

# Desenvolvimento de Lasers de Semicondutor para bombeio de Amplificadores de Guia de Ondas Dopado a Érbio (EDWA)

Aluno: Carlos Augusto B. de Gois

LPD (Lab. de Pesquisa em Dispositivos)

Financiamento: CNPq

Orientador: Newton C. Frateschi

Instituto de Física Gleb Wataghin, Unicamp

Palavras-Chave: Laser-Semicondutor-Fotônica

## Resumo

Este projeto teve como finalidade estudar, micro fabricar e caracterizar lasers de semicondutor, além de investigar uma potencial viabilidade de utilizar a técnica não convencional de polimento dos espelhos utilizando corrosão seca por plasma RIE, uma das alternativas para a fabricação de uma estrutura monolítica de Amplificadores de Guia de Ondas Dopado a Érbio (EDWA).

Apresentamos aqui os principais resultados, com ênfase nos parâmetros obtidos experimentalmente, e a avaliação da corrosão por plasma.

## Introdução

O laser (acrônimo para Amplificador de Luz por Emissão Estimulada de Radiação) é um dispositivo que gera radiação eletromagnética coerente, tanto espacial quanto temporalmente, e isto significa que as ondas estão sempre em fase, implicando que a luz gerada é, idealmente, monocromática.

Os lasers a semicondutor diferem dos outros tipos (como os lasers de gás ou de fibra, por exemplo) por serem de dimensões bastante diminutas, terem alta eficiência, e controle da saída de luz por meio da modulação da corrente injetada. Uma das aplicações se dá no campo das telecomunicações, como laser de bombeio dos EDFAs (do inglês Amplificador de Fibra Dopado a Érbio), que são um dos meios de amplificar o sinal óptico que é atenuado nas transmissões de longa distância.

Uma segunda alternativa, são os EDWAs (do inglês, Amplificador de Guia de Onda Dopado a Érbio), que são mais baratos, eficientes, e, por serem uma estrutura monolítica, eliminam problemas de acoplamentos entre chips. Dentre os componentes para este dispositivo, estão os lasers de bombeio, que precisam ser fabricados por técnicas não convencionais, como a que analisamos neste trabalho.

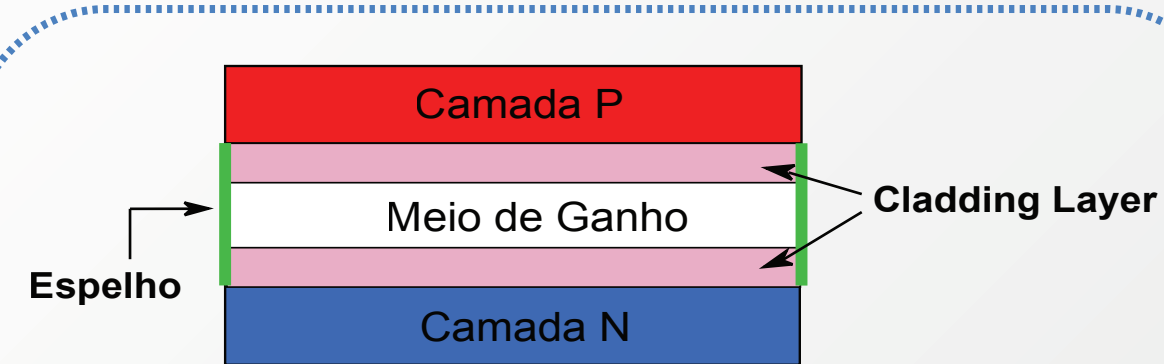
## Teoria

### Dispositivo

A estrutura de um laser é essencialmente composta por um meio de ganho e uma cavidade ressonante.

O primeiro tem a função de gerar emissão espontânea e amplificá-la por meio da emissão estimulada, e o segundo confina parte da luz, possibilitando a emissão estimulada.

Para criar fótons são necessários pares elétron-buraco. Nos lasers de diodo é possível criá-los pela presença da dupla heteroestrutura: uma descontinuidade nas bordas das bandas de energia, que confina elétrons no meio ativo.



