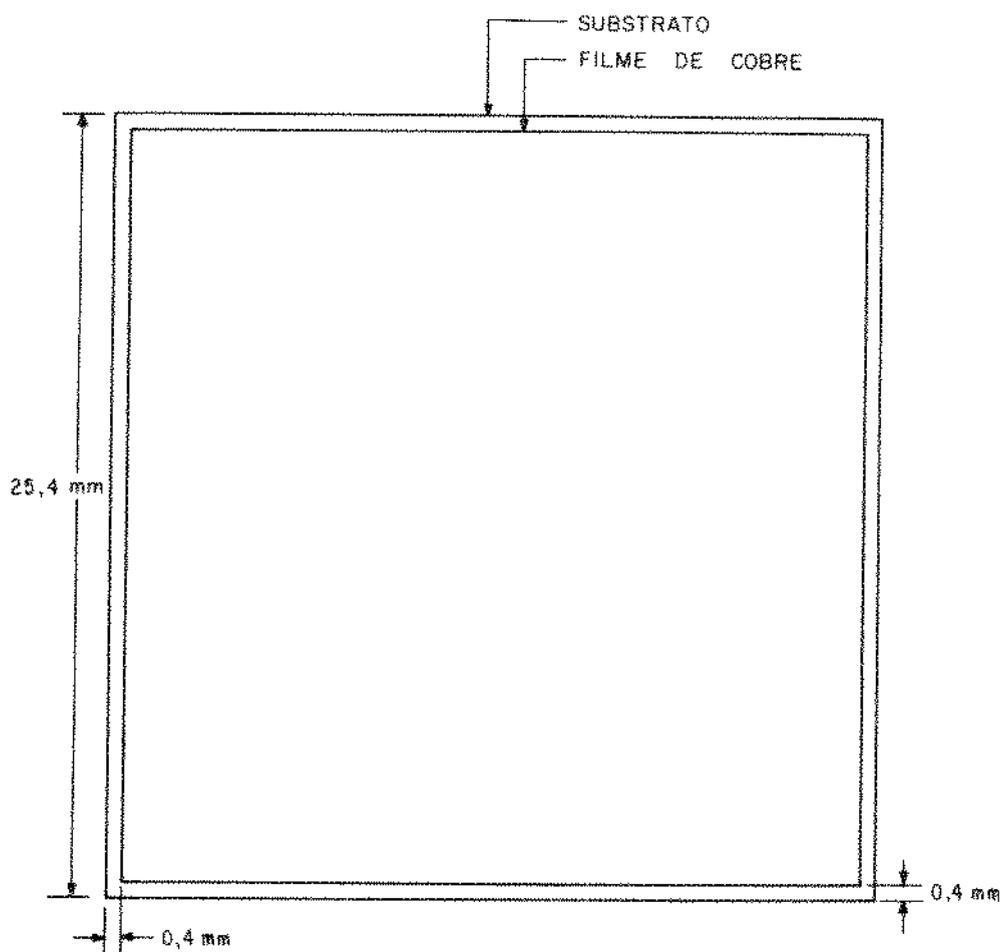


Fig. 5.13 - Forma do plano de terra obtido com o uso da máscara mostrada na figura 5.12.

Então, para a polimerização do KPR, o procedimento é o seguinte:

- 1 - Colocação da máscara HRP do plano de terra na foto-alinhadora.
- 2 - Colocação da lâmina com o KPR.
- 3 - Exposição à luz ultra-violeta durante 5 segundos.
- 4 - Remoção da máscara HRP do plano de terra.
- 5 - Colocação da máscara das linhas
- 6 - Mudança do lado da lâmina.

7 - Exposição à luz ultra-violeta durante 5 segundos.

8 - Colocação da lâmina em estufa à 80°C durante 30 minutos.

Teremos então a lâmina com o foto-resiste polimerizado nas duas superfícies maiores. Devemos efetuar agora a revelação do foto-resiste.

5.10 - Revelação do K.P.R

Após a polimerização, devemos retirar o foto-resiste que não foi polimerizado. Isto é, aquele que ficou protegido pelas mascaras. Isto é feito imergindo-se a lâmina no revelador de KPR.

Assim, teremos o KPR somente nas áreas que queremos proteger do ataque químico ao cobre. O próximo passo é a remoção do cobre nas áreas não protegidas.

5.11 - Corrosão do Cobre

No método de deposição química de cobre o procedimento de corrosão é mais simplificado por não necessitar da corrosão seletiva, isto é, corrosivos específicos para as diversas camadas de metais diferentes. Aqui, a única camada é a de cobre e ele é removido imergindo-se a lâmina em uma solução de Percloroeto Férrico. O procedimento utilizado é o seguinte:

- 1 - Imergir a lâmina em uma solução de Percloroeto Férrico 500g: 1000 ml de água deionizada aquecida a 50°C.
- 2 - Lavar em água deionizada
- 3 - Secar com jato de Nitrogênio seco.

Deve-se cuidar muito ao se colocar e retirar a lâmina da solução para que não ocorram danos ao foto-resiste. Devem ser utilizadas pinças de plástico para evitar-se arranhões.

Ao término da Etapa I deveremos ter a alumina completamente sem cobre a menos dos locais desejados.

5.12 - Remoção do KRP

Após o término da corrosão do cobre, devemos retirar o foto-resiste que protege as linhas recém construídas. Isto é efetuado por intermédio do removedor de foto-resiste. O procedimento utilizado é o seguinte:

- 1 - Imergir a lâmina no removedor de foto-resiste.
- 2 - Lavar a lâmina em água deionizada.
- 3 - Secar em jato de Nitrogênio seco.

Temos agora a Microlinha pronta. O próximo passo é a medição das características do circuito.

BIBLIOGRAFIA

- |1| - S. Mahapatra e S.N. Prasad." A New Electroless method for low-loss Microwave Integrated Cicuits" IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, CHMT-1 n° 4, December 1978.
- |2| - P. Fintschenko e E.C. Groshart." Electroless copper plating". Metal FINISHING, January 1970.
- |3| - L.G. Bhatgadde e S. Mahapatra." Improved Technique of Electroless Copper Coating of Alumina Sustrates". Metal FINISHING, December 1977.
- |4| - J. Dumesic, J.A. Koutsky e T.W. Chapman. " The rate of electroless Copper deposition by Formadehyde Reduction". J. Electrochemical Society, November, 1974. Pag.1405.
- |5| - Blum, W. e Hogaboon, G,B."Principles of Electroplating & Electroforming" Mc Graw Hill Book Co. INC. p 104 (1949).

CAPÍTULO - VI - EQUIPAMENTOS CONSTRUÍDOS PARA O TRABALHO

6.1 - Introdução

Para a realização deste trabalho, foi necessária a construção de alguns aparelhos para permitir a obtenção dos resultados são eles:

- Suporte para colocação das lâminas no evaporador;
- Cuba para banhos eletrolíticos provida de aquecimento e agitação;
- Medidor de aderência de filmes;
- Suporte para testes e medidas dos dispositivos.

Eles foram necessários tendo em vista as condições específicas do trabalho que exigiram acessórios específicos para a atividade, mas que podem perfeitamente ser utilizados em outras atividades envolvendo filmes finos. É o caso do medidor de aderência de filmes, que se presta à medida da aderência de filmes obtidos por qualquer outro método e também sobre outros tipos de substrato.

