

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Otávio de Paiva Pinheiro Neto

**Estudo de Guias de Onda com Modificações
Estruturais para Aplicações como Sensor de
Índice de Refração**

São Carlos

2024

Otavio de Paiva Pinheiro Neto

Estudo de Guias de Onda com Modificações Estruturais para Aplicações como Sensor de Índice de Refração

Trabalho de conclusão do curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de São Carlos como
parte das exigências para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientação Prof. Dr. Luís A. M. Barêa

São Carlos

2024

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Leandro e Dalva, que me forneceram toda a base que poderiam, ensinando a mim e ao meu irmão o conceito de "deixar o mundo melhor para o próximo". Agradeço também ao professor Barêa que, sempre vendendo o peixe da vida acadêmica, foguei-me durante a pandemia para essa jornada. Enfim, agradeço a todos aqueles que estiveram presentes nessa aventura que foi cursar Engenharia Elétrica na Universidade Federal de São Carlos.

"Toda a obra de um homem, seja em literatura, música, pintura, arquitetura ou em qualquer outra coisa, é sempre um auto-retrato; e quanto mais ele se tentar esconder, mais o seu caráter se revelará, contra a sua vontade."
(Samuel Butler)

Resumo

Este trabalho de conclusão de curso abordou sensores ópticos integrados baseados exclusivamente em guias de onda, com o objetivo de aprimorar a interação da onda evanescente do modo guiado com o analito alvo. Inicialmente, modificações estruturais foram introduzidas nos guias de onda para otimizar essa interação, induzindo perdas de propagação e modulando a potência na saída do guia conforme as variações no índice de refração do analito.

A interação com o analito foi concentrada em uma janela de detecção, simplificando a complexidade dos sensores ópticos e reduzindo os requisitos de alta resolução dos equipamentos, comumente usados para medir variações de comprimento de onda ressonantes. Devido à complexidade dos cálculos envolvidos, foram realizadas simulações computacionais com o software comercial RSoft, especificamente com o módulo BeamPROP, viabilizadas pela parceria com o Laboratório de Pesquisa em Dispositivos (LPD) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

O projeto também investigou o uso de materiais absorvedores, posicionados estrategicamente para modular a interação da onda evanescente em função das variações no índice de refração do analito. Esse método intensificou as mudanças na potência de saída do guia, facilitando a monitorização precisa das variações no índice de refração.

Por fim, foram abordados os processos de microfabricação para viabilizar esses sensores ópticos, culminando na elaboração de um roteiro de fabricação e de máscaras litográficas virtuais. Os resultados indicaram a viabilidade de desenvolver sensores altamente sensíveis e mais simples de monitorar, com potencial para aplicações diversas, incluindo a medição de concentrações de hemoglobina no sangue humano.

Palavras-chave: Sensor de Índice de refração, Guia de Onda, Onda Evanescente.

Abstract

This undergraduate thesis explored integrated optical sensors based solely on waveguides, aiming to enhance the interaction of the evanescent wave of the guided mode with the target analyte. Initially, structural modifications were introduced to the waveguides to optimize this interaction, inducing propagation losses and modulating the output power of the waveguide according to changes in the analyte's refractive index.

The interaction with the analyte was concentrated within a detection window, simplifying the complexity of optical sensors and reducing the high-resolution requirements of equipment commonly used to measure resonant wavelength shifts. Due to the complexity of the calculations involved, computational simulations were performed using the commercial software RSoft, specifically with the BeamPROP module, facilitated through a partnership with the Research Laboratory in Devices (LPD) at the University of Campinas (UNICAMP).

The project also investigated the use of absorbing materials, strategically positioned to modulate the evanescent wave interaction based on variations in the analyte's refractive index. This method intensified the changes in output power of the waveguide, facilitating precise monitoring of refractive index variations.

Finally, microfabrication processes were addressed to make these optical sensors viable, culminating in the development of a fabrication roadmap and virtual lithographic masks. The results indicated the feasibility of developing highly sensitive sensors that are simpler to monitor, with potential for various applications, including measuring hemoglobin concentrations in human blood.

Keywords: Refractive Index Sensor, Waveguide, Evanescent Wave.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Estudo Teórico e Revisão Bibliográfica	10
1.1.1	Estudos dos princípios básicos de funcionamento dos sensores de guias de onda	10
1.1.2	Revisões bibliográficas de outros trabalhos e as possíveis aplicações	19
2	OBJETIVOS	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Projeto de Confecção do Dispositivo	26
3.1.1	Equipamentos para Fabricação em Laboratórios Parceiros	26
4	RESULTADOS	31
4.1	Elaboração e idealização do dispositivo em meio virtual	31
4.1.1	Desenho do Dispositivo	31
4.1.2	Sensibilidade e Linearidade	34
4.1.3	Guia de Onda Reto	35
4.1.4	Guia de Onda Estrangulado	36
4.1.5	Modificação no Formato do Estrangulamento	39
4.1.6	Curvatura do Guia durante o Estrangulamento	40
4.1.7	Guia Suspenso em Analito	41
4.1.8	Estudo da Altura da deposição de Óxido de Silício	46
4.1.9	Adição de Material Absorvedor	46
4.1.9.1	Sobreposição de Material Absorvedor	47
4.1.9.2	Subposição de Material Absorvedor	47
4.1.9.3	Otimização da Subposição de Material Absorvedor	49
4.1.9.4	Otimização da Fita de Silício Amorfo	51
4.2	Elaboração do Projeto para Fabricação em Laboratórios Parceiros	54
4.2.1	Projeto das máscaras	55
4.2.2	Limpeza da Amostra	57
4.2.3	Processo de litografia eletrônica	57
4.2.4	Etapa de Corrosão Seca	58
5	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – APÊNDICE A	67

1 Introdução

A aplicação dos avanços dos processos de micro e nanofabricação na construção de dispositivos para estudar e conhecer sistemas e processos biológicos vem sendo um dos principais pilares para evolução da área de nanobiotecnologia. A extraordinária evolução na compreensão dos sistemas biológicos aliada à emergência da nanotecnologia abriu portas à possibilidade de detectar e manipular parâmetros bioquímicos e moleculares empregando dispositivos de dimensões reduzidas, que recebem o nome de biossensores. Essa miniaturização dos biossensores de análise bioquímica e de diagnósticos moleculares vem proporcionando uma impressionante melhora na rapidez, precisão e sensibilidade das análises, bem como uma maior acessibilidade e flexibilidades dos mesmos. Esses dispositivos estão em ascensão no mundo e, de acordo com dados da Future Market Insights, empresa de pesquisa e consultoria norte-americana na área de tecnologia da informação, o mercado de sensores óticos foi avaliado em cerca de US\$ 22 bilhões em 2022 e pode alcançar US\$ 62,77 bilhões até 2033, com taxa de crescimento (CAGR) de 10% ao ano (1).

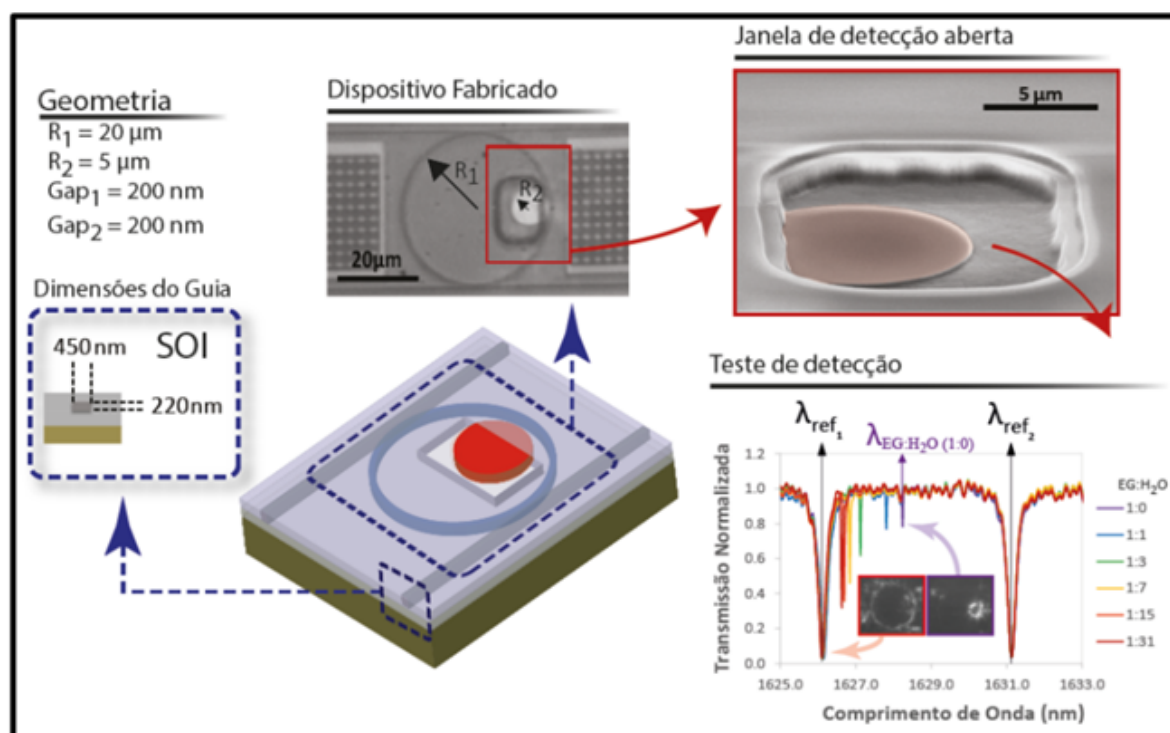
De um modo geral, vários biossensores atuais incorporam um biorreceptor capaz de reconhecer um analito alvo (ADN, ARN, genes, proteínas, etc.). A interação de ambos desencadeia uma perturbação bioquímica no sensor que deverá ser convertida no sinal detectável. Os diferentes tipos de analito, biorreceptor, método de transdução e sinal gerado garantem a diversidade a esses dispositivos e abrem um leque de caminhos para pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I). Nesse contexto, os sensores óticos são talvez a classe mais versátil dentro dos inúmeros sensores disponíveis, além de serem os primeiros comercializados, continuam sendo o tema de um grande esforço de pesquisa (2). Os frutos dessas pesquisas estão continuamente alimentando o setor comercial, garantindo o lançamento de novos produtos e potencializando as pesquisas em diversas áreas. Com o crescente interesse em nano-ótica e nanofotônica, é provável que toda uma nova geração de sensores óticos seja desenvolvida com recursos aprimorados e talvez únicos, baseados nos recentes avanços da fotônica e de novos materiais (3, 4).

Em particular, há uma classe de sensores que nem ao menos precisa de biorreceptores para detectar alguma mudança na sua superfície, como é o caso dos sensores óticos baseados na mudança de índice de refração do analito. Nesses dispositivos, também conhecidos como refratômetros (5), o sensoriamento ocorre por meio da detecção de variações nos comprimentos de onda (desvios espectrais ou variações da potência ótica) que viajam pelo sensor, quando ele é submetido a variações de índice de refração. Quando esses sensores são integrados, eles podem ser formados desde simples guias de onda quanto por combinações de componentes óticos integrados, como no caso de sensores baseados em microcavidades óticas (6, 7, 8). Em todos os casos, esses sensores óticos são capazes

de garantir alta qualidade de detecção aliados com a capacidade de serem compactos e facilmente integráveis com outros componentes óticos e eletrônicos. O estudo desses dispositivos aumentou consideravelmente nos últimos anos devido à essas vantagens exclusivas, às quais vêm permitindo o monitoramento de interações moleculares e reações químicas para uma ampla gama de aplicações, incluindo detecção biomédica, análise química, segurança alimentar, dentre outras (2, 9).

Diferentes sistemas de sensores integrados foram desenvolvidos nas últimas décadas, contemplando sensores de interferômetros (10, 11), sensores de ressonância de plasmon de superfície (SPR, surface plasmon resonance) (12, 13), sensores de cristal fotônico (PhC, photonic crystal) (14, 15), sensores de guia de ondas (WG) (16, 17), ressonadores óticos (18, 19) e de ressonância de modo guiado (GMR, guided-mode-resonance) (20). A Figura 1 abaixo ilustra um exemplo de sensor ótico que emprega uma cavidade em anel acoplada a um guia de onda, contendo no seu interior uma cavidade em disco, toda fabricada em uma plataforma de silício-sobre-isolante (SOI, Silicon-on-Insulator). Sobre o disco é aberta uma janela de detecção, expondo parte do disco a qualquer mudança no ambiente. Além desse esquema trazer todos os benefícios das PMs, como o alto confinamento fotônico e alto Q para as ressonâncias da cavidade interna (21), ele permite que as ressonâncias da cavidade externa (anel) fiquem fixas, insensíveis às variações do índice de refração do analito. Desse modo, essas ressonâncias são as referências do sensor, como ilustrado no espectro de detecção experimental presente na Figura 1.

Figura 1 – Sensor Ótico Baseado em PM, onde apenas uma parcela da cavidade de detecção está disponível para o sensoriamento de mudança externas.



Fonte: Autor

No espectro experimental da Figura 1 fica claro que ao redor da ressonância de detecção ($\lambda_{EG:H2O_{1.0}}$) estão as duas ressonâncias de referência (λ_{ref_1}) e (λ_{ref_2}), associadas à cavidade externa. As imagens de infravermelho mostram a respectiva cavidade acesa quando bombeada pelo comprimento de onda da sua ressonância. Quando esse sensor é submetido a uma mudança do ambiente, como feito por meio de uma solução de diferentes concentrações de etilenoglicol em água, ele detecta essa variação do índice de refração externo, sofrendo um desvio $\Delta\lambda_{res}$ apenas na ressonância de detecção. A partir de uma calibração prévia, ele é capaz de identificar qualquer substância que cause um desvio $\Delta\lambda_{res}$ medido com relação ao λ_{res} antes da detecção e com relação às ressonâncias de referência, λ_{ref_1} e λ_{ref_2} . Embora esse sensor seja eficiente e não sofra forte influência da variação de temperatura, devido às medidas diferenciais, ele é um bom exemplo da complexidade de equipamentos necessários para obter a resposta espectral com resolução suficiente para monitorar o desvio da ressonância de detecção. Apenas para esse sensor são necessários um laser de alta resolução, da ordem de picômetros, acompanhado de um fotodetector também de alta resolução, ambos trabalhando em sincronismo.

Portanto, esse exemplo mostra que embora a detecção de variações de índice de refração pode ser demonstrada em diferentes tecnologias com alto desempenho, ainda existem limitações que devem ser superadas para potencializar ainda mais a comercialização desses sensores. Uma delas é que geralmente os sistemas de leitura de sinal ótico presentes nesses sensores requerem instrumentos precisos, como espectrômetros e detectores de alta resolução e lasers de alta estabilidade e resolução. Todos esses instrumentos deixam o sistema de detecção volumoso e caro (22). Logo, é de extrema importância para indústria o desenvolvimento de sensores simples, cujos sistemas de detecção necessários sejam compactos, eficazes e baratos.

Em particular, na busca de reduzir a complexidade do aparato necessário para realizar as medições utilizando sensores óticos, esse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) faz um estudo de sensores baseados apenas em guias de ondas, que devem ser beneficiados devido às suas propriedades fundamentais. Sabendo que alguns guias dielétricos (baseados em Si_3N_4 ou Si envoltos em SiO_2), ou poliméricos ($SU8$, PMM), permitem propagar luz visível e que controlando suas dimensões, garantem a interação da onda evanescente com diferentes analitos alvos, a ideia desse estudo é investigar guias de onda capazes **de potencializar a interação ONDA EVANESCENTE e ANALITO apenas modificando a forma estrutural dos guias**. Além disso, uma vez projetado esses guias, deverão ser buscados **materiais absorvedores que posicionados estrategicamente sobre a região de detecção do guia de onda, possam garantir uma variação na interação da onda evanescente também com o material absorvedor, dependendo da variação do índice de refração presente sobre o material absorvedor**. Essa variação na interação entre a onda evanescente e o material absorvedor deverá potencializar as variações na potência de saída do guia, permitindo monitorar com maior facilidade as mudanças no

índice de refração em função da potência na saída, reduzindo ainda mais a necessidade de equipamentos precisos de bombeio e monitoramento da luz. Para buscar materiais que garantam uma absorção adequada e uma espessura reduzida, capaz de interagir de maneira controlada com a onda evanescente propagante no guia de onda, voltar-se-á a atenção para a utilização de camadas de materiais absorvedores disponíveis nas linhas de micro e nanofabricação compatíveis com a tecnologia Metal-óxido Semicondutor Complementar (CMOS, *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Um bom exemplo de material que satisfaz essas condições é o Silício Amorfo, que possui forte absorção óptica para faixa de comprimento de onda do visível.

Em particular, guias de onda ópticos revestidos com semicondutores ou metais permitem uma modulação das propriedades de propagação da luz devido ao acoplamento entre os modos sem perdas do guia dielétrico e os modos ópticos com perdas suportados pela camada de revestimento fina (23, 24, 25). Este acoplamento depende da espessura e do índice de refração da camada de revestimento, bem como do índice de refração do meio circundante, o que torna este tipo de estrutura de onda guiada adequada para detecção refratométrica (26, 27, 28, 29, 30, 31, 32). Em comparação com as configurações de revestimento metálico, o uso de um revestimento de camada semicondutora suporta tanto polarização transversal elétrica (TE), onde o campo elétrico não tem componente na direção de propagação, quanto polarização transversal magnética (TM), onde o campo magnético não tem componente na direção de propagação (23, 24), garantindo a possibilidade de obtenção de maiores sensibilidades de índice de refração (29). No entanto, apesar de um guia de onda revestido com semicondutor ser altamente passível de ser integrado em plataformas de fotônica de Silício, poucos trabalhos foram dedicados ao estudo dessa perspectiva para, por exemplo, demonstrar sensores integrados. Aliás, a grande maioria dos biossensores de guia de ondas revestidos de semicondutores foi demonstrada com o uso de fibras ópticas (29, 30, 31, 32). Portanto, a ideia apresentada nesse trabalho garante alto grau de inovação para essa proposta.

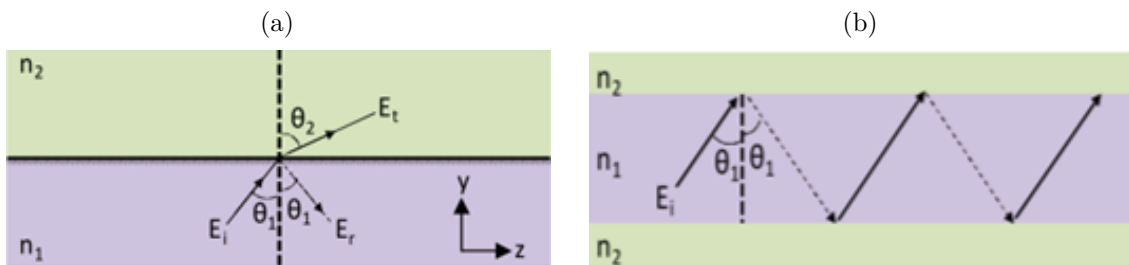
1.1 Estudo Teórico e Revisão Bibliográfica

1.1.1 Estudos dos princípios básicos de funcionamento dos sensores de guias de onda

De fato, diversos fenômenos óticos ocorrem no dispositivo, uma vez que a luz entra nele e já está submetida a absorção, espalhamento, refletância além de interagir com diferentes meios, onde são observadas a reflexão, refração, dispersão, além da transmissão que pode ser pensada a cada trecho que a luz atravessa no interior de um material e todos eles devem ser levados em conta porque interferem nos resultados e, conseqüentemente, na precisão do dispositivo.

É por isso que se faz tão importante um *software* de simulação que seja capaz de considerar nos cálculos todos esses parâmetros simultaneamente. E, para entender o que acontece nas simulações, pode-se utilizar um modelo simples de ótica geométrica em um guia de onda planar, como mostrado na Figura 2a. Nesta figura, um raio de luz incidente (E_i) se propaga em um meio com índice de refração n_1 e incide na interface de outro meio com índice de refração n_2 , formando um ângulo θ_1 com a reta normal à interface entre os meios. Na interface entre os dois meios, a luz é parcialmente refletida (E_r) e transmitida (E_t), de modo que a onda transmitida forma um ângulo θ_2 com a reta perpendicular à interface entre os meios. A relação entre os índices de refração e os ângulos θ_1 e θ_2 pode ser estabelecida pela conhecida Lei de Snell, na Equação 1.1:

Figura 2 – (a) Raio de luz refratada e refletida na interface dos dois meios. (b) Reflexão total interna nas interfaces, demonstrando o conceito de guia de onda (33).



Fonte: (33).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.1)$$

Na Figura 2a, o índice de refração do meio 1 é maior que o índice de refração do meio 2, de modo que o ângulo θ_2 é maior que θ_1 . Portanto, quando θ_1 aumenta, θ_2 se aproxima de 90° , de forma que o raio refratado se aproxima de uma reta paralela a interface entre os meios, simplificando a Lei de Snell para:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \quad (1.2)$$

Dessa forma, é possível definir o ângulo crítico θ_c como:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

Para ângulos de incidência maiores que o ângulo θ_c , nenhuma luz é transmitida, gerando o fenômeno da reflexão total interna, Figura 2b. Considerando uma segunda interface abaixo da primeira, onde a onda também pode sofrer uma reflexão total interna, pode-se perceber que a luz fica confinada na região de maior índice de refração e se propaga para a direita, como mostrado na Figura 2b. Porém não é possível afirmar que um guia de

onda propagará uma onda incidente com qualquer ângulo maior que o ângulo crítico, pois a propagação terá algumas restrições devido as mudanças de fase, que serão mostradas na sequência.

A relação entre a onda incidente e refletida pode ser descrita pela Fórmula de Fresnel, Equação 1.4. A onda refletida terá uma amplitude complexa E_r na interface e estará relacionada com a amplitude complexa E_i da onda incidente pela equação:

$$E_r = r \cdot E_i \quad (1.4)$$

Na Equação 1.4, r é o coeficiente complexo da reflexão. Este coeficiente é dependente do ângulo de incidência e da polarização da luz. A polarização da onda será considerada sendo a direção do campo elétrico associado à onda. Para os objetivos deste trabalho, serão considerados casos onde o campo elétrico é perpendicular ao plano de incidência da onda, chamada de condição transversal elétrica (TE). A situação em que o campo magnético é perpendicular ao plano de incidência da onda é conhecida como condição transversal magnética (TM). Para as condições de polarização TE e TM, os coeficientes de reflexão de Fresnel r_{TE} e r_{TM} são dados por:

$$r_{TE} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (1.5)$$

$$r_{TM} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (1.6)$$

Utilizando a Lei de Snell, Equação 1.1, tem-se:

$$r_{TE} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \quad (1.7)$$

$$r_{TM} = \frac{n_2^2 \cos \theta_1 - n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_2^2 \cos \theta_1 + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \quad (1.8)$$

Com estas últimas equações, observa-se que quando o ângulo de incidência é menor que o ângulo crítico, ocorrerá somente uma reflexão parcial e o coeficiente de reflexão r será obrigatoriamente real. Porém, quando o ângulo crítico é superado, ocorrerá uma reflexão total interna e o coeficiente de reflexão se tornará complexo. Isto implicará numa mudança de fase ϕ sobre a onda refletida. Considerando o caso:

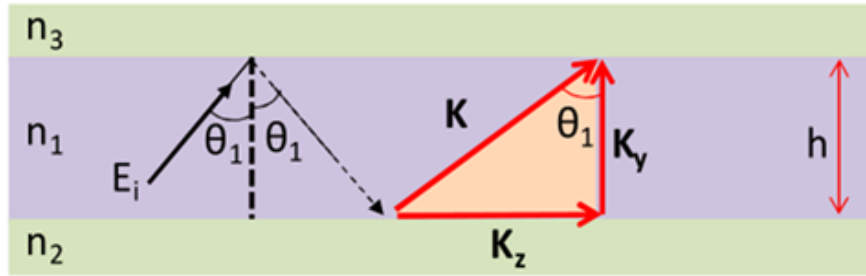
$$r = |r| \cdot e^{i\phi} \quad (1.9)$$

Portanto, a mudança de fase devido a reflexão total interna para cada polarização ϕ_{TE} e ϕ_{TM} , será dado por:

$$\phi_{TE} = 2 \arctan \left[\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\cos \theta_1} \right] \quad (1.10)$$

$$\phi_{TM} = 2 \arctan \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1 - 1}}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_1} \right] \quad (1.11)$$

Figura 3 – Propagação da onda por reflexão total interna em um guia de altura h



Fonte: (33).