Os espelhos, em conjunto com as cladding layers e o meio de ganho, formam a cavidade ressonante.

A camada P, a camada N, e o meio intrínseco entre elas, formam a dupla heteroestrutura.

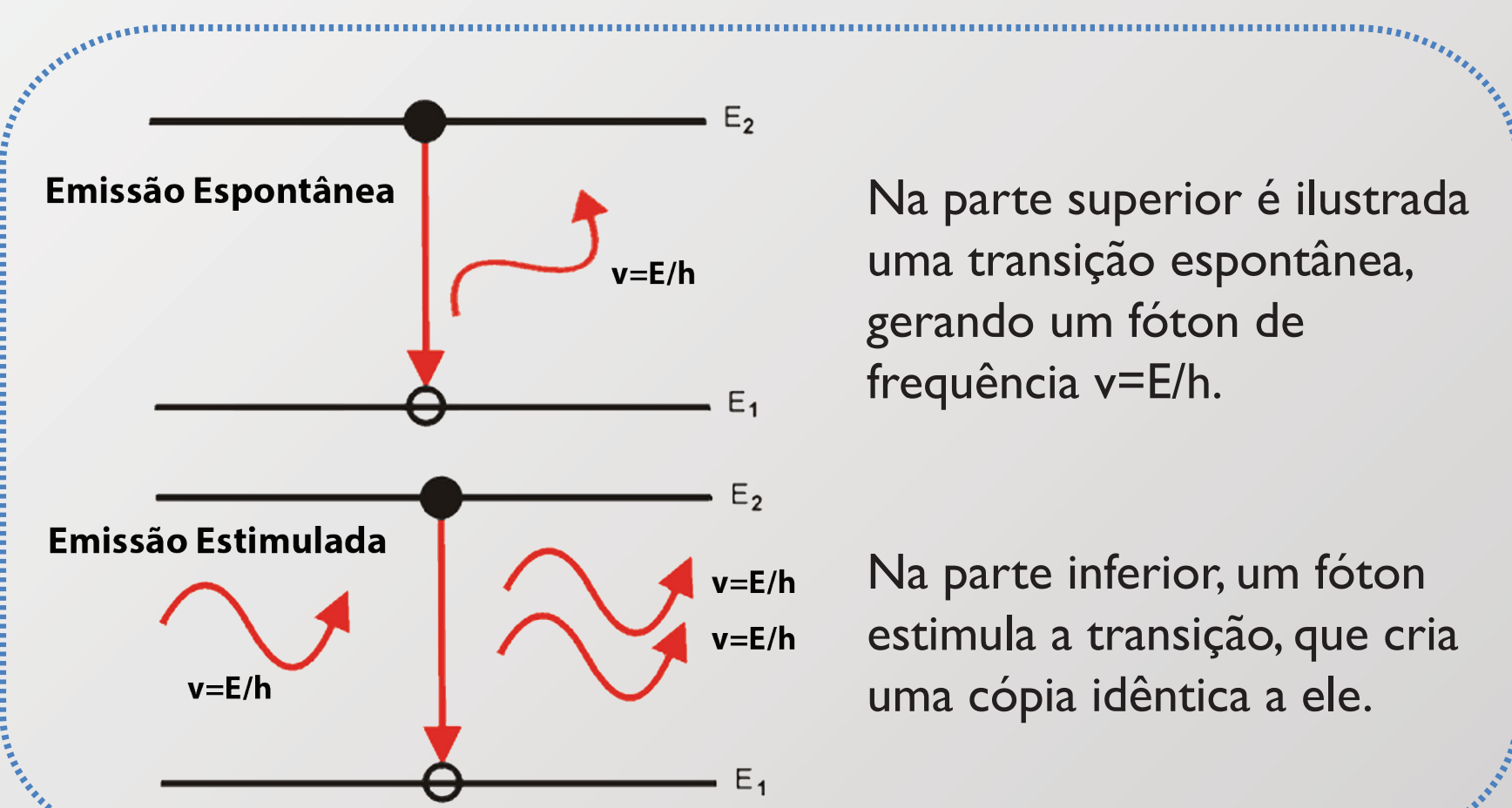
O meio de ganho é construído de forma a gerar fótons com uma frequência específica.