A cuba para banhos eletrolíticos nos dá as condições ideais para a realização da eletrodeposição do ouro permitindo porém, a sua utilização com qualquer outro metal que possa ser depositado galvanicamente.

Substratos de várias dimensões, podem ser utilizados bastando para isso trocar-se a peça suporte.

6.2 - Suporte de Lâmina para o Evaporador

Durante a primeira parte das experiências deparámo-nos com a necessidade da realização de um suporte para a colo-cação das lâminas no evaporador que não fizesse sombras tão pronunciadas no filme como os normalmente utilizados. Era con-dição essencial a obtenção do filme em boas condições na posi-ção mediana do lado das lâminas para permitir o contato com os conectores que geralmente são colocados nesta região. A solu-ção escolhida foi a de segurar-se a lâmina pelos vértices, re-giões onde não é importante a obtenção de um filme uniforme.

O suporte constituído de uma base quadrada de 30 mm de lado, foi construído totalmente em aço inoxidável para evi-tar-se problemas de contaminações do evaporador.

Fixo a cada vértice é colocado um fio, também de aço, que ter-mina formando um círculo de 2mm de diâmetro, onde se encaixa um dos vértices do substrato. Desta forma, é feita a fixação pelos quatro vértices da lâmina. Esta montagem, mostrada na Fig.1, demonstrou ser resistente o suficiente para suportar a lâmina, apesar das vibrações que ocorrem normalmente na opera-ção do evaporador.

Após a colocação do substrato neste suporte, o con-junto é fixado na calota esférica superior do evaporador por intermédio dos grampos normalmente utilizados para a fixação de peças no evaporador.

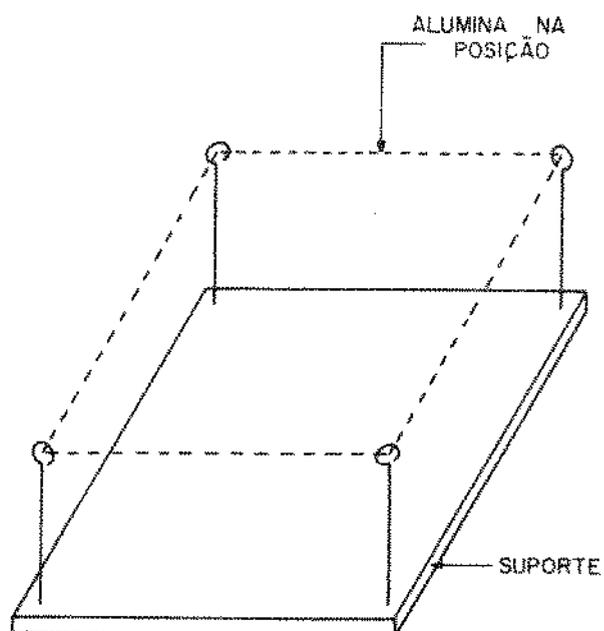
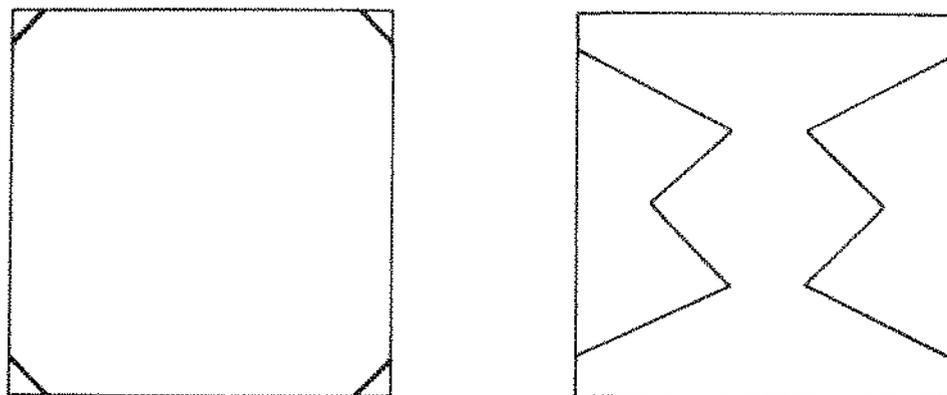


Fig. 6.1 - Suporte de lâminas para colocação no evaporador.

A figura 2 nos mostra a diferença entre as sombras obtidas no filme utilizando-se o suporte da Figura 1 e as sombras causadas pela fixação normal.



SUPORTE ESPECIAL

Fig.6.2 - Sombras no filme obtido no suporte especial e no suporte comum.

6.3 - Cuba para Banhos Eletrolíticos

Os banhos eletrolíticos de ouro e de cobre exigem condições de execução cuidadosamente controladas para que tenham resultados finais de acordo com o desejado. Estas condições são basicamente:

- Controle da temperatura do banho;
- Controle da duração do banho;
- Controle da corrente anódica;
- Agitação;
- Filtragem da solução.

Foi portanto, necessário o projeto e a construção de uma máquina que atendesse a estes requisitos para que não se comprometesse o resultado final do trabalho.

Normalmente, as soluções devem ser utilizadas a uma temperatura mais alta do que a ambiente para uma otimização dos resultados. Foi necessário portanto, prover o aparelho de um dispositivo de aquecimento da solução. O método escolhido foi

o de aquecimento indireto por " Banho-Maria" para evitar qualquer contaminação da solução proveniente da resistência elétrica usada para o aquecimento a qual é de difícil remoção, não permitindo limpeza constante.

Evita-se assim o máximo o contato com a solução de qualquer peça que não seja aquela a ser eletrodepositada. A potência de aquecimento é controlada por um " variac" de modo contínuo permitindo-se um bom ajuste da temperatura desejada.

A duração do banho é controlada por intermédio de um temporizador ao qual vai ligada a fonte de corrente. No painel do aparelho existe um miliamperímetro, na faixa de correntes normalmente utilizadas para as áreas de deposição empregadas, possibilitando um bom controle da espessura final do filme por intermédio da corrente e do tempo de deposição.

A agitação é de extrema importância no processo, pois ela é essencial para uma boa uniformidade. Devido às características do processo, ao proceder-se a uma eletrodeposição com as peças a serem depositadas estacionárias, criam-se caminhos preferenciais dos íons dentro da solução do banho, favorecendo a deposição em certos locais e criando-se assim pontos de maior espessura no filme. Uma agitação excessiva pode causar problemas como o deslocamento das lâminas e o derramamento da solução.

A agitação pode ser feita de duas maneiras: por agitação ou vibração mecânica de algumas peças dentro da solução, ou por bombeamento desta, criando-se correntes que tendem a homogenizar o banho. O método escolhido foi o da agitação mecânica por intermédio do próprio suporte das lâminas, devido à sua maior simplicidade, facilidade de operação e eficiência. Evitando-se o uso da bomba, eliminamos uma possível fonte de contaminação do banho.

A movimentação do suporte é cíclica na direção perpendicular à da superfície das lâminas a serem eletrodepositadas.

Este movimento pode ser controlado quanto à sua velocidade, variando-se a tensão contínua que é fornecida ao motor que realiza o movimento. A amplitude deste, foi fixada em 60mm, trabalhando-se com cubas, de 150mm.

