



Relatório final

Cavidades Optomecânicas Rumo ao Acoplamento Forte com Fotóns Únicos

FAPESP número de processo: 2023/05160-8

Beneficiário: Bernardo de Andrade Dias da Costa

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pedro Mayer Alegre

Applied Physics Department “Gleb Wataghin”
Institute of Physics
University of Campinas

Período de vigência: 1 de maio de 2023 - 30 de abril de 2024

Campinas, SP
7 de Agosto, 2025

Resumo do projeto:

Este projeto científico de graduação tem como objetivo desenvolver uma técnica eficiente de acoplamento para a entrada e saída de luz de cavidades ópticas integradas usando uma fibra óptica cônica. O estudante aprenderá os princípios básicos de guia de ondas ópticas, bem como habilidades de design, simulação, fabricação e teste. Múltiplas abordagens, como estruturas de pontos e transição adiabática de modos, serão exploradas para criar um acoplamento em chip baseado em wafers de silício a granel. O projeto envolve a fabricação de diferentes tipos de fibras ópticas cônicas, compreensão dos modos ópticos guiados, cálculo de perfis espaciais e aplicação da teoria do modo de casal para melhorar a eficiência do acoplamento. O estudante irá projetar um acoplador adiabático, fabricar uma fibra óptica cônica de sílica HF-etched e caracterizar e comparar as características espectrais das rotas de acoplamento. O objetivo final é empregar essa técnica em experimentos de baixa temperatura. Este projeto oferece uma oportunidade para os alunos desenvolverem habilidades práticas em design e fabricação de dispositivos de guia de ondas ópticas, ao mesmo tempo em que fornecem uma base teórica sólida nos fundamentos de guia de ondas ópticas e acoplamento. O resultado tem o potencial de contribuir para o desenvolvimento de dispositivos ópticos avançados para diversas aplicações no futuro.

Resumo das atividades feitas durante o período da bolsa:

Este relatório tem por objetivo expor os desenvolvimentos obtidos na pesquisa encoberta pela bolsa, e destacar possíveis desenvolvimentos futuros para uma extensão do projeto. Inicialmente, foi proposto desenvolver a solução das equações de Maxwell dentro de um guia de onda, afim de adquirir os modos ópticos das ondas eletromagnéticas no guia através de métodos numéricos.

Além disso, uma vez que a pesquisa proposta é sobre a fabricação de um guia de onda com formato cônico, é importante entender a teoria física que explica o comportamento do equipamento afim de auxiliar na otimização operacional deste. Dessa forma, foram estudado modelos que permitem a previsão do formato do *nanospike* após a corrosão deste.

Após um período inicial de familiarização com o laboratório, deu-se início à etapa de construção do setup necessário para a fabricação dos *nanospikes*. Enfim obtido os primeiros guias de onda cônico, foram obtidos alguns parâmetros da geometria e operacionalidade da amostra. Para obter tais informações também envolveu uma curva de aprendizagem em equipamentos laboratoriais, como microscópios ópticos e analisador de espectro óptico.

Porém, a fim de obter um entendimento melhor da eficiência das amostras e de otimização

do processo de fabricação, uma extensão da bolsa é necessária. Ao final do relatório é exposto o cronograma do projeto o cenário de extensão do projeto.

Atividades de pesquisa cumpridas:

1. Usou-se a solução das equações de Maxwell para um guia de onda e resolveu-se numericamente as soluções;
2. Estudou-se um modelo matemático para controlar o formato dos guias de onda na corrosão;
3. Construiu-se um setup de fabricação de fibras ópticas cônicas de sílica HF-etched;
4. Caracterizou-se a taxa de corrosão da fibra óptica com HF;
5. Produziu-se amostras por diferentes períodos;
6. Desenvolveu-se um setup de análise de transmissão e espectro óptico dos tapers;

1 Estudo da solução das equações de Maxwell dentro de um guia de onda.

No estudo das ondas eletromagnéticas dentro de um guia de onda, é crucial considerar diversos fenômenos associados e suas propriedades. Para descrevê-los de maneira precisa, recorreremos às equações de Maxwell, pois estas oferecem uma descrição matemática da propagação da luz dentro do guia de onda. A partir dessas equações, é possível desenvolver uma compreensão maior sobre a natureza do funcionamento dos guias de onda, e conseqüentemente, auxiliando no processo de desenvolvimento do projeto.

Destarte, considera-se as equações de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

Ao resolver essas equações, é possível derivar uma descrição matemática das ondas que se propagam pelo guia de ondas. Para atingir esse objetivo, é essencial levar em consideração as

condições de contorno de um material dielétrico, uma vez que este é o tipo principal de material utilizado. Além disso, a geometria do guia desempenha um papel crucial na determinação da forma final da solução [1].

1.1 Solução para o guia de onda retangular

Inicialmente, apresentarei a solução para o caso de um guia de ondas retangular. Em seguida, mostrarei um gráfico ilustrando a solução numérica das equações. Farei o mesmo procedimento para o guia de ondas cilíndrico.

Essa abordagem permitirá uma compreensão mais profunda do comportamento das ondas no guia de ondas e fornecerá insights valiosos para o projeto.

