



Moléculas fotônicas e seu impacto na fotônica integrada e em sensores ópticos

Gabriel R. da Ascensão e Luís A. M. Barêa
Universidade Federal de São Carlos -UFSCar

RESUMO: Na última década, tem ocorrido um aumento exponencial na demanda de dados da rede mundial de computadores alavancado por um número cada vez maior de dispositivos conectados e de novos serviços oferecidos, como o streaming e a hospedagem de dados em nuvem. A conectividade à Internet cresce a taxas superiores ao aumento global da população e para suprir toda essa demanda é imprescindível aumentar a capacidade e velocidade de transmissão e processamento de informações, mas sem gerar acréscimos significativos na potência dissipada e dimensão dos componentes empregados. Nesse contexto, a fotônica integrada vem cada vez mais provando ser uma tecnologia necessária e facilitadora para suprir essas demandas atuais, aumentando os limites da taxa de transferência e processamento de dados na forma de sinais ópticos ao mesmo tempo que contribui para progressos substanciais em áreas emergentes, como em sensores ópticos integrados.

ABSTRACT: In the last decade, there has been an exponential increase in the demand for data on the world wide web, driven by an increasing number of connected devices and new services offered, such as streaming and cloud data hosting. Internet connectivity is growing at rates higher than the global increase in population and to meet all this demand it is essential to increase the capacity and speed of transmission and processing of information, but without generating significant increases in the dissipated power and size of the components used. In this context, integrated photonics is increasingly proving to be a necessary and enabling technology to meet these current demands, pushing the limits of data transfer and processing rates in the form of optical signals while contributing to substantial progress in emerging areas, such as integrated optical sensors.

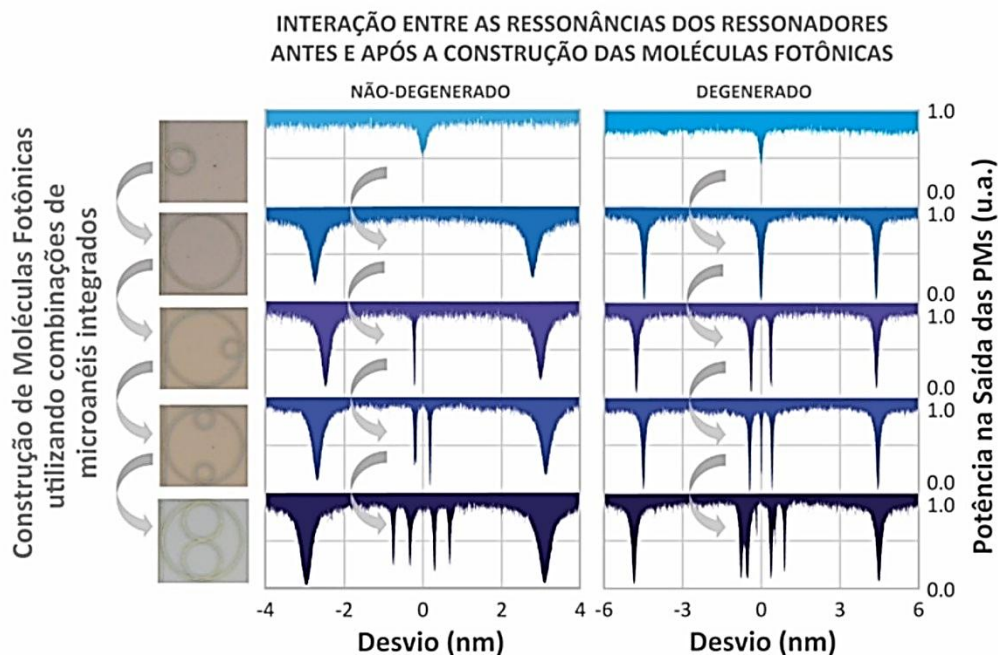
<http://doi.org/10.5281/zenodo.14920808>



Na última década, tem ocorrido um aumento exponencial na demanda de dados da rede mundial de computadores alavancado por um número cada vez maior de dispositivos conectados e de novos serviços oferecidos, como o streaming e a hospedagem de dados em nuvem. A conectividade à Internet cresce a taxas superiores ao aumento global da população e para suprir toda essa demanda é imprescindível aumentar a capacidade e velocidade de transmissão e processamento de informações, mas sem gerar acréscimos significativos na potência dissipada e dimensão dos componentes empregados. Nesse contexto, a fotônica integrada vem cada vez mais provando ser uma tecnologia necessária e facilitadora para suprir essas demandas atuais, aumentando os limites da taxa de transferência e processamento de dados na forma de sinais ópticos ao mesmo tempo que contribui para progressos substanciais em áreas emergentes, como em sensores ópticos integrados.

