

CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO
(RTP) COM LAMPADAS DE TUNGSTÊNIO-HALOGÊNIO COMO FONTE
RADIANTE DE AQUECIMENTO.

AUTOR: JOSÉ ALEXANDRE DINIZ.

ORIENTADOR: PROF. DR. PETER JÜRGEN TATSCH. *m*

LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA E DISPOSITIVOS (LED)
DEMIC- FEE - UNICAMP.

9223/188/BC

TESE APRESENTADA COMO PRÉ-REQUISITO
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEMIC-FEE-UNICAMP.

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Jose Alexandre Diniz

e aprovada pela Comissão

Julgadora em 21 / 08 / 92.

Peter Jürgen Tatsch
Orientador

A DEUS TODO PODEROSO QUE NOS
DÁ FORÇA, FÉ E ESPERANÇA PARA
CONTINUAR SEMPRE EM FRENTE.

ADS MEUS PAIS AMADOS
JÚLIO E MARIA HELENA

A TODOS OS MEUS FAMILIARES, ESPECIALMENTE,
ANSELMO E MARIA APARECIDA,
E A MINHA AMADA GLÁUCIA.

AGRADECIMENTOS.

Ao Prof. Dr. Peter Jürgen Tastch, pela confiança, interesse e orientação.

Ao Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga, por todo o apoio e confiança.

Ao Emílio C. Bortolucci, por sua dedicação na montagem da parte elétrica do forno de RTP.

Ao Ronei e Eduardo, pela disposição e dedicação na montagem da parte mecânica e instalação do sistema RTP.

A todo pessoal do LED, em especial Márcia, Agnaldo, Fred, Sr. Osvaldo, Pedro e ao Sr. Gil (oficina da Engenharia Elétrica), pela ajuda prestada.

Ao Godoy e Marco Antônio, por toda a ajuda, sugestões e cobranças.

Ao Douglas de Freitas Takeuti, pela colaboração no trabalho com RTA.

Ao Marcio Favoretto, do LPD/IFGW/UNICAMP, pelo auxílio na montagem do controlador de potência das lâmpadas.

Ao Miro e ao Jura, que são da Engenharia Mecânica, pela ajuda na soldagem e corte das peças do equipamento.

RESUMO

O principal trabalho desenvolvido foi o projeto, construção e teste de um forno (sistema) de processamento térmico rápido (RTP - RAPID THERMAL PROCESSING), para a utilização em processos de fabricação de circuitos integrados. Como fonte radiante de aquecimento, utilizou-se um conjunto de 11 lâmpadas de tungstênio-halogênio (halógenas) de 1500W/220V, totalizando 16500W de potência.

Os capítulos desta dissertação apresentam: no primeiro, o objetivo do trabalho, a motivação para executá-lo, as aplicações e as comparações entre os fornos convencionais e os sistemas RTP. No segundo, os sistemas RTP, com os diferentes tipos de fontes radiantes de calor, os métodos (termopares e pirômetros ópticos) para a medição da temperatura dos substratos em processamento térmico rápido e uma análise geral sobre a uniformidade de aquecimento nos sistemas. No terceiro, o projeto e montagem da parte mecânica do forno de RTP, a parte elétrica do equipamento, com uma análise geral do controlador de potência das lâmpadas halógenas. No quarto, o teste e caracterização do forno desenvolvido. No quinto, uma aplicação em processos de fabricação, do tipo recozimento térmico rápido (RTA - RAPID THERMAL ANNEALING) a baixas temperaturas. No sexto e último, as conclusões gerais, as melhorias e os trabalhos futuros sugeridos.

ÍNDICE.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	10
1.1 - OBJETIVO.....	10
1.2 - MOTIVAÇÃO.....	10
1.3 - COMPARAÇÃO ENTRE OS FORNOS TÉRMICOS CONVENCIONAIS E OS SISTEMAS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO (RTP).....	14
1.4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	19
CAPÍTULO 2 - SISTEMAS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO.....	21
2.1 - DESCRIÇÃO GERAL DOS SISTEMAS RTP.....	21
2.2 - TIPOS DE SISTEMAS RTP.....	23
2.2.1 - FORNO DE RTP COM AQUECEDOR PLANAR DE GRAFITE.....	23
2.2.2 - FORNO DE RTP COM LÂMPADAS DE ARCO VOLTAICO.....	25
2.2.3 - FORNO DE RTP COM LÂMPADAS DE TUNGSTÊNIO-HALOGÊNIO.....	26
2.3 - MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO SUBSTRATO EM PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO.....	28
2.3.1 - PIROMETROS ÓPTICOS.....	29
2.3.2 - TERMOPARES.....	31
2.4 - UNIFORMIDADE DE AQUECIMENTO DO FORNO DE RTP.....	34
2.4.1 - UNIFORMIDADE DE AQUECIMENTO SOBRE A SUPERFÍCIE DO SUBSTRATO EM PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO.....	34
2.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
CAPÍTULO 3 - O SISTEMA PROJETADO DE RTP.....	38
3.1 - A PARTE MECÂNICA DO FORNO DE RTP.....	38

3.2 - PROJETO DA CÂMARA DE AQUECIMENTO DO SISTEMA RTP.....	40
3.3 - PROJETO DA CÂMARA DE PROCESSO DO SISTEMA RTP.....	42
3.4 - VEDAÇÕES DO SISTEMA.....	48
3.5 - MEDIDA DA TEMPERATURA.....	48
3.6 - SISTEMA DE GASES/VÁCUO.....	49
3.7 - MONTAGEM DO FORNO.....	49
3.8 - CONTROLADOR DE POTÊNCIA DAS LÂMPADAS DE TUNGSTÊNIO- HALOGÊNIO.....	51
3.8.1 - DESCRIÇÃO DAS PLACAS DO CONTROLADOR DE POTÊNCIAS DAS LÂMPADAS DE TUNGSTÊNIO-HALOGÊNIO.....	51
3.8.2 - FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO CONTROLADOR.....	54
3.8.3 - CIRCUITO DE DETECÇÃO DE ZERO DO SINAL.....	55
3.8.4 - CIRCUITO: REDE - LÂMPADAS HALÓGENAS - TRIAC.....	58
3.8.5 - ANÁLISE GERAL DO ISOLADOR ("BUFFER") DO CIRCUITO CONTROLADOR.....	60
3.8.6 - ANÁLISE GERAL DO RESTANTE DO CIRCUITO CONTROLADOR.....	61
3.9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
 CAPÍTULO 4 - TESTE E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA RTP.....	 65
4.1 - INTRODUÇÃO.....	65
4.2 - CURVA CARACTERÍSTICA DO PERFIL TEMPERATURA/TEMPO DO SISTEMA RTP.....	65
4.3 - VERIFICAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE TEMPERATURA NO AMBIENTE INTERNO DA CÂMARA DE PROCESSO DO SISTEMA RTP.....	69
4.4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
 CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DO FORNO DE RTP: RECOZIMENTO TÉRMICO RÁPIDO, EM CICLOS DE TEMPERATURAS BAIXAS.....	 79

5.1 - INTRODUÇÃO.....	79
5.2 - CARACTERÍSTICA C-V DE UM CAPACITOR MOS.....	80
5.3 - EXPERIMENTO E RESULTADOS OBTIDOS.....	91
5.4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES FINAIS. MELHORIAS NO SISTEMA RTP CONSTRUÍDO E TENDÊNCIAS FUTURAS DE ESTUDOS.....	102
6.1 - CONCLUSÕES FINAIS.....	102
6.2 - TENDÊNCIAS FUTURAS DE ESTUDO E MELHORIAS NO FORNO DE RTP DESENVOLVIDO.....	103
6.3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO.

1.1 - OBJETIVO.

Este trabalho tem como objetivo a construção de um sistema de Processamento Térmico Rápido - RTP - *RAPID THERMAL PROCESSING* - para a utilização em pesquisas de processos de fabricação de Circuitos Integrados.

1.2 - MOTIVAÇÃO.

O desenvolvimento da microeletrônica tem apresentado três tendências principais:

- a) a redução das dimensões laterais e verticais dos dispositivos semicondutores e o aumento da densidade de integração e compactação dos Circuitos Integrados, com o intuito de aumentar a sua velocidade de operação;
- b) o aumento do diâmetro dos substratos (atualmente utilizam-se lâminas com até 200 mm em produção e 300 mm em pesquisa) para aumentar o número de circuitos fabricados em uma mesma lâmina e, portanto, reduzir os custos de produção;
- c) o aumento da complexidade dos circuitos e dispositivos.

Estas tendências na fabricação dos atuais dispositivos, com dimensões submicrométricas, só são realizáveis pela reavaliação

dos ciclos de tratamentos térmicos, do controle dos processos e das fontes de contaminação durante as etapas do processo. A crescente complexidade das tecnologias de fabricação exige, cada vez mais, para um rendimento de produção ("yield") economicamente viável, uma automação total do processo de fabricação e processamentos realizados em temperaturas baixas, ou em temperaturas altas por um curto espaço de tempo.

Neste contexto, o processamento térmico rápido assume um importante papel nos processos de fabricação dos circuitos integrados. Constata-se que, sem a utilização do processamento térmico rápido, os dispositivos CMOS e BiCMOS mais avançados de hoje, simplesmente não poderiam ser fabricados [1]. Utilizando o RTP, alcançam-se resultados impossíveis de serem obtidos em um processo com fornos térmicos convencionais de alta temperatura. Assim, as projeções dos especialistas indicam que pela metade da década de 1990, os projetos de 0,35 a 0,5 μm exigirão de cinco a quinze passos de RTP [1].

O processamento térmico rápido (RTP) está atualmente sendo utilizado com vantagens em processos e etapas de processamento de fabricação, como:

formação de contatos ("alloying"): pesquisas indicam que o recozimento de alumínio realizados via RTP, produzem resistências de contatos comparáveis às obtidas por recozimentos em fornos convencionais, com a vantagem da não formação de morros ("hillocks") e uma redução de 50 a 60% no número de cunhas de Al ("spiking"), isto para um ciclo de RTP em temperatura baixa em um curto espaço de tempo [2].

recozimento térmico rápido (RTA - "rapid thermal annealing"): no recozimento rápido das camadas dopadas por implantação iônica, para um intervalo pequeno de tempo, em um ciclo de alta temperatura (da ordem de 1150°C), ocorre a ativação das impurezas e a eliminação dos defeitos cristalinos provocados pela implantação iônica sem alterar fisicamente a profundidade de junção no local implantado [3], como ocorre no recozimento convencional.

oxidação térmica rápida (RTO - "rapid thermal oxidation"): formação de camadas finas de óxido (70 a 100 \AA) de silício, com características elétricas iguais ou melhores que as dos filmes crescidos em fornos convencionais [1-3]. A oxidação rápida ocorre em ambiente de O_2 seco ou com a adição de HCl para a diminuição da contaminação iônica do óxido por íons alcalinos (Na^+ , por exemplo) [7]. É realizado em curto intervalo de tempo (30 a 120 segundos) em alta temperatura ($> 1000^{\circ}\text{C}$).

nitretação térmica rápida (RTN - "rapid thermal nitridation"): o recozimento rápido do SiO_2 em ambiente de amônia (NH_3) resulta na nitretação do filme de SiO_2 , com a formação de oxinitreto, aumentando a qualidade do filme dielétrico fino [1-3], por fornecer uma barreira a difusão de dopantes e/ou impurezas, além de diminuir a densidade de cargas móveis no óxido. A associação da amônia com o óxido de silício, em processo térmico rápido, promove a formação de uma camada rica em nitrogênio na superfície do SiO_2 e na interface entre o Si (substrato) e o SiO_2 . O filme resultante é um oxinitreto. O processo da nitretação também é feito em fornos térmicos convencionais, mas com intervalos maiores de tempo em relação ao processamento térmico rápido. O

processamento térmico rápido ainda oferece uma vantagem adicional que é a rápida execução de etapas de processo RTO e RTN, sequencialmente, na mesma câmara de processo, sem manipulação da amostra em tratamento, somente pela alteração dos gases ambientais. Pode-se, também, reoxidar os óxidos já nitretados, formando camadas de ONO (oxinitreto reoxidado), através de ciclos sequenciais de RTO/RTN/RTO. Assim, o RTP permite a formação de uma variedade de composições $\text{SiO}_x\text{N}_{1-x}$ (oxinitreto). Em fornos térmicos, este procedimento torna-se difícil, devido aos longos espaços de tempo envolvidos [7].

silicetos: pode-se, através do processo de pulverização catódica ("sputtering"), depositar filmes de titânio (ou outros materiais) com espessuras variadas sobre as lâminas de silício. Em um processo com uma ou duas etapas de recozimento térmico rápido (RTA), são crescidos filmes de silicetos de titânio (TiSi_x) estáveis e estequiométricos, com resistividade bem menor que as obtidas em fornos convencionais [1-3]. O siliceto de titânio é caracterizado por sua resistividade baixa (13 a 16 Ωcm), boa adesão e uniformidade em temperaturas altas [1].

compostos III-V: ativação de camadas implantadas (RTA) em compostos do grupo III-V como o arseneto de gálio (GaAs), o fosfeto de índio (InP) ou compostos destes dois, como - InGaAs e InGaAsP [3-5]. Em particular, para o arseneto de gálio, os curtos espaços de tempo do recozimento RTP é vantajoso em relação ao recozimento convencional pela redução da perda preferencial de As e na minimização da degradação das heterojunções [8].

CVD térmico rápido (RTCVD - "rapid thermal chemical vapor deposition"): é o processo térmico rápido para a deposição de materiais sobre as lâminas semicondutoras, pela introdução de gases reativos na câmara de processos. No caso da deposição de tungstênio, de silício amorfo e polisilício utiliza-se uma baixa pressão dos gases da reação (RTP - LPCVD - "low pressure chemical vapor deposition") [1].

refluxo de óxido: com o intuito de aumentar a cobertura de degrau, utiliza-se o rápido refluxo de BPSG, com mínima alteração dos perfis de concentração de dopantes nos substratos [1-3].

1.3 - COMPARAÇÃO ENTRE OS FORNOS TÉRMICOS CONVENCIONAIS E OS SISTEMAS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO (RTP).

Na câmara de processos dos fornos térmicos convencionais, os substratos são aquecidos por um gás que é introduzido no ambiente. Este gás é aquecido pela energia térmica dissipada em uma resistência elétrica. Os principais mecanismos de aquecimento existentes na câmara são: a convecção e a condução térmica através do gás quente. Como estes dois mecanismos transportam a energia térmica (calor) através da matéria, eles são bastante lentos. Um outro mecanismo de aquecimento existente é o da radiação, que é bem rápido. Mas a resistência elétrica, que é utilizada nos fornos convencionais, não é uma boa fonte de radiação. Portanto, devido a grande massa térmica do gás existente na câmara de processo, um forno térmico terá baixíssimas taxas de aquecimento.

Por este motivo, a utilização dos fornos térmicos impõe três sérias limitações para o controle dos processos de fabricação de dispositivos semicondutores de dimensões submicro-métricas e de lâminas com diâmetros grandes [2]:

i) formação de junções rasas por implantação iônica: depois que um substrato passa pelo processo da implantação iônica para a formação de junções, é necessária a execução da etapa de recozimento da amostra, para o rearranjo dos dopantes na camada implantada. Como o processamento do recozimento em lote em alta temperatura é demorado e isotérmico (tem elevada inércia térmica), fica impossível produzir junções rasas com profundidade de junção $< 0,3 \mu\text{m}$, devido a difusão térmica dos dopantes durante o tempo do processo [2-4];

ii) tensões: todas as lâminas (com predominância nos substratos de diâmetros maiores que 75 mm), quando submetidas a processos de alta temperatura, sofrem deformações, através de tensões ("stress") termomecânicas, provocadas pela falta de uniformidade térmica. Estas tensões podem provocar defeitos na rede cristalina e deformar os substratos, introduzindo níveis de energia na banda proibida do material e armadilhas de carga em interfaces. Isto causa o aparecimento de correntes de fuga nos dispositivos e, conseqüentemente, perda das amostras e diminuição do rendimento de produção ("yield") [2-4];

iii) contaminação das lâminas nos processamentos em lote em alta temperatura: a contaminação dos substratos ocorre através da geração de partículas e difusão de contaminantes para dentro do

ambiente de processo e geração de partículas no próprio ambiente de processo. Esta contaminação provém das partes do sistema do forno convencional como, resistência elétrica, suporte das amostras, paredes do ambiente de processos, que são mantidas em alta temperatura por longo tempo.

Estes problemas dos fornos térmicos convencionais podem ser contornados ou minimizados pela utilização dos sistemas RTP. Nestes sistemas, o mecanismo de aquecimento dos substratos é a radiação, proveniente de uma fonte radiante de energia. O aquecimento dos substratos, que são expostos um de cada vez à radiação até atingirem uma temperatura determinada de equilíbrio dinâmico (que pode ser de 600°C a 1250°C), é muito rápido. Dependendo do processo a ser realizado, dos tipos de amostras a serem processadas e do próprio equipamento em disponibilidade, escolhe-se a temperatura de equilíbrio dinâmico. As lâminas são mantidas nesta temperatura por um período de tempo muito curto, e então, rapidamente se resfriam, por radiação, quando a fonte radiante é desligada ou removida. O ciclo de temperatura/tempo do processo corresponde ao aquecimento, manutenção em uma temperatura estacionária (ou de equilíbrio dinâmico) e resfriamento rápido da amostra [2], sendo praticamente um pulso de temperatura como representado na Fig.1. Em funcionamento, o sistema RTP permite que curtos ciclos de aquecimento sejam precisamente controlados (de 1 a 30 segundos). As taxas de aquecimento e resfriamento, dependendo do sistema utilizado e do material processado, podem chegar a 400°C/s e 100°C/s respectivamente [5]. Um forno de RTP, também denominado forno frio, só mantém aquecido o substrato, que está em

processamento. As paredes da câmara de processos, bem como o restante do sistema, permanecem refrigeradas (com cerca de 700°C menor que a temperatura da superfície da amostra). Isto minimiza o processo da contaminação dos substratos e da câmara de processo através da geração de partículas, difusão de contaminantes para dentro da câmara e geração de partículas no próprio ambiente de processo.

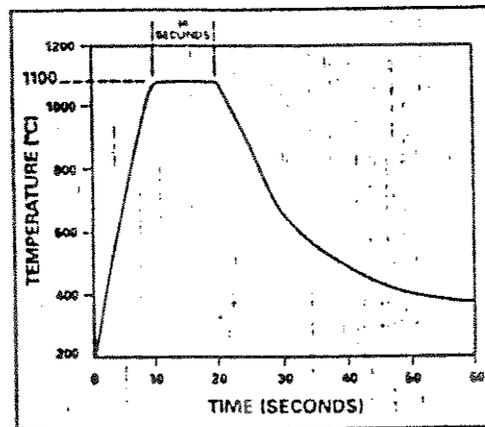


Fig.1 - Perfil de temperatura/tempo típico de um processamento térmico rápido [2].

Para se aquecer um substrato em alta temperatura por um período de tempo curto, com bons resultados, há alguns fatores característicos de operação da fonte de aquecimento e do sistema de controle, que devem ser considerados[6]:

a) A lâmina típica de um semiconductor é um disco muito fino (0,25 a 0,5 mm), com um diâmetro de 75 a 200 mm. Isto resulta em uma baixa massa térmica e em uma grande área de superfície, que deve receber uma quantidade enorme de energia. Portanto, para se evitar danos na amostra (através do "stress" térmico), a energia utilizada deve ser uniformemente aplicada à superfície.

b) A lâmina é posicionada, no campo de energia radiante da câmara de processos, em um suporte que não deve extrair calor da superfície da amostra. Usualmente, o suporte é feito de quartzo.

c) A temperatura da lâmina deve ser precisamente controlada. Normalmente, para este controle, utiliza-se um circuito de realimentação da temperatura da amostra.

d) O ambiente onde se encontra a amostra, deve ser controlado para prevenir a contaminação da superfície da lâmina. O envoltório da lâmina na câmara de processos é geralmente um tubo ou uma janela (placa) de quartzo, que é mantida em baixa temperatura, minimizando a contaminação da amostra.

e) A lâmina deve ser processada uma por vez. Isto diminui a perda de um grande número de amostras devida a um eventual erro de processamento. Mesmo assim, conseguem-se níveis de produção

comparáveis ao de lote, pois o processo é efetuado rapidamente.

1.4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1]- Laura Peters, Associate Editor - "Why You Need RTP" - Semiconductor International -vol.14, n.10, p.72 - sept.1991.

[2]- Walter Thruston and Richard Seaman, AG Associates - "Rapid Thermal Processing Systems Performance" - Microeletronic Manufacturing and Testing - vol.8, n°.8 - jul/85 - pgs.8,9 e 10.

[3]- S. Leavitt - "RTP: On the Edgs of Acceptance" - Semiconductor International . pg.64-70 - Mar/87.

[4]- R. Erichsen Jr., W. H. Schreiner, C. M. Hasenact e J. P. Souza - "Forno de Lâmpadas Halógenas para Processamento Rápido de Silício" - II Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica - Jul/87 - pgs.529-538.

[5]- Alexandre S. Lujan - "Difusão de Enxofre em Arseneto de Gálio por Processamento Térmico Rápido" - Tese de Mestrado - pgs. 6-29 - IFGW - Departamento de Física Aplicada - LPD - UNICAMP - jan/1991.

[6]- Ronald E. Sheels - "Rapid Thermal Processing Systems" - Microeletronic Manufacturing and Testing - vol.8, n°.8 - jul/85 - pgs.16,17 e 18.

[7]- J. Nulman - "Rapid Thermal Processing Efficiently Creates Thin Silicon Dielectrics" - Microelectronic Manufacturing and Testing - vol.11,n°.12 - nov/88 - pgs.14, 15 e 16.

[8]- T.E. Kazior, S.K. Brierley and F.J. Piekarski - "Capless Rapid Thermal Annealing of GaAs Using Grafite Susceptor" - IEEE Trans. on Semic. Manufac. - vol.4,n°.1 - feb/91 - pg.21.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO.

2.1 - DESCRIÇÃO GERAL DOS SISTEMAS RTP.

Os equipamentos de processamento térmico rápido constituem-se basicamente de cinco partes distintas (na Fig.2.1, está representado um esquema geral de um sistema RTP):

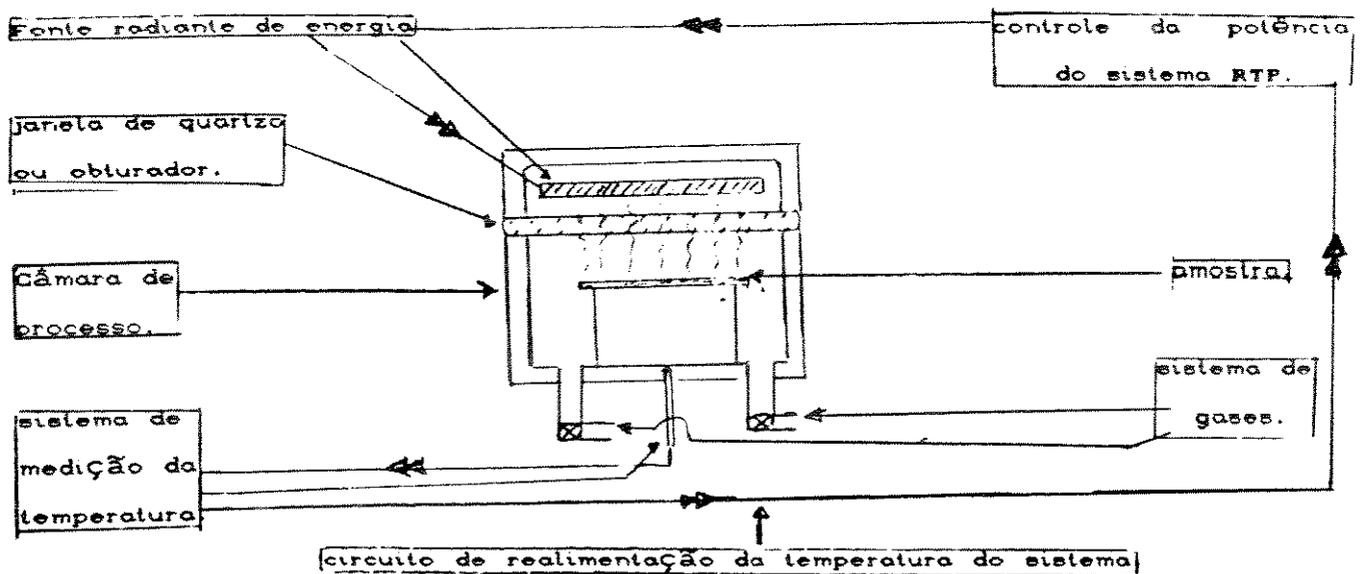


Fig.2.1 - Esquemática de um típico sistema RTP.

i) um gerador de energia térmica para aquecimento dos substratos: é formado por uma fonte radiante de aquecimento. Frequentemente o local onde está situada a fonte de aquecimento é denominado de câmara de aquecimento;

ii) câmara de processo: é um ambiente fechado, separado da fonte de aquecimento por uma janela ou tubo de quartzo, ou por um obturador ("shutter"), envolvendo ou resguardando o substrato da radiação. Estes separadores são sempre refrigerados, quando o forno de RTP está em funcionamento;

iii) sistema de gases: tem a função de injetar um fluxo controlado de um ou mais gases para dentro da câmara de processo, a fim de manter um ambiente interno correspondente ao processamento rápido em execução. Utilizam-se gases como nitrogênio (N_2), argônio (Ar) (gases inertes), oxigênio (O_2) e amônia (NH_3). Pode-se adicionar à câmara de processo uma bomba de vácuo, para a exaustão dos gases em processo, ou para a manutenção de um ambiente de vácuo ou baixa pressão;

iv) sistema de medição da temperatura da lâmina: usualmente são usados dois sensores térmicos: o pirômetro óptico; o termopar, ou ainda a associação dos dois;

v) controle da potência: controla a potência da fonte radiante de aquecimento. Associando-se este controlador de potência com o mecanismo de medição da temperatura, pode-se obter um circuito de realimentação da temperatura do sistema, para melhor repetibilidade dos ciclos rápidos, com um bom controle da temperatura de equilíbrio dinâmico do processamento desejado [4].

2.2 - TIPOS DE SISTEMAS RTP.

Os fornos de RTP se diferem basicamente pela fonte radiante de aquecimento utilizada. Os tipos de fontes mais usados atualmente são: as lâmpadas de arco voltaico (de plasma), o aquecedor planar de grafite e as lâmpadas de tungstênio-halogênio (halógenas), que produzem bons perfis de temperatura/tempo nos ciclos rápidos dos processamentos, com resultados similares [1-2].

O objetivo destes sistemas de aquecimento é o mesmo, ou seja, produzir boa uniformidade de aquecimento da superfície do substrato em processo com grande quantidade de energia.

Com a introdução de algumas características adicionais nos equipamentos de RTP, consegue-se aumentar a eficiência de aquecimento dos substratos. Por exemplo, um revestimento refletivo nas paredes das câmaras de aquecimento e de processo, para direcionar a radiação para o substrato em processamento rápido, pode maximizar a transferência de energia da fonte geradora de calor para o substrato.