Na parte superior do aparelho existem conectores para permitir a ligação por intermédio de pinos banana do anodo e do catodo.

Para o banho de ouro foram utilizados dois anodos de titânio platinado, com área total de 280 cm². Para o banho de cobre foram utilizados dois anodos de cobre eletrolítico de mesma área e espessura de 3 mm.

O equipamento que neste trabalho executou banhos de ouro e cobre, pode ser utilizado perfeitamente para quaisquer outros banhos, bastando para isto a mudança das soluções e dos anodos. A fig. 3 nos mostra uma vista da cuba para banhos eletrolíticos.

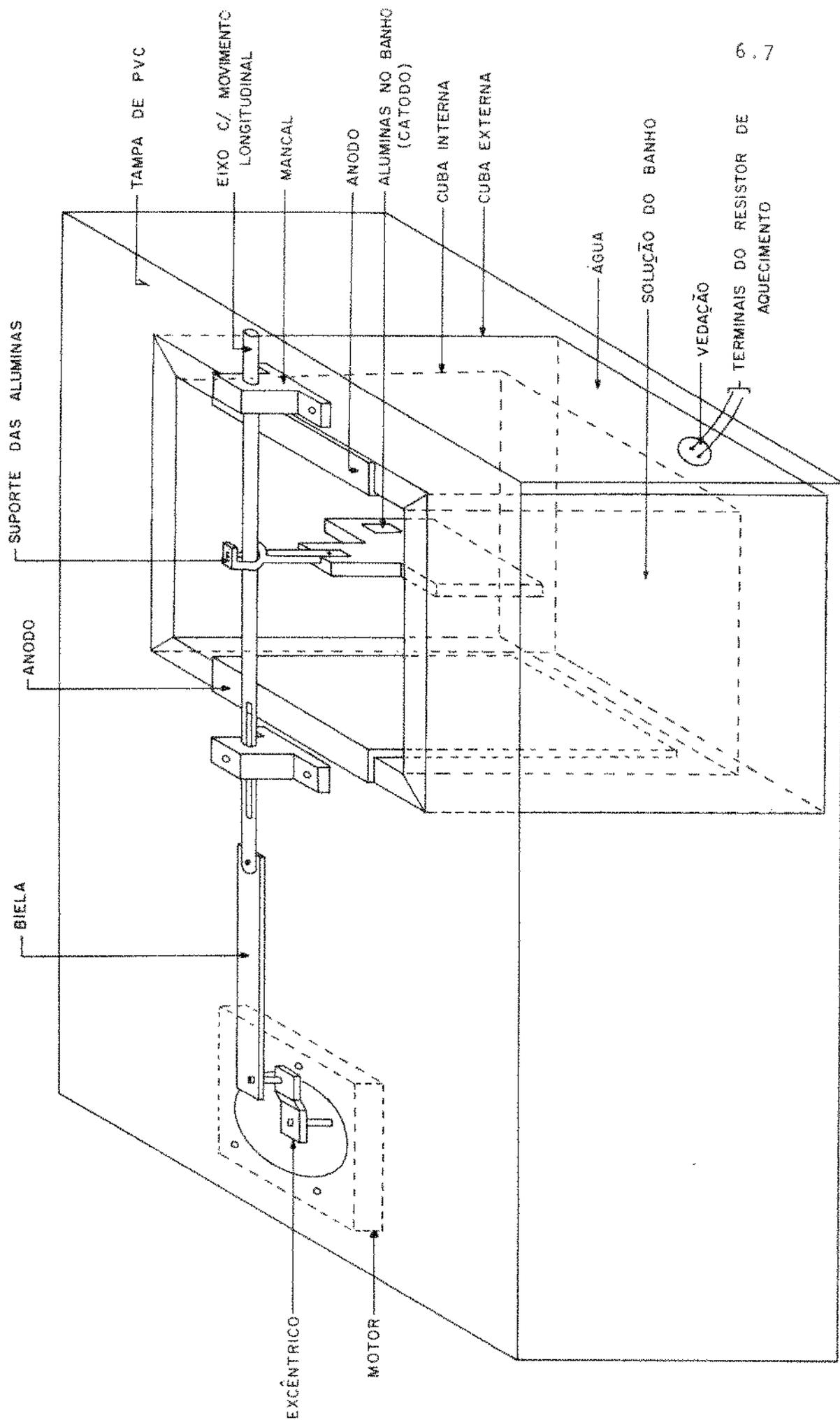


Fig.6.3. - Vista da cuba para banhos eletrolíticos.

6.4 - Medidor de Aderência de Filmes

Segundo Jacobsson,^[1] existem três métodos que permitem a avaliação ou a medida da aderência de filmes. São eles: método do durex, por puxamento direto, ou por arranhamento.

O primeiro é o mais fácil de todos, mas fornece normalmente uma informação apenas qualitativa. Consiste em colar-se uma fita durex na superfície do filme e arrancar-se brusca-mente. A análise da quantidade de filme que permanecer colada ao durex fornece informações sobre a aderência. Efetuando-se certas sofisticações podem-se obter informações quantitativas, sobre a aderência, porém, isto torna o método por demais sofisticado e como, a aderência da fita gomada não é constante, variando de fabricante e até de rolo para rolo, os resultados obtidos não são confiáveis, servindo apenas de teste comparativo quando este é efetuado com pouco intervalo de tempo e nas mesmas condições. Este método também não é razoável para comparar-se diferentes tipos de filmes ou filmes de mesmo material obtidos sobre substratos diferentes, quando a rugosidade do filme pode falsear os resultados.

O segundo método e o mais utilizado é o do puxamento direto. Ele consiste no seguinte: um pequeno bloco de área conhecida é colado sobre a superfície do filme do qual deseja-se medir a aderência. A seguir aplica-se uma força perpendicular a esta superfície de intensidade crescente até haver o rompimento, e desde que a área de contato do bloco é conhecida, chega-se à aderência. O maior inconveniente deste método, é no tocante ao adesivo utilizado, pois ele deve resistir a uma força superior à que resiste o filme.

O terceiro é o mais difícil de analisarem-se os resultados. Uma ponta desloca-se sobre o filme com força crescente à superfície. Quando houver deslocamento do filme, a análise da natureza do material do filme, do módulo da força aplicada e da velocidade da ponta, nos darão a informação sobre a

aderência. Este método tem os mesmos inconvenientes do primeiro, só podendo ser utilizado em superfícies bem planas ou polidas, onde a rugosidade do substrato não influirá.

No nosso caso, foi utilizado o segundo método. É colocado um bloco de latão com superfície de 10 mm^2 e aplicada a força por intermédio de uma mola calibrada. Sabendo-se o alongamento desta no momento do rompimento pode-se calcular a aderência em g/mm^2 . Para diferentes tipos de filmes onde podem-se obter valores de aderência muito diferentes dos aqui encontrados, pode-se variar a área do bloco e/ou a constante da mola.

Embora o tipo de cola não deva influir no resultado, se escolhermos uma cola pouco fluida ou coloca-la em quantidade diferente da ideal, causando falhas na colagem ou aumentando a área de contato do bloco com o filme, os resultados não serão confiáveis. Neste trabalho foi utilizada a cola "SUPER BONDER LOCTITE", a qual apresentou um período de cura de 24 horas.

