

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de: MESTRADO

Título da Tese: ESTUDO DA SOLDA DE LASERS DE SEMICONDUTOR

Autor: FRANCISCO MECCHI NETO

Orientador: Navin B. Patel

Co-orientador: Antonio Celso F. Arruda

Aprovado por

Prof. Dr. Antonio Celso F. Arruda

Prof. Dr. Navin B. Patel

Prof. Dr. Francisco Carlos de Prince

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Campinas, de 1989.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

" ESTUDO DA SOLDA DE LASERS
DE SEMICONDUTOR "

Autor: Francisco Mecchi Neto
Orientador: Navin B. Patel
Co-orientador: Antonio Celso F. Arruda

Tese apresentada à Faculdade
de Engenharia de CAMPINAS
da UNICAMP, como parte dos
requisitos necessários para
obtenção do título de
Mestre em Ciências

Agosto de 1989

AGRADECIMENTOS

À Navin B. Patel pela orientação e incentivo dados durante a realização deste trabalho.

À Antonio Celso F. Arruda pela co-orientação.

Aos amigos Barney, Claudio, Fred e Pitú pelos valiosos comentários e sugestões.

À Telebrás pela cessão dos lasers, instalações e equipamentos para realização deste trabalho.

À Verinha, minha esposa, pelo amor, paciência e dedicação que tanto me ajudaram a manter o equilíbrio e estrutura necessários à vida.

Aos colegas da ASGA, Telebrás e UNICAMP por estes anos de vida em comum, e a todos aqueles, que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais que tanto me incentivaram.

E, finalmente,

Ao Chiquinho e Raphael pelas horas de carinho e lazer.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
Introdução	
CAPÍTULO 2	2
O Laser de Semicondutor	
2.1. Histórico	
2.1. Princípio de Funcionamento	
CAPÍTULO 3	9
Estimativa da Resistência Térmica	
3.1. Introdução	
3.2. Modelo Unidirecional	
3.3. Outros Modelos	
CAPÍTULO 4	20
Medida da Resistência Térmica	
4.1. Introdução	
4.2. Medida da Resistência Térmica a Partir do Comprimento de Onda dos Modos Longitudinais (Método de Paoli)	
4.3. Medida da Resistência Térmica a Partir da Corrente de Threshold	

CAPÍTULO 5

33

Tecnologia Para Solda de Lasers de Semicondutor

5.1. Introdução

5.2. Principais Etapas do Processo de Solda

CAPÍTULO 6

41

Resultados e Conclusões

6.1. Resultados Experimentais

6.2. Conclusões

ANEXO I

53

ANEXO II

55

REFERÊNCIAS

64

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na fase em que se encontra o desenvolvimento da Tecnologia de fabricação dos lasers de semicondutor, torna-se de grande importância a otimização e controle dos processos relativos à montagem e encapsulamento destes dispositivos.

Um dos processos da montagem dos lasers de semicondutor é a solda destes em um dissipador de calor. A necessidade básica desta solda vem do fato de que quando operamos um laser de semicondutor em regime contínuo geramos na região ativa uma grande quantidade de calor. Como a corrente limiar depende fortemente da temperatura, não conseguiremos a operação em regime contínuo se não escoarmos rapidamente este calor da região ativa.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um processo para soldar o laser em seu dissipador de calor, bem como um estudo da utilização da Resistência Térmica como parâmetro de medida da qualidade do processo de solda.

Foram soldados 6 lotes de lasers com definição de faixa de contato através da deposição de óxido ("oxide stripe") e 2 lotes com definição de faixa de contato através de difusão ("V groove"). Estes lasers foram soldados sobre dissipadores de cobre ou silício com índio ou estanho. As medidas da Resistência Térmica foram feitas através dos métodos da corrente de Threshold e dos modos longitudinais. A partir destas medidas é feita uma comparação entre os dois métodos de medida da Resistência Térmica e determinada a viabilidade do uso do silício como dissipador de calor e do estanho como material de solda.

CAPÍTULO 2

O LASER DE SEMICONDUTOR

2.1. Histórico

Em 1954, Townes e seus colaboradores operaram pela primeira vez uma fonte de emissão radiativa coerente, o primeiro MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Quatro anos após, Shawlow e Townes propuseram uma extensão da teoria da microonda para o espectro visível. Esta teoria detalhada foi a base para a construção do primeiro MASER ÓPTICO ou LASER (Light Amplification by Stimulated Emission Radiation).

As primeiras sugestões para o uso de dois semicondutores diferentes formando uma junção, apareceram em 1951 com os trabalhos teóricos de Gubanov (1,2). Entretanto, somente em 1958 foram formuladas as primeiras hipóteses sugerindo o uso de junção de semicondutor para a fabricação de Lasers (3), à partir daí iniciou-se uma grande atividade nesta área, com a investigação de diferentes semicondutores, o que culminou com a obtenção, em 1962, do Laser de homojunção de GaAs (ARSENETO DE GÁLIO), por Hall (4), Nathan (5), Quist (6) e seus colaboradores. Estes Lasers foram obtidos através da difusão de zinco em um substrato tipo N de GaAs, formando uma junção P-N, na qual se obtém recombinação radiativa através da injeção de elétrons na região ativa. Os elétrons injetados na região ativa recombinam emitindo fótons com energia próxima a energia da banda proibida. A radiação estimulada é obtida quando o ganho ou amplificação de luz, ao atravessar o material, supera todas as perdas sofridas

nessa travessia. Este tipo de Laser foi extensivamente estudado e a limitação de sua operação somente à baixa temperatura, estimulou a pesquisa de outras estruturas. Alferov (7), Hayashi (8) e col., em 1970, obtiveram o primeiro Laser de heterojunção dupla de GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs operando continuamente à temperatura ambiente. Desde então, vários laboratórios de todo o mundo tem se dedicado à obtenção de estruturas cada vez mais eficientes.

Com o aperfeiçoamento da técnica de fabricação de lasers através do crescimento Epitaxial em Fase Líquida, foi possível, em 1973, obter laser semicondutor de GaAlAs capaz de operar continuamente por mais 1000 horas à temperatura ambiente (9), o que tornou possível à utilização destes dispositivos em comunicações ópticas. A aplicação em comunicações ópticas era o interesse central que motivava o desenvolvimento destes lasers. Com a possibilidade concreta da utilização dos Lasers de Semicondutor em sistemas comerciais de comunicações ópticas, as pesquisas foram se desenvolvendo não só em novas estruturas mas também em novos materiais que emitissem em comprimentos de onda, onde as fibras ópticas, que também estavam num rápido processo de desenvolvimento, apresentassem uma menor atenuação e dispersão. Foi a partir destes esforços, que em 1975, com Bogatov e col (10), começaram a surgir os Lasers de Fosfeto de Índio (InGaAsP).

No Brasil, o desenvolvimento destes dispositivos começou em 1971, com a vinda dos Profs. Navin B. Patel e Phellippe Brosson, liderados pelo Prof. José Ellis Ripper Filho, para a criação de um grupo, no Instituto de Física da UNICAMP, dedicado ao estudo dos fenômenos Físicos envolvidos na operação de Dispositivos Semicondutores. O Laser de Semicondutor foi escolhido como o primeiro a ser estudado, não só pela experiência prévia de dois membros do grupo inicial e pela sua utilidade potencial para comunicações ópticas, mas em grande parte pela sua complexidade de operação. A partir deste embrião, foi criado, em

1973, o grupo de comunicações ópticas, com apoio financeiro da TELEBRAS, que se estabeleceu naquela ocasião como empresa controladora do sistema de Telecomunicações Brasileiras. O trabalho foi iniciado com o desenvolvimento dos Lasers de GaAs. Em 1977 foi iniciado o desenvolvimento dos Lasers de InGaAsP, o que possibilitou ao Brasil a fabricação, de maneira rotineira, de Lasers Semicondutores Quaternários, operando em $1.3\mu\text{m}$, muito antes que a maioria dos laboratórios das grandes empresas multinacionais de telecomunicações.

2.2. Princípio de Funcionamento

Diodos Lasers de Semicondutor são basicamente junções P-N em semicondutor apropriado. Quando a junção é polarizada diretamente, circula corrente pelo dispositivo e uma parte da energia fornecida à ele é emitida na forma de luz.

A estrutura mais simples em Lasers de Semicondutor, é a homojunção formada por um mesmo semicondutor com portadores majoritários diferentes de cada lado da estrutura. Neste Laser, a injeção não equilibrada de portadores na junção produz a inversão de população necessária para se obter a emissão estimulada. Isto significa, por exemplo, que em um material originalmente tipo P, precisamos injetar elétrons (portadores minoritários), até atingir a densidade de pelo menos 10^{18} portadores/cm³. Numa junção P-N comum, na temperatura ambiente, esta condição é inatingível, com uma corrente razoável, devido à difusão dos portadores minoritários injetados. No entanto bons Lasers de Homojunção foram fabricados para operar a 80°K , pois nesta temperatura o comprimento de difusão dos portadores é sensivelmente reduzido. Para se conseguir a operação de Lasers à temperatura ambiente, foi lançada mão da utilização de heteroestruturas. Chamamos heteroestrutura à junção resultante de materiais com bandas de energia proibida diferentes, ou seja, diferentes Gaps. Os

primeiros Lasers que apareceram com este tipo de estrutura, foram os Lasers de heteroestrutura simples, que consistiam da junção de dois Semicondutores diferentes, com o mesmo parâmetro de rede e com energia de banda proibida e índice de refração diferentes.

Os Lasers de Semicondutor fabricados atualmente, surgiram da evolução dos Lasers descritos no parágrafo anterior, e são chamados de Lasers de dupla-heteroestrutura. Chamamos de dupla-heteroestrutura, quando envolvemos um material de Gap menor p ou n, com camadas de material de Gap maior, criando assim uma barreira de energia igual à diferença entre as energias de Gap (ΔE_g), que limita a difusão dos portadores minoritários à distância igual à espessura da camada de Gap menor do sistema criado. Um diagrama de bandas de uma dupla-heteroestrutura N-p-P é mostrada na figura 1 (geralmente nos referimos aos materiais de maior Gap de energia com letras maiúsculas e aos de Gap menor com letras minúsculas).

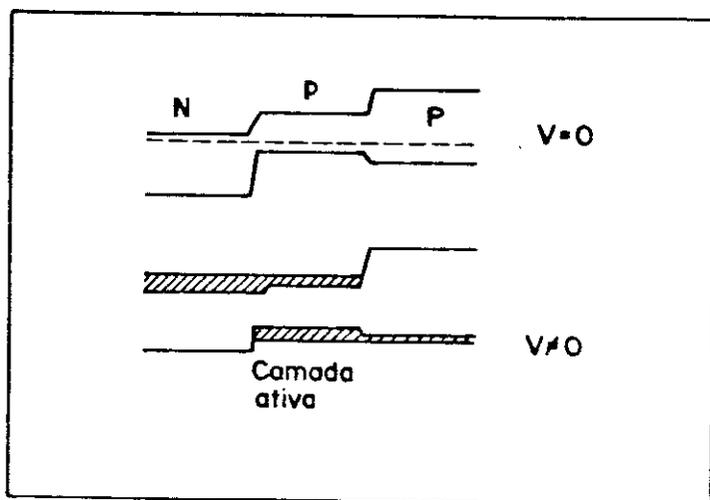


Figura 1

As descontinuidades nas bandas de condução e valência confinam os portadores injetados na camada ativa, que resulta na inversão de população necessária para se obter emissão estimulada. A primeira descontinuidade, na banda de condução, cria uma barreira para elétrons na junção P-p e a descontinuidade na banda de valência, cria uma barreira para os buracos na junção N-p. Cria-se assim uma região de inversão de população definida pela camada ativa, onde se dá a recombinação de elétrons e buracos, resultando na emissão de luz. As mesmas considerações para inversão de população são válidas para heteroestrutura dupla tipo N-n-P.

Uma vantagem adicional desta estrutura é o confinamento da radiação emitida dentro da camada ativa. Este confinamento é devido a variação no índice de refração existente entre a camada ativa e as regiões vizinhas, formando assim um guia de onda.

Estas propriedades, confinamento de portadores e de luz, permitem que a operação do dispositivo se dê à corrente limiar mais baixa que para outras estruturas, e ao mesmo tempo, operação contínua à temperatura ambiente. Além da redução na corrente limiar, a emissão de luz pode ser obtida apenas para o modo transversal fundamental reduzindo-se a espessura da camada ativa. As propriedades de emissão, de um Laser de heteroestrutura dupla, tem forte dependência com a espessura da camada ativa e a composição das camadas vizinhas.

Fazendo a camada ativa com espessura da ordem de 0,15-0,20 μ m e diferença entre as energias de Gap (ΔE_g) maior que KT pelo menos 10 vezes, pode-se conseguir níveis de injeção de $1-2 \times 10^{18}$ portadores/cm³, com densidades de corrente de apenas 1-2 KA/cm², o que corresponde à correntes de 100-200mA, em 300^oK. Isto sem dúvida foi uma grande evolução, considerando-se que os Lasers de homojunção precisam de 100 KA/cm² para atingir os mesmos níveis de injeção.

Um laser de contato largo, no qual a corrente se

distribui uniformemente na junção, apresenta a desvantagem de operar em vários filamentos distintos, de distribuição aleatória, que torna instável o modo de emissão de luz. Filamentos são regiões, definidas e localizadas onde ocorre a emissão estimulada. Esta instabilidade de filamentação modifica as características do espectro de luz emitida, dificultando suas aplicações especialmente em sistemas de comunicações ópticas. Tais dificuldades podem ser contornadas utilizando-se uma estrutura que confine a corrente na direção paralela à junção. Esta estrutura é conhecida como Laser de contato de faixa, e permite a operação do Laser em apenas um filamento. A faixa é a região onde há maior confinamento da corrente e pode ser obtida por diversas técnicas, sendo as mais comuns o bombardeamento de prótons e a deposição de óxido.