2.2.1 - FORNO DE RTP COM AQUECEDOR PLANAR DE GRAFITE.

O forno de RTP com aquecedor de grafite contém, na parte interna da câmara, uma resistência de grafite em ambiente à vácuo. A resistência é uma placa de grafite recortada no formato de "tiras retangulares"[2]. Nesta resistência, circula-se uma corrente elétrica que aquece o grafite até uma temperatura estacionária (ou de equilíbrio dinâmico) desejada. A amostra a ser processada, que também é colocada dentro da câmara, é separada do aquecedor por um obturador opaco ("shutter") (Fig.2.2). Quando a fonte

radiante de grafite alcança a temperatura de equilíbrio dinâmico, retira-se o obturador, expondo a lâmina, próxima da resistência, à radiação. Terminado o tempo de processamento da amostra, o obturador é recolocado sobre a lâmina, que fica ao resguardo da radiação.

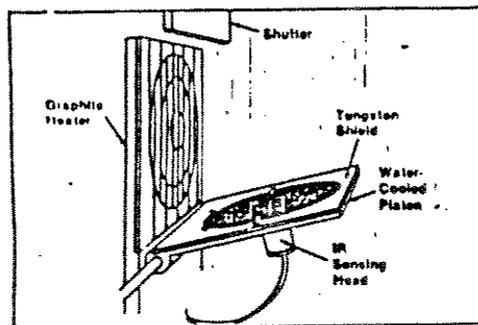


Fig.2.2 - Sistema RTP com aquecedor planar (resistência) de grafite como fonte radiante de aquecimento [1].

A principal vantagem deste tipo de forno é que os aquecedores de grafite produzem uma distribuição de energia uniforme [1].

As principais desvantagens deste sistema são:

i) como o grafite permanece aquecido a uma determinada temperatura e a sua taxa de aquecimento é pequena, necessita-se de um anteparo à radiação (o obturador) para controlar o aquecimento do substrato. No máximo, a temperatura atingida pelo substrato é a mesma do aquecedor de grafite. Assim, não é possível a execução de processos térmicos rápidos com várias etapas, onde o substrato permanece em temperaturas (ciclos rápidos) intermediárias antes de alcançar a temperatura final do processamento;

ii) para o aquecedor de grafite não se oxidar, o ambiente interno deve ser o vácuo. Se o ambiente de processo fosse um gás inerte (o que também evitaria a oxidação), ocorreria a absorção de calor da fonte de grafite, podendo alterar o ciclo térmico da amostra [1].

2.2.2 - FORNO DE RTP COM LAMPADAS DE ARCO VOLTAICO (ARCO DE PLASMA).

Neste tipo de forno, a energia irradiada vêm do arco voltaico que é produzido dentro de um tubo de quartzo com paredes refrigeradas a água, sendo a atmosfera interna do tubo de gás argônio (Fig.2.3). O arco de plasma é aberto dentro desta atmosfera inerte irradiando a energia para a amostra [2], colocada na câmara de processo do equipamento de RTP.

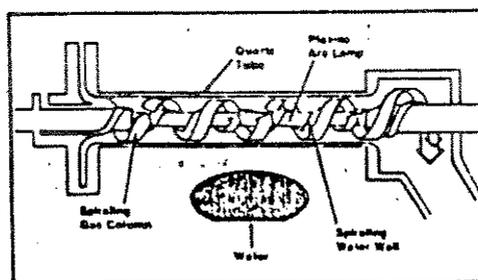


Fig.2.3 - Sistema RTP com lâmpadas de arco voltaico como fonte radiante de aquecimento [1].

Devido à alta potência da lâmpada de arco voltaico, obtém-se taxas de aquecimento altíssimas neste tipo de sistema, com uma boa produtividade. Mas, o custo da energia por lâmina processada é grande, o que é uma desvantagem. É necessário aproximadamente 40 kV para produzir o arco de plasma, sendo que praticamente 50% da energia gerada é dissipada pelas paredes refrigeradas a água [1].

2.2.3 - FORNO DE RTP COM LÂMPADAS DE TUNGSTÊNIO-HALOGÊNIO.

Neste tipo de forno, o aquecimento é feito por meio de lâmpadas de tungstênio-halogênio, também chamadas de lâmpadas de quartzo [3]. Possuem um filamento de tungstênio que é resistivamente aquecido dentro de um tubo de quartzo, hermeticamente fechado com uma quantidade pequena de um dos elementos halógenos (bromo ou iodo). Normalmente se utiliza o bromo, sólido em temperatura ambiente, que gaseifica quando a lâmpada alcança a temperatura de operação de 300°C a 400°C. Quando o tungstênio evapora do filamento, ele se combina com os átomos de bromo, formando um gás de moléculas de brometo de tungstênio. Estas moléculas se chocam com o filamento aquecido e se decompõe com a deposição de tungstênio sobre o filamento e com os átomos de bromo disponíveis para a formação de um novo ciclo. Isto permite que o filamento de tungstênio possa operar em uma temperatura muito mais alta, sem contanto escurecer o tubo de quartzo por deposição.

O posicionamento das lâmpadas no forno de RTP, é feito através de um arranjo em grupos ou bancos de lâmpadas colocadas acima e/ou abaixo ou em um envoltório circular sobre a amostra [4], dependendo do formato da câmara de processos - cilíndrico ou de

caixa retangular. Nas Figs.2.4 e 2.5 são mostrados alguns exemplos.

As maiores vantagens das lâmpadas halógenas são: para operar e manter são baratas, oferecendo um bom controle em baixas temperaturas (de 400°C a 625°C) e em altas temperaturas (em alguns processos como certas oxidações rápidas, exigem temperaturas de até 1250°C), com resposta muito rápida. Como principal desvantagem tem-se que estas lâmpadas sofrem uma gradual degradação, o que limita o seu tempo de funcionamento (cerca de 2000 horas).

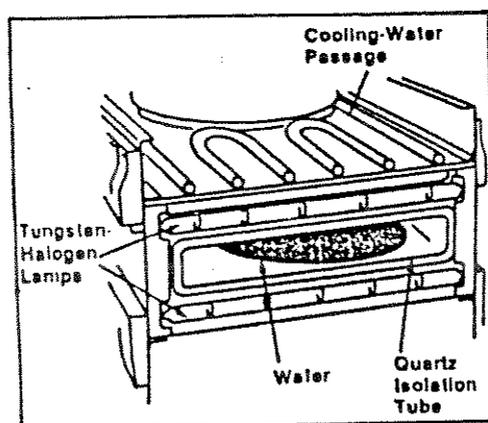


Fig.2.4 - Lâmpadas halógenas posicionadas acima e abaixo da lâmina em um forno de RTP com câmara de formato retangular [1].

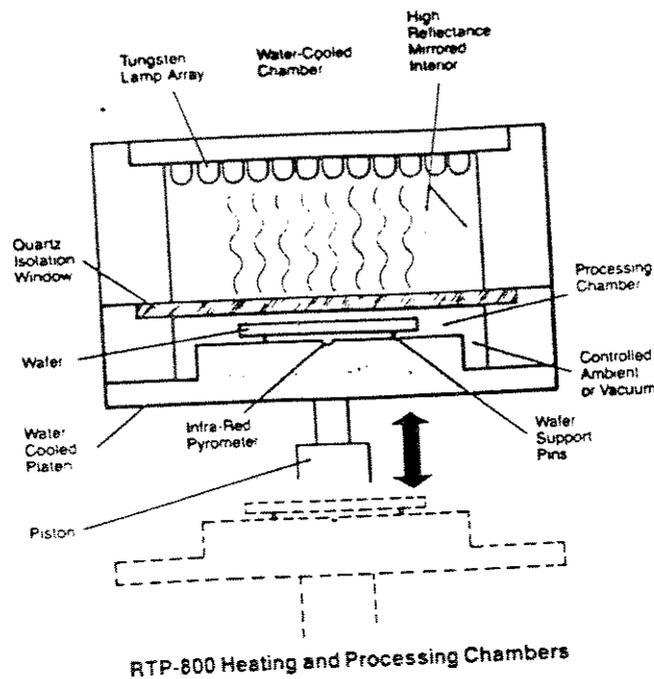


Fig.2.5 - Lâmpadas de tungstênio-halógeno colocadas acima do substrato em um equipamento de RTP, com câmara de processo retangular (RTP-800, da empresa VARIAN).

Alguns estudos, em relação a eficiência, dizem que as lâmpadas halógenas convertem 80% de potência elétrica em potência irradiada [2-3].

2.3- MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO SUBSTRATO EM PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO.

Utilizam-se normalmente dois tipos de sensores para a medição da temperatura de um forno de RTP: os pirômetros ópticos e os termopares [1]. Em muitos casos, utiliza-se uma associação destes dois medidores térmicos. A seguir são mostradas as vantagens

e as desvantagens de cada método e de que maneira cada um mede a temperatura na câmara de processos de um sistema de RTP.

Para otimizar a repetibilidade do ciclo térmico rápido, o sensor de temperatura utilizado (pirômetro ou termopar) é associado ao controlador de potência da fonte radiante de energia, através de um circuito de realimentação, tornando o controle da temperatura de equilíbrio dinâmico automático (o controle pode ser realizado por um microprocessador [4]).

2.3.1- PIRÔMETROS ÓPTICOS.

Os pirômetros ópticos baseiam-se no fenômeno da radiação térmica emitida por corpos opacos: quando uma radiação incide sobre um corpo opaco, em parte é refletida e a restante absorvida. Corpos de cores claras refletem a maior parte da radiação incidente, enquanto que corpos escuros absorvem a maioria dela. Se um corpo opaco está em equilíbrio com seu ambiente, a taxa de absorção da radiação deve ser igual à taxa de emissão. A radiação emitida pelo corpo, chamada de radiação térmica, depende da sua temperatura. Para temperaturas abaixo de 600°C, a radiação térmica emitida pelo corpo não é visível, pois a maior parte de energia está em um intervalo com comprimentos de onda mais longos do que os da luz visível. À medida que a temperatura do corpo aumenta, a quantidade de radiação térmica emitida aumenta, e a energia irradiada inclui comprimentos de onda cada vez menores.

O pirômetro óptico é um sensor térmico que é sensível aos comprimentos de onda da radiação emitida da amostra em processo, que está relacionada diretamente com sua temperatura, de acordo com as leis da mecânica quântica sobre a radiação do corpo negro em

relação à temperatura e ao comprimento de onda da energia irradiada.

i) VANTAGENS:

Os pirômetros são os mais utilizados em fornos comerciais. Têm como principal vantagem a medição da temperatura da lâmina sem haver contato com a amostra. Assim, consegue-se reduzir a quantidade de massa que está absorvendo energia na câmara de processos dos fornos frios. Uma outra vantagem é que em comparação aos termopares, os pirômetros são mais precisos e a resposta é mais rápida.

ii) DESVANTAGENS:

O intervalo de temperatura dos processamentos rápidos utilizados na microeletrônica varia de 400°C a 1250°C . Os pirômetros de infravermelho nem sempre são capazes de medir com precisão a temperatura do silício em todo este intervalo, pois a radiação térmica emitida pelo silício não é visível abaixo de 600°C (o silício torna-se transparente), causando erros na medida dos pirômetros. Portanto, estes medidores de infravermelho não são precisos para temperaturas baixas, não sendo utilizados para monitorar temperaturas abaixo de 600°C [1].

Dependendo da temperatura de equilíbrio dinâmico de um certo processo e da lâmina específica para este tratamento, os pirômetros necessitam de uma calibração inicial, que é um fator vital para a repetibilidade de um ciclo. Esta regulagem inicial é necessária, principalmente devido às variações de

emissividade que podem ocorrer nas lâminas em processamento. Estas variações são devidas à topologia da superfície da amostra, normalmente formada por várias camadas de vários materiais diferentes. A calibração compensa estas variações [6-7].

Para a calibração de um pirômetro óptico tem-se como base as medidas de temperatura feitas por um termopar calibrado, associado ao sistema, exclusivamente para esta aferição. O termopar é mantido em contato (fixado) com um substrato teste, e é submetido a um ciclo térmico rápido, simulando-se um processo no forno em utilização. A temperatura medida é utilizada como referência para a calibração do pirômetro. Existem alguns problemas que devem ser considerados neste tipo de calibração [6]:

(i) a fixação do termopar no substrato teste deve resultar em um bom contato térmico entre as partes, para não provocar erros nas medidas da temperatura;

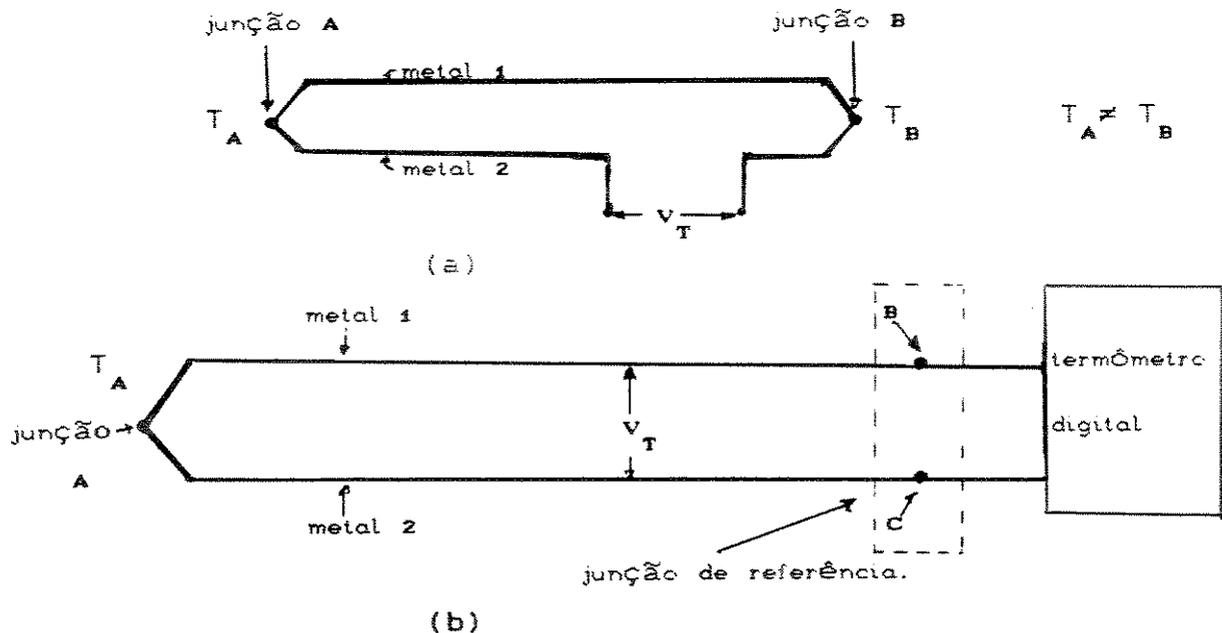
(ii) a precisão da medida do termopar utilizado, deve ser conhecida;

Com estes parâmetros sendo considerados, consegue-se uma boa calibração e minimização dos erros, nas medidas de temperatura.

2.3.2 - TERMOPARES:

O termopar consiste de um circuito elétrico mostrado em sua forma mais simples na Fig.2.6.a. Quando fios de dois metais ou ligas de metais diferentes são conectados de modo a formar um circuito (Fig.2.6.a), verifica-se que ocorre uma diferença de potencial V_T entre os dois metais, sempre que os contatos A e B estiverem a temperaturas diferentes. Esta diferença de potencial é

a propriedade termoelétrica do par. Para medir a diferença de potencial V_T (Fig.2.6.b), um galvanômetro ou um voltímetro deve ser inserido no circuito, o que introduz dois contatos (B e C) onde os fios do instrumento são conectados. Se estes fios são do mesmo material, e se ambos os contatos estão a uma mesma temperatura, denominada temperatura de referência, a diferença de potencial é a mesma do circuito simples, com uma das junções na temperatura de referência. No caso da Fig.2.6.b o termômetro digital é o instrumento que mede a diferença de potencial entre os fios do termopar, convertendo a medida de V_T em leitura da temperatura da junção A. A diferença de potencial V_T , não considerando uma pequena correção, é diretamente proporcional à temperatura da junção A. Os contatos B e C estão na temperatura ambiente [1-9].



Figs.2.5- Circuitos de Termopares. a) Circuito Simples (com Junções às Temperaturas T_A e T_B , onde T_B é de referência); b) Circuito com Termômetro Digital Medindo a Temperatura T_A da Junção A.

i) VANTAGENS:

Os termopares fazem medidas em um grande intervalo de temperatura com boa precisão, inclusive abaixo dos 600°C, onde os pirômetros de infravermelho não podem ser utilizados [1].

Outra vantagem dos termopares está no seu custo baixo de manutenção, que é fácil e rápida [1].

ii) DESVANTAGENS:

A fragilidade de um termopar, para temperaturas altas, faz com que o seu tempo de vida útil seja curto [1].

O termopar não mede diretamente a temperatura do substrato, sendo obrigatório haver um bom contato térmico da junção do termopar com a amostra em processo, para obter uma medida precisa. Para aumentar a precisão, usualmente, o termopar é fixo em uma amostra teste, com as mesmas características das lâminas que são processadas. Esta amostra teste é colocada próxima à lâmina em processamento [1]. Um outro método é encostar ou aproximar a junção do termopar diretamente na lâmina em tratamento, para obter a medida da temperatura do substrato. Neste caso pode ocorrer a contaminação da lâmina durante o processamento.

Há uma certa diferença entre as temperaturas iniciais da lâmina em tratamento no sistema RTP e a do termopar, pois, quando se inicia cada ciclo de aquecimento, o termopar demora um pouco para responder ao aumento rápido da temperatura da amostra, que está sendo aquecida por radiação e que está em contato térmico com a junção do termopar. No entanto, esta diferença desaparece quando o sistema RTP alcança o período de equilíbrio dinâmico desejado para

um certo processamento.

2.4 - UNIFORMIDADE DE AQUECIMENTO DO FORNO DE RTP.

Como foi mencionado no capítulo 1 - item 1.3, pode haver uma diferença entre as temperaturas das paredes da câmara de processos do forno com a do substrato em processamento, de até 700°C [5]. No entanto, é necessário que a uniformidade de aquecimento seja suficientemente boa, para que não se prejudique todo um tratamento específico do substrato. As dificuldades tecnológicas para se manter a uniformidade de temperatura, principalmente na superfície do substrato, são questões a serem analisadas a seguir. Este assunto é de grande importância para a tecnologia RTP, bem como para a de fornos térmicos.

2.4.1 - UNIFORMIDADE DE AQUECIMENTO SOBRE A SUPERFÍCIE DO SUBSTRATO EM PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO.

Como uma distribuição uniforme de energia térmica dentro de uma câmara de processos não nos revela exatamente qual o comportamento da temperatura na superfície do substrato em um processamento, tenta-se medir diretamente na lâmina a uniformidade de aquecimento. Uma não-uniformidade de temperatura pode causar danos do tipo: distorção, deformação (através do "stress" térmico) e ativação não-uniforme de dopantes. Pode-se obter uma informação sobre a uniformidade do aquecimento do substrato através de algumas medidas como: examinar o seu nivelamento pós-processamento, sua distorção e uniformidade de resistividade [1].

O nivelamento e a distorção dos substratos pós-processamento podem ser medidos em aparelhos comerciais, fornecidos com os equipamentos RTP, com padrões de nivelamento/distorção. Pode-se executar um processo, controlando-se a uniformidade térmica na superfície da amostra dentro de padrões determinados pelo fabricante [1].

A análise da uniformidade da temperatura pela medição da uniformidade da resistividade dos substratos de silício, após implantação iônica, apresenta uma certa dificuldade devido a alguns fatores: a precisão dos instrumentos de medição da resistividade e da dose implantada de dopantes. Entretanto, pode-se medir a resistividade da amostra pós-recozimento em vários (centenas) pontos distintos. A análise da uniformidade da resistividade no substrato, associada com a dose implantada de dopantes e relacionada com a temperatura do processo, permite determinar a sensibilidade destes parâmetros em relação ao aquecimento da lâmina processada e verificar a uniformidade do aquecimento [1].

Um outro parâmetro de desempenho relacionado com o aquecimento dos substratos, são os defeitos que aparecem na rede cristalina das lâminas semicondutoras, principalmente, no silício. Os "slips" (deslocamentos) ocorrem em grande quantidade quando a uniformidade da temperatura não é suficiente. Os "slips" são defeitos de deslocamento, aparecendo macroscopicamente como uma linha muito fina sobre o cristal e, geralmente, são visualizados nas bordas das amostras que foram recozidas. São causados por gradientes de temperatura no cristal. O comportamento da uniformidade de aquecimento da amostra pode ser analisado através da densidade de "slips" e a sua profundidade na rede cristalina. Para se evitar a formação de "slips" nas bordas

dos substratos, alguns artigos propõem uma certa compensação, pelo direcionamento da energia radiante para as bordas [8].

2.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] - Walter Thruston and Richard Seaman, AG Associates - "Rapid Thermal Processing Systems Performance" - Microelectronic Manufacturing and Testing - vol.8 n.8 - jul/85 - pgs.8,9 e 10.

[2] - R. Erichsen Jr., W.H. Schreiner, C.M. Hasenact e J.P. Souza - "Forno de Lâmpadas Halógenas para Processamento Térmico Rápido de Silício" - II Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica - jul/87 - pgs.529-538.

[3] - Ronald E. Sheels - "Rapid Thermal Processing Systems" - Microelectronic Manufacturing and Testing - vol.8, n°.8 - jul/85 - pgs.16-18.

[4] - Alexandre S. Lujan, F.C. Prince, Emílio C. Bortollucci - LPD - IFGW - UNICAMP - "Forno Rápido Controlado por Microcomputador para Aplicação em Processamento de Materiais Semicondutores" - II Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica - jul/87 - pgs.606-607.

[5] - Alexandre S. Lujan - "Difusão de Enxofre em Arseneto de Gálio por Processamento Térmico Rápido - Tese de Mestrado - pgs.6-29 - Instituto de Física "Gleb Wataghin" - Departamento de Física Aplicada - Laboratório de Pesquisas em Dispositivos (LPD) -

UNICAMP - Janeiro de 1991.

[6] - J.M. Dilhac - MRS Symposium Proceedings - vol.146 - pgs.333-334 - april/89 - "Kinetics of Rapid Thermal Oxidation: Critical Analysis of Experimental Results".

[7] - J. Nulman, B. Cohen, W. Blonigan, S. Antonio, R.Meinecke and A. Gat - MRS Symposium Proceedings - vol.146 - pgs. 461-462 - April/89 - "Pyrometric Emissivity Measurements and Compensation in an RTP Chamber".

[8] - R. Kakoschke, E. Bußmann - MRS Symposium Proceedings - vol.146 - pgs.473-482 - "Simulation of Temperature Effects During Rapid Thermal Processing".

[9] - Oséas Valente de Avilez Filho - Laboratório de Eletrônica e Dispositivos (LED) - FEE - UNICAMP - Tese de Mestrado-apêndice B pgs.B4 e B5 - maio/78 - "Projeto e Construção de um Controlador de Temperatura para Fornos de Difusão".

CAPITULO 3

O SISTEMA PROJETADO DE RTP.

3.1- A PARTE MECANICA DO FORNO DE RTP.

No capítulo 2, mencionaram-se os diferentes tipos de sistemas de processamento térmico rápido com as respectivas fontes radiantes de aquecimento. No protótipo desenvolvido foi utilizado um conjunto de lâmpadas de tungstênio-halogênio, como fonte de calor. Foi necessário estudar uma forma de como arranjar este grupo de lâmpadas, tendo como objetivo principal: dispô-las de modo que o rendimento do equipamento de RTP fosse o melhor possível, com mínimo de custo, facilidade de manutenção e, principalmente, alta eficiência no aquecimento, ou seja, concentrar uma grande quantidade de energia térmica sobre o substrato em processamento de até 4" de diâmetro. Optou-se por um conjunto de 11 lâmpadas de 1500W com cerca de 19 cm de comprimento útil de aquecimento.

O projeto da parte mecânica do forno de RTP foi dividido em duas partes: a primeira foi o projeto da fonte geradora de calor do sistema, também denominada câmara de aquecimento, e a segunda foi o projeto da câmara de processos. O projeto de cada câmara, com os seus respectivos detalhes, é mostrado a seguir neste capítulo. Na Fig.3.1, está a esquematização do projeto total da parte mecânica do forno de RTP construído.

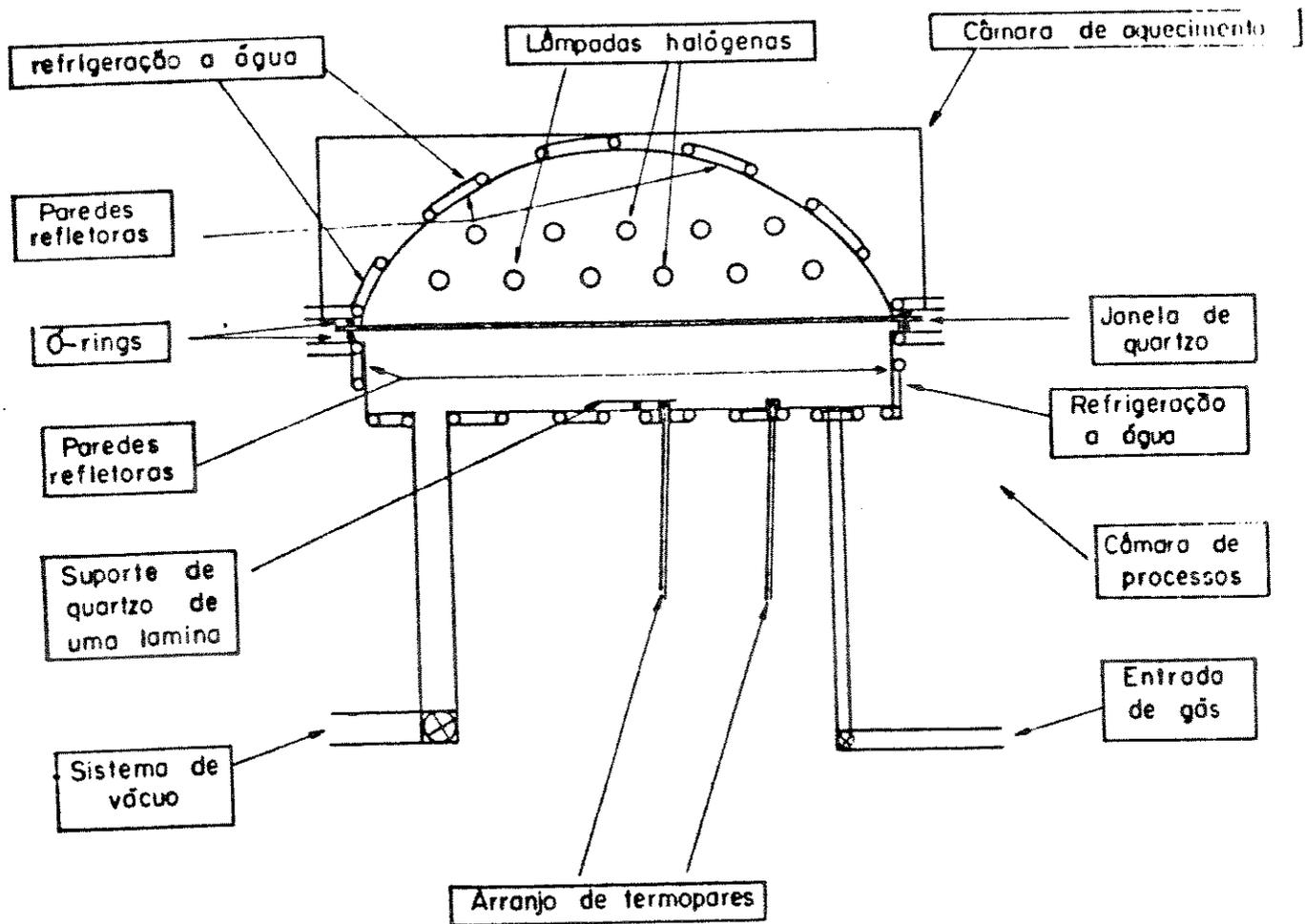


Fig.3.1 - Esquema geral do projeto do forno de RTP.

