XXX Congresso de Iniciação Científica UNICAMP

Estudo de materiais 2D como moduladores de fase para implementação de portas lógicas quânticas em fotônica integrada a baixas temperaturas

Palavras-chave: Grafeno, Portas lógicas quânticas, Modulador de fase.

Autores:
Anderson Souza Vulto [UNICAMP]
Prof. Dr. Pierre-Louis de Assis (orientador) [UNICAMP]

1 Objetivos

- Aprender os conceitos básicos sobre Informação Quântica;
- Realizar a revisão bibliográfica de artigos da área de portas quânticas integradas;
- Entender como os conceitos se manifestam em sistemas fotônicos;
- Fazer simulação de elementos finitos para elementos básicos para aplicação em portas quânticas;
- Avaliar através das simulações os diferentes materiais 2D, de propriedades optoeletrônicas conhecidas, a respeito do desempenho enquanto moduladores de fase.

2 O projeto

Levando em conta os avanços no processamento de *qubits*, propõe-se a utilização de guias de onda e fontes de fótons como forma de criação dessas unidades de informação quântica por meio da fotônica integrada. Tendo em vista a teoria quântica para a manipulação de qubits através de portas lógicas quânticas, utiliza-se de elementos ópticos lineares como divisores de feixe e moduladores de fase concatenados em um circuito para produzir operadores unitários, de acordo com o trabalho apresentado por Knill, Laflamme e Milburn [1].

Mais tarde, o módulo principal desses dispositivos foi reestruturado de modo a torná-los mais compactos, escaláveis e reconfiguráveis. Agora, ao invés de definir ângulos e fases serem fixos para os divisores de feixe presentes nos operadores apresentados por Knill, Laflame e Milburn, é mais interessante construir as operações utilizando composições de interferômetros de Mach Zehnder também como divisores de feixe variáveis (*VBS*) [2], o que permite a reconfiguração do interferômetro reaproximando a taxa de divisão entre os feixes da ideal $50 : 50$ e portanto torna a operação possível pois reduz a propagação de erros entre as medições, estes que são provenientes de imperfeições intrínsecas ao processo de fabricação.

Essa reconfiguração é dada através da aplicação de um potencial sobre um condutor em contato com o material no qual o feixe luminoso é propagado através do guia. Assim, permite uma variação na fase do feixe através da mudança no índice de refração do material causada a partir de uma resposta eletro-ótica e portanto reconfigurando o operador aplicado em função do potencial elétrico introduzido. O mecanismo é de grande interesse se pudermos quantificar os ângulos de divisão do feixe e a fase aplicada desejados em função da operação unitária desejada.

Então, pode-se considerar uma matriz do divisor de feixe $T_{m,n}(\theta, \phi)$ em função do ângulo de divisão do feixe e da fase aplicada, onde m e n são os guias de onda (portas) interagindo. A partir dela, é possível criar uma composição de produtos matriciais na qual a matriz T considerada deve possuir θ e ϕ tais que anulem os elementos das diagonais inferiores da matriz $N \times N$ do operador unitário utilizado. Assim, é possível compor uma matriz diagonal [3], onde N é a dimensão da matriz unitária.

$$D = (U \cdot T_{N,N-1} \cdot T_{N,N-2} \cdots T_{2,1})^{-1}$$

A partir daí também é de interesse explorar um pouco mais a disposição dos operadores e também otimizar a aplicação de interferômetros no sistema para a criação de portas lógicas quânticas para interação de qubits, o que pode ser feito utilizando não só as matrizes $T_{m,n}(\theta, \phi)$ mas também a sua inversa $T^{-1}_{m,n}(\theta, \phi)$ [4] e assim construir uma nova matriz unitária U como a composição:

$$U = D \cdot (\prod_{m,n \in S} T_{m,n})$$

Essa disposição permite achar a solução para a matriz diagonal D em função de todos os θ_i e ϕ_i referentes às configurações de cada interferômetro para dado operador unitário aplicado ao sistema.

Portanto, com o objetivo de explorar as interações do potencial aplicado com a fase e o ângulo de separação do feixe calculados em diferentes materiais, e que funcionarão como moduladores de fase, foram realizadas simulações utilizando o *software* COMSOL Multiphysics® tanto com o intuito de reproduzir os resultados de [5], para um guia de onda de filme fino de $LiNbO_3$, como também para estudar novas estruturas com guias de onda de Si e Si_3N_4 com moduladores de fase de grafeno. Avaliam-se então os modos acoplados no guia, o fator de confinamento óptico Γ do modo na área transversal e consequentemente a diferença na fase do feixe introduzida pelo material e o índice de refração efetivo Δn_{eff} [5].

