

Moléculas Fotônicas aplicadas como filtro ótico em laser semiconductor para obtenção de fonte de luz monocromática sintonizável

Aluno: Marcus Vinicius do Amaral Pires
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Universidade Federal De São Carlos - UFSCar
São Carlos, SP
<https://lattes.cnpq.br/5072506108887205>

Orientador: Luis Alberto Mijam Barêa
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Universidade Federal De São Carlos - UFSCar
São Carlos, SP
<http://lattes.cnpq.br/7929868663210908>

Resumo—Esse trabalho demonstra a aplicação de Moléculas Fotônicas - PMs em engenharia espectral e sua capacidade de integrar um filtro ótico complexo e compacto, capaz de filtrar com eficiência e de maneira sintonizável, espectros de emissão larga e com diversas ressonâncias, gerados por um laser semiconductor formado por poços quânticos de InGaAs/InGaAsP. O dispositivo proposto foi projetado empregando softwares de simulação comerciais e utilizando resultados obtidos com a fabricação e caracterização de um laser bombeado eletronicamente. O sinal gerado por esse laser foi acoplado na PM projetada que permitiu filtrar os modos do laser multimodo, provando sua capacidade de seleção de uma única ressonância, aproximando a saída do sistema fotônico de um laser monomodo sintonizável.

Index Terms—Moléculas Fotônicas, Filtros óticos, microcavidades, Laser de microdisco, Laser semiconductor

I. INTRODUÇÃO

Com a disseminação da internet na década de 90 e com a chegada dos conceitos de “Internet das coisas” e “Realidade Aumentada” nos anos 2000, o conceito de Indústria 4.0 e a implementação do 5G na telecomunicação, há uma grande demanda de novas tecnologias que permitem garantir uma maior largura de banda para acompanhar o crescente aumento de taxa de informação e desempenho dos novos processadores.

De forma a atender essas demandas, dentre as diversas tecnologias desenvolvidas nesse período, um grande foco foi dado para as pesquisas envolvendo geração, manipulação e detecção de luz, gerando grandes avanços na área de dispositivos fotônicos, buscando criar mecanismos eficientes para emitir, transmitir, modular, processar, comutar, amplificar e detectar a luz, instigando também aos pesquisadores o desenvolvimento de estruturas com capacidade de incorporar funcionalidades fotônicas em circuitos integrados de larga escala de silício (VLSI), permitindo a construção de complexos sistemas optoeletrônicos, com baixos custos e possibilitando ter um controle eletrônico integrado.

Neste contexto o laser semiconductor, que surgiu em meados de 1960, ganhou bastante atenção, já que este dispositivo apresenta algumas características próprias: boa estabilidade na potência, pequena dimensão, vasta faixa de cobertura espectral, baixo consumo de energia, baixo custo e possibilidade de

modulação direta na corrente de injeção. O laser semiconductor se apresenta como importante ferramenta para pesquisa científica para aplicações em diferentes áreas da sociedade moderna. [1]

Na área industrial os lasers são utilizados, em sua grande parcela, em sensores óticos para realização de medições além de aplicações importantes para indústria, como solda garantindo ao processo uma maior precisão. Já em telecomunicações, os lasers são usados como fontes de luz para o envio do sinal ótico em uma fibra ou em guias de onda integrados.

Em uma gama variada de aplicações foi necessário o desenvolvimento de fontes óticas apropriadas a cada um desses novos sistemas, promovendo o desenvolvimento de diversos outros lasers com meios ativos diferentes bem como tamanhos diversos e potências distintas. Um dos principais desafios dessa tecnologia é o desenvolvimento de um único laser capaz de gerar múltiplos comprimentos de ondas coerentes e integrados em um mesmo chip.

Na fotônica outro aliado são os dispositivos optoeletrônicos baseados em micro-ressonadores óticos, sejam na forma de anéis ou discos, passivos ou ativos. Uma vez que estes micro-ressonadores são ultra-compactos [2] e de fácil integração com outros dispositivos, podem ser utilizados em blocos de construção versátil para circuitos fotônicos integrados de larga escala [3], permitindo executar uma ampla gama de funções em processamento de sinais óticos, onde há um destaque especial para obtenção de lasers baseados em ressonadores na forma de microdiscos, uma vez que eles oferecem vantagens para a obtenção de emissão estimulada em volumes diminutos.

Esses ressonadores possuem também a capacidade de integrar-se facilmente com outras micro-cavidades que permitem capturar seletivamente, liberar e armazenar fótons, e promover suas interações. Possuindo pequeno volume e alto tempo de vida fotônico, as micro-cavidades podem ser utilizados tanto para filtros espectrais quanto para interações de fótons com alta eficiência não linear.

Além disso o arranjo entre micro-cavidades possibilita uma combinação complexa entre seus espectros obtendo diversas

outras funcionalidades e aplicações. Tais dispositivos são chamados de Moléculas fotônicas (PMs) e são capazes de trazer funcionalidades complexas aos sistemas óticos, ampliando ainda mais a funcionalidade dos dispositivos fotônicos integrados.

Com o avanço da fotônica integrada e da capacidade de integrar com sucesso guias de ondas e microcavidades óticas, como anéis ou discos, é possível a utilização de diferentes aplicações em um único dispositivo trazendo diferentes componentes óticos e optoeletrônicos para um único chip, culminando em diversas aplicações, tais como nos chamados lab-on-a-chip, onde em um único chip integrado, de apenas alguns milímetros a alguns centímetros quadrados, é possível realizar uma ou várias funções de laboratório para obter automação e triagem de alto rendimento [4].

Com base nesta perspectiva o presente trabalho tem como objetivo explorar a utilização destes dispositivos integrados ao propor uma Moléculas Fotônicas constituída de um laser de microdisco juntamente com micro-cavidades passivas capazes de permitir o bombeamento ótico eficiente e possibilitando a obtenção de uma fonte de luz compacta e sintonizável.

II. METODOLOGIA

A. Laser de microdisco

Como citado anteriormente, para a realização do estudo foi utilizado uma fonte de luz proveniente de um laser semicondutor de microdisco. A arquitetura do laser utilizado nas simulações foi baseada na proposta apresentada por Lacerda [5] em sua pesquisa que apresenta um laser semicondutor formado por seis camadas de poços quânticos de InGaAs/InGaAsP, índice efetivo de refração (n_{eff}) de 2.5 na sua região ativa confinado em dois cristais dopados de InP, InP - n e InP - p, cuja geometria é em formato de microdisco permitindo o confinamento da radiação gerada dentro de sua cavidade. O modelo planar dos poços quânticos pode ser observado em Fig.1.



Fig. 1. Modelo planar dos poços quânticos usado para a fabricação do laser. Fonte: LACERDA [5].

Modelagem do laser de microdisco:

O princípio de funcionamento de um laser é baseado em emissão e absorção no qual quando um átomo é submetido a uma radiação de uma fonte externa ele absorve a energia dessa

radiação e, dependendo do nível dessa energia absorvida ele também pode emitir uma radiação de energia, denominados fótons. Nos lasers essa característica é realizada de modo a ser ter uma emissão majoritariamente estimulada, isso é, quando o átomo absorve a energia e emite uma radiação em fase com a absorvida.

