

Moléculas fotônicas e seu impacto em sensores ópticos

André L. Moras¹, Paulo H.D. Ferreira², Newton C. Frateschi¹ a e Luís A. M. Barêa²
¹ Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP); ² Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

A fotônica integrada é uma importante área tecnológica e científica que permite criar e manipular a luz de forma controlada e precisa em regiões de dimensões reduzidas. Assim como a eletrônica permite controlar a eletricidade e os elétrons em *chips* eletrônicos, a fotônica integrada permite controlar a luz e os fótons em *chips* fotônicos miniaturizados. Por meio da fotônica integrada, é possível criar dispositivos ópticos denominados de guias de ondas, os quais são capazes de confinar e guiar a luz em circuitos fotônicos. Conforme pode ser observado na figura 1(a), os guias de ondas são compostos de um núcleo, geralmente envolto em óxido tanto por cima (TOX) quanto por baixo (BOX). O confinamento da onda ocorre quando o índice de refração do núcleo do guia é maior do que o índice de refração dos óxidos que o envolvem. Além disso, os guias de ondas podem comportar dois tipos de modos eletromagnéticos: Transversal Elétrico (TE) e Transversal Magnético (TM). As figuras 1(b) e 1(c) mostram a norma do campo elétrico na

seção transversal do guia para os modos fundamentais TE e TM, respectivamente. É interessante observar que a direção da descontinuidade do campo elétrico é diferente em cada caso. Os guias de ondas podem ser utilizados para formar microcavidades ressonantes, conectando sua entrada e saída por exemplo, formando anéis ressonantes. As microcavidades ressonantes são dispositivos capazes de confinar a luz em uma região diminuta, da ordem de micrômetros, por um tempo relativamente longo, permitindo a geração de alta potência luminosa em uma região espacial muito pequena. Devido a essas características, as cavidades ópticas apresentam ressonâncias com larguras de linha muito finas, ou seja, com altos fatores de qualidade (Q), e muito sensíveis às variações do ambiente ao seu redor, o que as tornam bastante promissoras para criação de novos sensores. Nas últimas décadas, tem-se observado um grande avanço na pesquisa e desenvolvimento de dispositivos fotônicos baseados em cavidades ópticas acopladas para aplicações em diversas áreas, co-

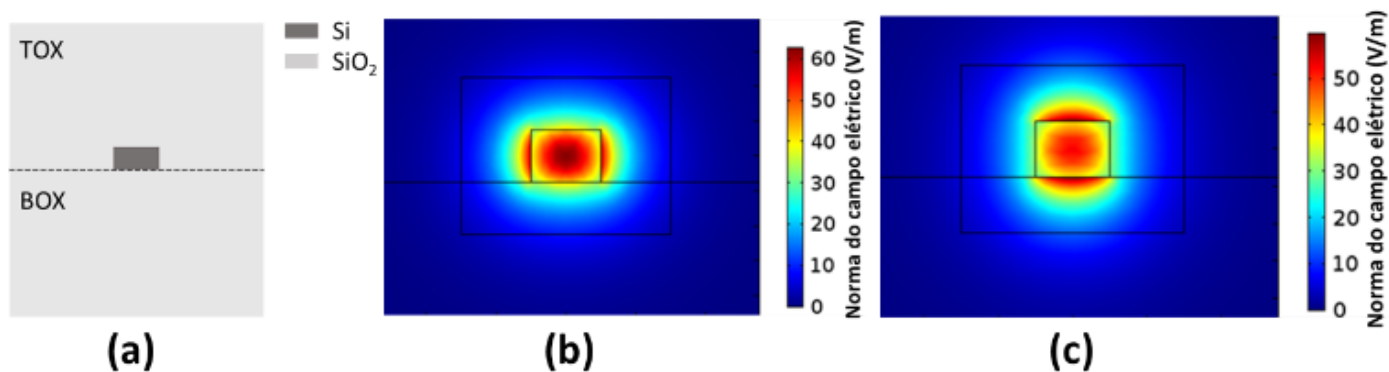


Fig. 1. (a) Ilustração da seção transversal de um guia de ondas de silício (Si) envolto por dióxido de silício (SiO₂). TOX: *Top Oxide*. BOX: *Bottom Oxide*. Simulações dos modos fundamentais (b) TE e (c) TM na seção transversal do guia.