3.2 - PROJETO DA CAMARA DE AQUECIMENTO DO SISTEMA RTP.

Nesta parte do forno situam-se, basicamente, as 11 lâmpadas de tungstênio-halogênio (fonte geradora de calor), os 22 soquetes das lâmpadas, a parede refletora em forma cilíndrica côncava, que é refrigerada a água por um tubo de cobre, com formato de "serpentina", soldado na parte externa da parede, e o canal de o'-ring. Cada detalhe será explicado posteriormente.

Iniciando o projeto da câmara de aquecimento, esquematizou-se uma acomodação específica da fonte radiante de calor, do seguinte modo: são duas camadas de lâmpadas - uma com cinco e outra com seis (totalizando onze). O grupo de menor número de lâmpadas (cinco) está localizado acima do de maior quantidade (seis). Os grupos estão posicionados de modo a alternar uma lâmpada em baixo seguida de outra em cima. Conseqüentemente, tem-se uma fonte radiante de calor utilizando um arranjo onde se procurou concentrar ao máximo as lâmpadas, a fim de se ter uma alta concentração energética no espaço para tratamento de amostras com diâmetros de até 100 mm, tendo o sistema uma potência total de 16.500W. Para minimizar a perda de radiação, foi idealizado um refletor de luz para o arranjo de lâmpadas. Neste refletor não deve existir "cantos vivos", para não haver nenhuma variação drástica de gradiente de temperatura (acúmulo de energia) que ocorre nestas regiões. Assim, a parede refletora da câmara de aquecimento tem uma forma cilíndrica côncava, com o intuito de maximizar a reflexão de radiação, concentrando-a na câmara de processo. A uniformidade de aquecimento que a fonte geradora de calor deve proporcionar à câmara de

processo e, conseqüentemente, ao substrato em processamento, é o fator mais relevante para esta tentativa da utilização deste tipo de parede refletora. No capítulo 4, descreve-se o rastreamento da temperatura na câmara de processo, para a verificação do comportamento da uniformidade de aquecimento do sistema desenvolvido.

Na escolha do material básico para se construir as paredes do sistema, foram considerados:

i) facilidade de manuseio para soldar, cortar, usinar e encurvar em calandra (para a construção da parede refletora cilíndrica côncava);

ii) resistência a altas temperaturas;

iii) utilização em outros processadores térmicos rápidos [1];

iv) boa condutividade térmica (as paredes da câmara de aquecimento e de processo, são refrigeradas a água, e portanto devem ter uma boa condução térmica para não sofrerem um aquecimento exagerado);

v) custo baixo.

Em face destas considerações, optou-se pelo latão, que tem alto ponto de fusão (aproximadamente 800°C), boa condutividade térmica e ótimas propriedades para usinagem.

As dimensões da câmara de aquecimento foram calculadas baseadas no tamanho e disposição das lâmpadas. Como foi discutido, o arranjo das lâmpadas e, conseqüentemente, dos soquetes das mesmas, tem uma formação alternada em duas camadas. Isto determinou a largura e a altura da câmara.

A câmara é constituída por duas partes. Na parte interna situam-se os bulbos das lâmpadas com os respectivos filamentos; e

formada por duas paredes laterais (contendo onze furos cada, para a passagem das lâmpadas) e pela parede cilíndrica côncava refletora (com serpentina para a refrigeração, soldada na parte externa), como mostrado nas Figs.3.2 e 3.3. Na parte externa situam-se duas paredes, que suportam os soquetes das lâmpadas (que não podem ser aquecidas acima de 250°C), as paredes laterais e a tampa da câmara (Figs.3.2 e 3.3).

3.3 - PROJETO DA CAMARA DE PROCESSO DO SISTEMA RTP.

A câmara de processamento é separada da câmara de aquecimento através de uma janela de quartzo com vedação de o-rings de viton. Esta janela tem a função de isolar as câmaras de processo e de aquecimento, permitindo-se manter na câmara de processo um ambiente com vácuo ou gás, evitando-se a possibilidade de contaminação do substrato em processamento.

O formato da câmara é retangular e de altura pequena, para que a distância entre o suporte da amostra e a fonte radiante de calor seja a mínima possível, para máxima transferência de energia térmica (Fig.3.4). A largura e o comprimento da câmara foram determinados a fim de se processar lâminas de até 100 mm de diâmetro (Fig.3.5). A base e as paredes da câmara são planas, retangulares e refletoras de luz. As paredes são refrigeradas com água, que circula por uma serpentina (tubo de cobre de 1/4") a elas soldada na parte externa, como mostram as Figs.3.1 e 3.4.

Em uma das laterais maiores, abriu-se um espaço de formato retangular, fechado por uma tampa (porta), para entrada e saída das lâminas a serem processadas. A vedação da porta de entrada é feita por o-ring. Uma segunda porta foi projetada para uso

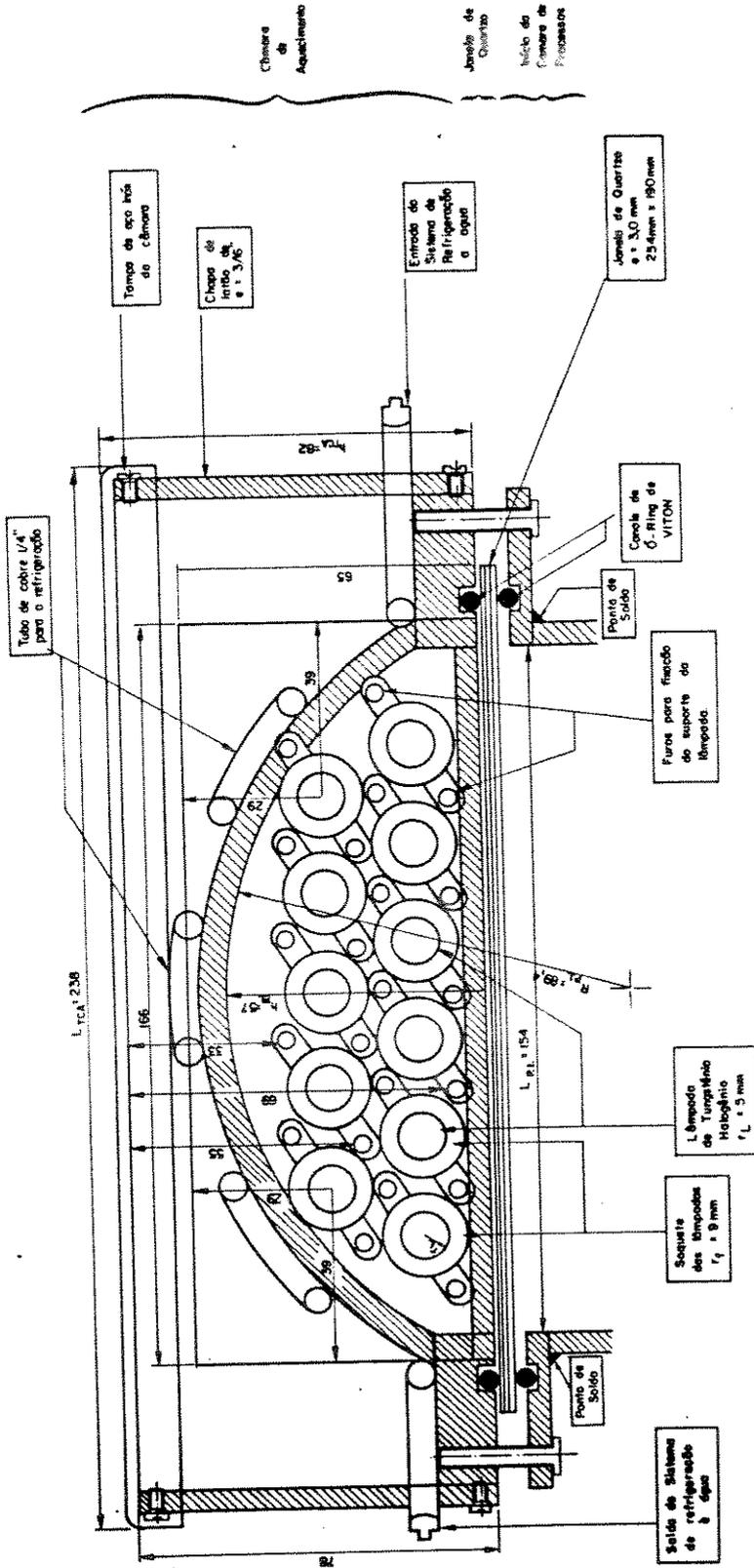


Fig.3.2 - Projeto da Câmara de Aquecimento do Sistema RTP em corte lateral.

Fig. 3.3. Projeto da Câmara de aquecimento do Sistema RTP em corte transversal (Vista frontal)

C.TCA = Comprimento Total da Câmara de Aquecimento = 320mm

C.PI = Comprimento da parte interna da Câmara de Aquecimento = 197 mm

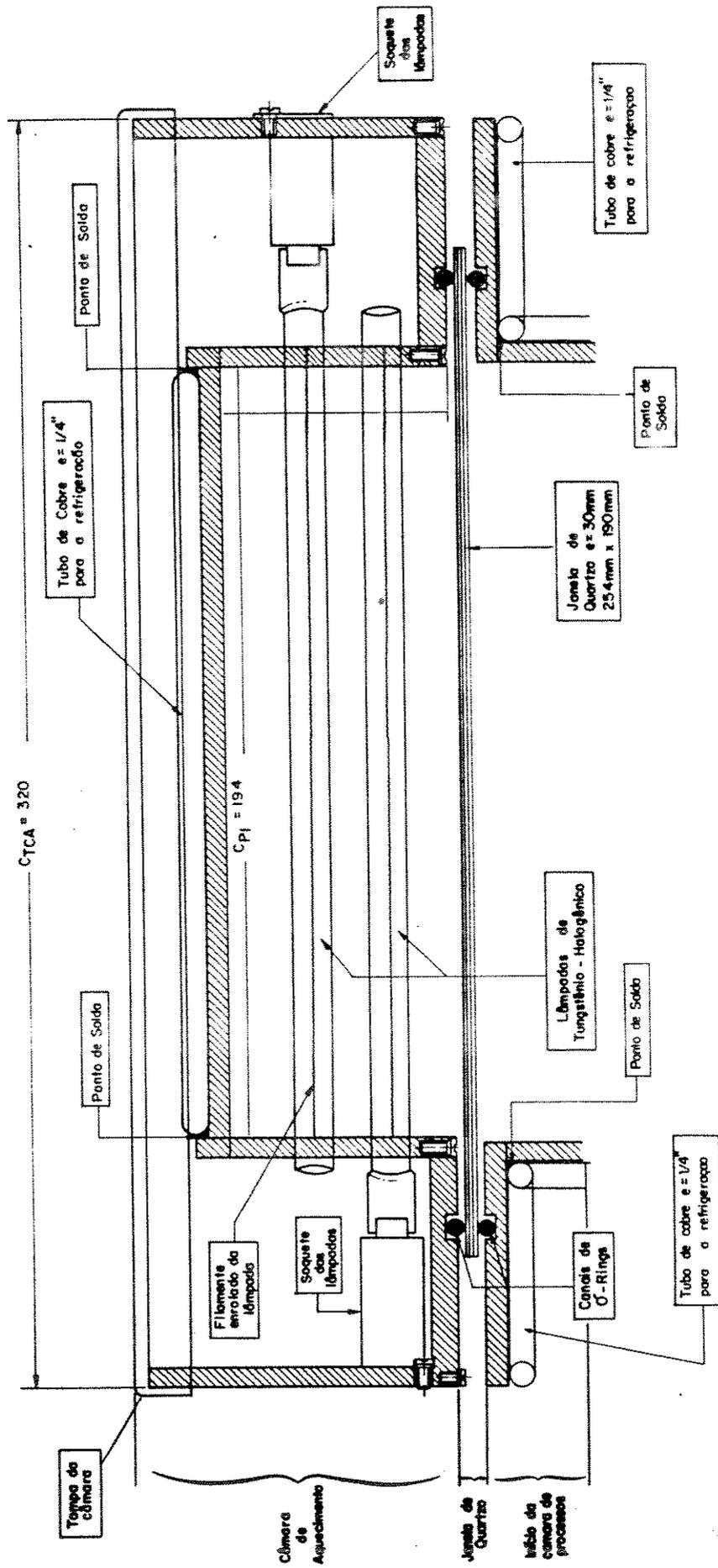
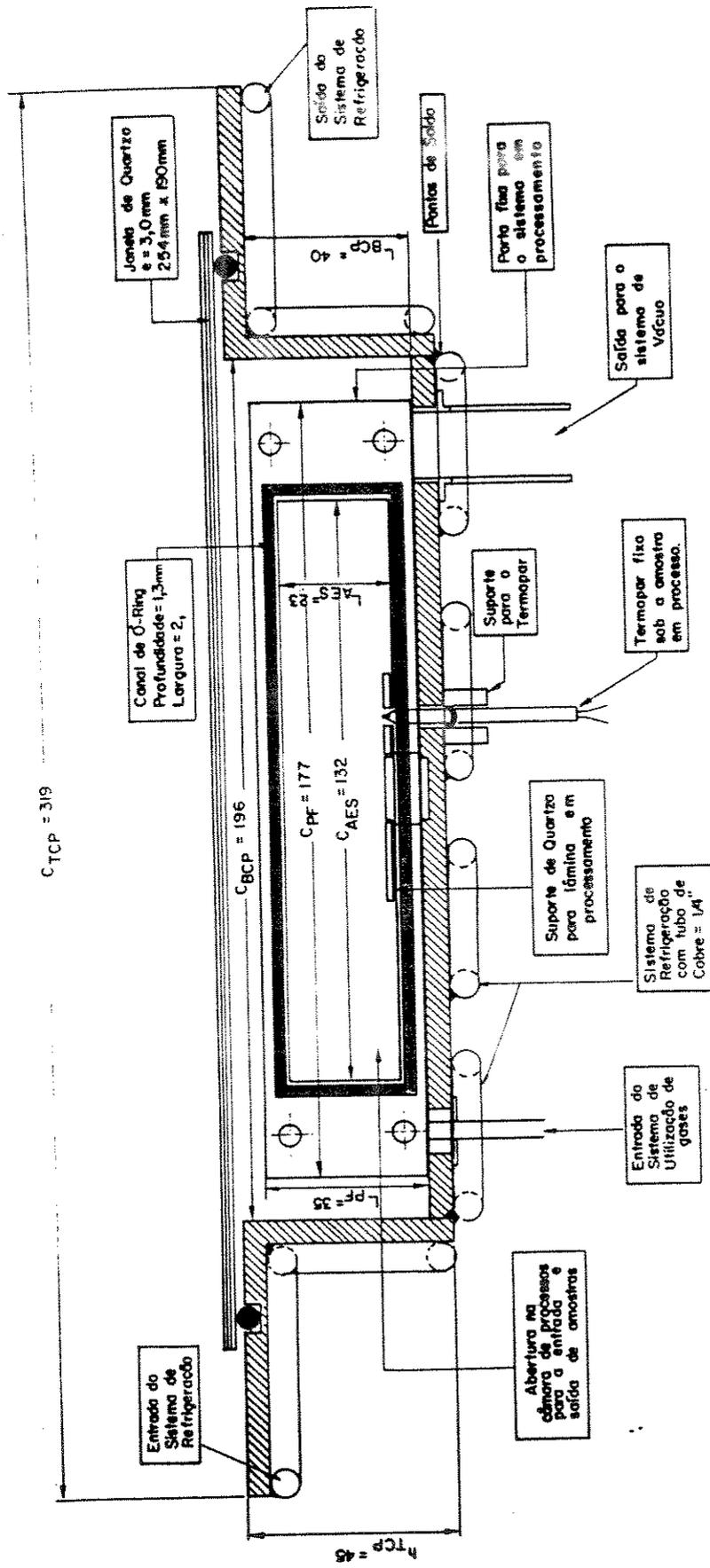
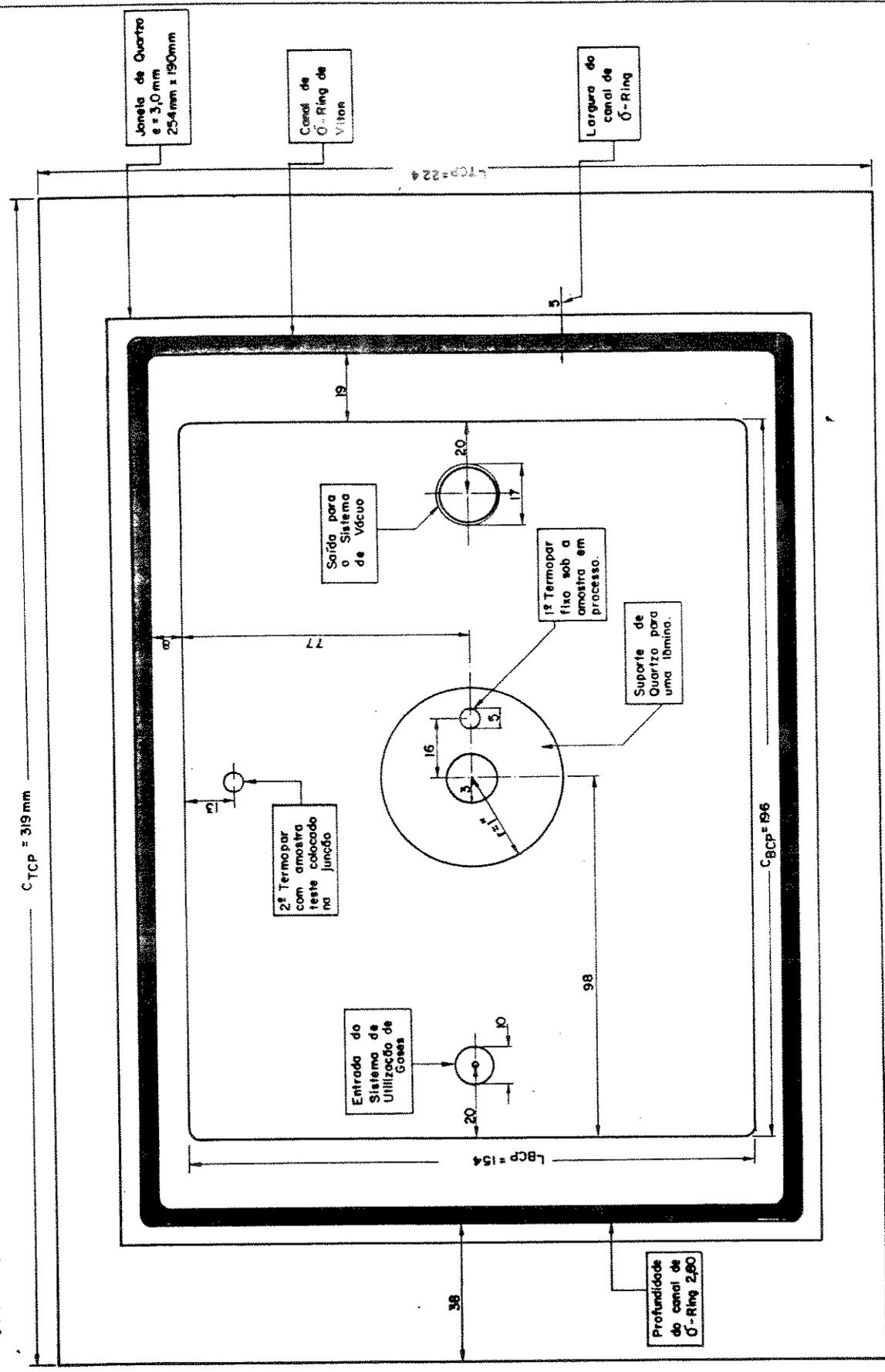


Fig. 3.4 - Projeto da câmara de Processos do Sistema RTP em corte transversal (Vista frontal)



- C_TCP = Comprimento Total da Câmara de Processos = 319mm
- h_TCP = Altura Total da Câmara de Processos = 45mm
- C_BCP = Comprimento da Base da Câmara de Processos = 196mm
- LAES = Largura da Entrada e Saída das Amostras = 23mm
- C_AES = Comprimento da Entrada e Saída das Amostras = 132mm
- L_PPF = Largura da Porta da Câmara de Processos = 35mm
- C_PPF = Comprimento da Porta da Câmara de Processos = 177mm

Fig 3.5 - Projeto da Câmara de Processos do Sistema RTP em corte vertical (Vista por cima).



C_{TCP} = Comprimento total da câmara de processos
 L_{TCP} = Largura total da câmara de processos
 C_{BCP} = Comprimento da base da câmara de processos
 L_{BCP} = Largura da base da câmara de processos

exclusivo em teste de caracterização do comportamento da uniformidade da temperatura interna do ambiente de processo. Nesta porta existe um encaixe (um corte transversal) para que um tubo de quartzo, que contém um termopar fixado em uma amostra de grafite, possa ser introduzido na parte interna da câmara. Isto permite um rastreamento do termopar e a obtenção da temperatura em vários pontos do sistema. A outra porta, sem corte transversal, é usada quando o forno de RTP está em processamento normal. Esta porta também tem uma camada refletora em sua superfície, para a reflexão dos raios de luz, como o restante das paredes do equipamento. As Figs.3.6 e 3.7 mostram o desenho das duas portas.

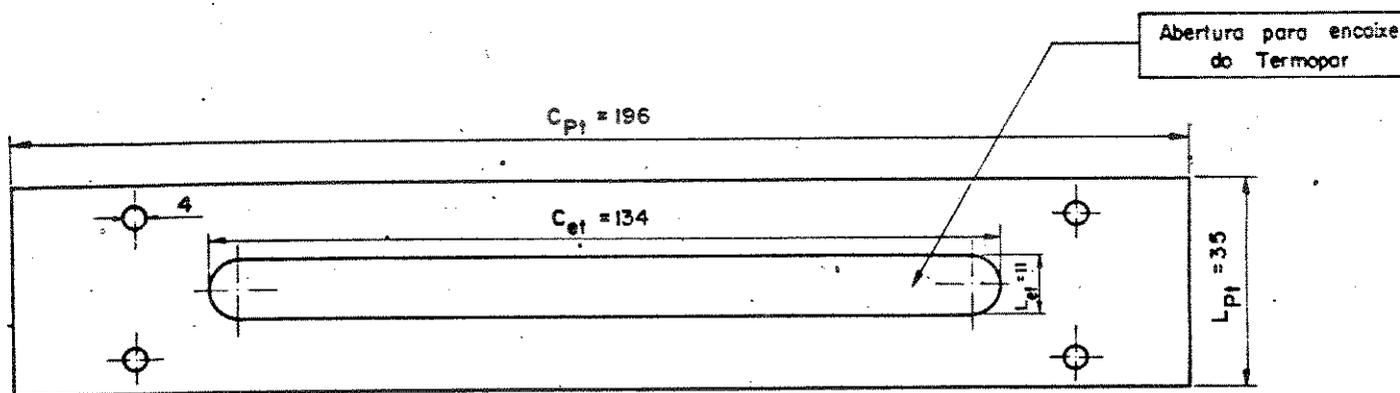


Fig.3.6 - Porta para Teste do Comportamento da Uniformidade de Temperatura dentro da Câmara de Processo.

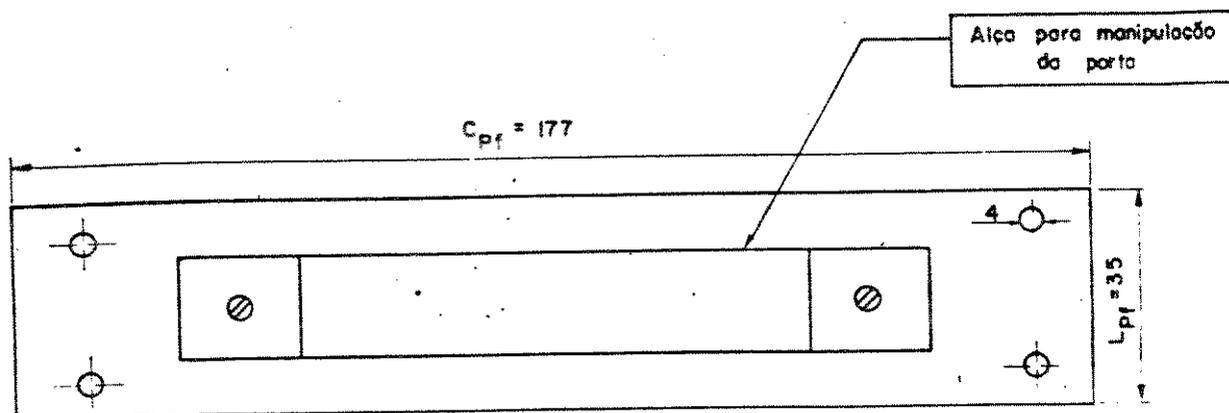


Fig.3.7 - Porta da Câmara de Processo do Sistema RTP .

3.4 - VEDAÇÕES DO SISTEMA.

Todas as vedações são feitas por o-rings de viton da empresa PARKER, que suportam altas temperaturas ($T = 430^{\circ}\text{C}$). Os o-rings de viton têm tamanhos padronizados, o que inclui espessuras, diâmetros internos e externos. Os canais foram calculados segundo as recomendações do fabricante. São utilizados o-ring N° 2-271 para a vedação da janela de quartzo e N° 2-043 para a vedação da porta da câmara de processo.

3.5 - MEDIDA DA TEMPERATURA.

A medição da temperatura do sistema é feita por um arranjo de dois termopares fixos na base da câmara de processo, ligados diretamente a um

termômetro digital FLUKE modelo 41531. Um dos sensores está localizado em baixo de uma pequena lâmina teste, que por sua vez localiza-se ao lado do suporte da amostra a ser processada. Esta, por sua vez, tem o segundo termopar encostado na sua base. Dependendo das condições do processamento, pode-se colocar este segundo sensor sobre a superfície do substrato. Este termopar determina a temperatura de processo. Os dois sensores são utilizados ao mesmo tempo, quando for necessária uma melhor avaliação da temperatura do processo.

