

Fabricação de interferômetro de Mach Zehnder e linhas de atraso em filme fino de Niobato de Lítio

Palavras-Chave: Fotônica integrada, Niobato de Lítio, Criptografia quântica

Autores:

Higor Vasques, IFGW – Unicamp

Prof. Dr. Newton C. Frateschi (orientador), IFGW – Unicamp

INTRODUÇÃO:

A escalabilidade e versatilidade de soluções baseadas em fotônica integrada, juntamente com a consolidação das suas técnicas de fabricação já impactam a área de telecomunicações e computação de alta performance [1, 2]. Essas características, aliadas à estabilidade da informação codificada em forma de luz em condições ambientes geram o interesse da aplicação de circuitos fotônicos integrados em tecnologias quânticas [3, 4]. O avanço dessas tecnologias coloca em risco padrões de criptografia amplamente utilizados atualmente, como o RSA [5], o que torna o desenvolvimento de formas de criptografia resistente a ataques utilizando computação quântica essenciais.

Para isso, uma das soluções propostas é o uso de protocolos de troca de chaves quânticas, onde a chave criptográfica é trocada através de um canal seguro, imune à espionagem e com capacidade de detecção de intrusos. Dentre diversos protocolos, um dos primeiros é o BB84 [6], que usa um esquema de enviar a informação em diferentes bases de medida, enquanto o receptor mede essa informação em bases aleatórias. Após o fim da comunicação o remetente revela as bases de medida, que quando concordam produzem bits corretos, e no caso contrário produzem bits aleatórios. Em seguida, o remetente revela as bases usadas, e considerando apenas as medidas corretas, eles revelam pedaços da informação, que discordariam se alguém tentasse interferir na comunicação. Caso não haja divergências eles usam o resto da mensagem como chave criptográfica.

Nosso trabalho se propõe a fazer o design e a fabricação dos componentes básicos, bem como avaliar a viabilidade da implementação do protocolo BB84 utilizando circuitos fotônicos integrados com codificação temporal da informação.

METODOLOGIA:

Para implementação do protocolo vamos usar uma codificação temporal, onde um pulso de luz chegando num tempo t_1 representa um bit 0, enquanto outro chegando com atraso num tempo t_2 representa um bit 1. Para conseguir esse atraso temporal o feixe de luz é colocado em uma linha de

atraso, que consiste em um guia de onda espiral longo com comprimento na ordem de centímetros, para que seja gerado um atraso detectável. Também precisamos da construção de interferômetros de Mach-Zehnder (MZI, em inglês, Mach-Zehnder Interferometer) para atuarem como divisores de feixe, gerando a superposição de estados necessária para construção das bases de medida. Assim, os principais componentes do nosso circuito são os MZIs e as linhas de atraso.

Por fim, é necessário a escolha do material em que o circuito será fabricado. Dentre os diversos materiais disponíveis, o Niobato de Lítio (LN) se destaca devido a sua excelente capacidade de modulação eletro-óptica, necessária para comunicação com alta largura de banda. Recentes avanços em técnicas de fabricação permitiram a comercialização de wafers de filme fino de LN, o que viabiliza seu uso como plataforma para circuitos fotônicos integrados. Dessa forma, considerando sua capacidade de modulação eletro-óptica e diversas outras vantagens [7], bem como o avanço da capacidade de fabricação em LN do nosso grupo de pesquisa, escolhemos esse material para nosso circuito.

Além disso, também é necessária uma forma para o acoplamento da luz dentro do chip, inicialmente feito por *grating coupling*, mas com possibilidade de utilizar *edge coupling* também. Com isso temos os componentes mostrados na figura 1. Para o design é necessário o uso de simulações, de modo a minimizar as possíveis perdas. Para isso foram feitas simulações de FDTD (em inglês, Finite-difference time-domain method) no Ansys Lumerical.