Para chegar na solução, usa-se a seguinte equação de onda:

$$\nabla^2 E_i - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

Pode-se entender ela como uma forma reduzida das equações de Maxwell, a qual fornece uma solução de uma onda genérica com dependência em (x, y, z, t) . A partir da solução desta, aplica-se as condições que caracterizam as ondas dentro do guia de onda específico.

Destarte, o guia de onda laminar se estende no plano yz , e a onda se propaga na direção \hat{z} (fig. 1a). Importante notar que definimos a polarização da onda na direção $E_{(x)} = E_y \hat{y}$, ou seja, perpendicular a direção de propagação; esta polarização é chamada de *transverse electric*. Poderia-se propor uma solução análoga mas com $H_{(x)} = H_y \hat{y}$ perpendicular a direção de propagação, chamada de *transverse magnetic*.

Importante notar que a condição essencial para manter as ondas eletromagnéticas confinadas dentro do guia de onda se dá pelo fato de que $n_f > n_s$, o qual permite a reflexão interna total, e consequentemente, os modos que as ondas eletromagnéticas viajam no guia.

A partir deste cenário, é importante ressaltar que a solução para o guia de onda laminar terá 3 expressões, uma para cada área do guia de onda. Também, considera-se um guia de onda infinito, com a onda viajando no eixo z . Assim, tomando o seguinte expressão como solução genérica:

$$E_y(x) = E_0 e^{\pm \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_i^2} x} \quad (6)$$

Onde n_i é o índice de refração; k_0 é a magnitude do vetor de onda dado por $k_0 = \omega_0/c$; e β é o coeficiente de propagação na direção z é aquele que fornecerá as três soluções para cada região do guia de onda. Vale notar que serão dadas 3 soluções, uma para cada região do guia de onda.

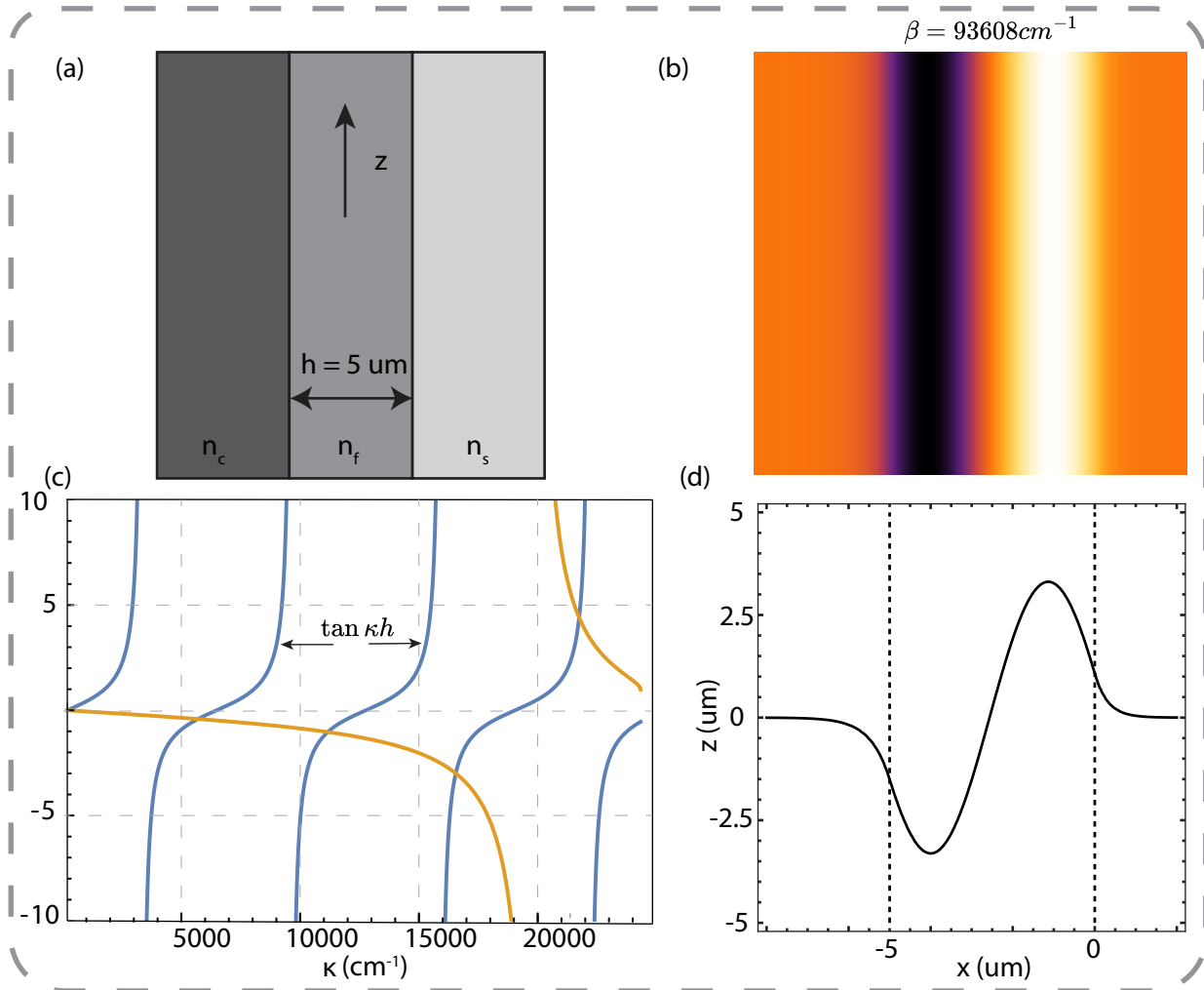


Figura 1: a) Geometria do guia de onda retangular; b) Solução do guia de onda em densidade, quando $\beta = 93608 \text{ cm}^{-1}$; c) Solução para a equação de autovalores (eq. 13). Os pontos de encontro das curvas são soluções; d) Solução explícita para o guia de onda quando $\beta = 93608 \text{ cm}^{-1}$