Considerando que a propagação acontece na direção z e que a luz esteja confinada na direção y , pode-se considerar o caminho resultante de propagação da luz na forma de zig-zag, como mostrado na Figura 3. Nesta Figura, a onda se propaga através do guia com vetor de onda $K (= k_0 n_1)$, sendo k_0 o vetor de onda para propagação no vácuo, cuja amplitude é dada por:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (1.12)$$

Nesta equação, ϵ_0 é a constante de permissividade elétrica do vácuo, μ_0 a constante de permeabilidade magnética do vácuo e ω a frequência angular da onda incidente. O diagrama final do guia, mostrado na Figura 3, demonstra adequadamente a decomposição do vetor de onda nas seguintes componentes:

$$\begin{aligned} K_z &= n_1 k_0 \sin \theta_1 \\ K_y &= n_1 k_0 \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (1.13)$$

A componente de propagação em z (K_z) é chamada vetor de onda longitudinal do guia e indica a taxa com que a onda se propaga na direção z , conhecida na literatura como β . Desse modo, pode-se decompor a onda que está sendo guiada em duas componentes, uma onda propagando na direção z e outra em y , que reflete em cada interface do guia. A

onda propagando em y é uma onda estacionária transversal ao guia de onda. Com essa abordagem, considerando somente a alteração temporal da fase devido a propagação da onda (que possui $\omega > 0$ e $\nu > 0$), é possível somar todas as mudanças de fase introduzidas em uma ida e volta completa no guia com distância transversal $2h$, obtendo:

$$\phi_h = 2K_y h = 2K_0 n_1 h \cos \theta_1 \quad (1.14)$$

Além da mudança de fase descrita acima, também haverá mudança de fase nos limites inferior e superior do guia devido a reflexão total interna da luz, prevista pela fórmula de Fresnel e representada nas equações 1.10 e 1.11. Logo, podem-se denominar, respectivamente, estas mudanças de fase de ϕ_i e ϕ_s , e dessa forma, o deslocamento de fase total será dado por:

$$\phi_t = 2K_0 n_1 h \cos \theta_1 - \phi_s - \phi_i \quad (1.15)$$

Essa equação trata da soma das mudanças de fase. O valor negativo para ϕ_i e ϕ_s é considerado nessa equação pois essas mudanças de fase são negativas. Para preservar a onda no guia deve-se considerar uma interferência construtiva, ou seja, este deslocamento de fase deverá ser múltiplo de 2π . Assim sendo:

$$\phi_t = 2K_0 n_1 h \cos \theta_1 - \phi_s - \phi_i = 2m\pi \quad (1.16)$$

Como m é inteiro, haverá uma série de ângulos θ_1 discretos para o qual esta última equação (1.16) poderá ser resolvida. Isto mostra que a luz só pode propagar em alguns ângulos discretos permitidos, caso contrário, após sucessivas interferências destrutivas, a luz se perderá no guia. Cada solução permitida será chamada de modo de propagação.

Analisando a Figura 3 e observando os índices de refração do guia planar ilustrado, podemos perceber que podem ocorrer duas situações: se os índices de refração n_2 e n_3 forem iguais, este guia de onda é conhecido como simétrico, enquanto se eles forem diferentes, este guia de onda é assimétrico. Para o caso simétrico, como os índices dos meios externos são iguais, as mudanças de fase devido a reflexão interna nas duas interfaces serão iguais, o que significa $\phi_i = \phi_s$. Dessa forma, substituindo as Equações 1.10 e 1.11 na 1.16, a equação dos modos para cada polarização ficam:

$$\text{TE: } \frac{K_0 n_1 h \cos \theta_1}{2} - m\pi = \left[\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\cos \theta_1} \right] \quad (1.17)$$

$$\text{TM: } \frac{K_0 n_1 h \cos \theta_1}{2} - m\pi = \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1 - 1}}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_1} \right] \quad (1.18)$$

A única variável nestas equações (1.17 e 1.18) é θ_1 . Portanto, a solução desta equação dará o ângulo de propagação para um determinado modo m . No estudo feito até o momento, foi utilizado $m = 0$, pois o termo na raiz quadrada será sempre positivo e real. Isso ocorre porque θ_1 será sempre maior que θ_c , e por isso, sempre será permitido um modo de menor ordem. Dessa forma, um guia simétrico sempre terá um modo propagando e nunca estará interrompido. A partir do ângulo de propagação obtido da solução é possível encontrar a constante de propagação β e índice de refração efetivo do guia de onda.

Entretanto, os guias de onda propostos nesse trabalho não são do tipo *slab* e estamos em busca da otimização de um dispositivo que se assemelha mais com guias retangulares, do tipo *channel*. Ou seja, tudo o que trabalhamos até aqui foi uma onda sendo confinada em apenas uma direção, mas precisamos que ela fique confinada em duas direções (x e y) e se propague em apenas uma (z), como mostra a Figura 4 em seção transversal, em que o retângulo cinza mais escuro representa onde a luz ficará confinada.

Os campos modais elétricos e magnéticos que se propagam ao longo dos guias de onda retangulares podem ser expressos como nas Equações 1.19 e 1.20:

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_{nm}(x, y)e^{j(\omega t - \beta_{nm}z)} \quad (1.19)$$

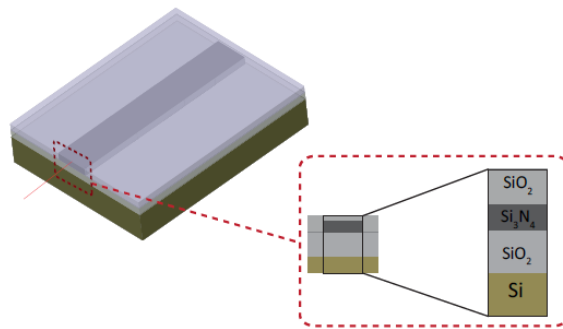
$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}_{nm}(x, y)e^{j(\omega t - \beta_{nm}z)} \quad (1.20)$$

Nestas equações, \mathbf{E}_{nm} e \mathbf{M}_{nm} representam a intensidade de campo (amplitude e polarização) das componentes elétricas e magnéticas, respectivamente, $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular da onda e β_{nm} é a constante de propagação dos modos n,m. Dessa forma, as soluções analíticas para os perfis modais $\mathbf{E}_{nm}(x, y)$ e $\mathbf{H}_{nm}(x, y)$ para uma seção transversal retangular são complexas e exigem aproximações.

Para que se possa estudar o comportamento dos campos elétricos e magnéticos nos guias de onda retangulares de interesse, faz-se necessário o cálculo de índice de refração efetivo e a observação da propagação ao longo do dispositivo e ao final do dispositivo presente na Figura 4. Para tanto, neste trabalho foi utilizado o módulo *BeamPROP* do *software* comercial *Rsoft*, para encontrar a solução desses guias retangulares. Essas simulações foram realizadas em colaboração com o Laboratório de Pesquisa em Dispositivos (LPD) do Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW) da Unicamp.

Na Figura 5 estão os modos quasi-TE e quasi-TM, com e sem a presença do analito sobre o guia de onda, a fim de demonstrar a mudança no índice de refração efetivo nas duas

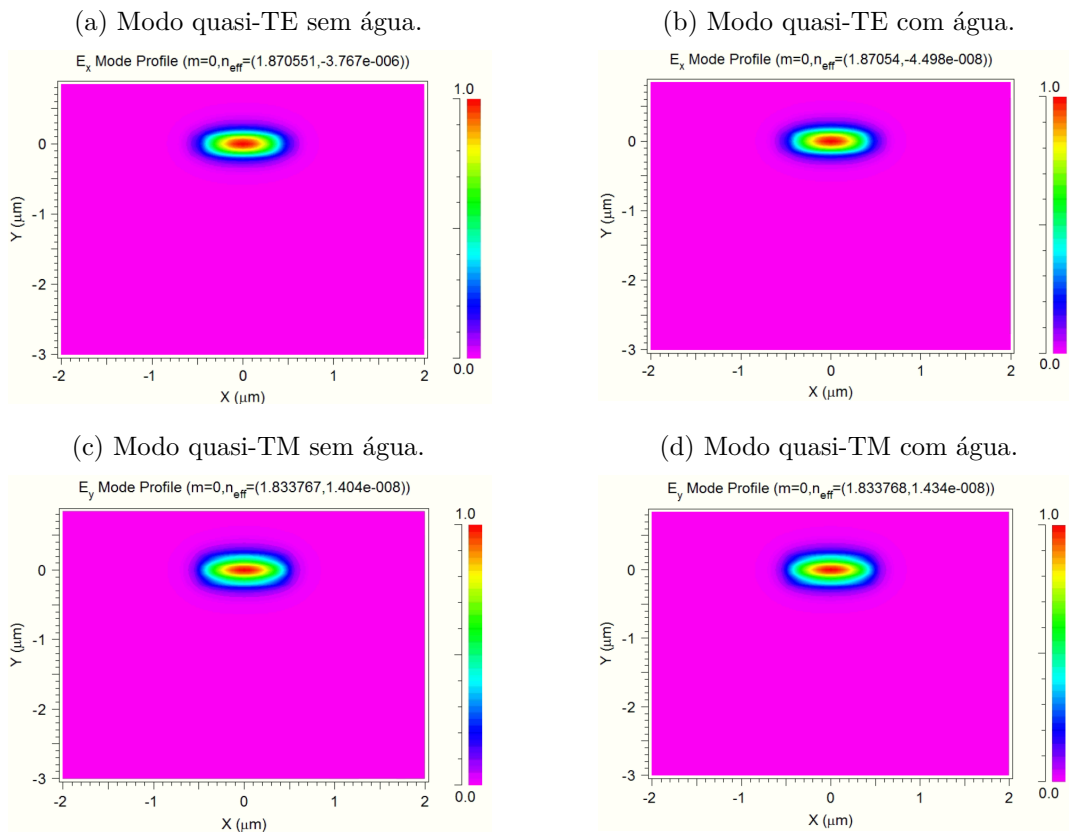
Figura 4 – Esquema do dispositivo utilizado para obtenção dos modos ópticos simulados, com detalhe para plataforma de Nitreto de Silício-sobre-isolante.



Fonte: Autor

situações. Para essa simulação, no caso da presença do analito, foi considerada a troca da camada de SiO_2 por água na janela de detecção. Analisando os valores dos índices de refração efetivos encontrados, é possível ver que pouca mudança ocorre nesses valores, mostrados no topo de cada modo computado. Isso já é uma indicação que esse guia de onda, sem qualquer modificação estrutural, não funciona como um bom sensor óptico de índice de refração.

Figura 5 – Modos quase-TE e quasi-TM com e sem água.



Fonte: Autor

O princípio de funcionamento de sensores baseados em guia de onda se dão com

uma entrada de luz, proveniente de um laser, que percorre toda a sua extensão e sai em direção a um sensor de potência, conhecido como fotodetector. O estudo de Lucas Ribeiro (34), demonstrou que o estrangulamento do guia de onda faz a evanescência interagir mais com o analito¹, cujo índice de refração das soluções aquosas predominantes estão entre 1,33 e 1,38 e este será detectado a partir das diferenças de variações de potência na saída, que garantirão a sensibilidade do sensor.

Como consta na Figura 4, a primeira camada de SiO_2 é depositada sobre um substrato de Si , seguido de uma camada de Si_3N_4 , que formará o guia de onda. Por fim, uma segunda camada (revestimento) de SiO_2 é depositada, após as etapas anteriores de fabricação, revestindo a parte superior do guia de onda retangular, a fim de protegê-lo do meio externo e garantir robustez ao sensor. A janela de detecção sempre é aberta no final da fabricação, por meio da remoção de uma parte da camada de SiO_2 , expondo uma parcela do guia de onda somente na região onde haverá detecção.

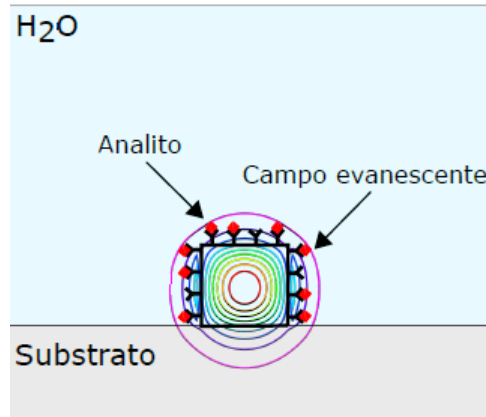
Aliás, a diferença de potência na entrada e na saída do guia de onda é utilizado para detecção da mudança de índice de refração e gerará a sensibilidade do sensor. No entanto, como essa detecção se dá? A resposta é que a interação do campo propagante no guia com os analitos alvos presentes na superfície do guia de onda garantem a esses sensores a capacidade de detecção. O princípio básico de operação é: quando uma parte da onda eletromagnética que está viajando para fora do guia de onda (chamada de onda evanescente) interage com o meio para criar uma região externa sensível a mudança de índice de refração (ver Figura 6), essa mudança do índice perturba o campo evanescente, que então modifica o índice de refração efetivo do guia de onda e algumas de suas propriedades, como a absorção e espalhamento. Como o índice de refração efetivo do modo propagante no guia de onda não é uma quantidade efetivamente mensurável, a mudança deve ser convertida em uma quantidade que possa ser facilmente detectada. Isso pode ser alcançado por meio do monitoramento do comprimento de onda propagante, do deslocamento na fase, ou da variação da intensidade de luz na saída do guia, uma vez que todos são dependentes do índice de refração efetivo. Este último exemplo é o que interessa ao presente trabalho.

Sabendo que a mudança no índice do analito alvo, quando interage com a onda evanescente do guia de onda, causa uma mudança no índice de refração efetivo e, consequentemente, variação na intensidade da luz, é possível pensar em métricas de desempenho para esse guia funcionando como sensor. As duas mais empregadas são:

1. **Sensibilidade:** A sensibilidade se refere à menor concentração do analito que pode ser detectada com segurança. Ao longo desse trabalho, o termo sensibilidade descreverá a resposta do sensor óptico às alterações do índice de refração (causadas pela interação do analito ao sensor). Existem dois tipos de sensibilidade: sensibilidade

¹ O dispositivo *lab-on-chip* permite que seja adicionada substância líquida em seu interior para análise, a essa substância nomeia-se "analito".

Figura 6 – Campo evanescente interagindo com o analito diluído em água.



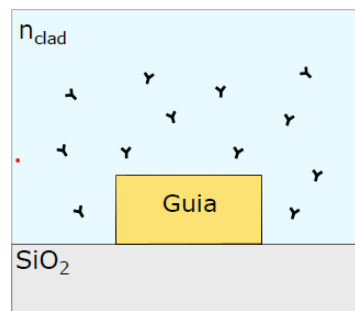
Fonte: Autor

homogênea (*bulk sensitivity*) e sensibilidade de superfície (*surface sensitivity*), como é mostrado na Figura 7 (17). Nesse trabalho, o interesse maior é na sensibilidade homogênea, definida como:

$$S_{bulk} = \frac{\Delta P_{out}}{\Delta n_{clad}} \quad (1.21)$$

onde n_{clad} é a variação do índice de refração do revestimento, ou seja, do analito. A S_{bulk} para um sensor de guia de onda é definida como a variação de potência (P_{out}) por uma variação no índice de refração do revestimento (n_{clad}).

Figura 7 – Sensibilidade homogênea



Fonte: Autor

- Limite de Detecção (sLOD):** O termo limite de detecção é baseado na configuração de dispositivos externos ao sensor, tais como lasers e detectores, e leva em consideração o nível de ruído presente nesses equipamentos. O sLOD é utilizado para descrever a menor quantidade detectável do analito alvo (17, 35), ou a quantidade mínima de variação do índice de refração detectável, definido como:

$$sLOD = \frac{R}{S} \quad (1.22)$$

onde R é a resolução de configuração do sistema e S é a sensibilidade homogênea ou de superfície.

Nesse contexto, esse presente trabalho visa melhorar a métrica "Sensibilidade" com que se identifica o índice de refração do analito por meio da diferença de potência na saída do sensor devido a mudança do índice efetivo causado pela presença do analito, e ainda dispensar o uso de lasers e fotodetectores de alta resolução, problema explicitado na [Introdução](#) de apresentação do trabalho, que deve minimizar os custos desses sensores.

1.1.2 Revisões bibliográficas de outros trabalhos e as possíveis aplicações

Para ampliar o nível de conhecimento nessa área e nas plataformas e materiais empregados, foram investigados trabalhos publicados de guias de onda e que possuem certa semelhança de funcionamento com a presente proposta. Uma breve descrição de alguns trabalhos encontrados, plataformas e materiais relevantes é apresentada a seguir, divididos em tópicos com uma breve descrição.

- Fibra

Trabalhos que empregam sensores de fibra apontam estrutura compacta, fácil fabricação e altamente repetível, além de desempenho estável em sensoriamento de temperatura e índice de refração na faixa de 1,34 a 1,41. A referência (36) é um trabalho que se destaca, onde a sensibilidade alcançada foi de 5-25nm/°C de 50°C a 10°C ou 21505,4 nm/RIU na região aproximadamente maior que 1,4. Entretanto, quando é discutido sensores baseados em fibras fica claro que eles não permitem ser integrados em chips, restringindo suas aplicações em *Lab-on-chip*.

- Sensores óticos em Silício sobre Isolante (SOI - *Silicon on insulator*)

Os sensores observados nessa plataforma demonstram que ela é uma ótima opção para fotônica linear e não-linear por permitir um alto contraste de índice de refração e a fabricação de guias de onda estreitos, suportando um único modo e cavidades ressonantes com raios abaixo de $5\mu\text{m}$ com baixa perda por radiação, além de alta compatibilidade com CMOS (metal-óxido semiconductor complementar) (37, 38). Vale ressaltar que estruturas em SOI permitem alta densidade fotônica em seu interior, tornando-as excelentes geradoras de efeitos óticos não lineares, cujas aplicações são inúmeras e muito desejadas (38). No entanto, a maioria dos sensores óticos nessa plataforma envolve microcavidades acopladas.

- Sensores em Nitreto de Silício (Si_3N_4)

Também compatível com CMOS, o Si_3N_4 é bom candidato a ótica não-linear (principalmente empregando anéis) e não sofre perdas por absorção de dois fótons

como nos dispositivos a base de Silício. Nos trabalhos estudados, na faixa de 1,33 a 1,38 chegou-se a limites de detecção (sLOD) de $5,88 \times 10^{-4}$ de variação de índice de refração. Ademais, o coeficiente termo-ótico do Nitreto de Silício ($CTO_{SiN} = 4,0 \cdot 10^{-5}/^{\circ}C$) é uma ordem de grandeza menor que o do Silício ($CTO_{Si} = 1,84 \cdot 10^{-4}/^{\circ}C$), embora, em deposições maiores de 300nm, altas temperaturas ($\approx 400^{\circ}C$) ocasionam rachaduras ao resfriarem (34, 37, 38). De toda forma, devido ao menor coeficiente termo-ótico, essa plataforma é uma boa escolha para dispositivos que precisam de maior estabilidade térmica, além que, assim como dispositivos SOI, também permite aplicações em *Lab-on-a-chip*. Por essa razão, essa foi a plataforma escolhida nesse projeto.

- Si amorfo

O trabalho de Carlos Barrios (39) demonstrou tremenda vantagem na deposição de Silício Amorfo sobre o guia de onda também sendo compatível com a tecnologia CMOS. Uma das principais vantagens é que esse material é capaz de aumentar a onda evanescente, devido ao seu alto índice de refração, fazendo-a interagir ainda mais com analito, permitindo uma redução no limite de detecção do sensor em 8×10^{-5} , na faixa de 1,33 a 1,38.

Nos trabalhos investigados foram descobertas inúmeras aplicações para esse tipo de sensoriamento que se baseiam no controle de qualidade ou presença de alguma substância em determinada solução. São tais como controle de qualidade de sucos de fruta, dosagens de xarope em refrigerantes, a concentração de sacarose em cana-de-açúcar, controle de fermentação, ciência forense, concentração de fluidos (metálicos, oleosos ou outras impurezas) em água, controle de soluções farmacêuticas e o trabalho com fibra apresentou até mesmo sensoriamento de temperatura submarítma, uma vez que esses dispositivos também são sensíveis a temperatura (36, 38), multiplexação de comprimento de onda, metrologia, espectroscopia, monitoramento de reações moleculares dinâmicas e estudos quanto a interação de materiais com a luz que contribui para áreas como a eletrodinâmica quântica (37).

Neste sentido, combinando as informações apresentadas até esse ponto, fica claro que a proposta principal deste trabalho de TCC é investigar modificações estruturais em guias de onda dielétricos tais que elas sejam capazes de permitir que a onda evanescente do guia interaja de modo eficiente e controlada com analitos alvo. Dessa forma, essa interação deverá depender do índice de refração do analito presente sobre o sensor, o qual influenciará nas perdas de propagação dos guias e permitirá ao sensor identificar as variações do índice de refração desse analito, sem exigir equipamentos de alta resolução para bombeio e medição da luz propagada.

Para demonstrar essa ideia e sua viabilidade, no capítulo [Objetivos](#) deste trabalho será descrito os objetivos gerais. A metodologia e componentes que serão empregados para explorar e implementar tais objetivos estão no capítulo [Materiais e Métodos](#), seguida dos resultados e das formas de análise destes resultados no capítulo [Resultados](#). Para finalizar, as considerações finais no capítulo [Conclusão](#), resumindo os principais pontos de interesse deste Trabalho de Conclusão de Curso.

2 Objetivos

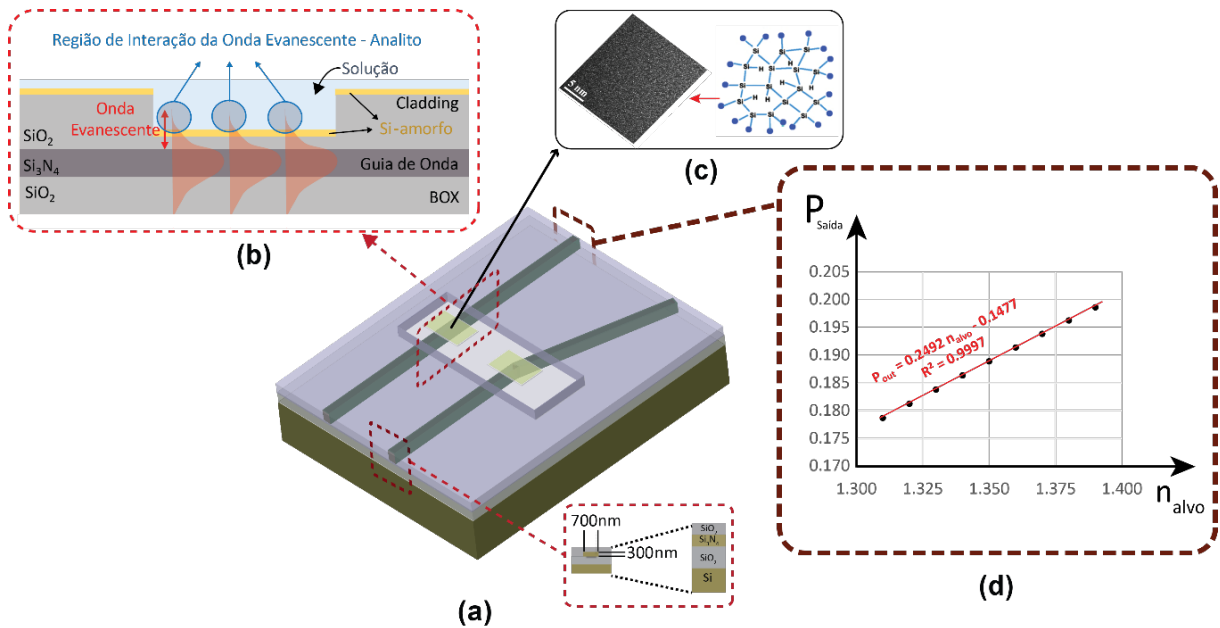
Dentro do contexto apresentado na [Introdução](#), a proposta deste Trabalho de Conclusão de Curso é investigar sensores ópticos, mas **direcionado apenas para aqueles construídos com guias de onda integrados, reduzindo a complexidade para obtenção dos sensores e, principalmente, para realização da detecção, evitando o emprego de lasers sintonizáveis e detectores de alta resolução.** Dentro dessa proposta, deverão ser investigadas diferentes configurações de guias de onda, envolvendo curvas, estrangulamentos, desvios angulares, e outras modificações estruturais simples, mas capazes de aumentar a interação da onda evanescente propagante no guia com o analito alvo, garantindo um incremento na sensibilidade do sensor. Em seguida, será investigado o potencial da integração desse sensor com materiais absorvedores, uma vez que esses materiais permitem uma interação controlada com a onda evanescente quando há variações do índice de refração do analito. O maior desafio desse trabalho, em termos de design, será obter as dimensões otimizadas do guia de onda e o local exato para posicionar o material absorvedor para garantir a absorção de luz de forma controlada com a variação no índice de refração do analito, potencializando o efeito de sensoriamento. O estudo sobre essa interação controlada entre a onda evanescente do guia de onda e o material absorvedor já está em andamento no grupo de pesquisa e resultados preliminares apontam para dois sensores integrados com Silício Amorfo ilustrados na Figura 8.