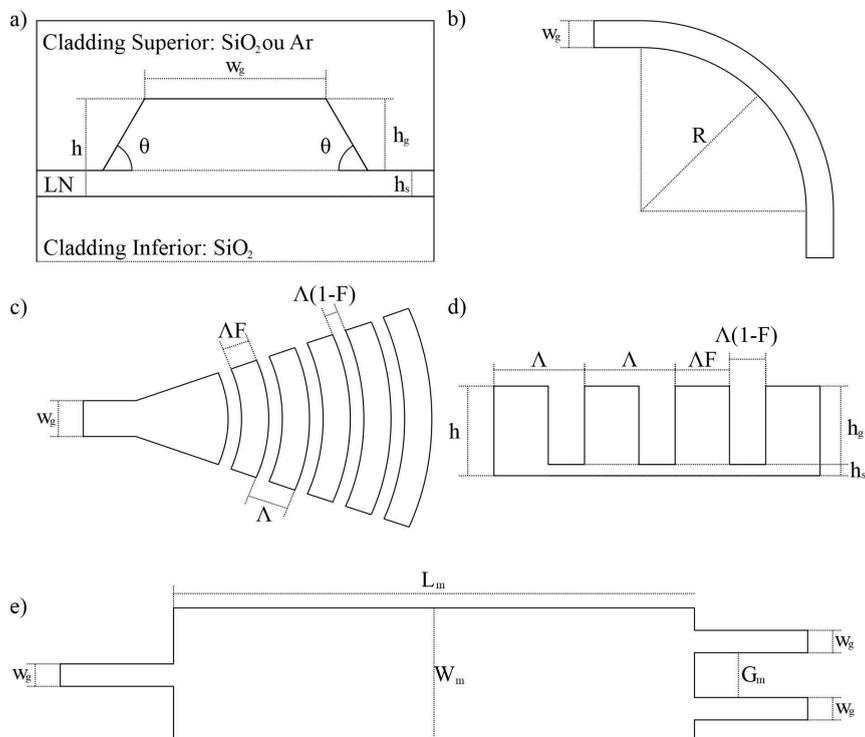


Figura 1 - a) Secção transversal do guia de onda. b) Curva de 90° feita com o guia de onda. c) Visão Superior da grade de difração. d) Corte transversal da grade de difração. e) Esquema de divisor de feixes por MMI. Todas figuras fora de escala.

Por fim, com os resultados da simulação podemos partir para a fabricação dos componentes bases, utilizando um sistema de litografia por feixe de elétrons usando como eletroresiste Man-2405,

seguido de uma corrosão física com Argônio em um ICP-RIE (em inglês, *Inductive Coupled Plasma - Reactive Ion Etching*). Com os componentes básicos fabricados podemos enfim realizar as medidas de perda de acoplamento e transmissão, bem como tentar fazer a medida do atraso do pulso.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Para esse projeto, por limitações na capacidade de corrosão, foi escolhido utilizar um wafer com $h = 400 \text{ nm}$ de Niobato de Lítio (LN, do inglês, *Lithium Niobate*) em cima de $2 \mu\text{m}$ de sílica. Para essa espessura usamos o design padrão do grupo de guia monomodo, conforme figura 1-a, com largura $W_g = 1 \mu\text{m}$, altura do guia de $h_g = 350 \text{ nm}$ e altura do slab de $h_s = 50 \mu\text{m}$. Optamos por ter um slab pois ao corroer totalmente o LN foi obtida uma superfície muito rugosa, o que aumentaria as perdas. Por fim, a angulação da parede depende da técnica de fabricação, de tal forma que obtemos atualmente paredes com ângulo $\theta = 60^\circ$.

