



Instalação de um laboratório dedicado à pesquisa em nanofotônica no Instituto de Física da USP

Daniel A. Matos¹, Nathalia B. Tomazio¹

¹ Instituto de Física (IFUSP), Universidade de São Paulo
ntomazio@if.usp.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a implantação do laboratório NatLab (Nanophotonic Technologies Laboratory) no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), um laboratório voltado para a micro/nanofabricação e caracterização de dispositivos fotônicos. Uma parte importante do laboratório é dedicada a um sistema de fabricação por fotopolimerização de dois fótons, que permite a produção de microestruturas tridimensionais de geometrias arbitrárias com nível de detalhamento de centenas de nanômetros e versatilidade de materiais. A iniciativa visa fomentar pesquisas em fotônica e em áreas interdisciplinares, assim como a formação de recursos humanos para fortalecer a USP como uma universidade de referência nacional e internacional e contribuir de maneira inovadora com o avanço da ciência e tecnologia.

Palavras-chave: Nanofotônica. Micro/nanofabricação. Nanotecnologia.

ABSTRACT: This work introduces the newly established NatLab (Nanophotonic Technologies Laboratory) at the Institute of Physics of the University of São Paulo (IFUSP), a laboratory dedicated to the micro/nanofabrication and characterization of photonic devices. An important part of the laboratory is devoted to a two-photon polymerization fabrication system, which enables the production of three-dimensional microstructures with arbitrary geometries and feature sizes on the order of hundreds of nanometers and material versatility. The initiative aims to foster research in photonics and interdisciplinary fields, as well as to train human resources to strengthen USP as a national and international renowned university and to drive innovative progress in science and technology.

Keywords: Nanophotonics, Micro/nanofabrication. Nanotechnology.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.17967136>

A PESQUISA EM NANOFOTÔNICA

A nanofotônica, que reúne conhecimentos das áreas de nanotecnologia e fotônica, é um campo de pesquisa atual bastante ativo do ponto de vista de ciência básica e de desenvolvimento de nossas tecnologias. Esta área começou a ganhar destaque significativo a partir dos anos 1990, devido aos avanços na fabricação de materiais e dispositivos em escala nanométrica e vem recebendo bastante atenção nos últimos anos devido ao seu caráter revolucionário. O número de publicações e citações em nanofotônica nos últimos anos, considerando as revistas do grupo *Nature Publishing Group*, é de centenas e dezenas de milhares, respectivamente (Fig. 1).

A nanofotônica é dedicada ao estudo da interação da luz com a matéria na escala nanométrica ou sub-micrométrica, e abrange diferentes frentes de atuação, das quais podemos destacar a física de microdispositivos fotônicos (*e.g.*, microcavidades, guias-de-onda, cristais fotônicos), plasmônica, desenvolvimento de metamateriais e metasuperfícies, engenharia de nanomateriais (*e.g.*, nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono, pontos quânticos, etc) e técnicas de microscopia de campo próximo. Alguns exemplos de plataformas de estudo em nanofotônica são mostrados na Fig. 2. Essa frente de pesquisa tem revelado novos mecanismos de manipulação das propriedades da luz, abrindo portas para um número amplo de aplicações em óptica não-linear, opto-mecânica, eletrodinâmica quântica, (bio)sensores, processamento de sinais ópticos, tecnologias quânticas, fontes de energia renovável, tratamento e diagnóstico de doenças e em ciência dos materiais.