Na Figura 8(a) é possível ver que ambos os sensores possuem configurações simples, consistindo, inicialmente, de guias de onda de Si_3N_4 sobre SiO_2 , sendo um deles linear e outro contendo um ângulo de desvio. Em ambos, a onda evanescente que viaja fora do guia interage com o material a ser detectado ao passar pela janela de detecção (vide Fig. 8(b) e, dependendo da variação do índice de refração do analito colocado na janela, essa interação é afetada e traduzida em variações de potência na saída do guia ($P_{saída}$). A medida da variação da potência na saída do guia ($\Delta P_{saída}$) em função da variação do índice de refração do analito alvo (Δn_{alvo}) fornece a sensibilidade homogênea do sensor, dada pela seguinte relação:

$$S_{homog\tilde{e}nea} = \frac{\Delta P_{saída}}{\Delta n_{alvo}} \quad (2.1)$$

Apenas para efeito de demonstração, no sensor linear da Figura 8(a), foi utilizada uma camada de Si amorfo (Vide Fig. 8(c)) já integrado e, como analito, foi apenas considerada uma solução que garanta uma variação de índice de refração entre 1.33 e 1.39. A medida que o índice de refração do analito vai de 1.33 para 1.39, a penetração da onda evanescente no material absorvedor e no analito aumenta, modificando sua interação

Figura 8 – **Proposta de dois sensores baseados em guias de ondas que exploram a interação da luz evanescente com Silício amorfo:** (a) Esquema dos sensores já integrados com um filme de Silício Amorfo, com destaque para as dimensões do guia de onda planejado em Si_3N_4 sobre SiO_2 ; (b) Visão lateral do guia de onda na região da janela de detecção aberta, mostrando em detalhes a interação da onda evanescente com o material absorvedor e o analito (Solução); Em (c) é apresentado em detalhes a estrutura do Silício Amorfo e uma imagem de microscopia eletrônica do filme (40); (d) Resultado teórico obtido para o guia de onda linear, onde é possível ver a variação da potência na saída do guia durante uma variação do índice de refração sobre a janela de detecção. Para essa simulação foi considerada polarização TM e bombeio em 632.8nm.



Fonte: Autor

com ambos. Dessa forma, utilizando o módulo BeamPROP do software comercial RSoft, foi possível simular a Potência de Saída ($P_{saída}$) do guia linear com a presença de Silício Amorfo para cada Índice de Refração de um analito (n_{alvo}). O resultado dessa simulação é mostrado na Fig. 8(d), onde é claro que há um comportamento linear da Variação da Potência de Saída ($\Delta P_{saída}$) em função da Variação de Índice de Refração (Δn_{alvo}). A partir desse comportamento linear, foi possível extrair uma Sensibilidade Homogênea ($S_{homogênea}$) de $\sim 25\%/RIU$, onde RIU é unidade de índice de refração. A mesma simulação foi realizada removendo a camada de Silício Amorfo e, como resultado, a sensibilidade homogênea caiu para $\sim 2\%/RIU$, ou seja, uma redução de uma ordem de grandeza. Esses resultados são preliminares e deverão ser otimizados, podendo alcançar sensibilidades ainda maiores com as modificações estruturais previstas para o guia de onda, como a inserção de um desvio angular mostrado na Fig. 8(a), e uma melhor otimização da posição do material absorvedor. No entanto, mesmo nesses resultados preliminares, foi possível demonstrar que a presença do Si amorfo sobre o guia de onda, funcionando como material absorvedor, garante que um simples guia de onda linear funcione como um sensor de índice

de refração e experimente um aumento de 10 vezes em sua sensibilidade comparado com o mesmo guia sem o material absorvedor.

Colocada todas essas informações, pode-se enumerar os seguintes objetivos desse projeto:

1. Realizar uma revisão bibliográfica quanto aos fundamentos básicos de guias de ondas, com especial atenção para guias de onda de Si e Si_3N_4 ;
2. Realizar uma revisão bibliográfica sobre sensores ópticos baseados em guias de onda integrados, a fim de identificar o estado da arte desses sensores;
3. Estudo quanto as propriedades óticas dos materiais absorvedores e das formas de obtenção dos mesmos para integração com dispositivos fotônicos;
4. Realizar uma revisão bibliográfica sobre integração de materiais absorvedores com guias de onda e suas aplicações em sensores ópticos integrados;
5. Realizar simulações computacionais com pacotes comerciais de softwares para investigar e otimizar as dimensões de guias de ondas em configurações distintas, capazes de garantir sensores com alta sensibilidade;
6. Realizar simulações computacionais dos guias de onda previamente otimizados, mas integrados com os materiais absorvedores de interesse, responsáveis pela absorção da luz evanescente propagante no guia de forma controlada e dependente da concentração do analito sobre o material absorvedor;
7. Estudar os métodos de fabricação disponíveis nos laboratórios parceiros para obter os sensores projetados, identificando as limitações de cada uma delas, bem como sua compatibilidade com as técnicas de fabricação empregadas na microeletrônica;
8. Elaborar um projeto de fabricação de acordo com os métodos de fabricação disponíveis, tanto para obtenção dos guias de onda integrados quanto para integração dos materiais absorvedores, gerando um conjunto de máscaras virtuais a partir do projeto de fabricação planejado.

Na sequência, no capítulo [Materiais e Métodos](#), serão apresentados a metodologia e os componentes que serão empregados para desenvolver esses objetivos.

3 Materiais e Métodos

Como descrito no capítulo [Objetivos](#), será iniciado o trabalho realizando-se um estudo dos fundamentos básicos de guias de onda. Paralelo a esse estudo, será realizada uma revisão bibliográfica sobre sensores óticos baseados em guias de onda integrados, a fim de identificar o estado da arte desses sensores, as melhores sensibilidades alcançadas e os desafios a serem vencidos. Em seguida, serão realizadas simulações computacionais dos guias, extraindo suas características fundamentais, como perfil dos campos nos modos TE e TM, perdas de propagação, acoplamento com fibras na entrada e saída, dentre outros. Também deverá ser comparada as respostas em potência na saída do guia em função de variações nas dimensões transversais, modificações longitudinais, materiais empregados no guia (Si ou Si_3N_4), etc. Essas simulações serão fundamentais para otimizar os guias para o funcionamento como sensores óticos e deverão ser realizadas empregando pacotes de softwares comerciais, como RSoft e seus módulos. Prosseguindo, será direcionada a revisão bibliográfica para integração de materiais absorvedores em guias de onda e suas aplicações em sensores óticos integrados. Paralelamente, será realizado um estudo dirigido sobre as propriedades óticas de alguns materiais com potencial para ser empregados como material absorvedor, a exemplo, tem-se o Silício Amorfo. Com esse conhecimento completo de guia de onda e materiais absorvedores, poderão ser iniciadas as etapas de simulações computacionais dos guias integrados com esses materiais, como o caso do Silício Amorfo, que garantirão a absorção da luz evanescente propagante no guia e deverão incrementar a sensibilidade do sensor.

Por fim, aqui serão apresentados os métodos de fabricação disponíveis nos laboratórios parceiros, identificadas as suas limitações, bem como sua compatibilidade com as técnicas de fabricação empregadas na microeletrônica. Sabendo dessas possibilidades, será elaborado um roteiro de fabricação para obtenção dos guias de onda modificados. Essa etapa é importante para verificar se as dimensões do guia projetado são compatíveis com os equipamentos disponíveis e conseguir limitar quais os materiais absorvedores possíveis de serem depositados utilizando os equipamentos disponíveis. Esse projeto de fabricação envolverá a elaboração das máscaras litográficas virtuais e o planejamento das etapas de deposição e corrosão de materiais, abrangendo a abertura da janela de detecção e integração do material absorvedor. Ao final do TCC, poderá ser submetido esse roteiro de fabricação, bem como as máscaras virtuais planejadas, para fabricação dos sensores nos laboratórios parceiros.

3.1 Projeto de Confeção do Dispositivo

3.1.1 Equipamentos para Fabricação em Laboratórios Parceiros

As etapas de micro e nano fabricação dos dispositivos fotônicos que o grupo de pesquisa trabalha envolvem processos inteiramente compatíveis com a tecnologia CMOS, empregando na fabricação plataformas integradas de *SOI* ou Nitreto de Silício. No entanto, essas etapas de fabricação exigem equipamentos caros e de alta complexidade de manuseio e manutenção. Esses fatos exigem que o grupo trabalhe em colaboração com laboratórios parceiros para ter acesso a esses equipamentos e conseguir realizar rodadas de fabricação. Nesse sentido, durante esse trabalho, foi realizada uma consulta a esses laboratórios e identificado os seguintes equipamentos que deverão ser fundamentais para o desenvolvimento dos dispositivos propostos nesse projeto:

1. Equipamento de deposição de vapor químico assistida por plasma (PECVD):

O *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD) é utilizado para deposições assistidas por plasma. Nesse equipamento, os precursores gasosos são inseridos numa câmara com baixo vácuo, e através da energia proveniente do plasma, dissociam-se e reagem na superfície da amostra depositando o filme fino desejado. O PECVD é utilizado para depositar Nitreto de Silício, Óxido de Silício e Oxinitreto de Silício. Esse equipamento pode ser encontrado no Centro de Componentes Semicondutores (CCSnano) na Unicamp.

2. Spinner, para deposição controlada de eletroresiste:

Spinner é um equipamento capaz de girar amostras em altas rotações, garantindo que alguns polímeros, como os fotoresistes, possam ser depositados uniformemente e com precisão de espessura. Esse equipamento é fundamental para espalhar os fotoresistes ou eletroresistes que são necessários para realizar as etapas de litografia óptica ou eletrônica. Spinners podem ser encontrados no Laboratório de Pesquisa em Dispositivos (LPD) e no CCSnano, ambos na Unicamp.

3. Equipamento de Litografia por feixe de elétrons (Raith eLine Plus):

O Sistema de Litografia por Feixes de Elétrons é um sistema que permite realizar litografia em substratos de silício, vidro, GaAs e outros com até 2" de diâmetro, com tensão de aceleração variável entre 100V e 30 kV com canhão tipo TFE, que opera tanto no modo de escrita como no modo de imageamento eletrônico. Esse equipamento possui abertura selecionáveis de 7 μm , 10 μm , 15 μm , 20 μm 30 μm , 60 μm e 120 μm , permitindo utilizar correntes de feixe entre 1 ρA a 2 ηA . O sistema de deflexão do feixe permite a seleção de campos entre 1 μm e 2 mm, sendo que a metrologia de movimento da mesa do porta substrato é controlada por interferometria a laser com resolução de 2 ηm . O eLine conta com dois detectores de elétrons retro-espalhados,

um convencional e outro que opera no modo “Inlens”, permitindo trabalhar com detecção de marcas de alinhamento para escritas multiníveis. As operações do sistema de vácuo são automatizadas e o equipamento conta com ante-câmara (loadlock), que garante o rápido carregamento das amostras que serão escritas. Por fim, o sistema possui software de edição de ‘layouts’ instalado e aceita formatos GDSII, CIF, DXF, ASCII, BMP. Esse equipamento está disponível no CCSnano.

4. **Equipamento de Litografia óptica:** A fotoalinhadora é um equipamento capaz de fazer litografia a partir de luz ultravioleta, por meio de alinhamento de máscaras com resolução de até $1\mu\text{m}$ para o modelo MJB3 e de até $0.5\mu\text{m}$ para o modelo MJB4. Essa última permite alinhamento de dupla-face, ou seja, realizar o processo de litografia em dois lados de um wafer. Uma MJB3 está disponível no LPD da Unicamp e uma MJB4 está disponível no CCSNano.

5. **Equipamento de Litografia a laser:**

O sistema de litografia a laser consiste em um equipamento capaz de expor um substrato previamente preparado com fotoresiste a um feixe de laser com resolução micrométrica. Essa exposição é realizada na forma de um desenho ou padrão inserido pelo usuário através de arquivos GDSII, DXF, Bitmap, CIF ou Gerber. Assim como a litografia por feixe de elétrons, esse equipamento é útil para expor polímeros sensíveis ao laser empregado. Em particular, o sistema disponível no LAMULT da Unicamp é o modelo $\mu\text{pg}101$ da Heidelberg Instruments. Esse modelo possui um sistema de posicionamento com ajuste de foco em tempo real e passo mínimo nos eixos XY de $40\ \eta\text{m}$. Vem equipado com laser de estado sólido com comprimento de onda de $380\ \eta\text{m}$ e pode ser usado para fabricar estruturas da ordem de $1\mu\text{m}$ com velocidade de até $5\ \text{mm}^2$ por minuto.

6. **Equipamento de Corrosão por íons reativos e plasma de alta densidade (ICP/RIE):**

O *Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching* (ICP-RIE) é um equipamento para corrosão seca assistido por plasma, cuja característica principal com relação a outros reatores de plasma é a adição de um indutor para melhorar a densidade do plasma, permitindo altas taxas de corrosão e melhor anisotropia. O modelo disponível no CCSnano conta com uma ante-câmara de transferência da amostra para a câmara principal e é equipado com refrigeração traseira do wafer assistida por Hélio que permite o controle da temperatura do eletrodo. No CCSnano esse equipamento permite a corrosão de Si e SiNx.

7. **Equipamento para realização de cortes em wafer de Silício:**

Equipamento capaz de visualizar marcas de corte em um wafer de silício e realizar

o corte preciso dos wafers, com espaçamentos de até 1mm. Esse equipamento está disponível no CTI Renato Archer, localizado em Campinas.

8. Equipamento de Corrosão por feixe de íons focalizados (FIB):

Este sistema, presente no CCSnano, é denominado Dual Beam FIB/SEM - NANO-LAB modelo New200 fabricado pela companhia FEI. Ele consiste em um microscópio eletrônico de varredura (SEM) acoplado a um feixe de íons de Gálio focalizados (FIB) e um sistema de injeção de gás (GIS). Basicamente o FIB opera de modo semelhante ao SEM, fazendo uma varredura da superfície com um feixe de íons de Gálio. Na sua interação com a superfície, o feixe produz várias partículas secundárias (íons, átomos e elétrons). Tanto íons como elétrons secundários podem ser coletados por detectores e formar uma imagem da superfície, podendo fornecer uma informação mais completa sobre a amostra, quando comparado ao SEM. Dependendo da corrente do feixe e da tensão de aceleração dos íons aplicada, existem dois regimes distintos de operação no mesmo equipamento. No primeiro regime, pode-se obter imagens de alta resolução e implantar íons de Gálio em um material, geralmente utilizando correntes baixas, da ordem de 1-10 ρA . No segundo regime, pode-se corroer o substrato, utilizando correntes acima de 10 ρA e chegando até 20 ηA . Neste último regime de operação, uma fração significativa do material pode ser removida pelo feixe, produzindo um corte com uma forma previamente definida, seguindo um padrão de uma máscara virtual. Esse equipamento está disponível no CCSnano.

Todos esses equipamentos precisam estar em Salas Limpas, capazes de manterem um nível de pureza no ambiente com relação a presença de micro e nanopartículas, como poeira, que podem danificar os dispositivos durante a fabricação. Além disso, ainda são necessárias Capelas Orgânicas para limpeza das amostras com Acetona e Isopropanol, realizada antes do início dos processos de fabricação, Capelas de Ácidos, caso seja necessária a realização de corrosões úmidas envolvendo soluções com ácidos (HCl, H₂SO₄, etc) e medidores de espessura (perfilômetro) para verificação da seletividade e taxa de corrosão, bem como da espessura durante a deposição dos filmes.

Parte dessa infraestrutura está disponível na UFSCar (como capelas, salas limpas, etc.) e outra parte nos laboratórios parceiros da Unicamp. A seguir são listados esses laboratórios:

- Laboratório do Grupo de Pesquisa em Dispositivos Fotônicos – GPDFoton – UFS-CAR:

Possui infraestrutura disponível para simulação dos dispositivos, microfabricação e caracterização óptica e elétrica. O Parque de Equipamentos disponíveis, junto com outros laboratórios parceiros do grupo, é: Criostato Magneto-Óptico (Oxford – Janela óptica, B de até 17 T, T controlada: 4-300K); Espectrômetro Andor (SR-500-A) com

CCD-Si (DU420A-BR-DD); Espectrômetro Horiba (Spex 500M) com fotomultiplicadora S20 e S1; Espectrômetro Horiba (Triax 180) com detector de Ge e InGaAs; 2 criostatos de ciclo fechado Janis CCS-150 com janela óptica e T entre 8-300K; Laser de Argônio (1W); Laser He-Cd Kimom Head (IK5652R-G); Lasers de estado sólido (100 mW – 532 nm, 593nm, 637 nm, 808 nm); Fonte de Corrente Keithly (2425 – 100W); Fonte de Tensão programável Keithly (230); Unidade source/measure de precisão Keysight (B2902A); Sistema de Lâmpada de Xe e Hg(Xe) Horiba OBB com monocromador 200mm; Amplificador Lock-in de fase dupla (Modelo SR830) - Stanford Research System; Componentes ópticos diversos (lentes, espelhos, filtros, polarizadores, retardadores de onda, medidores de potência) alocados em mesas ópticas adequadas; Microscópio óptico e estereoscópios.

- Laboratório de Multiusuários do IFGW – LAMULT – UNICAMP:
Possui infraestrutura disponível para microfabricação e caracterização de materiais e dispositivos. O parque de equipamento disponíveis é: Litografia por feixe laser, microscópio eletrônico de varredura, micro Raman, fresadora, espectroscopia de infravermelho (FTIR), detector de fuga, microscópio de força atômica (AFM), perfilômetro.
- Laboratório de Pesquisa em Dispositivos – LPD – UNICAMP:
Possui infraestrutura para simulação, microfabricação e caracterização óptica e elétrica de dispositivos fotônicos e optoeletrônicos. O parque de equipamentos disponíveis é: Fotoalinhadora, Equipamento de corrosão por plasma (RIE), Evaporadora para deposição de metais por feixe de elétrons (E-Beam) e deposição de dielétricos por ECR, Equipamento de corrosão por Plasma O₂, perfilômetro e capelas para corrosão por ácido e limpeza orgânica. Para caracterização de dispositivos, o laboratório conta com: laser sintonizável (1465 – 1620 nm), lasers de semicondutor no visível, detectores de alta resolução, analisador de espectro óptico, fontes de corrente e tensão, fibras com microlentes, microposicionadores com controle piezo, controlador de polarização, microscópios ópticos e estereoscópios. Para simulação, o LPD conta com o pacote computacional RSOFT.
- Centro de Componentes Semicondutores – CCSnano – UNICAMP:
Possui completa infraestrutura para micro e nanofabricação de dispositivos optoeletrônicos. O parque de equipamentos disponíveis é: Dual FIB (FEI Nanolab 200), Sistema de litografia por feixe de elétrons, sistema Raman/AFM, duas fotoalinhadoras, Sistemas de deposição por Plasma (Reator CVD, PECVD - Oxford NGP-80), Sistemas de corrosão por Plasma (Oxford Plasma-100, ICP), Sistemas de metalização (Feixe de elétrons, térmicos e sputtering), Fornos de oxidação, Secagem por ponto crítico (CPD tousimis 951), Implantador de íons e equipamentos para caracterização Óptica/morfológica (Elipsometria, Perfilometria, Microscopia Óptica), Análise es-

pectral (transmissão e reflexão), FTIR e Caracterização elétrica (Caracterização DC e RF (45 MHz-75 GHz)).

Foi verificado que a maioria desses laboratórios disponibilizam técnicos treinados e capazes de realizar as etapas de micro e nanofabricação no parque de equipamentos, bem como na caracterização de dispositivos. Além disso, todos contam com serviço de treinamento para alunos, garantindo que os técnicos preparem esses alunos para utilizarem o parque de equipamentos disponíveis. Dessa forma, na Seção 4.2, será discutido como é possível utilizar esse parque de equipamentos para fabricar os dispositivos propostos nesse trabalho, descrevendo o roteiro de fabricação.

4 Resultados

Para melhor apresentação dos resultados obtidos, estes serão divididos em 2 partes: idealizações e resultados de simulação e projeto de confecção do dispositivo. Começando pelo 1º Tópico: Elaboração e idealização do dispositivo em meio virtual 4.1, onde se encontram as diversas idealizações e a implementação computacional dos sensores que se encontram destrinchados nesta Seção que contém a determinação do desenho do dispositivo em 4.1.1, as formas de análise e comparação entre os dispositivos para otimização 4.1.2 e terminando nos resultados atingidos para várias modificações investigadas através de simulação, separadas uma a uma em 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5, 4.1.6, 4.1.7, 4.1.8 e 4.1.9 e, por fim, encontra-se o 2º Tópico: Projeto de fabricação na Seção 4.2 subdividido entre Subseções que apresentam tanto a máscara litográfica quanto as etapas de fabricação.

4.1 Elaboração e idealização do dispositivo em meio virtual

Assim, como a aferição dos modos e seus índices de refração efetivos, todas as simulações foram realizadas com o módulo *BeamPROP* do *software* comercial *Rsoft* em colaboração com o Laboratório de Pesquisa em Dispositivos (LPD) do Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW) da Unicamp. Com isso em mente, é necessária elaboração do desenho do dispositivo para que seja possível prosseguir com as simulações e, assim, otimizá-lo para a região de interesse.

4.1.1 Desenho do Dispositivo

O projeto de um guia de onda consiste em definir suas dimensões a fim de garantir as condições necessárias para um desempenho significativo em determinada aplicação. Aqui, o propósito é desenvolver um guia de onda que permita, simultaneamente, obter uma onda evanescente maximizada para interagir com o analito alvo, baixa perda de propagação e dimensões que não exijam alta complexidade na fabricação. No entanto, quando se trata de complexidade na fabricação, é de extrema importância a escolha de materiais compatíveis com a tecnologia CMOS. Desse modo, o Si_3N_4 é um candidato promissor devido ao seu índice de refração relativamente alto e absorção desprezível no espectro de comprimento de onda visível, como descrito anteriormente.

Com respeito às espessuras das camadas dos materiais presentes na Figura 4, as escolhas foram realizadas com base nos limites de deposição e fabricação apresentados na literatura (41, 42). A espessura da camada de SiO_2 depositada sobre o Si deve ser suficientemente espessa para tornar a perda de vazamento de luz do guia para o substrato

insignificante (41), ou seja, não menor que 220 nm nem maior que $4 \text{ }\mu\text{m}$. Além disso, a espessura de $2,2 \text{ }\mu\text{m}$, além de satisfazer o ponto, também é padrão nas plataformas *SiNON* das principais *foundries* no mundo, uma vez que elas reduzem os problemas de *stress* entre os materiais que possuem coeficientes de dilatação térmica diferentes. Já a camada de revestimento garante a proteção do guia de onda de Si_3N_4 contra perturbações do meio externo, sendo que esse revestimento será de $2 \text{ }\mu\text{m}$ e o Nitreto contará com uma espessura de $0,3 \text{ }\mu\text{m}$ já estudada pela literatura (34) e apresentada em (42) com 380 nm . Com relação aos índices de refração adotados para esses materiais em um comprimento de onda $\lambda = 633 \text{ nm}$, eles foram: $n_{\text{SiO}_2} = 1,457011646$, $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 2,022228$ e $n_{\text{Si}} = 3,92066$.