Como o projeto está relacionado com as atividades pré desenvolvidas pelo grupo de pesquisa na área de fontes de fótons únicos, é de interesse que os dispositivos atuem em temperaturas criogênicas. Para isso, é necessário que os moduladores não sofram perda de eficiência de modulação ou de largura de banda.

Como isso não é o caso para a maioria dos materiais utilizados à temperatura ambiente, pois os mecanismos de sintonia são reduzidos com a temperatura, o grafeno se mostra como uma das alternativas dadas as condições impostas uma vez que, além de ser um excelente condutor, a mobilidade dos portadores aumenta a baixas temperaturas [6]. Então, será de interesse entender e explorar as configurações de modulação utilizando grafeno em poucas camadas tanto propostas por Lee [6] e por Wang [7] quanto as de interesse direto para utilização em conjunto à fontes de fóton único. É importante ressaltar que não há interesse em utilizar o modulador com base em absorção e portanto uma nova configuração do dispositivo terá que ser proposta para que seja possível operar o dispositivo apenas realizando a modulação de fase.

Nos dispositivos baseados em grafeno, devemos considerar a condutividade óptica como a principal propriedade na análise de modos através das simulações propostas. Será utilizado um regime de *Pauli blocking*, no qual a absorção do grafeno é suprimida por não haver estados disponíveis para a transição ótica. Para isso, é preciso trabalhar com estruturas capacitivas de modo que não haja apenas a aplicação de um potencial mas também a geração de um campo elétrico.

3 Resultados

Realizando as simulações através do *software* COMSOL Multiphysics® utilizando como estudo a análise dos modos confinados no guia de onda avaliados através da seção transversal do dispositivo construído, foram utilizadas como base os moduladores de fase de niobato de lítio (Figura 1) e de grafeno (Figura 2).

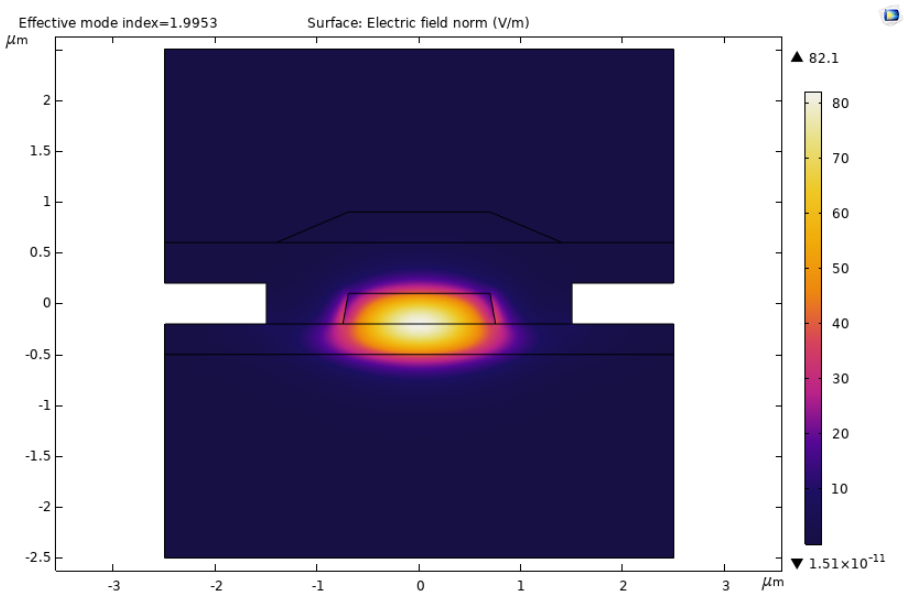

Figura 1: Simulação de um modo único com $n_{eff} = 1.9953$ acoplado no guia de onda de um filme fino de niobato de lítio sobreposto por SiO_2. Disposição da seção transversal similar a [5].