3.6 - SISTEMA DE GASES/VÁCUO.

No sistema de gases e de vácuo, a entrada de gás foi feita para se manter, na parte interna da câmara de processo, o ambiente necessário para a execução de um determinado tratamento rápido. Pode ser utilizado a princípio, gases como nitrogênio, argônio e oxigênio. A saída dos gases é feita na base da câmara através de uma bomba de vácuo que permite, por meio de uma válvula, ajustar a pressão na câmara, ou, se necessário, criar um ambiente de vácuo.

3.7 - MONTAGEM DO FORNO.

Depois de projetado todo o forno, fez-se os cortes das peças de uma chapa de latão de 3/16" de espessura. Nas paredes laterais da câmara de aquecimento, foram feitos furos para a passagem das lâmpadas e fixação dos soquetes como mostrado na Fig.3.2. A curvatura da parede refletora côncava cilíndrica, foi feita em uma calandra. Em seguida realizou-se a usinagem das peças,

com abertura dos canais de o'-rings e os seguintes furos na base da câmara de processo: dois para o acoplamento dos termopares, um para a entrada de gases e, um quarto, para conectar a bomba de vácuo.

A montagem do forno foi feita pela soldagem das peças de latão com solda prata, através de um maçarico de oxi-acetileno. Também, com o uso da solda prata, soldou-se o sistema de refrigeração da câmara de aquecimento, constituído de um tubo de cobre de 1/4" fixado na parte externa da parede cilíndrica côncava.

O tubo de cobre do sistema de refrigeração da câmara de processamento foi soldado com estanho, por ser mais fácil de se trabalhar (ponto de fusão mais baixo do que a prata) e por proporcionar também um bom contato térmico entre as partes.

A seguir, construiu-se o suporte de quartzo para os substratos e as peças de encaixe dos termopares.

Após a montagem, para se ter máxima reflexão dos raios de luz, nas paredes internas do equipamento, foi realizado uma niquelação. Entretanto, para a niquelação das partes internas do sistema, é obrigatória a execução de um excelente polimento das peças, antes da niquelação.

O sistema de refrigeração foi conectado ao encanamento de água refrigerada do laboratório através de tubos de poli-flo de 1/4". A entrada de gases ligada ao sistema de gás do laboratório, através de tubos de poli-flo de 1/4", tem um fluxômetro para determinar o fluxo de gás dentro da câmara de processos (até 8l/min). A bomba de vácuo utilizada é uma bomba mecânica SARGENT WELCH modelo 1376.

3.8 - CONTROLADOR DE POTÊNCIA DAS LÂMPADAS DE TUNGSTÊNIO-HALOGÊNIO.

O controlador construído baseou-se no controlador desenvolvido no LPD do Instituto de Física "Gleb Wataghin" da UNICAMP [1-3].

A fonte radiante de energia do sistema RTP é um conjunto de 11 lâmpadas de tungstênio-halogênio, com 1500W/220V cada uma. A energia elétrica para sua alimentação é trifásica, sendo que duas fases são utilizadas para controlar quatro lâmpadas cada uma e a terceira fase para as três lâmpadas restantes, totalizando uma potência de 16500W. Assim, é necessário a utilização de três circuitos controladores de potência das lâmpadas, um para cada fase.

O objetivo deste item é descrever, de forma geral, estes circuitos controladores, que são, basicamente, a parte elétrica do processador térmico rápido.

3.8.1 - DESCRIÇÃO DAS PLACAS DO CONTROLADOR DE POTÊNCIA DAS LÂMPADAS DE TUNGSTÊNIO-HALOGÊNIO.

A alimentação do controlador de potência da fonte radiante de energia é trifásica. Têm-se, portanto, três placas (N.1,2 e 3) controladoras independentes, uma para cada fase da rede elétrica. Duas das três placas (N.1 e 2) estão ligadas em quatro lâmpadas cada uma e a terceira delas (a N.3), está acionando o funcionamento das outras três lâmpadas, do grupo de onze. Cada uma das placas aciona um conjunto de triacs para o controle da potência fornecida à fonte radiante. O esquema da Fig.3.8, mostra a ligação das placas controladoras com os triacs, as lâmpadas e a rede elétrica.

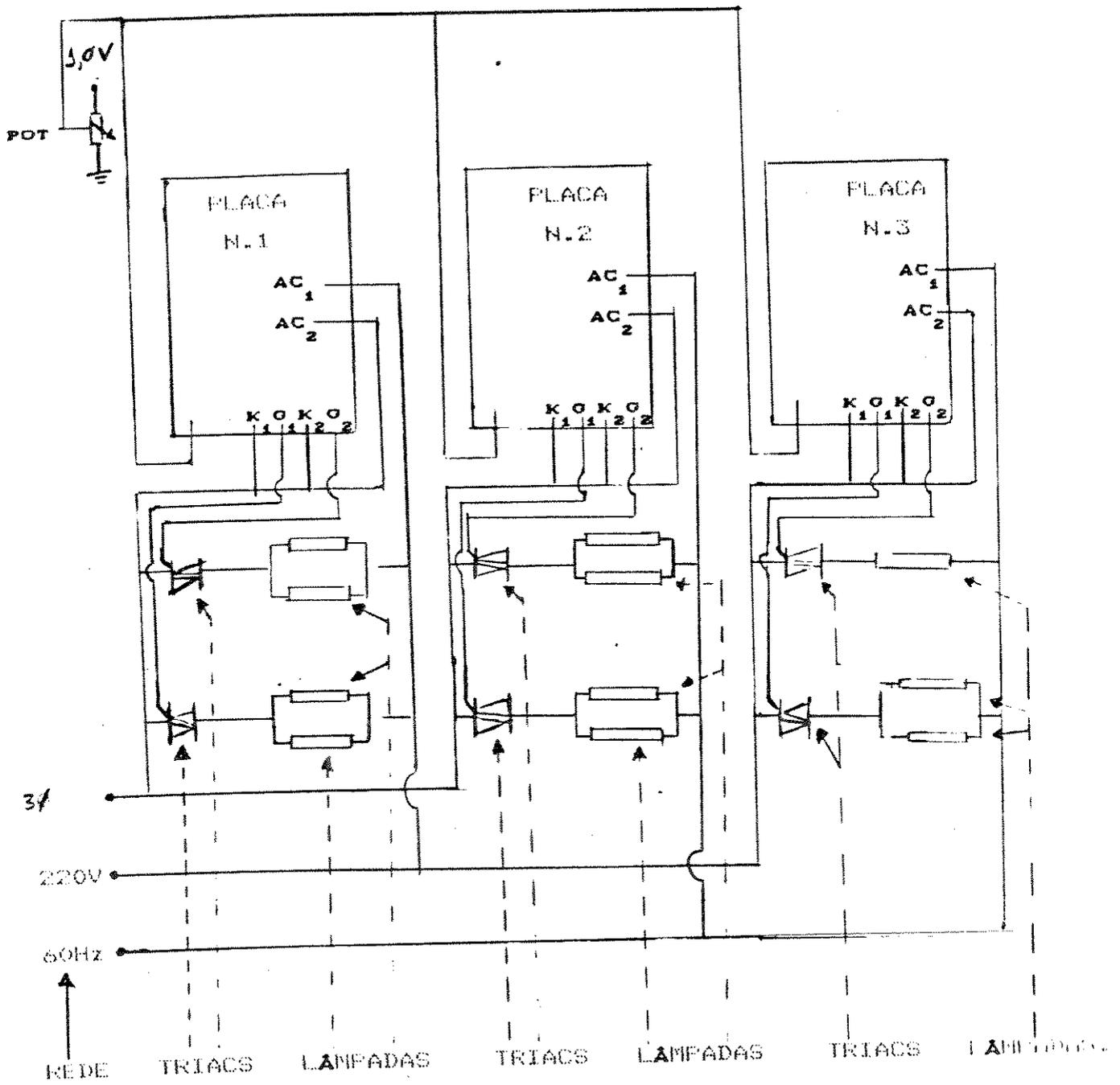


Fig.3.8 - Ligaço PLACAS-TRIACS-LAMPADAS-REDE.

No diagrama de blocos da Fig.3.9, esquematiza-se uma das placas do controlador de potência, um conjunto de lâmpadas halógenas e os triacs.

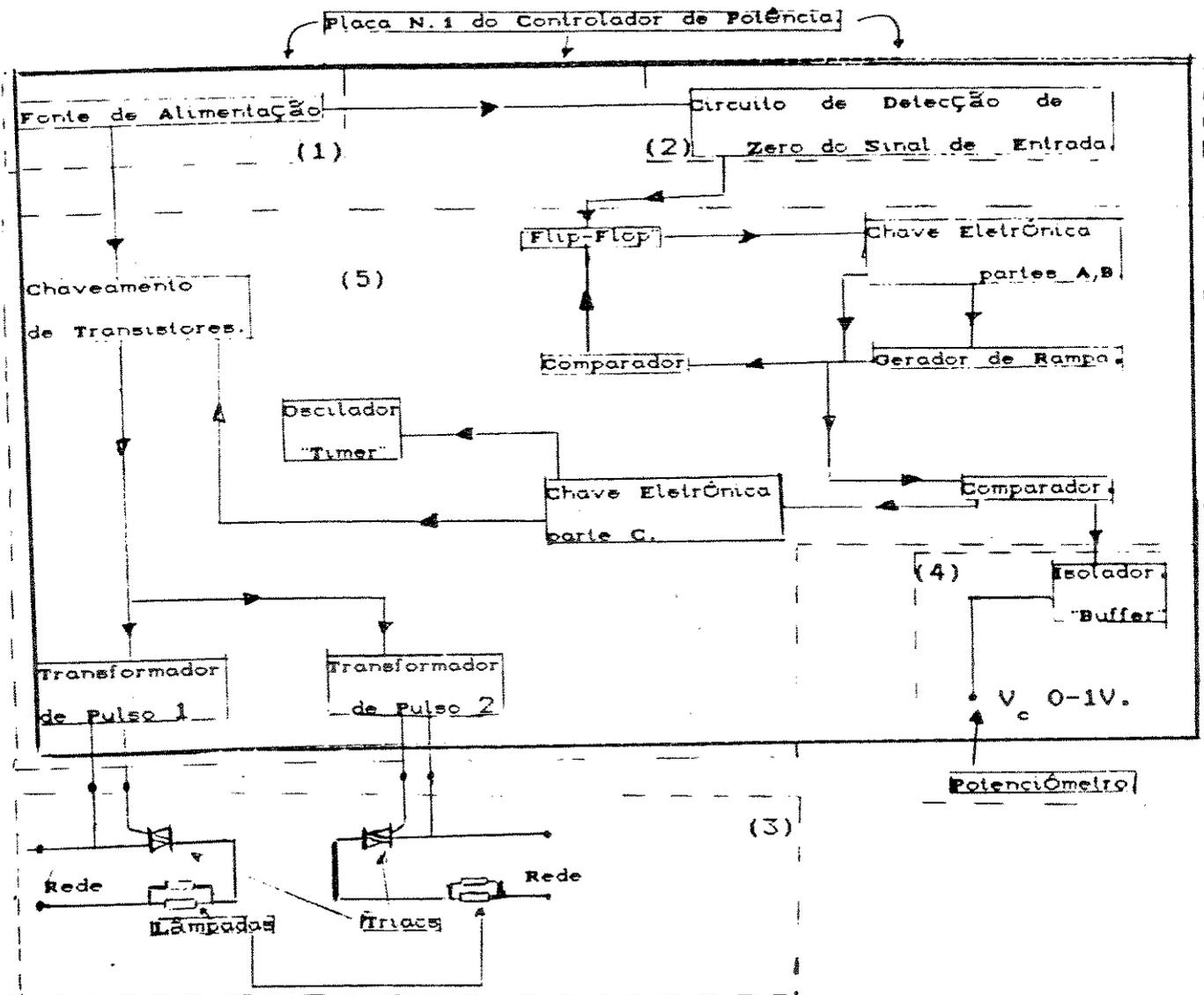


Fig.3.9 - Diagrama de blocos de uma placa do controlador de potência, ligada ao sistema Triacs-lâmpadas de halogênio-rede.

Dividiu-se a descrição do circuito controlador em cinco partes, como mostrado na Fig.3.9:

- (1) Fonte de Alimentação;
- (2) Circuito de Detecção de Zero do Sinal;
- (3) Circuito: TRIACS-LAMPADAS DE HALOGÊNIO-REDE;
- (4) Isolador ("Buffer");
- (5) Circuito Restante: Chave Eletrônica, Comparadores, Oscilador ("Timer"), Chaveamento de Transistores, Transformadores de Pulso e Flip-Flop.

3.8.2 - FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO CONTROLADOR.

Na fonte de alimentação do sistema de controle, há um retificador de onda completa de ponte, que consiste de um transformador e quatro diodos, montados segundo o esquema da Fig.3.10:

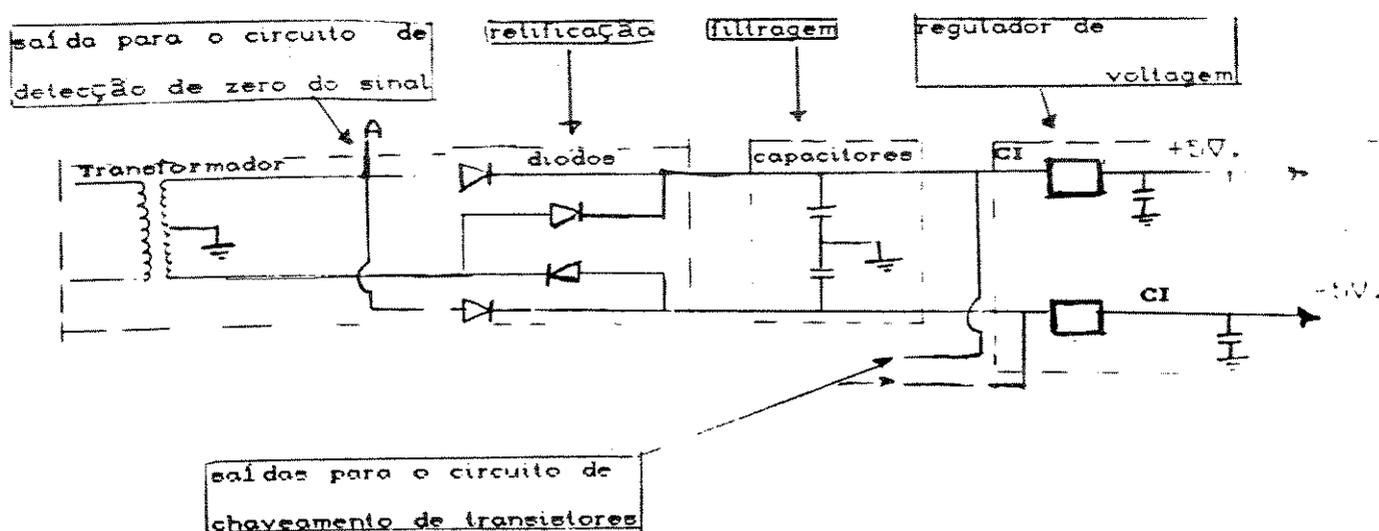
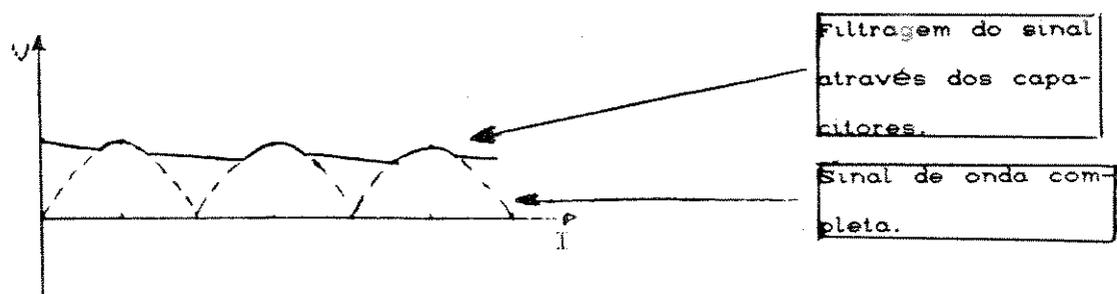


Fig.3.10 - Fonte de Alimentação do Controlador de Potência.

Os capacitores são colocados para filtrar o sinal de onda completa, que é feito pelo circuito retificador dos diodos. Na saída dos capacitores tem-se o sinal esquematizado na Fig.3.10.A.

Fig.3.10.A - Filtragem do Sinal Através dos Capacitores.



Utilizam-se dois Circuitos Integrados (CIs - modelo: 7805 e 7905 - Fig.3.10), para regular a tensão da fonte de alimentação do sistema. Um deles regula a tensão negativa e o outro a positiva.

3.8.3 - CIRCUITO DE DETECÇÃO DE ZERO DO SINAL.

O circuito de detecção de zero tem o objetivo de controlar o disparo dos triacs próximo do zero da função senoidal de saída do transformador da fonte de alimentação, para acionar as lâmpadas.

Na Fig.3.11 mostra-se o esquema do circuito de detecção de zero do sinal. O sinal de saída do transformador da fonte de alimentação, no ponto A das Figs.3.10 e 3.11, é do tipo senoidal, que é transformado em onda quadrada por um comparador (CI - modelo: LM 311). Na ramificação B, o sinal é dividido em duas partes: uma passa por um inversor e um diferenciador e a outra passa por um diferenciador.

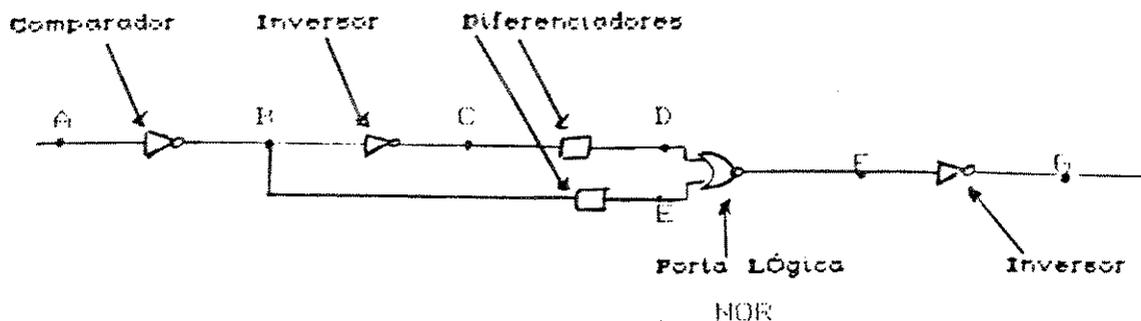


Fig.3.11 - Esquemática do Circuito Controlador de Zero da Função.

Na Fig.3.12, apresenta-se o esquema de um diferenciador com os respectivos sinais de entradas e saída.

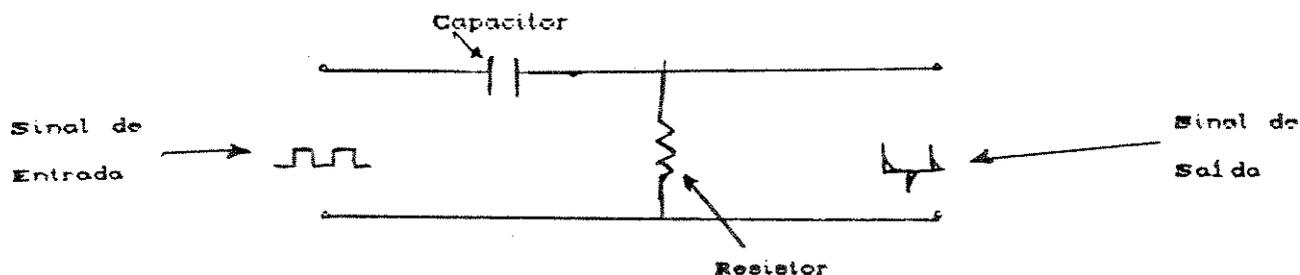
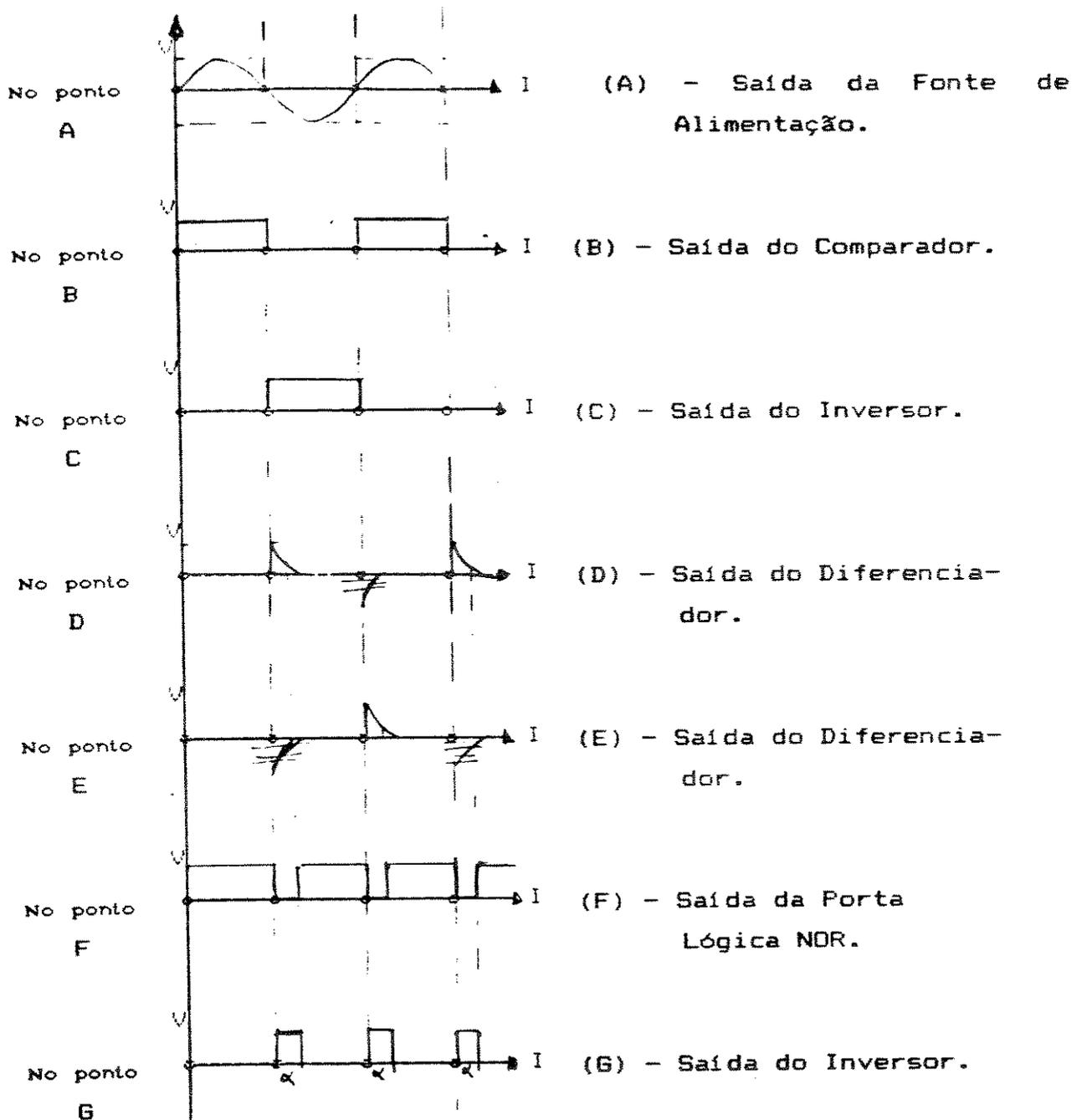


Fig.3.12 - Um Diferenciador com os Sinais de Entrada e Saída.

O sinal na saída é a derivada da função degrau na entrada. Como mostrado na Fig.3.11, os sinais que saem dos diferenciadores se dirigem para uma porta lógica do tipo NOR.

Nas Figs.3.13(A),(B),(C),(D),(E),(F)e(G), representam-se as formas de onda dos sinais que circulam pelo circuito de detecção de zero do sinal senoidal, aplicado à entrada do sistema (Fig.3.11).



Figs.3.13 - Representação das formas de onda dos sinais que circulam pelo circuito de detecção de zero do sinal senoidal.

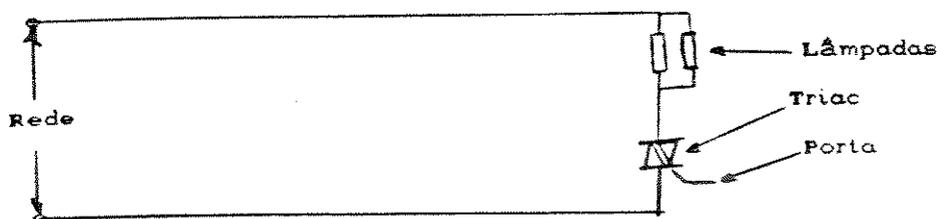
A forma de onda resultante do circuito de detecção de zero do sinal (Fig.3.11) é mostrada na Fig.3.13(G). Detecta-se o zero da função senoidal da entrada com um certo desvio α . Assim, em cada fase, controla-se os disparos dos triacs do sistema, que acionam as lâmpadas de tungstênio-halogênio.

3.8.4 - CIRCUITO: REDE - LAMPADAS HALÓGENAS - TRIAC.

Para cada fase há dois triacs e, assim, têm-se um triac para, no máximo, cada duas lâmpadas (Figs.3.8 e 3.9).

As lâmpadas de tungstênio-halogênio têm as seguintes características: 1500W/220V cada uma. O esquema do circuito a ser descrito é mostrado na Fig.3.14.

Fig.3.14 - Esquemática: TRIAC-LAMPADAS HALÓGENAS - REDE.



O sinal de entrada na placa é do tipo senoidal, conforme mostrado na Fig.3.14(A).

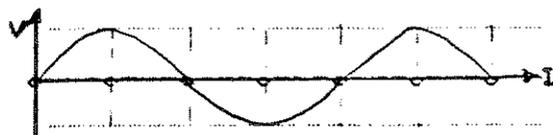


Fig.3.14(A)-Função Senoidal de Entrada na Placa.

O sinal correspondente à porta do triac está representado na Fig.3.14(B).

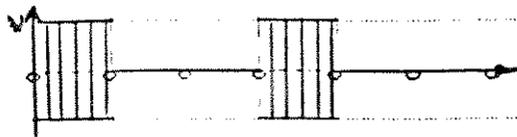


Fig.3.14(B) - Sinal da Porta do Triac.

Nas lâmpadas de halogênio, o sinal é da forma que está esquematizado na Fig.3.14(C).



Fig.3.14(C) - Sinal em uma Lâmpada Halógena.

Quando há um certo valor de tensão na porta do triac (disparo), uma corrente circula pela lâmpada. Quando a tensão na porta é nula, a lâmpada não é acionada e, portanto, não acende. Assim, os sinais da porta do triac e nas lâmpadas de halogênio estão sincronizados.

Por sua vez, a tensão no triac é representada na Fig.3.14(D).