mo engenharia espectral, óptica quântica, processamento de sinais e sensores ópticos [1] - [16]. Esses dispositivos podem ser chamados de Moléculas Fotônicas (PMs) devido à sua semelhança com as moléculas químicas. Assim como átomos distintos se unem para formar moléculas mais complexas com características singulares, cavidades distintas, quando acopladas, interagem entre si para formar moléculas fotônicas com novas propriedades que dependem principalmente desta interação. As PMs são estruturas fotônicas compostas de duas ou mais cavidades ressonantes acopladas em diversas configurações, o que permite alcançar novas respostas espectrais que não são possíveis empregando cavidades únicas independentes acopladas apenas com um guia de onda. O emprego de PMs permite um controle mais preciso das características espectrais dos dispositivos fotônicos em uma área reduzida do *chip*. Em [1], por exemplo, pesquisadores mostraram que é possível quebrar a relação intrínseca entre o espaçamento espectral livre (FSR), o fator de qualidade (Q) e o tamanho da cavidade utilizando PMs. Nesse mesmo trabalho, os autores também demonstraram PMs com dupletos e tripletos ressonantes, cuja distância espectral das ressonâncias só pode ser alcançada usando anéis únicos muito maiores. Já em [3], o uso de PMs garantiu a demonstração de transmissão de um mesmo sinal para quatro ressonâncias separadas de 50 GHz, utilizando somente 1 mW de potência de controle. Para efeito de comparação, seriam necessárias dimensões e potência de controle dez vezes maiores para alcançar o mesmo efeito empregando um único anel. Partindo para a área de sensores ópticos, o uso de PMs permitiu demonstrar um aumento da sensibilidade dos sensores

[15], com redução na dependência com variações de temperatura [16], tornando-os mais eficazes e confiáveis. No entanto, mesmo com todas as características favoráveis para aplicações em sensoriamento, ainda há pouco trabalho na literatura explorando o uso de PMs em sensores, o que as tornam interessantes para inovações nessa área.

A figura 2 ilustra os princípios básicos de operação de um sensor óptico baseado em PMs. Conforme pode ser observado nas figuras 2(a) e 2(b), apenas a cavidade interna é exposta ao meio ambiente, enquanto que o restante do dispositivo permanece coberto e protegido pelo revestimento de SiO₂. Dessa forma, somente a cavidade interna do dispositivo é sensível às variações do índice de refração do ambiente próximo à superfície do sensor, o que pode ser provocado, por exemplo, pela presença de uma substância desconhecida. Por esse motivo, a cavidade interna e a região exposta são denominadas, respectivamente, de cavidade de detecção e região de detecção. A cavidade externa é utilizada como referência e por isso é denominada de cavidade de referência, responsável pela inserção das ressonâncias de referência no espectro da PM. A figura 2(c) mostra o *chip* com sensores integrados posicionado sobre um *setup* de caracterização e, na figura 2(d), é possível ver uma micrografia do *chip* após a aplicação de uma solução aquosa de etilenoglicol (EG) com 5% de concentração. A figura 2(e) mostra o espectro de transmissão do sensor de PM antes e após a detecção de um elemento desconhecido. O espectro da PM pode ser obtido utilizando um laser sintonizável na entrada e um medidor de potência sincronizado com o laser. Os vales

observados correspondem às ressonâncias da cavidade de detecção (λ_{antes} e $\lambda_{\text{após}}$) e referência (λ_{ref}). Dessa forma, a resposta do sensor é definida como $c = \Delta\lambda_{\text{após}} - \Delta\lambda_{\text{antes}}$ [16]. Porém, como utilizamos uma PM onde apenas a cavidade de detecção é exposta, temos a possibilidade de realizar medidas diferenciais, definidas como:

$$\Delta\lambda_{\text{após}} = \lambda_{\text{após}} - \lambda_{\text{ref}} \text{ e } \Delta\lambda_{\text{antes}} = \lambda_{\text{antes}} - \lambda_{\text{ref}}$$