A figura 2 mostra a estrutura de Lasers de dupla heteroestrutura de GaAlAs e InGaAsP, com definição do contato de faixa através da deposição de óxido. Esta é uma das estruturas que foi desenvolvida pela UNICAMP/TELEBRÁS.

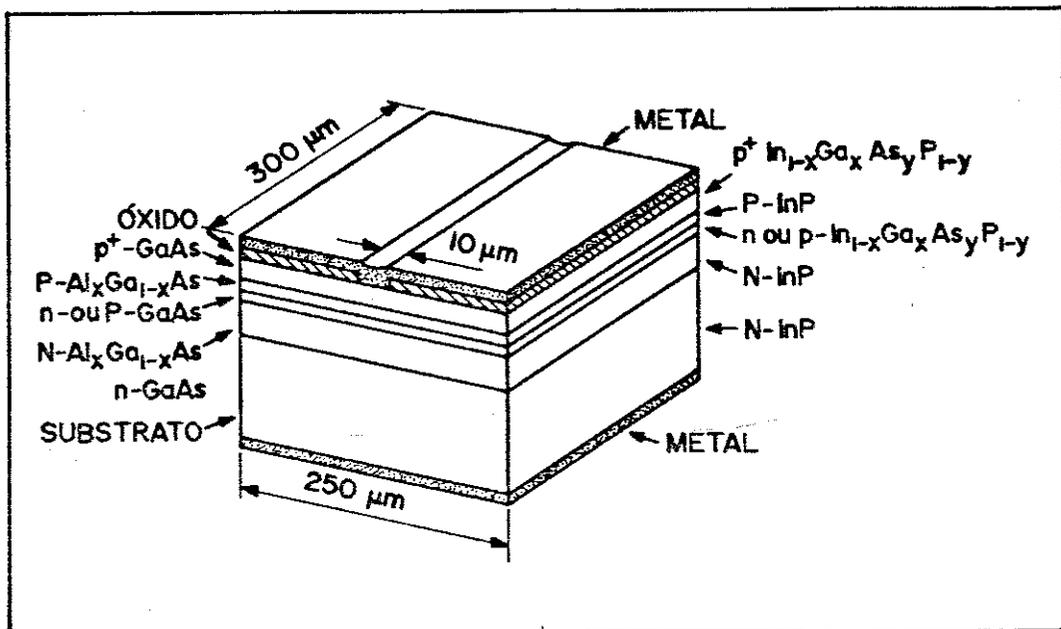


Figura 2

Outra forma de se obter lasers de semiconductor com geometria de contato de faixa é através do processo de difusão. A figura 3 mostra a estrutura de um laser de Arseneto de Gálio, com contato de faixa obtido através de difusão, do tipo "V-groove":

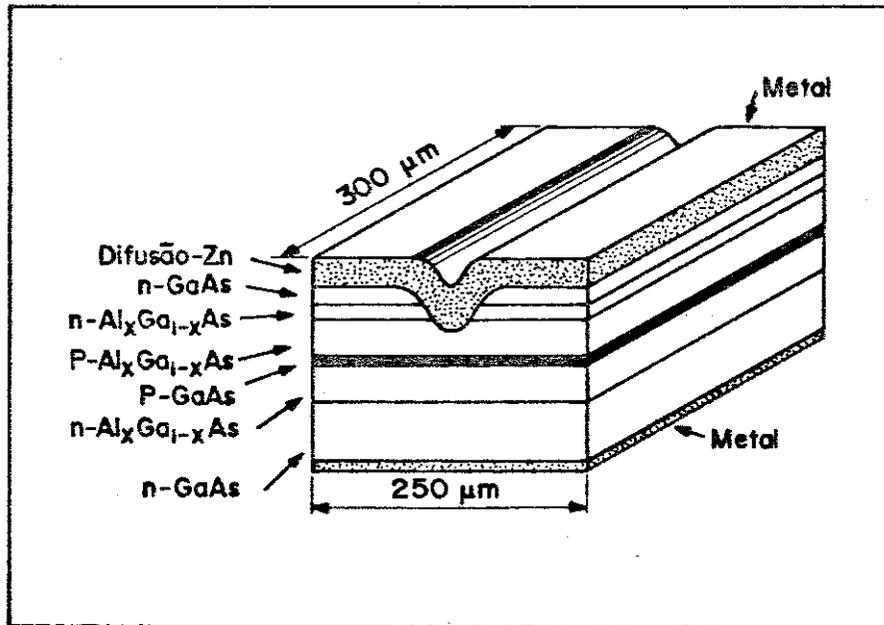


Figura 3

Neste trabalho foram usados lasers de Arseneto de Gálio com faixa de contato definida através de deposição de óxido e difusão, com estruturas semelhantes as mostradas nas figuras 2 e 3.

CAPÍTULO 3

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA TÉRMICA

3.1. Introdução

As características de um Laser de Junção são fortemente afetadas pela temperatura resultante de sua operação. Por isto, muito esforço têm sido dedicado no sentido de se construir um modelo que permita calcular a distribuição de temperatura nas direções perpendicular e paralela à junção, bem como seus efeitos sobre a corrente limiar, tempo de vida do Laser e modos de emissão de luz. Deste modo, pode-se avaliar os parâmetros relevantes no funcionamento do Laser e assim otimizar os processos de fabricação e funcionamento.

O comportamento térmico para uma configuração particular de dispositivo é representado através da sua Resistência Térmica (RT). A Resistência Térmica de Lasers de Semicondutor é definida como a variação de temperatura da região ativa relativa ao dissipador de calor dividida pela potência dissipada na região ativa. A Resistência Térmica é uma característica do dispositivo que depende da condutividade Térmica e espessura das camadas que o compõem e influencia a operação do dispositivo através do efeito que têm sobre a temperatura da região ativa. Além disto, a Resistência Térmica é um parâmetro que pode ser usado para avaliar a qualidade da tecnologia de solda que é usada para fixar o laser ao dissipador de calor.

Garel-Jones e Dymant (11) desenvolveram um modelo para o cálculo da distribuição de temperatura e Resistência Térmica para

Lasers de contato de faixa, admitindo que todo o calor é gerado na região ativa e o seu fluxo é unidirecional.

Joyce e Dixon (12) usando um modelo de duas dimensões e também supondo que todo o calor é gerado na região ativa, fizeram um cálculo da distribuição de temperatura e Resistência Térmica para Lasers de contato de faixa com isolamento obtido através de bombardeamentos de prótons. Também analisaram a importância da transferência radiativa de calor para o substrato ou outros pontos do Laser.

Kobayashi e Iwawe (13), fizeram uma análise numérica dos problemas térmicos a partir de um modelo de três dimensões. Consideraram uma estrutura de multicamadas, composta de materiais não uniformes e a presença de pontos de calor nos defeitos de crescimento das interfaces. Nesta análise o fluxo de calor para as camadas vizinhas à região ativa e o fluxo lateral de calor, reduzem a temperatura da região ativa e produzem uma distribuição não uniforme de temperatura ao longo da faixa.

Nuwan e col. (14) baseados no modelo proposto na referência (12) calcularam a Resistência Térmica considerando dois casos limites: quando toda a absorção de calor se dá na região ativa e quando há 100 por cento de transferência para as camadas vizinhas. Este segundo caso assume a presença de fontes de calor em diferentes pontos da estrutura do Laser. Analisa ainda a presença de alumínio na camada ativa e conclui que, se a porcentagem de alumínio for maior que 5 por cento, a transferência radiativa será relevante no cálculo da Resistência Térmica.

Duda e outros (15) calcularam a Resistência Térmica e distribuição de temperatura na direção perpendicular à junção, levando em conta características das diferentes camadas, eficiência quântica externa e a presença de outras fontes de calor. Além disto, apresentaram resultados experimentais

estatísticos de algumas centenas de Lasers com diferentes larguras de faixa, montados em diferentes dissipadores de calor (cobre, silício e óxido de berílio).

J.S. Manning (16) calculou a Resistência Térmica de Lasers com contato de faixa isolado por óxido, através de um programa de computador de Autoria de Bathe (17) para análise de fluxo de calor. Para este cálculo é construído um modelo, de duas ou três dimensões, pela divisão do diodo, solda e bloco de cobre em uma grade de pontos. Além disto, concluiu que o modelo desenvolvido por Duda e outros, apesar de ter sido desenvolvido para Lasers com faixa definida por bombardeamento de prótons, apresenta uma diferença muito pequena para os cálculos que faz para Lasers com definição de faixa através da deposição de óxido.

Estes modelos permitem calcular um perfil de temperatura nas direções perpendicular e paralela à junção. Entretanto, limitações experimentais permitem determinar apenas variações médias de temperatura, através da Resistência Térmica.

3.2. Modelo Unidirecional

A maneira mais simples para se calcular a Resistência Térmica de um laser de semiconductor é considerando o dispositivo uma superposição de camadas como mostrado na figura 4.

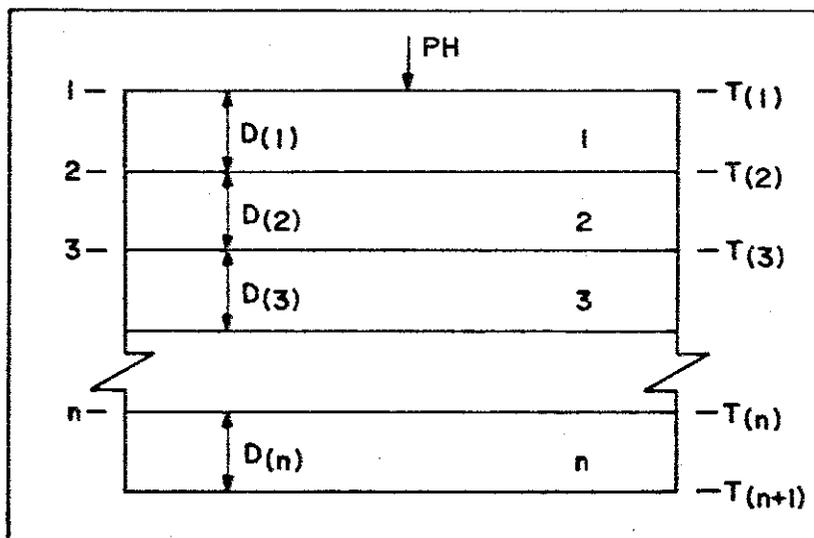


Figura 4

Para um estado estacionário, notamos que o fluxo de calor PH é constante em cada plano de área perpendicular à direção do fluxo de calor. Se as superfícies 1, 2, 3, ..., (N + 1), forem mantidas em temperaturas constantes T(1), T(2), T(3), ..., T(N + 1) respectivamente. Sendo T(n), maior que T(n+1), o fluxo de calor através da camada n, obtido pela integração da equação da condução

de calor para um meio estacionário que tenha condutividade térmica constante e não possua fonte térmica (18) é:

$$PH = - K (n) \cdot A \frac{T(n + 1) - T(n)}{D (n)} \quad (1)$$

Como o fluxo de calor PH é o mesmo para todas as camadas, temos:

$$PH = \frac{T(1) - T(n + 1)}{\frac{D(1)}{K(1)A} + \frac{D(2)}{K(2)A} + \dots + \frac{D(n)}{K(n)A}} \quad (2)$$

Onde cada $D(n)/K(n)A$ é a Resistência Térmica do material condutor com uma espessura $D(n)$. Esta forma sugere o uso de uma analogia elétrica como mostrada na figura 5.

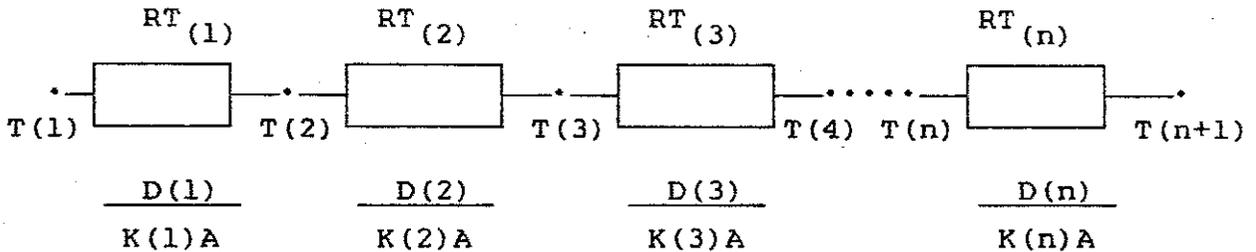


Figura 5

Agora, notamos que a equação (2) pode ser escrita na forma:

$$\text{Fluxo de calor} = \frac{\text{Diferença total de temperatura}}{\sum \text{Resistências Térmicas}} \quad (3)$$

Vamos agora analisar o caso em que a condutividade térmica de algumas camadas do dispositivo é função da temperatura. Este cálculo baseia-se no modelo proposto por Garel-Jones e Dymant (11) para Lasers de dupla-heteroestrutura com contato de faixa definido por óxido. Neste modelo o Laser é considerado como uma superposição de camadas, como mostrado na figura 6.