A ordem de magnitude dos índices de refração é: $n_f > n_s > n_c$, o qual cada índice de refração fornecerá as 3 seguintes soluções:

$$E_y(x) = Ae^{-\gamma_c x} \quad 0 < x \quad (7)$$

$$E_y(x) = B \cos(\kappa_f x) + C \sin(\kappa_f x) \quad -h < x < 0 \quad (8)$$

$$E_y(x) = De^{\gamma_s(x+h)} \quad x < -h \quad (9)$$

Onde, $\gamma = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_i^2}$, e $\kappa = \sqrt{k_0^2 n_i^2 - \beta^2}$.

Para finalizar, afim de obter os valores das constantes $A, B, C, e D$ é necessário aplicar as seguintes condições de contorno: As componentes tangenciais de \vec{E} e \vec{H} serem contínuas na interface; as componentes normais de \vec{D} e \vec{B} são contínuas na interface.

Se supormos que os campos são harmônicos, pode-se escrever a intensidade do campo elétrico em função do campo magnético:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (10)$$

Permitindo chegar na seguinte expressão:

$$H_z = \frac{j}{\mu\omega} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (11)$$

Assim, a partir da continuidade de \vec{H} podemos comparar as expressões nas três. Consequentemente, chegamos em uma expressão que permite chegar na solução dependendo apenas de A .

$$\begin{aligned} E_y(x) &= A e^{-\gamma_c x} & x > 0 \\ E_y(x) &= A \left[\cos(\kappa_f x) - \frac{\gamma_c}{\kappa_f} \sin(\kappa_f x) \right] & -h < x < 0 \\ E_y(x) &= A \left[\cos(\kappa_f h) + \frac{\gamma_c}{\kappa_f} \sin(\kappa_f h) \right] e^{\gamma_s(x+h)} & x < -h \end{aligned} \quad (12)$$

Para finalizar, ao aplicar a condição de que o campo elétrico tangencial é contínuo em $x = -h$. Permitindo chegar em uma equação de autovalores dada por:

$$\tan(h\kappa_f) = \frac{\gamma_c + \gamma_s}{\kappa_f \left[1 - \frac{\gamma_c \gamma_s}{\kappa_f^2} \right]} \quad (13)$$

A partir desta equação é possível obter os valores permitidos de β , e assim os modos guiados permitidos para o modelo. Porém, por esta ser uma equação transcendental, é apenas possível conseguir soluções numéricas (fig. 1 c)).

A partir deste gráfico, nos pontos de intersecção, é possível obter os valores de β . Os valores visíveis no plot, são: $\beta = 94087, 93608, 92819$, e 91752 cm^{-1} .

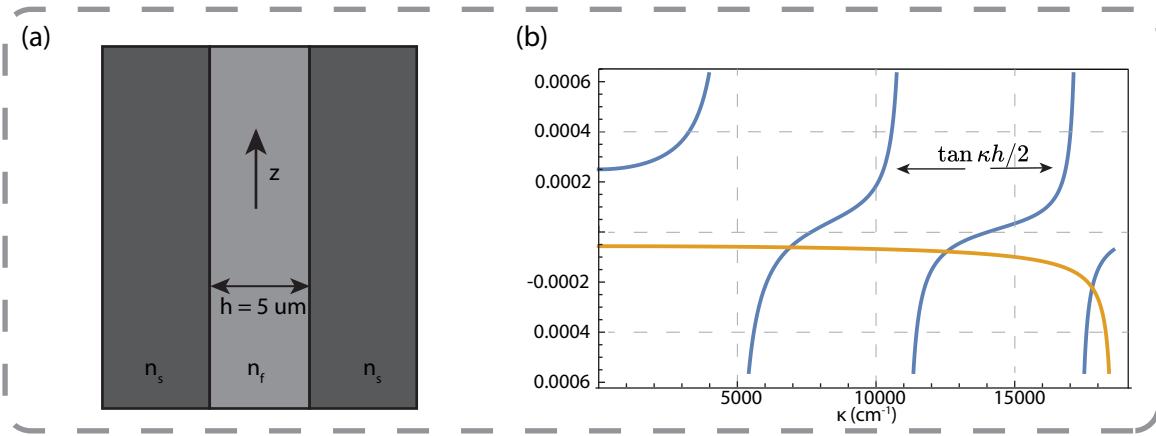


Figura 2: a) Geometria do guia de onda retangular simétrico; b) Solução para a equação de autovalores (eq. 15). Os pontos de encontro das curvas são soluções

1.2 Solução para o guia de onda retangular simétrico:

Semelhantemente ao caso anterior, é possível existir guia de onda retangulares em que um material de índice de refração n_f está cercado por um mesmo material de índice de refração n_s . O cálculo é o mesmo para resolver o sistema é o mesmo, porém, o formato da solução para $x > 0$ e $x < -h$ são o mesmo, obtendo uma equação de autovalores diferente.