Em uma estrutura com materiais semicondutores, a energia dos elétrons em átomos é quantizada, ou seja, a estrutura eletrônica dos átomos é formada por bandas de energia, no qual cada nível da banda de energia do átomo corresponde a uma função de onda dentro de um cristal e representa um estado quântico do elétron, sendo necessário ceder energia a este conjunto para mover um elétron de um estado quântico para outro.

Nestes materiais semicondutores as interações entre os átomos e seus elétrons de valência resultam em uma estrutura de banda onde é bem definida a banda de valência e a banda de condução, que são separadas por uma lacuna de energias denominada de Gap. Dessa forma, para que um elétron nessa condição possa passar da banda de valência para a banda de condução é necessária que esse elétron seja excitado por energia maior que a energia do Gap.

Ao considerar uma junção pn semicondutora como representado pelo diagrama apresentado em Fig.2(a), temos que, sem a aplicação de uma tensão externa, o nível de Fermi é contínuo ao longo da junção e a região de depleção da junção pn é estreita, temos também na região de depleção uma barreira de potencial que impede a difusão de elétrons e da formação de buracos da banda de condução de um lado da junção para o outro.

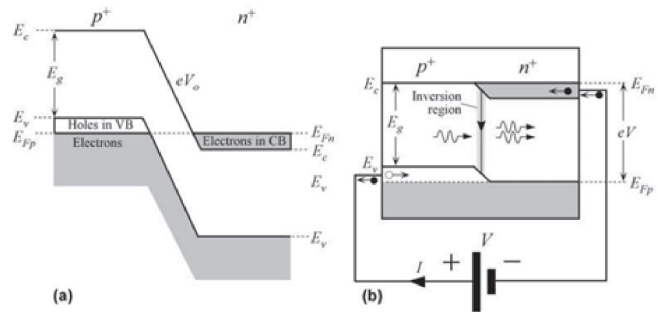


Fig. 2. Diagrama de inversão de população. (a) Banda de energia da junção pn degenerada. (b) Diagrama de banda de energia submetido a uma tensão externa suficiente para que haja a inversão de população. Fonte: Adaptado de [5]

Ao aplicar uma tensão externa nesse conjunto (Fig. 2(b)), sendo esta tensão maior que a tensão de Gap, há uma diminuição dessa barreira de potencial diminuindo a depleção na região e possibilitando a circulação de elétrons da banda de condução na região de depleção, bem como a circulação de buracos. Com isso ocorre uma concentração maior de elétrons na banda de condução, em comparação com a banda de valência, causando assim uma inversão de população de elétrons, obtendo com essa inversão a emissão de fótons.

Além da inversão de população para a geração de fótons é também necessário uma cavidade ótica que confine os fótons

gerados pela emissão estimulada, aumentando sua eficiência. Neste projeto o laser utilizado possui cavidade ótica em formato de microdisco o qual apresenta emissão radial e possui a presença de modos ressonantes do tipo WGM (whispering gallery modes) [6]. Em Fig.3 demonstra-se algumas propriedades desse tipo de cavidade no qual é possível ver a emissão radial em cada ponto pela qual a onda confinada é refletida 3(a) e também o perfil do campo elétrico juntamente com a onda evanescente nas bordas da cavidade 3(b).



Fig. 3. **Demonstração planar de uma cavidade ressonante.** (a) Emissão da radiação radial na borda da cavidade ressonante. (b) Ressonâncias e onda evanescente na borda da cavidade. **Fonte:** Adaptado de [6]

Para a simulação desse laser de microdisco foi utilizado o um script em Python para encontrar os modos ressonantes “m” em função do comprimento de onda da radiação emitida, limitada na faixa entre 1,1µm a 1,7µm, uma vez que a aplicação desse dispositivo é desejável para operação em telecomunicações. Para essa simulação foi utilizada a equação que relaciona os modos ressonantes com o comprimento de onda da radiação emitida.

$$\lambda_m = \frac{n_{ef} 2\pi R}{m} \text{ para } \lambda = [1.1, 1.7] \mu m \quad (1)$$

Obtendo-se os modos presentes no microdisco dentro da região espectral desejada é possível obter o espectro do laser por meio da equação que descreve o espectro da radiação emitida em função do comprimento de onda [5]:

$$I_T = \frac{1}{(1 - e^{\Delta})^2 + 4e^2 \sin^2(KL(M)/2)} \quad (2)$$

Onde:

$$\Delta = \left[\left(\frac{g - \alpha}{2} \right) L(M) + M \ln R \right] \quad (3)$$

Nessas equações temos que ‘g’ representa o ganho, ‘α’ representa as perdas intrínsecas do material, ‘L(M)’ é o perímetro do polígono descrito pela trajetória da onda dentro da cavidade, ‘M’ os modos azimutais, ‘R’ o raio do disco e ‘K’ o valor do vetor de onda, dado por $K = 2\pi N_{ef} / \lambda$.

Outra característica importante desse tipo de laser é o espaçamento entre os diversos modos da cavidade. Esse espaçamento espectral livre (FSR) é inversamente proporcional ao raio da cavidade, sendo dado por:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_{ef} 2\pi R} \quad (4)$$

Fabricação e caracterização:

Para a fabricação do laser de poços quânticos projetado foi escolhido o processo de fabricação utilizando FIB disponível nos laboratórios parceiros. Essa técnica de fabricação exigiu 7 etapas básicas: a limpeza da amostra, metalização para formação do contato ôhmico p, metalização para formação do contato ôhmico n, tratamento térmico, corrosão com o Feixe de Íons Focalizados (FIB), corrosão úmida seletiva e limpeza final da amostra [5].

Para fabricação do laser de microdisco desse trabalho, foi investigada a técnica de fabricação desenvolvida e aprimorada pelos autores da fonte [7]. Nessa técnica, resumida em Fig.4, a fabricação inicia-se com uma amostra planar de InP, contendo poços quânticos de InGaAsP/InGaAs, onde é definido previamente um microdisco com raio de 6 µm utilizando Ti/Pt/Au Fig4(a), obtido pela combinação de fotolitografia, deposição dos metais e liftoff, em Fig4(b) a amostra é levada ao sistema FIB para remover material ao redor do microdisco de metal e em seguida Fig4(c) é realizado um polimento com o próprio FIB, mas empregando uma corrente de corrosão baixa, a fim de minimizar a implantação de íons de gálio. Por fim em Fig4(d) tem-se o resultado de uma corrosão química úmida, utilizando uma solução de H₂O e HCl (1:4), que permite remover seletivamente o material InP, deixando estruturas em disco suspensas da camada de contato InGaAs e da região ativa / guia de ondas InGaAs/InGaAsP [7].