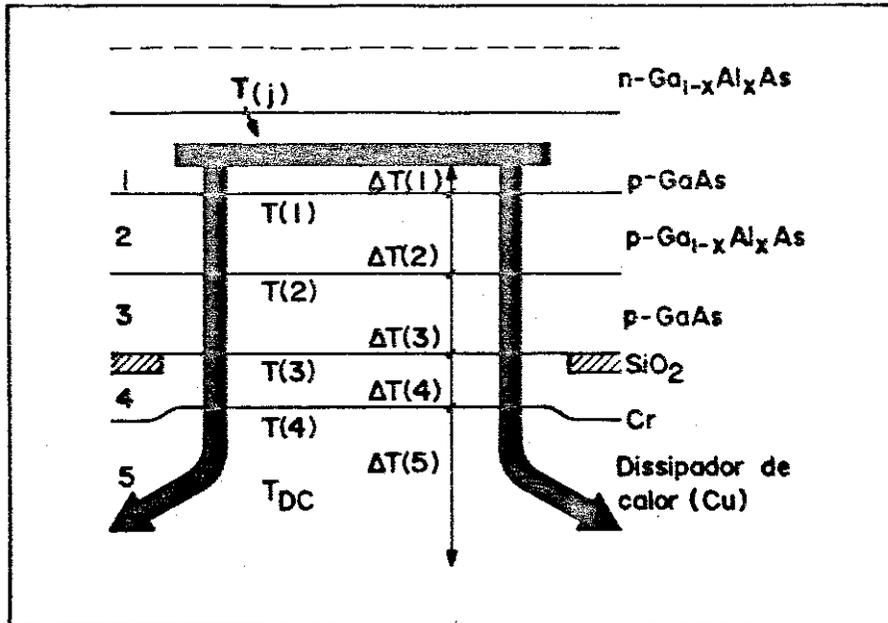


Figura 6

A camada de óxido atua como uma barreira ao fluxo de calor, fazendo com que este seja unidirecional entre a junção e o dissipador de calor e bidirecional no dissipador. A distribuição de temperatura e Resistência Térmica obtidas a partir deste modelo, podem ser aplicadas a geometrias que tenham isolamento por óxido, estruturas de camadas enterrada e as estruturas tipo "mesa". Por outro lado, este modelo super-estima a Resistência Térmica de

dispositivos em que o confinamento de corrente é conseguido através de bombardeamento de prótons, difusão, injeção lateral ou técnicas de heteroisolação.

Nesse modelo, uma fonte de calor (PH) com largura (S) e comprimento (L) é assumida como estando localizada no centro da região ativa. O fluxo de calor passa através das camadas p-GaAs, p-GaAlAs e Cr, para depois se espalhar em um dissipador de cobre Semi-infinito. Nos dispositivos experimentais existe uma camada de ouro ($\cong 15\mu\text{m}$) e outra de In ($\cong 1\mu\text{m}$) entre o Cr e o dissipador de cobre, mas como a condutividade do ouro é semelhante a do cobre e a camada de Índio é fina, podemos supor que estas fazem parte do dissipador e possuem a Condutividade Térmica do cobre.

O calor fluindo através da camada (n), produz correspondente variação de temperatura ($T(n)$) que pode ser calculada usando os parâmetros e fórmulas dadas na tabela 1. As camadas de 1 a 5, são assumidas como tendo temperaturas constante $T(j)$, $T(1)$, $T(2)$, $T(3)$ e $T(4)$ respectivamente.

Cam.	Material	Espessura (cm)	Condutividade Termica ($\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	ΔT (K)
1	P-GaAs	$D(1) = 0,25 \times 10^{-4}$	$K(1) = 0,91 \exp \frac{-T(j)}{367}$	$\Delta T(1) = \frac{PH \cdot D(1)}{L \cdot S \cdot K(1)}$
2	P-GaAlAs	$D(2) = 1,0 \times 10^{-4}$	$K(2) = \frac{0,91}{\alpha} \exp \frac{-T(1)}{367}$	$\Delta T(2) = \frac{PH \cdot D(2)}{L \cdot S \cdot K(2)}$
3	P-GaAs	$D(3) = 1,5 \times 10^{-4}$	$K(3) = 0,91 \exp \frac{-T(2)}{367}$	$\Delta T(3) = \frac{PH \cdot D(3)}{L \cdot S \cdot K(3)}$
4	Cr	$D(4) = 0,10 \times 10^{-4}$	$K(4) = 0,86$	$\Delta T(4) = \frac{PH \cdot D(4)}{L \cdot S \cdot K(4)}$
5	Cu	semi - infinito	$K(5) = 3,90$	$\Delta T(5) = \frac{PH \ln(4L/S)}{K(5) \pi L}$

Tabela 1

A dependência da densidade de corrente limiar (J_{Th}) em função da temperatura da junção $T(j)$, pode ser obtida experimentalmente através da medida da intensidade de luz de saída em função da densidade de corrente pulsada. Uma baixa porcentagem de pulso por período é usada para que a temperatura da junção $T(j)$ seja aproximadamente igual a temperatura do dissipador de calor (TDC). Os resultados experimentais mostram uma dependência que tem a seguinte forma:

$$J_{Th}(T(j)) = J_0 \exp(T(j)/T_0) \quad (4)$$

onde J_0 e T_0 são constantes típicas do dispositivo.

A variação total de temperatura entre a junção e o dissipador de calor é dada por:

$$T(j) - TDC = \sum_{n=1}^5 \Delta T(n) \quad (5)$$

Assumindo que toda a potência elétrica fornecida ao dispositivos é dissipada em forma de calor na região ativa, temos:

$$PH = V \cdot L \cdot S \cdot J_{Th} \quad (6)$$

onde:

$$V = V_0 + L \cdot S \cdot J_{Th} \cdot R_s \quad (7)$$

$$V_0 = 1,49 - \frac{0,00058 T(j)^2}{(T(j) + 300)} \quad (8)$$

Na equação (7), V_0 e $(L \cdot S \cdot J_{Th} \cdot R_s)$ representam a contribuição de tensão dada pela junção e Resistência Série (R_s) respectivamente.

A condutividade térmica $K(1)$ e $K(3)$ para as camadas de p-GaAs são válidas para temperaturas acima de $300^\circ K$. A condutividade térmica da liga p-GaAlAs, camada (2), é assumida

como tendo a mesma dependência da temperatura que as de p-GaAs, mas reduzida de um valor (α) que é dependente da porcentagem de Al da camada (x). O valor de x é dado para uma faixa que varia de $x = 0$ até $x = 4$, que é suficiente para o estudo em questão. Para $x = (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4)$, $\alpha = (1.00, 2.33, 3.06, 3.76, 4.45)$.

A partir dos valores do calor dissipado na junção (PH) e da diferença de temperatura entre a junção e o dissipador de calor ($T(j) - TDC$), podemos obter o valor da Resistência Térmica (RT) que é definida como a quantidade que multiplicada pela potência elétrica dissipada no dispositivo, fornece a temperatura da camada ativa:

$$RT = \frac{T(j) - TDC}{PH} \quad (9)$$

Um programa de computador que faz o cálculo da distribuição de temperatura e Resistência Térmica a partir do modelo proposto por Garel-Jones e Dymant pode ser visto no anexo I.

3.3. Outros Modelos

Comparando os diversos modelos usados para o cálculo da Resistência Térmica, veremos que a análise unidimensional, com o calor sendo gerado somente na região ativa (11), indica um valor de 46°C/W . A análise bidimensional de Joyce e Dixon (12), também assumindo que o calor é gerado somente na região ativa, mas admitindo espalhamento de calor, obtêm um valor de 22°C/W a 29°C/W , para um diodo similar, com contato de faixa isolado por bombardeamento de prótons. Usando ainda análise bidimensional, mas incluindo o calor gerado no substrato e na camada p-GaAs, Duda e outros (15) calcularam um valor de 13°C/W para um Laser com contato de faixa isolado por bombardeamento de prótons e parâmetros similares aos dos Lasers usados neste trabalho. J.S. Manning (16), usando Laser com contato de faixa isolado por óxido

e com parâmetros também similares aos dos Lasers usados neste trabalho, obteve um valor de 12°C/W para o diodo, 6 a 11°C/W para a solda de índio (dependendo da espessura) e 7°C/W para o dissipador de calor, o que nos dá um total de 25 a 30°C/W para a soma das Resistências Térmicas do Laser, solda e dissipador de calor.

Analisando o que foi visto até agora, notamos que o cálculo do valor da Resistência Térmica do Laser pode variar de 12 a 46°C/W , dependendo das condições de contorno que adotamos para este cálculo. Esta discrepância de valores é devida a dificuldade de se construir um modelo que expresse, com fidelidade, o comportamento térmico do dispositivo, bem como a impossibilidade, devido às dimensões do mesmo, de se determinar com precisão os parâmetros que influenciam o valor da Resistência Térmica.

A tabela 2, mostra uma estimativa dos valores da Resistência Térmica de cada camada dos lasers com contato de faixa isolado por óxido usados neste trabalho, baseada nos resultados obtidos por Duda (15) e Maning (16). Esta estimativa nos dá uma idéia do valor teórico esperado para a Resistência Térmica dos lasers que serão soldados, bem como a contribuição de cada camada para este valor.

Camada	Espessura (μm)	Condutividade Térmica ($\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{C}$)	Resistência Térmica ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	Ref.
Substrato	100	0,45	0	16
n AlGaAs	1,5	0,12	0	16
p GaAs	0,1	0,25	0	16
p AlGaAs	1	0,12	8	16
SiO_2	0,4	0,01	2	16
Metalização (Ti/Pt/Au)	0,5/1/3	0,2/0,7/3,2	1	16
Índio	2	0,87	6	16
Silício	250	1,5	20	15
Dissipador (Cu)		4,01	7	16

Tabela 2

CAPÍTULO 4

MEDIDA DA RESISTÊNCIA TÉRMICA

4.1. INTRODUÇÃO

A dificuldade de se medir a Resistência Térmica de um Laser de Semicondutor é causada pela dificuldade de se medir diretamente a temperatura da região ativa do dispositivo, pois as dimensões físicas da região ativa são da ordem de $300 \times 5 \times 0,2\mu\text{m}$, o que impossibilita o uso das técnicas convencionais para medida de temperatura. Por outro lado, alguns parâmetros do laser de semicondutor, que podem ser medidos de maneira relativamente simples, apresentam uma forte dependência com a temperatura da região ativa, o que possibilita uma medida indireta da temperatura da região ativa. Entre estes parâmetros estão a tensão no dispositivo, a potência óptica emitida, o comprimento de onda dos modos longitudinais e a corrente de Threshold.

Qualquer medida da Resistência Térmica de diodos, envolve a determinação da variação de temperatura da junção produzida por uma determinada variação na potência fornecida ao dispositivo. Isto pode ser feito através de duas técnicas: A primeira envolve a compensação da variação de temperatura da junção através do resfriamento do dissipador de calor. A segunda mantém a temperatura do dissipador fixo, mas requer a determinação da dependência da temperatura da junção com o parâmetro escolhido para medir a temperatura.

Neste trabalho, a Resistência Térmica dos lasers será medida através de dois diferentes parâmetros: O comprimento de onda dos modos longitudinais e a corrente de Threshold.

A medida através do comprimento de onda dos modos longitudinais utiliza a técnica da compensação e, portanto, não necessita de uma medida de calibração preliminar. Além disto, por causa da pequena largura de cada modo, pequenas diferenças de temperatura ($< 0,2^{\circ}\text{C}$) podem ser facilmente medidas. Conseqüentemente, a medida da Resistência Térmica de cada laser por esta técnica pode ser medida rapidamente e com muita precisão.

A medida através da corrente de Threshold necessita de calibração preliminar e assume uma dependência exponencial da corrente de Threshold com a temperatura da região ativa, que é adequada somente para uma limitada faixa de temperatura. Por outro lado a medida da Resistência Térmica pode ser feita quando dos testes elétricos do dispositivo, que são obrigatórios em uma linha de produção de lasers de semicondutor.

4.2. Medida da Resistência Térmica a Partir do Comprimento de Onda dos Modos Longitudinais (Metodo de Paoli)

O método utilizado para esta medida foi proposto por Paoli (19) e baseia-se na dependência do índice de refração da camada ativa com a temperatura. Esta dependência faz com que a frequência de ressonância de cada modo da cavidade Fabry-Perot em um laser de junção varie com a temperatura da cavidade. Nessa técnica mede-se o decréscimo de temperatura que deve sofrer o dissipador de calor para manter fixo um modo da cavidade Fabry-Perot num comprimento de onda selecionado, quando se passa de um regime de alimentação pulsado para o regime contínuo. Desde que se mantenha a corrente de alimentação constante, manter um modo num mesmo comprimento de onda significa que a cavidade óptica se encontra na mesma temperatura operando continuamente, que quando o laser é operado à uma baixa porcentagem de pulso por período. Assim, a variação de temperatura do absorvedor de calor

pode ser igualada a variação de temperatura da cavidade óptica devido ao aumento de potência. Portanto, essa técnica é sensível à variações médias de temperatura dentro da cavidade óptica.

Após a determinação da variação de temperatura da região ativa, a Resistência Térmica (RT) do laser pode ser facilmente calculada pela definição:

$$RT = \frac{\Delta T}{\Delta P} \quad (10)$$

onde ΔP representa a diferença entre a potência dissipada no dispositivo operando à baixa porcentagem de Pulso por período e em regime contínuo. Como esta medida é feita em correntes abaixo do limiar, onde a potência radiativa é uma pequena fração da potência elétrica fornecida ao dispositivo, podemos considerar ΔP como sendo a potência elétrica fornecida externamente ao dispositivo, que é dada pela corrente multiplicada pela tensão no dispositivo.