A força é aplicada à mola por intermédio de um fio de aço, de 0,5mm de espessura que é enrolado em um tambor de diâmetro conhecido. A força é exercida em uma manivela e o tambor roda com uma redução de oito vezes. Portanto, sabendo-se o ângulo que a manivela é girada sabe-se o alongamento da mola. Como a sua constante é conhecida, chega-se facilmente à força aplicada. Um esquema deste medidor de aderência é mostrado na fig.4.

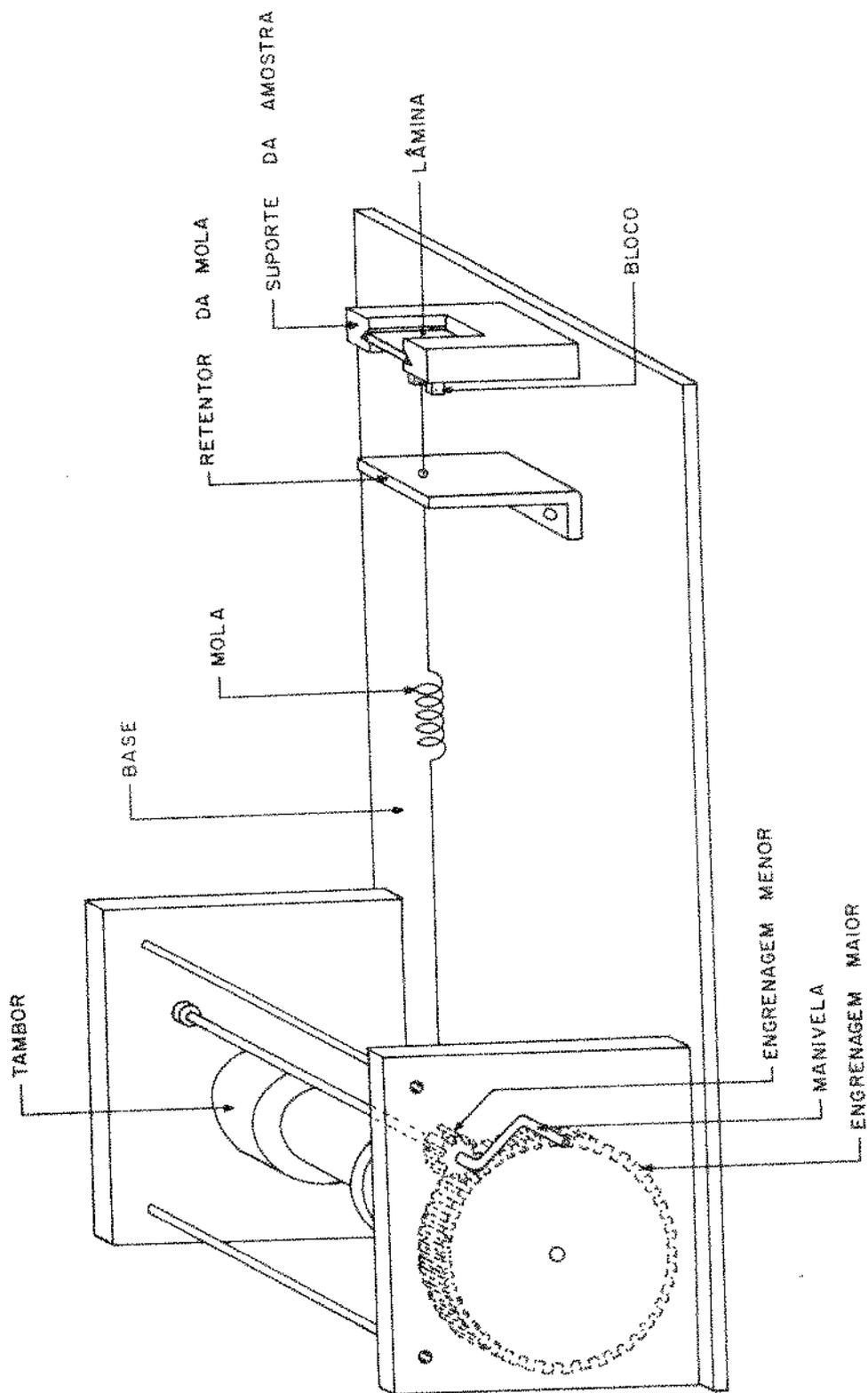


Fig. 6.4 - Esquema do medidor de aderência de filmes finos.

Quando se tem uma noção da ordem de grandeza de aderência do filme a ser medido, pode-se escolher uma área do bloco em função da constante da mola. Porém se não tivermos esta noção, deveremos colar um bloco de área normal, no nosso caso 10 mm^2 , e ir aumentando-se a constante das molas, confeccionando-se molas com espessuras cada vez maior, até chegarmos ao ponto de deslocamento. Este foi o método utilizado neste trabalho. A repetibilidade dos resultados situou-se em $\pm 10\%$, que é um valor bem razoável para este tipo de medida.

6.5 - Suporte para testes e medidas dos dispositivos

Para permitir a avaliação dos dispositivos construídos foi necessária a construção de um suporte que ofereça as condições adequadas a este dispositivo no tocante às conexões, à blindagem e proteção física.

Este suporte foi construído a partir de um bloco de latão onde foi escavada, uma cavidade na sua parte central para permitir a colocação da lâmina. Nas suas quatro faces laterais menores foram feitos furos para a colocação de até quatro conectores do tipo SMA. A lâmina é mantida na sua devida posição por intermédio de quatro conjuntos constituídos de: um cilindro, uma mola tensora e um parafuso regulador da tensão, que são posicionados nos quatro vértices da cavidade existente no bloco. As molas exercem uma pressão por intermédio dos cilindros e esta pressão pode ser ajustada pelo parafuso regulador. Podemos portanto efetuar a regulagem para termos uma pressão homogênea nos quatro vértices da lâmina e assim diminuir os esforços mecânicos. O suporte tem ainda uma tampa que fecha completamente a cavidade onde está a lâmina oferecendo proteção mecânica a ela e atuando também com blindagem. Esta tampa é posicionada por quatro parafusos colocados nas proximidades das posições dos conectores.

A figura 6.5 temos uma vista simplificada do suporte onde não está representada a sua tampa.

Os conectores SMA foram previstos para colocação no centro de cada lateral da lâmina por ser este um suporte não específico. É lógico que suportes projetados especificamente para um determinado dispositivo poderão ter dois ou até três conectores em cada lateral, embora esta necessidade seja um tanto rara. Todo o conjunto sofreu um banho de ouro com a espessura de dois microns para permitir um melhor contato elétrico pois o plano de terra do dispositivo é ligado à blindagem dos conectores SMA através do próprio bloco e não há qualquer tipo de solda entre as duas partes. O contato é mantido pelos conjuntos cilindro /mola/parafuso. O contato do condutor central dos conectores com o circuito da lâmina também é feito por pressão sem o uso de solda. Este método foi utilizado tendo em vista que este suporte é para fins de experiência e que ele deve permitir uma rápida troca das lâminas para efeito de comparação para medidas dos dispositivos antes do seu encapsulamento definitivo.