Em outras palavras, a resposta do sensor corresponde basicamente ao desvio ressonante da ressonância de detecção com relação às ressonâncias de referência. Nessas condições, a sensibilidade às variações de índice de refração (RI) do sensor de PM pode ser definida como:

$S_{\text{RI}} = \Delta\lambda_{\text{res}}/\Delta n$, onde Δn corresponde à variação do índice de refração do material presente na região de detecção. Conforme pode ser observado na figura 3(a), que mostra o espectro de transmissão do sensor de PM em função da temperatura do dispositivo, tanto as ressonâncias de referência quanto de detecção sofrem um desvio espectral para o vermelho (comprimento de onda maiores) com o aumento da temperatura. Vale comentar que, nesse experimento, a tempe-

ratura do dispositivo foi estabelecida e controlada por um sistema de controle contendo um termistor para a medida de temperatura e um elemento Peltier para resfriamento do chip. A figura 3(b) mostra que os desvios espectrais sofridos pelas ressonâncias de detecção e referência não são exatamente iguais, pois as cavidades não são idênticas. No entanto, a diferença entre os desvios, que está associada à resposta diferencial do sensor, é muito pequena. Nesse caso, equivalente à $(0,008 \pm 0,002)$ nm/°C. Portanto, a dependência da temperatura é 10 vezes menor para a resposta diferencial do sensor de PM do que cada cavidade individual. Esses resultados mostram que o emprego da cavidade de referência nessa configuração reduz significativamente a dependência da temperatura, promovendo aumento da especificidade e confiabilidade do sensor. O uso de dispositivos ópticos de referência para reduzir efeitos provocados por variações de temperatura tem sido reportado por vários autores [17]-[19]. No entanto, o emprego em PMs é uma novidade e precisa ser todavia mais explorado. Para se

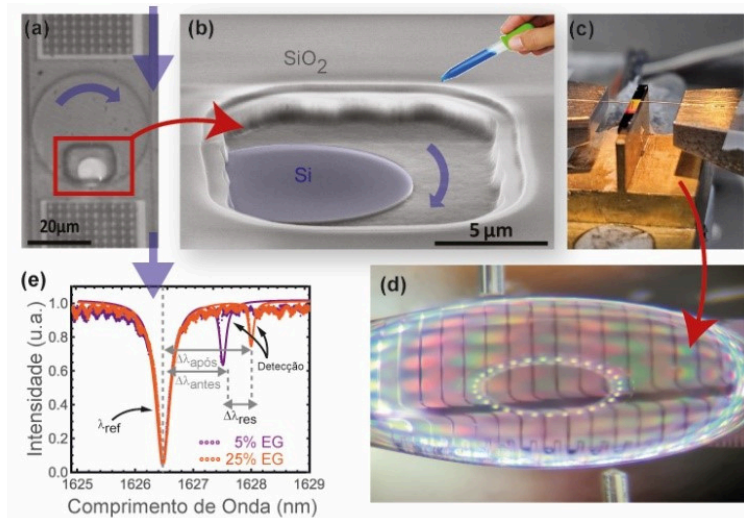


Fig. 2. (a) Imagem de microscopia óptica do sensor de PM. (b) Imagem de microscopia eletrônica da região de detecção aberta sobre uma parte do microdisco, que nesse caso é a cavidade de detecção. (c) Foto do chip fotônico em uma plataforma de caracterização. (d) Foto da vista superior do chip no setup de caracterização e após a aplicação do analito alvo (solução aquosa de etilenoglicol). (e) Espectro de transmissão do sensor. A curva laranja mostra o desvio ressonante provocado pela alteração do índice de refração da região de detecção após mudança da concentração de EG diluído em água (5% EG para 25% EG).