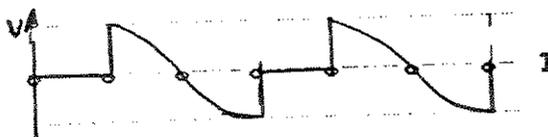


Fig.3.14(D) - Sinal de Saída do Triac.

3.8.5 - ANÁLISE GERAL DO ISOLADOR ("BUFFER") DO CIRCUITO CONTROLADOR DE POTÊNCIA.

No controlador de potência das lâmpadas, há um circuito isolador ou de proteção, que é chamado de "buffer". Este circuito proporciona uma entrada de alta impedância (que no caso varia de 0-1V) e provém uma corrente elétrica, com tensão constante, suficiente para alimentar o resto do circuito controlador.

O sistema isolador é constituído por um circuito integrado (CI - modelo: CA 3140), dois resistores e um capacitor. A esquematização de um "buffer", com as respectivas tensões de entrada e saída, e uma corrente elétrica suficiente para alimentar o circuito controlador, são apresentados na Fig.3.15.

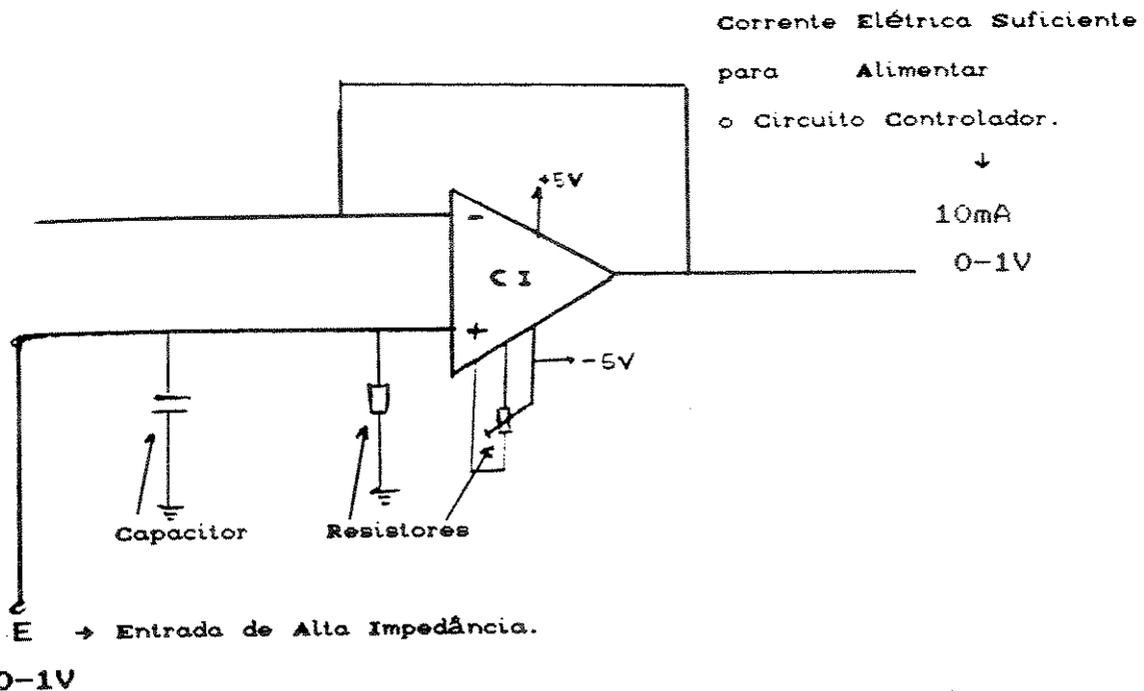


Fig.3.15 - Esquema Básico de um "Buffer" (Circuito Isolador).

3.8.6 - ANÁLISE GERAL DO RESTANTE DO CIRCUITO CONTROLADOR.

Esta parte constitui-se de (Figs.3.9 e 3.16): uma chave eletrônica (dividida em três partes: a, b e c), dois comparadores (CIs - modelo: LM 311) , um oscilador de baixa frequência ("timer"), um circuito de chaveamento de transistores, dois transformadores de pulso, um "flip-flop" (CI - mod.: 555) e um gerador de rampa. Na Fig.3.16 mostra-se este circuito em forma de diagrama de blocos.

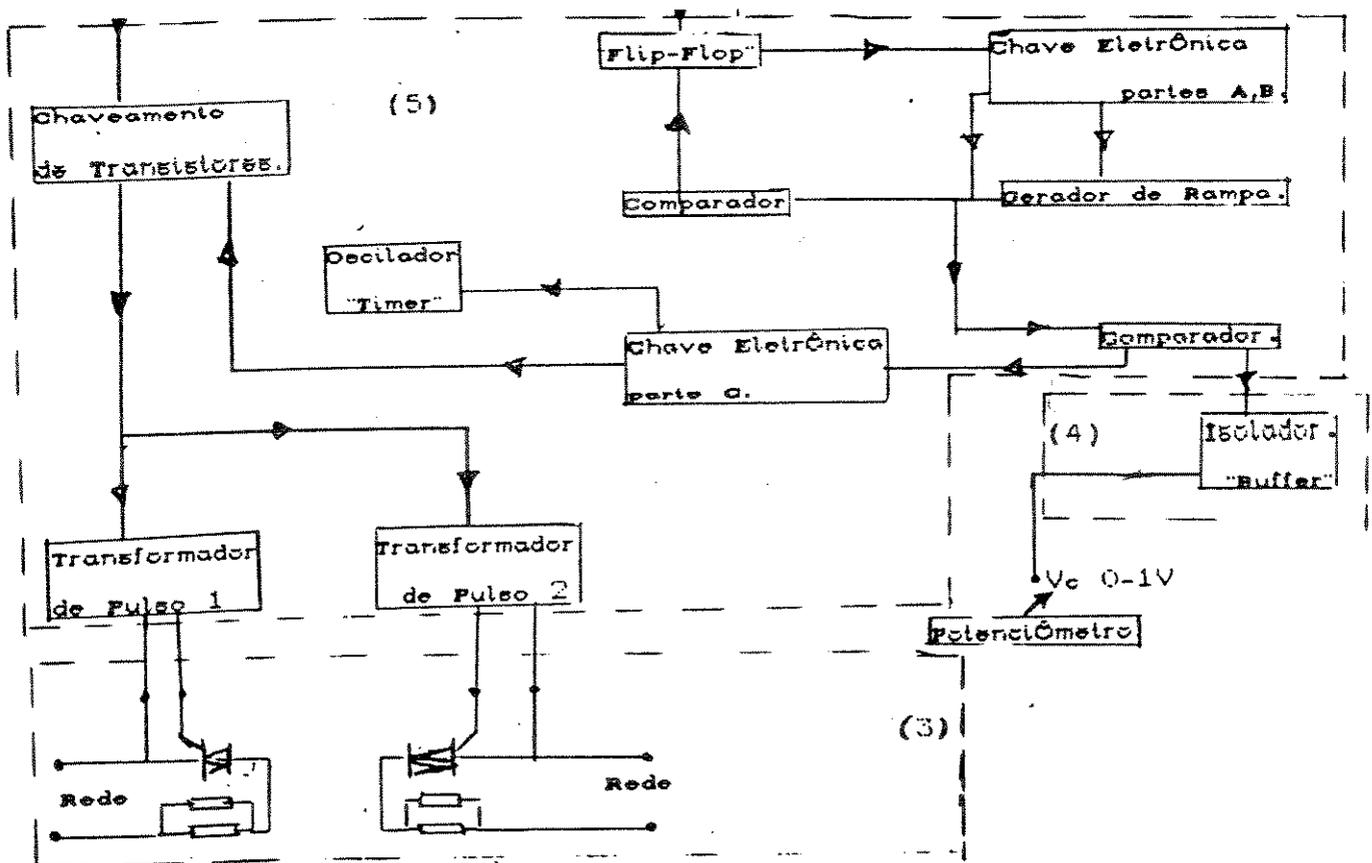
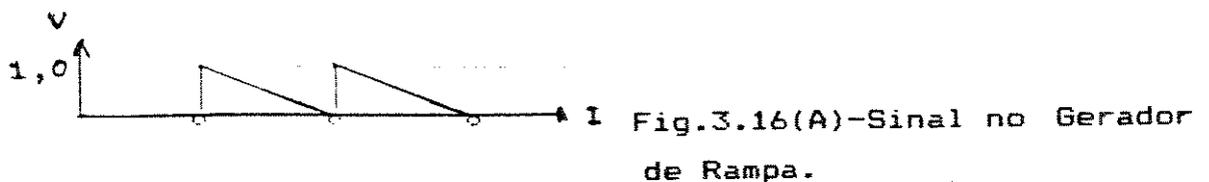
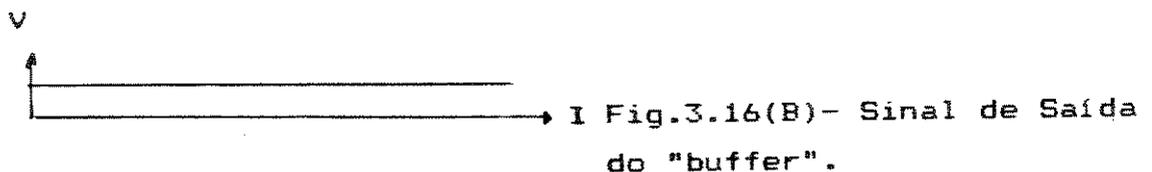


Fig.3.16 - Circuito Restante do Controlador de Potência da Fonte Radiante de Calor.

As chaves eletrônicas (a e b) carregam e descarregam o capacitor do gerador de rampa que, por sua vez, está sincronizado com o sinal do circuito de detecção de zero. Quem comanda a chave eletrônica é um "flip-flop" (CI), que determina a sincronia do circuito com a voltagem de um comparador. Este comparador determina a tensão correta para o gerador de rampa. O sinal do gerador de rampa está representado na Fig.3.16(A).



No circuito isolador do controlador ("buffer"), o sinal de saída para uma dada tensão (entre 0V e 1V) é constante. O esquema deste sinal está na Fig.3.16(B). Associando-se este sinal com o do gerador de rampa (como mostra a Fig.3.16(C)) tem-se, na saída do comparador, o sinal apresentado na Fig.3.16(D).



Este sinal de saída do comparador é aplicado ao oscilador de baixa frequência ("timer"), chegando na chave eletrônica c. Os respectivos sinais estão representados nas Figs.3.16(C),(D),(E) e (F).

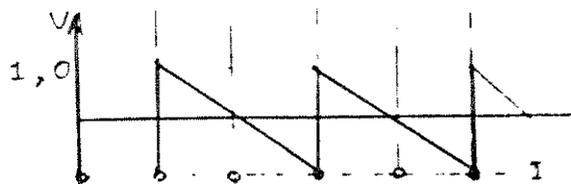


Fig.3.16(C)- Gerador de Ram-
pa + Controle ("buffer").

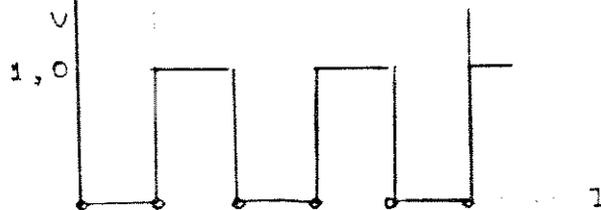


Fig.3.16(D)- Saída do Comp-
rador.

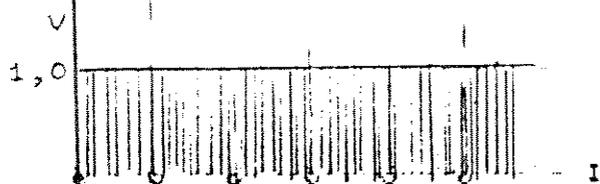


Fig.3.16(E)- Sinal do Oscil-
ador ("Timer") de Baixa
Frequência.

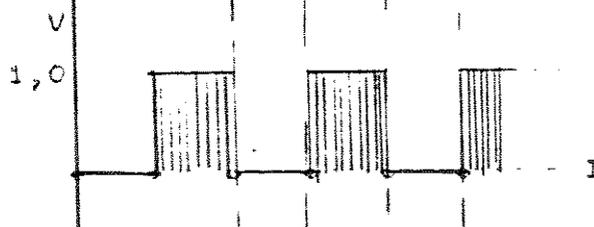


Fig.3.16(F)- Saída da Chave
Eletrônica.

O sinal de saída da chave eletrônica c , dirige-se para o circuito de chaveamento de transistores, para ser amplificado e aplicado aos transformadores de pulso que, por sua vez, respondem às frequências altas e funcionam como proteção através do isolamento do circuito de disparo da rede (circuito de detecção de zero), antes de chegar aos triacs. A partir daí, os triacs são acionados e, conseqüentemente, acendem as lâmpadas de tungstênio-halogênio.

3.9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1]- Alexandre S. Lujan - "Difusão de Enxofre em Arseneto de Gálio por Processamento Térmico Rápido" - Tese de Mestrado - pgs.6-29 - IFGW - Departamento de Física Aplicada - LPD - UNICAMP - jan/1991.
- [2]- R. Erichsen Jr., W.H. Schreiner, C.M. Hasenact e J.F. Souza - "Forno de Lâmpadas Halógenas para Processamento Rápido de Silício" - II Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica - jul/1987 - pgs.529-538.
- [3]- Alexandre S. Lujan, F.C. Prince, Emílio C. Bortullucci - LPD - IFGW - UNICAMP - "Forno Rápido Controlado por Microcomputador para Aplicação em Processamento de Materiais Semicondutores" - II Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica - jul/1987 - pgs.606-607.

CAPITULO 4

TESTE E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA RTP.

4.1 - INTRODUÇÃO.

Depois da montagem das partes mecânica e elétrica do equipamento de RTP, instalação dos sistemas de água refrigerada, de vácuo e de gases, além da colocação dos termopares para a medição da temperatura, iniciou-se a fase experimental de caracterização do sistema.

Os experimentos de teste e caracterização foram feitos sem a janela de quartzo, o que pode provocar dois tipos de problemas: dissipação de calor pelas aberturas existentes na câmara de aquecimento e a contaminação do ambiente interno de processamento das lâminas, pois não há vedação da câmara de processo.

A contaminação do ambiente da câmara de processo não foi um fator preocupante na fase de teste e caracterização do forno; as experiências necessárias e possíveis foram executadas. Todos os procedimentos destes experimentos são apresentados e analisados, a seguir.

4.2 - CURVA CARACTERÍSTICA DO PERFIL TEMPERATURA/TEMPO DO SISTEMA RTP.

Através da potência a que as lâmpadas de tungstênio-halogênio são submetidas, consegue-se controlar o forno

de RTP. Este controle é feito da seguinte maneira: aplicando-se um certo valor da potência, chega-se a uma determinada temperatura de estabilização, ou seja, de equilíbrio dinâmico, que é um patamar na curva característica do perfil temperatura/tempo, para um dado intervalo de tempo. As taxas de aquecimento e resfriamento, bem como o intervalo de tempo da estabilização da temperatura do sistema, são determinados pelo ato de colocar, manter e retirar a potência nas lâmpadas halógenas, que irradiam calor para o ambiente interno da câmara de processo.

O procedimento e as condições para a obtenção da curva característica do equipamento sob potência máxima foram:

(1) a amostra utilizada foi uma lâmina de silício de 1" de diâmetro;

(2) como o substrato era pequeno, foi possível colocar a junção do termopar, que é fixo na base da câmara de processo, encostada na superfície da lâmina, a fim de se obter um contato térmico satisfatório, o que permite a medição da temperatura da superfície da amostra;

(3) utilizou-se um fluxo de nitrogênio na câmara de 2,0 l/min e uma temperatura da água de refrigeração em torno de 15°C;

(4) o termômetro digital, que estava ligado ao termopar encostado no substrato, indicava a temperatura inicial da amostra em torno de 20°C;

(5) com esta temperatura inicial, acionava-se o cronômetro e aplicava-se potência máxima à fonte radiante de calor;

(6) em intervalos de 10 em 10 segundos, media-se a temperatura da lâmina, através do termômetro digital conectado ao

termopar;

(7) a estabilização da temperatura do sistema ocorreu em torno de 1000°C. Chegou-se a este patamar do perfil temperatura/tempo após 15s. Manteve-se o patamar por aproximadamente 80s. Durante este tempo a temperatura cresceu a uma taxa $\leq 1,0^\circ\text{C/s}$. Após 100s, mediu-se o ciclo de resfriamento da amostra, colocando zero de potência sobre a fonte radiante de calor.

(8) assim, realizou-se um ciclo térmico com 100% de potência sobre as lâmpadas de quartzo. Determinaram-se as taxas de aquecimento e resfriamento e estabeleceu-se a curva característica do perfil temperatura/tempo (Gráfico 4.1 e Tabela 4.1).

As aberturas para a saída do sistema de vácuo e colocação do segundo termopar foram fechadas por tampas de aço inox, por não serem necessárias neste experimento.

Os resultados estão mostrados na Tabela 4.1 e gráfico 4.1.

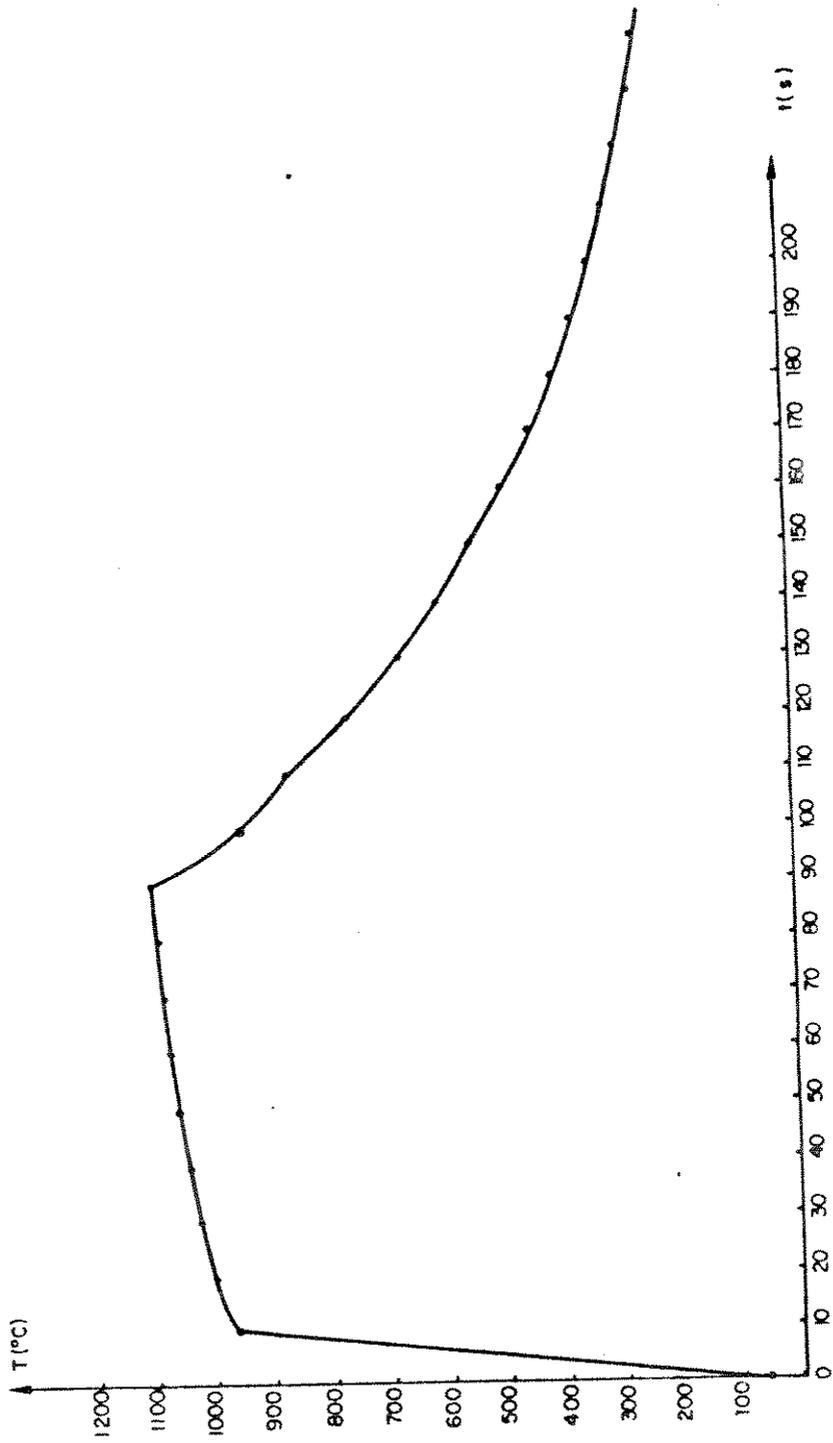
Tabela 4.1 - Medidas de Tempo e Temperatura para uma Amostra de Silício de 1", em um Ciclo Térmico de Potência Máxima no Sistema RTP.

t(s)		0		10		20		30		40		50		60		70		80		90	
T(°C)		23		958		998		1019		1037		1051		1063		1074		1084		1091	

t(s)		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190	
T(°C)		936		850		751		662		595		537		482		430		389		355	

t(s)		200		210		220		230		240		250		260		270		280		290	
T(°C)		326		296		274		254		237		222		209		198		187		179	

Gráfico 4.1 - Perfil Temperatura/Tempo do forno de RTP para potência máxima sobre as lâmpadas de Halogênio - Correspondeente da Tabela 4.1



A curva característica do perfil temperatura/tempo (Gráfico 4.1) mostra uma faixa de estabilização da temperatura em torno de 1080°C em 20s, com taxas máximas de aquecimento e resfriamento de 93,5°C/s e 15,5°C/s, respectivamente.

4.3 - VERIFICAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE TEMPERATURA NO AMBIENTE INTERNO DA CÂMARA DE PROCESSO DO SISTEMA RTP.

Para a medida da distribuição da energia térmica dentro da câmara de processo, foi desenvolvido um sensor de temperatura para o rastreamento interno do ambiente da câmara de processo. Este sensor constitui-se de uma amostra de grafite (cilindro pequeno), com uma abertura onde se introduziu a junção de um termopar. O conjunto foi colocado dentro de um tubo de quartzo (Fig.4.1), formando um sensor para a medição da temperatura em várias posições específicas da câmara de processamento.

As dimensões do cilindro de grafite são: diâmetro de 8,0 mm e comprimento de 5,0 mm. A abertura neste material é um furo central, na base do cilindro, de 2,5 mm de diâmetro e com profundidade de 3,0 mm, para a fixação da junção do termopar.

O tubo de quartzo tem 10 mm de diâmetro externo e 8,0 mm de diâmetro interno e o comprimento é de 200 mm. O termopar, dentro do tubo, estava encapsulado em um material apropriado (encapsulador de amianto) de 5,0 mm de espessura. Para completar o sistema de medição da temperatura, utilizou-se um termómetro digital ligado ao termopar.

No capítulo 3 - item 3.3, foi mostrado o projeto de uma porta da câmara de processo, com uma abertura exclusivamente

desenvolvida para o rastreamento da temperatura (Fig.4.2). Esta abertura foi construída para a passagem do tubo de quartzo com o sensor de temperatura (amostra de grafite + termopar).

Para evitar a dissipação térmica pela abertura da porta, projetou-se uma placa de amianto com 7,0 mm de espessura, com um furo de 12 mm de diâmetro, em uma posição específica. Esta placa (Fig.4.3) de amianto vedou a abertura, melhorou a fixação do tubo de quartzo e permitiu a medição da temperatura em pontos específicos dentro da câmara de processo. A Fig.4.4 mostra, em vista lateral, o sistema de medição da temperatura fixado na porta-teste e na placa de amianto.

As Figs.4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os projetos do sistema de medição da temperatura, da porta-teste para o rastreamento da temperatura, da placa de amianto para a vedação da abertura da porta-teste e o da fixação do sensor de temperatura na porta-teste e na placa de amianto, respectivamente.

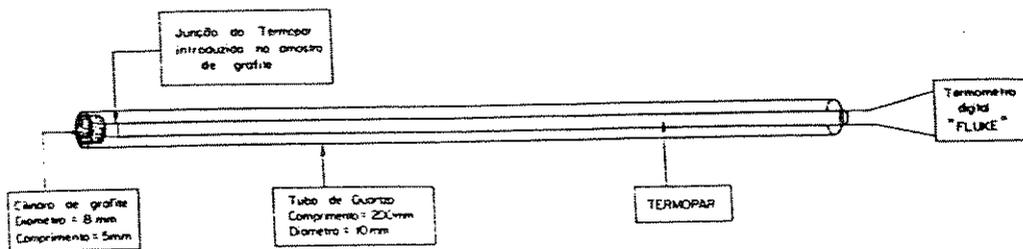


Fig 4.1 - Sistema para medição da temperatura Amostra de grafite + Termopar + Tubo de Quartzo + Termômetro Digital (Vista lateral)

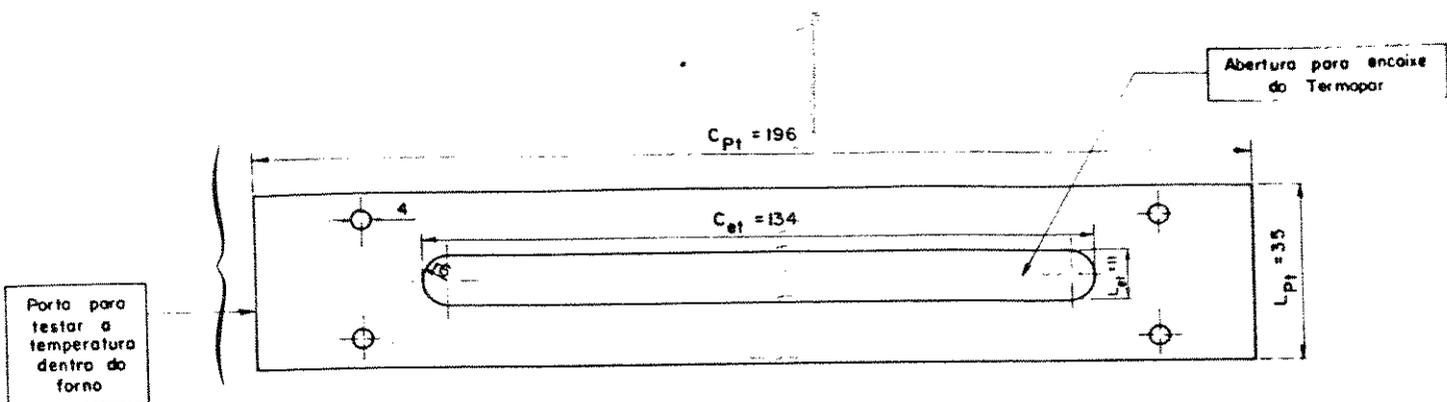


FIG. 4.2 Porta para teste do Compartimento da Uniformidade de Temperatura dentro da Câmara de Processos

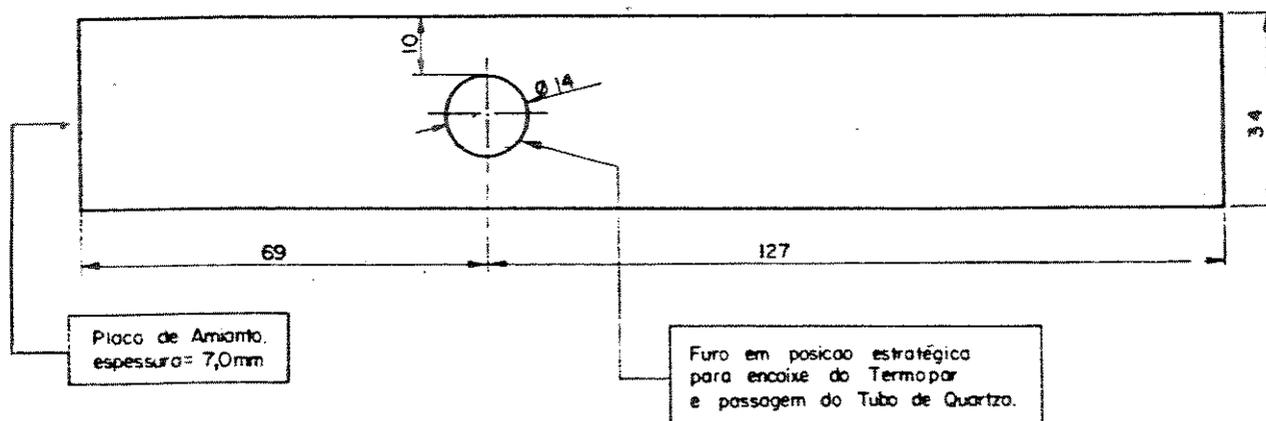


Fig.4.3 - Placa de Amianto para dificultar a dissipação de calor através da abertura da porta teste.