A montagem experimental usada para medida da Resistência Térmica a partir do comprimento de onda dos modos longitudinais é mostrada na figura 7:

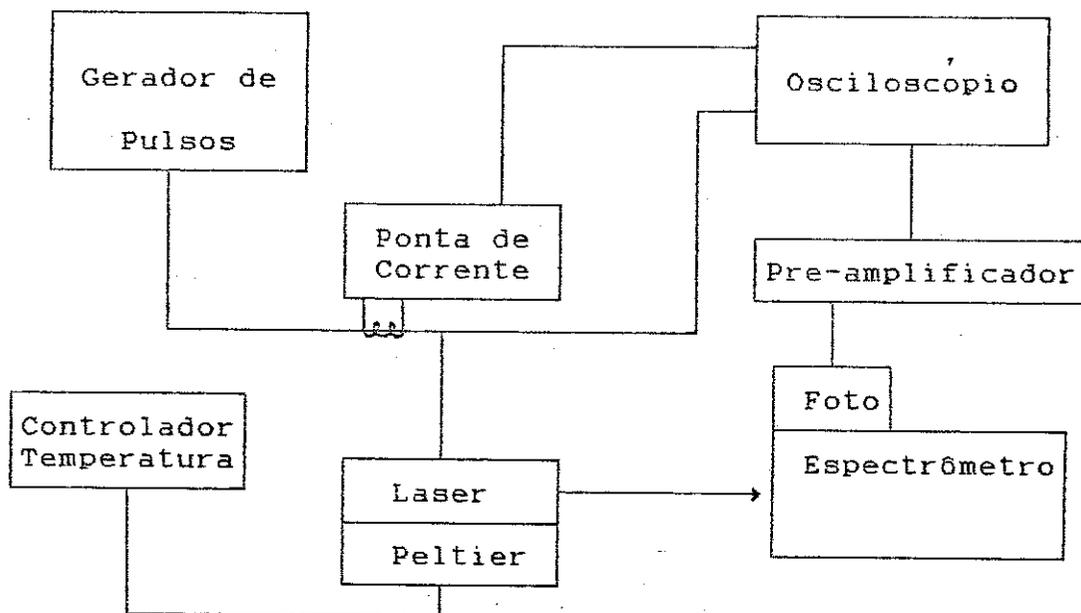


Figura 7

Para selecionar o modo da cavidade Fabry-Perot usado na medida, cada laser é pulsado a $1\mu s$ e 1000 pulsos/seg. A amplitude do pulso de corrente deve ser escolhido o mais próximo possível da corrente de Threshold e dentro da sensibilidade do sistema. A luz do laser é então focalizada em um espectrômetro que tem uma válvula fotomultiplicadora na saída. O sinal obtido da fotomultiplicadora é medido por um osciloscópio para observação do pulso de luz no intervalo ($\approx 0,2\text{\AA}$) selecionado pelo espectrômetro. Tipicamente, a largura do pulso de luz observado a um comprimento de onda fixo é muito menor que a largura total do pulso aplicado ao dispositivo. O comprimento de onda de cada modo sofre uma

varredura durante a aplicação do pulso de corrente devido ao transiente térmico. Para minimizar o transiente de temperatura entre o laser e o dissipador de calor, o comprimento de onda do modo é selecionado dentro dos primeiros 50ns do pulso e após a oscilação inicial do pulso ter cessado. Após o modo ter sido selecionado da forma descrita acima, nenhum outro ajuste é feito no espectrômetro durante a medida.

A potência aplicada ao dispositivo é levado de 0 a 100% através do aumento da frequência do pulso e da largura do mesmo, mantendo-se a corrente constante, ao mesmo tempo que se reduz a temperatura do dissipador de calor para manter o pico do modo selecionado no comprimento de onda inicial.

A tensão aplicada ao dispositivo e a corrente que está circulando pelo mesmo é medida no osciloscópio conforme mostra a figura 7.

Como o comprimento de onda do pico do modo é selecionado a 25°C e mantido neste comprimento de onda até o final da medida, os valores medidos referem-se a cavidade ressonante à aproximadamente 25°C.

A figura 8 mostra que a variação de temperatura ΔT , medida por esta técnica é proporcional à porcentagem de pulso por período aplicado ao dispositivo de 0 a 100%, indicando que a medida é sensível à média da potência dissipada.

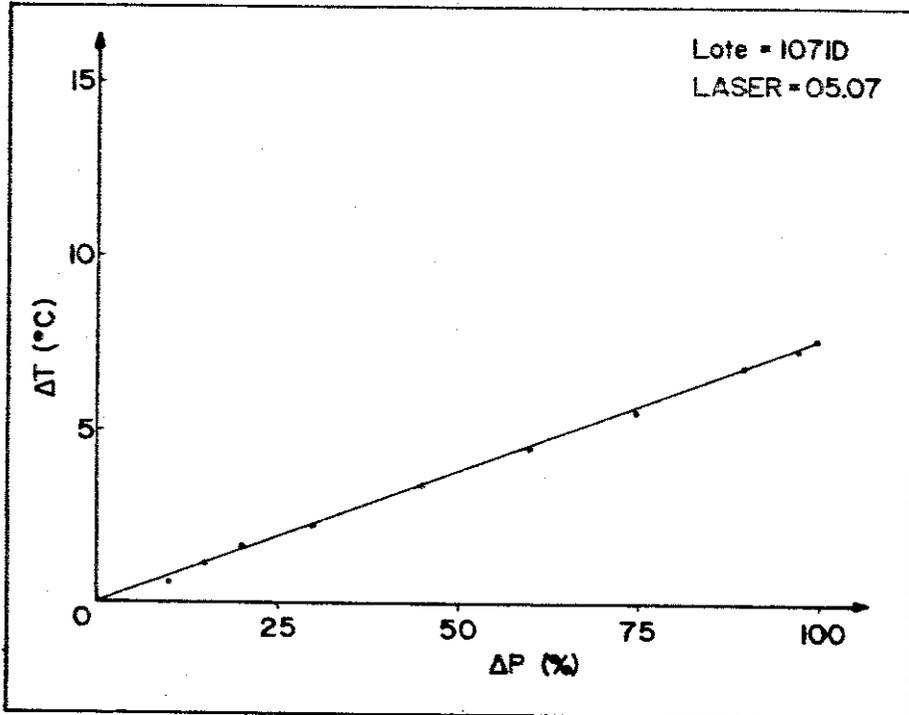


Figura 8

4.3. Medida da Resistência Térmica a Partir da Corrente de Threshold

Uma relação empírica comumente usada para descrever a dependência da corrente de Threshold com a temperatura em lasers de semicondutor é $I_{Th}(T) \propto \exp(T/T_0)$, onde I_{Th} é a corrente de Threshold a uma determinada temperatura T e T_0 é uma constante que mostra a dependência da corrente de Threshold com a temperatura. Para os lasers do tipo usado neste trabalho, uma relação exponencial descreve a corrente de Threshold somente para pequenos intervalos de temperatura ($\cong 20^\circ\text{C}$). Como a medida da Resistência Térmica envolve somente pequenos desvios ($\leq 10^\circ\text{C}$) da temperatura ambiente, o T_0 medido à temperatura ambiente é adequado para descrever o aumento na corrente de Threshold devido à operação em regime contínuo.

A medida da corrente de Threshold em regime pulsado e contínuo, à mesma temperatura do dissipador de calor, nos dá a variação de temperatura da região ativa através da seguinte relação:

$$\Delta T = T_0 \ln [I_{Th}(cw)/I_{Th}(\text{Pulsado})] \quad (11)$$

Alternativamente, a variação de temperatura pode ser determinada diretamente através do gráfico do $\ln(I_{Th})$ versus a temperatura. A diferença de temperatura entre a curva em regime

pulsado e a em regime contínuo a uma determinada corrente de Threshold é igual a diferença de temperatura na região ativa. A figura 9 ilustra a utilização deste método:

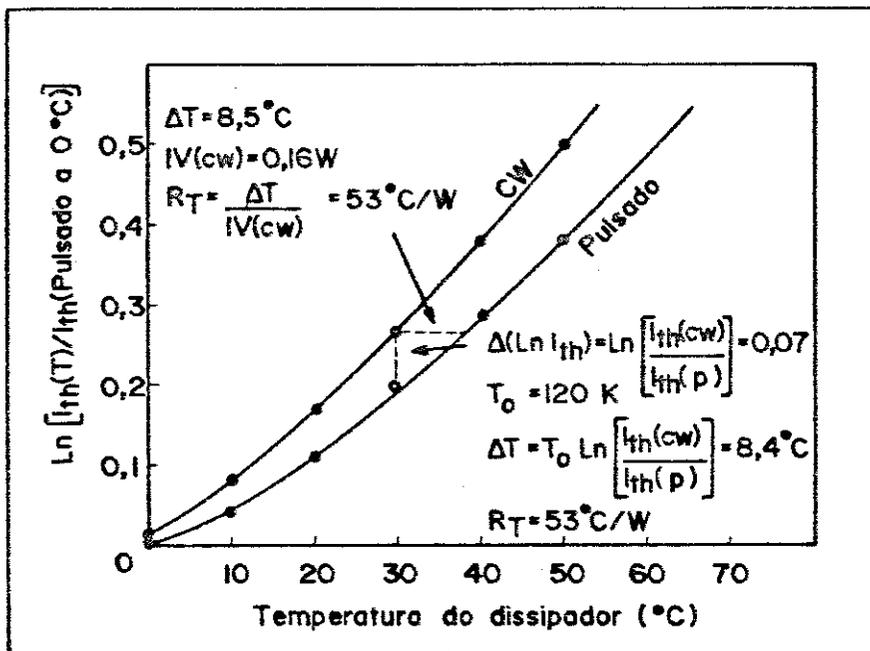


Figura 9

Determinada a diferença de Temperatura da junção entre a operação em regime contínuo e pulsado à baixa porcentagem de pulso por período, a Resistência Térmica pode ser calculada diretamente pela equação (10).

A montagem experimental básica usada para medida da Resistência Térmica a partir da corrente de Threshold é a mostrada na figura 10:

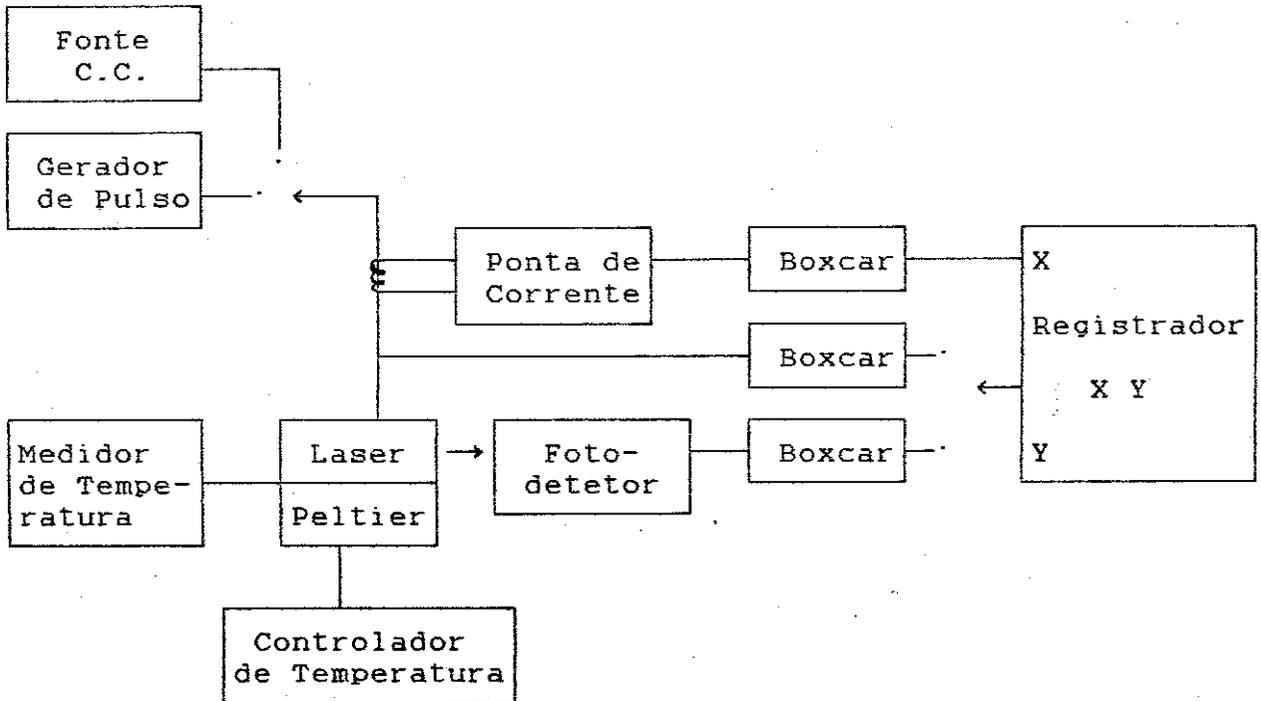


Figura 10

Esta montagem pode ser feita em diversas configurações de equipamentos, inclusive usando microcomputador ou placas para uso em microcomputador desenhadas exclusivamente para este fim. O Sistema que foi usado neste trabalho é de propriedade da Telebrás e uma folha de Testes típica, com os resultados dos testes eletro-ópticos feitos nos lasers soldados está mostrada na figura 11.

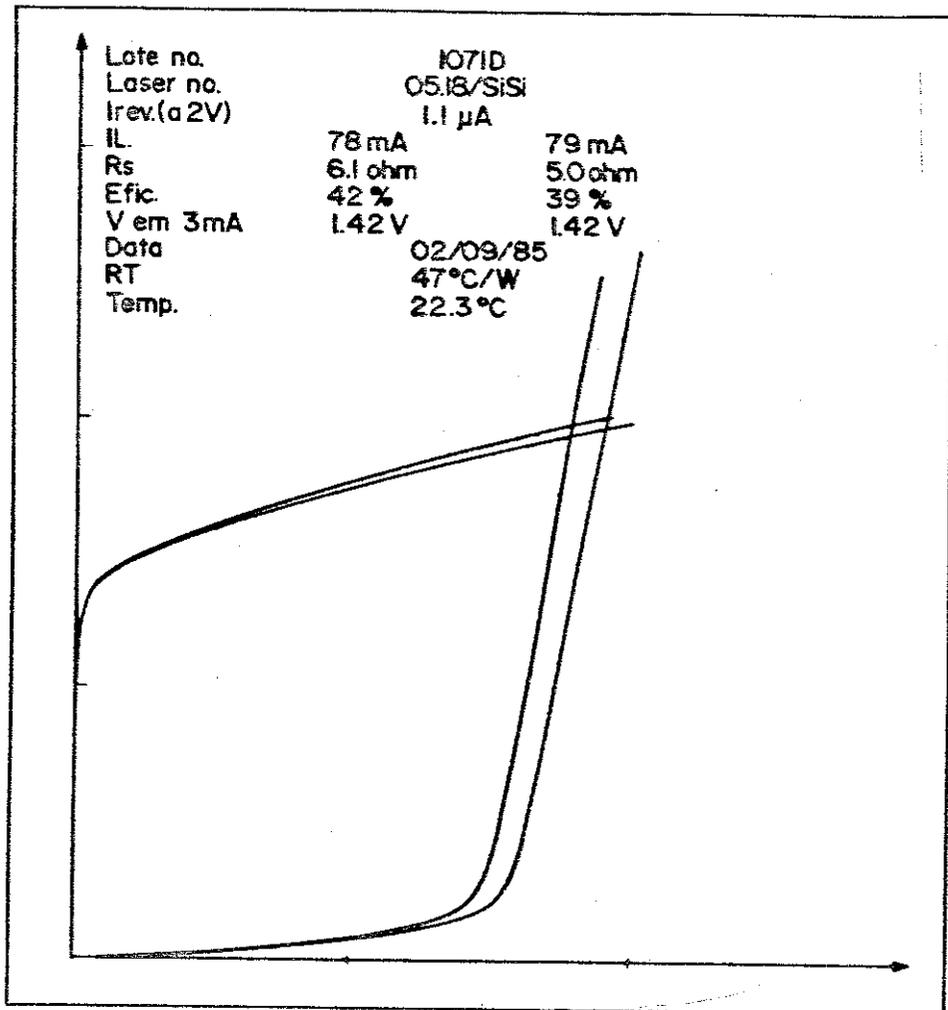


Figura 11

O valor de T_0 é determinado para um conjunto de lasers oriundos de um mesmo crescimento através da medida de 6 lasers deste conjunto. Para isto, são obtidas várias curvas I_{Th} , em regime pulsado, na faixa de temperatura entre 20 e 50 graus centígrados.