### Interação Entre Onda e Matéria

A transição de um elétron da banda de condução para a banda de valência pode ser um processo radiativo ou não radiativo.

Os últimos são indesejados, sendo os mais expressivos a corrente de fuga, a fuga de portadores, e a recombinação de Auger.

Nos processos radiativos, temos a emissão espontânea, que gera um fóton de frequência proporcional a diferença entre os níveis de energia, e também a emissão estimulada, que induz o novo fóton a ser emitido com as mesmas características.



Na parte superior é ilustrada uma transição espontânea, gerando um fóton de frequência  $v=E/h$ .

Na parte inferior, um fóton estimula a transição, que cria uma cópia idêntica a ele.

### Características Fenomenológicas

Usualmente um laser é descrito pelas equações de taxa, que relacionam a variação temporal do número de elétrons e fótons com os mecanismos de geração e de perda. Qualquer dessas equações pode ser relacionada a forma geral

$$\frac{dN}{dt} = G_{ger} - R_{rec}$$

onde o primeiro termo da direita representa a geração, e o segundo as perdas, sejam elas de elétrons ou fótons.

Começando pelos portadores de carga, sejam N a densidade de portadores e  $\tau$  o tempo de vida característico, isto é, o tempo médio para a ocorrência de um decaimento espontâneo, então definimos

$$R_{esp} + R_{nr} + R_{fuga} \equiv N/\tau$$

onde o primeiro termo da esquerda é a taxa de geração espontânea, o segundo é a taxa de recombinações não radiativas, e o terceiro a taxa de perda de portadores por correntes de fuga. Assim, esta equação representa todos os mecanismos de perda de portadores, com exceção da recombinação estimulada, que deixaremos explícita.

Por fim, considerando que a geração ocorre somente pela injeção

de elétrons por meio de uma fonte de corrente, chegamos a equação de taxa para os elétrons,

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV} - \frac{N}{\tau} - R_{est}$$

onde o primeiro termo da direita representa a densidade de portadores injetados por unidade de tempo.

Por um processo análogo, podemos formular a equação de taxa para os fótons dentro da cavidade

$$\frac{dN_f}{dt} = \Gamma R_{est} + \Gamma \beta_{esp} R_{esp} - \frac{N_f}{\tau_f}$$