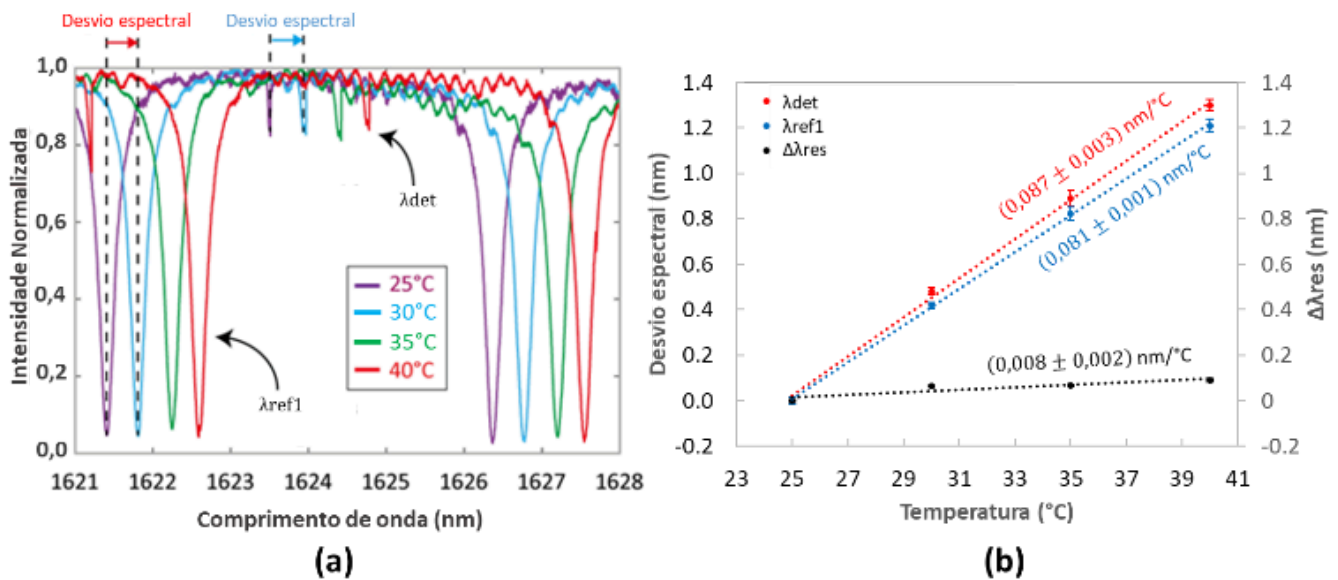


Fig. 3: (a) Espectro de transmissão do sensor de PM em temperaturas distintas. Encontram-se destacados os desvios espectrais sofridos pelas ressonâncias de detecção (λ_{det}) e referência (λ_{ref1}) quando a temperatura aumenta de 25°C a 30°C. (b) Desvios espectrais das ressonâncias de detecção (vermelho) e referência (azul), e resposta diferencial do sensor (preto), em função da temperatura. Figura alterada de [16].

ter uma ideia do impacto dos resultados apresentados, o sensor de PM mostrado e sua metodologia de detecção encontram-se protegidos por uma patente [20] e tem potencial para aplicações imediatas na indústria. Porém, o impacto das características das PMs em sensores não está limitado apenas na maneira simples de redução da dependência com variações da temperatura. Em 2022, pesquisadores da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), junto com a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), mostraram por meio de simulações que é possível aumentar ainda mais a sensibilidade dos sensores de PM de duas formas, (1) aumentando o tamanho da região de detecção e, (2) realizando o estrangulamento do guia de onda que forma a cavidade de detecção, presente na região de detecção. A figura 4(a) ilustra o sensor de PM proposto no trabalho em questão. É importante obser-