Da equação (4), podemos tirar que:

$$I_{Th(T)} = I_{Th(ref)} \exp (T/T_0)$$

onde:

$$T = T_0 \ln \frac{I_{Th(T)}}{I_{Th(ref)}}$$

Sendo T a temperatura na qual esta sendo feita a medida e $T_{(ref)}$ a temperatura na qual foi feita a primeira medida, e que servirá como referência.

Fazendo-se um gráfico de $\ln \frac{I_{Th(T)}}{I_{Th(ref)}}$ em função da temperatura T , obtém-se uma reta cujo coeficiente angular é o inverso do valor de T_0 .

Dos valores obtidos para as 6 amostras é feito uma média aritmética, cujo valor é utilizado para todo o conjunto. As figuras 12 e 13 ilustram esta medida. O uso da média do valor de T_0 para todo o lote facilita a realização da medida da Resistência

Térmica, principalmente quando o número de lasers a serem medidos é grande, mas pode introduzir erros, devido ao desvio do valor médio de T_0 , que inviabilizam o uso da medida em algumas aplicações.

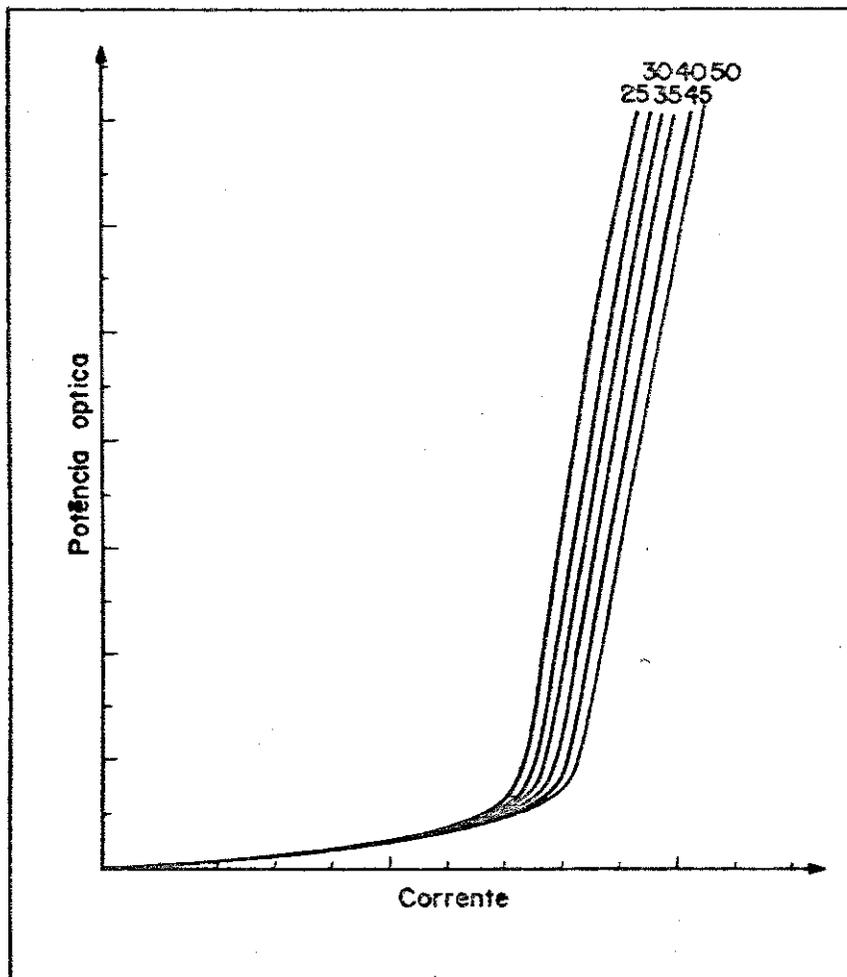


Figura 12

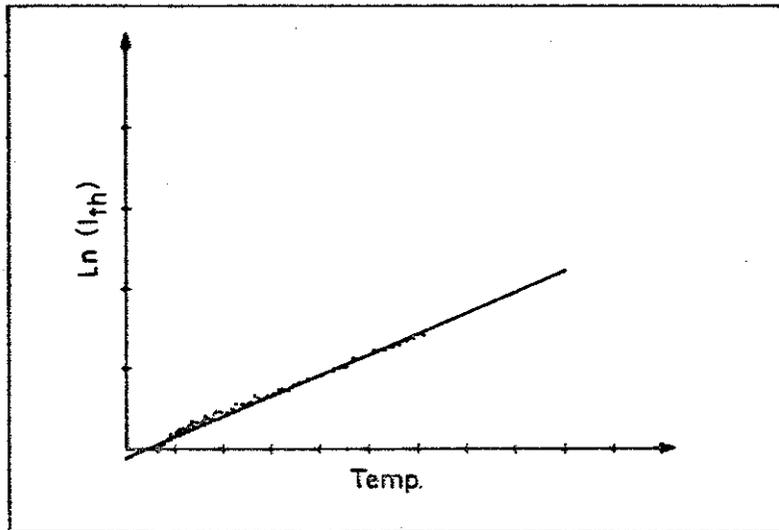


Figura 13

CAPÍTULO 5

TECNOLOGIA PARA SOLDA DE LASERS DE SEMICONDUTOR

5.1. Introdução

As principais etapas da fabricação de lasers de semicondutor podem ser divididas como mostrado na figura 14.

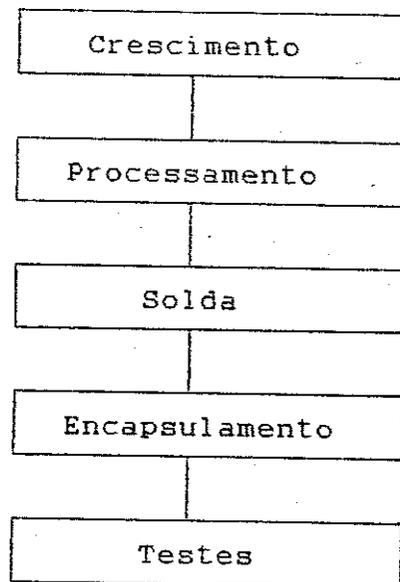


Figura 14

5.2. Principais Etapas do Processo de Solda

Neste trabalho vamos nos ater somente à descrição das etapas para a realização da solda do dispositivo. O fluxograma das etapas para a realização da solda de lasers de semicondutor está mostrado na figura 15.

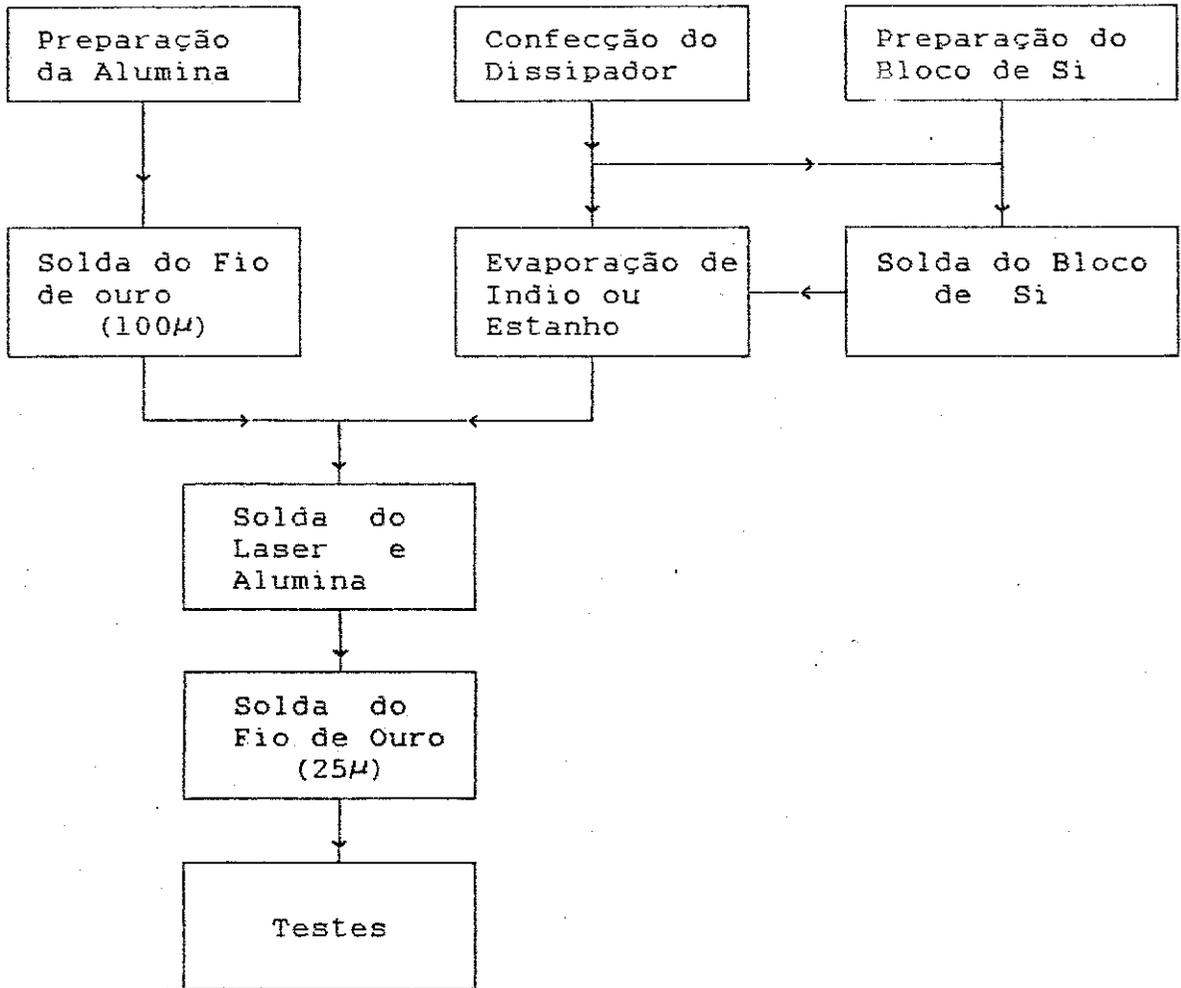


Figura 15

O dissipador de calor já com o laser, alumina, silício e fios de ouro montados, está mostrado na figura 16.

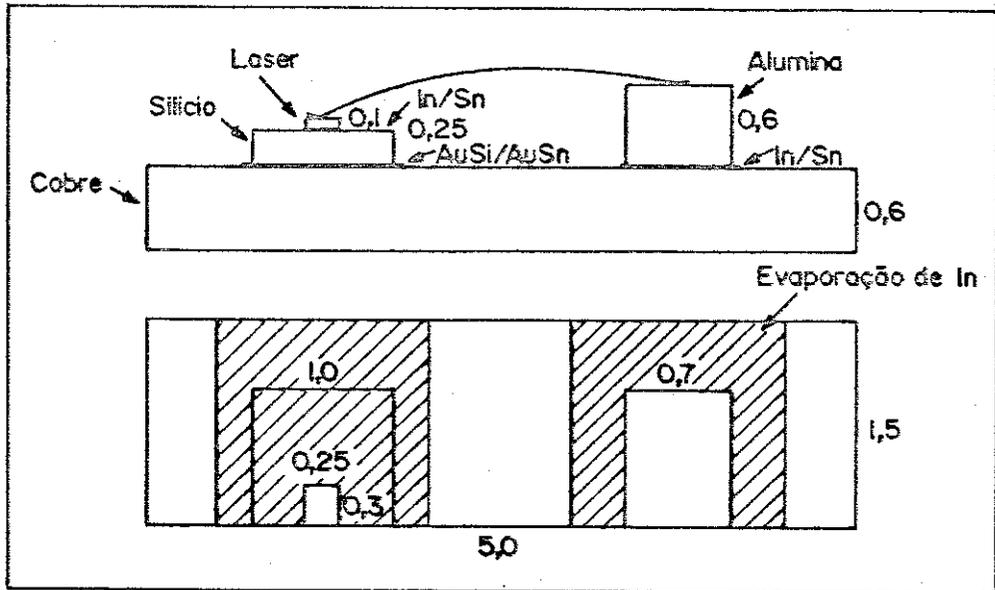


Figura 16

Cada uma das etapas mostradas no fluxograma da figura 15 está descrito a seguir:

5.2.1. Preparação da Alumina

O objetivo desta etapa é fazer o corte e a limpeza do bloco de Alumina que é utilizado para soldar o fio de 25 μ m que vem do laser e o fio de 100 μ m que vai para o sistema de testes ou o pino do encapsulamento. Foi utilizado alumina pois este é um material de uso comum em microeletrônica, que apresenta boas características de isolamento elétrico e inclusive pode ser comprado já metalizado. A alumina usada neste trabalho é fabricada pela Hoechst e cortada em blocos de 1,0 x 0,7 x 0,625mm, metalizados com 1 μ m de ouro de ambos os lados. A alumina é comprada em placas de 1" x 1" e cortada nas dimensões necessárias em uma serra de baixa rotação com disco diamantado de baixa concentração. Após o corte as aluminas foram limpas em tricloro, acetona e metanol à quente e em ultra-som e então, armazenadas em ambiente seco e com fluxo de nitrogênio.