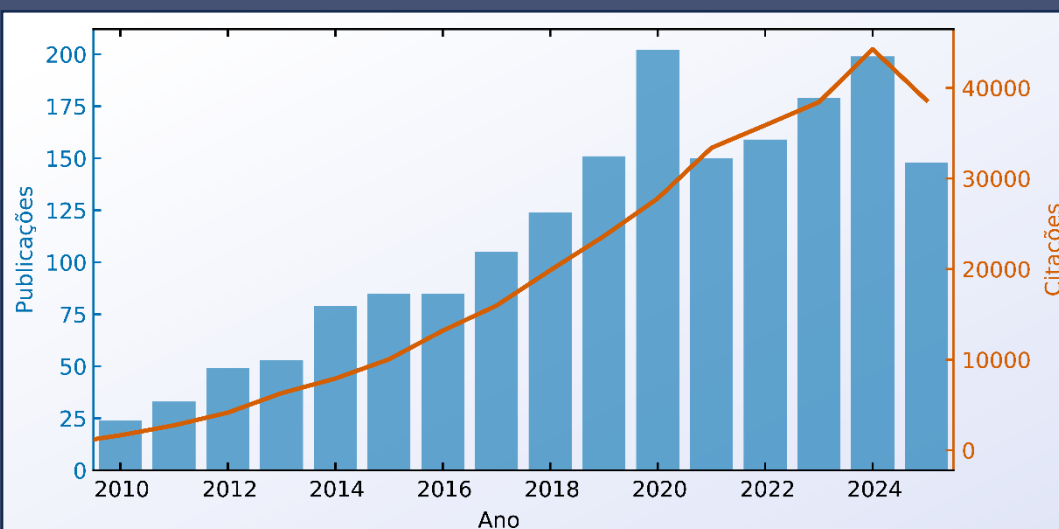


FIGURA 1 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DE PUBLICAÇÕES E CITAÇÕES EM NANOFOTÔNICA E FOTÔNICA INTEGRADA

Dados obtidos da *Web of Science Core Collection* mediante busca sistemática dos termos "*Nanophotonic**" ou "*Integrated photonic**" em 20 periódicos do grupo *Nature* no período de 2010 a 2025.

A técnica mais usada para a fabricação de dispositivos para a pesquisa em nanofotônica é a litografia [1], que consiste em um processo de transferência de um padrão desejado para um substrato, como silício, niobato de lítio, semicondutores do tipo III-V, entre outros. Para alcançar a resolução nanométrica, utiliza-se litografia a partir da escrita por feixe de elétrons. Esse tipo de equipamento permite atingir altíssima resolução espacial, levando a fabricação de dispositivos com dimensões inferiores a 20 nm, e ainda assim cobrir áreas extensas, como *wafers* de até 8 polegadas. Para a fabricação de dispositivos com resolução micrométrica, tipicamente utiliza-se a fotolitografia [2], que utiliza exposição seletiva à luz UV para a transferência do padrão desejado ao substrato adequado. Outras estratégias de fabricação bem-sucedidas baseiam-se em técnicas de processamento com lasers de pulsos ultracurtos [3], que podem ser usadas para esculpir canais por ablação a laser, modificar o volume ou superfície de materiais diversos, criar microestruturas 3D por meio da fotopolimerização por dois fótons (F2F), etc. A F2F faz uso da natureza não-linear do processo de absorção de dois fótons para fabricar microestruturas tridimensionais com geometrias arbitrárias e resolução de 100 nm [4]. A F2F destaca-se pela sua versatilidade e simplicidade, dispensando a necessidade de múltiplas etapas de processamento, máscaras litográficas, e agentes altamente corrosivos. Notavelmente, a combinação dessas técnicas de fabricação é uma estratégia promissora para o desenvolvimento de dispositivos mais complexos.