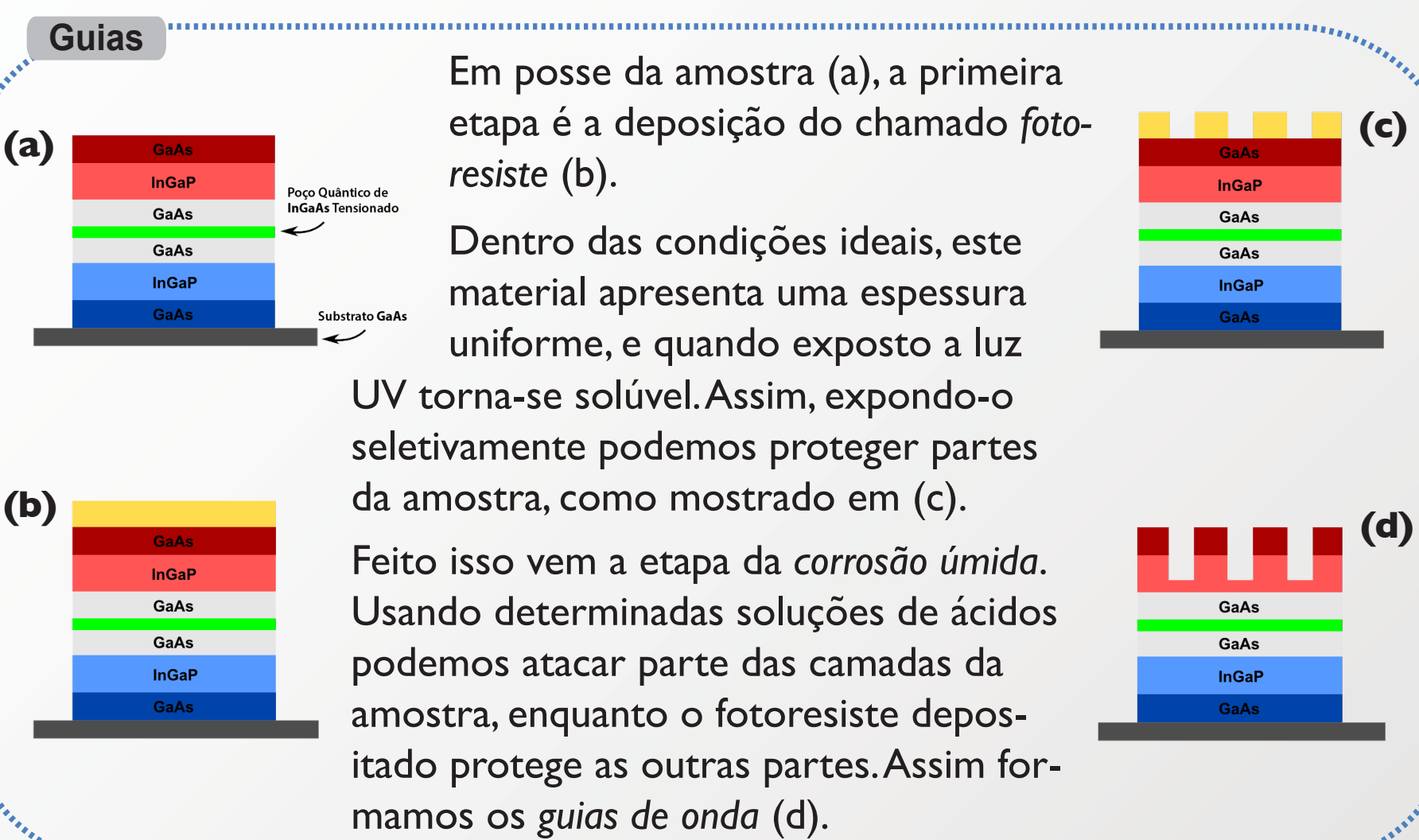
onde  $\Gamma$  é o fator de confinamento, que representa a sobreposição do volume de confinamento óptico ao volume do meio ativo,  $\beta$  é a fração dos fótons gerados que pertencem ao modo óptico desejado, e os outros termos são análogos a equação para os elétrons.

Vale notar que desconsideramos as correlações entre as duas equações, e que portanto estas são formas bastante simplificadas para as equações de taxa, porém suficientes para modelar os lasers estudados neste projeto.

## Fabricação

### Convencional

Após o processo de design da estrutura do material e do crescimento da amostra, a fabricação do dispositivo passa pelas etapas de formação dos guias de onda, isolamento elétrico entre os vários lasers, que são fabricados lado a lado, deposição do metal de contato, e finalmente a clivagem dos espelhos.



### RIE

Com os guias de onda já formados, precisamos isolar eletricamente os lasers vizinhos. Para isso, depositamos nitreto de silício sobre toda a amostra (e).