Com o design do guia de onda decidido partimos para simulação do divisor de feixe, que é utilizado para construção do MZI, para qual podem ser utilizados y-splitters, directional couplers e MMIs (em inglês, *Multi-Mode Interferometer*). Escolhemos o MMI por ser mais robusto a erros de fabricação, seguindo o esquema da figura 1-e. Usando o *Lumerical* inicialmente simulamos diversos designs usando uma FDTD 2D, buscando as dimensões que apresentavam maior eficiência. No entanto, encontramos um método melhor de simulação usando EME (Em inglês, *EigenMode Expansion*), no qual mantendo uma largura fixa podemos fazer um sweep do comprimento, sendo muito mais rápida e eficiente. Com esse método encontramos para um MMI de largura $W_m = 6 \mu\text{m}$, comprimento $L_m = 21,86 \mu\text{m}$ e gap $G_m = \mu\text{m}$ uma eficiência de 97,6%, equivalente à -0.1 dB .

Em seguida foi feito um estudo da perda por irradiação em guia de ondas curvados em função do raio de curvatura, usando uma simulação em FDTD 3D, com o resultado exposto na figura 2. Vemos que conforme aumentamos o raio de curvatura a perda do caso de um guia linear ideal, com perdas zero. Essa simulação é importante pois quanto maior o raio de curvatura mínimo da espiral maior é sua área ocupada, porém com perdas menores, portanto é um passo fundamental para decidir o formato ideal de espiral.

Por fim, foi feita a otimização de um acoplador por grade de difração conforme a figura 1-c, onde Λ é a periodicidade dada pela condição de bragg de primeira ordem para um comprimento de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$ e F é o fator de preenchimento, também introduzimos uma variação do fator de preenchimento controlada pelo fator R dada por $F(x) = F_0 - Rx$, o que nos deixa com dois parâmetros livres, F_0 e R . Fazendo o sweep desses parâmetros, mostrados na figura 3, obtemos uma grade com acoplamento de -6.7 dB .

Com as principais simulações concluídas, partimos para a fabricação dos componentes bases, que passou por contratemplos, pois o sistema de feixe de elétrons do CCSNano está não operacional desde fevereiro, porém conseguimos realizar a litografia no sistema do LNNano. No entanto o sistema

de corrosão por ICP-RIE também ficou operacional no período do projeto, e enquanto o LNNano possui um ICP, trata-se de um sistema diferente, o que requer a calibração de uma nova receita. Por conta disso, foi realizada apenas a etapa de litografia até o momento.

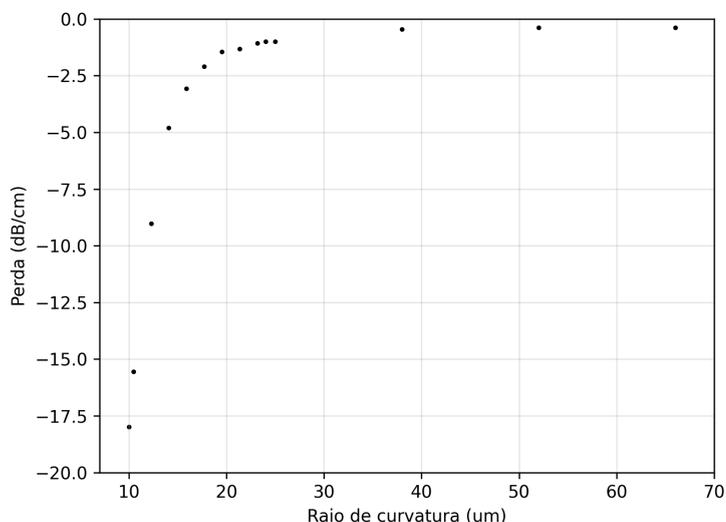


Figura 2 - Perdas por irradiação em um guia de onda curvado em função do raio de curvatura.