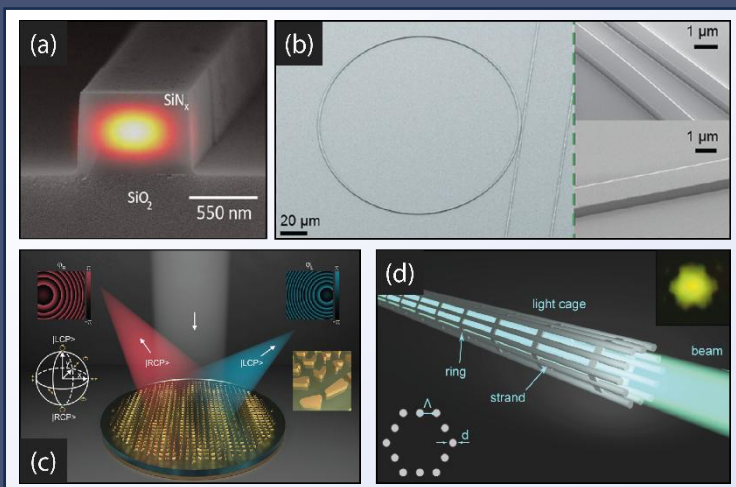


FIGURA 2 - EXEMPLOS REPRESENTATIVOS DE SISTEMAS E ESTRUTURAS ESTUDADOS NO CAMPO DA NANOFOTÔNICA

(a) Guia de onda de SiN com perfil do modo fundamental TE superposto (adaptado de [26] ©Optical Publishing Group). (b) Microcavidade em anel de Niobato de Lítio acoplada a guia de onda (adaptado de [29] ©Optical Publishing Group). (c) Metalente plana capaz de focalizar luz com polarização circular à esquerda e à direita em diferentes regiões (adaptado de [27]). (d) Guia de onda de núcleo oco do tipo *cage* e suas principais características; o inserto superior direito mostra o perfil modal medido sob excitação por luz branca, e o inferior esquerdo, o esquema da seção transversal (adaptado de [28] ©Optical Publishing Group).

INSTALAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE NANOFÔTONICA NO IF-USP

O novo laboratório, que está hospedado no Prédio Principal do IFUSP, recebe o nome de NatLab - um acrônimo para *Nanophotonic Technologies Laboratory*. Ele irá abrigar (1) um sistema de micro/nanofabricação *home-built* com base em escrita a laser via fotopolimerização de dois fótons e (2) um sistema de caracterização óptica de microdispositivos.

Para alcançar um nível de detalhamento de fabricação da ordem de centenas de nanômetros e preservar a integridade da resposta óptica dos microdispositivos, o laboratório foi equipado com um controle de contaminação de particulado, com pressão positiva no laboratório, filtros do tipo HEPA para garantir um grau de limpeza em todo o espaço e saídas de fluxo laminar (padrão ISO 5) especificamente sobre o aparato de fabricação e a bancada de preparação de amostras.

O aparato de micro/nanofabricação a laser conta com (1) um laser pulsado de femtossegundos, (2) um estágio de translação motorizado tridimensional de alta precisão com deslocamento lateral máximo de 130 mm, máxima velocidade de 500 mm/s, e passo mínimo de 2 nm para deslocamento controlado do laser no volume da resina fotocurável, (3) um sistema de imageamento equipado com lente objetiva de microscópio de magnificação de 100x (1.35 de abertura numérica) para alinhamento e monitoramento do processo de microfabricação em tempo real, (4) um obturador mecânico com tempo de resposta de 1.7 ms para controle da exposição do laser e (5) uma mesa óptica equipada com controles de amortecimento de vibrações mecânicas. Também foram compradas diferentes formulações de resina fotocurável (SZ2080 eOrmocomp). Um esquema do aparato é mostrado na Figura 3. No momento presente, estamos realizando a montagem do sistema de fabricação a laser no NatLab, e esperamos ter o sistema em operação a partir do 1º semestre de 2026.

Apesar de os equipamentos comerciais voltados à micro e nanofabricação apresentarem maior robustez e operabilidade facilitada, a construção de um sistema *home-built* permite uma maior customização de materiais e dos parâmetros de fabricação (e.g., potência do laser). O sistema *home-built* possibilita o uso de várias resinas fotocuráveis e a incorporação de materiais funcionais a essas resinas, como cerâmicas, corantes orgânicos, nanopartículas metálicas, etc [4]. Além disso, com a

aquisição dos estágios de translação de alta precisão com deslocamento lateral da ordem de aproximadamente 10 centímetros, seremos capazes de produzir estruturas grandes com nível de detalhamento sub-micrométrico, cobrindo diferentes escalas de tamanho.