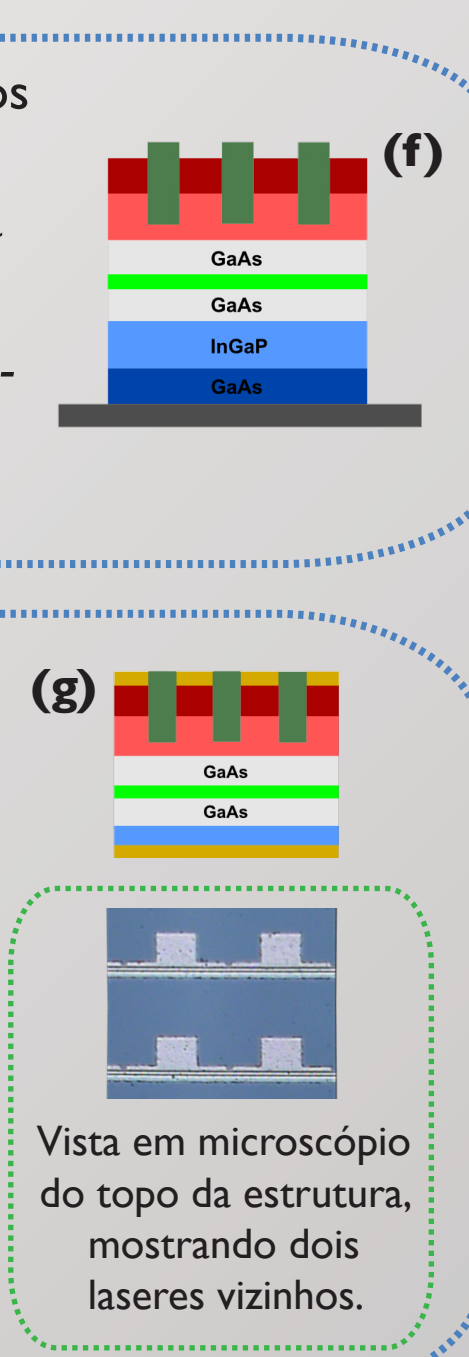
Novamente usando fotoreziste, retiramos o isolante das áreas no topo dos guias de onda (f), por um processo de corrosão por plasma.

### Clivagem

Com uma nova fotografação protegemos as áreas onde o isolante foi depositado, e então depositamos a liga metálica que servirá de contato elétrico.

Submergindo a amostra em acetona, todo o resisto é solubilizado, e com isso o metal é retirado dos espaços entre os lasers, resultando na estrutura em (g).

Após isto vem o desbaste da parte inferior da amostra, e é feito o segundo contato. Com a fina espessura é possível clivar a amostra seguindo os planos cristalinos e com isso criar os espelhos, formando assim a cavidade ressonante.



### RIE

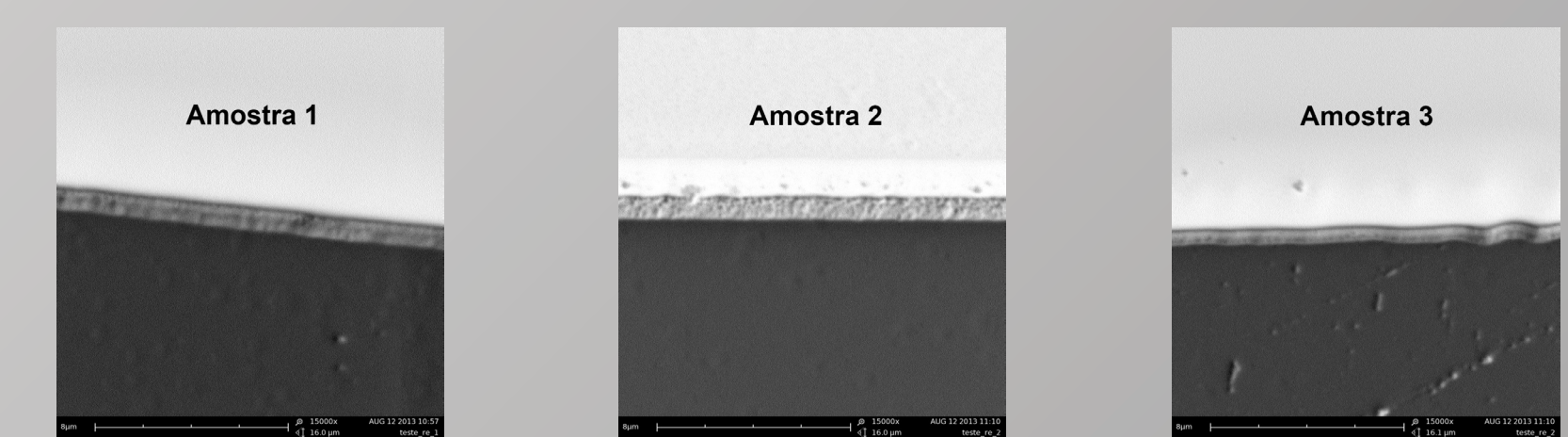
Com o método de clivagem apresentado anteriormente, é necessário que isolemos o dispositivo do substrato. Este fato impossibilita a integração fotônica, e consequentemente o desenvolvimento do EDWA.