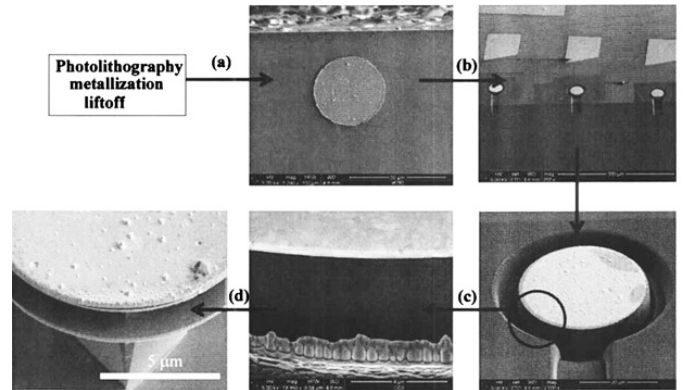


Fig. 4. **Esboço do processo de microresonador-fabricação.** **Fonte:** Adaptado de Low-roughness active microdisk resonators fabricated by focused ion beam [7] (a) Metalização de contatos e liftoff; (b) processo de fresa focalizada por feixe de íons utilizando 30 keV, 20 nA durante 5 min; (c) processo de polimento com FIB usando 30 keV, 1 nA por 6 min, resultando em paredes verticais e muito lisas; (d) Corrosão seletiva do InP usando 3HCl: 1H₂O por 40 s.

B. Molécula Fotônica

Da mesma forma como átomos se combinam para formar moléculas podemos dizer que cavidades se acoplam para formar PMs, as quais permitem a combinação de seus espectros formando uma resposta espectral complexa. A principal vantagem é que essa combinação de cavidades garantem um espectro com FSR curto, sem aumentar o tamanho das cavidades ou o tamanho dos dispositivos associados, como demonstrado no esquemático apresentado em Fig.5. Nos gráficos

apresentados pela figura Fig.5 é apresentado a combinação de cavidades internas para obtenção de novas ressonâncias com diferente FSR, de forma que, no conjunto em Fig.5(a), é apresentando diferentes PMs com ressonâncias das cavidades internas sendo ressonantes com a cavidade externa e nos conjuntos em Fig.5(b) o caso em que as ressonâncias das cavidades internas não são ressonantes na cavidade externa.

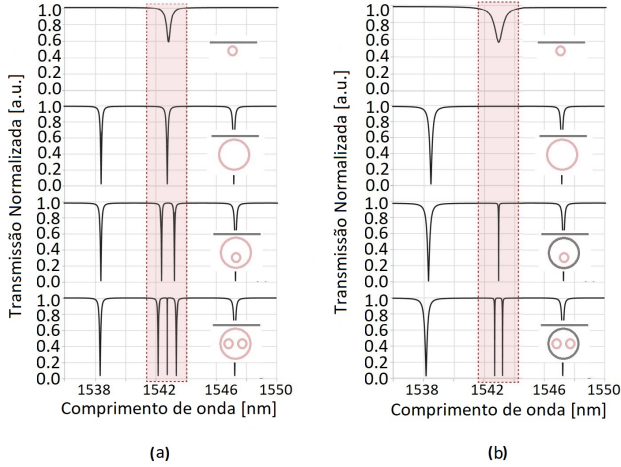


Fig. 5. Espectros de transmissão de diferentes moléculas fotônicas, para (a) ressonância das cavidades internas são ressonantes com a cavidade externa e (b) ressonâncias das cavidades internas não são ressonantes com a cavidade externa. As figuras inseridas em cada gráfico esquematizam as PMs observadas e as micro-cavidades pintadas em vermelho são as relacionadas com os comprimentos de onda na região de interesse dos gráficos. **Fonte:** Adaptado de [6]

Modelagem espectral e fabricação de um filtro ótico:

Para o projeto de dispositivos óticos integrados baseados em microcavidades acopladas, de maneira geral, é de grande importância estudar o comportamento da onda quando esta é acoplada em uma combinação de guias de onda com microcavidades. Este efeito pode ser facilmente compreendido através do método de matriz de transferência [8]. Utilizando este método para um guia dielétrico acoplado a um anel obtemos a equação matricial:

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & ik \\ ik^* & t^* \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde temos a_1 e a_2 como amplitudes da onda injetada e medida no guia de onda, b_1 e b_2 amplitudes dentro do anel, A sendo a atenuação no anel, t e t^* o fator de transmissão no anel e no guia e k e k^* o fator de acoplamento entre guia e anel, como apresentado no esquemático apresentado em Fig.6.

Ao considerarmos que não há perdas na região de acoplamento e sabendo que o ressonador possui atenuação praticamente nula $A \approx 1$, teremos a potência transmitida e medida na saída do guia dada por:

$$|a_2|^2 = \frac{A^2 + |t|^2 - 2A|t|\cos(\eta + \delta_t)}{1 + A^2 + |t|^2 - 2A|t|\cos(\eta + \delta_t)} \quad (6)$$

O ressonador entrará em ressonância quando $\eta + \delta_t = m.2\pi$, $param \in [1, 2, 3, \dots]$, o fator de transmissão, δ_t , está

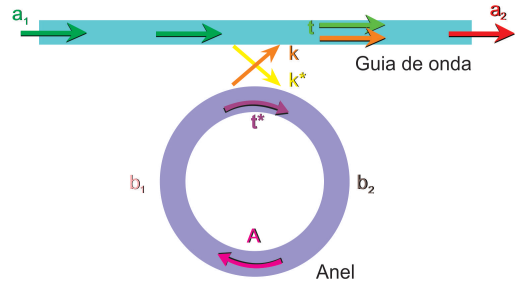


Fig. 6. Comportamento geral de uma onda em um filtro óptico composto por um guia dielétrico acoplado a um anel. **Fonte:**Autor

inserido em $\eta', \eta' = \eta + \delta_t = \frac{\omega L}{c/n} = \omega T$, com T sendo o tempo necessário para a onda dar uma volta na cavidade. Com essas considerações, é possível chegar na relação:

$$a_2 = \frac{t - Ae^{i\omega T}}{1 - tAe^{i\omega T}} \quad (7)$$

De forma mais geral, quando há mais de uma cavidade acoplada em uma cavidade externa, mas sem acoplamentos entre si, é possível demonstrar que a saída da PM é dada por [6]:

$$a_2 = \frac{t - (Ae^{i\omega T}) * N}{1 - (tAe^{i\omega T} * N)} \quad (8)$$

Onde:

$$N = \prod_{p=1}^n \left[\frac{t_{p'} - A_{p'} e^{i\omega T_{p'}}}{1 - t_{p'} A_{p'} e^{i\omega T_{p'}}} \right] \quad (9)$$

O gráfico em Fig.7 apresenta o espectro simulado utilizando a equação 8 para um filtro ótico contendo um guia de onda e um anel de raio $12.5 \mu\text{m}$ no qual temos os parâmetros Largura de meia altura representada por $\Delta\lambda_{FWHM}$; Índice de grupo n_g ; Espaçamento espectral livre FSR e Fator de Extinção FE, dados pelas equações:

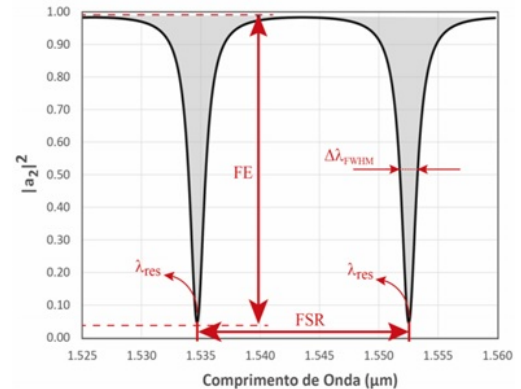


Fig. 7. Espectro de transmissão resultante de um filtro contendo um guia de onda e um anel de raio $12.5 \mu\text{m}$. **Fonte:**Autor

$$\Delta\lambda_{FWHM} = \frac{1}{\pi n_g L} \frac{(1 - A|t|)}{\sqrt{A|t|}} \lambda_{res}^2 \quad (10)$$

$$n_g = n_{ef} - \lambda_o \frac{dn_{ef}}{d\lambda} \quad (11)$$

$$FSR = \frac{\lambda_{res}^2}{n_g L} \quad (12)$$

$$FE = \frac{(|t| + A)^2 (1 - |t|A)^2}{(|t| - A)^2 (1 + |t|A)^2} \quad (13)$$

Outro dado importante que podemos tirar do espectro em Fig.7 que não estão mostrados são: a Finesse (F) e o fator de qualidade (Q). A Finesse está relacionada com o FSR e o Q está relacionado com a largura de linha da ressonância, por meio das equações:

$$F = \frac{FSR}{\Delta\lambda_{FWHM}} = \frac{\pi\sqrt{A|t|}}{(1 - |t|A)} \quad (14)$$

$$Q = \frac{\lambda_{res}}{\Delta\lambda_{FWHM}} = \frac{\pi L n_g \sqrt{A|t|}}{\lambda_{res}(1 - |t|A)} \quad (15)$$

Com relação à fabricação de filtros óticos, ao longo desse trabalho foram estudados os métodos de fabricação de PMs baseadas em uma plataforma de Nitreto de Silício sobre óxido de Silício, sobre Silício. Dentre as dificuldades para fabricação destas PMs, uma delas é a diferença entre as dimensões do guia e a região de acoplamento com a cavidade, pois geralmente as micro-cavidades em forma de anéis são formadas por um guia de largura de poucos microns, porém, elas devem estar centenas de nanômetros próximas dos guias para ocorrer o acoplamento.

Para contornar estas e outras dificuldades e satisfazer as exigências para acoplar as micro-cavidades, o processo de fabricação das PMs exige um a sequência bem definida aprimorada pelo [9] e é composta pelas etapas:

- a Limpeza da amostra (I)
- b Etapa de eletro-litografia e deposição de metal para as marcas de alinhamento (II – V)
- c Eletro-litografia para gravação dos guias e cavidades (VI – VIII)
- d Corrosão por plasma (IX)
- e Limpeza (X).

Essa sequência de etapa é ilustrada no esquemático em Fig.8, com as respectivas etapas demonstradas pelos números i – x.

C. Modelagem e simulação do filtro baseado em PM

Nessa seção discutimos as etapas de simulação do laser de microdisco multimodo utilizado como fonte de luz e do filtro compacto, bem como a simulação do conjunto formado pelo laser de microdisco com o filtro ótico baseado em PMs, observando as etapas utilizadas na modelagem do filtro de modo a se obter uma condição possível de filtrar os modos desejados desse laser.

Simulação do espectro do laser:

Utilizando a equação 2 foi simulado por script em Python para encontrar o espectro esperado do laser. Em Fig.9(a) é

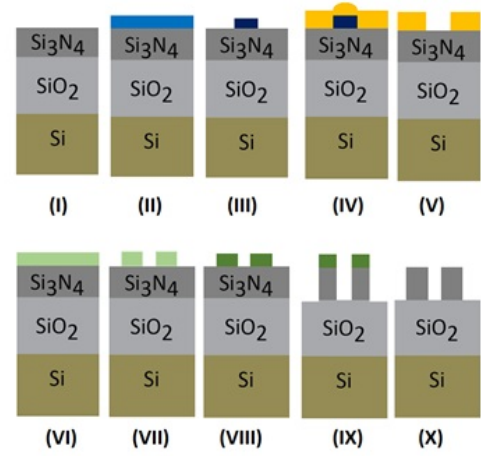


Fig. 8. Etapas de fabricação de uma sequência de PMs em nitreto de Silício. Fonte: Adaptado de Desenvolvimento de Estruturas Monolíticas de Guias de Ondas Acoplados a Micro-Cavidades. [9]

apresentado o espectro obtido utilizando o laser de microdisco com raio de 6 μm . Esse mesmo laser foi fabricado e caracterizado pelo autor na referência [5], obtendo a resposta experimental demonstrada em Fig.9(b).

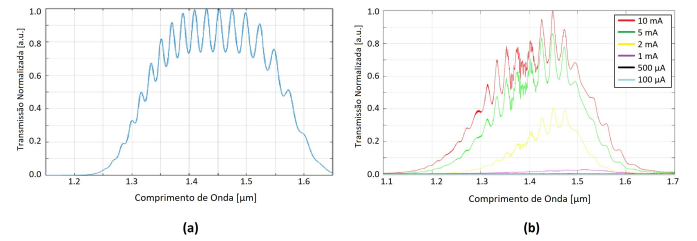


Fig. 9. Gráfico do espectro do laser de microdisco normalizado. (a) Simulação da resposta do laser de microdisco com raio de 6 μm Autor e (b) caracterização do laser de microdisco com raio de 6 μm variando sua corrente de excitação [5]

Analisando os espectros em Fig.9(a) e Fig.9(b) é possível ver que os espectros teóricos e experimentais se assemelham na forma, apresentando ressonâncias próximas, principalmente para o caso em que foi aplicado uma corrente de excitação de 10mA. Esse resultado da comparação valida a aproximação utilizada para simulação teórica do espectro do laser de microdisco.

Simulação do conjunto:

Para o projeto do filtro ótico, inicialmente foi investigada as microcavidades acopladas em série ao guia de onda (vide Fig.10(a)), o que permitiu visualizar separadamente a participação de cada cavidade na geração das ressonâncias do espectro final. Na simulação da resposta do conjunto laser e filtro com molécula fotônica, foi utilizado o software Mathematica, sendo que o espectro do laser obtido experimentalmente foi utilizado como bombeio no filtro ótico. Dessa forma foi sobreposto ao espectro do laser a resposta de um

filtro óptico baseado na equação 7 de modo a obter ressonâncias λ_{res} capazes de atenuar os picos do laser de forma que torna-se possível isolar um único pico central do laser.