Assim, segue abaixo a equação de autovalores para o caso simétrico:

$$\tan \kappa h/2 = \gamma/\kappa \text{ Para modos pares (cos)} \quad (14)$$

$$= -\kappa/\gamma \text{ Para modos ímpares (sin)} \quad (15)$$

De forma semelhante, os pontos de intersecção das curvas (fig. 2) são as soluções para a equação 15. Embora, neste caso, o qual $h = 3\mu m$, haja apenas uma solução por volta de $\kappa = 6000 cm^{-1}$.

Finalizando o assunto sobre guias de onda, tal estudo permitiu obter uma visão fundamental sobre a estrutura do guia de onda, e também um entendimento geral sobre o estudo de fotônica.

2 Estudo sobre a corrosão da fibra óptica

Destarte, o ácido hidrofluórico (HF) é um dos únicos ácidos capazes de corroer sílica (SiO_2), embora seja altamente perigoso para a saúde humana - sendo necessário tomar muitas providências para garantir a segurança do usuário - este material será o que permitirá a fabricação de fibras ópticas cônicas. Para este trabalho foi usado HF com 49% de concentração ([2]).

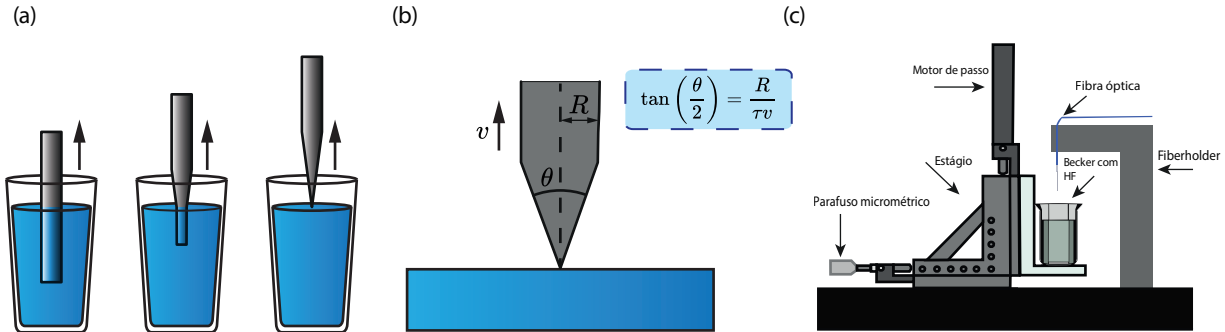


Figura 3: a) Representação do procedimento de fabricação de fibra cônica de sílica HF-etched; b) Geometria do modelo linear (eq. 16); c) Diagrama do setup de fabricação dos *nanospikes*.

O processo de corrosão é relativamente simples: A fibra óptica é mergulhada no HF em uma profundidade h , e essa é puxada por um motor de passo motorizado controlado por computador em uma velocidade constante v . Vale notar que o HF utilizado foi armazenado dentro de um becker de teflon em todos os procedimentos seguidos. A fig. 3a mostra como o procedimento é realizado.

Através da enumeração da figura temos os estágios do processo:

1. Início do processo de corrosão e da contagem de tempo do processo. Determina-se uma velocidade constante a qual a fibra óptica é puxada.
2. Após um período t do processo de corrosão, a fibra óptica inicia a obter um formato cônico. Uma vez que a sílica é um material isotrópico a corrosão é igual em todas as partes, propiciando esse formato.
3. Finalmente, após um período τ (tempo necessário para corroer a fibra até obter um tamanho de ponta necessária) de corrosão obtém-se uma fibra com uma ponta. Desta forma, o processo está finalizado.

Mais detalhes serão dados sobre este processo na seção de construção do setup de fabricação.

2.1 Modelo linear

Importante notar que existe uma dependência linear entre a velocidade v em que a fibra é puxada, e o ângulo final θ que é formado na ponta da fibra, como pode ser visto na fig. 3 b).

Onde $\theta/2$ é o ângulo que forma na ponta em relação a normal; v é a velocidade que a fibra é puxada; T é a taxa de corrosão; R é o raio da fibra. Uma vez explícito o esquema, toma-se a seguinte relação linear entre o ângulo θ e a velocidade v de movimento da fibra [3] [4]:

$$\tan (\theta / 2)=\frac{R}{v \tau} \quad (16)$$

Onde τ é o tempo de corrosão necessário para atingir um tamanho específico de ponta L . Este valor será melhor discutido nos resultados obtidos nos primeiros testes da montagem.

Finalmente, embora o modelo linear (eq. 16) já tenha sido testado e verificado por outros grupos de pesquisa ([3], [4]), ele foi verificado em este projeto até certa medida. A discussão respectiva será dada na seção seguinte.

3 Construção do setup de fabricação dos *nanospikes*

O setup (fig 16c) para fabricação dos *nanospikes* foi feito utilizando equipamentos já presentes no laboratório, e componentes impressos na impressora 3D. Por exemplo, o *Fiberholder* e o apoio do becker preso ao estágio foram feitos em uma impressora 3D usando PLA como matéria prima. Além disso, importante mencionar que a construção deste teve custou várias versões e modificações, chegando finalmente em uma versão final.