5.2.2. Solda do Fio de ouro de 100 micra

O objetivo desta etapa é soldar o fio de ouro que fará o contato elétrico da parte superior da alumina com o sistema de Testes ou o pino do encapsulamento. O equipamento usado para este processo é uma soldadora de fio por termo compressão projetada pelo CPqD da Telebrás exclusivamente para este fim. O fio de ouro utilizado é de 100 μ m com pureza de 99,99% e alongação de 2%.

5.2.3. Confeccão do Dissipador de Calor

O material usado para confecção do bloco dissipador é cobre metalúrgico livre de oxigênio. A placa de cobre é comprada com 1mm de espessura e usinada para se obter blocos com dimensões de 5 x 1,5 x 0,6mm. Um dos lados do dissipador é polido com pasta de diamante. O polimento é iniciado com pasta de 9 μ m e vai até 1/4 μ m. Após a usinagem e o polimento é feita uma eletrodeposição de NiAu com espessuras de 2 e 0,15 micra respectivamente.

Após a eletrodeposição o dissipador é limpo em tricloro, acetona e metanol à quente e em ultra som e, então armazenado em ambiente seco e com fluxo de nitrogênio.

5.2.4. Preparação do Bloco de Silício

O silício usado neste trabalho é altamente dopado, o que faz com que se torne um bom condutor elétrico, metalizado na face superior com Ti/Pt/Au e Au na face inferior. Após a metalização a pastilha de silício é cortada em blocos de 1mm x 1mm com o auxílio de uma riscadora de cristais. Após o corte os blocos de silício devem ser limpos através do mesmo processo utilizado para a limpeza da alumina e do bloco dissipador.

5.2.5. Solda do Bloco de Silício

A solda do silício no bloco de cobre é realizada utilizando-se a soldadora Kulicke and Soffa modelo 463-3 com

preformas de AuSi e AuSn. As soldas foram realizadas com os ajustes da soldadora nas seguintes posições:

Temperatura da base:	{ AuSi - 425°C
Tensão da lâmpada :	{ AuSn - 320°C
Atraso :	110V
Tempo :	3 seg
Força :	12,5 seg
Corrente no pick-up:	104 gr
Fluxo de N ₂ :	200mA
	2 l/min

5.2.6. Evaporação de Índio ou Estanho

O índio ou estanho é depositado sobre o dissipador de calor através de evaporação térmica, onde um suporte é usado de modo a formar uma máscara que permite a deposição do material somente nas faixas onde serão soldados o laser e o bloco de alumina. A espessura da camada depositada é de aproximadamente 2µm. Após a retirada dos dissipadores de calor da evaporadora estes devem ser armazenados em ambiente seco e com fluxo de nitrogênio e utilizados no máximo 3 dias após a retirada da evaporadora, para evitar a formação de óxidos que dificultam tanto a soldagem do laser quanto dá alumina.

5.2.7. Solda do Laser e alumina

O processo para solda do laser no dissipador de calor é delicado e exige do operador alguma prática e habilidade para trabalhar com objetos de pequenas dimensões. Durante a montagem do laser, este será manuseado com o auxílio de um "chupador", que consiste de uma pequena mangueira de borracha com a ponta de um normógrafo na extremidade. Tanto o laser como a alumina devem ser posicionados faceando o bloco dissipador. O posicionamento do laser é muito crítico pois, estando a região ativa muito próxima

($\pm 3\mu\text{m}$) da face que será soldada no dissipador, qualquer erro no posicionamento do laser poderá provocar a subida de índio nos espelhos do laser ou dificultar o acoplamento da fibra-óptica quando da montagem do laser no encapsulamento.

O equipamento que foi montado para realizar a solda dos lasers e os procedimentos operacionais para sua operação estão descritos no anexo II.

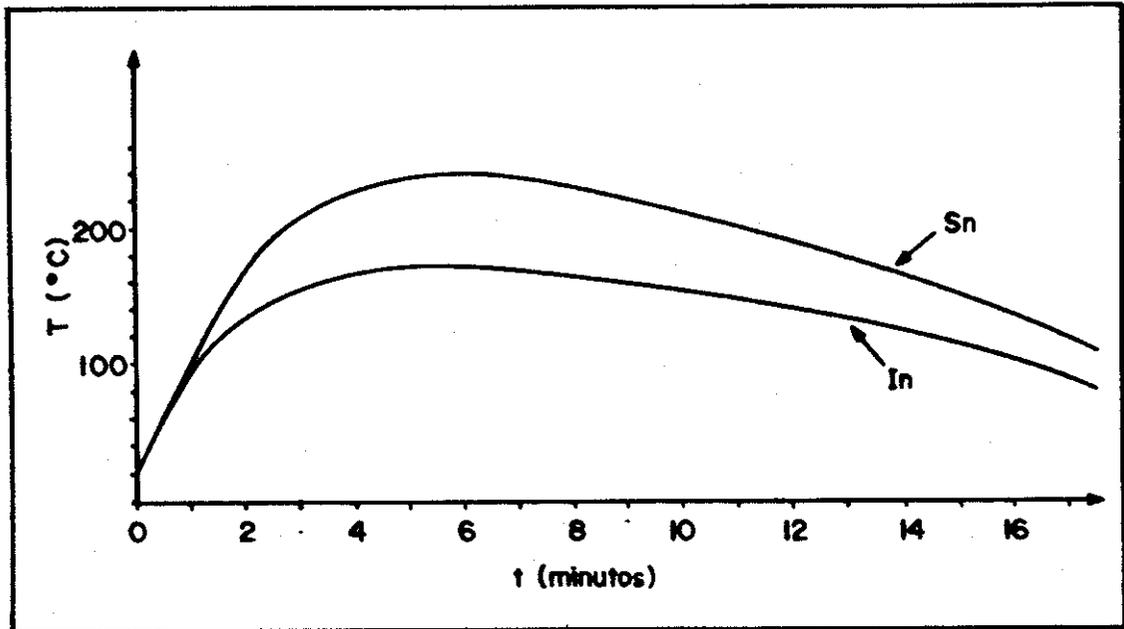


Figura 17

A fig. 17 mostra os ciclos de temperatura típicos para a solda dos lasers com índio e estanho.

A solda dos lasers é feita em atmosfera de mistura verde ($\text{H}_2 + \text{N}_2$) e resfriado com fluxo de nitrogênio.

5.2.8. Solda do Fio de Ouro de 25 micra

O objetivo da solda do fio de 25 μ m é fazer o contato entre o lado N do laser e a face superior da alumina. Esta solda é realizada pelo processo termosônico com capilar tipo wedge. O fio de ouro utilizado é de 25 μ m com pureza de 99,99% e alongação de 5 a 10%.

A solda do fio de ouro de 25 μ m no laser exige o aquecimento do capilar à 290°C e da base entre 135°C a 140°C. A potência do ultra-som deve ser a mínima possível, visto que, o seu uso em excesso pode introduzir defeitos no cristal que irão comprometer a confiabilidade do dispositivo. Também por motivo de confiabilidade são soldados dois fios interligando o laser e a alumina.

5.2.9. Testes

Após a montagem do laser no dissipador conforme descrito nos itens anteriores, este é submetido a testes eletroópticos para determinar a Resistência Térmica do dispositivo a partir dos modos longitudinais e da corrente de Threshold, conforme descrito no capítulo 4.

CAPÍTULO 6

Resultados e Conclusões:

6.1. Resultados Experimentais:

Os lasers usados neste trabalho foram crescidos e soldados nos laboratórios do CPqD da Telebrás, conforme descrito no capítulo 5. As medidas da Resistência Térmica pelo método da corrente limiar também foram realizadas nos laboratórios do CPqD da Telebrás e as medidas da Resistência Térmica pelo método de Paoli foram realizados nos laboratórios do LPD do Instituto de Física da UNICAMP. Estas medidas foram realizadas conforme está descrito no capítulo 4.

Os quadros a seguir, mostram as características e os Resultados da medida da Resistência Térmica de 8 lotes, num total de 54 lasers. Além dos resultados das medidas da Resistência Térmica de cada laser, é mostrado também o gráfico de barras destas medidas, a Resistência Térmica média e o desvio padrão de cada lote.

LOTE 1A

No. do Cristal: 1071E		Tipo de estrutura: "OXIDE STRIPE"			
Dissipador: Cu + Si		To: 208°K			
Solda: Índio		Largura do stripe: 18 micra			
No. Laser	RT °C/W	Metodo: corrente Limiar		RT °C/W	Método: Paoli
1	156	50 100		109	50 100
2	43			4 35	4
3	34			3 33	3
4	54			2 52	2
5	63			45	1
RT média= 70°C/W		$\sigma = 44.1$		RT média= 54.8 °C/W $\sigma = 27.96$	
Sem Laser 0	RT média=48,5°C/W		$\sigma = 10.96$		RT média= 41,2°C/W $\sigma = 7,69$

O lote 1A é composto por lasers com faixa de contato de 18 micra soldados com índio sobre blocos de silício conforme mostrado na figura 16.

O laser n.º 1 esta com o valor da Resistência Térmica muito acima da média do lote. Provavelmente isto se deve a algum problema durante o processo da solda. A última linha do quadro de resultados do lote 1A mostra a Resistência Térmica média e o desvio padrão do lote desconsiderando o laser n.º 1.

LOTE 1B

No. do Cristal: 1071E		Tipo de estrutura: "OXIDE STRIPE"					
Dissipador: Cu		To: 208°K					
Solda: Índio		Largura do stripe: 18 micra					
No. Laser	RT °C/W	Método: corrente Limiar		RT °C/W	Método: Paoli		
1	77	50	100	150	68	50	100
2	37				28		
3	45				39		
RT média= 53° C/W				RT média= 45° C/W			
Sem 0 Laser 1	RT média= 41° C/W			RT média= 33,5° C/W			

Os lasers do lote 1B foram soldados com índio, diretamente sobre o dissipador de cobre e no mesmo processamento de solda do lote 1A. O laser n.º 1 deste lote apresentou um valor de Resistência Térmica muito acima da média do lote e por esta razão na última linha do quadro de resultados deste lote é mostrado o valor da Resistência Térmica média do lote, desconsiderando o laser n.º 1. O desvio padrão deste lote não foi calculado pois o número de amostras é muito pequeno.

LOTE 2

No. do Cristal: 1071D		Tipo de estrutura: "OXIDE STRIPE"			
Dissipador: Cu + Si		To: 199°K			
Solda: Índio		Largura do stripe: variado (2,5 a 50)			
No. Laser	RT °C/W	Método: corrente Limiar		RT °C/W	Método: Paoli
1	51			40	
2	60			8	8
3	65			7	7
4	77			6	6
5	65			5	5
6	82			4	4
7	62			3	3
8	66			2	2
9	47			1	1
RT média= 63,9°C/W		$\sigma = 10,4$		RT média= 44,9°C/W	
				$\sigma = 2,8$	

O lote 2 é composto por lasers com faixa de contato de largura variada (2,5 a 50 micra), soldados com índio sobre blocos de silício conforme mostrado na figura 16.

LOTE 3

No. do Cristal: 1080E		Tipo de estrutura: "OXIDE STRIPE"			
Dissipador: Cu + Si		To: 174°K			
Solda: Índio		Largura do stripe: 18 micra			
No. Laser	RT °C/W	Método: corrente Limiar		RT °C/W	Método: Paoli
1	50	50 100		36	50 100
2	45			43	
3	45			36	
4	72			47	
5	46	4		42	
6	66	3		46	
7	50	2		40	
8	47	1		40	
RT média= 52,6° C/W		$\sigma = 9,7$		RT média= 41,2° C/W $\sigma = 3,8$	

O lote 3 é composto por lasers com faixa de contato com largura de 18 micra, soldados com índio sobre blocos de silício conforme mostrado na figura 16.

LOTE 4

No. do Cristal: 1071D		Tipo de estrutura: "oxide STRIPE"				
Dissipador: Cu + Si		To: 199°K				
Solda: Estanho		Largura do stripe: variado (2,5 a 50)				
No. Laser	RT °C/W	Método: corrente Limiar		RT °C/W	Método: Paoli	
1	59			41		
2	83			5		49
3	50			4		48
4	63			3		49
5	47			2		45
6	73			1		54
RT média= 62,5°C/W		$\sigma = 12,5$		RT média= 47,7°C/W		
				$\sigma = 4,0$		

O lote 4 é composto por lasers com largura da faixa de contato variado (2,5 a 50 micra) soldados com estanho sobre blocos de silício conforme mostrado na figura 16.

LOTE 5

No. do Cristal: 1080E		Tipo de estrutura: "oxide STRIPE"	
Dissipador: Cu		To: 174°K	
Solda: Indio		Largura do stripe: 18 micra	
No. Laser	RT °C/W	Método: corrente Limiar	RT °C/W
1	47		
2	49		9
3	40		8
4	56		7
5	62		6
6	27		5
7	50		4
8	43		3
9	43		2
10	60		1
RT média= 47,7° C/W		σ= 9,82	

O lote 5 é semelhante ao lote 3, só que os lasers foram soldados diretamente sobre o dissipador de cobre. Neste lote não foi feita a medida da Resistência Térmica pelo método de Paoli.