Para essa simulação foi utilizado o espectro do laser caracterizado e demonstrado na Fig.9(b), com excitação realizada pela injeção de 10mA de corrente. Por se tratar de um resultado experimental, a utilização desse espectro na simulação garante uma maior assertividade nos valores escolhidos para as micro-cavidades. Nessa arquitetura foi simulado o espectro do filtro para cada anel separadamente, como mostrado em Fig.10(b) para $R=1 \mu m$, em Fig.10(c) para $R=2 \mu m$ e em Fig.10(d) para $R=3.5 \mu m$. Esses raios foram empregados para garantir FSRs capazes de isolar a ressonância central do laser em $1.455 \mu m$, atenuando as demais ressonâncias. Essa condição foi encontrada ao se utilizar 3 micro-ressonadores como apresentado pelas imagens em Fig.10.

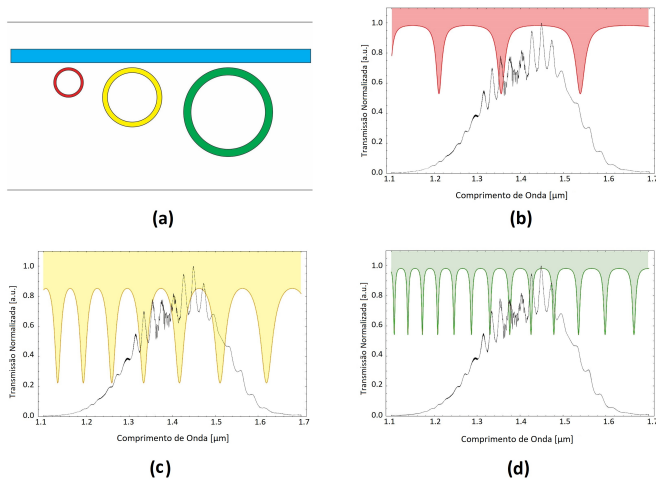


Fig. 10. Passos da simulação do filtro óptico com micro-ressonadores em série. (a) Arquitetura do filtro óptico com micro-ressonadores em formato de anéis em conjunto série; Resposta espectral para micro-ressonador com (b) Raio = $1 \mu m$, (c) Raio = $2 \mu m$ (d) Raio = $3.5 \mu m$; Fonte:Autor

Uma vez encontrada a melhor resposta espectral, ou seja, aquela que filtra as ressonâncias indesejadas do laser, por meio da soma de seus espectros (vide Fig.11(a)) foi utilizado essa resposta para obter o espectro teórico do laser na saída do filtro simulado (vide Fig.11(b)), no qual foi possível obter uma resposta com alta atenuação nas ressonâncias adjacentes a $1.455 \mu m$, representado pela curva vermelha. Comparando o espectro azul, antes do filtro, com o vermelho, após o filtro, é possível ver que a ressonância em $1.445 \mu m$ é selecionada, e a maior ressonância presente abaixo dela está atenuada em 2.2 dB. Apesar da alta atenuação ainda há uma resposta com alto ruído.

Para os parâmetros de simulação nessa arquitetura, utilizando a equação 7 para cada anel isoladamente, para um conjunto de 3 anéis com os seguintes parâmetros: $R_0 = 3.5 \mu m$; $R_1 = 2 \mu m$; $R_2 = 1 \mu m$; $\delta_{\varphi_0} = 0.65$; $\delta_{\varphi_1} = 0.20$; $\delta_{\varphi_2} = 4.10$; $A_0 = 0.95$; $A_1 = 0.50$; $A_2 = 0.95$; $K_0 = 0.857$; $K_1 = 0.617$; $K_2 = 0.694$; $eN_g = 1.8$. Com isso foi

simulado a resposta espectral do laser esperada na saída do filtro por meio da diferença entre o resultado obtido para o espectro do filtro com o espectro caracterizado do laser. O espectro apresentado em Fig.11(a) mostra a sobreposição entre a resposta espectral da combinação das cavidades, demonstrado pela linha em vermelho e a resposta espectral do laser, de modo que teremos na região cinza uma atenuação da potência do laser devido o filtro óptico obtido. Dessa forma é apresentado em Fig.11(b) o espectro do laser antes (azul) e depois (vermelho) de passar pelas cavidades.

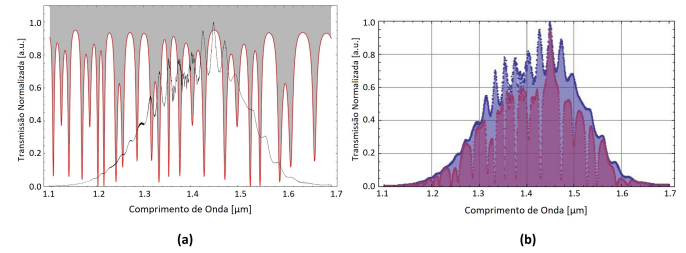


Fig. 11. Resposta espectral simulada para do laser de microdisco junto com um filtro óptico composto por micro-cavidades óticas em formato de anel. (a) sobreposição do espectro do laser caracterizado com a resposta espectral simulada do conjunto de micro-cavidades; (b) Sobreposição da Resposta espectral do laser caracterizado com sua resposta simulada após passar pelo filtro com micro-cavidades. Fonte:Autor

Posteriormente a esta etapa foi utilizado a equação 8 para simular a resposta espectral do conjunto para uma PM constituída pelas mesmas micro-cavidades utilizadas anteriormente, de modo a ser obtido uma arquitetura com dois anéis internos, sem acoplamento entre si, e um anel externo com a micro-cavidade de maior raio, como apresentado em Fig.12(a). Esse arranjo garante que o filtro seja muito mais compacto. A resposta espectral resultante, seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente, pode ser observado em 12(b) um comportamento muito similar ao obtido na arquitetura anterior obtida por um conjunto de micro-cavidades em série (vide Fig.11(b)), mas com uma redução considerável na dimensão do filtro.

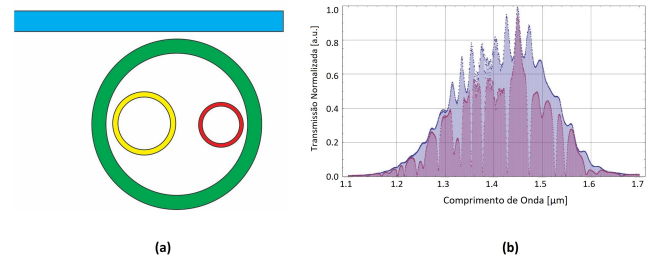


Fig. 12. Simulação do filtro utilizando Molécula Fotônica. (a) Arquitetura da molécula fotônica composta por um anel de $3.5 \mu m$ e dois anéis internos de $2.0 \mu m$ e $1.0 \mu m$; (b) Simulação da Resposta espectral do laser após passar pela molécula fotônica modelada Fonte:Autor

Como comentado anteriormente, apesar da boa atenuação dessa arquitetura nas ressonâncias adjacentes do laser em

1.455 μm , essa resposta ainda não se caracteriza como um bom resultado ao se observar a relação sinal-ruído (OSNR) uma vez que os picos adjacentes (caracterizados como ruído) possui uma amplitude relativamente alta em relação ao sinal (pico central a ser isolado) obtendo-se aproximadamente 2.2 dB de atenuação. Dessa forma, optou-se por realizar a simulação da resposta espectral do laser ao passar por um conjunto de 3 PMs idênticas como demonstrado pela em Fig.13(a).