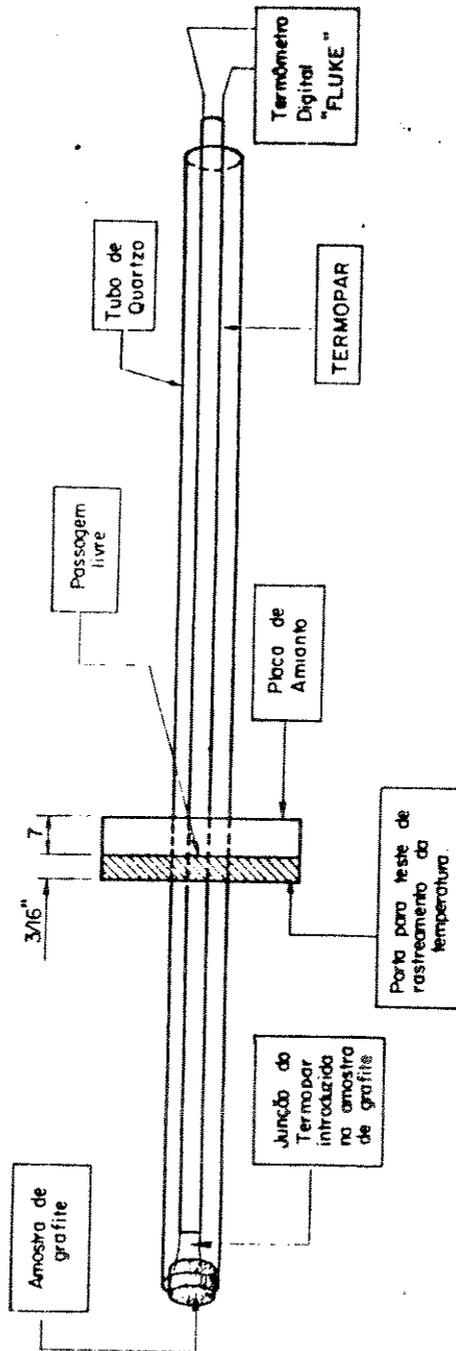


Fig 4.4 - Sistema para medição da temperatura encaixado na porta teste de Amianto.

O rastreamento para a verificação da uniformidade da distribuição da temperatura, no ambiente interno da câmara de processo, foi executado ao longo de dois eixos perpendiculares (x - transversal e y - longitudinal) que se cruzam no centro da câmara, em um plano horizontal. Este plano horizontal estava a 10 mm da base da câmara, na altura exata do suporte de quartzo da lâmina, que foi retirado durante as medidas. Assim, percorrendo com o sensor de temperatura nestas duas direções, pôde-se cobrir as principais áreas úteis da câmara.

A Fig.4.5 está mostrando a câmara de processamento, vista de topo, com as duas direções (x e y) percorridas pelo sensor de temperatura.

Foram medidos sete pontos no eixo x e cinco na direção de y. Em cada ponto fazia-se três medidas para verificar a repetibilidade do ciclo, ou seja, cada medida correspondia a um ciclo térmico, com duração que podia variar de 360 a 390 segundos. Esperava-se que a temperatura no sensor de grafite se estabilizasse. A variação encontrada entre as medidas foi de $\pm 5,0^{\circ}\text{C}$. O tempo em que a fonte radiante de energia foi mantida em funcionamento foi grande em relação aos tempos de processo normalmente utilizados. As potências fornecidas às lâmpadas halógenas foram de 40% no eixo x e, 20% no eixo y.

As Tabelas 4.2 e 4.3 indicam os valores de cada medida de temperatura de estabilização, em relação às posições nos eixos x e y, respectivamente.

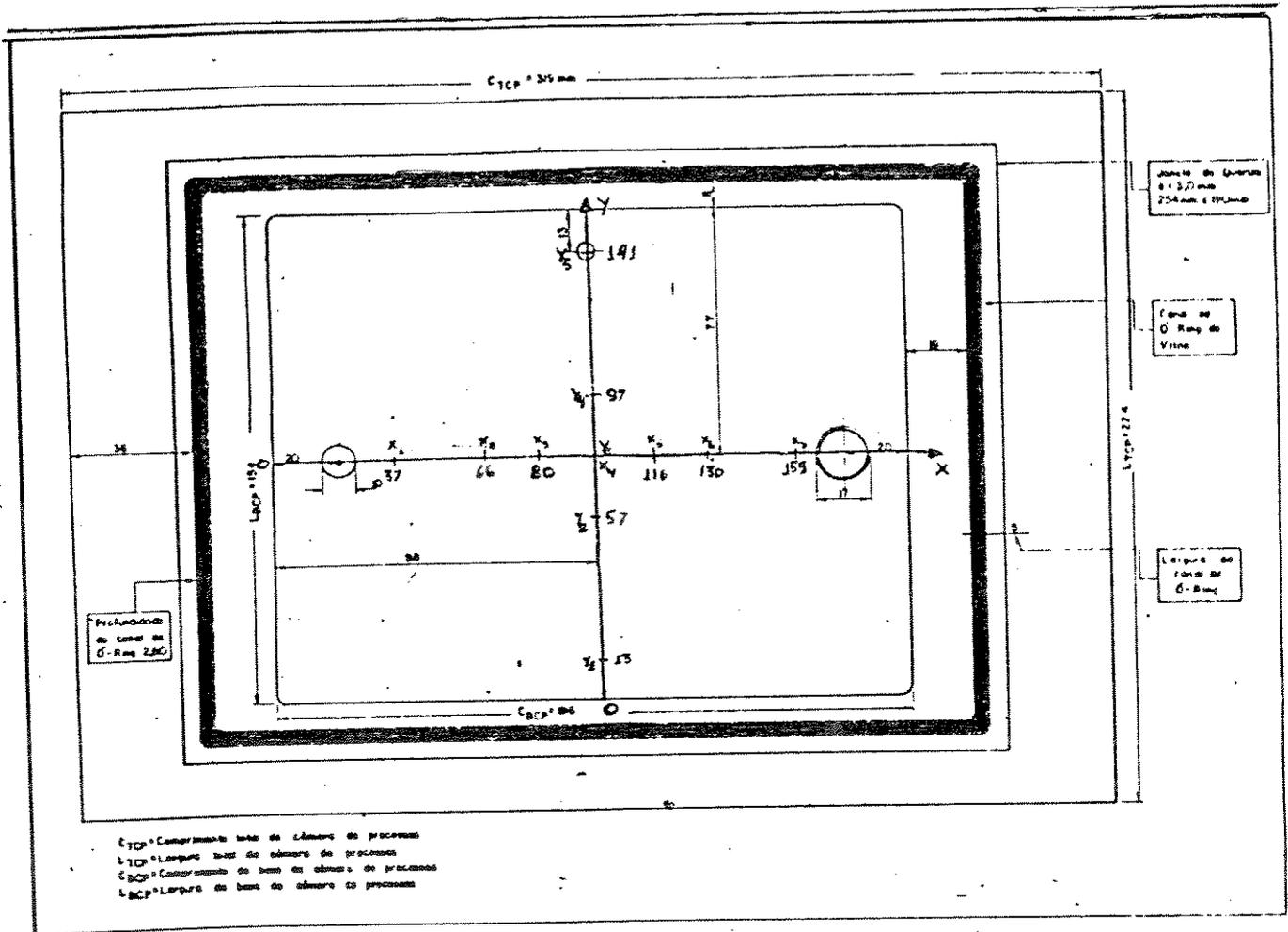


Fig.4.5 - EIXOS X e Y DE RASTREAMENTO PARA VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA UNIFORMIDADE TÉRMICA NO AMBIENTE INTERNO DA CÂMARA DE PROCESSO DO SISTEMA.

Tabela 4.2 - VALORES DAS TEMPERATURAS DE ESTABILIZAÇÃO, EM RELAÇÃO ÀS SUAS RESPECTIVAS POSIÇÕES DENTRO DA CAMARA DE PROCESSO, SOBRE A DIREÇÃO DO EIXO X (GRÁFICO 4.2 e Fig.4.5), FORNECENDO 40% DE POTÊNCIA ELÉTRICA SOBRE AS LÂMPADAS DE TUNGSTÊNIO-HALOGÊNIO.

Pontos	Posição ($x \pm 2$)mm	Temperatura ($T \pm 5$)°C
x		
x ₁	37	586
x ₂	66	653
x ₃	80	685
x ₄	98	687
x ₅	116	687
x ₆	130	655
x ₇	159	587

TABELA 4.3 - VALORES DAS TEMPERATURAS DE ESTABILIZAÇÃO, EM RELAÇÃO ÀS SUAS RESPECTIVAS POSIÇÕES DENTRO DA CAMARA DE PROCESSO, SOBRE A DIREÇÃO DO EIXO Y (GRÁFICO 4.3 e Fig.4.5), FORNECENDO 20% DE POTÊNCIA ELÉTRICA SOBRE A FONTE RADIANTE DE ENERGIA.

Pontos	Posição ($y \pm 2$)mm	Temperatura ($T \pm 5$)°C
y		
y ₁	13	431
y ₂	56	481
y ₃	76	479
y ₄	96	482
y ₅	141	432

Analisando-se os Gráficos 4.2 e 4.3, tem-se que: em um diâmetro da ordem de 1,5" em torno do centro da câmara de processo (Fig.4.5), a temperatura mantém-se uniforme dentro de $\pm 5,0^{\circ}\text{C}$. É um patamar da temperatura, que é representado no Gráfico 4.2, entre os pontos $x_3 = (80\pm 2)\text{mm}$ e $x_5 = (116\pm 2)\text{mm}$ (eixo x - transversal), e no Gráfico 4.3, entre os pontos $y_2 = (56\pm 2)\text{mm}$ e $y_4 = (96\pm 2)\text{mm}$ (eixo y - longitudinal).

Percorrendo-se os eixos x e y, respectivamente, tem-se que: para pontos (não pertencentes ao patamar da temperatura) eqüidistantes do centro da câmara, os valores medidos são praticamente iguais, ou seja, a temperatura medida em um ponto, com uma determinada distância do centro e próximo a uma extremidade de qualquer um dos eixos, é aproximadamente a mesma em um outro ponto, com a mesma distância do centro, na outra extremidade. Portanto, há um certo equilíbrio de aquecimento nestas direções (Gráficos 4.2 e 4.3), pois em relação ao centro, o valor que é medido em um lado é o mesmo medido no outro lado. Estes resultados são similares aos indicados em [1].

Em condições normais, um processamento térmico rápido é feito com lâminas semicondutoras (como silício ou arseneto de gálio), com curtíssimos intervalos de tempo de processo (tipicamente de 30s) e temperatura de equilíbrio dinâmico (estabilização) da amostra aumentando com taxa $\leq 1,0^{\circ}\text{C/s}$. As condições dos testes de rastreamento da temperatura foram: amostra de grafite, tempo de cada experiência em torno de 360s e temperatura de equilíbrio dinâmico da amostra aumentando com taxa $\leq 0,1^{\circ}\text{C/s}$. Foram utilizados estes parâmetros, de taxa de crescimento da temperatura de estabilização e tempo, diferentes das condições normais, pois a amostra de grafite demora mais para

aquecer do que uma lâmina de silício e foi necessário um desvio mínimo no aumento da temperatura de estabilização da amostra, para se ter uma medida mais precisa, portanto, tempo maior e variação da taxa de crescimento da temperatura de equilíbrio dinâmico menor. A utilização da amostra de grafite foi devida à maior facilidade de usinagem deste material, para a construção do sensor de temperatura usado.

Gráfico 4.2 - Deslocamento do Sensor de Grafite sobre o Eixo x para análise da Uniformidade da Temperatura dentro da Câmara de Processos - Correspondente a Tabela 4.2 (Vide Fig 4.5)

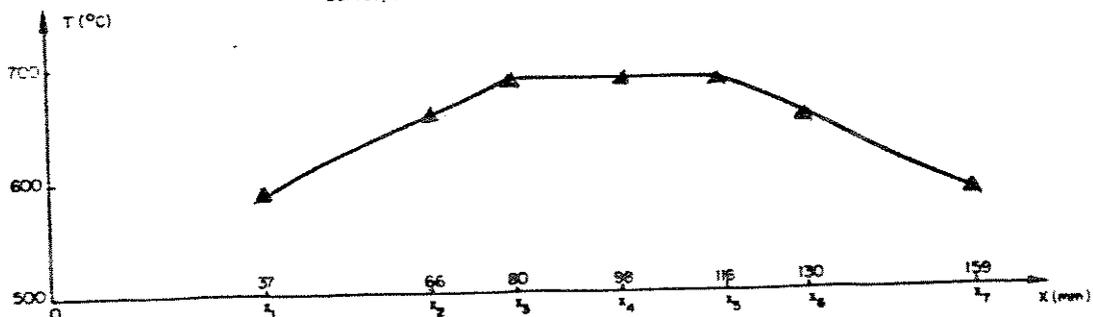
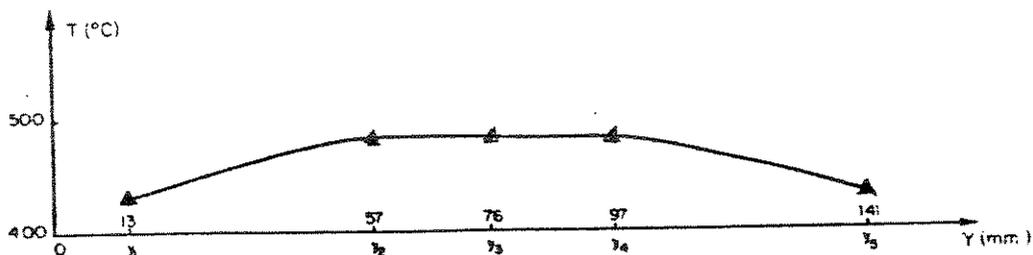


Gráfico 4.3 - Deslocamento do Sensor de Grafite sobre o Eixo y para análise da Uniformidade da Temperatura dentro da Câmara de Processos - Correspondente a Tabela 4.3 (Vide Fig 4.5)



4.4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] - R. Erichsen Jr., W.H. Schreiner, C.M. Hasenact e J.P. Souza -
"Forno de Lâmpadas Halógenas para Processamento Rápido de Silício"
- II Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica - jul/87
- pgs.529-538.

CAPITULO 5

APLICAÇÃO DO FORNO DE RTP: RECOZIMENTO TÉRMICO RÁPIDO, EM CICLOS DE TEMPERATURAS BAIXAS.

5.1 - INTRODUÇÃO.

Foram realizados recozimentos térmicos rápidos (RTA) [1] de dispositivos do tipo capacitor MOS (metal - óxido - semicondutor) de silício, obtendo-se uma diminuição da densidade de cargas capturadas na interface (D_{it}) óxido - semicondutor (SiO_2-Si). Os recozimentos foram realizados com uma temperatura de equilíbrio dinâmico em torno de 400°C, em ambiente de nitrogênio, durante um tempo total de 210s.

As amostras utilizadas, preparadas para a tese de mestrado de D. Takeuti [2], foram duas pastilhas distintas, cada uma contendo dois capacitores MOS. Os óxidos destes capacitores tinham uma espessura de 1000 Å e a área de cada dispositivo era de 500x500 (μm)². Antes dos recozimentos as amostras foram expostas ao raio-X durante 14 minutos. Como fonte de raios-X utilizou-se um tubo Rigaku Denki 400 LA2 com alvo de cobre, com tensão de aceleração de 30 kV e corrente de 15 mA. As características do feixe de raio-X (Cu-K α) foram: comprimento de onda $\lambda_{K\alpha} = 1,542$ Å e energia $E_{K\alpha} = 8$ keV. Este feixe Cu-K α foi obtido com a colocação de um filtro de níquel na janela do tubo [2-3].

A determinação das densidades de cargas (D_{it}) capturadas na interface SiO_2-Si dos capacitores, antes e após o recozimento, foi feita através das curvas características C-V (capacitância versus voltagem), em frequências alta e

baixa (quase estática).

5.2 - CARACTERÍSTICA C-V DE UM CAPACITOR MOS [4].

A estrutura de um capacitor MOS apresenta três interfaces: metal-óxido, óxido-semicondutor e semicondutor-metal, como ilustra a Fig.5.1(a). A Fig.5.1(b) apresenta o diagrama de faixas de energia para um capacitor MOS ideal em equilíbrio termodinâmico. Um capacitor é considerado ideal quando: não há presença de cargas no óxido ou interface Si-SiO₂, as funções trabalho do semicondutor e do metal são idênticas, e a distribuição de dopantes é uniforme no substrato semicondutor.

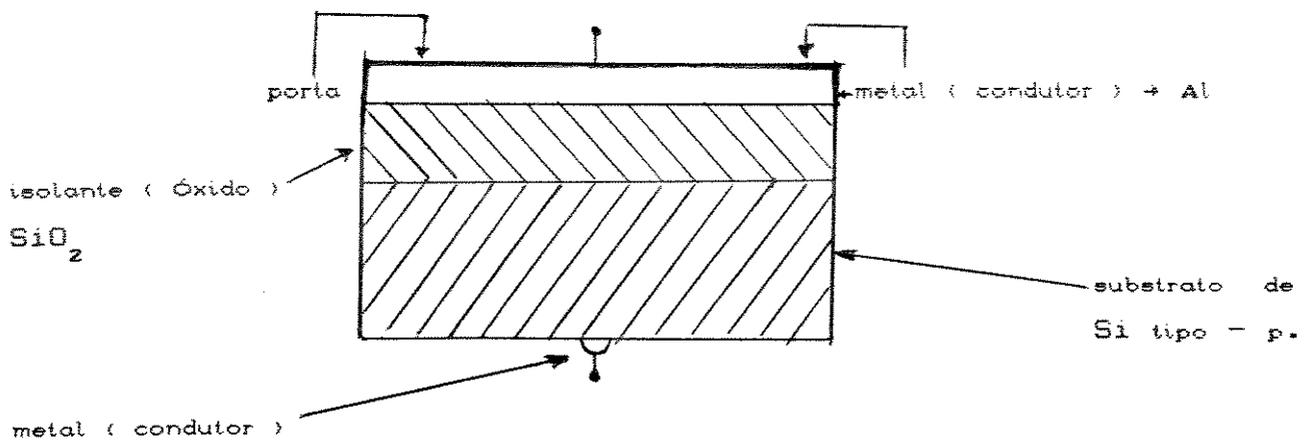
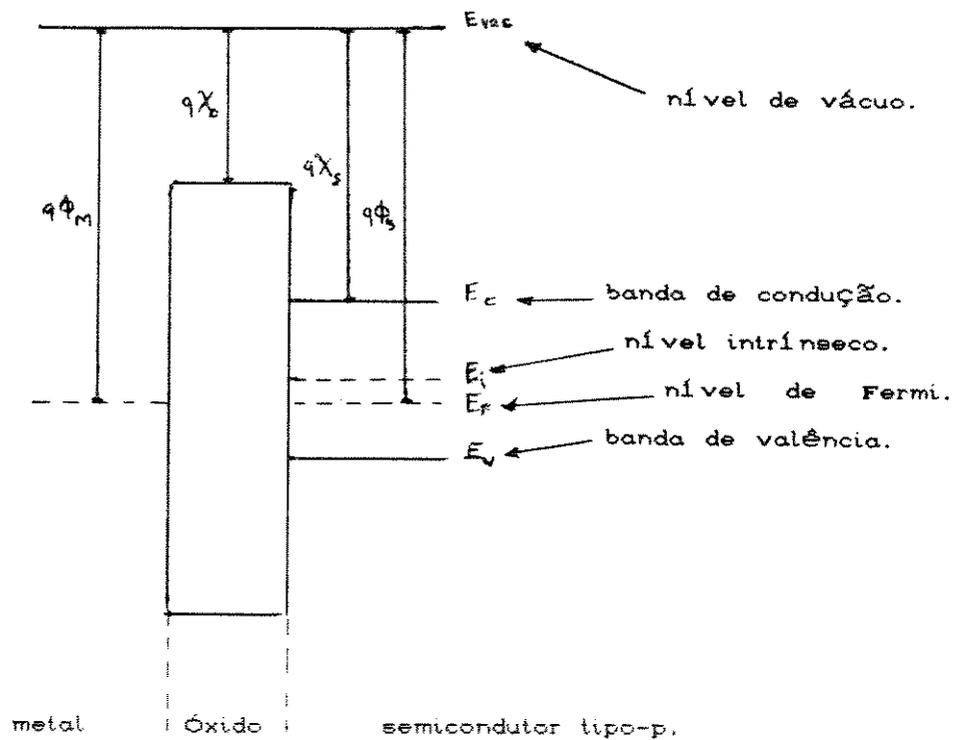


Fig.5.1(a) - Estrutura de um capacitor MOS, com substrato de Si -p.



onde:

- E_c → energia do limite inferior da banda de condução;
- E_{F_s} → energia do nível de Fermi extrínseco no semiconductor;
- E_v → energia do limite superior da banda de valência.
- E_i → energia do nível intrínseco no semiconductor;
- E_{vac} → energia de referência no nível de vácuo;
- ϕ_M → função trabalho do metal;
- ϕ_s → função trabalho do semiconductor;
- χ_s → afinidade eletrônica do semiconductor;
- χ_o → afinidade eletrônica do óxido.

Fig.5.1(b) - Diagrama de bandas de energia para um capacitor MOS ideal, com substrato tipo-p.

Um capacitor MOS é fabricado da seguinte forma: sobre uma lâmina (substrato) de semicondutor é depositada ou crescida (oxidação) uma camada fina de material isolante (óxido). Utilizando-se material condutor (metal), são formados dois eletrodos: o primeiro sobre a camada de óxido (denominado porta) e o segundo sob a lâmina (denominado eletrodo do substrato), como ilustra a Fig.5.1(a).

Na Fig.5.2 apresenta-se um esboço das curvas C-V de um capacitor MOS ideal, com substrato tipo n (Fig.5.2(a)) e p (Fig.5.2(b)), obtido pela aplicação de uma tensão positiva e negativa entre os eletrodos do capacitor [4].

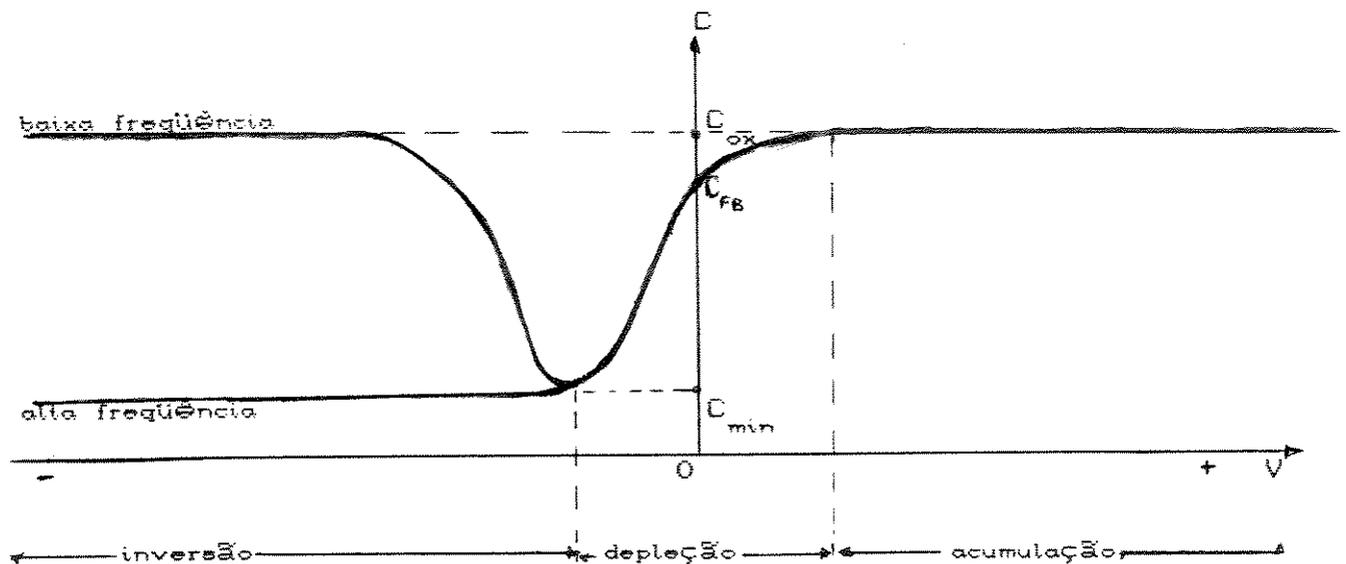


Fig.5.2(a) - Esboço de uma curva C-V de um capacitor MOS ideal, com substrato tipo-n.