Como veremos na seção de caracterização, a refletividade dos espelhos clivados é de aproximadamente 30%. Para tanto, é preciso que as faces refletoras tenham um perfil vertical e sejam pouco rugosas.

Neste trabalho propusemo-nos a buscar uma alternativa de polimento dos espelhos que permita a integração com outros dispositivos. Escolhemos tentar a corrosão por plasma RIE, que atua tanto por ataque químico, seletivo, quanto por ataque físico (sputtering), que é não seletivo e isotrópico.

Sabendo que a corrosão de GaAs e InGaP é predominantemente por sputtering, procuramos otimizar os parâmetros da corrosão para diminuir a pressão na câmara e aumentar a potência que acelerava os íons.

Analisando as amostras com um microscópio eletrônico, concluímos que o perfil da figura (c) tem as características desejadas, sendo então interessante para o grupo que continuemos o projeto utilizando este novo método de fabricação.

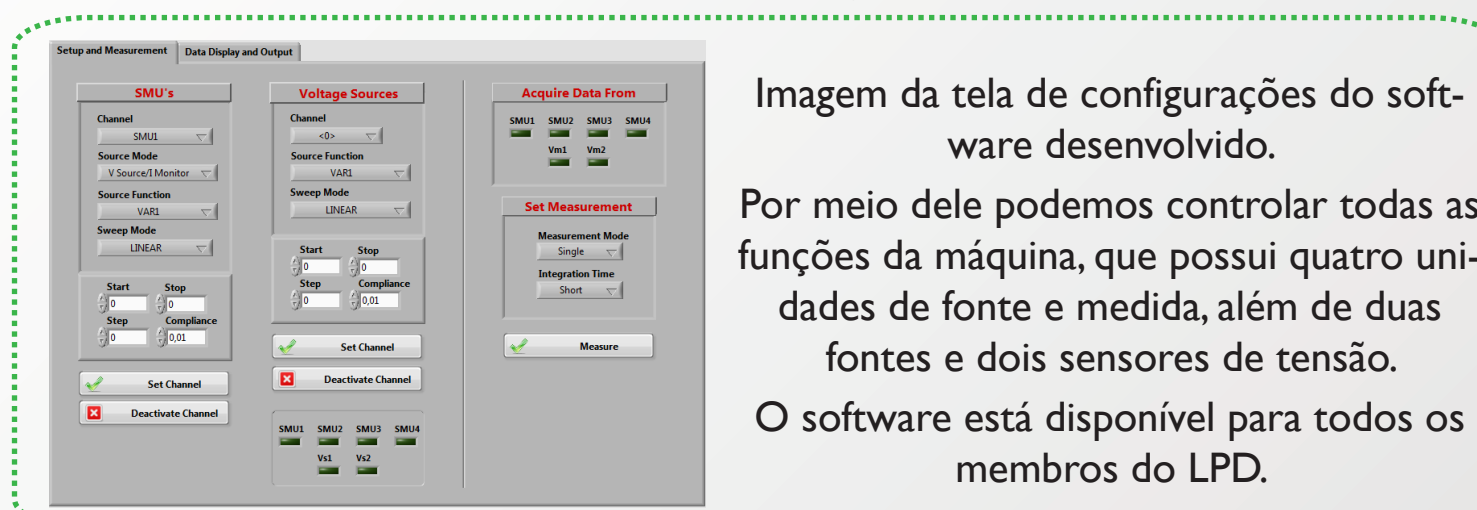


## Caracterização

### Instrumentação

Foi realizado um treinamento de operação de diversos equipamentos do laboratório, como unidades de fonte e sensoriamento de tensão e corrente, analisadores de espectro óptico, lasers sintonizáveis e fotodetectores, e também a implementação de um sistema para controle remoto de uma analisadora de parâmetros de semicondutores (HP4145B).