Com esses dados de espessuras e índices de refração foi possível realizar uma simulação 3D do guia de onda para encontrar as perdas de propagação e o índice efetivo para diferentes larguras do guia de onda nas polarizações TE e TM. O objetivo dessa etapa é identificar uma largura para o guia de onda (Si_3N_4) que satisfaça as condições de baixa perda de propagação e dimensões adequadas para uma fabricação de baixa complexidade.

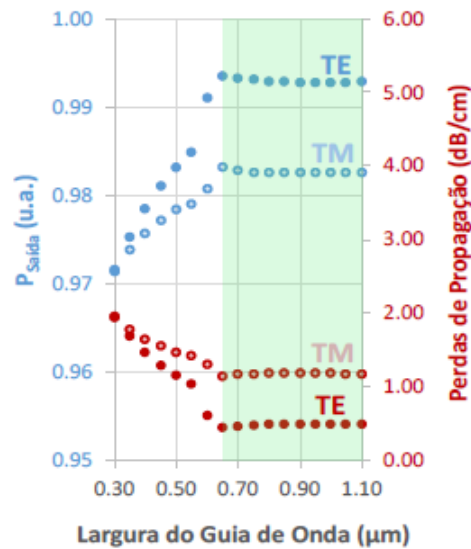
A simulação das perdas de propagação foi realizada bombeando o seu modo fundamental com $1W$ de potência na entrada, garantindo que não houvesse perdas de acoplamento. O guia utilizado na simulação possuía 1 mm de comprimento, as dimensões descritas anteriormente e a disposição como consta na Figura 4 e a detecção de potência foi realizada na saída de cada guia. Para essa simulação, o tamanho da malha usado foi de 20 nm em todas as direções. As potências de saída foram extraídas de cada guia de onda (curva em azul), que permitiram computar as perdas de propagação (curva em vermelho) de cada guia, tanto para polarização TE quanto TM (vide Figura 9).

Os resultados mostram que as potências na saída do guia, tanto para TE quanto para TM, aumentam a medida que a largura do guia de onda é incrementado. A região em verde, onde $L > 0,63 \text{ }\mu\text{m}$, representa a faixa de largura do guia simulado em que as perdas de propagação para polarização TE são de aproximadamente $0,5 \text{ dB/cm}$ e para polarização TM são de aproximadamente $1,2 \text{ dB/cm}$. Essa é a região simulada onde o guia de onda passa a apresentar as menores perdas de propagação e se mantém constante. Portanto, esse fato faz considerar o guia de onda com largura inicial $1 \text{ }\mu\text{m}$ adequado para compor o sensor garantindo uma largura relativamente fácil para fabricação em diversos equipamentos de litografia. Para melhor apresentar o dispositivo, foram elaboradas 3 vistas que são apresentadas na Figura 10.

O dispositivo é caracterizado pelos seguintes parâmetros:

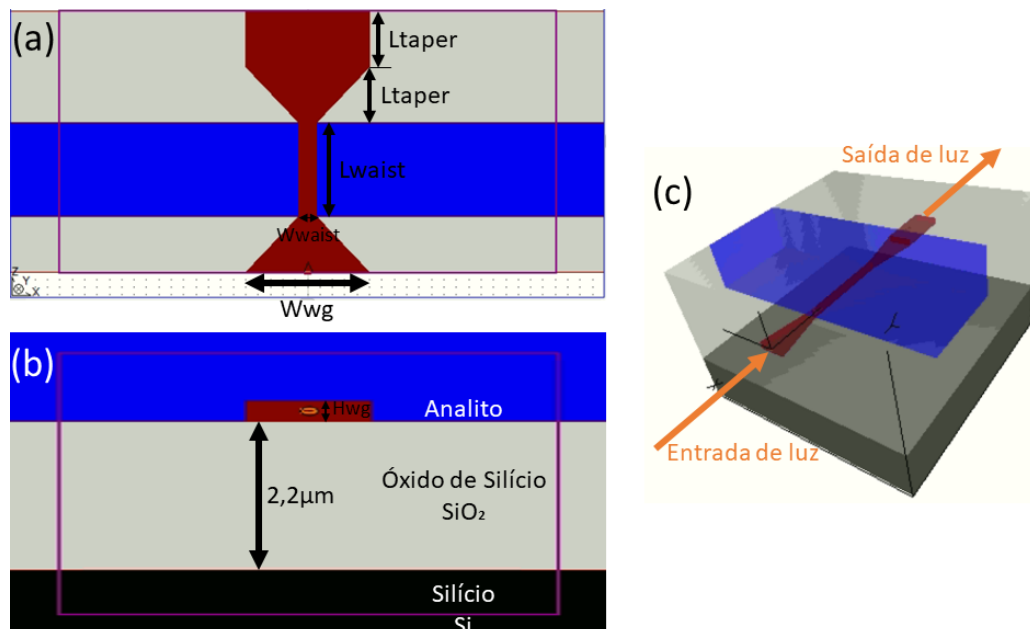
- **Hwg**: altura do guia de onda, fixada em $0,3 \text{ }\mu\text{m}$;
- **Wwg**: largura inicial do guia de onda, igual a $1,0 \text{ }\mu\text{m}$;
- **Wwaist**: espessura do estrangulamento, que será ajustada pela otimização;

Figura 9 – Perdas de propagação em um guia de onda, para os modos TE e TM em função da largura do guia de onda, utilizando um comprimento de guia de onda de 1 mm.



Fonte: (34)

Figura 10 – Dispositivo estrangulado. Em (a) tem-se a visão de cima com um corte por onde passa o guia (em vermelho, Nitreto de Silício), em (b) se tem a visão de frente, por onde a luz entra no dispositivo (em laranja no interior do guia de onda) e em (c) tem-se uma visão em perspectiva.



Fonte: Autor

- **Lwaist**: distância percorrida pela luz enquanto o dispositivo está na região estrangulada, ou seja, com largura W_{waist} . Essa variável também será otimizada;
- **Ltaper**: distância necessária para que o dispositivo transicione de W_{wg} para W_{waist} ,

vice-versa e mais uma região ao final de estabilização com largura W_{wg} . Sendo a última variável a ser ajustada em todas as modificações estruturais do guia de onda.

Dessa maneira, o sensor inicia com um guia de onda com largura W_{wg} que segue sendo afinado por uma distância L_{taper} até a largura atingir o valor W_{waist} . Esse valor mantém fixo por uma distância L_{waist} , onde o guia de onda começa a aumentar novamente até atingir a largura inicial W_{wg} , percorrendo outra distância L_{taper} . Enfim, há uma etapa onde a luz percorre o dispositivo com essa largura final por mais uma distância L_{taper} , permitindo a estabilização da evanescência para monitorarmos a potencia final. Esses parâmetros são ilustrados na Figura 10.

Além disso, foi estipulada uma margem para a simulação, representada como retângulo roxo na Figura 10. Horizontalmente, a margem possui uma extensão de $4\mu m$ centralizada na entrada de luz, destacada em laranja na Figura 10(b). Enquanto que, verticalmente, a margem se estende $0,85\mu m$ para cima e $3\mu m$ para baixo a partir da entrada de luz, fazendo com que, uma vez que o guia possui altura $H_{wg} = 0,3\mu m$ e a camada de óxido, $2,2\mu m$, sejam considerados apenas $0,65\mu m$ de Silício como substrato. Por último, em profundidade, a margem de simulação acompanha da entrada à saída de luz, o que pode variar de acordo com o tamanho de L_{taper} e L_{waist} . Essa margem auxilia o processamento descartando a luz que passa por ela, de acordo com os testes, O tamanho estipulado é suficiente para permitir que a evanescência que pode retornar ao guia de onda efetivamente retorne, enquanto a evanescência que não consegue voltar seja descartada ao atravessar a borda.

Sabe-se que computadores e simuladores em geral não são capazes de cálculos contínuos, sendo assim, existe a necessidade de estipular um “passo” para a realização dos cálculos que nesse caso foi de $5\eta m$ em todas as direções, suficiente para a resolução que se busca sem que sejam gastas mais horas de simulação que o necessário por variação de parâmetro. Nessas condições, cada simulação dura em torno de 45 a 75 minutos, ou seja, se for necessário variar W_{waist} de 50 a 150 ηm de $10\eta m$ em $10\eta m$, teremos 10 simulações que vão chegar por volta de 10 horas podendo variar de acordo com o número de simulações simultâneas. Além disso, todos os resultados necessitam da variação de índice de refração simultaneamente com o parâmetro, então, o simulador investiga índices de refração para o analito entre 1,33 a 1,38 com passo de 0,01, o que leva a multiplicar por 6 o tempo necessário de cada variação de parâmetro, neste exemplo, a otimização de W_{waist} levaria em torno de 60 horas.

4.1.2 Sensibilidade e Linearidade

Os resultados da simulação se limitam a aferir a porcentagem de potência que se encontra na saída em relação a entrada aplicada. Dessa forma, tem-se um valor de P_{out}

entre 0 e 1 para cada variação de parâmetro e é necessário elaborar um modo de comparar qual o melhor valor do parâmetro que possibilitará uma sensibilidade para mudanças de índice de refração no analito e certa linearidade na variação de potência para garantir precisão e acurácia na obtenção de índices desconhecidos.

Como de costume, para o cálculo da linearidade será utilizado o método de regressão linear, R_{quad} , da Equação 4.1 e para o cálculo da sensibilidade será utilizado o S_{bulk} que é a porcentagem de variação por índice de refração, esta é uma medida que fala do inverso do mínimo de variação que o sensor é capaz de detectar. Por exemplo, no trabalho (37) houve um limite de detecção de $5,88 \times 10^{-4}$ cujo inverso chega a $1700\%/RIU^1$ e sua fórmula é dada na Equação 4.2.

$$r^2 = \left(\frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$S_{bulk} = \left(\frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2} \right) * 100 \quad (4.2)$$

Nas Equações 4.1 e 4.2, os valores x são as saídas de potência para cada variação do parâmetro em otimização e y são os índices de refração que variam de 1,33 a 1,38. Em razão do favorecimento da linearidade, a maior encontrada dentre os resultados será priorizada a menos que mais de uma possua r^2 superior a 0,99 ou que a diferença entre as maiores seja pequena o suficiente em relação ao ganho de S_{bulk} , tendo este por critério de desempate, como o maior em módulo².

4.1.3 Guia de Onda Reto

Após as definições sobre o funcionamento do *software* e comparação de resultados 4.1.2, os estudos relacionados a otimização do sensor foram iniciados com simulações de um guia de onda “reto”, isto é, sem modificações estruturais, como na Figura 4, onde foi analisada a sensibilidade para efeitos de comparação futura.

Como dito antes, para comparar a eficiência desse guia de onda sem modificação estrutural com outros futuros sensores com modificações, empregamos a metodologia para extrair a sensibilidade, descrita na seção anterior, e computamos o S_{Bulk} . Os resultados obtidos para o modo TE propagado no guia reto foi uma sensibilidade de apenas $1\%/RIU$, e um R^2 igual a 0,9566. Para o modo TM, encontrou-se uma sensibilidade 5x maior, $5\%/RIU$, com um R^2 igual a 0,9977. Esses valores são bastante reduzidos, o que torna as modificações estruturais essenciais para melhorar a eficiência de sensores baseados em guias de onda.

¹ RIU: Variação de Índice de Refração

² Haverá uma discussão à frente do motivo de que ele possa ser negativo a depender do parâmetro variado

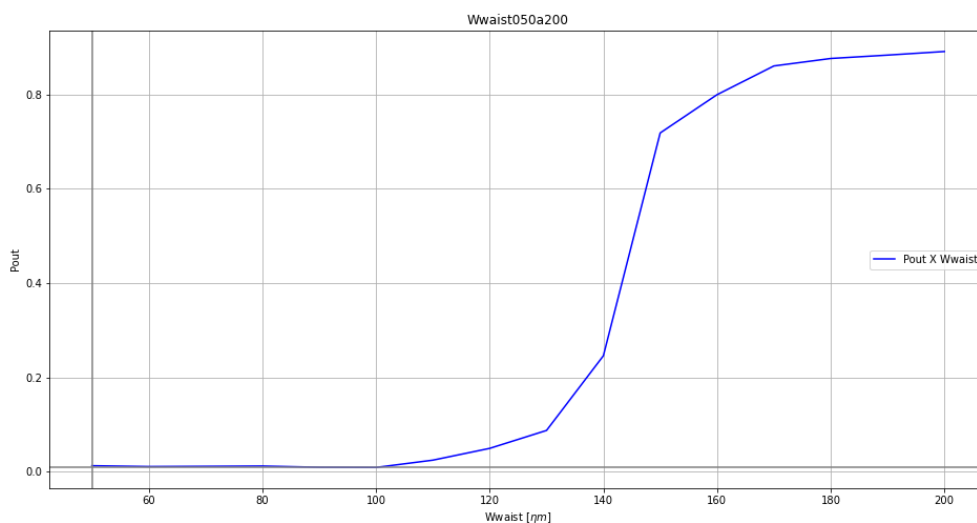
Assim sendo, nas próximas etapas serão abordadas as otimizações que se utilizam de modificações estruturais no dispositivo para garantir a diferença de potência na saída do guia de onda em acordo com variações no índice de refração do analito.

4.1.4 Guia de Onda Estrangulado

A primeira modificação planejada em um guia de onda capaz de impactar sua sensibilidade foi o estrangulamento, como apresentado na Figura 10. É bem sabido que o estrangulamento de uma fibra ou um guia de onda integrado garante o aumento da interação luz-analito (34). Logo, ele se tornou o primeiro passo de investigação deste trabalho.

Com o objetivo de reduzir o número de simulações e, assim, o tempo dispensado com obtenção dos resultados, primeiro variou-se apenas o parâmetro desejado e, encontrando onde existe variação de potência da entrada pela saída, variou-se o índice de refração simultaneamente para obtenção de qual dimensão permite obter a maior sensibilidade. Tendo essa estratégia em vista, o primeiro parâmetro variado foi W_{waist} para o modo TE, e o resultado obtido pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Potência na saída do guia em função da Variação de W_{waist} para o modo TE.



Fonte: Autor

A Figura 11 apresenta o gráfico da saída de potência normalizada pela potência de entrada ($P_{in} = 1W$). Analisando esse resultado, vê-se que para valores de W_{waist} entre 120 nm e 180 nm tem-se uma variação de quase 90% na potência de saída e é nessa faixa de W_{waist} que se deve buscar a maior sensibilidade.

Na Tabela 1 estão os valores de sensibilidade e linearidade calculados como foi explicitado em 4.1.2. Sendo assim, o melhor valor que se obtém é de 140 nm para W_{waist} ,

mesmo que para $180\eta m$ e $170\eta m$ a linearidade se apresenta maior, a sensibilidade aumenta em mais de 10 vezes para $140\eta m$. Sendo assim, este valor se mostra muito mais promissor a ser otimizado que os anteriores na tentativa de não só obter uma variação linear. Assim sendo, são iniciadas as próximas simulações para otimização do Lwaist.

Tabela 1 – Variação Wwaist para o modo TE estrangulado

Wwaist [ηm]	Sbulk(%/RIU)	R ²
120	343	0.8898
130	1109	0.9133
140	1194	0.93
150	221	0.853
160	138	0.8606
170	57	0.9483
180	28	0.9543

Uma vez que já houve a exposição do ponto de partida e a fim de objetificar a exposição deste Trabalho de Conclusão de Curso, esse primeiro gráfico de localização da variação de potência não será mais apresentando, ficando apenas as tabelas com as sensibilidades dos tamanhos mais promissores. Observe na Tabela 2 que o valor escolhido deve ser e foi de $25 \mu m$ para Lwaist, obtido após a etapa de otimização.

Tabela 2 – Variação Lwaist para o modo TE Estrangulado

Lwaist [μm]	Sbulk(%/RIU)	R ²
15	940	0.962
20	979	0.9808
25	1194	0.93
30	1173	0.8167
35	1183	0.7825
40	1111	0.8304

Tabela 3 – Variação Ltaper para o modo TE estrangulado

Ltaper [μm]	Sbulk(%/RIU)	R ²
5	1163	0.9457
10	1160	0.9219
15	1194	0.93
20	1289	0.8993
25	1276	0.8986
30	1142	0.9277

Com a tabela 3 obteve-se que o valor de Ltaper deve ser de $15\mu m$. Assim, chega-se ao dispositivo ótimo para o modo TE com Wwaist de $140\eta m$, Lwaist de $25\mu m$ e Ltaper de $15\mu m$.

Acabadas as simulações para modo TE, iniciam-se para o modo TM. Variando W_{waist} , as sensibilidades encontradas estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Variação W_{waist} para o modo TM estrangulado

W_{waist} [ηm]	Sbulk(%/RIU)	R^2
80	530	0.7806
90	1351	0.9836
100	212	0.9619
110	103	0.9447
120	64	0.9773

Com isso, chega-se a $90\eta m$ para W_{waist} e, na Tabela 5 vê-se que o melhor para L_{waist} é $30\mu m$.

Tabela 5 – Variação L_{waist} para o modo TM estrangulado

L_{waist} [μm]	Sbulk(%/RIU)	R^2
20	1018	0.9963
25	1189	0.9939
30	1351	0.9836
35	1435	0.9639
40	1441	0.9417

Tabela 6 – Variação L_{taper} para o modo TM estrangulado

L_{taper} [μm]	Sbulk(%/RIU)	R^2
15	1376	0.9805
20	1347	0.9821
25	1384	0.977
30	1390	0.983
35	1375	0.9809
40	1374	0.9833
45	1366	0.9791

Por fim, com os resultado da Tabela 6, têm-se que os melhores valores são: W_{waist} de $90\eta m$, L_{waist} de $30\mu m$ e L_{taper} de $30\mu m$. O resultado final de ambos os modos com apenas o estrangulamento pode ser observado na Tabela 7

Tabela 7 – Resultado de otimização final para a técnica de estrangulamento

Modo	$W_{waist}[\eta m]$	$L_{waist}[\mu m]$	$L_{taper} [\mu m]$	Sbulk(%/RIU)	R^2
TE	140	25	15	1194	0.93
TM	90	30	30	1390	0.983

Analisando esse resultado é possível concluir que o sensor otimizado para TE possui uma sensibilidade Sbulk quase 1200 vezes maior do que o sensor de guia de onda sem

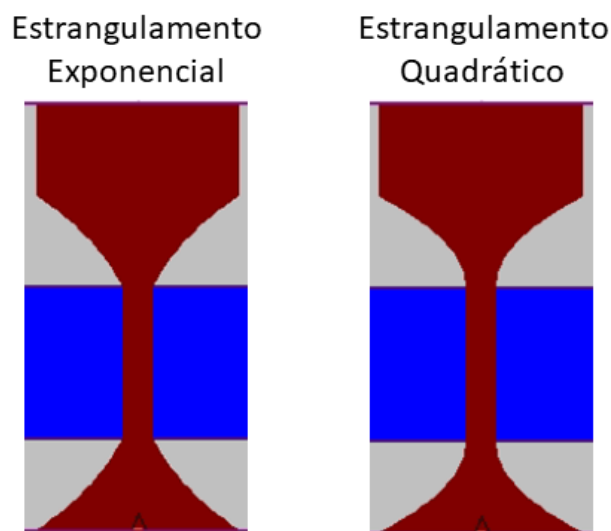
estrangulamento. Enquanto, para o caso do sensor trabalhando em polarização TM, o aumento da sensibilidade com a implementação do estrangulamento foi de 278 vezes. Com relação à linearidade, o sensor trabalhando em polarização TM foi o que apresentou o maior valor, porém, ambos possuem valores superiores a 0.9.

4.1.5 Modificação no Formato do Estrangulamento

Anteriormente, foram trabalhados o guia sem qualquer modificação, chamado de guia "reto" (Subseção 4.1.3), e o guia estrangulado (Subseção 4.1.4). Este último, como se observa na Figura 10, teve um estrangulamento linear, ou seja, o guia tinha W_{waist} de largura inicial e se reduzia até atingir L_{waist} a um comprimento L_{taper} de forma retilínea.

Observando-se tal desenho foi pensado em modificar a forma com que se tem estrangulado o guia até então. Como dois formatos são fornecidos pelo software RSoft CAD EnvironmentTM, utilizou-se destes para os estudos de como isso afetaria a qualidade do guia como sensor de índice de refração do analito alvo. Ambos os formatos podem ser observados na Figura 12, sendo o formato exponencial e quadrático:

Figura 12 – Suavização do estrangulamento do guia



Fonte: Autor

O formato exponencial com as especificações da otimização do estrangulamento comum teve como resultado o que se segue na Tabela 12 no Apêndice A para o modo TE e para TM o apresentado na Tabela 13 também no Apêndice A, a partir de agora todas as informações tabeladas estarão presentes neste apêndice para melhor apresentação dos resultados. Ou seja, $S_{bulk} = 1187\%/RIU$ e $R^2 = 0,9229$ para TE e $S_{bulk} = 1389\%/RIU$ e $R^2 = 0,9774$ que o coloca muito próximo do guia estrangulado de forma linear³, mas ainda inferior em todos os parâmetros.

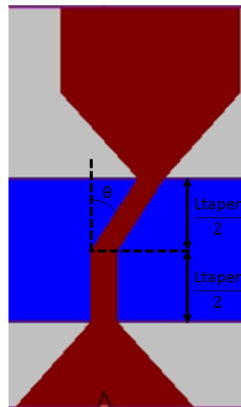
³ Apresentava 1194%/RIU de sensibilidade e $R^2 = 0,93$ para TE e, em TM, 1390%/RIU e linearidade de 0,983

Enquanto o formado quadrático também apresenta piora em relação a linearidade (Em modo TE $R^2 = 0,91$ e em TM $R^2 = 0,9463$), ainda com uma redução de 4% em modo TE de 1194 para 1152% por variação do índice de refração, mas garante um salto de quase 10% a mais na sensibilidade para o modo TM de 1390% para 1509%/RIU. Resultados que são apresentados respectivamente para modo TE e TM nas Tabelas 14 e 15, que se apresentam no Apêndice A como já explicado anteriormente.

4.1.6 Curvatura do Guia durante o Estrangulamento

Com o objetivo de aumentar a diferença na saída de potência entre os índices de refração em um mesmo guia, ou seja, aumentar a sensibilidade homogênea, S_{bulk} , pensou-se na possibilidade de curvar o guia o que implicaria em menos evanescência retornando ao guia, dependendo do analito. Nesse sentido, implementamos a ideia de uma curvatura na região estrangulada do sensor e essa ideia foi desenhada no pacote RSoft CAD EnvironmentTM como exibido na Figura 13:

Figura 13 – Curvatura do guia durante o estrangulamento



Fonte: Autor

Para que tal modificação fosse possível houve a necessidade de aumentar os limites da simulação (retângulo roxo apresentado na Figura 10), uma vez que essa curva causa um aumento na largura do dispositivo como um todo. Dessa forma, foi elaborada uma função que manteve a cada variação do ângulo θ uma distância de $2\mu m$ à esquerda da entrada de luz e à direita da saída.

Com essa nova modificação e uso da otimização das dimensões do guia estrangulado foi variado o ângulo θ para que pudesse ser encontrado um valor promissor para otimização. Tal variação começou com passos maiores de 0 a 30° e se reduzindo até que se encontrou o valor de $1,2^\circ$ como curvatura mais promissora, vide Tabela 16.

Estabelecida a curvatura foi então seguido o procedimento de otimização desta nova estrutura em modo TE. Sendo assim, com base nas Tabelas 17, 18 e 19 que são os resultados das variações em sequência fixando-se o melhor valor para o parâmetro anterior

e fixando-se os ainda não aferidos pela otimização de estrangulamento da Subseção 4.1.4 que estão apresentados na Tabela 7, em modo TE estabeleceu-se W_{waist} de $140 \mu m$, L_{waist} em $25\eta n$ e L_{taper} como $25\eta n$ atingindo $1301\%/RIU$ de sensibilidade homogênea e uma linearidade de 0,902.