Esse processo foi utilizado ao se esperar um acúmulo das atenuações do ruído a medida em que o pico central se mantém com baixa atenuação, sendo então possível obter um espectro com maior definição no pico central do laser e maior atenuação nas ressonâncias indesejadas. Esse procedimento garantiu uma atenuação de aproximadamente 5 dB entre a ressonância selecionada e segunda maior em potência (vide Fig.13(b)), em outras palavras obteve-se uma resposta onde o segundo maior pico de potência é aproximadamente 65% menor que o pico com maior potência ótica.

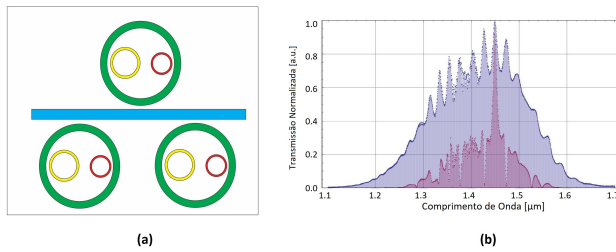


Fig. 13. **Simulação da Resposta espectral do laser em um filtro com três moléculas fotônicas** (a) Esquemático do filtro com três moléculas fotônicas idênticas e (b) Simulação da resposta espectral do laser ao passar três vezes pela mesma molécula fotônica. **Fonte:**Autor

Posteriormente, foi realizada a sintonização do pico central escolhido. Este desvio no espectro do filtro é facilmente controlado modificando-se o termo que descreve o comportamento da onda $e^{i\omega T}$ na Equação 8. Para o caso de $n=2$ (duas cavidades internas), como é possível observar nos espectros apresentados em Fig.14(a) e Fig.14(b) que mostram, respectivamente, o efeito de um aumento e uma redução na temperatura dos elementos aquecedores que permitindo gerar um redshift e um blueshift na resposta espectral da PM. Esses desvios permitem selecionar as ressonâncias adjacentes daquela já selecionada (vide Fig.13(a)), garantindo uma sintonização das ressonâncias do laser semiconductor. Esse efeito poderá ser feito fisicamente utilizando um elemento aquecedor sobre as cavidades, e até mesmo outros mecanismos que permitirão o controle de acoplamento nas cavidades do filtro, garantindo não somente a sintonização do pico, mas também do seu fator de extinção.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este projeto apresentou a modelagem e simulação de uma molécula fotônica para aplicação como filtro sintonizável para uma fonte de luz com resposta espectral complexa provando que PMs permitem garantir um dispositivo com reduzidas

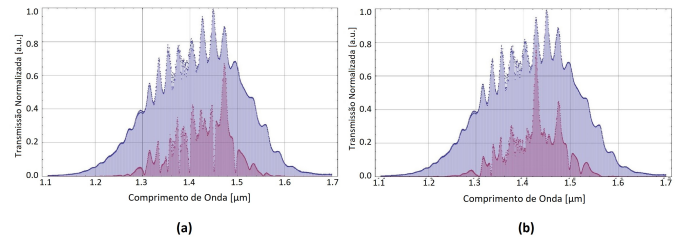


Fig. 14. **Gráfico normalizado comparativo do espectro experimental do laser com o espectro teórico esperado na saída da PM proposta com desvio no espectro das cavidades** Simulação obtido para: a) $\delta_{\varphi 0} = 5.5$; $\delta_{\varphi 1} = 3.9$; $\delta_{\varphi 2} = 3.25$; eb) $\delta_{\varphi 0} = 3.25$; $\delta_{\varphi 1} = 1.55$; $\delta_{\varphi 2} = 5.45$ **Fonte:**Autor

dimensões e, por se tratar de um dispositivo baseado em tecnologia de silício, de fácil integração com outros dispositivos fotônicos.

Com esse dispositivo foi possível obter uma fonte de luz monocromática a partir de um laser dicromático com relação sinal-ruído OSNR de aproximadamente 5 dB. Apesar de ser um valor baixo em comparação a outras tecnologias, as quais apresentam OSNR superiores a 12 dB, esse dispositivo possui a vantagem de ter uma área diminuta bem como ser de fácil integração com outros dispositivos fotônicos que não necessitam em sua aplicação de uma OSNR alta como na maioria dos lasers encontrados na literatura que operam em aplicações de transmissão, sendo então um excelente dispositivo para aplicações em detecção e análise.

O esquemático em Fig.15(a) resume nossa primeira ideia para obter um filtro ótico complexo e compacto capaz de filtrar dinamicamente um laser dicromático, formado por camadas de poços quânticos de InGaAs/InGaAsP (vide Fig.15(b)), de forma a permitir passar em sua saída uma única ressonância desse laser. Este filtro possui um conjunto de 3 anéis, com raio de 3.5 μm , com duas cavidades passivas acopladas internamente a elas, com raio de 2 μm e 1 μm (vide Fig.15(c)), que são responsáveis pelo controle espectral do dispositivo por meio do controle do supermodo gerado pelas cavidades internas e sintonizado por aquecedores integrados. Em Fig.15(d) é apresentado o espectro experimental deste laser de microdisco (curva azul) com raio de 6 μm que foi utilizado para simular a resposta do filtro ótico complexo obtendo-se o espectro filtrado desse laser com apenas um único pico central em evidência (curva vermelha).

IV. CONCLUSÃO

Esse trabalho demonstrou que é possível a obtenção de um filtro ótico complexos com moléculas fotônicas ao apresentar um dispositivo formado pela integração de três PMs capazes de filtrar dinamicamente uma faixa de frequências de modo que sua saída possua uma resposta espectral suficiente para ser considerada como um espectro monocromático. Esse filtro, integrado com o laser de microdisco, pode ser considerado uma fonte de luz sintonizável em um tamanho diminuto, ocupando uma área de aproximadamente $20 \times 20 \mu\text{m}^2$, que representa uma diminuição de aproximadamente 1:2.2 em

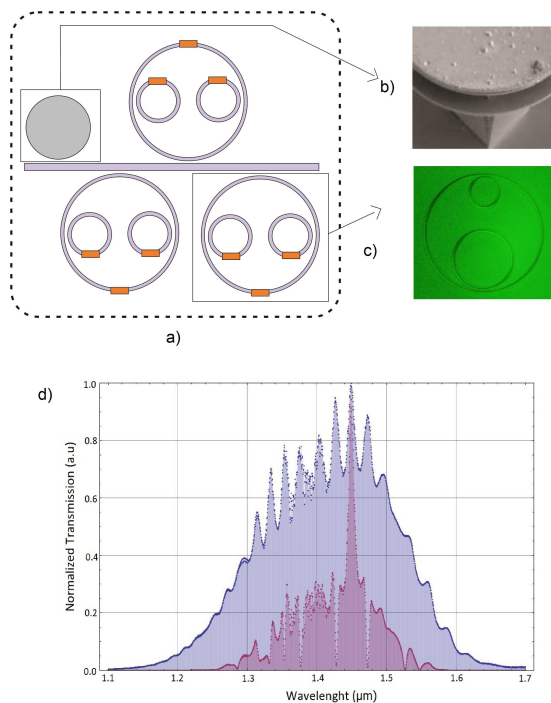


Fig. 15. **Dispositivo proposto para obter uma fonte de luz sintonizável.** (a) Arquitetura do dispositivo proposto; (b) Microscopia eletrônica do laser de poços quânticos de 6 μm ; (c) Microscopia eletrônica da PM com Raio de 3.5 μm e raios internos de 2 μm e 1 μm ; (d) Espectro caracterizado do laser com corrente de excitação de 10 mA (curva azul) e Espectro simulado do laser após o filtro proposto com PMs (curva vermelha) **Fonte:**Autor

relação a uma arquitetura convencional constituída por filtros com microcavidades passivas e ainda mais considerando filtros utilizando outras tecnologias.