var que a cavidade interna apresenta formato de anel, permitindo o estrangulamento do guia de onda que forma essa cavidade. Os parâmetros w_t e w_L representam, respectivamente, a largura do guia estrangulado e o perímetro exposto do anel de detecção. A figura 4(b) mostra o espectro de transmissão do sensor de PM simulado para água pura e com 5% de EG diluído em água, tanto para cavidade de detecção sem estrangulamento quanto para cavidade estrangulada ($w_t = 300$ nm), ambas com janela de detecção idênticas com valor de $w_L = 126$ μ m, e em uma condição sem considerar perdas de propagação inerentes aos materiais. É importante observar que a ressonância de referência praticamente não sofre desvio com o aumento da concentração da solução, enquanto a ressonância de detecção sofre um desvio espectral para o vermelho com o aumento da concentração.

A figura 4(d) mostra a sensibilidade RI do sensor de PM em função de wL e para várias larguras de guia (w_t). Pode-se observar que para todas as larguras, a sensibilidade RI do sensor aumenta com o aumento do tamanho da região de detecção. Esse aumento ocorre basicamente devido ao aumento da interação entre o modo ressonante na cavidade de detecção e o material presente na região de detecção. Os resultados também mostram que a sensibilidade RI do sensor aumenta com o estrangulamento do guia, isto é, quanto mais reduzida for a largura do guia, maior será a sensibilidade RI. Conforme pode ser observado na figura 4(c), o estrangulamento do guia da cavidade de detecção reduz o confinamento do modo ressonante, permitindo uma maior interação com o material da região de detecção, o que promove aumento da sensibilidade do dispositivo. Em particular, estima-se nesse trabalho que é possível alcançar uma sensi-

bilidade RI de 264 nm/RIU quando o guia da cavidade de detecção é estrangulado para 300 nm e o perímetro exposto do anel de detecção é equivalente a 126 μm , o que corresponde à 50% de exposição da cavidade de referência ao analito. Apesar dos estudos e resultados já alcançados e mostrados pela comunidade científica no desenvolvimento e aplicação de PMs em sensores ópticos, ainda há muito a ser explorado. No caso do sensor com guias estrangulados, todavia falta uma demonstração experimental. Além disto, é importante observar que os dois principais trabalhos citados e apresentados nesse texto correspondem a sensores de PM baseados em duas cavidades acopladas. Quase não há estudos, por exemplo, no emprego de PMs compostas de três ou mais cavidades acopladas em diversas topologias para aplicações de sensores ópticos. Configurações mais complexas de PMs permitem novas condições espectrais espe-