LOTE 6

No. do Cristal: 1039D		Tipo de estrutura: "V-GROOVE"			
Dissipador: Cu + Si		To: 130°K			
Solda: Estanho					
No. Laser	RT °C/W	Método: corrente Limiar		RT °C/W	Método: Paoli
1	51	50 100		63	50 100
2	45			5	5
3	35			4	4
4	42			3	3
5	39	2		2	2
6	55	1		1	1
RT média= 44,5° C/W		$\sigma = 6,8$		RT média= 54° C/W	
				$\sigma = 7,0$	

O lote 6 é composto por lasers com contato de faixa definido por difusão, soldados com estanho sobre blocos de silício conforme mostrado na figura 16.

LOTE 7

No. do Cristal: 1039D		Tipo de estrutura: "V-GROOVE"	
Dissipador: Cu		To: 130°K	
Solda: Índio			
No. Laser	RT °C/W	Método: corrente Limiar	RT °C/W
1	29		6
2	34		5
3	50		4
4	37		3
5	29		2
6	28		1
7	39		
RT média= 356,14° C/W		σ= 7,24	

O lote 7 é composto por lasers semelhantes aos do lote 6, soldados com índio diretamente sobre o dissipador de cobre. Neste lote não foi feita a medida da Resistência Térmica pelo método Paoli.

6.2. Conclusões:

Comparando os resultados das medidas dos lotes 1A, 1B, 2, 3 e 4 notamos que dos 31 lasers destes lotes, 30 apresentaram o valor da Resistência Térmica medida pelo método de Paoli menor que o valor da Resistência Térmica medida pelo método da corrente limiar. Considerando que o método de Paoli é mais preciso e independente de calibração, concluímos que o método da corrente limiar está superestimando o valor da Resistência Térmica dos lasers. Lynch, Yang e Hung (20) já haviam chegado a esta mesma conclusão e atribuíram esta discrepância a corrente de espalhamento adicional, resultante de gradientes térmicos gerados quando da operação do dispositivo em regime contínuo. Esta corrente seria gerada através do efeito termoelétrico provocado pelo gradiente lateral de temperatura na camada tipo p que fica entre a região ativa e contato metálico do dispositivo.

Analisando ainda os resultados dos 5 primeiros lotes, notamos que o desvio padrão das medidas realizadas pelo método da corrente limiar é sempre maior que o desvio padrão das medidas realizadas pelo método de Paoli. A explicação para esta diferença pode estar na utilização da média do valor de T_0 de 6 lasers para o cálculo da Resistência Térmica de todo o cristal quando da medida da Resistência Térmica pelo método da corrente limiar.

Comparando os resultados dos lotes 1A com 1B, 3 com 5 e 6 com 7, verificamos que a inclusão do bloco de silício entre o laser e o dissipador de cobre, introduziu um aumento na Resistência Térmica menor que os 20°C/W estimados por Duda. Achamos que esta diferença é consequência da maior planicidade e melhor qualidade da superfície do silício, o que faz com que a solda se aproxime mais das condições ideais, diminuindo assim a parte da Resistência Térmica relativa a camada de solda e com isto diminuindo a Resistência Térmica total da montagem.

Analizando agora a média dos valores da Resistência Térmica dos lotes 2 e 4, notamos que o uso de Estanho no lugar do Índio como material de solda, não introduziu alterações significativas no valor da Resistência Térmica do conjunto. Isto já era esperado pois a diferença entre o valor da condutividade térmica do Índio e do estanho é pequena e a espessura da camada de solda também é pequena ($\cong 2\mu\text{m}$). Este resultado mostra a viabilidade do uso de estanho como material para solda de lasers.

Os resultados das medidas da Resistência Térmica do lote 6, que é formado por lasers com estrutura tipo "V-groove", mostram que ao contrário dos lasers com estrutura tipo "oxide stripe" dos lotes 1A, 1B, 2, 3 e 4, o lote 6 apresentou o valor da Resistência Térmica medida pelo método da corrente limiar menor que o valor obtido pelo método de Paoli. Este fato pode estar relacionado com a diferença de estruturas ou algum erro na média do valor de T_0 quando da medida pelo método da corrente limiar. Por enquanto, nós não temos uma explicação satisfatória para esta diferença pois o número de lasers, com estrutura tipo "V-groove", que foram soldados é muito pequeno, o que dificulta qualquer tipo de conclusão.

Analizando agora os resultados deste trabalho como um todo, podemos concluir que:

- A inclusão de um bloco, que tenha um coeficiente de dilatação térmica próximo ao coeficiente de dilatação térmica do laser, entre o laser e o dissipador de cobre, não apresenta grandes problemas do ponto de vista da execução do processo e abre um campo para a utilização de soldas mais duras que o Índio, que podem não só possibilitar a operação do dispositivo encapsulado em temperaturas mais altas e com menor degradação da Resistência Térmica com o tempo, como também fazer montagens que facilitem o acoplamento da Fibra-óptica na frente do laser. Achamos que este é o caminho a ser seguido no desenvolvimento da montagem do laser.

- A utilização da medida da Resistência Térmica pelo método da corrente limiar é adequado somente quando não se necessita de muita precisão na medida. Quando o valor da Resistência Térmica for ser usado para ajuste de processos que introduzam pequenas variações no valor da Resistência Térmica ou calibração de medidas por outros métodos, deverá ser usado o método de Paoli.

Como sugestão para trabalhos futuros propomos a utilização de outros materiais tais como o óxido de berílio e o carbeto de silício entre o laser e o dissipador e também de ligas como por exemplo a de ouro/silício e ouro/estanho como material de solda.

Sugerimos também um estudo das tensões e da degradação da Resistência Térmica que estes materiais ocasionam, bem como a influência destas modificações do processo de solda na confiabilidade dos lasers.

ANEXO I

```

PROGRAM RESISTERMICA
IMPLICIT REAL*4 (J,K,L)
DIMENSION DELTAT(5)
COMMON /BL/ PH,A
OPEN (1,FILE='DADOS.DTA')
READ (1,'(3X,F5.1)') T0
READ (1,'(3X,F5.1)') J0
READ (1,'(2X,E8.2)') L
READ (1,'(2X,E8.2)') S
READ (1,'(5X,E8.2)') D1
READ (1,'(5X,E8.2)') D2
READ (1,'(5X,E8.2)') D3
READ (1,'(5X,E8.2)') D4
READ (1,'(5X,F4.2)') K4
READ (1,'(5X,F4.2)') K5
WRITE (*,'(3X,4H t0=,F5.1,2X,4H J0=,F5.1,2X,3H L=,
E8.2,2X,3H S=,E8.2)') T0,J0,L,S
WRITE (*,'(3X,4H D1=,E8.2,2X,4H D2=,E8.2,2X,4H D3,
E8.2,2X,4H D4=,E8.2,2X,4H K4=,F4.2,2X,4H K5=,F4.2)')
D1,D2,D3,D4,K4,K5
WRITE (*,'(32H DIGITE OS SEGUINTES PARAMETROS:)' )
WRITE (*,'(10X,5H Jth=\)')
READ (*,'(E9.3)') JTH
WRITE (*,'(15X,E9.3)')JTH
WRITE (*,'(10X,4H Rs=\)')
READ (*,'(E9.3)') RS
WRITE (*,'(14X,E9.3)')RS
WRITE (*,'(10X,6H ALFA=\)')
READ (*,'(E9.3)') ALFA
WRITE (*,'(16X,E9.3)') ALFA
PI=3.1416
A=L*S
TJ=T0*A*LOG(JTH/J0)
V0=1.49-(0.00058*TJ*TJ)/(TJ+300)

```

```

PH=A*JTH*(V0+A*JTH*RS)
K1=K(TJ)
CALL TEMP (D1,K1,DELTAT(1))
T1=TJ-DELTAT(1)
K2=K(T1)/ALFA
CALL TEMP (D2,K2,DELTAT(2))
T2=T1-DELTAT(2)
K3=K(T2)
CALL TEMP (D3,K3,DELTAT(3))
CALL TEMP (D4,K4,DELTAT(4))
DELTAT(5)=(PH*ALOG(4*L/S))/(K5*PI*L)
DTTOT=0
WRITE (*,'(41H VARIACOES DE TEMPERATURA EM CADA CAMADA:))')
DO 10 I=1,5
DTTOT=DTTOT+DELTAT(I)
WRITE (*,'(10X,8H DELTA T,I1,2H =,E10.3)') I, DELTAT(I)
RT=DTTOT/PH
WRITE (*,'(31H VARIACAO TOTAL DE TEMPERATURA:,2X,E10.3)') DTTOT
WRITE (*,'(25H POTENCIA ELETRICA TOTAL:,2X,E10.3)') PH
WRITE (*,'(21H RESITENCIA TERMICA:,2X,E8.2)') RT
CLOSE (1,STATUS='KEEP')
STOP
END

```

```

SUBROUTINE TEMP (D,AK,DELTAT)
COMMON /BL/ PH,A
DELTAT=(PH*D)/(A*AK)
RETURN
END

```

```

FUNCTION K(T)
IMPLICIT REAL*4 (K)
K=0.91*EXP(-T/367)
RETURN
END

```

ANEXO II

Rev. Brasil. Apl. Vac., Vol.3, N^{OS} 1 e 2, 1983.

SISTEMA PARA SOLDA DE LASERS DE SEMICONDUTOR

Francisco Mecchi Neto
Insituto de Física "Gleb Wataghin"
Departamento de Física Aplicada
UNICAMP - Caixa Postal 6165
13.100 - Campinas - SP

Douglas John Bull
CPqD - TELEBRAS
13.100 - Campinas - SP

No atual desenvolvimento da fabricação de lasers de semicondutor no Brasil, faz-se necessário que este seja convenientemente soldado em um bloco de material adequado e com dimensões bastante superiores às do laser.

O sistema que será apresentado neste trabalho permite que se faça variações dos parâmetros que influenciam na solda do dispositivo, permitindo, assim, a determinação de um ponto ótimo de solda.

Laser, sistema, solda.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Diodos Lasers de Semicondutor são basicamente junções P-N em semicondutor apropriado. Quando a junção P-N é polarizada diretamente, circula corrente pelo dispositivo e uma parte da energia fornecida, é emitida por ele em forma de luz⁽¹⁾. A figura 1 mostra esquematicamente um diodo eletroluminescente.

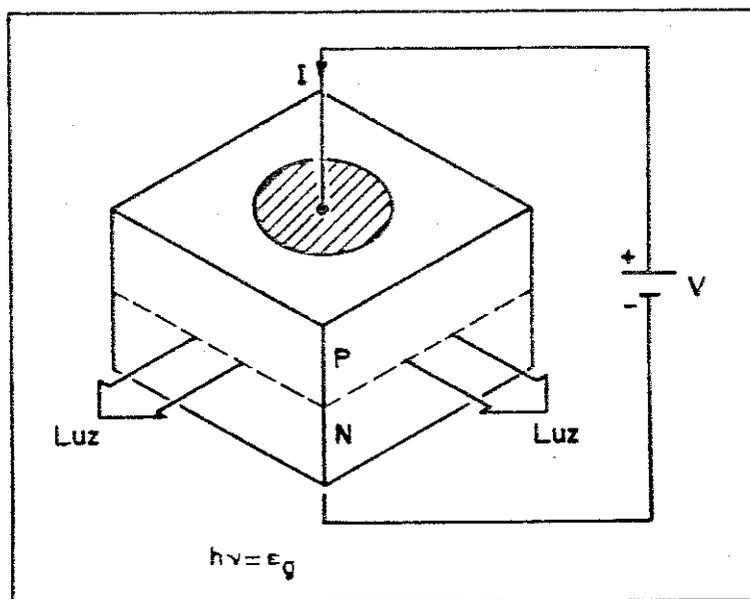


Figura 1

A junção P-N, no caso do laser de homoestrutura obtida por difusão, ou no caso do laser dupla-heteroestrutura obtida por crescimento epitaxial a partir da fase líquida, mais conhecida como LPE, deve ser o mais próximo possível da superfície a ser soldada, visto que o cristal não é um bom condutor de calor. Assim, para lasers que queremos operar continuamente, a região ativa deve estar apenas de 2 a 3 μ m acima da superfície externa, a qual, após os respectivos contatos ôhmicos, será soldada sobre um bloco de maior massa e bom condutor de calor.

Quando tentamos operar um laser semiconductor de GaAs em regime contínuo, geramos na região ativa uma grande quantidade de calor. O aumento de temperatura da região ativa por ampere injetado é da ordem de $20-30^{\circ}\text{C}^{(2)}$. Como a corrente limiar depende fortemente da temperatura, não conseguiremos operar continuamente o laser se não fizermos esse calor gerado escoar rapidamente da região ativa do dispositivo. Esta é a causa que torna necessária e imprescindível a soldagem do laser.

Devido às dimensões do laser e aos materiais envolvidos, a soldagem de um laser de semiconductor em seu suporte, o escoador de calor, torna-se uma etapa do processo de fabricação do laser que exige uma tecnologia própria. O objetivo de se montar o sistema para solda é conseguir o controle de alguns parâmetros que influenciam na qualidade desta solda, permitindo, assim, que se faça um estudo da influência destes parâmetros na qualidade final do dispositivo. Os principais parâmetros que devem ser estudados são: atmosfera, temperatura, tempo de aquecimento, tempo de resfriamento, pressão sobre o laser, espessura e granulação da camada depositada, materiais, etc.. O sistema aqui apresentado irá controlar os quatro primeiros parâmetros, sendo os restantes controlados por operações externas ao sistema.

2. SISTEMA

A partir da necessidade de se controlar a atmosfera, temperatura, tempo de aquecimento e tempo de resfriamento, foi projetado e montado o sistema mostrado na figura 2.