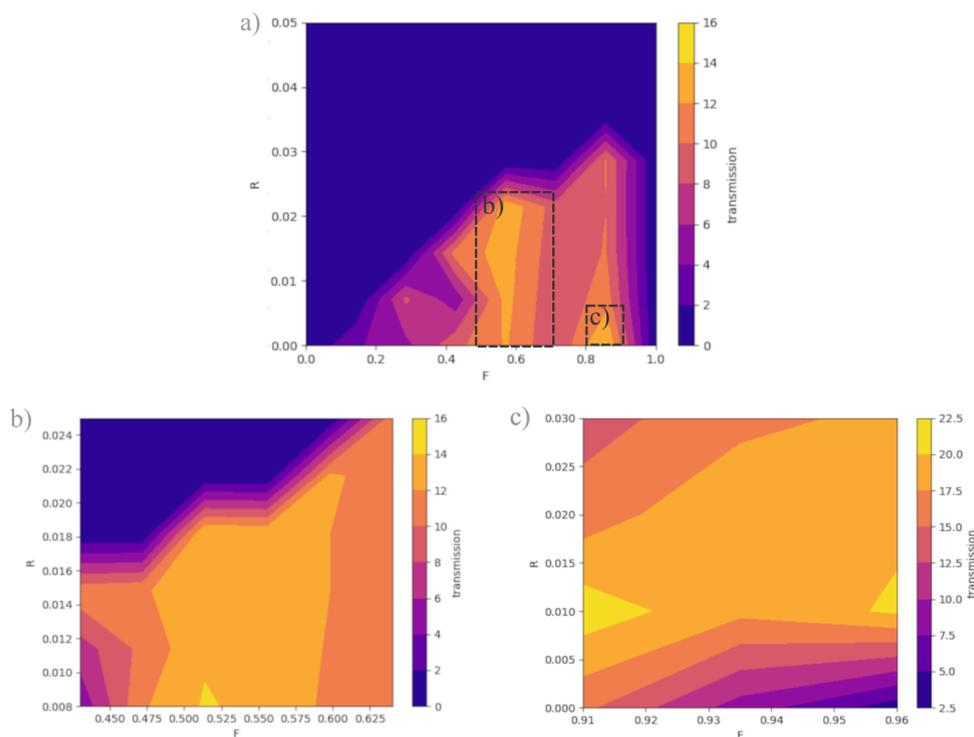


Figura 3 - a) Sweep inicial dos parâmetros livres, com duas regiões mais promissoras, marcadas com linhas pontilhadas. b) Sweep dos parâmetros livres na região pontilhada B. C) Sweep dos parâmetros livres na região pontilhada C.

Na amostra fabricada até o momento, fizemos componentes para caracterização da perda por raio de curvatura, perda por stitching do sistema de litografia, bem como testes dos *MMIs* e dos *grating couplers*. Além disso, por limitações do sistema de litografia precisamos manter os componentes dentro de um campo de escrita de $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$, que não é capaz de conter uma espiral. Por isso iremos ligar várias espirais em séries, de forma a minimizar a perda ao cruzar um campo de escrita. Os resultados da litografia atual se encontram na figura 4.

Nessa litografia, para os sistemas de testes de perda será utilizado *edge coupling* para acoplamento, visto que ainda não foram testados os *grating couplers*.