V. TRABALHOS FUTUROS

Para consolidar os dados obtidos pela teoria e pelas simulações desenvolvidas nesse projeto se faz necessário a fabricação e caracterização dos componentes envolvidos no projeto, laser de microdisco e moléculas fotônicas. Como os equipamentos envolvidos na fabricação dos chips integrados, que comportam componentes óticos e eletrônicos da ordem de dezenas de nanômetros, possuem um alto custo, tanto para aquisição quanto para manutenção, torna-se difícil a realização desse processo.

Entretanto, ao longo desse projeto foi possível conseguir, por meio de parceria, a fabricação de alguns desses componentes para serem avaliados juntamente com outras pesquisas e projetos de acordo com os processos de fabricação abordados na pesquisa. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no Anexo I.

A fabricação também é possível por meio de programas de fabricantes especializados, Foundries, que recebem o design dos dispositivos vindos de indústrias, centros de pesquisa ou grupos acadêmicos, que aplicam uma série de processos de micro e nano fabricação e devolvem os chips com garantia de alta resolução e qualidade na fabricação.

Nestas condições é necessário a adequação das dimensões dos componentes para as especificações de acordo com os pedidos pela Foundrie, bem como o desenvolvimento desses dispositivos com os dados de materiais fornecido por elas.

REFERENCES

- [1] OLIVEIRA A.B. BARBOZA P.M.T. Sobre lasers semicondutores. *Revista Acta Scientia*, 2(2):87–98, Jul 2020.
- [2] BEAUSOLEI R.G. Xu Q., FATTAL D. 1.5- μm -radius high-Q silicon microring resonators., 2008. *Optics Express* 16, 4309–4315.
- [3] SCHWELB O. A decade of progress in microring and microdisk based photonic circuits: a personal selection., 2008. *Proc. Of SPIE*, vol. 6872.
- [4] YESTISEN A.K. VOLPATTI L.R. Commercialization of microfluidic devices., 2014. *Trends in Biotechnology* 32 (7): 347–350.
- [5] LACERDA L.F.V. Modelagem, fabricação e caracterização de um laser semicondutor de microdisco formado por poços quânticos de InGaAs/InGaAsP., 2017. Monografia (Engenharia Elétrica), UFSCar (Universidade Federal de São Carlos), São Carlos-SP, Brasil.
- [6] BARÊA L.A.M. Moléculas Fotônicas para aplicações em engenharia espectral e processamento de sinais óticos., 2014. Tese (Doutorado) – Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil.
- [7] BARÊA L.A.M. et al. Low-roughness active microdisk resonators fabricated by focused ion beam. *Journal Of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 27(6):2979–2981, Aug 2010.
- [8] A. Yariv. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides. *Electronics Letters*, 36:321 – 322, 03 2000.
- [9] BARÊA L.A.M. Desenvolvimento de Estruturas Monolíticas de Guias de Ondas Acoplados a Micro-Cavidades., 2010. Tese (Mestrado) – Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil.

Anexo I - Fabricação e Caracterização

I. MÁSCARAS DE FABRICAÇÃO:

De acordo com o estudo realizado antes das etapas de fabricação, deu-se início ao projeto da máscara virtual. O projeto dessa máscara foi realizado no software livre KLayout e salvo em extensões DXF.

Com o intuito de aproveitar a etapa de fabricação para análise de outros parâmetros foi sugerido a fabricação das moléculas fotônicas com diferentes Gaps entre o guia e o anel interno e diferentes Gaps entre o anel externo com os anéis internos, para verificar o impacto desse parâmetro na resposta espectral das PMs, permitindo ser assertivo na melhor distância a ser utilizada.

Dessa forma a figura Fig.16 apresenta a máscara do filtro projetado onde é possível ver um conjunto de 5 filtros utilizando uma área de escrita de 1mm x 1mm. Os guias de onda foram definidos de modo a facilitar o acoplamento com fibras para auxiliar em sua caracterização.

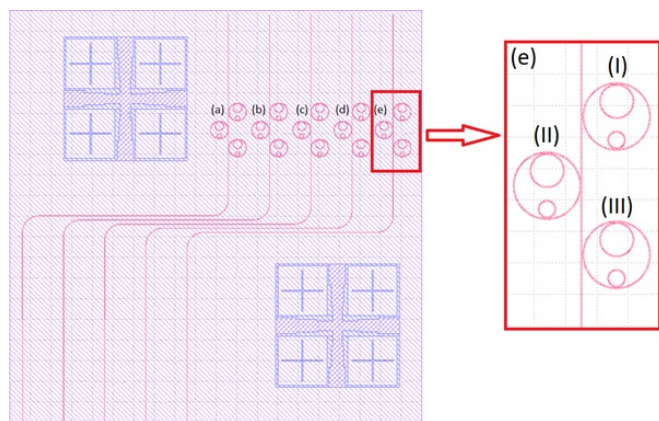


Fig. 16. Máscara virtual que será utilizada para fabricação dos filtros em nitreto de Silício. Fonte: Autor

Definindo os filtros em 17 de (a) até (e) da esquerda para a direita e definindo as moléculas como (I) até (III) como exemplificado em Fig.6, foi definido os valores de GAP para guia/cavidade e cavidade/cavidade Tabela I.

TABLE I
RELAÇÃO GAPS PARA FABRICAÇÃO DOS FILTROS.

Dispositivo	PM	Gap Guia/Cav	Gap Cav/Cav
(a)	I	0.25 μm	0.25 μm
	II	0.25 μm	0.25 μm
	III	0.25 μm	0.25 μm
(b)	I	0.25 μm	0.35 μm
	II	0.25 μm	0.35 μm
	III	0.25 μm	0.35 μm
(c)	I	0.25 μm	0.45 μm
	II	0.25 μm	0.45 μm
	III	0.25 μm	0.45 μm
(d)	I	0.35 μm	0.35 μm
	II	0.15 μm	0.25 μm
	III	0.35 μm	0.25 μm
(e)	I	0.40 μm	0.35 μm
	II	0.10 μm	0.25 μm
	III	0.40 μm	0.25 μm

II. FABRICAÇÃO:

Moléculas Fotônicas:

A Figura Fig.17 apresenta a primeira tentativa de fabricação utilizando a máscara desenvolvida nesse projeto. Observando a imagem de microscopia óptica (Fig. 17(b)), é possível ver que os guias de onda não resistiram a etapa de revelação, rompendo-se durante o processo de fabricação. Esse problema pode ter ocorrido devido a uma falha na exposição do eletroresiste. De toda forma, é possível ver que as cavidades resistiram a essa etapa e parecem estar adequadas.