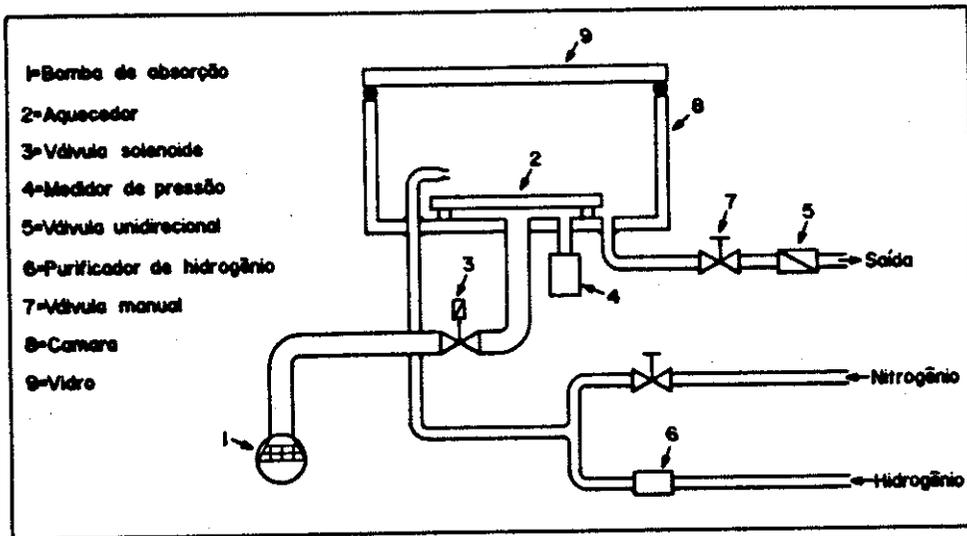


Figura 2

A bomba de vácuo (1) usada é uma bomba de absorção dupla, que usa carvão vegetal como material absorvente. Os vasos são de latão e o pescoço e a flange de entrada são de aço inox. As soldas necessárias para a montagem da bomba são de prata. Convém ressaltar aqui que esta bomba, apesar de ser de fabricação caseira, tem apresentado ótimos resultados para esta aplicação, pois, além de atingir pressões menores que 10^{-5} torr rapidamente, não contamina a câmara onde está sendo feita a solda com moléculas de óleo. Interligando a bomba de absorção (1) com a câmara (8),

existe uma tubulação de aço inox onde está inserida uma válvula solenóide (3) que permite conectar ou não a bomba de vácuo (1) à câmara (8).

O aquecimento do bloco onde está sendo feita a solda é conseguido através de uma resistência elétrica (2) que é usada em ferros de solda de 400W, do tipo machadinho. O controle da temperatura é feito por um controlador do tipo PID que usa termopar (K) como sensor. A temperatura é monitorada por um termômetro digital que também usa termopar (K) como sensor.

A atmosfera pode ser de nitrogênio, mistura verde ou hidrogênio. Os dois primeiros são injetados diretamente na câmara através de uma válvula de agulha e uma tubulação de 1/4" de aço inox. O hidrogênio, antes de entrar na câmara, passa por um purificador de hidrogênio (6), da Matheson, que é um equipamento constituído basicamente por uma célula de paládio que fornece na sua saída hidrogênio com alto grau de pureza, isto é, uma concentração de oxigênio menor que 0,5ppm (partes por milhão). Não foi colocada uma válvula na linha do hidrogênio, pois está já existe no próprio purificador. A saída dos gases da câmara é feita através de uma tubulação de aço inox, na qual estão inseridas uma válvula de agulha (7) e uma válvula unidirecional (5), que evita a entrada de gases para dentro da câmara. Alguns cuidados devem ser tomados quando se trabalha com hidrogênio, pois este é altamente explosivo quando em contato com determinada concentração de oxigênio. Um dos cuidados que se deve tomar é fazer uma tubulação desde a saída da válvula unidirecional (5) até o interior de uma capela, onde o hidrogênio é queimado.

A câmara (8) é feita em aço inox e o vidro que fica na sua parte superior é do tipo pirex, com 10mm de espessura, para evitar que se quebre com as diferenças de pressão ou os choques térmicos a que fica sujeito.

O problema das conexões elétricas entre o interior e o exterior da câmara foram resolvidos com a confecção de passadores

de corrente em aço inox, vedadas com o'ring de viton e centrados por uma bucha de nylon.

3. PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS

O bloco onde será soldado o laser é, atualmente, de cobre, o qual foi escolhido devido a sua alta condutividade térmica e elétrica. Após ter sido cortado nas dimensões apropriadas e ter a face, onde será soldado o laser, polida, o bloco é submetido a uma eletrodeposição de níquel/ouro para evitar oxidações e, posteriormente, é feita uma evaporação de índio com espessura adequada. Depois de pronto o bloco de cobre, o laser é colocado sobre a superfície onde foi evaporado índio e fixado por uma pequena pressão exercida por uma lâmina de aço. Todo o trabalho de montagem do laser sobre o bloco e acompanhamento da solda é feito com a ajuda de um microscópio. O suporte onde estão fixadas as lâminas, e sobre o qual são colocados os blocos para serem montados os lasers, também é feito de cobre e tem capacidade para soldar 10 lasers de cada vez.

Após a montagem dos lasers, o suporte dos blocos é colocado sobre o aquecedor (2) e a câmara é evacuada pela bomba de absorção até uma pressão de aproximadamente 10^{-3} torr. Terminada a evacuação, a válvula solenóide (3) é fechada e abre-se a válvula agulha do nitrogênio - mistura verde ou a válvula agulha do purificador de hidrogênio, e a câmara ficará então submetida a uma pressão de 1/3 Psi (determinada pela válvula unidirecional) do gás escolhido (H_2 , N_2 ou mistura verde). Convém lembrar que, após ser fechada a válvula solenóide (3), deverá ser aberta a válvula agulha que fica na saída dos gases. Todo este processo de evacuação e entrada de gases é repetido por duas vezes para se ter o mínimo de oxigênio possível dentro da câmara.

A temperatura é então escolhida no dial do controlador e o conjunto é aquecido até a temperatura desejada e mantido nessa temperatura pelo tempo que se queira. O tempo de resfriamento é

hoje determinado principalmente pela inércia térmica do sistema e pelo fluxo de gás. Caso o tempo de resfriamento venha a se apresentar como um parâmetro muito importante na solda dos lasers, poderá ser incluído um programador de temperatura junto com o controlador, para que se tenha um perfeito controle deste parâmetro.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O sistema está em operação a aproximadamente quatro meses e tem possibilitado o estudo da solda de lasers de semicondutor com bastante êxito. A temperatura, que está na faixa dos 180°C , já foi determinada. O sistema apresentou uma pequena diferença entre a temperatura do termômetro e a que estava realmente o laser. Este erro é corrigido através de uma curva de erro, mostrada na figura 3.

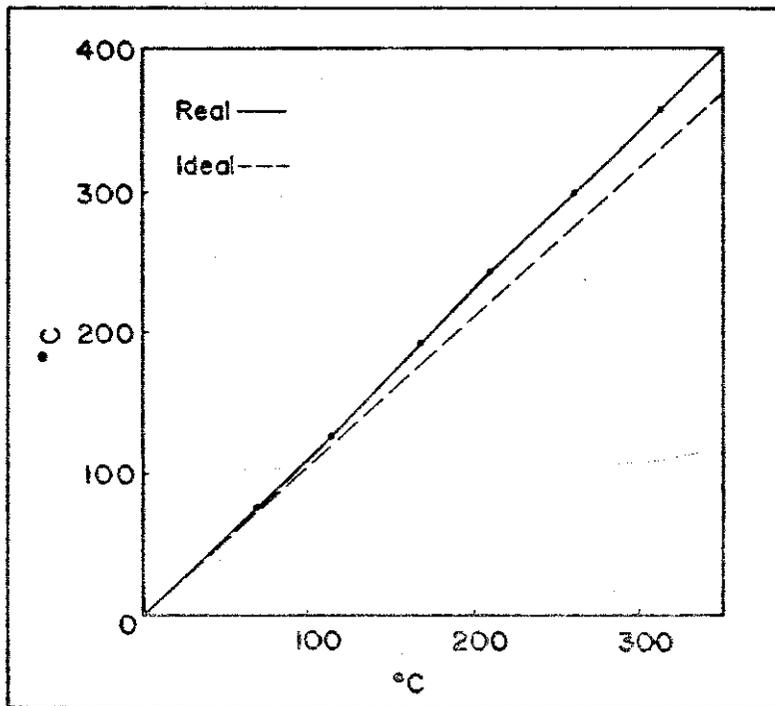


Figura 3

Esta curva foi levantada com a temperatura marcada no termômetro e a medida, através de um termopar que foi colocado no lugar do laser. Este erro na medida de temperatura se deve ao fato de existir um gradiente de temperatura entre o interior do aquecedor, que é onde o termopar do termômetro está colocado, e a superfície do bloco de cobre onde o laser está montado.

Com os estudos realizados com o auxílio deste sistema, pretende-se projetar uma máquina que forneça as condições ideais para a solda de lasers de semicondutor, a qual será usada na futura linha de fabricação de lasers para sistemas de comunicações ópticas.

Uma curva típica da intensidade de luz x intensidade de corrente de um laser de semicondutor soldado no sistema descrito neste trabalho pode ser vista na figura 4.

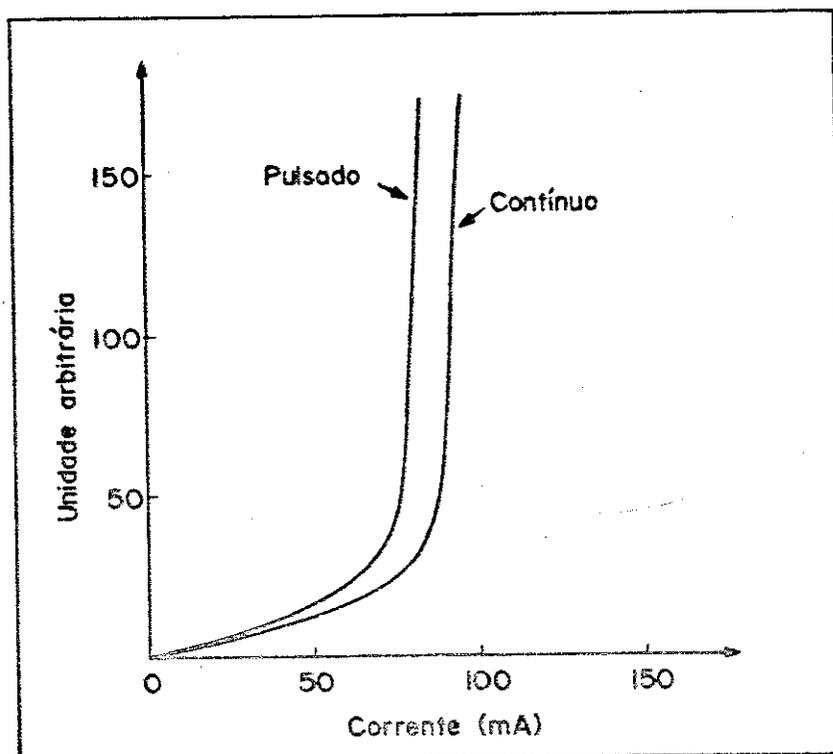


Figura 4

5. REFERÊNCIAS

- (1) J.E. Ripper, C.A. Ribeiro, "Comunicações Ópticas", LED, UNICAMP (1981)
- (2) F.C. Prince, "Influência de tensões na região ativa de lasers semicondutores de GaAs e dupla-heteroestrutura", Tese de Mestrado, UNICAMP.

REFERÊNCIAS

- (1) A.I. Gubanov, Zh Tekh. F12.21, 304 (1951).
- (2) A.I. Gubanov, Zh E KSP. Teor F12, 21, 721 (1951).
- (3) P. Argram, Proc. Conf. Quantum, prog 1762 (1963).
- (4) R.N. Hall, G.E. Fenner, J.D. Kingsley, T.J. Soltys, R.O. Carlson, Prys. Rev. Lett 9,366 (1963).
- (5) M.I. Nathan, W.P. Dumke, G. Burns, F.H. Dill Jr., G.J. Lasher, Appl. Phys. Lett. 1,62 (1962).
- (6) T.M. Quist, R.H. Redeker, R.J. Keyis, W.E. Kraig, B. Lax, A.L. Mc Wharter and H.J. Zeigler, Appl. Phys. Lett. 1, 91 (1962).
- (7) Zh. I. Alferov, V.M. Andreev, D.Z. Garbusov, Yu. V. Zhilyaev, E.P. Marozov, E.L. Portoni, V.G. Trofim, Sov. Phys. Semicond. 4, 1573 (1971).
- (8) I. Hayashi, M.B. Panish, P.W. foy and S. Sumsky, Appl. Phys. Letters 17, 109 (1970).
- (9) R.L. Hartman, J.C. Dymont, C.J. Hwang, M. Kuhn Appl. Phys. Letters, 23, 181 (1973).
- (10) A.P. Bogatov, L.M. Dolginov, P.G.E. Lissev, B.N. Sverdlov e E.M. Sheschenko, Sov. J. Quantum Eletron 4, 1281 (1975).
- (11) P. Garel Jones and John C. Dymont, IEEE Journal of Quantum Eletron, QE-11, n.^o 7 (1975).
- (12) W.B. Joyce and R. Dixon, J. Appl. Phys., 46, 855 (1975).
- (13) T. Kobayashi and G. Iwane, Jap. Appl. Phys., 16, 1403 (1977).

- (14) D.H. Newman, D.J. Bond and J. Stefani, Solid State Elect. Devices, 2, 41 (1978).
- (15) E. Duda, J. Carballes and J. Apruzzese, IEE J. Quantum Electron, QE-15, 812 (1979).
- (16) J.S. Manning, J. Appl. Phys., 52, 3179 (1981).
- (17) K.J. Bathe, Report 82448-5, Mechanical Engineering Department, MIT (1977).
- (18) Leighton E. Sisson e Donald R. Pitts, Fenômenos de Transporte, Editora Guanabara DOIS S.A., 96 (1979).
- (19) T.L. Paoli, IEEE J. Quantum Electron, QE-13, 662 (1977).
- (20) R.T. Lynch, L. Yang and R.Y. Hung, Eletr. Letters, vol. 14, n.º 24, 769 (1978).