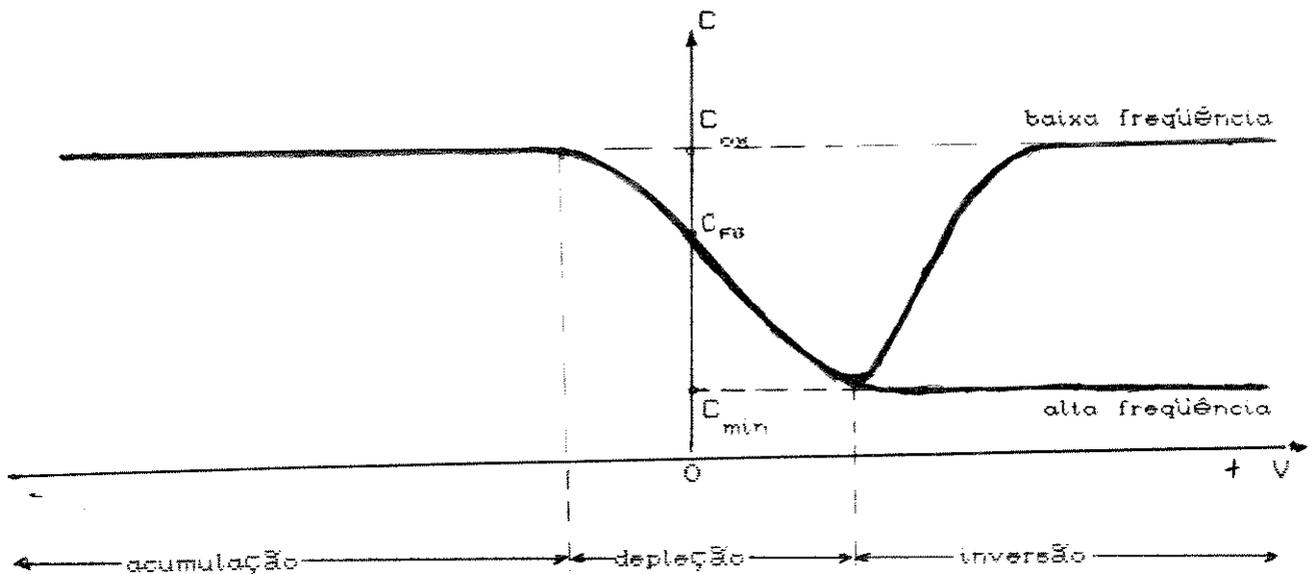


Fig.5.2(b) - Esboço de uma curva C-V de um capacitor MOS, com substrato do tipo-p.

Para uma análise qualitativa da característica C-V do capacitor MOS é necessário considerar três diferentes regiões da curva (apresentadas nas Figs.5.2(a) e (b)), que são formadas durante a varredura da polarização (positiva ou negativa) aplicada entre os eletrodos, sendo V_p a tensão na porta, t_{ox} a espessura do óxido e tensão no eletrodo do substrato nula (aterrado). Considera-se nesta descrição do comportamento do capacitor que o substrato é do tipo-p. Para o substrato do tipo-n a descrição é semelhante.

(i) Região de acumulação: aplicando-se uma tensão negativa na porta ($V_p \ll 0$), as lacunas, que são os portadores majoritários, são atraídas à superfície do substrato (interface

óxido - semicondutor). A concentração de lacunas aumenta na superfície do silício, formando-se uma região de acumulação de portadores majoritários. O nível de energia de Fermi (E_F) aproxima-se da banda de valência. Como este nível mantém-se constante em equilíbrio térmico, há um encurvamento das bandas de energia de valência (E_v) e condução (E_c) (Fig.5.3(b)). A camada de acumulação, para uma concentração alta de portadores majoritários, pode ser considerada como o segundo eletrodo de um capacitor de placas paralelas, pois o primeiro é o eletrodo da porta (metal), resultando em um campo elétrico $E = - V_p / t_{ox}$ no óxido da porta, como ilustra a Fig.5.3(a). Em condição de acumulação, desde que exista um contato ôhmico direto entre o substrato tipo-p e a região de acumulação das lacunas, a capacitância da estrutura MOS é aproximadamente igual à capacitância no óxido, que é $C_{ox} = \epsilon_{ox} . A / t_{ox}$ (Eq.5.1), onde:

- C_{ox} → capacitância no óxido;
- ϵ_{ox} → permissividade do óxido;
- t_{ox} → espessura do óxido;
- A → área do eletrodo da porta.

Diminuindo-se a tensão negativa na porta ($V_p < 0$), a camada de acumulação de portadores majoritários é reduzida, pois o campo elétrico no óxido está menos intenso. Continuando-se a diminuição da tensão na porta, chega-se a um instante em que a camada de acumulação é extinta, tornando-se as concentrações de portadores na superfície semelhante às do corpo do substrato. Nesta condição não há encurvamento nas bandas de energia (condição de banda plana - "flat band") e a voltagem aplicada na porta é denominada tensão

de banda plana (V_{FB}), sendo C_{FB} a capacitância de banda plana correspondente.

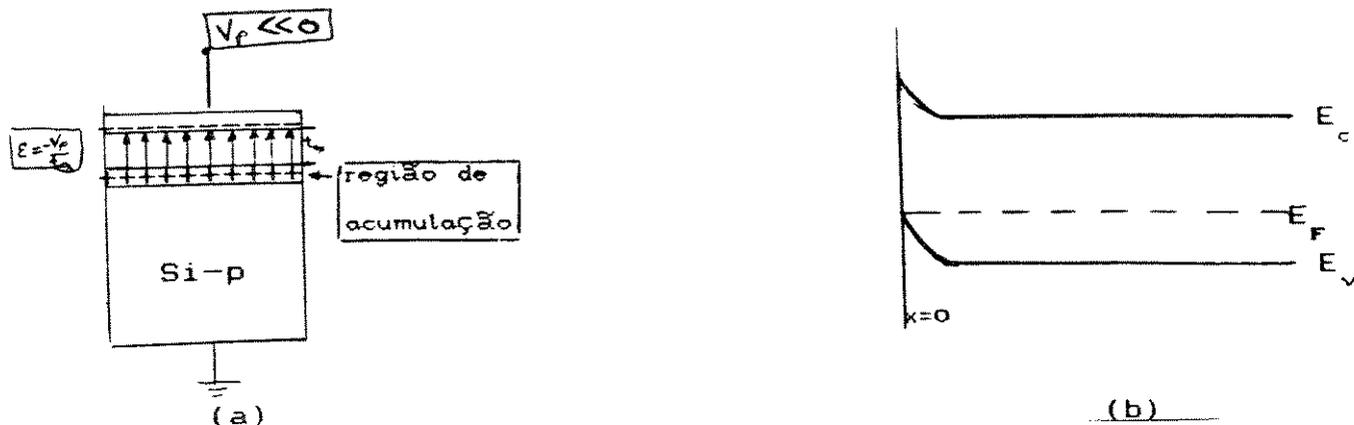


Fig.5.3 - (a) Esquemática da região de acumulação no capacitor; (b) Diagrama de bandas no semiconductor, com o encurvamento nos níveis de energia E_c e E_v .

(ii) Região de depleção: para uma tensão na porta maior que a tensão de banda plana ($V_p > V_{FB}$), ocorre a depleção dos portadores majoritários (lacunas) da superfície do substrato, descobrindo os íons das impurezas aceitadoras. Assim, uma região de depleção de portadores é formada na superfície e W_d é a largura dessa região (Fig.5.4(a)). Na condição de depleção, ocorre a aproximação do nível de Fermi em direção ao meio da banda proibida do semiconductor e o encurvamento de bandas, como é esquematizado na Fig.5.4(b).

Ressalta-se que, a largura W_d é proporcional ao potencial de superfície $\psi_s(V_p)$, que está relacionado com o encurvamento das bandas, ou seja, é função da voltagem V_p aplicada na porta. W_d é dado por [2]:

$$W_d = [(2 \cdot \epsilon_s \cdot \psi_s) / (q \cdot N_{A,D})]^{1/2} \quad (\text{Eq.5.2}),$$

onde:

ϵ_s → coeficiente de permissividade elétrica do silício;

q → carga do elétron;

$N_{A,D}$ → concentração de dopantes aceitadores ou doadores no silício.

A esquematização da região de depleção e o respectivo diagrama de bandas no substrato de silício tipo-p estão nas Figs.5.4(a) e (b).



Fig.5.4 - (a) Esquematização da região de depleção no capacitor; (b) Diagrama de bandas do silício, com o encurvamento dos níveis E_c e E_v .

A capacitância relacionada à região de depleção (C_{sd}) é associada em série com a capacitância do óxido da porta, resultando em uma capacitância total da estrutura do capacitor MOS (Eq.5.3):

$$C_T(V_p) = [(1/C_{ox}) + (1/C_{sd}(V_p))]^{-1} \quad (\text{Eq.5.3})$$

onde:

$C_T(V_p)$ → capacitância total da estrutura MOS;

C_{ox} → capacitância do óxido (Eq.5.1);

$C_{sd}(V_p)$ → capacitância da região de depleção, que é dada por:

$$C_{sd}(V_p) = \epsilon_s / W_d(V_p) \quad (\text{Eq.5.4}),$$

onde:

ϵ_s → constante dielétrica do silício.

(iii) Região de inversão: aumentando-se ainda mais a tensão V_p aplicada na porta da estrutura MOS ($V_p \gg V_{FB}$), consegue-se igualar as concentrações de portadores (minoritários e majoritários) com a concentração do nível intrínseco do semiconductor ($n=p=n_i$). O nível intrínseco e o de Fermi se cruzam no diagrama de bandas, assumindo valores iguais. Ocorre a atração de portadores minoritários (elétrons) em direção à superfície do substrato. Forma-se, então, uma camada de inversão (do tipo-n) na interface Si-SiO₂. Com um valor maior de V_p (mantendo-se as condições de equilíbrio), há um aumento na concentração de elétrons na superfície do substrato, $\psi_s(V_p)$ torna-se saturado e W_d torna-se constante, alcançando um valor máximo. Esta é a condição de inversão forte ($V_p \geq 2V_{FB}$), com $W_d = W_{m\acute{a}x}$ (região de depleção com largura máxima). O nível de Fermi aproxima-se da banda de condução próximo da superfície, como mostra as Figs.5.5(a) e (b).

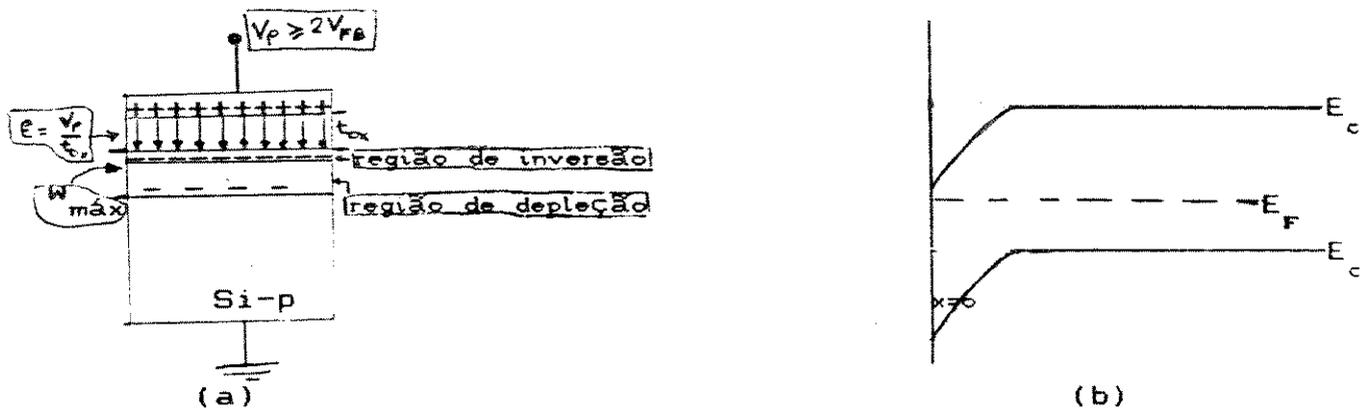


Fig.5.5 - (a) Esquemática da região de inversão forte no capacitor; (b) Diagrama de bandas com os encurvamentos dos níveis de energia E_c e E_v .

O valor da capacitância da estrutura MOS, em condição de inversão, é função da frequência do sinal ac de polarização aplicado na porta [2]. Para as medidas C-V em baixa frequência, tipicamente entre 5 a 100 Hz, o período de um sinal ac é muito maior que o tempo de resposta dos portadores minoritários. Então, quando formada a camada de inversão, ocorre a geração de pares elétron-lacuna suficiente para compensar o sinal aplicado, ou seja, os elétrons (portadores minoritários) em alta concentração acompanham o sinal ac de baixa frequência, mantendo-se um estado de equilíbrio. Assim, a capacitância total para a condição de inversão, utilizando-se polarização com sinal de baixa frequência, torna-se igual a C_{ox} (Eq.5.1).

Para medidas C-V em alta frequência (> 1 Hz), em condições de acumulação e depleção, há portadores majoritários em concentração suficiente para responder a um sinal ac deste tipo. Mas, na inversão, a capacitância é determinada pelo tempo de

resposta dos portadores minoritários. Para um sinal de polarização em alta frequência, há um atraso dos portadores minoritários em relação a este sinal ac, ou seja, estes portadores não são gerados em taxa alta suficiente para se compensar o sinal aplicado na porta. Ocorre a modulação da camada de depleção, pois a largura desta camada é máxima e constante, para condição de inversão forte, portanto, a capacitância total da estrutura MOS torna-se mínima, como mostra a Eq.5.5.

$$C_{Tmin} = [(1/C_{ox}) + (W_{m\acute{a}x} / \epsilon_s)]^{-1} \quad (\text{Eq.5.5})$$

onde:

C_{Tmin} → capacitância total mínima para condição de inversão, utilizando-se sinal de polarização de alta frequência;

$W_{m\acute{a}x}$ → largura máxima da camada de depleção;

C_{ox} → capacitância no óxido;

ϵ_s → constante dielétrica do silício.

Com o estudo das três regiões (de acumulação, depleção e inversão), pode-se compreender melhor as curvas características C-V em frequências alta e baixa, como mostrado nas Figs.5.2(a) e (b).

Para uma estrutura MOS não ideal, há a presença de cargas no óxido e capturadas na interface Si-SiO₂, e as funções trabalho do metal e semiconductor são diferentes. Isto provoca um deslocamento da curva C-V da estrutura MOS real em relação à ideal [4], pois a diferença de potencial entre os eletrodos do capacitor MOS (V_p) depende, diretamente, da diferença das funções trabalho (ϕ_{ms}), da tensão no óxido (V_{ox}), relacionado com cargas no

óxido e do potencial de superfície ψ_s , como indica a Eq.5.6:

$$V_p = V_{ox} + \phi_{ms} + \psi_s \quad (\text{Eq.5.6})$$

(a) Para um capacitor MOS ideal, a Eq.5.6 torna-se:

$$V_p = \psi_s, \text{ pois } V_{ox} = 0 \text{ e } \phi_{ms} = 0.$$

Para $V_p = V_{FB}$ (condição de banda plana); $\psi_s = 0$,
portanto, $V_{FB} = 0$.

(b) Para um capacitor MOS real:

$$V_{ox} = - Q_o / C_{ox}, \text{ onde:}$$

C_{ox} é dado pela Eq.5.1;

A → área do dispositivo;

Q_o → carga efetiva no óxido.

$$\phi_{ms} \neq 0 \text{ e } \psi_s \neq 0.$$

Para condição de banda plana:

$$\psi_s = 0; V_p = V_{FB} = \phi_{ms} - Q_o / C_{ox} \quad (\text{Eq.5.7}).$$

Portanto, verifica-se um deslocamento da curva C-V experimental (real) em relação à teórica (ideal). A técnica C-V determina importantes propriedades elétricas das estruturas MOS, através de comparações entre curvas experimentais e teóricas [4]. Diferentes procedimentos de medidas e métodos (recursivo, gráficos e de deslocamentos de curvas C-V) são utilizados para determinar estas propriedades, que são: capacitância de banda plana (C_{FB}), espessura do óxido (t_{ox}), concentração efetiva de dopantes ($N_{A,D}^*$), densidade de cargas capturadas na interface (D_{it}), densidade de cargas móveis (N_m), fixas (N_f) e capturadas (N_{ot}) no óxido, entre outras [2].

5.3 - EXPERIMENTO E RESULTADOS OBTIDOS.

No experimento para a obtenção da diminuição da densidade de cargas capturadas na interface óxido - semicondutor dos capacitores MOS, definiu-se que o tempo de cada recozimento térmico rápido (RTA) seria o período em que a temperatura do processo permanecesse acima de 250°C (Fig.5.8). Geralmente, os recozimentos ocorrem a partir desta temperatura [5]. Os equipamentos utilizados nas medidas C-V [2] estão esquematizados na montagem da Fig.5.7. As etapas do experimento [2], que são mostradas na Fig.5.6, foram executadas da seguinte maneira: primeiramente, traçaram-se as curvas C-V iniciais (Gráficos 5.1(1) e 5.2(1)) para cada um dos capacitores, em frequências baixa (quase estática) e alta. Depois disso, os respectivos dispositivos foram expostos ao raio-X (Cu - K_α (filtro de Ni)), durante 14 minutos, a fim de se criar cargas capturadas na interface (Gráficos 5.1(2) e 5.2(2)), sendo que, novas curvas C-V foram feitas depois desta exposição. Assim, comparando-se as curvas iniciais com as de pós-exposição ao raio-X, determinaram-se as densidades de cargas na interface SiO₂-Si, criadas pelo raio-X. A partir daí, uma amostra por vez foi colocada no forno de RTP para o recozimento rápido, com ciclos térmicos de aproximadamente 70s, temperaturas finais de equilíbrio dinâmico em torno de 415°C, para uma das pastilhas (amostra AD-1) e 390°C, para a outra (amostra AD-2). Utilizaram-se estas temperaturas, pois o alumínio foi o metal usado para a formação dos contatos destes dispositivos e seu ponto de fusão está em torno de 660°C. Assim, as temperaturas deveriam ser abaixo deste ponto, por segurança, próximas de 400°C. Depois de cada recozimento, foram traçadas curvas C-V das amostras

e determinadas as respectivas densidades de cargas capturadas na interface de cada dispositivo, comparando-se as curvas iniciais com as de pós-recozimento. Como foram executados três recozimentos para cada uma das pastilhas, têm-se os seguintes Gráficos (curvas C-V, pós-recozimentos): 5.1(3),(4) e (5) (dispositivo AD-1a) e, 5.2(2),(3) e (4) (dispositivo AD-2b).

Todos estes procedimentos tiveram um pré-aquecimento em torno de 100°C , antes de ser acionado o cronômetro. Além disso, o tempo total de recozimento para cada amostra foi de, aproximadamente, 210 s, pois cada recozimento tinha duração de $\pm 70\text{s}$. O ambiente interno da câmara de processamento das amostras era inerte, com a utilização de gás nitrogênio a 2,0 l/min.

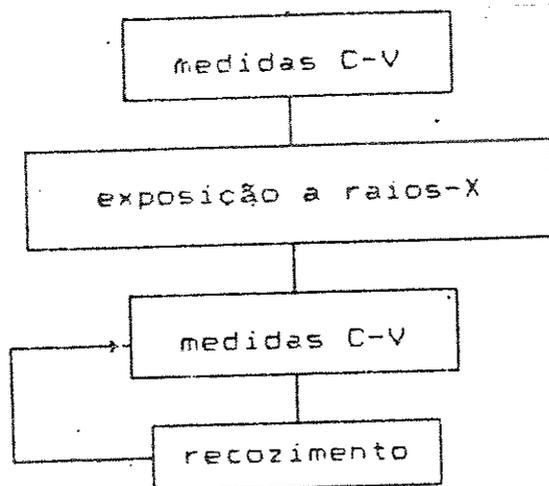


Fig.5.6 - Etapas do experimento [2].

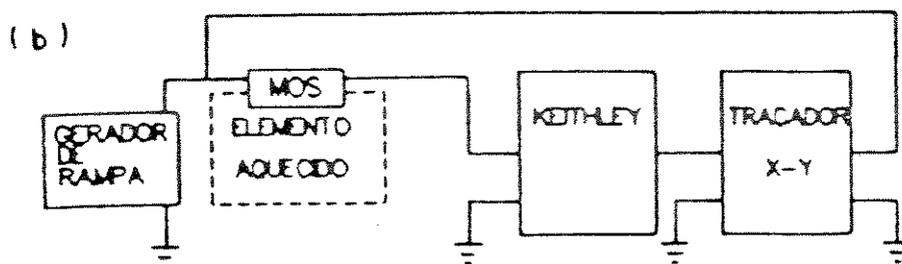
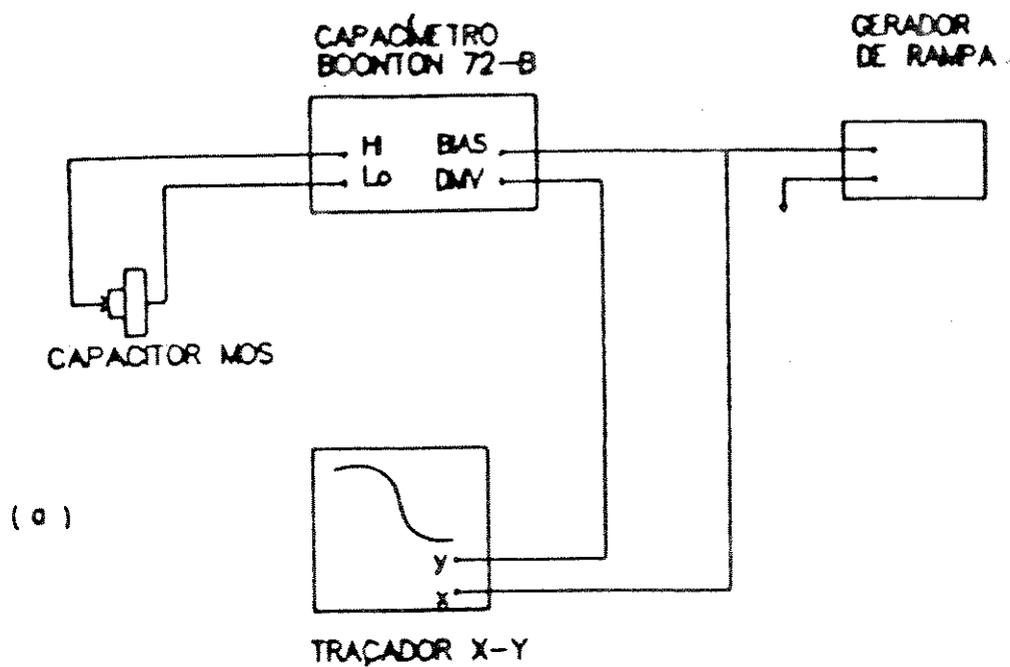


Fig.5.7 - Montagem dos equipamentos utilizados para a execução das medidas C-V do experimento [2]; (a) medida C-V em frequência alta; (b) medida C-V em frequência baixa (quase estática).

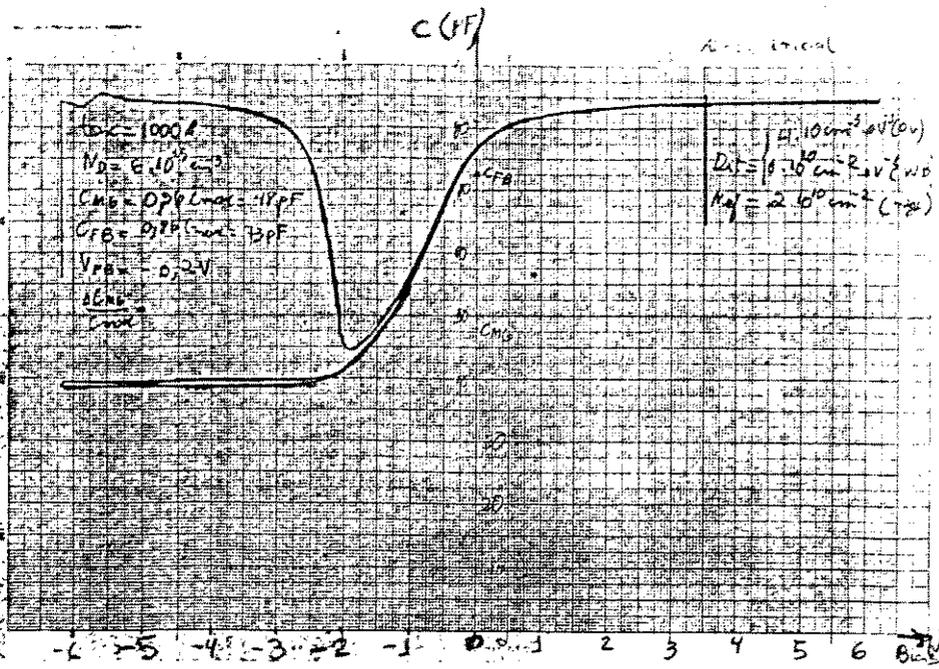


Gráfico 5.1(1) - Curva C-V inicial do dispositivo AD-1a.

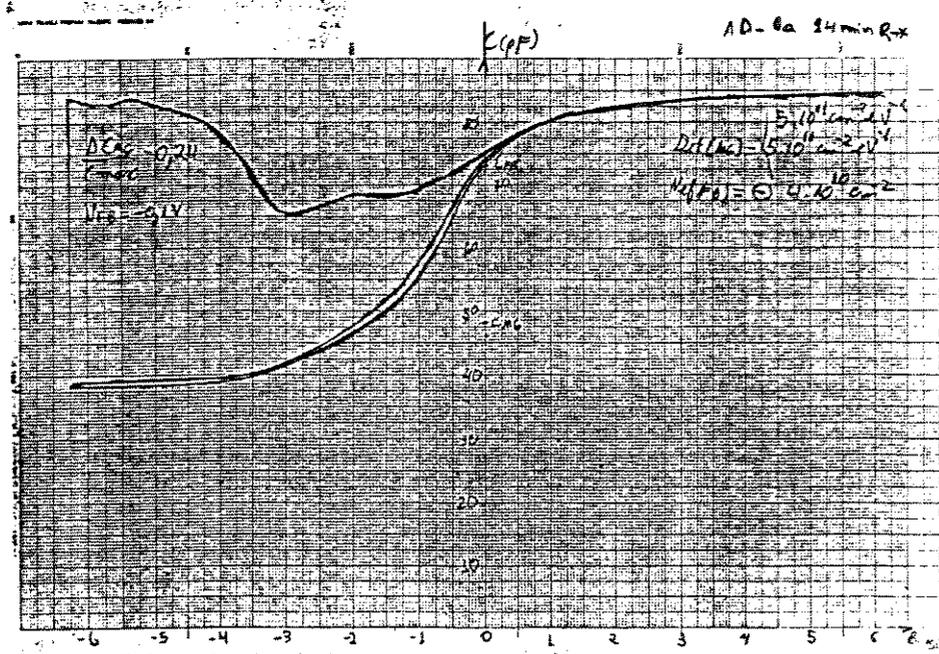


Gráfico 5.1(2) - Curva C-V pós-exposição ao raio-X.