Por conseguinte, segue uma breve descrição dos itens indicados na fig. 16c): O parafuso micrométrico foi usado como ajuste fino da posição do becker em relação a fibra óptica; O estágio funciona como apoio para acoplar a apoio do becker e permitir que o motor de passo suba e desça a fibra óptica; o *Fiberholder* prende até 5 fibras através de estresse mecânico usando uma placa presa por parafusos. Em adição, também há um microscópio acoplado a uma câmera, o qual permite obter imagens em tempo real do processo de corrosão de uma das fibras conectadas a um laser.

Ademais, para utilizar o motor de passo este foi conectado a um controlador da empresa *Newport*, o qual permitiu controlar o equipamento através de uma interface proprietária. Deste modo, foi feito um software automatizado ([5]) para controle do motor de passos, uma interface gráfica para melhor controle dos comandos, e um código que permite ligar o microscópio que está conectado no computador. Embora o código esteja feito para usar com o microscópio, este ainda não está implementado no processo de fabricação. Contudo, como será discutido na seção de passos futuros, ele eventualmente será aplicado.

Embora o setup tenha a suas limitações, ele é efetivo para obter as primeiras amostras dos *nanospikes*, os quais serão mostrados a seguir.

4 Resultados das amostras

Para iniciar as fabricações, foi necessário um treinamento de uso de sala limpa, uma vez que esta possui um série de regras que precisam ser seguidas para manter a limpeza na sala. Além disso, um treinamento de segurança foi realizado para haver um manuseio seguro do HF durante os procedimentos. Desta forma, as primeiras duas amostras foram efetuadas apenas para praticar os procedimentos de segurança.

Após os treinamentos feitos, 6 seções de fabricação foram completas, o que resultou em 18 amostras de *nanospikes* [6]. Embora todas as seções fossem feitas com 4 fibras, algumas destas foram quebradas durante o processo de fabricação. A receita para a fabricação das amostras foi:

1. Obtenha 4 fibras do mesmo tamanho ($\sim 20\text{ cm}$), remova o cladding e o acrilato, e clive a ponta de cada uma das fibras. Em seguida, prenda-as com *magic tape* na placa que ficará no fiberholder.
2. Prenda a placa no fiberholder, e prenda as fibras na mesma altura (10 cm) em relação a parte inferior do fiberholder; mergulhe as pontas dentro de um becker com acetona por 5 minutos; isto permitirá que o que sobrou do acrilato seja limpo.
3. Após os 5 minutos, remova as fibras da acetona e mergulhe-as na água. Em seguida, seque-as com nitrogênio.
4. Ligue o software de controle e coloque a velocidade desejada na interface gráfica. Coloque o EPI (Equipamento de proteção individual) e garanta que os equipamentos para caso de emergência estejam funcionando. Insira as fibras dentro do becker com HF e o deixe pelo tempo determinado.
5. Após o tempo determinado, remova as fibras e as mergulhe-as dentro de um becker com água. Coloque o HF dentro do recipiente próprio para ser descartado de forma correta. Importante mencionar que este passo e o anterior são os mais importantes e o que requerem a maior atenção, uma vez que envolvem a manipulação do HF, e é necessário que todos os passos de segurança sejam seguidos.

4.1 Geometria

Com as amostras prontas, foi feita uma análise da geometria formada pelas pontas usando um microscópio óptico (figs. 4c e 4d).