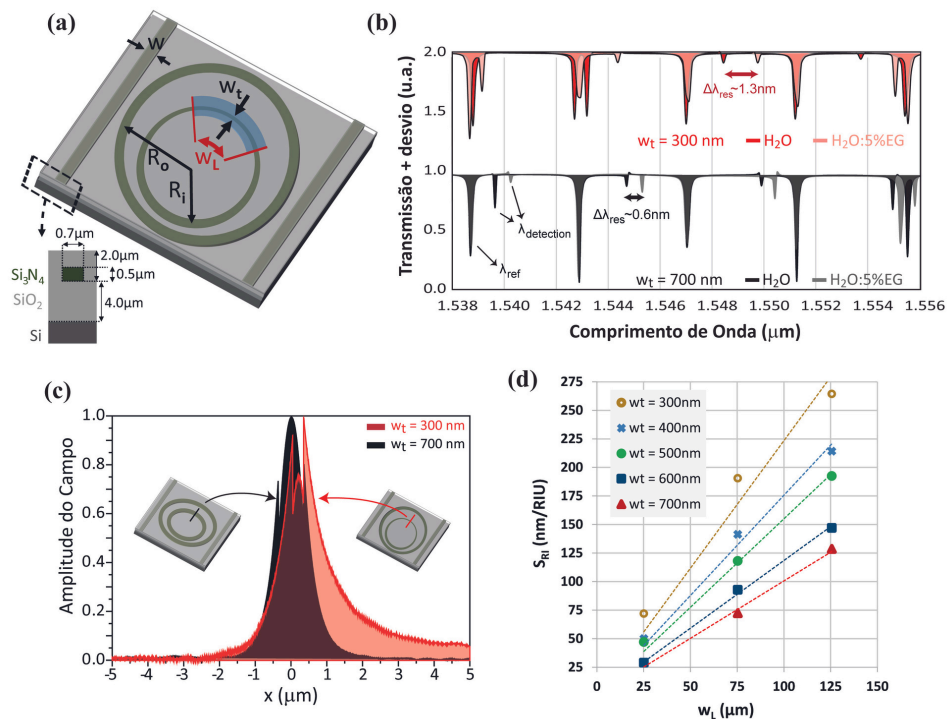


Fig. 4: (a) Ilustração do sensor de PM mostrando as cavidades de detecção ($R_i=40\mu\text{m}$) e referência ($R_o=50\mu\text{m}$). As distâncias entre guia de onda e cavidade externa e, entre cavidades interna e externa, são equivalentes a 700nm e 500nm, respectivamente. (b) Espectro de transmissão do sensor de PM simulado para água pura e 5% EG diluído em água, tanto para cavidade de detecção sem estrangulamento quanto para cavidade estrangulada ($w_t = 300 \text{ nm}$), ambas com janela de detecção $wL = 126 \mu\text{m}$. (c) Perfil da norma do campo elétrico do modo TE da cavidade de detecção na região com e sem estrangulamento. (d) Sensibilidade RI versus estrangulamento do guia de onda da cavidade de detecção (wL). Figura alterada de [21].

ciais únicas, como o surgimento de tripletos, quadrupletos e sextupletos de ressonâncias, as quais podem ser extensivamente exploradas para uso em aplicações de detecção com novas abordagens além dos métodos diferenciais apresentadas aqui. Essas novas abordagens são caminhos de pesquisa da colaboração entre grupos da Unicamp e UFSCar e apontam, por exemplo, para possibilidade de uso de pontos excepcionais em PMs [22], que são singularidades espectrais que exibem uma forte resposta espectral às perturbações externas, com potencial de incrementar ainda mais a sensibilidade dos sensores, ou a investigação do espalhamento de luz nas PMs, permitindo a realização de medidas no domínio espacial onde cada cavidade da PM passa a ser um pixel [23].

Os autores agradecem à FAPESP (2018/25339-4) e ao CNPq (Projeto 3105432021-5).

Referências

[1] L.A.M. Barea et al., "Spectral Engineering With CMOS Compatible SOI Photonic Molecules", IEEE Photonics Journal, vol. 5, no. 6, pp. 2202717, (2013) Art n° 2202717, doi: 10.1109/JPHOT.2013.2289977.

[2] L.A.M. Barea et al., "Silicon technology compatible photonic molecules for compact optical signal processing". Applied Physics Letters, **103**, 201102 (2013) doi: 10.1063/1.4829743

[3] M.C.M.M. Souza et al., "Embedded coupled microrings with high-finesse and close-spaced resonances for optical signal processing," Opt. Express **22**, 10430 (2014) doi: 10.1364/OE.22.010430

[4] M.C.M.M. Souza et al., "Spectral engineering with coupled microcavities: active control of resonant mode-splitting" Opt. Lett. **40**, 3332 (2015) doi:10.1364/OL.40.003332

[5] M.C.M.M. Souza et al., "Modeling quasi-dark states with temporal coupled-mode theory," Opt. Express **24**, 18960 (2016). doi: 10.1364/OE.24.018960

[6] G.F.M. de Rezende et al., "Tunable, Reconfigurable and Active Silicon Photonic Devices employing Photonic Molecules," in Latin America Optics and Photonics Conference (2018), paper Th2A.3, doi: 10.1364/LAOP.2018.Th2A.3.