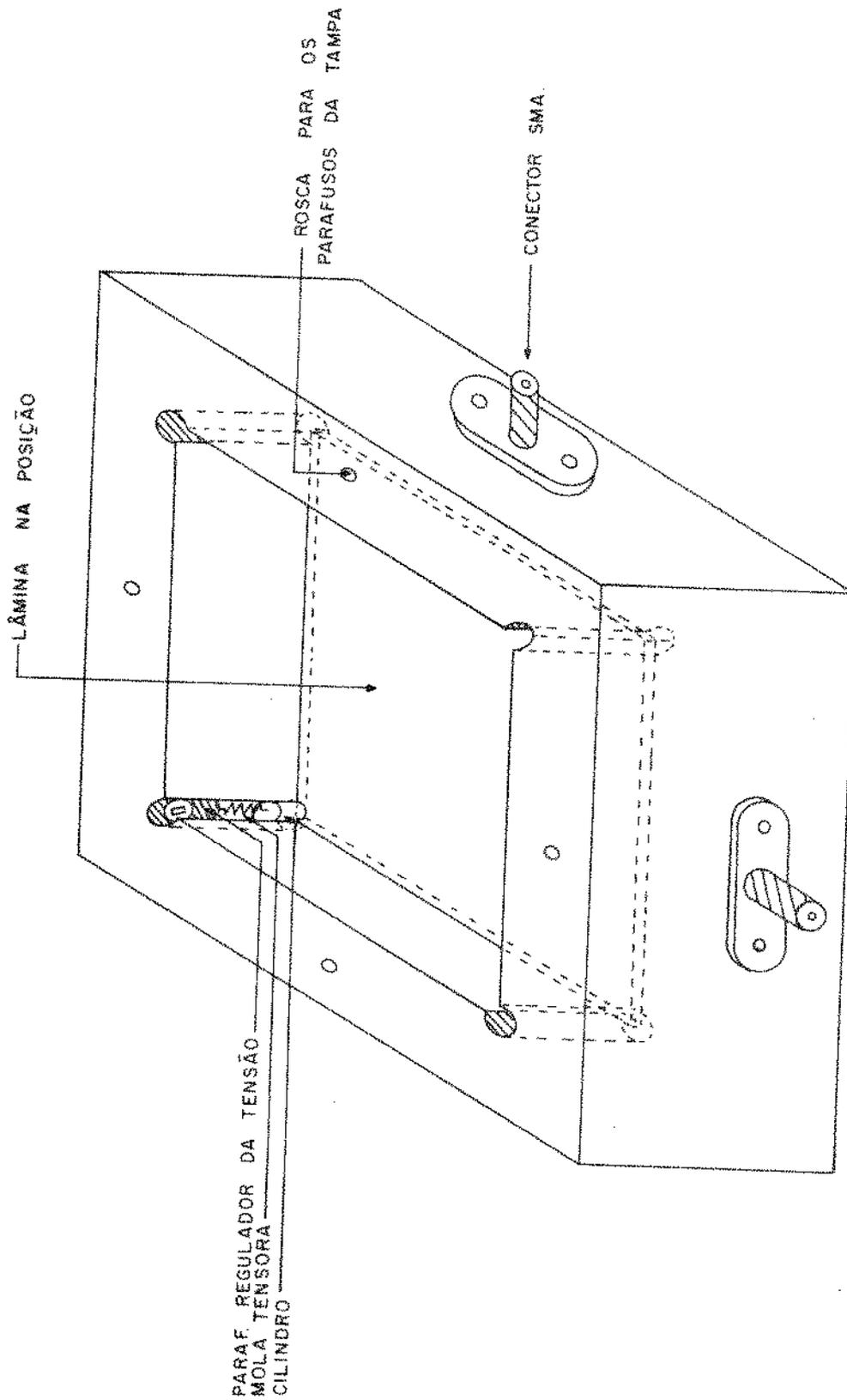


Fig.6.5 - Vista do suporte para testes e medidas dos dispositivos.

BIBLIOGRAFIA

- ||| - Jacobsson, R. "Measurements of the adhesion of thin films"
Thin Solid Films, 34, (1976) 9 - 199.

CAPÍTULO VII - AVALIAÇÃO

7.1 - Introdução

Conforme dissemos no capítulo I, o interesse deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre a tecnologia de construção por evaporação de ouro e a tecnologia de construção por deposição química de cobre. A primeira já é de completo conhecimento nas áreas interessadas no assunto, enquanto que a segunda é uma tecnologia nova e sobre a qual não encontramos muita bibliografia disponível. Desconhecem-se os motivos que levaram esta tecnologia a ser tão pouco divulgada, pois ela não é nova, conforme podemos observar na patente nº 3.033.703 do United States Patent Office, que deu entrada em 8 de dezembro de 1958, por Schneble et al. | 1 | . Na descrição desta patente já podemos verificar todos os itens principais do processo utilizado neste trabalho, isto é: sensibilização com Cloreto Estanhoso, ativação com Cloreto de Paládio e deposição com Sulfato de Cobre e Formaldeído.

Mais tarde, em 28 de novembro de 1967, Hirohata et al., | 2 | apresentaram, pela patente 3.532.519 do mesmo United States Patent Office, um processo industrial para a deposição química de filmes de cobre, com a utilização na solução de deposição do ácido etilenodiaminotetraacético que possibilita um melhor controle do banho, pela medição constante do pH, resultando em um banho estável, sem decomposição química durante a deposição, o que resulta em baixa perda de reagentes.

Mais recentemente (1977) fomos informados do trabalho de Bhatgadde e Mahapatra [3] onde é explicitamente citada a possibilidade do uso deste método de deposição na fabricação de microlinhas de transmissão. Em 1978 foi publicado novo trabalho de Mahapatra, agora em colaboração com Prasad [4] onde eles relatam um estudo comparativo entre a deposição química de cobre e a evaporação de ouro. Neste trabalho são mostrados estudos da atenuação em função da frequência, comparando-se os valores teóricos e experimentais na faixa de 2 a 10GHz.

Nota-se estreita concordância entre os dois valores.

Também é feita uma comparação entre a atenuação medida de microlinhas de cobre (processo químico) e de ouro (evaporação). Durante toda a faixa de 2 a 10GHz o cobre apresenta valores de atenuação menores do que os de ouro. Já poderíamos esperar conclusões deste tipo tendo em vista a menor resistividade do cobre.

Com este trabalho resolvemos verificar os resultados obtidos por Mahapatra e Prasad [4]. Para isto o filtro projetado no capítulo 2 foi construído segundo as duas tecnologias, e feita a caracterização do dispositivo obtido por cada uma delas.

7.2 - Comparação Resultados Obtidos

Conforme foi mencionado nos capítulos 4 e 5, foi efetuada caracterização referente à espessura, resistividade, aderência e qualidade da superfície. Obtivemos os seguintes valores para as lâminas depositadas pelos dois métodos:

	Filmes de Cromo-Ouro	Filmes de Cobre
- Espessura	6 microns	7 microns
- Resistividade	$2,16 \cdot 10^{-6}$.cm	$2,06 \cdot 10^{-6}$.cm
- Aderência	$250 \pm 20 \text{g/mm}^2$	$25 \pm 5 \text{g/mm}^2$
- Qualidade da superfície	boa	muito boa
- Rugosidade	baixa	bem baixa

A espessura nos dois casos foi definida pela duração da eletrodeposição. Para os filmes de cobre optou-se por uma espessura aproximadamente 15% maior, porque isto não acarreta aumento do custo, ao contrário do que iria ocorrer com o ouro, ao mesmo tempo que propicia uma melhor qualidade da superfície, pois uma camada mais espessa reflete menos as imperfeições do substrato. Na análise da medida da resistividade, que foi feita pelo método das quatro pontas, deve-se salientar que a espessura do cromo é de 200 Angstrons pois este fator influencia bastante nos resultados conforme discutido anteriormente.