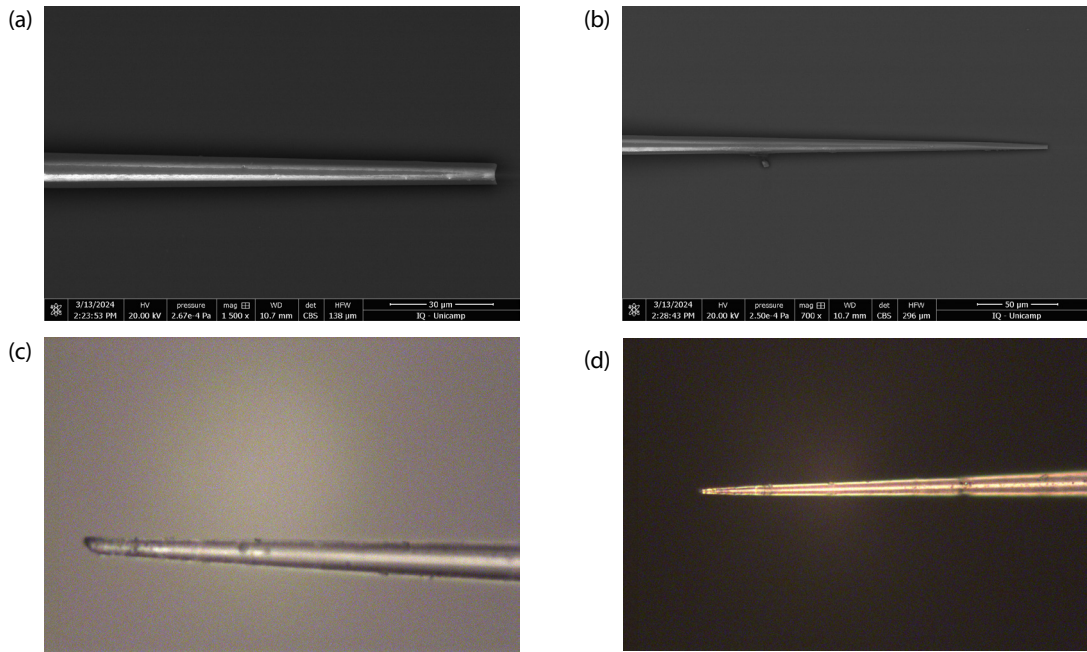


Figura 4: a) Amostra feita com velocidade de subida de $1.2 \mu\text{m/s}$ deixada por 60 minutos no ácido visto em um MEV; b) Amostra feita com velocidade de subida de $1.2 \mu\text{m/s}$ deixada por 90 minutos no ácido em um MEV; c) Mesma amostra de a) vista em um microscópio óptico; d) Mesma amostra de b) vista em um microscópio óptico.

Inicialmente, é possível observar que na maioria das pontas foi encontrado uma certa quantidade de sujeira. Há duas hipóteses para este fenômeno: 1) Existir sujeira no ar da sala limpa, este ser puxado pela capela, atingindo a amostra; 2) Esta sujeira ser efeito de uma corrosão causada pelo gás do HF durante o procedimento, criando "crateras" expostas de forma aleatória.

Além disso, através destas fotos ([6]) foi possível obter valores de ângulos aproximados da ponta das fibras através do software *ImageJ*. Através dele conseguiu-se valores por volta de $2^\circ - 5^\circ$, porém, como todas as fibras tiveram a mesma velocidade de subida, todas elas deveriam ter o mesmo ângulo. Pelo modelo linear, considerando uma velocidade de subida de $1,2 \mu\text{m/s}$, o ângulo deveria ser 2 (eq. 16) para todas as amostras. Para explicar essa desavença, foi proposto que: Esperava-se que a taxa de corrosão fosse $1,25\text{m/min}$, porém, é possível que a taxa de corrosão fosse de maior. Dessa forma, para verificar a hipótese, foi feita uma caracterização da taxa de corrosão do HF na fibra (SiO_2).

Para tal, colocou-se várias fibras por um período t , e comparou-se a variação do diâmetro (fig. 5c) destas usando uma fibra não corroída como referência (fig. 5b). A figura 5c mostra os valores do diâmetro da fibra para um dado período dentro do HF. Para medir a variação com a referência usou-se imagens de um microscópio óptico, e mediu-se com o auxílio do software *imageJ*.

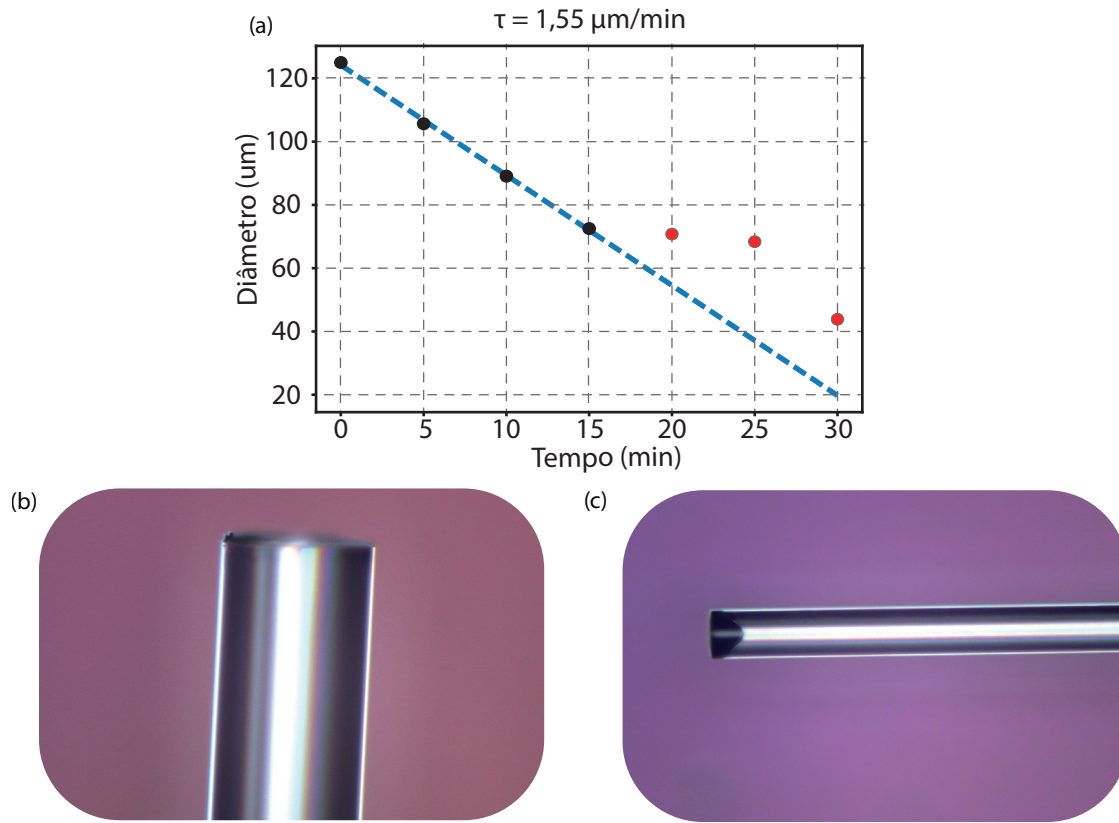


Figura 5: a) Caracterização da taxa de corrosão do HF em SMF-28; b) Fibra óptica usada de referência para obter a variação do diâmetro da fibra; c) Fibra óptica corroída após 30 minutos de corrosão. [7]