[7] Ó.B. Helgason et al., "Dissipative solitons in photonic molecules". Nat. Photonics **15**, 305 (2021). doi: 10.1038/s41566-020-00757-9

[8] Kun Liao et al., "Photonic molecule quantum optics," Adv. Opt. Photon. **12**, 60 (2020). doi: 10.1364/OE.27.037579

[9] S.Woska et al., "Tunable coupling of chip-scale photonic molecules via thermal actuation," Opt. Mater. Express **11**, 3194 (2021). doi: 10.1364/OME.432655

[10] M. Borghi et al., "Four Wave Mixing control in a photonic molecule made by silicon microring resonators". Sci Rep **9**, 408 (2019). doi: 10.1038/s41598-018-36694-5.

[11] M.C.M.M. Souza et al., (2016). "Tunable photonic molecules for spectral engineering in dense photonic integration". Future Trends in Microelectronics: Journey into the Unknown, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA.

[12] A.L. Moras et al., "Development of SOI sensor using simulations based on the effective index method", in Frontiers in Optics + Laser Science (2022), paper JTu5A.82, doi: 10.1364/FIO.2022.JTu5A.82.

[13] A.L. Moras et al., "Silicon nitride photonic molecules for robust sensing applications," in Frontiers in Optics / Laser Science (2020), paper JTh4B.12. doi: 10.1364/FIO.2020.JTh4B.12.

[14] L.A.M. Barea et al., "Photonic molecules for application in silicon-on-insulator optical sensors", Proc. SPIE 10537, Silicon Photonics XIII, 105371B (2018). doi: 10.1117/12.2287844.

[15] X. Zhou et al., "On-Chip Biological and Chemical Sensing With Reversed Fano Lineshape Enabled by Embedded Microring Resonators" IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **20** (3), 35 (2014). doi: 10.1109/JSTQE.2013.2294465.

[16] Andre L. Moras et al., "Integrated Photonic Platform for Robust Differential Refractive Index Sensor", IEEE Photonics Journal **12** (5), 3024856, (2020); doi:10.1109/jphot.2020.3024856

[17] D. Kim et al., "On-chip integrated differential optical microring refractive index sensing platform based on a laminar flow scheme," Opt. Lett. **40**, 4106 (2015).

- [18] X. Tu et al., "Thermal independent Silicon-Nitride slot waveguide biosensor with high sensitivity," *Opt. Express* **20** (3), 2640 (2012). doi: 10.1364/OE.20.002640
- [19] L. Jin et al., "Optical waveguide double-ring sensor using intensity interrogation with a low-cost broadband source," *Opt. Lett.*, **36** (7), 1128 (2011). doi: 10.1364/OL.36.001128.
- [20] L.A.M. Barea et al., Patente: Privilégio de Inovação. N°do registro: BR1020170270157, "BIOSSENSOR ÓPTICO INTEGRADO, MÉTODO DE DETECÇÃO E USOS DO BIOSSENSOR", Instituição de registro: INPI - Depósito: 14/12/2017. Concessão: 16/01/2024.
- [21] A.L. Moras et al., "Enhanced Sensitivity Photonic Molecule Sensor based on Embedded Tapered Microring Resonators," in 2022 IEEE Photonics Conference (IPC), (2022), 1. doi: 10.1109/IPC53466.2022.9975699.
- [22] J. Wiersig, "Review of exceptional point-based sensors," *Photon. Res.*, PRJ **8** (9), 1457 (2020). doi: 10.1364/PRJ.396115.
- [23] J. Wang et al., "Silicon coupled-resonator optical-waveguide-based biosensors using light-scattering pattern recognition with pixelized mode-field-intensity distributions" *Sci Rep.* **4** (1), 7528 (2014). doi: 10.1038/srep07528.