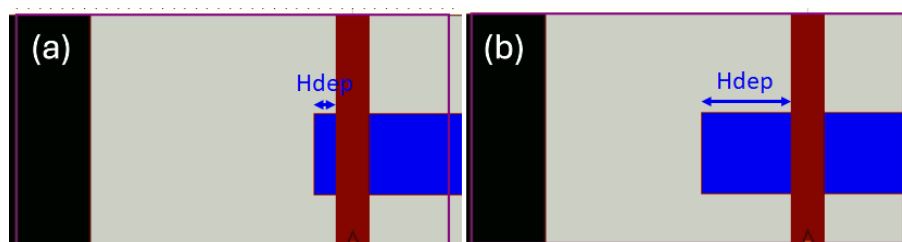
Essa estrutura em modo TM ficou otimizada com W_{waist} de $90 \mu m$, L_{waist} em $30\eta n$ e L_{taper} como $35\eta n$ atingindo $1355\%/RIU$ de sensibilidade homogênea e uma linearidade de 0,9831, como apresentado pelas Tabelas 20, 21 e 22 seguindo o método explicitado no parágrafo anterior.

Portanto, conclui-se que essa modificação é inferior ao estrangulamento simples, pois, embora possua um ganho de sensibilidade de quase 9%, perde 3 décimos no parâmetro de linearidade para o modo TE que é bem indesejado e, ainda, para TM há apenas uma piora na sensibilidade.

4.1.7 Guia Suspenso em Analito

Na sequência, foi investigada uma segunda ideia com potencial para aumentar ainda mais essa interação luz-analito: deixar o guia estrangulado suspenso, o que garante que ele esteja envolto pelo analito, aumentando a área de interação luz-analito. Foram estudados os efeitos como na otimização do trabalho anterior e então foi feito com que o nível do analito descesse em alguns níveis como se segue na Figura 14:

Figura 14 – Variação da suspensão do guia em analito. Em (a) vê-se uma suspensão de $200 \eta m$ e em (b), de $600 \eta m$.



Fonte: Autor

Para esta ideia, para cada H_{deep} foi repetido o trabalho de otimização anterior. Por isso, foi limitado a estudar 3 suspensões diferentes, 200, 600 e $1000 \eta m$ e, na sequência, havendo um resultado promissor, serão investigadas as proximidades deste resultado. Os dados serão apresentados abaixo com cada item demonstrando a respectiva dimensão de suspensão e, em cada um deles, serão apresentados as otimizações obtidas para cada polarização. Com viés de apresentar melhor os resultados, estes serão ordenados por profundidade da imersão do guia em analito, sendo a ordem 100, 200, 300, 600 e $1000 \eta m$.

1. Resultados para uma suspensão do guia de $100 \eta m$:

a) Resultados para polarização TE:

Na Tabela 23 se encontram a sensibilidade (S_{bulk}) e o R^2 que são os parâmetros levados em consideração na escolha do tamanho do parâmetro investigado, nesse caso o parâmetro W_{waist} , como feito anteriormente na Subseção 4.1.4.

A partir da técnica já empregada, escolheu-se o $140\eta m$ para W_{waist} e se variou L_{waist} para encontrar o espaço mais propício para simular com variação de índice de refração, vide Tabela 24.

Então foi escolhido o valor de $25\mu m$ para L_{waist} por possuir o maior R^2 . Para L_{taper} , fica claro que o valor de $15\mu m$ se destacou por possuir maior sensibilidade homogênea e linearidade que outros tamanhos, parâmetros apresentados na Tabela 25.

Assim, os valores otimizados encontrados foram: $140\eta m$ para W_{waist} , $25\mu m$ para L_{waist} e $15\mu m$ para L_{taper} . Com esses valores, o sensor apresentou uma sensibilidade de $1443\%/RIU$, com um R^2 de $0,9948$, garantindo uma excelente linearidade.

b) Resultados para polarização TM:

Aqui, iniciaram-se os trabalhos para o modo TM com H_{deep} de $100\eta m$, vide Tabela 26 para os valores de sensibilidade e linearidade do sensor em função da variação de W_{waist} .

O valor escolhido foi de $90\eta m$ para W_{waist} e na Tabela 27 pode-se observar que $20\mu m$ é um bom valor para L_{waist} mesmo que não supere os $0,99$ de R^2 como os $15\mu m$ por possuir maior sensibilidade, uma vez que a otimização de L_{taper} pode ser capaz de realizar esse ajuste. Como acabou acontecendo, veja a Tabela 28.

Com base nesta última tabela, Tabela 28, tem-se que o melhor valor é de $30\mu m$. Assim, temos $90\eta m$ para W_{waist} , $20\mu m$ para L_{waist} e $30\mu m$ para L_{taper} . Com esses valores, o sensor apresentou um S_{bulk} de $1203\%/RIU$, com um R^2 de $0,9913$, garantindo uma excelente linearidade.

2. Resultados para uma suspensão do guia de $200\eta m$:

a) Resultados para polarização TE:

Na Tabela 29 se encontram a sensibilidade (S_{bulk}) e o R^2 que são os parâmetros levados em consideração na escolha do tamanho do parâmetro investigado, como feito anteriormente em 4.1.4.

Como antes, escolheu-se o $140\eta m$ e se variou L_{waist} para encontrar o espaço mais propício para simular com variação de índice de refração, vide Tabela 30. Aqui foi escolhido o valor de $25\mu m$ para L_{waist} . Para L_{taper} , fica claro que o valor de $15\mu m$ por critério de desempate de maior S_{bulk} como apresentado na Tabela 31. Com esses novos valores foi feita uma reotimização para W_{waist} na Tabela 32.

Então os valores otimizados encontrados foram: $138\eta m$ para W_{waist} , $25\mu m$ para L_{waist} e $15\mu m$ para L_{taper} . Com esses valores, o sensor apresentou uma sensibilidade de $1307\%/RIU$, com um R^2 de $0,9972$, garantindo uma excelente linearidade.

b) Resultados para polarização TM:

iniciando os trabalhos para o modo TM com H_{deep} de $200\eta m$, vide Tabela 33, para os valores de sensibilidade e linearidade do sensor em função da variação de W_{waist} . O valor escolhido foi de $95\eta m$ para W_{waist} e na Tabela 34 pode-se observar que $30\mu m$ é o melhor valor para L_{waist} . Com esses valores, otimizou-se o valor de L_{taper} , mostrado na Tabela 35.

Com base nesta última tabela, Tabela 35, tem-se que o melhor valor é $25\mu m$ e depois seguiu-se uma reotimização de W_{waist} (Tabela 36) onde se descobriu o mesmo valor de antes como melhor. Assim, tem-se $95\eta m$ para W_{waist} , $30\mu m$ para L_{waist} e $25\mu m$ para L_{taper} . Com esses valores, o sensor apresentou uma sensibilidade de $1081\%/RIU$, com um R^2 de $0,9904$, garantindo uma excelente linearidade. No entanto, essa sensibilidade pode ser incrementada para até $1208\%/RIU$, com o preço de uma redução na linearidade para 0.9279 .

Dessa forma, este acabou sendo o melhor resultado entre as simulações iniciais (200 , 600 e $1000\eta m$). Implicando nas simulação dos valores 300 e $100\eta m$, sendo este último o enumerado 1. dessa lista, conforme explicada a ordem em ascensão de suspensão.

3. Resultados para uma suspensão do guia de $300\eta m$:

a) Resultados para polarização TE:

A Tabela 37 apresenta a sensibilidade (S_{bulk}) e o R^2 que são aquilo que se deve levar em consideração na escolha da largura que o guia possui quando estrangulado (W_{waist}), como se tem feito para outros tamanhos de H_{deep} , profundidade que o guia fica submerso em analito.

Como antes, escolheu-se também $140\eta m$ para W_{waist} e se variou L_{waist} para encontrar o espaço mais propício para simular com variação de índice de refração, vide Tabela 38.

Aqui foi escolhido o valor de $25\mu m$ para L_{waist} por dosagem entre a maior sensibilidade possível levando em conta uma linearidade que possa atingir o 0,99 desejado e os valores com maior linearidade têm sensibilidade muito abaixo do que se pretende atingir. Para L_{taper} , o valor de $25\mu m$ deve ser escolhido por apresentar maior valor para R^2 como apresentado na Tabela 39.

Portanto, os valores otimizados encontrados foram: $140\eta m$ para W_{waist} , $25\mu m$ para L_{waist} e $25\mu m$ para L_{taper} . Com o sensor atingindo uma sensibilidade de 636%/RIU, com um R^2 de 0,9784, descartando essa profundidade como ótima.

b) Resultados para polarização TM:

Mesmo assim, por execução em paralelo, os trabalhos para o modo TM com H_{deep} de $300\eta m$, a Tabela 40 exibe valores de sensibilidade e linearidade do sensor em função da variação de W_{waist} .

O valor escolhido foi de $90\eta m$ para W_{waist} eleito por maior sensibilidade e a Tabela 41 mostra que $30\mu m$ é o valor para L_{waist} que equilibra das maiores sensibilidades sem arruinar a linearidade. Com esses valores, otimizou-se o valor de L_{taper} , mostrado na Tabela 42.

Com base nesta última tabela, Tabela 42, tem-se que o melhor valor é $35\mu m$ por atender o critério de $R^2 \geq 0,99$ com maior S_{bulk} . Em suma, temos $90\eta m$ para W_{waist} , $30\mu m$ para L_{waist} e $35\mu m$ para L_{taper} . Com esses valores, o sensor apresentou uma sensibilidade de 645%/RIU, com um R^2 de 0,9947 implicando em sensibilidade que também descarta $H_{deep} = 300\eta m$ em comparação à outros resultados.

4. Resultados para uma suspensão do guia de $600\eta m$:

a) Resultados para a polarização TE:

Utilizando a metodologia já descrita, obteve-se os resultados para simulações com W_{waist} na Tabela 43.

Analisando essa tabela, W_{waist} é fixado em $90\eta m$ e se prossegue para a otimização de L_{waist} onde é atingido o valor ótimo de $35\mu m$ como apresentado na Tabela 44.

E, por fim, com os resultados de L_{taper} da Tabela 45, chega-se aos valores de $90\eta m$ para W_{waist} , $35\mu m$ para L_{waist} e $70\mu m$ para L_{taper} atingindo sensibili-

dade de 896%/RIU e R^2 igual a 0,734.

b) Resultados para a polarização TM:

Seguem resultados para simulações com W_{waist} na Tabela 46.

Com isso, W_{waist} é fixado em $55\eta m$ e se pode prosseguir para a otimização de L_{waist} onde se atinge o valor ótimo de $55\mu m$ como apresentado na Tabela 47.

E, por fim, com os resultados de L_{taper} da Tabela 48, obtém-se os valores de $55\eta m$ para W_{waist} , $55\mu m$ para L_{waist} e $155\mu m$ para L_{taper} atingindo sensibilidade de -232%/RIU e R^2 igual a 0,8548.

5. Resultados para uma suspensão do guia de $1000\eta m$:

a) Resultados para polarização TE:

Seguem resultados para simulações com W_{waist} na Tabela 49 no Apêndice A.

Com isso, W_{waist} é fixado em $90\eta m$ e inicia a otimização de L_{waist} onde se obtém o valor ótimo de $50\mu m$ como apresentado na Tabela 50.

E, por fim, com os resultados de L_{taper} da Tabela 51, são atingidos os valores de $90\eta m$ para W_{waist} , $50\mu m$ para L_{waist} e $55\mu m$ para L_{taper} implicando em sensibilidade de -853%/RIU e R^2 igual a 0,4988.

b) Resultados para polarização TM:

Os resultados para simulações com W_{waist} estão exibidos na Tabela 52.

Assim, W_{waist} é fixado em $90\eta m$ e avança para a otimização de L_{waist} onde o experimento atinge o valor ótimo de $55\mu m$ como apresentado na Tabela 53.

Finalizando com os resultados de L_{taper} da Tabela 54, os valores de $55\eta m$ para W_{waist} , $90\mu m$ para L_{waist} e $55\mu m$ para L_{taper} são obtidos para atingir sensibilidade de -117%/RIU e R^2 igual a 0,9538.

A Tabela 8 mostra os resultados finais de cada otimização para os Hdeep's simulados. Analisando essa tabela, é possível concluir que a medida que o guia foi ficando mais suspenso, tanto a sensibilidade quanto a linearidade são prejudicadas, implicando na conclusão de que $100\eta m$ de suspensão foi o melhor valor obtido nesta Subseção, sendo ainda melhor que todos os resultados expostos até então uma vez que atinge os requisitos da linearidade maior que 0,99.

Tabela 8 – Resultado de otimização final para a técnica de suspensão do guia em analito

Hdeep[ηm]	Modo	Wwaist[ηm]	Lwaist[μm]	Ltaper [μm]	$S_{bulk}(\%/RIU)$	R^2
100	TE	140	25	15	1443	0.9948
	TM	90	20	30	1203	0.9913
200	TE	138	25	15	1307	0.9972
	TM	95	30	25	1081	0.9904
300	TE	140	25	25	636	0.9784
	TM	90	30	35	645	0.9947
600	TE	90	35	70	896	0.734
	TM	55	55	155	232	0.8548
1000	TE	90	50	55	853	0.4988
	TM	90	55	55	117	0.9538

4.1.8 Estudo da Altura da deposição de Óxido de Silício

No ideal de se produzir dispositivos com menor complexidade, houve uma tentativa anterior a utilização do material absorvedor, que já estava prevista no planejamento deste trabalho, utilizar-se do substrato de Silício para tal função. Para isso, estudou-se a variação da altura da camada de Dióxido de Silício marcada na Figura 10 como 2, $2\mu m$. Entretanto, como se vê na Tabela 9, os resultados não foram satisfatórios nem quanto ao mero estrangulamento original em relação a sensibilidade, mostrando não ser conveniente apenas a redução da camada de Óxido de Silício para melhorar a eficiência do sensor.

Tabela 9 – Variação de Altura do Óxido em modo TE

Altura[ηm]	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
500	984	0.9977	1.02×10^{-03}
600	1011	0.9983	9.89×10^{-04}
700	1026	0.9969	9.75×10^{-04}
800	1049	0.9947	9.53×10^{-04}
900	823	0.9928	1.22×10^{-03}
1000	909	0.994	1.10×10^{-03}
1100	1014	0.9877	9.86×10^{-04}
1200	1076	0.9796	9.29×10^{-04}
1300	1126	0.9715	8.88×10^{-04}

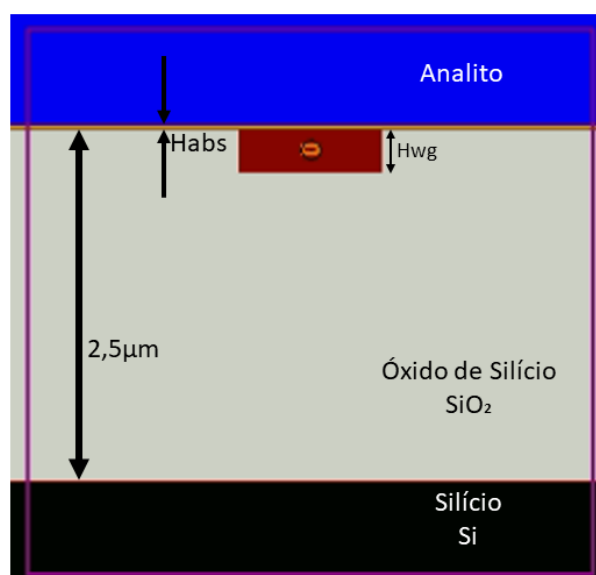
4.1.9 Adição de Material Absorvedor

Aqui, iniciou-se o estudo da adição de um material absorvedor na construção do guia de onda estrangulado a fim de controlar a interação luz-analito junto com a presença do efeito de absorção e buscar um aumento na sensibilidade do sensor já otimizado. Na sequência, o estudo apresenta-se seccionado em acordo com a posição do Silício Amorfo, no caso, o material absorvedor em questão.

4.1.9.1 Sobreposição de Material Absorvedor

Por questões de construção, optou-se por iniciar o estudo da adição de materiais absorvedores, no caso, o Silício Amorfo, com uma camada sobre o Si_3N_4 (guia de onda) e o SiO_2 , de forma que ocupasse toda a região nas direções x e z, como na Figura 15, onde o material absorvedor está representado com uma fina camada dourada entre o SiO_2 (em cinza) e o analito (em azul). Essa disposição é, em termos de microfabricação, a mais simples de ser implementada, uma vez que basta realizar a deposição do Silício Amorfo antes da deposição do dióxido de silício que recobre o dispositivo. As margens e os passos da simulação se mantiveram como os propostos na Subseção 4.1.1.

Figura 15 – Adição do material absorvedor



Fonte: Autor

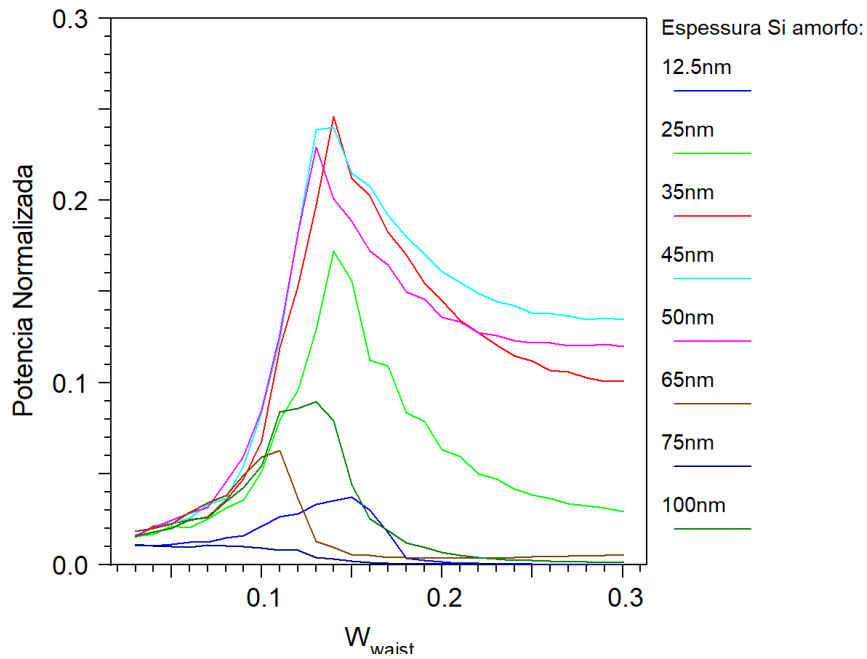
Dessa forma, foi gerada a tabela apresentada na Figura 16, onde os resultados se apresentaram favoráveis para W_{waist} de 35 a 50 ηm , mas ainda assim com baixa variação na potência normalizada que, ao fim da otimização, implicaria em baixa sensibilidade S_{bulk} .

Enfim, a camada mesmo que fina de Silício Amorfo é capaz de modificar a interação entre luz-analito, mas se mostra próximo dos piores resultados vistos. Por isso, a disposição aqui estudada acabou sendo descartada antes mesmo de sua otimização final por conta desses estudos iniciais.

4.1.9.2 Subposição de Material Absorvedor

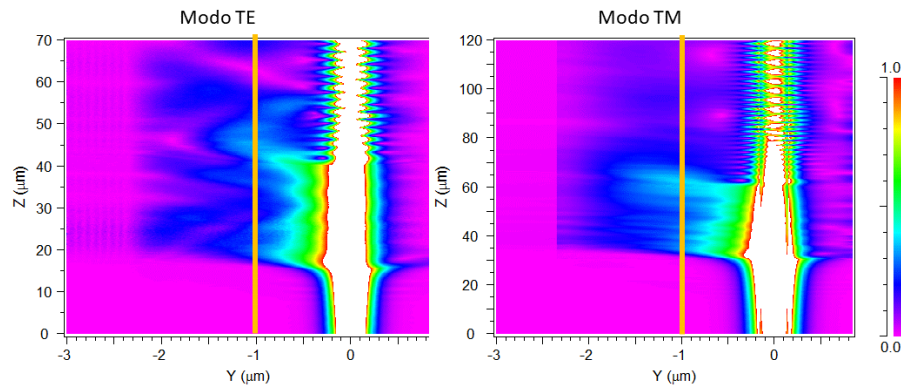
Com isso em vista, foram analisadas as imagens da interação luz-analito dentro do dispositivo e se observou uma região de frote interação da luz em torno de $1\mu m$ de profundidade para ambos os modos, observe a Figura 17, onde foi traçada uma linha laranja em $1\mu m$ de profundidade após a entrada de luz.

Figura 16 – Estudo do funcionamento da variação potência conforme se modifica W_{waist} e Habs



Fonte: Autor

Figura 17 – Interação luz analito no dispositivo otimizado. Para ambas as imagens foi utilizado o índice de refração 1,35.

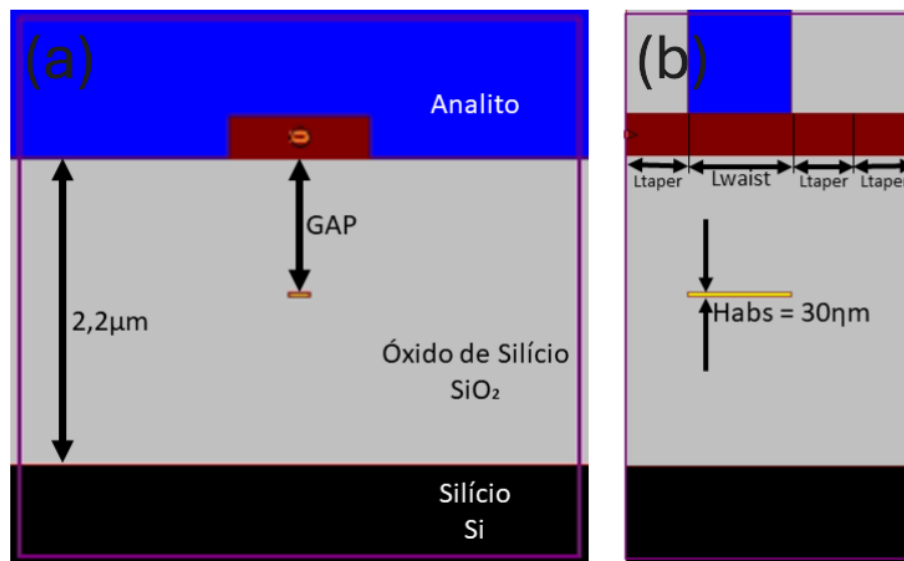


Fonte: Autor

O raciocínio que se teve foi de evitar aproveitar essa região para aumentar a absorção posicionando uma camada de Silício Amorfo e, assim, incrementar a sensibilidade. O dispositivo a que se chegou foi mera adição do material absorvedor nessa faixa de $1\mu m$ com as dimensões do guia estrangulado com espessura de $30nm$, a Figura 18 o exibe com clareza.

Com essa ideia pronta, o que restou foi sua otimização, na qual se obteve melhores resultados para modo TE, a um S_{bulk} de 1456% por variação de índice de refração e linearidade $R^2 = 0,9775$, enquanto, para modo TM, a sensibilidade de 1513%/RIU e $R^2 = 0,9608$. As dimensões foram de $130nm$ para W_{waist} , $30\mu m$ para L_{waist} e $40\mu m$ para

Figura 18 – Adição do material absorvedor por baixo do guia. (a) Vista frontal e (b) vista lateral, ambas com seção ao meio.



Fonte: Autor

Ltaper em modo TE, cujos passos para obtenção estão expostos nas Tabelas 55, 56 e 57. E, para o modo TM, as dimensões ficaram $90\eta m$ para W_{waist} , $35\mu m$ para L_{waist} e $35\mu m$ para L_{taper} como pode ser visto nas Tabelas 58, 59 e 60.