Desta forma, como é possível observar pela fig. 5a, a taxa de corrosão é aproximadamente $1.55 \mu\text{m}/\text{min}$. Porém, a partir de 15 minutos de corrosão, a taxa de corrosão diminui. É possível que durante o experimento o SiO_2 diluiu-se no HF alterando a concentração do ácido, e assim diminuindo a taxa de corrosão. Para verificar a hipótese, o HF usado foi mexido de forma a espalhá-lo homogeneamente. Consequentemente, observou-se uma tendência no último ponto do gráfico (fig. 5a) a retornar à relação linear.

Ademais, também foi possível obter imagens das fibras ópticas usando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), permitindo obter uma melhor resolução da ponta da fibra óptica. A partir destas, obteve-se valores por volta de $1,5 - 2 \mu\text{m}$ para o diâmetro de 5 pontas em períodos de corrosão diferentes. Tal dado corroborou para a hipótese de que taxa de corrosão era muito maior do que esperado.

Portanto, afim de obter pontas de pontas melhores, algumas medidas serão feitas, as quais serão mencionadas na última seção do relatório.

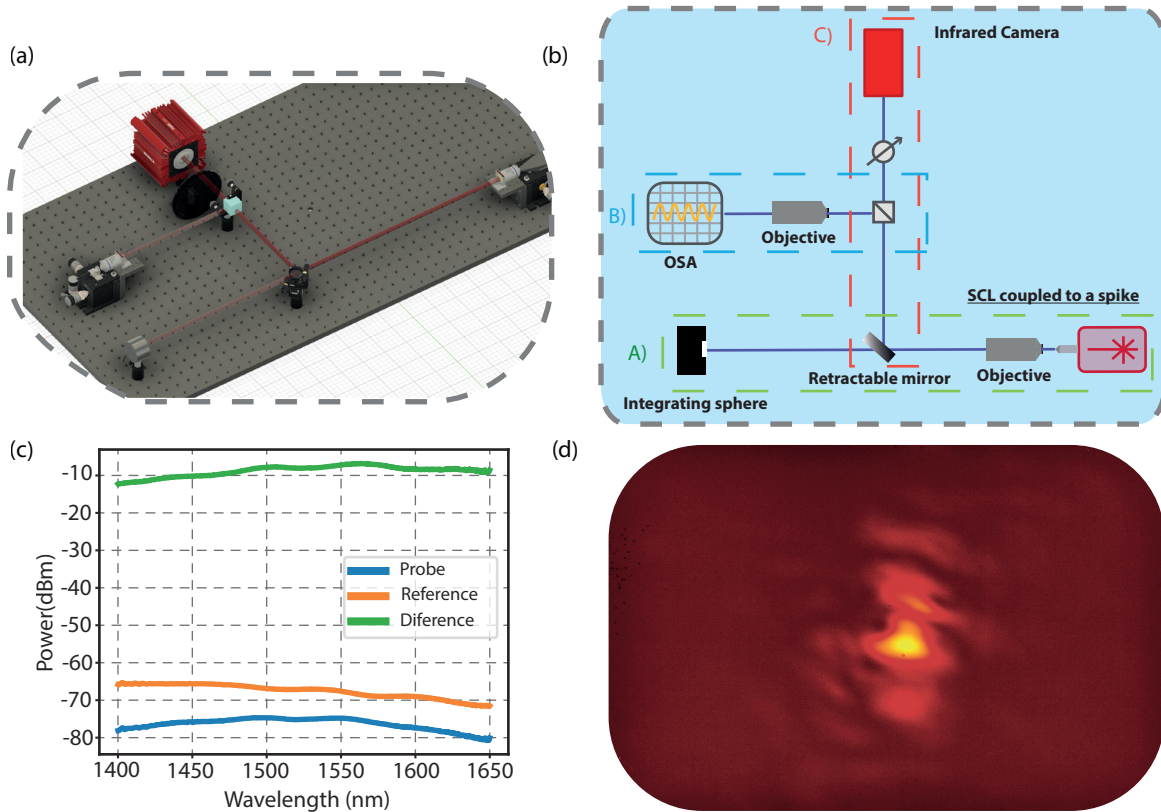


Figura 6: a) Modelo do setup usado para medir a transmissão da fibra óptica. Este esquema foi feito no software de desenho técnico *Fusion 3D*; b) Diagrama do circuito em *free space* para o setup de transmissão; c) Medida do OSA para a amostra 6, uma fibra óptica clivada (Referência), e a diferença entre as duas; d) Foto do modo de luz emitido pelo *nanospike* medido.