Diversas aplicações da fotônica integrada baseiam-se em blocos de construção versáteis e um componente quase onipresente é um ressonador na forma de anel ou disco, com diâmetros menores que o de um fio de cabelo. Esses ressonadores são capazes de armazenar a luz em volumes diminutos, gerando ressonâncias estreitas e com alto fator de qualidade (Q), proporcionando baixo consumo de energia e alta velocidade de processamento aos dispositivos baseados neles. No entanto, quando esses ressonadores são utilizados sozinhos, seu desempenho é limitado em algumas aplicações devido, por exemplo, à dependência intrínseca do tempo de vida do fóton armazenado, da distância entre as ressonâncias e do tamanho do ressonador, que reduz sua versatilidade. Para superar esse e outros desafios, novas combinações de anéis e discos vêm sendo propostas e desenvolvidas por grupos de pesquisa no Brasil [1–5] e no exterior [6–11], e sua construção tem uma estreita comparação com a formação de moléculas a partir de átomos. Quando olhamos para natureza é bem sabido que o potencial eletrostático entre o núcleo e os elétrons de um átomo define os níveis discretos de energia dos seus estados eletrônicos. Esse mesmo efeito ocorre quando olhamos para um ressonador em anel, onde a quantização das frequências ópticas surge das múltiplas voltas que a luz realiza no seu interior, aprisionando fótons assim como os átomos aprisionam os elétrons. De forma análoga (mas não equivalente) às moléculas, que resultam da hibridização dos estados eletrônicos entre dois átomos vizinhos, quando dois ou mais anéis são construídos muito próximos, em uma escala típica do

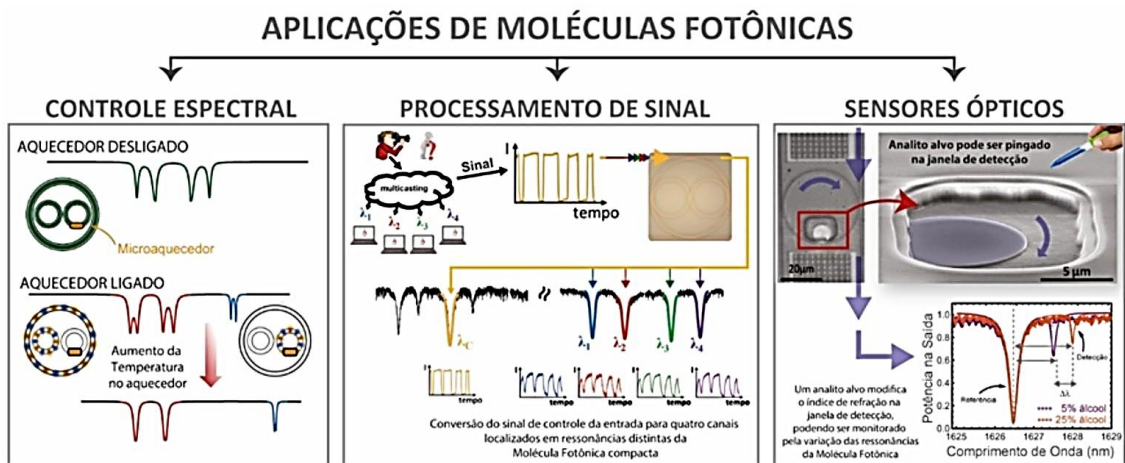
comprimento de onda da luz, eles funcionam como “átomos fotônicos” e suas combinações geram as chamadas “moléculas fotônicas” (PMs). Pesquisadores brasileiros, nos últimos anos, já demonstraram que a construção de moléculas fotônicas integradas pode ocorrer por meio da combinação de anéis acoplados no interior de um anel externo, construídos em uma plataforma de silício sobre isolante (SOI) e utilizando processos de micro e nanofabricação similares aos empregados na fabricação de circuitos eletrônicos integrados [1–5].



Nessas moléculas fotônicas, o acoplamento entre os anéis gera respostas espectrais complexas graças à interação entre as ressonâncias de cada um dos ressonadores acoplados, preservando a área do chip, uma vez que são utilizadas regiões usualmente desprezadas, como o interior dos anéis, para realizar o acoplamento dos ressonadores. À medida que o número de anéis acoplados é incrementado, as respostas espectrais mostram condições não-degeneradas, quando as ressonâncias dos anéis internos e externo não são coincidentes em um mesmo comprimento de onda, e condições degeneradas, quando essas ressonâncias coincidem. Essas condições permitem o surgimento de dupletos, tripletos e quadrupletos de ressonâncias, podendo contabilizar até seis ressonâncias empregando apenas três anéis, desde que garantido o acoplamento dos anéis internos entre si.