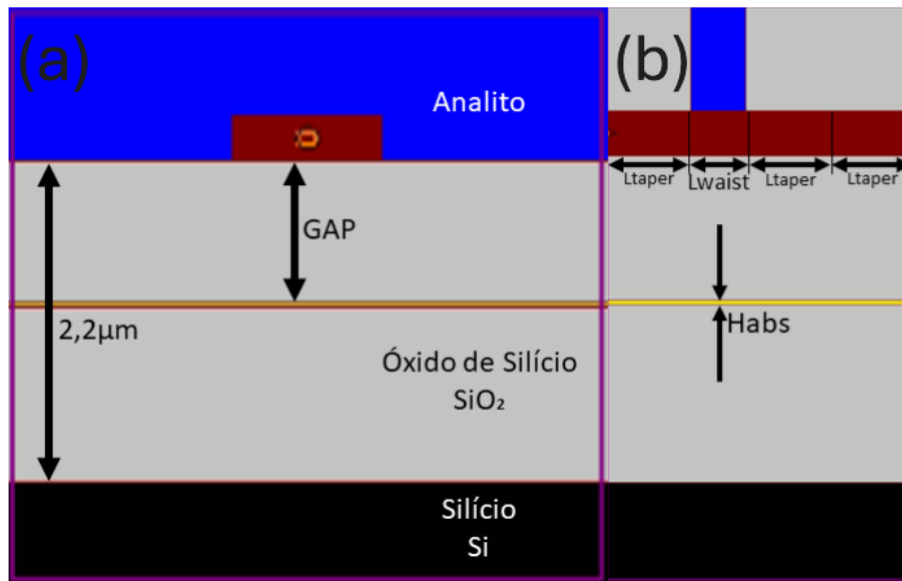
Com isso, percebeu-se que essa última modificação se apresenta promissora, implicando na busca por uma melhor otimização nos seguintes parâmetros: espessura, largura e comprimento da camada de Silício Amorfo, além do GAP, nome utilizado para representar a distância entre o guia de onda e o meio dessa camada absorvedora.

4.1.9.3 Otimização da Subposição de Material Absorvedor

Havendo bons resultados de localização e espessura em [Subposição de Material Absorvedor](#) que teve embasamento na revisão bibliográfica e observação da evanescência para tal determinação, foi decidido fixar esses valores e iniciar com uma camada completa de Silício Amorfo em meio ao Óxido de Silício por ser a fabricação menos complexa de se realizar, contando apenas com uma simples deposição uniforme do material durante a etapa de deposição do óxido de silício. O *design* desse projeto se encontra na Figura 19.

Vale ressaltar que os parâmetros W_{waist} , L_{waist} , L_{taper} , GAP e Habs foram fixados como demonstra a Equação 4.3, os resultados dessa e das próximas tentativas de melhoria com relação a disposição da deposição de Silício Amorfo estão todas expostas na

Figura 19 – Deposição de uma camada completa de Silício Amorfo com GAP de $1\mu m$ e Habs de $30\eta m$. (a) Vista frontal e (b) vista lateral, ambas com seção ao meio.



Fonte: Autor

Tabela 10.

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{waist} = 130\eta m \\ L_{waist} = 30\eta m \\ L_{taper} = 45\eta m \\ GAP = 1000\eta m \\ H_{abs} = 30\eta m \end{array} \right. \quad (4.3)$$

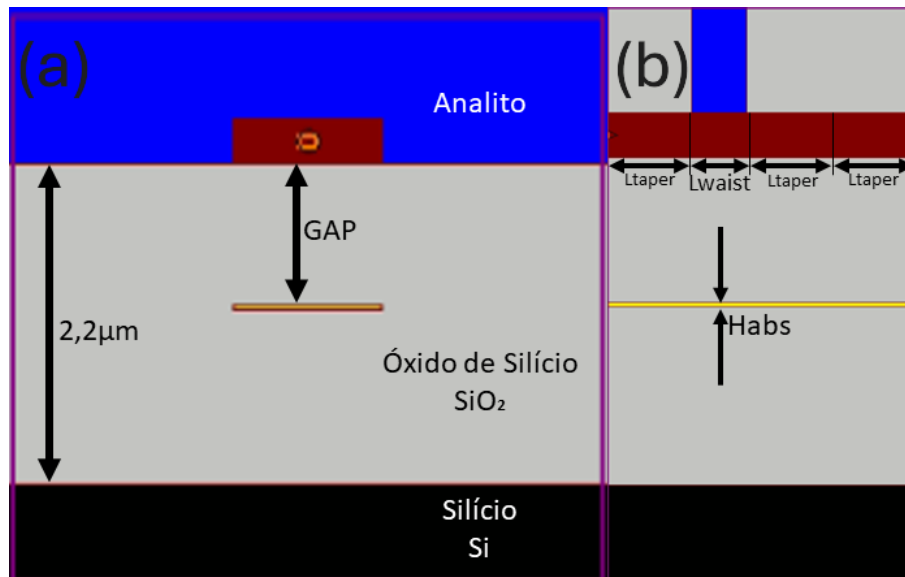
Em seguida, foram realizadas as simulações de duas faixas com o mesmo comprimento do dispositivo, uma com largura igual a inicial do Nitreto de Silício, chamada de W_{wg} , que pode ser vista na Figura 20, e outra de largura igual a do estrangulamento, chamado de W_{waist} , demonstrada pela Figura 21.

Enfim, com resultados obtidos insatisfatórios até então, registrados na Tabela 10, foi realizada a simulação da deposição de uma fita ainda de largura W_{waist} e comprimento L_{waist} , ou seja, uma deposição abaixo do guia no mesmo formato do estrangulamento, como mostrado na Figura 22.

Dessa forma, a Tabela 10 mostra os resultados obtidos para o modo TE de propagação. Analisando esses resultados, pode-se concluir que a deposição de uma fita se destacou em relação às outras possibilidades estudadas quando se considera os melhores valores de sensibilidade.

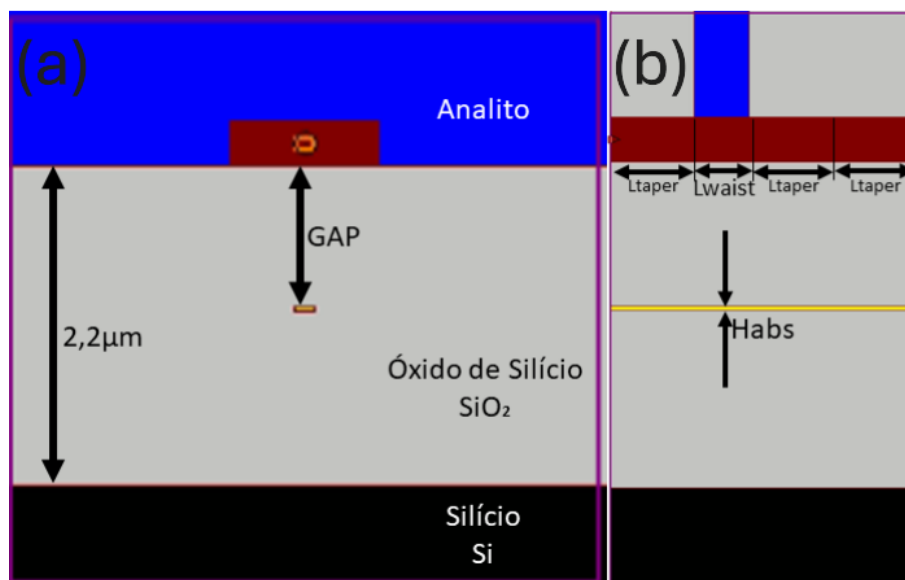
Embora as outras deposições não tenham sido promissoras, a mera deposição do material absorvedor em forma de fita já foi capaz de subir a sensibilidade em mais de 20% quando se considera apenas o estrangulamento do guia, sendo os 1194 de S_{bulk} e linearidade

Figura 20 – Deposição de uma faixa com largura W_{wg} de Silício Amorfo com GAP de $1\mu m$ e Habs de $30\eta m$. (a) Vista frontal e (b) vista lateral, ambas com seção ao meio.



Fonte: Autor

Figura 21 – Deposição de uma faixa com largura W_{waist} de Silício Amorfo com GAP de $1\mu m$ e Habs de $30\eta m$. (a) Vista frontal e (b) vista lateral, ambas com seção ao meio.



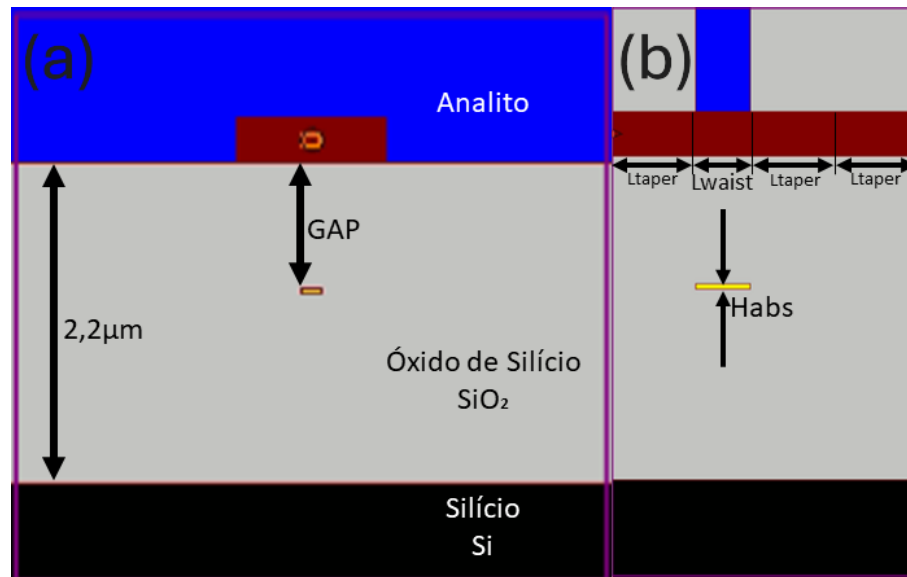
Fonte: Autor

0,93 em modo TE, nesta última a deposição fez subir 0,0475, chegando a 0,9775.

4.1.9.4 Otimização da Fita de Silício Amorfo

Com o objetivo de aumentar a sensibilidade homogênea, S_{bulk} , e a linearidade, R^2 , realizou-se a otimização do dispositivo apresentado na Figura 22 que se trata da deposição

Figura 22 – Deposição de uma fita de comprimento L_{waist} e largura W_{waist} de Silício Amorfo com GAP de $1\mu m$ e Habs de $30\eta m$. (a) Vista frontal e (b) vista lateral, ambas com seção ao meio.



Fonte: Autor

Tabela 10 – Diferentes deposições de Silício Amorfo em meio ao Óxido de Silício em modo TE

Tipo	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
Camada	755	0.9888	1.32×10^{-03}
Faixa W_{wg}	1000	0.9966	1.00×10^{-03}
Faixa W_{waist}	1000	0.9966	1.00×10^{-03}
Fita	1456	0.9775	6.87×10^{-04}

de Silício Amorfo com dimensões L_{waist} x W_{waist} , ou seja, as mesmas utilizadas no estrangulamento do guia de onda.

Por se tratar da variável de maior variação absoluta, optou-se por iniciar a otimização da altura em que o material absorvedor se encontraria, no caso, variou-se o GAP para extrair os dados de sensibilidade e linearidade. Os resultados podem ser vistos na Tabelas 61 e 62 do Apêndice Apêndice A para os modos TE e TM, respectivamente.

Com os melhores resultados sendo $900\eta m$ para o modo quasi-TE e $1100\eta m$ para quasi-TM, seguiu-se com o estudo da variação da espessura. Observe nas Tabelas 63 e 64 os dados obtidos na otimização. Nelas, observa-se que para modo TE se atinge 3 vezes o R^2 maior que 0.99 em espessuras de 15, 20 e $45\eta m$ sendo esta última a com maior sensibilidade, devendo ser a escolhida. Enquanto para TM, atinge-se melhorias tanto na sensibilidade quanto em linearidade com espessura de $15\eta m$.

Em decorrência dos guias serem projetados para polarizações diferente, não há problema que os parâmetros de dimensionamento sejam diferentes entre os modos. Em

último passo de otimização, assim como já se foi detalhado em subseções anteriores, foram dimensionados W_{waist} , L_{waist} e L_{taper} , nessa ordem de simulação e apresentação, e esses dados podem ser vistos para TE nas Tabelas 65, 66 e 67, enquanto para TM em 68, 69 e 70.

Portanto, a deposição de Silício Amorfo atuando como material absorvedor teve como melhor resultado neste trabalho os dados vistos na Equação 4.4.

$$\left\{ \begin{array}{l} GAP = 900\eta m \\ H_{abs} = 45\eta m \\ W_{waist} = 130\eta m \\ L_{waist} = 30\eta m \\ L_{taper} = 45\eta m \\ S_{bulk} = 1376 \\ R^2 = 0,9927 \end{array} \right. \quad (4.4)$$

Já para TM, os resultados se apresentam na Equação 4.5.

$$\left\{ \begin{array}{l} GAP = 1100\eta m \\ H_{abs} = 15\eta m \\ W_{waist} = 90\eta m \\ L_{waist} = 30\eta m \\ L_{taper} = 35\eta m \\ S_{bulk} = 1520 \\ R^2 = 0,9863 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

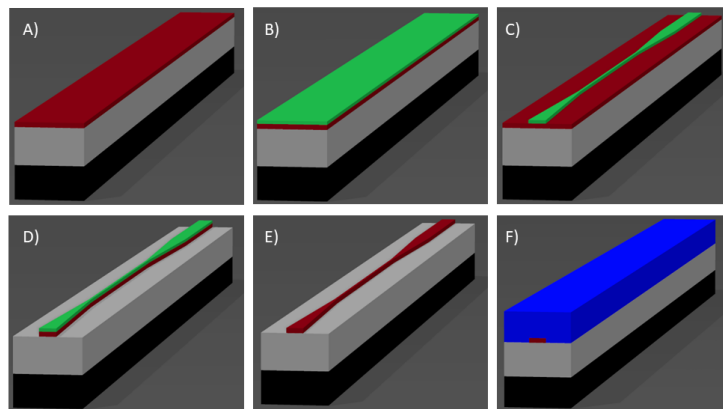
Estes resultados quando comparados a primeira tentativa de inclusão de um material absorvedor, presente em [Subposição de Material Absorvedor](#), obteve melhoria na linearidade de 0,9775 para 0,9927 em sacrifício de aproximadamente 5% em sensibilidade para modo TE, enquanto que para modo TM, a otimização se mostrou mais eficiente sendo testada dessa forma em ambos os parâmetros buscados, uma vez que a linearidade aumentou de 0,9608 para 0,9863, muito mais próximo do valor que se desejava inicialmente, e a sensibilidade com um pequeno aumento de 0,004%.

Todos os resultados relevantes obtidos foram unidos e estão apresentados na Tabela 11 em [Conclusão](#), que resume a otimização desses sensores baseados em guias estrangulados com ou sem material absorvedor.

4.2 Elaboração do Projeto para Fabricação em Laboratórios Parceiros

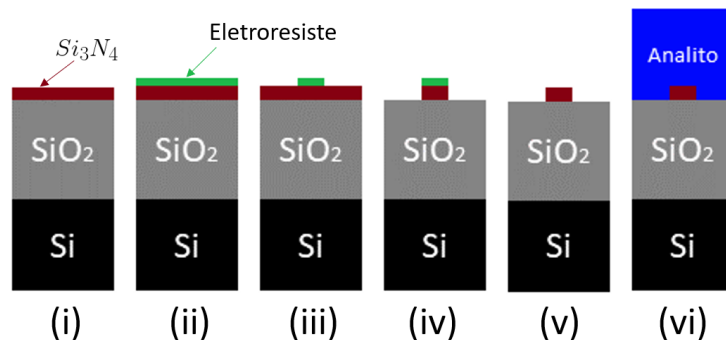
Durante elaboração de um roteiro de fabricação para os dispositivos apenas com a otimização do estrangulamento projetados em Nitreto de Silício, ficou claro que uma das dificuldades a ser enfrentada nas etapas são as dimensões nanométricas dos estrangulamentos, a fim de garantir a interação da onda evanescente com o analito. Outra dificuldade é a qualidade das paredes dos guias de onda, em particular, nas regiões de estrangulamento, uma vez que se houver alta rugosidade, as perdas de luz propagante podem ser altas e prejudicar o funcionamento do sensor. Portanto, para satisfazer essas exigências, um bom roteiro de fabricação é fundamental, bem como a calibração dos processos envolvidos, que é essencial para garantir um dispositivo com bom funcionamento. Em cada item da Figura 23 é mostrado uma a uma das etapas que integram nosso roteiro de fabricação do dispositivo, e na Figura 24 essas etapas também são demonstradas, mas em vista frontal.

Figura 23 – Etapas de fabricação do sensor baseado em um guia estrangulado: A) Refere-se à deposição de Nitreto de Silício, B) à deposição de eletroresiste, C) à litografia eletrônica após a revelação, D) à corrosão seca, E) à remoção do eletroresiste e F) à utilização do dispositivo com analito inserido.



Fonte: Autor

Figura 24 – Etapas para fabricação do dispositivo apenas estrangulado proposto, vista frontal. Que segue os mesmos passos da Figura 23.



Fonte: Autor

Conforme as Figuras 23 e 24, prevêem-se as seguintes etapas de fabricação:

1. Etapa de limpeza e deposição de Si_3N_4 sobre uma amostra contendo $2,2\mu m$ de SiO_2 sobre um substrato de Si (Figura 23(A)).
2. Etapa de espalhamento do eletroresiste (Figura 23(B)) empregando um spinner.
3. Elaboração da Máscara Virtual e escrita utilizando litografia por feixe de elétrons já com a Etapa de Revelação do eletroresiste, definindo o estrangulamento do guia de onda em eletroresiste (Figura 23(C)); nessa etapa, a máscara virtual é a responsável por garantir as dimensões projetadas para o sensor, além de tentar evitar problemas durante a escrita por feixe de elétrons, como "erros de costura", que acontecem quando o guia de onda é maior do que o campo de escrita do *e-beam*. Para o caso do e-beam presente no CCSnano, o maior campo permitido é de $1mm \times 1mm$. No entanto, é necessário investigar se nesse campo é possível alcançar resolução de escrita para fabricar o estrangulamento.
4. Etapa de corrosão do Nitreto de Silício por plasma (Figura 23(D)); nessa etapa pode ser utilizado o ICP/RIE do CCSnano, mas é necessário garantir com alguns testes que o eletroresiste resista ao tempo necessário para remoção do nitreto de silício.
5. Etapa de Limpeza do eletroresiste (Figura 23(E)). Essa etapa pode ser realizada com uma lavagem em acetona, seguida por isopropanol e corrosão com plasma de O_2 .
6. Etapa de Uso com a inserção de um analito para aferimento de seu índice de refração (Figura 23(F)). Essa já é a etapa de caracterização do sensor, onde diferentes analitos podem ser inseridos sobre o guia de onda.

A seguir, nas próximas subseções serão discutidas cada uma dessas etapas separadamente.

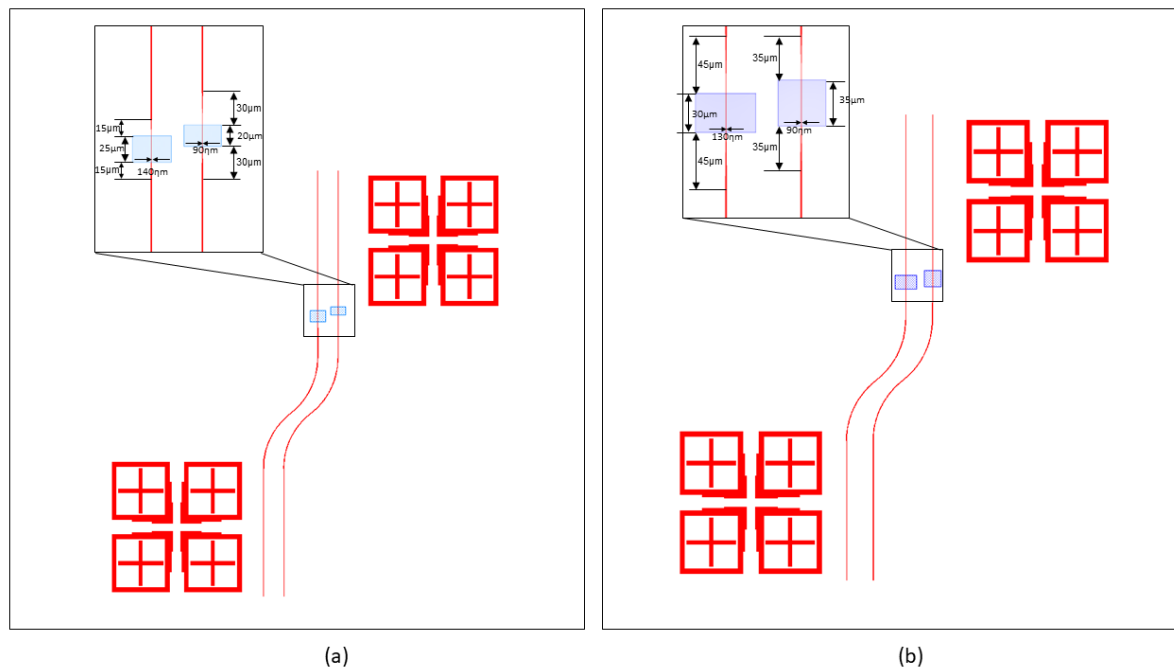
4.2.1 Projeto das máscaras

O primeiro passo na fabricação consiste no projeto da máscara virtual que será utilizada no processo de litografia por feixe de elétrons. A máscara virtual pode ser desenhada em qualquer programa gráfico e salvo em extensões GDSII ou DXF. Uma condição importante é garantir que todos os polígonos que compõem as estruturas da máscara estejam fechados e não se sobreponham, pois poderia causar dupla exposição.

Para futuras etapas de fabricação foram elaboradas duas máscaras virtuais, como mostrado na Figura 25, onde é possível observar o guia suspenso com Hdeep de $100\eta m$ em (a), sendo o da direita modo TE e o da esquerda, TM. Já na Figura 25(b) é possível observar a máscara do guia integrado com Silício Amorfo, sendo o da esquerda projetado

para o modo TE e o da direita, para TM. Em ambas as máscaras é possível ver as janelas de detecção em azul, que podem ser consideradas como uma segunda máscara para pós-processamento dos sensores. Elas são responsáveis pela abertura das janelas onde serão inseridos analitos. Para elaboração dessas máscaras, foi utilizado o software livre KLayout para importar os CADs do RSoft e construir a máscara virtual mostrada na Figura 25. Essa metodologia garante que todas as dimensões da simulação sejam preservadas.

Figura 25 – Máscaras litográficas projetadas em simulação: (a) Trata-se da otimização guia suspenso em analito Hdeep= $100\eta m$ e (b) da integração com Silício Amorfo



Fonte: Autor

Cada uma dessas máscaras é limitada pelo equipamento de escrita, ou seja, deve ser considerado um campo de 1 mm x 1mm. Nesse campo, o equipamento do CCS permite escrever tudo que está dentro dele, evitando “erros de costura”, que nada mais são do que o desalinhamento da escrita quando o equipamento troca de campo. A desvantagem desse campo é que ele reduz a resolução do equipamento, podendo causar um pouco mais de rugosidade nas paredes das estruturas fabricadas.

Vale destacar que, em ambas as máscaras, também são mostradas as marcas de alinhamento, que poderão ser utilizadas para realinhamentos futuros. Apenas para frisar, os guias de onda fora das regiões de sensoriamento possuem dimensões de $1000\eta m$ e as entradas e saídas deles possuem acopladores com as dimensões ideais obtidas em projetos anteriores que garantem acoplamentos acima de 75% de eficiência para bombeio com Fibra óptica.

4.2.2 Limpeza da Amostra

A amostra prevista para ser utilizada neste processo de fabricação consiste em um substrato de Silício com $2,2\mu\text{m}$ de SiO_2 , importada e já disponível no laboratório do grupo de pesquisa. Sobre a camada de dióxido de Silício, deverá ser depositado um filme de 300nm de Si_3N_4 por LPCVD, disponível no CCSnano. Para iniciar o processo de fabricação, seguindo as etapas da Figura 24, o primeiro passo (I) consiste na limpeza da amostra. Essa limpeza consistirá dos seguintes passos: 1. fervura da amostra com tricloro (80°C), seguido pela 2. fervura em acetona (80°C) e concluindo com 3. fervura em isopropanol (80°C). As três fervuras devem ser realizadas com tempos de 10 minutos cada. Em seguida, a amostra deverá ser seca em Nitrogênio e levada ao plasma barril. Essas etapas devem ser realizadas no LPD/Unicamp. No plasma barril a amostra deverá ser submetida a 10 minutos sob um plasma de 200 W de Oxigênio (50 sccm), o que deverá remover qualquer resíduo remanescente da limpeza orgânica (Tricloro/Acetona/Isopropanol). Por fim, antes da etapa de espalhamento de eletroresiste e litografia, a amostra deve ser submetida a uma desumidificação durante 10 minutos em uma placa quente à 200°C , o que deverá facilitar a aderência do eletroresiste.