Dos resultados obtidos para 1, foi possível obter o fator de confinamento óptico Γ e como consequência a mudança no índice efetivo do modo Δn_{eff} e portanto $V_\pi \cdot L$ (o produto da tensão à meia onda pela distância entre os pontos de contato do circuito). Para o modulador de fase de $LiNbO_3$:

Γ	$-2.1207 \cdot 10^5\ m^{-1}$
Δn_{eff}	$3.429 \cdot 10^{-5}$
$V_\pi \cdot L$	$2.26\ V \cdot cm$

Tabela 1: Resultados obtidos através das equações em [5] e considerando $L = 0.9\mu m$

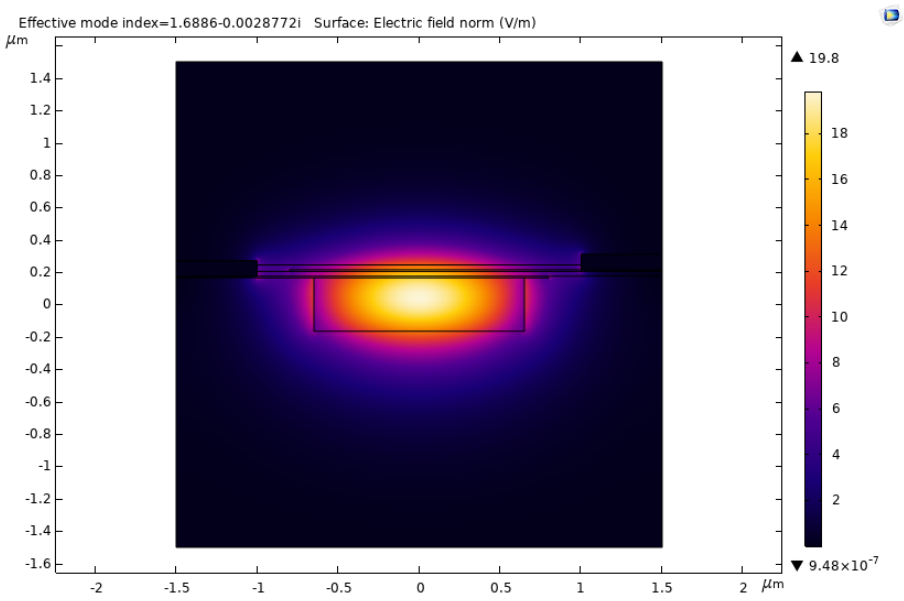

Figura 2: Simulação de um modo único com $n_{eff} = 1.6886 - 0.0028772i$ acoplado no guia de onda de Si_3N_4 sobreposto por um modulador de fase de grafeno (*dual-layer graphene*) com uma camada dielétrica de Al_2O_3. Disposição da seção transversal similar a [6].

Referências

[1]E. Knill, R. Laflamme e G. J. Milburn, "A scheme for efficient quantum computation with linear optics", Nature **409**, 46–52 (2001).

[2]C. M. Wilkes, X. Qiang, J. Wang, R. Santagati, S. Paesani, X. Zhou, D. A. B. Miller, G. D. Marshall, M. G. Thompson e J. L. O'Brien, "60 dB high-extinction auto-configured Mach–Zehnder interferometer", Optics Letters **41**, 5318 (2016).

[3]M. Reck e A. Zeilinger, " Experimental Realization of Any Discrete Unitary Operator ", Physical Review Letters **73**, 58–61 (1994).

[4]W. R. Clements, P. C. Humphreys, B. J. Metcalf, W. S. Kolthammer e I. A. Walmsley, "Optimal design for universal multiport interferometers", Optica **3**, 1460–1465 (2016).

[5]Y. Liu, H. Li, J. Liu, S. Tan, Q. Lu e W. Guo, " Low V π thin-film lithium niobate modulator fabricated with photolithography ", Optics Express **29**, 6320 (2021).

[6]B. S. Lee, B. Kim, A. P. Freitas, A. Mohanty, Y. Zhu, G. R. Bhatt, J. Hone e M. Lipson, "High-performance integrated graphene electro-optic modulator at cryogenic temperature", Nanophotonics **10**, 99–104 (2020).

[7]J. Wang, S. Paesani, Y. Ding, R. Santagati, P. Skrzypczyk, A. Salavrakos, J. Tura, R. Augusiak, L. Mančinska, D. Bacco, D. Bonneau, J. W. Silverstone, Q. Gong, A. Acín, K. Rottwitt, L. K. Oxenløwe, J. L. O'Brien, A. Laing e M. G. Thompson, "Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics - SI", Science **360**, 285–291 (2018).