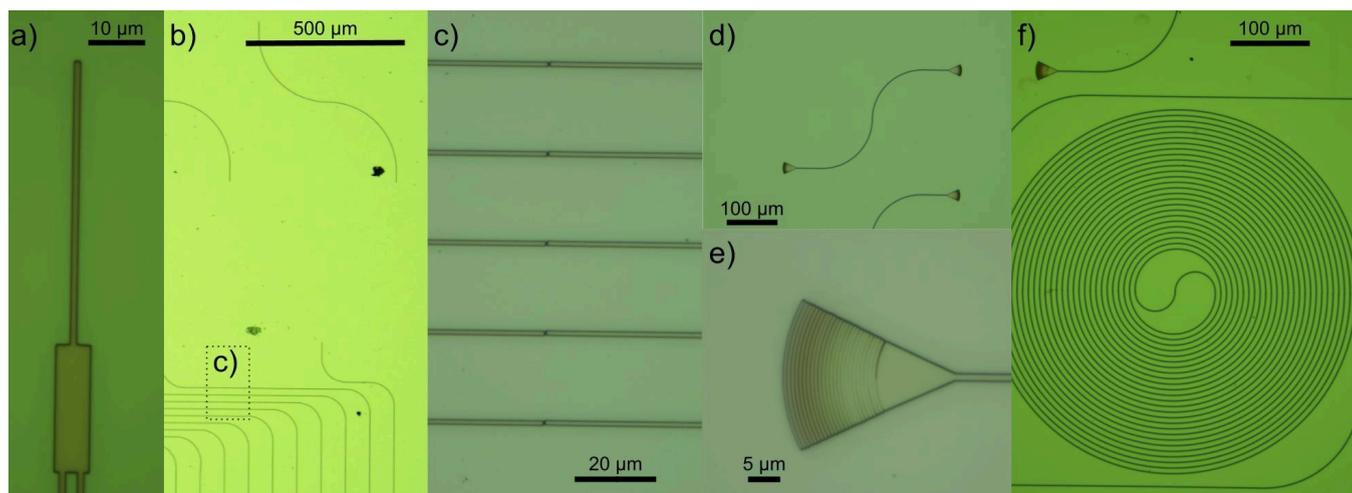


Figura 4 - resultados da litografia. a) Dispositivo para teste do MMI 1x2, b) Dispositivos para medida de perdas em curvatura e dispositivo para medida de perda por stitching. c) Exemplo do erro de stitching, na região pontilhada de "b)". d) Dispositivo para teste do *grating coupler*. e) Unidade do *grating coupler*, onde percebemos que a resolução usada não foi suficiente para fabricação correta. f) Unidade básica de uma linha de atraso, com 23mm de comprimento.

CONCLUSÕES:

Neste trabalho foi proposto o design e a fabricação dos componentes básicos para um circuito para implementação do protocolo BB84 usando codificação temporal. Ao longo do projeto fizemos simulações e otimizamos os componentes necessários para a composição do circuito final. Também, apesar da impossibilidade de fazer a fabricação completa por conta de equipamentos atualmente não operacionais, a litografia dos componentes de teste foi feita, sendo uma etapa importante para atingir a fabricação completa do dispositivo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. A. Vlasov, "Silicon CMOS-integrated nano-photonics for computer and data communications beyond 100G," in IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 2, pp. s67-s72, February 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6146487.
- [2] J. A. Kash et al., "Optical interconnects in exascale supercomputers," 2010 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Denver, CO, USA, 2010, pp. 483-484, doi: 10.1109/PHOTONICS.2010.5698971.
- [3] Pelucchi, E., Fagas, G., Aharonovich, I. et al. The potential and global outlook of integrated photonics for quantum technologies. Nat Rev Phys 4, 194–208 (2022). <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00398-z>
- [4] Wang, J., Sciarrino, F., Laing, A. et al. Integrated photonic quantum technologies. Nat. Photonics 14, 273–284 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0532-1>
- [5] Sharma, M., Choudhary, V., Bhatia, R. S., Malik, S., Raina, A., & Khandelwal, H. (2020). Leveraging the power of quantum computing for breaking RSA encryption. Cyber-Physical Systems, 7(2), 73–92. <https://doi.org/10.1080/23335777.2020.1811384>
- [6] C.H. Bennett, G. Brassard, in: Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, Bangalore, India, December, 1984, pp. 175–179.
- [7] Di Zhu, Linbo Shao, Mengjie Yu, Rebecca Cheng, Boris Desiatov, C. J. Xin, Yaowen Hu, Jeffrey Holzgrafe, Soumya Ghosh, Amirhassan Shams-Ansari, Eric Puma, Neil Sinclair, Christian Reimer, Mian Zhang, and Marko Lončar, "Integrated photonics on thin-film lithium niobate," Adv. Opt. Photon. 13, 242-352 (2021)