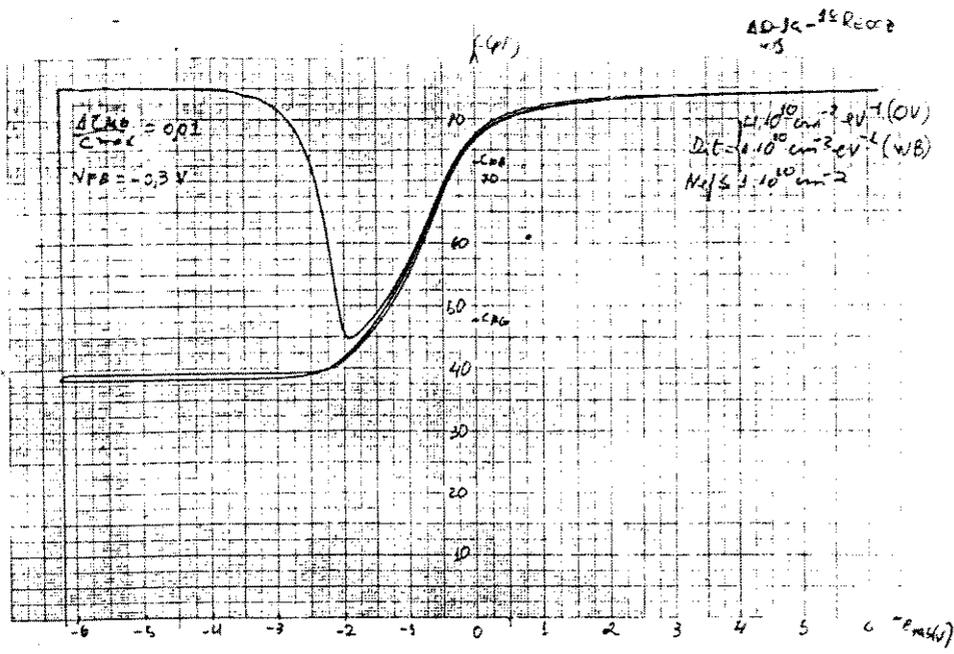


Gráfico 5.1(3) - Curva C-V traçada após o primeiro recozimento.

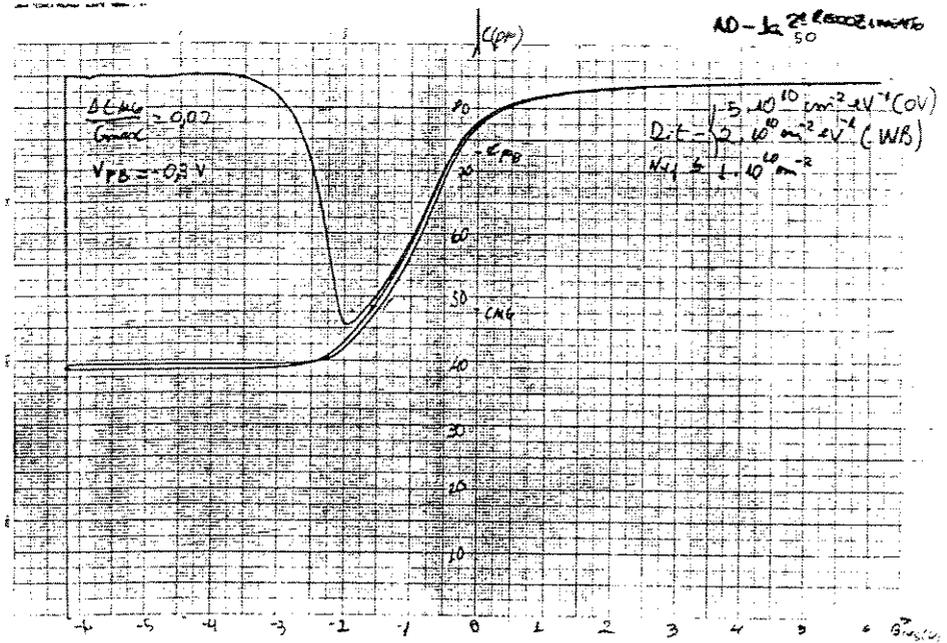


Gráfico 5.1(4) - Curva C-V traçada após o segundo recozimento.

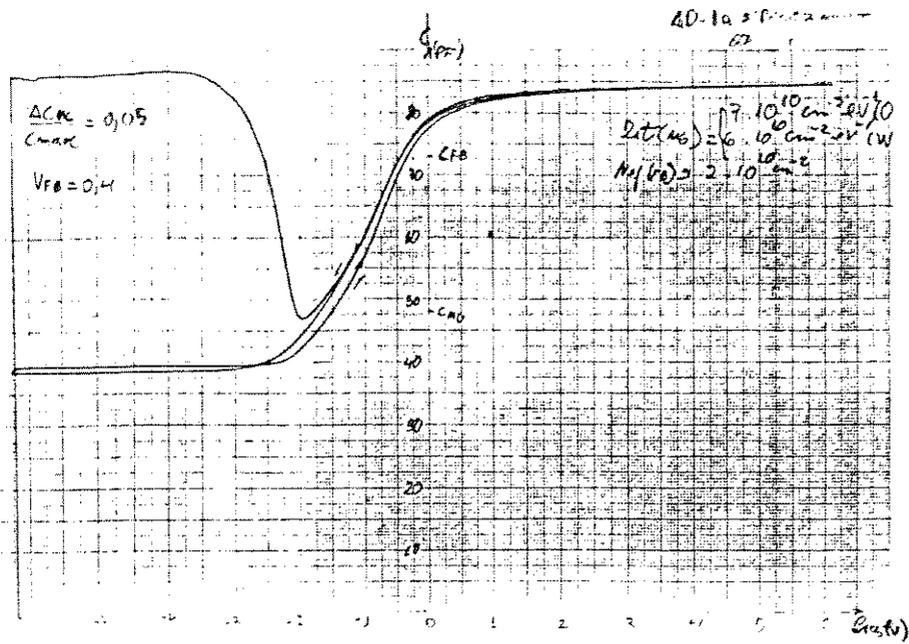


Gráfico 5.1(5) - Curva C-V traçada após o terceiro recozimento.

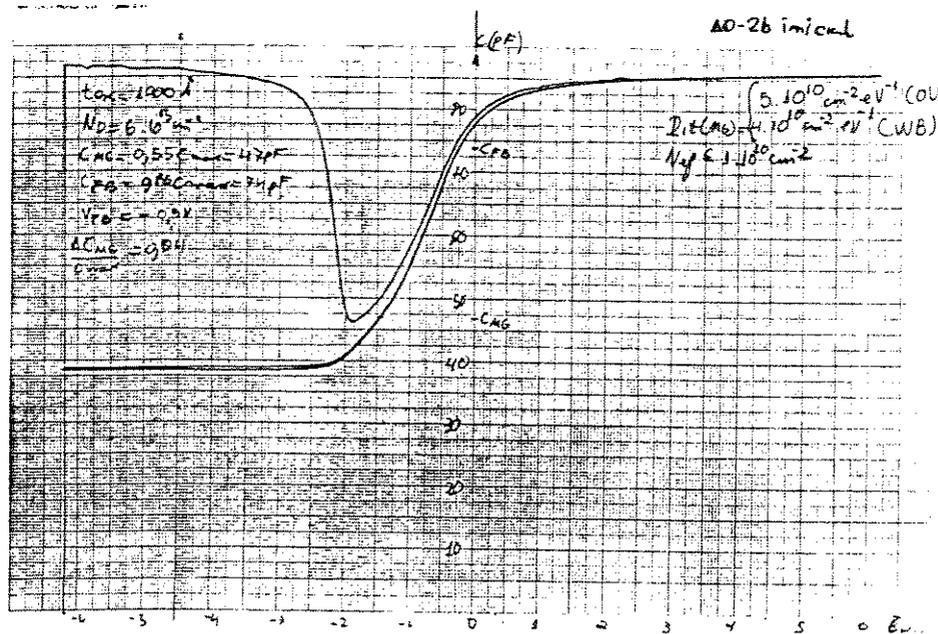


Gráfico 5.2(1) - Curva C-V inicial do Dispositivo AD-2b.

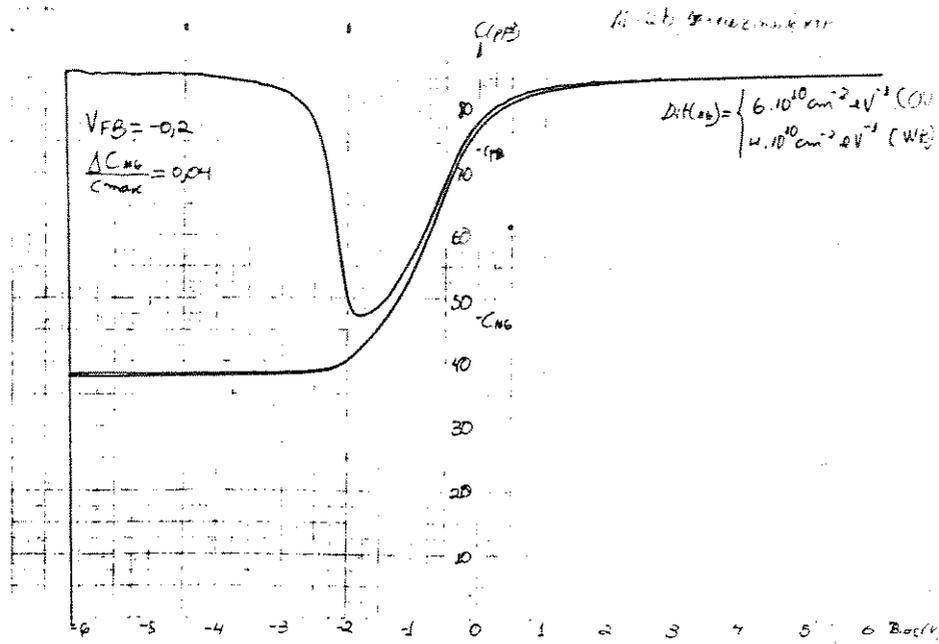


Gráfico 5.2(2) - Curva C-V traçada após o primeiro recozimento.

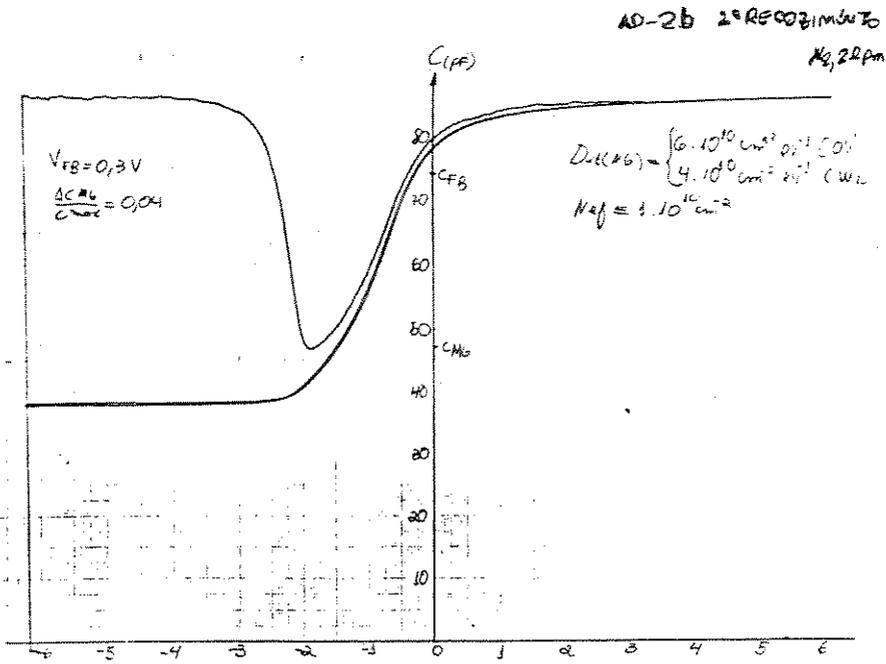


Gráfico 5.2(3) - Curva C-V traçada após o segundo recozimento.

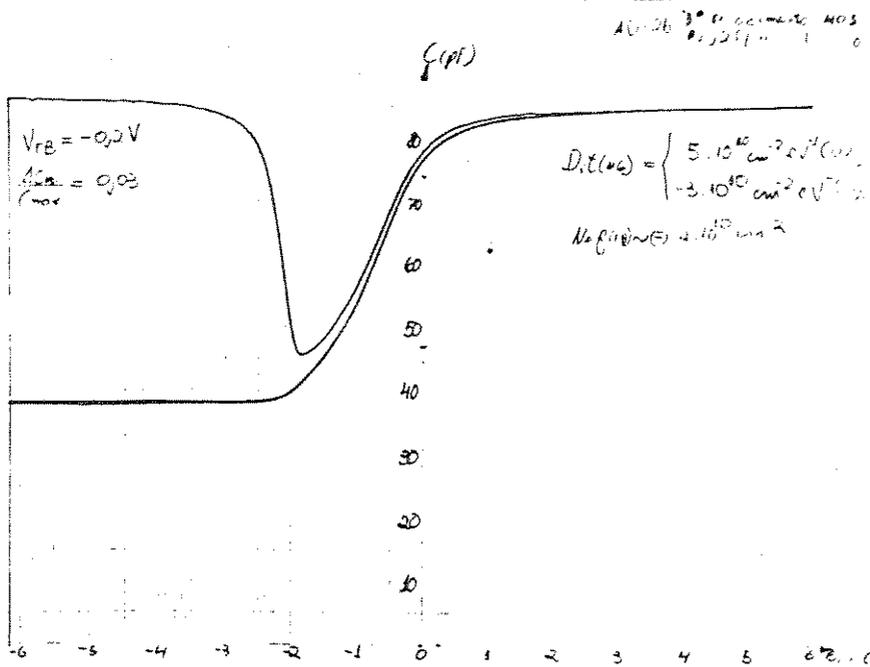


Gráfico 5.2(4) - Curva C-V após o terceiro recozimento.

Uma análise do tempo de recozimento em relação à densidade de cargas capturadas na interface está indicada na Fig.5.9. Na Fig.5.8, está um perfil típico de temperatura/tempo, utilizado nos procedimentos de recozimento térmico rápido, onde a potência sobre as lâmpadas de halogênio foi em torno de 15%, controlado manualmente através do potenciômetro.

Da Fig 5.9, tem-se que: os dispositivos tratados com maior temperatura (amostra AD-1), em torno de 415°C, tiveram, após o primeiro recozimento, a eliminação de, aproximadamente, 92% de cargas na interface óxido - semicondutor. Para os dois recozimentos seguintes, houve um ganho na densidade de cargas capturadas na interface, inclusive, no dispositivo AD-1a, presenciou-se um aumento de uma certa histerese, que apareceu na exposição ao raio-X, como mostrado nos Gráficos 5.1(2), (3), (4) e (5), enquanto que, os capacitores MOS processados à temperatura final de estabilização de 390°C (amostra AD-2), apresentaram 90% de diminuição após o terceiro recozimento, sem a ocorrência de histerese (Gráficos 5.2(2), (3) e (4)).

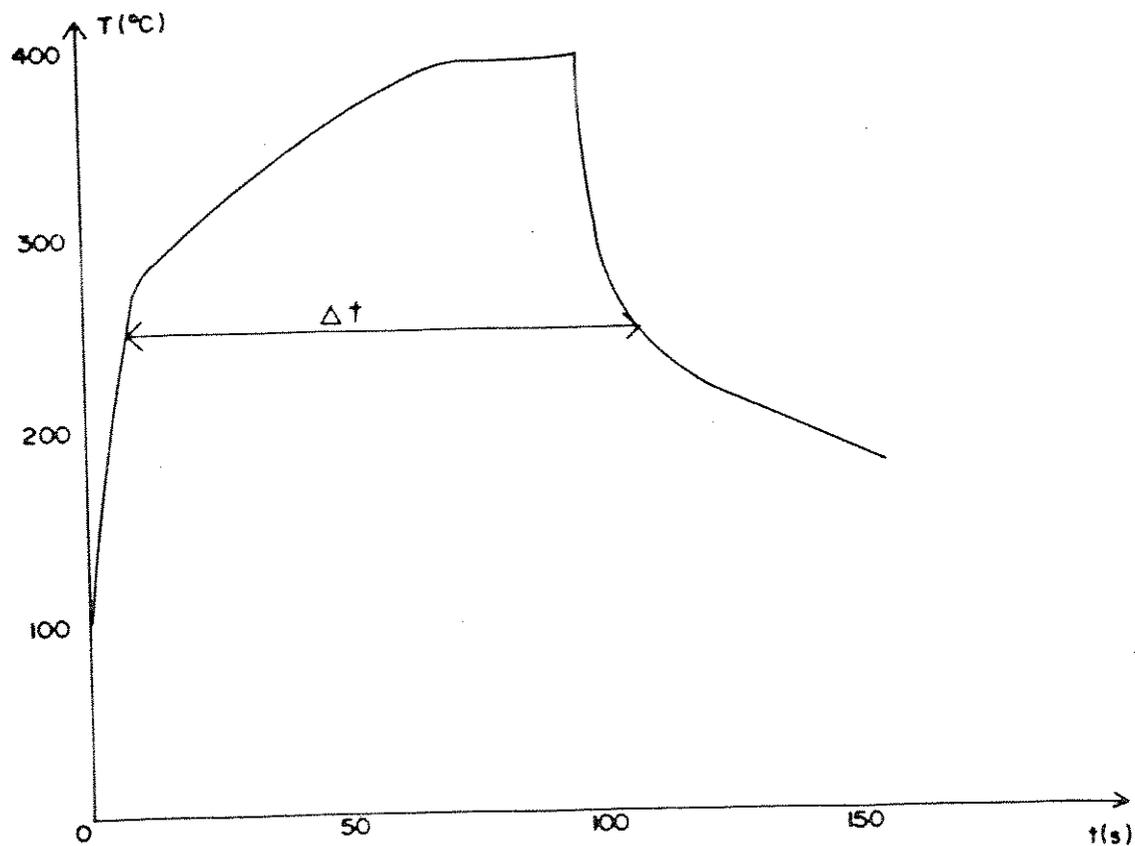


Fig.5.8 - Típica curva do perfil temperatura/tempo desenvolvida nos processos de recozimento térmico rápido, com Δt representando o intervalo de tempo de cada recozimento das amostras.

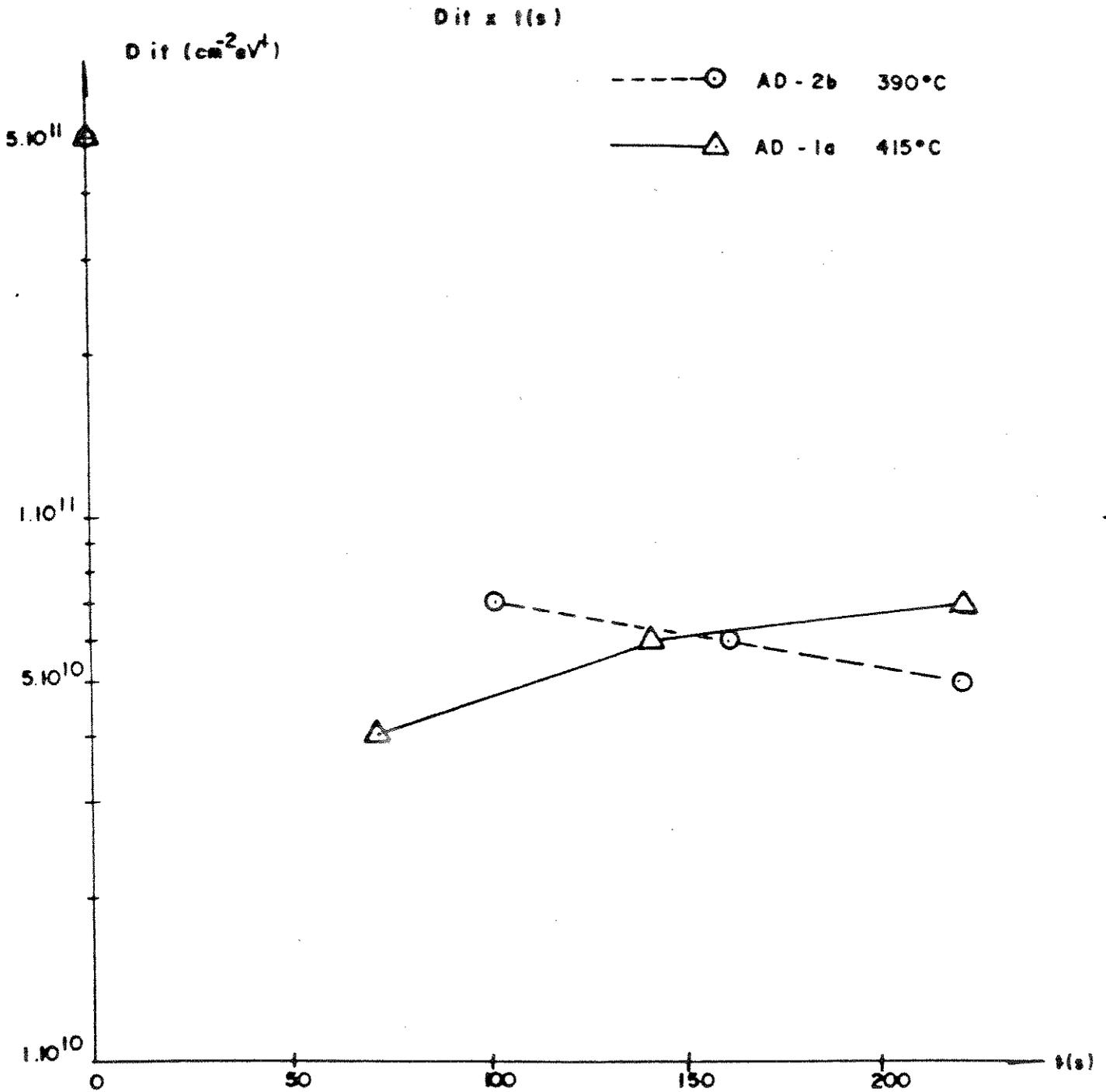


Fig.5.9 - Valores das densidades de cargas na interface em relação ao tempo de recozimento das amostras [2].

5.4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] - Michael L. Reed & James D. Plummer - "Si-SiO₂ Interface Trap Production by Low-Temperature Thermal Processing" - Appl. Phys. Lett., vol.51, n°.17, august/87.

[2] - Douglas de F. Takeuti - "Estudo do Comportamento Termodinâmico de Dispositivos MOS Submetidos a Radiação Ionizantes" - Tese de Mestrado - DEMIC/FEE/UNICAMP - pags.1 a 7, 22 a 47 e 63 a 87 - junho/92.

[3] - D.F. Takeuti, J.A. Diniz, E.S. Braga and P.J. Tatch - "A Comparison Between Rapid Thermal and Conventional Annealing of Radiation-Induced Interface Trapped Charges" - Thin Solid Films, submetido a publicação.

[4] - Paul Richman - "MOS Field-Effect Transistors and Integrated Circuits" - cap.3 - pags.47 a 71 - august/1973.

[5] - D.A. Buchanan and D.J. Dimaria - J. Appl. Phys. - vol.67, n.12 - 1990.

CAPITULO 6

CONCLUSÕES FINAIS. MELHORIAS NO SISTEMA RTP CONSTRUÍDO E TENDÊNCIAS FUTURAS DE ESTUDOS.

6.1 - CONCLUSÕES FINAIS.

Os resultados obtidos da curva característica do perfil temperatura/tempo (Gráfico 4.1 - capítulo 4), do equipamento de processamento térmico rápido desenvolvido, mostram uma temperatura de equilíbrio dinâmico em torno de 1100°C, em 20s, com taxas de aquecimento e resfriamento próximas de 95°C/s e 16°C/s, respectivamente. Em termos práticos, estes resultados podem ser aplicados para todos os processamentos térmicos rápidos, inclusive, recozimentos pós-implantação iônica [1] e oxidações (RTO) [2]. Esta taxa de aquecimento pode ser considerada boa para um sistema "home made", pois os equipamentos comerciais desenvolvem taxas de até 200°C/s. Com o controle da potência sobre as lâmpadas de halogênio, o tempo e a temperatura de permanência do equilíbrio dinâmico do sistema pode ser alterado para mais ou para menos, dependendo, exclusivamente, do processo requerido para uma determinada amostra de material semiconductor.

Em relação aos experimentos executados para a verificação da uniformidade de temperatura na câmara de processo, os resultados (Gráficos 4.2 e 4.3 - capítulo 4) indicam que, o aquecimento é satisfatoriamente uniforme, devido às medidas na região central da câmara de processamento mostrarem valores praticamente constantes. Assim, a parede refletora côncava na câmara geradora de calor e as

paredes refletoras no ambiente de processo ajudaram na obtenção deste bom comportamento de aquecimento dentro da câmara de processo. Ressalta-se que uma boa uniformidade nesta câmara não garante que a temperatura seja uniforme na superfície da lâmina em tratamento térmico rápido, mas, com certeza, é um excelente parâmetro para que isto ocorra.

Na aplicação do forno de RTP em recozimentos térmicos rápidos, em baixas temperaturas (próximas de 400°C), os resultados retirados das curvas C-V apresentadas, no capítulo 5, comprovam alguns estudos [3] que indicam que estes recozimentos conseguem, em tempos curtos de processamento, a diminuição de cargas capturadas na interface Si-SiO₂ próxima de 100%, para dispositivos MOS com contatos de alumínio. Com o aumento do tempo total de recozimento das amostras, a densidade destas cargas volta a aumentar. Este comportamento, também observado em trabalhos anteriores [3] ainda não é entendido. Assim, existe um mínimo e um máximo de tempo necessário de recozimento rápido, para uma determinada temperatura de equilíbrio dinâmico, a fim de se obter uma diminuição máxima de cargas na interface óxido - semi-condutor dos dispositivos MOS com contatos de Al.

6.2 - TENDÊNCIAS FUTURAS DE ESTUDOS E MELHORIAS NO FORNO DE RTP DESENVOLVIDO.

O controlador de potência das lâmpadas apresentou problemas com a utilização de triacs, pois necessitava-se de manutenção constante. Não foi possível aplicar potência máxima, porque os triacs falhavam. Atualmente, os triacs estão sendo substituídos por diodos SCR de grande porte, o que elimina o

problema de potência do sistema.

Uma melhoria necessária e de custo baixo, para o equipamento de RTP, seria o desenvolvimento de um sistema controlador de potência da fonte radiante de aquecimento do tipo P,I,D, acionado por um microcomputador, assim poder-se-ia ter um circuito de realimentação da temperatura do sistema, totalmente automático e programado, ajudando, principalmente, na repetibilidade dos ciclos térmicos rápidos. Além disso, o controlador de potência das lâmpadas, atualmente utilizado no protótipo, tem entrada para circuito do tipo P,I,D com a utilização de um microcomputador.

Em um futuro próximo, pretende-se utilizar o equipamento na execução de trabalhos na área de recozimento térmico rápido de camadas implantadas, utilizando-se altas temperaturas (> 1000°C).

Outro trabalho experimental que se pretende realizar é o estudo detalhado sobre o método de medição da temperatura e garantia de manutenção da uniformidade de aquecimento na superfície de um substrato em tratamento térmico rápido.

6.3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] - Walter Thurston & Richard Seaman, AG Associates - "Rapid Thermal Processing Systems Performance" - Microeletronic Manufacturing and Testing - vol. 8 n.º 8 - jul/85 - pgs. 8,9 e 10.

[2] - J. M. Dilhac - MRS Symposium Proceedings - vol. 146 - pgs.333 - 334 - april/89 - "Kinetics of Rapid Thermal Oxidation: Critical Analysis of Experimental Results".

[3] - Michael L. Reed & J. D. Plummer - "Si-SiO₂ Interface Trap Production by Low-Temperature Thermal Processing" - Appl. Phys. Lett., vol.51, n.º.17, august/87.