4.2 Transmissão e modos da fibra

Finalmente, como o *nanospike* também será utilizado para efetuar outros experimentos no grupo de pesquisa, é importante verificar quais são os modos guiados e como a luz é transmitida nas pontas. O setup experimental para a medição de transmissão foi dividido em 3 partes:

O setup (fig. 6b) foi dividido em:

- A) Um estágio translacional de XYZ, um fiberholder; uma objetiva de 40 vezes; um espelho retrátil; e uma esfera integradora conectada a um power meter. O *nanospike* é acoplado a um laser super contínuo, o qual emite luz em frequências em uma banda larga de 1400 nm a 1650 nm. Após a potência da luz colimada ser medida, a ponta inteira é colocada dentro da esfera integradora, obtendo perda associada ao formato da ponta.
- B) O espelho retrátil possui papel de transmitir a luz para a outra parte do setup. Através

dele, o feixe atinge um *beam splitter* o qual 90% chega a uma outra objetiva, que leva até um *analisador de espectro óptico*, permitindo obter faixa espectral dos modos que são emitidos.

- C) Os outros 10% da potência atravessam um atenuador e atingem uma câmera feita para o infravermelho, e projeta a imagem ao computador (fig. 6b).

Ao obter o setup montado, ele segue o seguinte procedimento: O *power meter* recebe um valor para a potência que chega da ponta da fibra. Em seguida, é medido toda a luz que chega na fibra ao colocar a ponta inteira dentro da esfera integradora. Assim, é possível obter a perda em dBm associada a ponta da fibra. Ademais, em geral obteve-se transmissões baixas, em uma faixa de 35% – 45%, causado possivelmente pelo formato da ponta da fibra.

Por conseguinte, ao obter as imagens da luz capturada, é possível efetuar uma análise qualitativa dos modos presentes na fibra. Desta forma, pode-se analisar o comportamento dos modos que são emitidos pelas ponta. Como foi mostrado na fig. 6c, obteve-se um padrão de luz disperso, indicando que a qualidade da ponta da fibra está longe do ideal, embora o foco de intensidade seja o centro dela. Porém, Tal resultado era esperado, dado que as pontas estavam, em geral, em um formato acidentado (figs. 4a e 4b).

Porém, ao observar o espectro de luz da ponta (fig. 6d) obteve-se um padrão muito semelhante comparado ao espectro de uma fibra clivada (referência da fig.6), tendo apenas uma diferença em perdas. Em vista disso, é possível inferir que não há modos interferindo entre si conforme atravessam a ponta, de forma que permite inferir que fibra atinge o critério adiabático.

5 Cronograma:

Para completar todas as atividades associadas ao projeto, é necessário uma extensão da bolsa de iniciação científica. Um cronograma estendido é proposto abaixo:

1. Estudo teórico:

- 1.1 Estudo numérico da teoria de guias de onda;
- 1.2 Estudo do processo de corrosão da fibra óptica cônica;
- 1.3 Estudo de *coupled mode theory*;
- 1.4 Simulação numérica em *comsol* dos modos ópticos da fibra óptica cônica;

2. Fabricação:

- 2.1 Montagem do setup de fabricação;
 - 2.2 Desenvolvimento do software de controle da fabricação;
 - 2.3 Treinamento para prática em sala limpa;
 - 2.4 Testes de funcionamento do processo;
 - 2.5 Caracterização da taxa de corrosão;
 - 2.6 Otimização e serialização do processo de fabricação;
3. Caracterização da transmissão:
- 3.1 Montagem do setup de fabricação;
 - 3.2 Caracterização da transmissão e espectro das fibras cônicas em função da geometria da amostra;
 - 3.3 Acoplar as fibras cônicas em chips baseado em silício a granel e caracterizar a transmissão;
 - 3.4 Acoplar em chip com temperaturas criogênicas;

Atividades	Trimestre							
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1.1								
1.2								
1.3								
1.4								
2.1								
2.2								
2.3								
2.4								
2.5								
2.6								
3.1								
3.2								
3.3								
3.4								

Tabela 1: Cronograma do projeto atual. As tarefas já concluídas estão destacadas em azul, enquanto as tarefas futuras estão em vermelho. As atividades futuras estão em verde para enfatizar que fazem parte de uma extensão.

6 Participation in a Scientific Event

- “Waveguides for coupling with optomechanical cavities”, EOSBF 2024 - Encontro brasileiro de física de outono - Florianópolis - Brasil 2024 (Apresentação oral).

Bibliography

- [1] C. R. Pollock and M. Lipson. *Integrated photonics*. Springer Science, 2003.
- [2] G. Son, et al. Chemically-etched optical fiber tapers for adiabatic fundamental mode evolution over o-and c-bands. *Journal of Lightwave Technology*, 40:4832–4840, 7 2022.
- [3] Z. Wang. Optomechanically coupled nanospike array fabricated on the endface of a soft-glass photonic crystal fiber.
- [4] L. H. Haber, et al. Shape control of near-field probes using dynamic meniscus etching, 2004.
- [5] B. da Costa. Automation software for nanospike fabrication, April 2024.
- [6] B. da Costa. Photos and data of the probes fabricated in my scientific initiation 2023-2024, April 2024.
- [7] B. da Costa. Data and photos of characterization of optical fiber HF-etching procedure, April 2024.