As resistividades encontradas para os dois tipos de filme são baixas e próximas dos valores publicados. Pinto | 5 | nos relata valores de resistividade para filmes de ouro no intervalo $2,2 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$.cm. A qualidade das superfícies foi avaliada ao microscópio e considerada boa, com ausência de acúmulos excessivos. A rugosidade é baixa, refletindo basicamente as imperfeições do substrato no caso dos filmes de cromo-ouro. Para os filmes de cobre a qualidade das superfícies é muito boa com raros defeitos e rugosidade bem menor de que a do substrato. Em algumas lâminas, após a remoção do óxido da superfície, encontramos superfícies quase especulares com

uma qualidade muito boa. As maiores diferenças foram encontradas nas medidas de aderência onde encontramos valores para os filmes cromo-ouro quase dez vezes maiores do que os dos filmes de cobre. Este baixo valor apesar de parecer preocupante, não causou problemas durante toda a realização dos trabalhos, nos parecendo ser mais um ótimo valor para o ouro do que um péssimo valor para o cobre.

Em seguida a esta caracterização foi feita a montagem da lâmina no suporte para testes e medidas, para efetuarmos as medidas de atenuação e VSWR em função de frequência. Nestas medidas foram usados os seguintes aparelhos todos de fabricação da Hewlett-Packard:

Sweep Oscilador	Modelo 8620 C
R.F. Plug-in 8-12,4 GHz	Modelo 86250 C
Sweep Amplitude Analyzer	" 8755 B
Reflectometer Bridge 0,04-18 GHz	" 11666 A
Detector	" 11664 A

Estes aparelhos foram ligados conforme o diagrama ilustrado na Fig.1 .

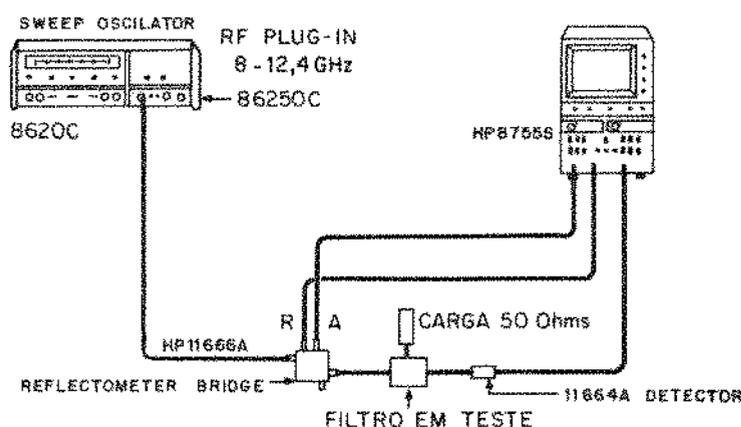


Fig.7.1 - Ligação dos aparelhos para a realização das medidas de atenuação e VSWR.

Deste modelo obtivemos diretamente a perda de transmissão do filtro, enquanto que para a curva de VSWR os dados foram tirados da curva de perda de retorno onde:

$$\text{Perda de retorno} = 20 \log |\rho| \quad \text{e como}$$

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad \text{temos então os dados para a curva de VSWR.}$$

Idêntico procedimento foi adotado para os dois tipos de filmes, e os resultados são mostrados na Fig.7.2 para a curva de atenuação e na Fig.7.3 para o VSWR.

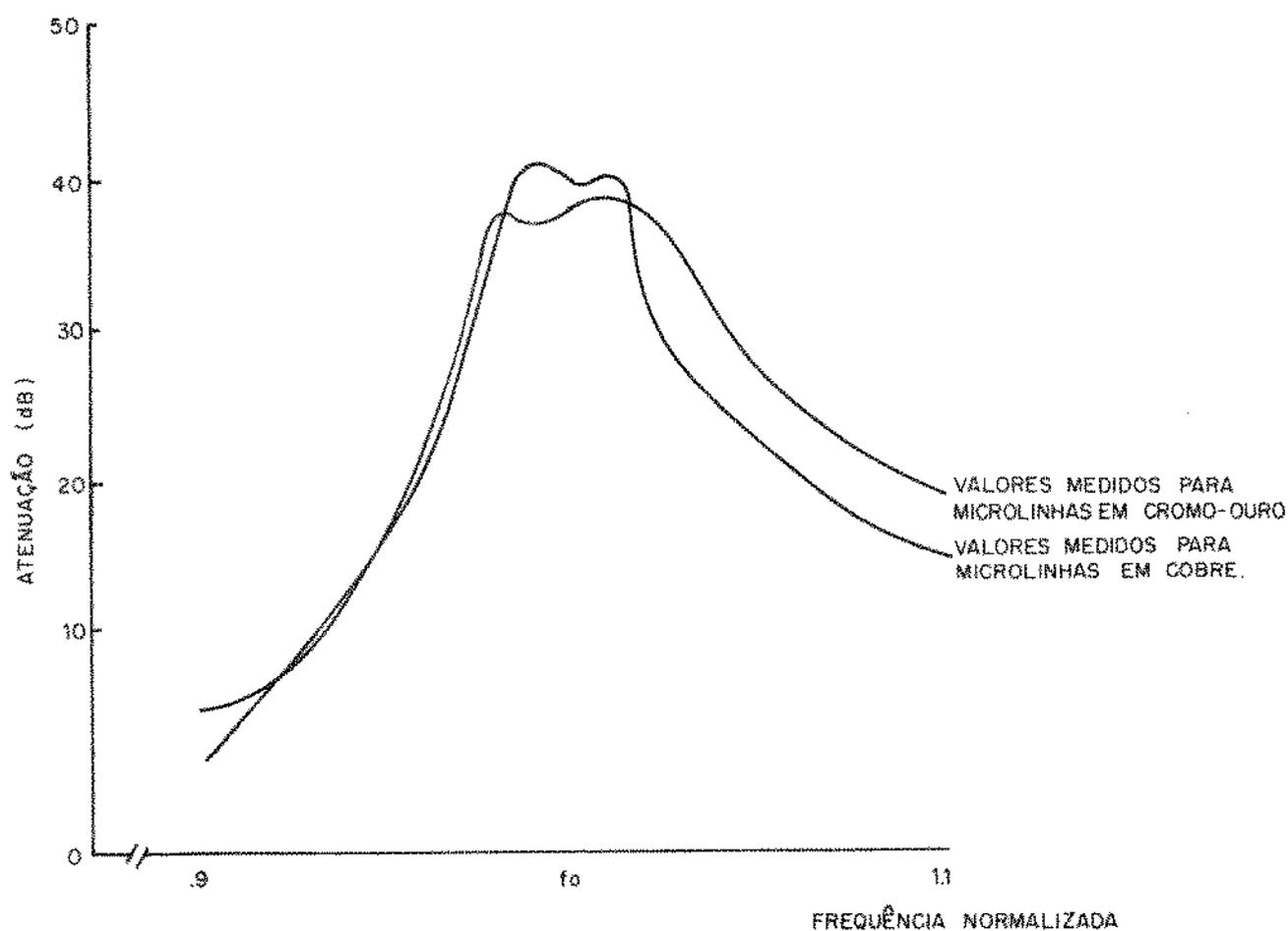


Fig.7.2 - Perdas de transmissão em função da frequência para os circuitos construídos em cromo-ouro e cobre .