4.2.3 Processo de litografia eletrônica

O sistema de litografia por feixe de elétrons disponível no CCSnano é um eLine Raith-150. Basicamente, esse equipamento possui um programa específico para leitura das máscaras virtuais em GDSII e ele é capaz de transferir os padrões definidos nesta máscara para a superfície de uma amostra, em escala micro ou nanométrica. Para realizar essa transferência do padrão, o software é capaz de controlar o interruptor do feixe de elétrons e as lentes eletromagnéticas de varredura do microscópio, manipulando-os de forma que o feixe siga a trajetória necessária para reproduzir os desenhos da máscara virtual na amostra desejada. Para dar início a essa etapa, após a limpeza da amostra, ela deverá ser recoberta com eletroresiste antes de ser realizado o processo de litografia. Por isso, está listada na sequência os processos planejados para etapa de litografia:

- a. Essa etapa deverá ser iniciada com a deposição de um promotor de aderência (Hexametildissilazana - HMDS) sobre a amostra à 3000 rpm por 30s, utilizando um *spinner*. Após 1 minuto de descanso, deverá ser espalhado o eletroresiste Ma-N-2405 à 3000 rpm durante 30 segundos. A amostra com o eletroresiste deverá ser levada para a placa quente à 90°C por 90 segundos. Após isso, essa amostra pode ser levada para o ELine, onde será feita a exposição utilizando uma dose de $60\mu\text{C}/\text{cm}^2$, com uma tensão de 20 kV. Essa receita já foi previamente utilizada em outros trabalhos e deverá ser ajustada novamente.
- b. A revelação da gravação poderá ser feita utilizando MIF-300 puro. O tempo de

revelação deve ser por volta de 30 segundos. Esse tempo será suficiente para remover todo o eletroresiste que não foi exposto, deixando o exposto como proteção para etapa de corrosão.

- c. Após a revelação, deverá ser realizado um recozimento na amostra em placa quente à 115°C durante 5 minutos, garantindo que o eletroresiste possa suportar a corrosão das estruturas gravadas.

4.2.4 Etapa de Corrosão Seca

O processo de corrosão planejado para remover o Nitreto de Silício das regiões que não estão protegidas pelo eletroresiste deverá ser o Inductively Coupled Plasma (ICP), também disponível no CCSNano. Este processo consiste em uma corrosão seca assistida por plasma. A característica principal do ICP com relação aos outros reatores de plasma é a adição de um indutor para melhorar a densidade do plasma, permitindo altas taxas de corrosão e melhor anisotropia, ou seja, garantindo que as paredes dos guias de onda e das cavidades tenham um perfil com baixa inclinação. Para esse processo deverá ser empregada combinação dos gases Ar, N₂, SF₆, O₂. No entanto, ainda não se tem uma receita disponível para esse processo, o que exigiria uma etapa de calibração.

Após finalizar a corrosão, a amostra deverá passar por uma nova limpeza, a fim de remover o eletroresiste remanescente do processo de corrosão. Esta limpeza consistirá em fervura em acetona, seguida de fervura em isopropanol. Essa fervura deverá ser realizada pelo menos com 10 minutos em cada e à 80°C. Caso ainda houver eletroresiste, a amostra deverá ser submetida a um plasma barril (50 sccm de O₂), com uma potência de 250 W, durante 20 minutos. Por fim, está planejada uma última etapa de um polímero para proteção dos dispositivos e abertura da janela de detecção sobre a região estrangulada do guia de onda. O polímero que poderá ser utilizado nessa etapa é o PMMA. Em seguida, utilizando uma segunda máscara virtual com a dimensão da janela de detecção, é possível gravar no *e-line* essa janela de detecção, revelar e levar a amostra para um aquecimento em placa quente de 200°C por 10 minutos, o que garantirá a vitrificação do PMMA, protegendo todo o dispositivo, com exceção da região na janela de detecção, onde o estrangulamento ficara exposto para o analito.

Essa última etapa finaliza a fabricação do sensor. No entanto, ainda há mais dois processos importante que deverão ser realizados antes do chip estar pronto para ser caracterizado. Esses processos consistem nos cortes dos chips em amostras menores, com larguras de exatos 1mm. Uma possibilidade onde esses cortes poderão ser feitos é no Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI). Após essas amostras estarem cortadas, será necessário polir as entradas e saídas dos guias de onda, utilizando um Feixe de íons Focalizados (FIB), presente no CCSnano. Este polimento, de acordo com trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa (21), deverá ser feito utilizando uma corrente de

$0.1\eta A$ e uma tensão de 30 kV. As dimensões corroídas para formar cada espelho deve ser de $10\ \mu m$ de largura por $2\ \mu m$ de comprimento ao longo do acoplador. Cada um destes cortes deverá levar em média 2 minutos. Após isto, o dispositivo deverá estar pronto para caracterização óptica.

5 Conclusão

Em suma, esse projeto apresentou uma proposta de estudo detalhada sobre sensores óticos baseados exclusivamente em guias de ondas, que deverão ser modificados estruturalmente a fim de garantir forte interação entre a onda evanescente propagante no guia e um analito alvo. Além disso, fez parte do trabalho investigar e desenvolver um processo de integração de materiais absorvedores sobre os guias de onda projetados, a fim de garantir aos sensores elevadas taxas de sensibilidade com a otimização da geometria do guia e a interação controlada do material absorvedor com a onda evanescente propagante e o analito alvo, garantindo um caráter inovador à tese. Sendo assim, apresentam-se os resultados mais relevantes na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado de otimização final para todas as técnicas aplicadas

Modificação	Modo	Wwaist [ηm]	Lwaist [μm]	Ltaper [μm]	S_{bulk} (%/RIU)	R ²	sLOD
Guia Reto	TE	-	-	-	1	0.9566	1
	TM	-	-	-	5	0.9977	0.2
Estrangulamento	TE	140	25	15	1194	0.93	8.38×10^{-04}
	TM	90	30	30	1390	0.983	7.19×10^{-04}
Curvatura Exponencial	TE	140	25	15	1187	0.9229	8.42×10^{-04}
	TM	90	30	30	1389	0.9774	7.20×10^{-04}
Curvatura Quadrática	TE	140	25	15	1152	0.91	8.68×10^{-04}
	TM	90	30	30	1509	0.9463	6.63×10^{-04}
Guia Curvado $\theta = 1.2^\circ$	TE	140	25	25	1301	0.902	7.69×10^{-04}
	TM	90	30	35	1355	0.9831	7.38×10^{-04}
Suspensão em Analito Hdeep = $100\eta m$	TE	140	25	15	1443	0.9948	6.93×10^{-04}
	TM	90	20	30	1203	0.9913	8.31×10^{-04}
Suspensão em Analito Hdeep = $200\eta m$	TE	138	25	15	1307	0.9972	7.65×10^{-04}
	TM	95	30	25	1081	0.9904	9.25×10^{-04}
Suspensão em Analito Hdeep = $300\eta m$	TE	140	25	25	636	0.9784	1.57×10^{-03}
	TM	90	30	35	645	0.9947	1.55×10^{-03}
Suspensão em Analito Hdeep = $600\eta m$	TE	90	35	70	896	0.734	1.12×10^{-03}
	TM	55	55	155	232	0.8548	4.31×10^{-03}
Suspensão em Analito Hdeep = $1\mu m$	TE	90	50	55	853	0.4988	1.17×10^{-03}
	TM	90	55	55	117	0.9538	8.55×10^{-03}
Material Absorvedor GAP = $1\mu m$	TE	130	30	45	1456	0.9775	6.87×10^{-04}
	TM	90	35	35	1513	0.9608	6.61×10^{-04}
GAP = $900\eta m$	TE	130	30	45	1376	0.9927	7.27×10^{-04}
GAP = $1100\eta m$	TM	90	30	35	1520	0.9863	6.58×10^{-04}

Nesta, Tabela 11, destacam-se os resultados obtidos para as modificações estruturais denotadas como Suspensão em Analito com $H_{\text{deep}} = 100\eta m$ por atingir a linearidade requisitada com os valores altos de sensibilidade quando comparada ao guia reto e os 2 últimos resultados da integração com material absorvedor que também se demonstraram como modificações estruturais promissoras na tentativa de utilizar o guia de onda integrado como um sensor de índice de refração, apesar destes últimos não atingirem a linearidade requisitada para a transversal magnética, ainda que próxima do valor, foi possível observar o maior valor de sensibilidade da Tabela para a transversal em questão, sendo que a transversal elétrica tendo atingido um dos maiores valores tabelados, ficando atrás do primeiro resultado aqui destacado.

Dessa forma, em um mercado global de sensores óticos ascendente, foi possível demonstrar várias modificações estruturais em conjunto com o estrangulamento do guia, incluindo a inserção de material absorvedor, capazes de tornar um guia de onda capaz de sensorear índice de refração. Sendo ainda demonstrada possibilidade e viabilidade de fabricação através de roteiro e máscaras litográficas.

Referências

- 1 OPTICAL Sensor Market Overview (2023 to 2033). 2023. Disponível em: <<https://www.futuremarketinsights.com/reports/optical-sensor-market>>. Citado na página 7.
- 2 DAMBORSKÝ, P.; ŠVITEL, J.; KATRLÍK, J. Optical biosensors. *Essays in Biochemistry*, v. 60, n. 1, p. 91–100, jun. 2016. ISSN 0071-1365, 1744-1358. Disponível em: <<https://portlandpress.com/essaysbiochem/article/60/1/91/78222/Optical-biosensors>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- 3 WEN, W. et al. Recent advances in emerging 2D nanomaterials for biosensing and bioimaging applications. *Materials Today*, v. 21, n. 2, p. 164–177, mar. 2018. ISSN 13697021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702117303693>>. Citado na página 7.
- 4 MORGAN, H. (Ed.). *Fundamentals and sensing applications of 2D materials*. Duxford: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier, 2019. (Woodhead Publishing series in electronic and optical materials). OCLC: on1082186424. ISBN 9780081025772. Citado na página 7.
- 5 LI, C. et al. Optofluidics Refractometers. *Micromachines*, v. 9, n. 3, p. 136, mar. 2018. ISSN 2072-666X. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-666X/9/3/136>>. Citado na página 7.
- 6 LI, H.-Y. et al. A low cost, label-free biosensor based on a novel double-sided grating waveguide coupler with sub-surface cavities. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 206, p. 371–380, jan. 2015. ISSN 09254005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400514011447>>. Citado na página 7.
- 7 KRIOUKOV, E.; GREVE, J.; OTTO, C. Performance of integrated optical microcavities for refractive index and fluorescence sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 90, n. 1-3, p. 58–67, abr. 2003. ISSN 09254005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400503000224>>. Citado na página 7.
- 8 WANG, J. et al. Silicon coupled-resonator optical-waveguide-based biosensors using light-scattering pattern recognition with pixelized mode-field-intensity distributions. *Scientific Reports*, v. 4, n. 1, p. 7528, dez. 2014. ISSN 2045-2322. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/srep07528>>. Citado na página 7.
- 9 FAN, X.; WHITE, I. M. Optofluidic microsystems for chemical and biological analysis. *Nature Photonics*, v. 5, n. 10, p. 591–597, out. 2011. ISSN 1749-4885, 1749-4893. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nphoton.2011.206>>. Citado na página 8.
- 10 TOCCAFONDO, V.; OTON, C. J. Robust and low-cost interrogation technique for integrated photonic biochemical sensors based on Mach–Zehnder interferometers. *Photonics Research*, v. 4, n. 2, p. 57, abr. 2016. ISSN 2327-9125. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=prj-4-2-57>>. Citado na página 8.

- 11 LAPSLEY, M. I. et al. A single-layer, planar, optofluidic Mach–Zehnder interferometer for label-free detection. *Lab on a Chip*, v. 11, n. 10, p. 1795, 2011. ISSN 1473-0197, 1473-0189. Disponível em: <<https://xlink.rsc.org/?DOI=c0lc00707b>>. Citado na página 8.
- 12 NGUYEN, H. et al. Surface Plasmon Resonance: A Versatile Technique for Biosensor Applications. *Sensors*, v. 15, n. 5, p. 10481–10510, maio 2015. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/5/10481>>. Citado na página 8.
- 13 JOSE, J.; PARK, M.; PYUN, J.-C. E. coli outer membrane with autodisplayed Z-domain as a molecular recognition layer of SPR biosensor. *Biosensors and Bioelectronics*, v. 25, n. 5, p. 1225–1228, jan. 2010. ISSN 09565663. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956566309005120>>. Citado na página 8.
- 14 JÁGERSKÁ, J. et al. Refractive index sensing with an air-slot photonic crystal nanocavity. *Optics Letters*, v. 35, n. 15, p. 2523, ago. 2010. ISSN 0146-9592, 1539-4794. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ol-35-15-2523>>. Citado na página 8.
- 15 SURDO, S. et al. Optofluidic microsystems with integrated vertical one-dimensional photonic crystals for chemical analysis. *Lab on a Chip*, v. 12, n. 21, p. 4403, 2012. ISSN 1473-0197, 1473-0189. Disponível em: <<https://xlink.rsc.org/?DOI=c2lc40613f>>. Citado na página 8.
- 16 BAHRAMI, F. et al. An improved refractive index sensor based on genetic optimization of plasmon waveguide resonance. *Optics Express*, v. 21, n. 18, p. 20863, set. 2013. ISSN 1094-4087. Disponível em: <<https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-21-18-20863>>. Citado na página 8.
- 17 LIU, I.-C. et al. Optofluidic refractive-index sensors employing bent waveguide structures for low-cost, rapid chemical and biomedical sensing. *Optics Express*, v. 26, n. 1, p. 273, jan. 2018. ISSN 1094-4087. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=oe-26-1-273>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 18.
- 18 GUIDER, R. et al. Sensitivity and Limit of Detection of biosensors based on ring resonators. *Sensing and Bio-Sensing Research*, v. 6, p. 99–102, dez. 2015. ISSN 22141804. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221418041530012X>>. Citado na página 8.
- 19 SORIA, S. et al. Optical Microspherical Resonators for Biomedical Sensing. *Sensors*, v. 11, n. 1, p. 785–805, jan. 2011. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/11/1/785>>. Citado na página 8.
- 20 LIN, Y.-C. et al. Intensity-detection-based guided-mode-resonance optofluidic biosensing system for rapid, low-cost, label-free detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 250, p. 659–666, out. 2017. ISSN 09254005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400517308043>>. Citado na página 8.
- 21 MORAS, A. L. et al. Integrated Photonic Platform for Robust Differential Refractive Index Sensor. *IEEE Photonics Journal*, v. 12, n. 5, p. 1–10, out. 2020. ISSN 1943-0655, 1943-0647. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9200534/>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 58.

- 22 ZOBEL, A. et al. Chemical vapour deposition and characterization of uniform bilayer and trilayer MoS₂ crystals. *Journal of Materials Chemistry C*, v. 4, n. 47, p. 11081–11087, 2016. ISSN 2050-7526, 2050-7534. Disponível em: <<https://xlink.rsc.org/?DOI=C6TC03587F>>. Citado na página 9.
- 23 CARSON, R. F.; BATCHMAN, T. E.; MCWRIGHT, M. L. Periodic Coupling In Semiconductor-Clad Optical Waveguide Devices. In: STOTLAR, S. C. (Ed.). Albuquerque: [s.n.], 1985. p. 413. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.976146>>. Citado na página 10.
- 24 CARSON, R. F.; BATCHMAN, T. E. Multimode phenomena in semiconductor-clad dielectric optical waveguide structures. *Applied Optics*, v. 29, n. 18, p. 2769, jun. 1990. ISSN 0003-6935, 1539-4522. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ao-29-18-2769>>. Citado na página 10.
- 25 KAMINOW, I. P.; MAMMEL, W. L.; WEBER, H. P. Metal-Clad Optical Waveguides: Analytical and Experimental Study. *Applied Optics*, v. 13, n. 2, p. 396, fev. 1974. ISSN 0003-6935, 1539-4522. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ao-13-2-396>>. Citado na página 10.
- 26 SLAVIK, R. et al. Novel spectral fiber optic sensor based on surface plasmon resonance. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 74, n. 1-3, p. 106–111, abr. 2001. ISSN 09254005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400500007188>>. Citado na página 10.
- 27 ZOUROB, M.; GODDARD, N. J. Metal clad leaky waveguides for chemical and biosensing applications. *Biosensors and Bioelectronics*, v. 20, n. 9, p. 1718–1727, mar. 2005. ISSN 09565663. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956566304002830>>. Citado na página 10.
- 28 SKIVESEN, N. et al. Deep-probe metal-clad waveguide biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*, v. 22, n. 7, p. 1282–1288, fev. 2007. ISSN 09565663. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956566306002570>>. Citado na página 10.
- 29 ANDREEV, A. et al. A refractometric sensor using index-sensitive mode resonance between single-mode fiber and thin film amorphous silicon waveguide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 106, n. 1, p. 484–488, abr. 2005. ISSN 09254005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400504006173>>. Citado na página 10.
- 30 SOCORRO, A. et al. Fiber-optic biosensor based on lossy mode resonances. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 174, p. 263–269, nov. 2012. ISSN 09254005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400512007198>>. Citado na página 10.
- 31 PALIWAL, N.; JOHN, J. Lossy Mode Resonance (LMR) Based Fiber Optic Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal*, v. 15, n. 10, p. 5361–5371, out. 2015. ISSN 1530-437X, 1558-1748, 2379-9153. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7130568/>>. Citado na página 10.

- 32 VILLAR, I. D. et al. Optical sensors based on lossy-mode resonances. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 240, p. 174–185, mar. 2017. ISSN 09254005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400516313594>>. Citado na página 10.
- 33 BARÊA, L. A. M. *Desenvolvimento de estruturas monolíticas de guias de ondas acoplados a micro-cavidades*. [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/779107>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.
- 34 DUARTE, L. E. R. Otimização da sensibilidade de sensores ópticos de índice de refração baseados em guias de onda. jun. 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14773>>. Citado 5 vezes nas páginas 17, 20, 32, 33 e 36.
- 35 WANGüEMERT-PÉREZ, J. G. et al. [INVITED] Subwavelength structures for silicon photonics biosensing. *Optics & Laser Technology*, v. 109, p. 437–448, jan. 2019. ISSN 00303992. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399218307874>>. Citado na página 18.
- 36 CHENG, S. et al. Tapered multicore fiber interferometer for ultra-sensitive temperature sensing with thermo-optical materials. *Optics Express*, v. 29, n. 22, p. 35765, out. 2021. ISSN 1094-4087. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=oe-29-22-35765>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- 37 BARÊA, L. A. M. *Moléculas fotônicas para aplicações em engenharia espectral e processamento de sinais ópticos*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/924835>>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 35.
- 38 LIMA, J. A. D. *Projeto, modelagem e fabricação de guias de onda ópticos integrados baseados em polímeros para aplicações em sensores*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, São Carlos, maio 2017. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-29052017-135956/>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- 39 BARRIOS, C. A. An Analysis of a Compact Label-Free Guiding-Wave Biosensor Based on a Semiconductor-Clad Dielectric Strip Waveguide. *Sensors*, v. 20, n. 12, p. 3368, jun. 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3368>>. Citado na página 20.
- 40 MORENO, M. et al. Amorphous, Polymorphous, and Microcrystalline Silicon Thin Films Deposited by Plasma at Low Temperatures. In: MANDRACCI, P. (Ed.). *Crystalline and Non-crystalline Solids*. InTech, 2016. ISBN 9789535124450 9789535124467. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/crystalline-and-non-crystalline-solids/amorphous-polymorphous-and-microcrystalline-silicon-thin-films-deposited-by-plasma-at-low-temperatur>>. Citado na página 23.
- 41 BROUCKAERT, J. et al. Planar Concave Grating Demultiplexer Fabricated on a Nanophotonic Silicon-on-Insulator Platform. *Journal of Lightwave Technology*, v. 25, n. 5, p. 1269–1275, maio 2007. ISSN 0733-8724. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4167948/>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

42 WU, K.; POON, A. W. Stress-released Si₃N₄ fabrication process for dispersion-engineered integrated silicon photonics. *Optics Express*, v. 28, n. 12, p. 17708, jun. 2020. ISSN 1094-4087. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=oe-28-12-17708>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

APÊNDICE A – Apêndice A

Tabela 12 – Características da variação do estrangulamento em formato exponencial em modo TE já otimizado

$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
1187	0.9229	8.42×10^{-04}

Tabela 13 – Características da variação do estrangulamento em formato exponencial em modo TM já otimizado

$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
1389	0.9774	7.20×10^{-04}

Tabela 14 – Características da variação do estrangulamento em formato quadrático em modo TE já otimizado

$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
1152	0.91	8.68×10^{-04}

Tabela 15 – Características da variação do estrangulamento em formato quadrático em modo TM já otimizado

$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
1509	0.9463	6.63×10^{-04}

Tabela 16 – Efeitos característicos devido a variação de θ com estrangulamento em modo TE

$\theta[^\circ]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
0	1194	0.9299	8.38×10^{-04}
1	1193	0.9375	8.38×10^{-04}
1.1	1199	0.9329	8.34×10^{-04}
1.2	1221	0.9348	8.19×10^{-04}
1.3	1221	0.9334	8.19×10^{-04}
1.4	1188	0.937	8.42×10^{-04}
1.5	1186	0.9363	8.43×10^{-04}
1.6	1214	0.9333	8.24×10^{-04}
1.7	1185	0.9363	8.44×10^{-04}
1.8	1210	0.9334	8.26×10^{-04}
1.9	1201	0.9296	8.33×10^{-04}
2	1206	0.9333	8.29×10^{-04}
3	1168	0.9348	8.56×10^{-04}
4	1149	0.9295	8.70×10^{-04}
5	1120	0.9317	8.93×10^{-04}
10	911	0.9505	1.10×10^{-03}
15	679	0.9972	1.47×10^{-03}
20	557	0.9843	1.80×10^{-03}
25	441	0.9828	2.27×10^{-03}
30	240	0.9791	4.17×10^{-03}

Tabela 17 – Efeitos característicos devido a variação de Wwaist com curva , $\theta = 1.2^\circ$, e estrangulamento em modo TE

Wwaist[ηm]	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
120	352	0.8946	2.84×10^{-03}
130	1116	0.9186	8.96×10^{-04}
140	1221	0.9348	8.19×10^{-04}
150	223	0.8619	4.48×10^{-03}
160	136	0.8738	7.35×10^{-03}
170	55	0.9793	1.82×10^{-02}
180	30	0.9806	3.33×10^{-02}

Tabela 18 – Efeitos característicos devido a variação de Lwaist com curva , $\theta = 1.2^\circ$, e estrangulamento em modo TE

Lwaist [μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
10	780	0.9886	1.28×10^{-03}
15	959	0.9635	1.04×10^{-03}
20	993	0.9838	1.01×10^{-03}
25	1221	0.9348	8.19×10^{-04}
30	1214	0.8338	8.24×10^{-04}
35	1210	0.8147	8.26×10^{-04}
40	1167	0.812	8.57×10^{-04}

Tabela 19 – Efeitos característicos devido a variação de Ltaper com curva , $\theta = 1.2^\circ$, e estrangulamento em modo TE

Ltaper [μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
10	1173	0.9309	8.53×10^{-04}
15	1221	0.9348	8.19×10^{-04}
20	1268	0.9092	7.89×10^{-04}
25	1301	0.902	7.69×10^{-04}
30	1113	0.9399	8.98×10^{-04}
35	1266	0.9297	7.90×10^{-04}
40	1237	0.9255	8.08×10^{-04}

Tabela 20 – Efeitos característicos devido a variação de Wwaist com curva , $\theta = 1.2^\circ$, e estrangulamento em modo TM

Wwaist [ηm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
70	48	0.6918	2.08×10^{-02}
80	576	0.8876	1.74×10^{-03}
90	1165	0.9928	8.58×10^{-04}
100	258	0.8655	3.88×10^{-03}
110	121	0.9847	8.26×10^{-03}
120	52	0.9981	1.92×10^{-02}
130	36	0.9873	2.78×10^{-02}

Tabela 21 – Efeitos característicos devido a variação de Lwaist com curva , $\theta = 1.2^\circ$, e estrangulamento em modo TM