O sistema desenvolvido torna mais fácil o controle da máquina, além de automatizar as tarefas de adquirir dados, construir gráficos, e exportar em formatos prontos a serem utilizados em manipulações com softwares como o Excel, Origin, SciDAVis, e similares.

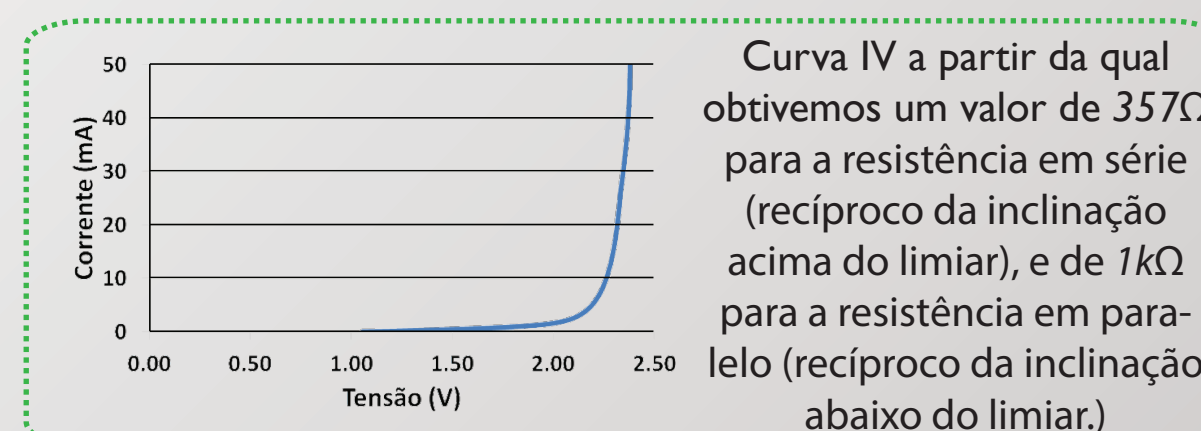


### Medidas Básicas

#### IV

Sendo o dispositivo fabricado um laser de diodo, esperamos que seu comportamento elétrico seja o de circuito aberto para baixas tensões, e curto-circuito para tensões acima de uma determinada tensão de limiar.

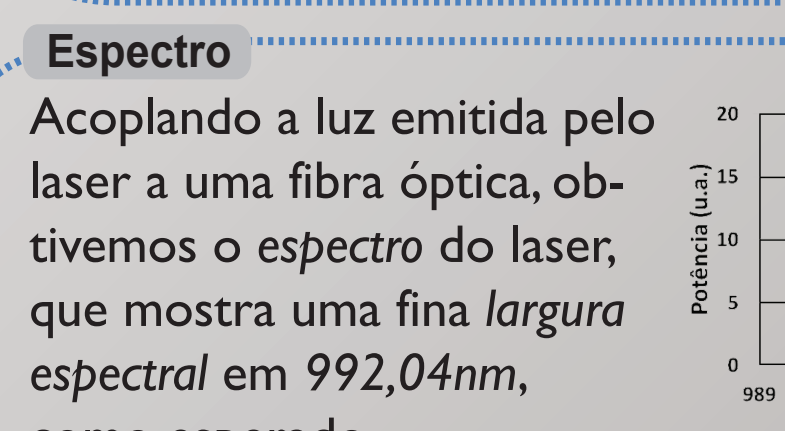
Fazendo uma varredura de tensões e medindo a corrente, obtemos a curva IV, a partir da qual podemos determinar a resistência em série, que indica a resistência do diodo medido, e a resistência em paralelo, pela qual podemos determinar se há correntes de fuga.