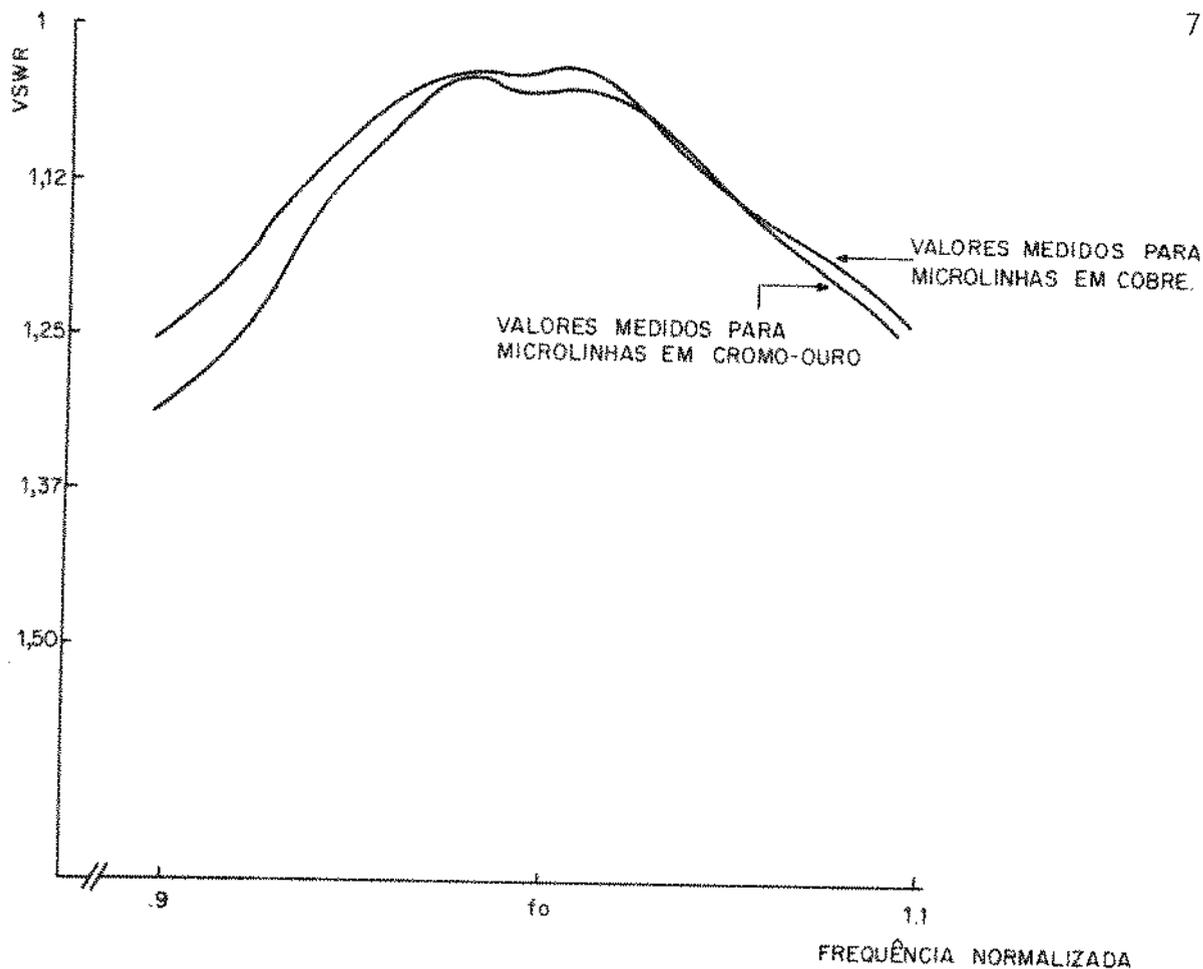


Fig.7.3 - VSWR em função da frequência para os circuitos construídos em cromo-ouro e cobre .

Como no caso dos filmes de ouro não foi tentada alguma coisa diferente do normal pois os filmes tanto o de cromo como o de ouro tem as espessuras normalmente utilizadas, o substrato também é o que se usa para as aplicações comuns, e a resistividade final dos filmes está na faixa dos valores obtidos em outras experiências, resolvemos definir esta técnica, a de cromo-ouro, como um padrão e comparar os resultados obtidos com os filmes de cobre com estes valores. Temos portanto nas Figs.7.2 e 7.3 a comparação destes trabalhos .

Podemos ver perfeitamente nas figuras a existência de dois picos em cada curva, o que denota a sintonia em duas frequências distintas. Isto se deve provavelmente a algum erro na confecção das máscaras, onde a simetria entre os dois tocos não deve estar perfeita. Se esta simetria estivesse perfeita, teríamos uma atenuação na frequência central muito

maior do que a apresentada e também o VSWR estaria mais próximo de 1. Porém este problema é devido à construção da máscara e não reflete problemas intrínsecos aos métodos de deposição. Na época de realização destas máscaras o equipamento especializado para esta função existente no LED estava em fase de testes, e o controle que normalmente é realizado pelo computador, estava sendo feito manualmente. Portanto é bem provável que tenha havido uma redução de precisão nesta fase dos trabalhos. Podemos notar também na Fig.7.2 que o Q para o circuito em cobre é maior do que para cromo-ouro. Isto é esperado, visto que para circuitos iguais e construídos no mesmo tipo de substrato, o Q reflete a qualidade do filme redutor, e já observamos a superioridade da condutância dos filmes de cobre em relação aos de ouro. A forma das duas é bem semelhante e a frequência central medida coincidiu com a do projeto e é 10GHz. As curvas de VSWR também se mostraram bem parecidas e sem diferença significativa entre elas. O mesmo efeito de sintonia em duas frequências, nota-se aqui do mesmo modo que na curva de atenuação.

7.3 - Considerações Gerais

Pelo visto no item anterior, os circuitos em cobre se comportaram muito bem em relação aos de cromo-ouro. Tanto nas perdas de transmissão como no VSWR notamos pequenas diferenças para melhor. Porém a sua grande vantagem, é, a facilidade de construção, baixo custo e pequeno tempo de processamento.

A menor perda de transmissão no caso do cobre é explicado por Howe [6] que nos dá a fórmula da atenuação de uma microlinha devido ao condutor:

$$a_c = \frac{0,0231 R_s \sqrt{\epsilon}}{Z_0} \left[\frac{\delta Z_0}{\delta b} - \frac{\delta Z_0}{\delta w} - \frac{\delta Z_0}{\delta t} \right]$$

onde: Z_0 = Impedância característica
 b = espessura do dielétrico
 W = largura da linha
 t = espessura do condutor
 R_s = resistividade do condutor (ohms/□)

Podemos verificar que, teoricamente, linhas construídas com condutores melhores deverão apresentar perdas menores. Isto explica as diferenças encontradas na Fig.7.2 pois obtemos uma resistividade média de $2,06 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ para o cobre e $2,1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$.