Essa engenharia espectral habilita a construção de espectros com reduzidos espaçamentos entre as ressonâncias e larguras de linhas finas, mesmo com anéis de

reduzidos raios, quebrando a dependência entre esses parâmetros presentes em um dispositivos baseados em um único anel. Essa engenharia espectral também pode ser sintonizada controlando-se a posição das ressonâncias com microaquecedores integrados sobre os guias de onda que formam os anéis. Por meio do efeito termo-óptico, o índice de refração local do guia de onda é alterado com o aumento da temperatura no microaquecedor, tornando a engenharia espectral sintonizável. Essa característica garante a realização de divisão de modos ópticos para ajustar a resposta espectral em dispositivos integrados compactos. Alguns trabalhos na literatura [4,12] já demonstraram que uma molécula fotônica com três anéis acoplados (dois anéis internos acoplados entre si) permite realizar essa divisão de modo óptico de maneira contínua e ajustável, mitigando as mudanças indesejadas em algumas ressonâncias que acontecem nesse tipo de aplicação. Em particular, esse dispositivo permitiu a transição de um duplete, com largura de banda de 80 GHz, para uma única ressonância, empregando baixa potência (35mW) e área compacta ($40 \times 40 \mu\text{m}^2$). Os autores demonstraram ainda que o controle em apenas um dos anéis internos é suficiente para sintonizar o acoplamento entre esses anéis, cessando o acoplamento contra-propagativo presente, garantindo a transição de um quadruplete, por exemplo, para um duplete de ressonâncias.



Esses resultados provam que as moléculas fotônicas podem criar dispositivos ultrarrápidos, compactos e com eficiência de energia para aplicações em filtros ópticos com largura de banda ajustável, modulação de banda lateral única e fotônica de micro-ondas. Para citar outro exemplo, essa mesma molécula fotônica compacta pode ser utilizada para aplicações em processamento de sinais ópticos, como *multicasting*



totalmente óptico em comprimento de onda [3]. *Multicasting* é uma importante ferramenta utilizada para gerenciar o trânsito de dados em redes, permitindo replicar um sinal transmitido em um comprimento de onda para outros múltiplos comprimentos de onda, que podem ser individualmente processados e transmitidos para diferentes destinatários. Explorando efeitos de modulação óptica causada pela dispersão de portadores livres, capaz de cobrir toda a resposta espectral da molécula fotônica e causar deslocamentos similares em todas as suas ressonâncias, pesquisadores brasileiros demonstraram a transmissão de um mesmo sinal para quatro ressonâncias separadas de 50 GHz, exigindo apenas 1 mW de potência de controle [3]. Para saber o potencial dessa demonstração, se ela fosse realizada em um anel único, exigiria dimensões e potência de controle dez vezes maiores que a empregada na molécula fotônica utilizada. E para demonstrar que as moléculas fotônicas são capazes de impulsionar áreas emergentes, como a de sensores ópticos e laboratórios em um único chip, pesquisadores brasileiros também demonstraram recentemente uma plataforma fotônica integrada que compreende um sensor de índice de refração baseado em uma molécula fotônica compacta [13,14]. Essa molécula fotônica consiste em um ressonador de microdisco, parcialmente revestido, acoplado a um ressonador de anel externo e totalmente revestido, ambos fabricados em uma plataforma SOI. Essa configuração de ressonadores permitiu utilizar as ressonâncias do anel como referência e as do microdisco como de detecção, garantindo monitoramento de qualquer analito-alvo colocado na janela de detecção por meio de medidas diferenciais entre essas ressonâncias. Esse esquema de medição diferencial foi capaz de mitigar a influência de perturbações ambientais, enquanto fornecia ressonâncias estreitas e com alto valor de Q. A caracterização experimental desse sensor demonstrou que o emprego da molécula fotônica garante uma sensibilidade de 24 nm/RIU, alcançando um limite de detecção (LOD) da ordem de 10^{-3} unidades de índice de refração (RIU). Ademais, a resposta desse sensor às variações de temperatura é cerca de 16 vezes menor que as respostas individuais do anel de referência e do disco de detecção, provando ser uma solução importante para aplicações da vida real em que as condições de medição não são facilmente controláveis.