Lwaist [μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
10	724	0.9974	1.38×10^{-03}
15	958	0.9945	1.04×10^{-03}
20	1119	0.9743	8.94×10^{-04}
25	1283	0.9717	7.79×10^{-04}
30	1355	0.9831	7.38×10^{-04}
35	1450	0.9464	6.90×10^{-04}
40	1414	0.9156	7.07×10^{-04}

Tabela 22 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com curva , $\theta = 1.2^\circ$, e estrangulamento em modo TM

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	1337	0.9689	7.48×10^{-04}
15	1405	0.9685	7.12×10^{-04}
20	1398	0.966	7.15×10^{-04}
25	1405	0.9709	7.12×10^{-04}
30	1402	0.964	7.13×10^{-04}
35	1450	0.9464	6.90×10^{-04}
40	1416	0.9377	7.06×10^{-04}

Tabela 23 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $100\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
90	48	0.1501	2.08×10^{-02}
100	158	0.6472	6.33×10^{-03}
110	128	0.7273	7.81×10^{-03}
120	221	0.6263	4.52×10^{-03}
130	868	0.89	1.15×10^{-03}
140	1443	0.9948	6.93×10^{-04}
150	661	0.7603	1.51×10^{-03}

Tabela 24 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $100\eta m$ em analito

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	888	0.9878	1.13×10^{-03}
15	1245	0.9892	8.03×10^{-04}
20	1356	0.9885	7.37×10^{-04}
25	1443	0.9948	6.93×10^{-04}
30	1493	0.9361	6.70×10^{-04}
35	1466	0.8492	6.82×10^{-04}
40	1437	0.7586	6.96×10^{-04}

Tabela 25 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $100\eta m$ em analito

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	1423	0.9966	7.03×10^{-04}
15	1443	0.9948	6.93×10^{-04}
20	1436	0.9935	6.96×10^{-04}
25	1435	0.9936	6.97×10^{-04}
30	1397	0.9793	7.16×10^{-04}
35	1179	0.9128	8.48×10^{-04}
40	1155	0.9339	8.66×10^{-04}

Tabela 26 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $100\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
70	7	0.2708	1.43×10^{-01}
80	274	0.7605	3.65×10^{-03}
90	1161	0.9576	8.61×10^{-04}
100	954	0.934	1.05×10^{-03}
110	110	0.8552	9.09×10^{-03}
120	39	0.9349	2.56×10^{-02}
130	20	0.9952	5.00×10^{-02}

Tabela 27 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $100\eta m$ em analito

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	738	0.9993	1.36×10^{-03}
15	1012	0.9932	9.88×10^{-04}
20	1137	0.9788	8.80×10^{-04}
25	1161	0.9576	8.61×10^{-04}
30	1166	0.9148	8.58×10^{-04}
35	1179	0.8584	8.48×10^{-04}
40	1186	0.8024	8.43×10^{-04}

Tabela 28 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $100\eta m$ em analito

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	1032	0.9825	9.69×10^{-04}
15	1093	0.982	9.15×10^{-04}
20	1116	0.9842	8.96×10^{-04}
25	1137	0.9788	8.80×10^{-04}
30	1203	0.9913	8.31×10^{-04}
35	1165	0.9826	8.58×10^{-04}
40	1157	0.913	8.64×10^{-04}

Tabela 29 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $200\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
120	234	0.3237	4.27×10^{-03}
130	793	0.7404	1.26×10^{-03}
140	1222	0.9926	8.18×10^{-04}
150	453	0.7882	2.21×10^{-03}
160	25	0.8113	4.00×10^{-02}

Tabela 30 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $200\eta m$ em analito

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
5	206	0.9973	4.85×10^{-03}
10	496	0.9911	2.02×10^{-03}
15	865	0.9845	1.16×10^{-03}
20	1083	0.9778	9.23×10^{-04}
25	1222	0.9926	8.18×10^{-04}
30	1302	0.9759	7.68×10^{-04}
35	1342	0.9081	7.45×10^{-04}
40	1369	0.8685	7.30×10^{-04}
45	1391	0.8342	7.19×10^{-04}
50	1416	0.7998	7.06×10^{-04}

Tabela 31 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $200\eta m$ em analito

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
5	1163	0.9859	8.60×10^{-04}
15	1222	0.9926	8.18×10^{-04}
25	1198	0.9935	8.35×10^{-04}
35	1259	0.9096	7.94×10^{-04}
45	1275	0.9185	7.84×10^{-04}
65	1425	0.9148	7.02×10^{-04}

Tabela 32 – Efeitos característicos devido a variação de reotimização de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $200\eta m$ em analito

Reotimização de $W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
130	793	0.7404	1.26×10^{-03}
132	934	0.8429	1.07×10^{-03}
134	1097	0.944	9.12×10^{-04}
136	1267	0.9873	7.89×10^{-04}
138	1307	0.9972	7.65×10^{-04}
140	1222	0.9926	8.18×10^{-04}
142	1127	0.9838	8.87×10^{-04}
144	997	0.9767	1.00×10^{-03}
146	803	0.9389	1.25×10^{-03}
148	611	0.8659	1.64×10^{-03}
150	453	0.7882	2.21×10^{-03}

Tabela 33 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $200\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
90	908	0.9749	1.10×10^{-03}
95	946	0.9954	1.06×10^{-03}
100	707	0.9661	1.41×10^{-03}
105	311	0.8321	3.22×10^{-03}
110	86	0.7559	1.16×10^{-02}

Tabela 34 – Efeitos característicos devido a variação de Lwaist com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $200\eta m$ em analito

Lwaist [μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
15	600	0.9979	1.67×10^{-03}
20	792	0.9971	1.26×10^{-03}
25	946	0.9954	1.06×10^{-03}
30	1081	0.9904	9.25×10^{-04}
35	1202	0.9799	8.32×10^{-04}
40	1305	0.9657	7.66×10^{-04}

Tabela 35 – Efeitos característicos devido a variação de Ltaper com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $200\eta m$ em analito

Ltaper [μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
5	942	0.9911	1.06×10^{-03}
15	1054	0.9896	9.49×10^{-04}
25	1081	0.9904	9.25×10^{-04}
35	1208	0.9279	8.28×10^{-04}
45	1085	0.9868	9.22×10^{-04}
65	1096	0.9885	9.12×10^{-04}

Tabela 36 – Efeitos característicos devido a variação de reotimização de Wwaist com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $200\eta m$ em analito

Reotimização de Wwaist [ηm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
90	957	0.9655	1.04×10^{-03}
91	994	0.9636	1.01×10^{-03}
92	1042	0.9692	9.60×10^{-04}
93	1088	0.9799	9.19×10^{-04}
94	1089	0.9873	9.18×10^{-04}
95	1081	0.9904	9.25×10^{-04}
96	1053	0.9907	9.50×10^{-04}
97	1022	0.9916	9.78×10^{-04}
98	970	0.9857	1.03×10^{-03}
99	908	0.9715	1.10×10^{-03}
100	825	0.9556	1.21×10^{-03}

Tabela 37 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $300\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
90	-253	0.3476	-3.95×10^{-03}
100	178	0.0996	5.62×10^{-03}
110	313	0.2815	3.19×10^{-03}
120	134	0.0694	7.46×10^{-03}
130	620	0.6696	1.61×10^{-03}
140	644	0.9755	1.55×10^{-03}
150	199	0.78	5.03×10^{-03}

Tabela 38 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $300\eta m$ em analito

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	236	0.9955	4.24×10^{-03}
15	414	0.9855	2.42×10^{-03}
20	522	0.9753	1.92×10^{-03}
25	644	0.9755	1.55×10^{-03}
30	754	0.9417	1.33×10^{-03}
35	862	0.8667	1.16×10^{-03}
40	950	0.8072	1.05×10^{-03}

Tabela 39 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $300\eta m$ em analito

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	638	0.9595	1.57×10^{-03}
15	644	0.9755	1.55×10^{-03}
20	656	0.9777	1.52×10^{-03}
25	636	0.9784	1.57×10^{-03}
30	762	0.9078	1.31×10^{-03}
35	781	0.8685	1.28×10^{-03}
40	743	0.8852	1.35×10^{-03}

Tabela 40 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $300\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
70	-22	0.1221	-4.55×10^{-02}
80	247	0.8127	4.05×10^{-03}
90	490	0.9708	2.04×10^{-03}
100	333	0.9717	3.00×10^{-03}
110	43	0.7998	2.33×10^{-02}
120	15	0.9873	6.67×10^{-02}
130	14	0.9964	7.14×10^{-02}

Tabela 41 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $300\eta m$ em analito

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	199	0.993	5.03×10^{-03}
15	316	0.9851	3.16×10^{-03}
20	414	0.9729	2.42×10^{-03}
25	490	0.9708	2.04×10^{-03}
30	548	0.9659	1.82×10^{-03}
35	591	0.9496	1.69×10^{-03}
40	627	0.9236	1.59×10^{-03}

Tabela 42 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $300\eta m$ em analito

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	492	0.9697	2.03×10^{-03}
15	496	0.9759	2.02×10^{-03}
20	541	0.9784	1.85×10^{-03}
25	548	0.9659	1.82×10^{-03}
30	630	0.9955	1.59×10^{-03}
35	645	0.9947	1.55×10^{-03}
40	668	0.8424	1.50×10^{-03}

Tabela 43 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $600\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
70	-5	0.0001	-2.00×10^{-01}
80	281	0.2915	3.56×10^{-03}
90	457	0.7528	2.19×10^{-03}
100	84	0.0417	1.19×10^{-02}
110	-255	0.789	-3.92×10^{-03}

Tabela 44 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $600\eta m$ em analito

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
5	-59	0.7973	-1.69×10^{-02}
15	160	0.7479	6.25×10^{-03}
25	457	0.7528	2.19×10^{-03}
35	595	0.662	1.68×10^{-03}
45	590	0.5697	1.69×10^{-03}
55	551	0.4964	1.81×10^{-03}

Tabela 45 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $600\eta m$ em analito

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	528	0.679	1.89×10^{-03}
30	761	0.7037	1.31×10^{-03}
50	823	0.6774	1.22×10^{-03}
70	896	0.734	1.12×10^{-03}
90	864	0.7092	1.16×10^{-03}
110	864	0.6976	1.16×10^{-03}

Tabela 46 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $600\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
40	-44	0.9858	-2.27×10^{-02}
50	-101	0.9803	-9.90×10^{-03}
53	-93	0.948	-1.08×10^{-02}
55	-147	0.8482	-6.80×10^{-03}
57	-134	0.927	-7.46×10^{-03}
60	-141	0.9224	-7.09×10^{-03}
70	-92	0.9214	-1.09×10^{-02}
80	-2	0.0151	-5.00×10^{-01}

Tabela 47 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $600\eta m$ em analito

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
5	-100	0.9997	-1.00×10^{-02}
30	-157	0.9001	-6.37×10^{-03}
55	-204	0.9781	-4.90×10^{-03}
80	-115	0.4495	-8.70×10^{-03}
105	-116	0.3521	-8.62×10^{-03}
130	-95	0.3592	-1.05×10^{-02}
155	-71	0.3696	-1.41×10^{-02}

Tabela 48 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $600\eta m$ em analito

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
5	-172	0.8598	-5.81×10^{-03}
30	-205	0.8105	-4.88×10^{-03}
55	-214	0.8084	-4.67×10^{-03}
80	-175	0.3293	-5.71×10^{-03}
105	-205	0.8076	-4.88×10^{-03}
130	-129	0.2712	-7.75×10^{-03}
155	-232	0.8548	-4.31×10^{-03}

Tabela 49 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $1000\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
60	-52	0.4747	-1.92×10^{-02}
70	-132	0.6424	-7.58×10^{-03}
80	-196	0.5812	-5.10×10^{-03}
90	-168	0.9	-5.95×10^{-03}
100	-46	0.3443	-2.17×10^{-02}
110	-5	0.0283	-2.00×10^{-01}
120	3	0.0889	3.33×10^{-01}

Tabela 50 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $1000\eta m$ em analito

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	-22	0.5085	-4.55×10^{-02}
30	-197	0.8676	-5.08×10^{-03}
50	-303	0.7303	-3.30×10^{-03}
70	-360	0.5899	-2.78×10^{-03}
90	-347	0.4467	-2.88×10^{-03}
110	-417	0.473	-2.40×10^{-03}
130	-425	0.4537	-2.35×10^{-03}
150	-426	0.469	-2.35×10^{-03}
170	-426	0.5067	-2.35×10^{-03}
190	-417	0.5395	-2.40×10^{-03}
210	-401	0.5636	-2.49×10^{-03}
230	-384	0.5895	-2.60×10^{-03}
250	-368	0.6215	-2.72×10^{-03}
270	-349	0.6474	-2.87×10^{-03}
290	-330	0.6693	-3.03×10^{-03}
310	-312	0.6929	-3.21×10^{-03}

Tabela 51 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TE com suspensão do guia de $1000\eta m$ em analito

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
5	-547	0.572	-1.83×10^{-03}
30	-763	0.5072	-1.31×10^{-03}
55	-853	0.4988	-1.17×10^{-03}
80	-876	0.4837	-1.14×10^{-03}
105	-886	0.4892	-1.13×10^{-03}
130	-891	0.4872	-1.12×10^{-03}
155	-905	0.4733	-1.10×10^{-03}

Tabela 52 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $1000\eta m$ em analito

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
30	26	0.2039	3.85×10^{-02}
35	19	0.0693	5.26×10^{-02}
40	-92	0.5026	-1.09×10^{-02}
45	-132	0.9459	-7.58×10^{-03}
50	-81	0.8987	-1.23×10^{-02}
55	-105	0.9935	-9.52×10^{-03}
60	-79	0.8736	-1.27×10^{-02}
65	-83	0.9854	-1.20×10^{-02}
70	-38	0.8252	-2.63×10^{-02}
75	-30	0.9721	-3.33×10^{-02}
80	-15	0.7234	-6.67×10^{-02}

Tabela 53 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $1000\eta m$ em analito

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
50	-127	0.9257	-7.87×10^{-03}
70	-43	0.7122	-2.33×10^{-02}
90	-83	0.8334	-1.20×10^{-02}
110	-90	0.7424	-1.11×10^{-02}
130	-85	0.5451	-1.18×10^{-02}
150	-83	0.4424	-1.20×10^{-02}
170	-81	0.3702	-1.23×10^{-02}
190	-78	0.3172	-1.28×10^{-02}
210	-76	0.2748	-1.32×10^{-02}
230	-73	0.2417	-1.37×10^{-02}
250	-69	0.216	-1.45×10^{-02}

Tabela 54 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com o estrangulamento do guia imerso em analito em modo TM com suspensão do guia de $1000\eta m$ em analito

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
5	-131	0.9962	-7.63×10^{-03}
30	-149	0.9342	-6.71×10^{-03}
55	-117	0.9538	-8.55×10^{-03}
80	-121	0.8505	-8.26×10^{-03}
105	-400	0.854	-2.50×10^{-03}
130	-214	0.9863	-4.67×10^{-03}
155	-71	0.275	-1.41×10^{-02}

Tabela 55 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com $GAP = 1\mu m$ por baixo até uma deposição de $S_{i_{amorfo}}$ com $H_{Si} = 30\eta m$ estrangulado em modo TE

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
120	686	0.9576	1.46×10^{-03}
130	1112	0.9895	8.99×10^{-04}
140	804	0.9227	1.24×10^{-03}
150	212	0.9523	4.72×10^{-03}
160	123	0.8999	8.13×10^{-03}
170	60	0.9775	1.67×10^{-02}
180	28	0.9624	3.57×10^{-02}

Tabela 56 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com $GAP = 1\mu m$ por baixo até uma deposição de $S_{i_{amorfo}}$ com $H_{Si} = 30\eta m$ estrangulado em modo TE

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	1062	0.9983	9.42×10^{-04}
15	1131	0.998	8.84×10^{-04}
20	1056	0.9972	9.47×10^{-04}
25	1112	0.9895	8.99×10^{-04}
30	1316	0.973	7.60×10^{-04}
35	1398	0.9643	7.15×10^{-04}
40	1484	0.9379	6.74×10^{-04}

Tabela 57 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com $GAP = 1\mu m$ por baixo até uma deposição de $S_{i_{amorfo}}$ com $H_{Si} = 30\eta m$ estrangulado em modo TE

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	1261	0.9728	7.93×10^{-04}
15	1316	0.973	7.60×10^{-04}
20	1317	0.9694	7.59×10^{-04}
25	1419	0.955	7.05×10^{-04}
30	1329	0.9757	7.52×10^{-04}
35	1476	0.9722	6.78×10^{-04}
40	1415	0.9762	7.07×10^{-04}
45	1456	0.9775	6.87×10^{-04}

Tabela 58 – Efeitos característicos devido a variação de W_{waist} com $GAP = 1\mu m$ por baixo até uma deposição de $S_{i_{amorfo}}$ com $H_{Si} = 30\eta m$ estrangulado em modo TM

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
70	94	0.6621	1.06×10^{-02}
80	212	0.8207	4.72×10^{-03}
90	1407	0.9662	7.11×10^{-04}
100	360	0.7915	2.78×10^{-03}
110	132	0.9225	7.58×10^{-03}
120	69	0.9861	1.45×10^{-02}
130	42	0.9968	2.38×10^{-02}

Tabela 59 – Efeitos característicos devido a variação de L_{waist} com $GAP = 1\mu m$ por baixo até uma deposição de $S_{i_{amorfo}}$ com $H_{Si} = 30\eta m$ estrangulado em modo TM

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	591	0.9991	1.69×10^{-03}
15	785	0.9993	1.27×10^{-03}
20	994	0.9976	1.01×10^{-03}
25	1189	0.9802	8.41×10^{-04}
30	1407	0.9662	7.11×10^{-04}
35	1551	0.9546	6.45×10^{-04}
40	1606	0.9449	6.23×10^{-04}

Tabela 60 – Efeitos característicos devido a variação de L_{taper} com $GAP = 1\mu m$ por baixo até uma deposição de $S_{i_{amorfo}}$ com $H_{Si} = 30\eta m$ estrangulado em modo TM

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	1456	0.9503	6.87×10^{-04}
15	1519	0.9527	6.58×10^{-04}
20	1533	0.9514	6.52×10^{-04}
25	1551	0.9546	6.45×10^{-04}
30	1561	0.9554	6.41×10^{-04}
35	1513	0.9608	6.61×10^{-04}
40	1573	0.9555	6.36×10^{-04}

Tabela 61 – Variação de GAP para o Material Absorvedor em modo TE

$H_{deepS}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
800	1156	0.9737	8.65×10^{-04}
900	1401	0.9858	7.14×10^{-04}
1000	1456	0.9775	6.87×10^{-04}
1100	1432	0.9579	6.98×10^{-04}
1200	1473	0.967	6.79×10^{-04}

Tabela 62 – Variação de GAP para o Material Absorvedor em modo TM

HdeepS[μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
800	1532	0.9698	6.53×10^{-04}
900	1535	0.9563	6.51×10^{-04}
1000	1513	0.9608	6.61×10^{-04}
1100	1541	0.9644	6.49×10^{-04}
1200	1473	0.9503	6.79×10^{-04}

Tabela 63 – Variação da Espessura do Material Absorvedor em modo TE com GAP = 900 ηm

Habs10[μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
10	190	0.4471	5.26×10^{-03}
15	966	0.9917	1.04×10^{-03}
20	1095	0.9912	9.13×10^{-04}
25	1160	0.9896	8.62×10^{-04}
30	1401	0.9858	7.14×10^{-04}
35	1384	0.977	7.23×10^{-04}
40	1446	0.9842	6.92×10^{-04}
45	1376	0.9927	7.27×10^{-04}
50	1421	0.9744	7.04×10^{-04}

Tabela 64 – Variação da Espessura do Material Absorvedor em modo TM com GAP = 1100 ηm

Habs10[μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
10	1501	0.9572	6.66×10^{-04}
15	1562	0.9748	6.40×10^{-04}
20	1606	0.9405	6.23×10^{-04}
25	1549	0.967	6.46×10^{-04}
30	1541	0.9644	6.49×10^{-04}
35	1274	0.8871	7.85×10^{-04}
40	609	0.6503	1.64×10^{-03}
45	408	0.8649	2.45×10^{-03}
50	713	0.9703	1.40×10^{-03}

Tabela 65 – Variação de Wwaist com Material Absorvedor em modo TE com GAP = 900 ηm

Wwaist[ηm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
120	688	0.9314	1.45×10^{-03}
127	1127	0.9279	8.87×10^{-04}
128	1177	0.9524	8.50×10^{-04}
129	1260	0.9573	7.94×10^{-04}
130	1376	0.9927	7.27×10^{-04}
131	1358	0.9943	7.36×10^{-04}
132	1366	0.9897	7.32×10^{-04}
133	1263	0.982	7.92×10^{-04}
140	776	0.8511	1.29×10^{-03}
150	241	0.9539	4.15×10^{-03}
160	90	0.9662	1.11×10^{-02}
170	58	0.9318	1.72×10^{-02}
180	38	0.9557	2.63×10^{-02}

Tabela 66 – Variação de Lwaist com Material Absorvedor em modo TE com GAP = 900 ηm

Lwaist[μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
10	929	0.9843	1.08×10^{-03}
15	1053	0.9867	9.50×10^{-04}
20	992	0.9949	1.01×10^{-03}
25	1135	0.9973	8.81×10^{-04}
30	1376	0.9927	7.27×10^{-04}
35	1411	0.9639	7.09×10^{-04}
40	1338	0.9134	7.47×10^{-04}

Tabela 67 – Variação de Ltaper com Material Absorvedor em modo TE com GAP = 900 ηm

Ltaper[μm]	S_{bulk} [%/RIU]	R^2	sLOD
10	1205	0.9671	8.30×10^{-04}
15	1251	0.9643	7.99×10^{-04}
20	1320	0.9783	7.58×10^{-04}
25	1417	0.9375	7.06×10^{-04}
30	1276	0.9433	7.84×10^{-04}
35	1308	0.9599	7.65×10^{-04}
40	1300	0.9651	7.69×10^{-04}
45	1376	0.9927	7.27×10^{-04}
50	1336	0.9726	7.49×10^{-04}
55	1301	0.9624	7.69×10^{-04}
60	1219	0.9741	8.20×10^{-04}

Tabela 68 – Variação de W_{waist} com Material Absorvedor em modo TM com GAP = 1100 ηm

$W_{waist}[\eta m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
70	37	0.7495	2.70×10^{-02}
80	382	0.6051	2.62×10^{-03}
87	1485	0.9338	6.73×10^{-04}
88	1547	0.9692	6.46×10^{-04}
89	1585	0.9613	6.31×10^{-04}
90	1562	0.9748	6.40×10^{-04}
91	1459	0.8998	6.85×10^{-04}
92	1290	0.9116	7.75×10^{-04}
93	1023	0.8205	9.78×10^{-04}
100	263	0.9931	3.80×10^{-03}
110	93	0.9908	1.08×10^{-02}
120	54	0.9957	1.85×10^{-02}
130	39	0.9931	2.56×10^{-02}

Tabela 69 – Variação de L_{waist} com Material Absorvedor em modo TM com GAP = 1100 ηm

$L_{waist}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	650	0.9988	1.54×10^{-03}
15	904	0.9931	1.11×10^{-03}
20	1121	0.9866	8.92×10^{-04}
25	1354	0.9884	7.39×10^{-04}
27	1429	0.9888	7.00×10^{-04}
28	1466	0.988	6.82×10^{-04}
29	1498	0.9872	6.68×10^{-04}
30	1520	0.9863	6.58×10^{-04}
31	1541	0.9844	6.49×10^{-04}
32	1550	0.983	6.45×10^{-04}
35	1562	0.9748	6.40×10^{-04}
40	1528	0.9504	6.54×10^{-04}

Tabela 70 – Variação de L_{taper} com Material Absorvedor em modo TM com GAP = 1100 ηm

$L_{taper}[\mu m]$	$S_{bulk}[\%/RIU]$	R^2	sLOD
10	1317	0.9878	7.59×10^{-04}
15	1390	0.9854	7.19×10^{-04}
20	1391	0.9891	7.19×10^{-04}
25	1403	0.9858	7.13×10^{-04}
30	1401	0.9884	7.14×10^{-04}
35	1520	0.9863	6.58×10^{-04}
40	1561	0.9589	6.41×10^{-04}
45	1532	0.984	6.53×10^{-04}