Quanto à resistência à altas temperaturas, os filmes de ouro levam vantagem, pois suportam altas temperaturas durante longo tempo. Os filmes de cobre só aceitam um aquecimento localizado de 300°C durante 5 segundos. Aquecimentos mais rigorosos causam o descolamento do filme.

Quanto à facilidade de obtenção, o cobre apresenta notável vantagem devido a não exigir equipamento especializado como o evaporador.

Portanto tendo realizado o mesmo trabalho com as duas tecnologias, a impressão que temos é francamente favorável à deposição química do cobre tanto pela facilidade da obtenção do filme como por motivos econômicos evitando-se o alto custo do ouro de alta pureza. Quanto às características elétricas dos circuitos não notamos diferenças que mereçam maiores comentários.

BIBLIOGRAFIA

- | 1 | - Schneble, F. W.; Bay, O.; Mc Cormack, J.; *United States Patent Office*, nº 3.033.703, aprovada em 8 de maio de 1962
- | 2 | - Hirohata, H.; Oita, M.; *United States Patent Office* nº 3.532.519, aprovada em 6 de outubro de 1970
- | 3 | - Bhatgadde, L. G. e Mahapatra, S.; " *Improved Technique of Electroless Copper Coating of Alumina Substrates*", *Metal Finishing*, December 1977.
- | 4 | - Mahapatra, S. e Prasad, S. N.: " *A New Electroless Method for Low-Loss Microwave Integrated Circuits*" *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol CHMT-1, nº4, December 1978.
- | 5 | - Pinto, J. K. da C.; " *Oscilador a diodo túnel, acoplado a uma microlinha de transmissão*". Tese de doutoramento apresentada à Universidade de São Paulo em 1977.
- | 6 | - Howe, H.; " *SRIPLINE CIRCUIT DESIGN*", ARTECH HOUSE, Dedhan, Massachussetts, USA, pag 15.

CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foram apresentadas duas tecnologias possíveis de serem utilizadas na fabricação de microlinhas de transmissão. A primeira de uso mais diversificado é a de evaporação de cromo e ouro. Outra tecnologia é apresentada, a qual, acreditamos poder concorrer com a tecnologia anterior e obter grande sucesso. Referimo-nos à deposição química de cobre. Estudo semelhante poderia ter sido efetuado incluindo a deposição química de ouro. Porém como um dos motivos principais que motivaram esta procura de diversificação de tecnologia foi exatamente o alto custo da evaporação de cromo e ouro, escolhemos para esta comparação o método mais barato atualmente disponível. Apesar da popularidade da deposição de ouro ser ainda menor do que a da deposição de cobre, nada impede a sua realização, havendo no entanto uma maior dificuldade na obtenção dos reagentes.

Conforme vimos no capítulo anterior, nada impede a imediata disseminação do uso do cobre nas microlinhas. Analisando as propriedades intrínsecas de cada método notamos que os únicos possíveis problemas apresentados pelo cobre são: a baixa aderência e a oxidação da superfície. Quanto à aderência, a possibilidade que vislumbramos é o aumento deste valor, decorrente de pesquisa intensiva neste aspecto, analisando-se mais profundamente os fatores que influem na aderência. Como qual-

quer problema tecnológico é bem possível que a solução esteja ao nosso alcance neste momento, bastando apenas um maior estudo da questão.

Quanto à oxidação da superfície, a solução já está ao nosso alcance, existindo duas possibilidades de opção: o uso da mesma deposição química para depositar uma fina camada de ouro, ou a deposição eletrolítica. Esta última possibilidade tem um problema adicional, caso as linhas não tenham continuidade elétrica, quando teríamos que efetuar este banho antes da corrosão que teria que ser seletiva entre o ouro e cobre, havendo então o problema de achar-se um foto-resiste que suporte bem os dois corrosivos. Porém, deve ser salientado que, embora exista a possibilidade da ocorrência de problemas por causa destas características, no transcorrer deste trabalho nada notamos de grave e que pudesse interferir nos bons resultados apresentados.

Quanto às características elétricas dos dispositivos, novamente o cobre apresentou vantagens com uma atenuação ligeiramente menor, que pode ser desprezado em sistemas pequenos, mas em sistemas complexos ou que envolvam grande dissipação de calor pelas linhas, este aumento da eficiência pode ser significativo.

Acreditamos que a deposição química abre novos horizontes para a construção de microlinhas de transmissão, como alternativa à evaporação de ouro até agora utilizada mas que se caracteriza como sendo de custo muito elevado. Instalações complexas e caras, e aparelhagem sofisticada, como é o caso do evaporador, são dispensadas, pois, para a deposição química, o que necessitamos é: copos de Becker, um "Hot-Plate" e as soluções. Os reagentes utilizados são na sua maioria importados porém, este é um fato do qual não podemos escapar. Talvez num futuro a médio prazo, com o aumento do consumo de reagentes químicos de uso mais especializado, eles passem a ser fabricados aqui como aconteceu com os de uso geral. A eliminação do

uso do evaporador vai permitir a confecção de circuitos de microondas em muitos outros laboratórios menos aparelhados fisicamente.

Como sugestão para futuras investigações, podemos citar a possibilidade de continuação do estudo da deposição de ouro sobre o cobre pelas duas possibilidades citadas anteriormente. Um estudo visando o aumento da aderência seria altamente desejável. Também a verificação da compatibilidade do uso desta tecnologia com dispositivos ativos ou passivos construídos fora do substrato permitiria uma maior utilização de suas vantagens.

APÊNDICE A

..RUN MICLIN

MICROLINHA - ANÁLISE E SÍNTESE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM MICRO-
FITA ACOPLADAS OU SIMPLES USANDO AS RELAÇÕES DE
A.J.GIAROLA.

AUTOR: S.S.SAVIANI - CONVÊNIO UNICAMP/TELEBRÁS 143/76 - OUTUBRO/
1978
2A. VERSÃO - JUNHO/
1979

UTILIZE A SEGUINTE FORMATAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA:

-PARA SÍNTESE DA LINHA DE TRANSMISSÃO

'SLS' ER Z0 CR QUANDO A LINHA E' SINGELA

'SLA' ER Z0E Z00 CR QUANDO A LINHA E' ACOPLADA

-PARA ANÁLISE DA LINHA DE TRANSMISSÃO

'ALS' ER W/H CR QUANDO A LINHA E' SINGELA

'ALA' ER W/H S/H CR QUANDO A LINHA E' ACOPLADA

-PARA FINALIZAR

'FIM' CR

DADOS DE ENTRADA: SLS 9.8 50

EREF = 6.70630 VEL= 1.15765530E+11 MM/S W/H= 0.98756

DADOS DE ENTRADA: SLS 9.8 70

EREF= 6.39114 VEL= 1.18585500E+11 MM/S W/H= 0.44519

DADOS DE ENTRADA: SLS 9.8 110

EREF = 6.07573 VEL= 1.21624660E+11 MM/S W/H= 1.10360

DADOS DE ENTRADA: FIM

END OF EXECUTION

CPU TIME: 0,52 ELAPSED TIME: 1.10

EXIT