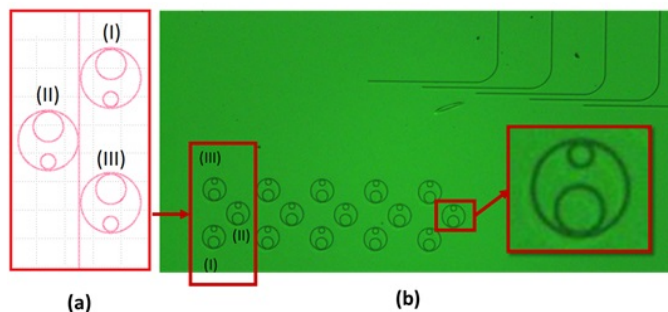


Fig. 17. Microscopia óptica de um conjunto de filtros de Nitreto de silício com moléculas fotônicas. (a) Zoom da máscara virtual demonstrando a disposição das PMs planejadas, que podem ser observadas na microscopia óptica do chip fabricado (b), onde também é identificada cada uma das cavidades e percebe-se a ausência de parte do guia de onda que não resistiu à etapa de revelação. Fonte: Autor

Laser:

Seguindo os passos para a obtenção de lasers de poços quânticos, foi dado início ao processo de fabricação do laser. Em Fig.18 é apresentado um grupo de 4 lasers de microdisco com 4 parâmetros de cortes distintos. Em cada um desses cortes foi utilizada uma corrente diferente, representada em verde sobre cada microdisco. A ideia é conseguir identificar, após a fabricação e medida dos espectros desses microdiscos, qual a melhor corrente para corrosão, ou seja, a que causou menor dano ao dispositivo.

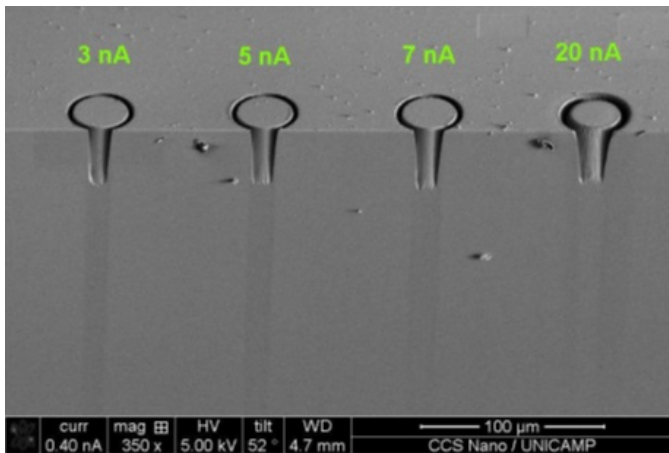


Fig. 18. **Influência da corrente do feixe de corte na fabricação do laser de microdisco.** Microscopia eletrônica de um conjunto de 4 lasers de poços quânticos variando a corrente do feixe de corte com parâmetros: $V=30$ kV; $I=3, 5, 7$ e 20 nA; dwell time= 1 μ s; Pitch= 70 nm; Overlap= 50% ; Refresh time= 0 e $Z=0.9$ μ m, com distância entre discos de aproximadamente 50 μ m **Fonte:**Autor

Foi realizada a deposição dos contatos tipo P sobre toda a amostra, e definidos os tamanhos do microdisco com a máscara virtual desenhada no próprio FIB. Essa máscara virtual consistiu de um anel, onde o raio interno é o raio desejado para o microdisco (30 μ m), e o raio externo é a região desejada para remoção de material. Foi considerado 5 μ m para essa região, o que é suficiente para a solução de HCl penetrar e realizar a corrosão úmida, definindo os pedestais dos microdiscos. Estes dispositivos estão na etapa de corrosão úmida.

Seguindo as etapas de fabricação levantadas no estudo teórico, foi possível também criar e levantar os parâmetros necessários para a fabricação do dispositivo proposto. Com o intuito de investigar qual a influência de cada parâmetro da fabricação, nesse caso a corrente de corrosão no FIB, por exemplo, no funcionamento do dispositivo, foi fabricado o mesmo componente variando-se esses parâmetros. Esse procedimento irá ajudar a entender qual a melhor condição dentro do processo de fabricação e como dar esse passo para se obter, no final, uma resposta espectral mais próxima quanto possível da

resposta teórica obtida nas pesquisas anteriores.

Seguindo esse pensamento foi realizada a fabricação de 4 laser de poços quânticos variando-se a corrente do feixe de corte e verificando, de forma visual, qual a influência desta corrente na rugosidade das paredes do laser (Fig.19). Posteriormente foi realizado o polimento destes componentes com FIB e novamente confrontado visualmente com a etapa anterior, qual foi a melhoria na rugosidade. A figura Fig.19 evidencia essa contribuição confrontando o laser fabricado 19(a) com a microscopia eletrônica após a etapa de polimento 19(b), verificando que esta etapa contribuiu significativamente para uma drástica redução na rugosidade do disco. Lembrando que a rugosidade da parede, gerada na fabricação, é a principal responsável pelas perdas de propagação dos dispositivos lasers, podemos afirmar a priori que o polimento deverá ser bastante eficaz, uma vez que permitiu essa redução da rugosidade.

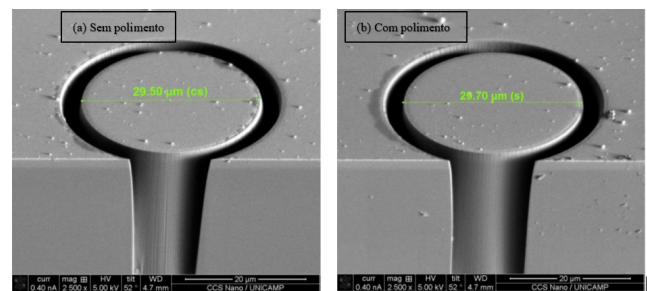


Fig. 19. **Influência do processo de polimento FIB na fabricação do laser de poços quânticos.** (a) Microscopia eletrônica do laser de poços quânticos com parâmetros do feixe de corte: $V=30$ kV; $I=3$ nA; dwell time= 1 μ s; Pitch= 70 nm; Overlap= 50% ; Refresh time= 0 e $Z=0.9$ μ m; e (b) Microscopia eletrônica do laser de poços após polimento FIB com parâmetros de feixe de polimento: $V=30$ kV; $I=3$ nA; dwell time= 1 μ s; Pitch= 70 nm; Overlap= 50% ; Refresh time= 0 e $Z=0.8$ μ m **Fonte:**Autor