REFERÊNCIAS

- [1] [1] L.A.M. Barea, F. Vallini, G.F.M. de Rezende, N.C. Frateschi, Spectral Engineering With CMOS Compatible SOI Photonic Molecules, *IEEE Photonics J.* 5 (2013) 2202717–2202717. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2013.2289977>.
- [2] L.A.M. Barea, F. Vallini, P.F. Jarschel, N.C. Frateschi, Silicon technology compatible photonic molecules for compact optical signal processing, *Appl. Phys. Lett.* 103 (2013) 201102. <https://doi.org/10.1063/1.4829743>.
- [3] M.C.M.M. Souza, L.A.M. Barea, F. Vallini, G.F.M. Rezende, G.S. Wiederhecker, N.C. Frateschi, Embedded coupled microrings with high-finesse and close-spaced resonances for optical signal processing, *Opt. Express.* 22 (2014) 10430. <https://doi.org/10.1364/OE.22.010430>.
- [4] M.C.M.M. Souza, G.F.M. Rezende, L.A.M. Barea, A.A.G. von Zuben, G.S. Wiederhecker, N.C. Frateschi, Spectral engineering with coupled microcavities: active control of resonant mode-splitting, *Opt. Lett.* 40 (2015) 3332. <https://doi.org/10.1364/OL.40.003332>.
- [5] M.C.M.M. Souza, G.F.M. Rezende, L.A.M. Barea, G.S. Wiederhecker, N.C. Frateschi, Modeling quasi-dark states with temporal coupled-mode theory, *Opt. Express.* 24 (2016) 18960. <https://doi.org/10.1364/OE.24.018960>.
- [6] Ó.B. Helgason, F.R. Arteaga-Sierra, Z. Ye, K. Twayana, P.A. Andrekson, M. Karlsson, J. Schröder, Victor Torres-Company, Dissipative solitons in photonic molecules, *Nat. Photonics.* 15 (2021) 305–310. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00757-9>.
- [7] K. Liao, X. Hu, T. Gan, Q. Liu, Z. Wu, C. Fan, X. Feng, C. Lu, Y. Liu, Q. Gong, Photonic molecule quantum optics, *Adv. Opt. Photonics.* 12 (2020) 60. <https://doi.org/10.1364/AOP.376739>.
- [8] M. Wang, N. Yao, R. Wu, Z. Fang, S. Lv, J. Zhang, J. Lin, W. Fang, Y. Cheng, Strong nonlinear optics in onchip coupled lithium niobate microdisk photonic molecules, *New J. Phys.* 22 (2020) 073030. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab97ea>.
- [9] S. Woska, P. Rietz, O. Karayel, H. Kalt, Tunable coupling of chip-scale photonic molecules via thermal actuation, *Opt. Mater. Express.* 11 (2021) 3194. <https://doi.org/10.1364/OME.432655>.
- [10] M. Borghi, A. Trenti, L. Pavesi, Four Wave Mixing control in a photonic molecule made by silicon microring resonators, *Sci. Rep.* 9 (2019) 408. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36694-5>.
- [11] M. Zhang, C. Wang, Y. Hu, A. Shams-Ansari, T. Ren, S. Fan, M. Lončar, Electronically programmable photonic molecule, *Nat. Photonics.* 13 (2019) 36–40. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0317-Y>.
- [12] M.C.M.M. Souza, G.F.M. Rezende, A.A.G. von Zuben, G.S. Wiederhecker, N.C. Frateschi, L.A.M. Barea, Tunable Photonic Molecules for Spectral Engineering in Dense Photonic Integration, in: *Futur. Trends Microelectron.*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2016: pp. 337–348. <https://doi.org/10.1002/9781119069225.ch3-7>.
- [13] L.A.M. Barea, M.C.M.M. Souza, A.L. Moras, Á.R.G. Catellan, G.A. Cirino, A.A.G. Von Zuben, N.C. Frateschi, J.W.M. Bassani, Photonic molecules for application in silicon-on-insulator optical sensors, in: G.T. Reed, A.P. Knights (Eds.), *Silicon Photonics XIII*, SPIE, 2018: p. 46. <https://doi.org/10.1117/12.2287844>.
- [14] A.L. Moras, V.C.S. Junior, M.C.M.M. Souza, G.A. Cirino, A.A.G. Von Zuben, L.A.M. Barea, N.C. Frateschi, Integrated Photonic Platform for Robust Differential Refractive Index Sensor, *IEEE Photonics J.* 12 (2020) 1–10. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.3024856>.