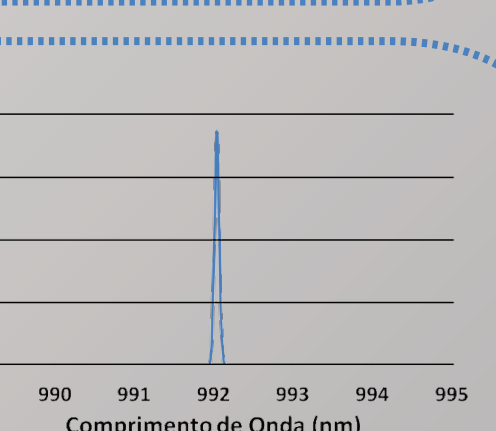
#### LI

Fazendo uma varredura da corrente aplicada e medindo a potência óptica de saída, podemos traçar a curva LI.

Nela há uma abrupta mudança na inclinação da curva, a partir da qual a emissão estimulada predomina. Do prolongamento da reta, obtemos corrente de limiar.



Espectro  
Acoplando a luz emitida pelo laser a uma fibra óptica, obtivemos o espectro do laser, que mostra uma fina largura espectral em 992,04nm, como esperado.

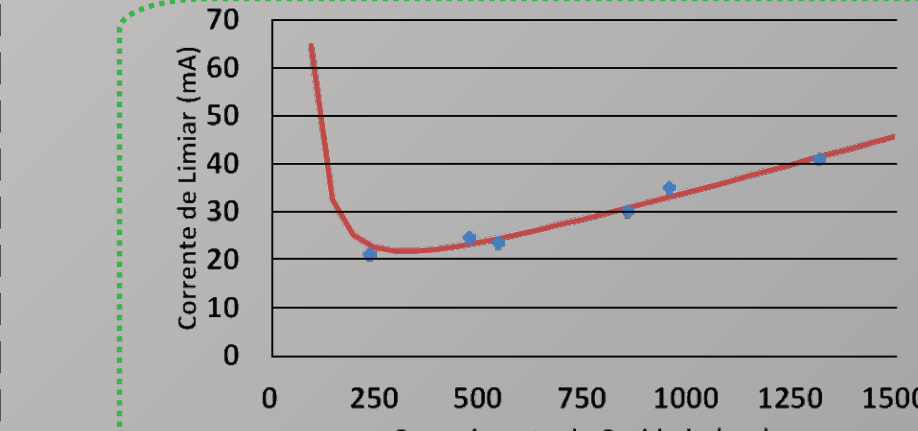


### Refletividade

Determinando as correntes de limiar para diversos lasers de diferentes comprimentos da cavidade ressonante (L), e utilizando a relação

$$\ln(I_{th}) = \ln(qALBN_0^2) + \frac{2}{g_0} [\alpha_i + \frac{1}{L} \ln(1/R)]$$

onde A é a área da região ativa, B o coeficiente de recombinação molecular,  $N_0$  a densidade de portadores,  $g_0$  o ganho material,  $\alpha_i$  a perda intrínseca, e R a refletividade dos espelhos, podemos ajustar uma curva aos pontos experimentais. Assim obtivemos os parâmetros do material, necessários para determinar o valor da refletividade dos espelhos polidos por RIE, que será decisivo para avaliarmos se esta é uma alternativa viável para o EDWA.



## Conclusão

No decorrer do projeto completamos as tarefas de estudo, microfabricação e caracterização de lasers de semicondutor pelo processo convencional de clivagem dos espelhos, e também investigamos a viabilidade de utilizar a corrosão seca por plasma RIE para esta finalidade.

Com o trabalho, conseguimos determinar uma forma otimizada para este processo, e também obter os dados necessários para a avaliação dos novos lasers que serão fabricados com esta técnica, que aparenta ser promissora para o uso nos EDWAs, pois permite a integração fotônica.

## Agradecimentos

Agradecemos a todos os técnicos, professores e alunos integrantes do Laboratório de Pesquisa em Dispositivos (LPD-DFA-IFGW) e aos técnicos do Centro de Componentes Semicondutores (CCS) envolvidos nos treinamentos, estudos e execução do projeto.

## Contato

email: carlosbgois@gmail.com