RESULTADOS ESPERADOS DO NATLAB

Um dos resultados esperados com a instalação do NatLab é a viabilização de respostas ópticas não-lineares, tais como a geração de frequências [5], modulação [6] e chaveamento de sinais [7], em microdispositivos fotônicos fabricados a partir de F2F. Se bem-sucedido, o projeto permitirá agregar as vantagens e conveniências de processamento da técnica de F2F ao campo da fotônica não-linear, em especial a possibilidade de incorporação de diferentes materiais funcionais ao microdispositivo e de fabricação em uma variedade de substratos [8]. Além de tornar a fabricação de microdispositivos fotônicos não-lineares significativamente mais simples, este projeto abrirá portas para o desenvolvimento de microdispositivos com múltiplas respostas de interesse; *e.g.*, respostas óptica não-linear e eletro-óptica, resultando em impacto para sistemas de processamento de sinais ópticos e para sensoriamento fora de um ambiente

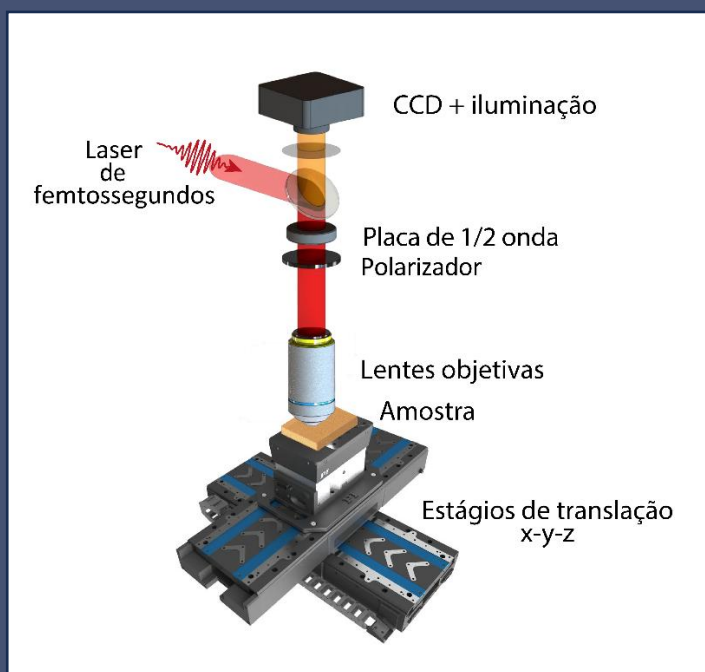


FIGURA 3 - ESQUEMA DO SISTEMA DE MICRO/NANOFABRICAÇÃO A LASER VIA F2F

O sistema é composto por um laser pulsado de femtossegundos, um estágio de translação motorizado tridimensional de alta precisão para o deslocamento da amostra com relação ao laser, uma lente objetiva de microscópio de alta abertura numérica e um sistema de imageamento para alinhamento e monitoramento do processo de escrita a laser em tempo real. O conjunto placa de $\frac{1}{2}$ onda e polarizador é usado para ajustar a potência do laser.



controlado de laboratório. Ademais, a infraestrutura desejada permitirá a fabricação de metasuperfícies em escalas apropriadas para operação em frequências ópticas [9] e de THz [10], a investigação da influência de nanopilares e nanoantenas no acoplamento de luz em dispositivos optoeletrônicos nanoestruturados [11], e a fabricação de elementos acopladores mais eficientes para a conexão óptica fibra-chip e/ou chip-chip [12].

Também vamos fabricar microestruturas maciças cilíndricas torcidas para desenvolver filtros ópticos com largura de linha de sub-MHz explorando espalhamento estimulado de Brillouin [13]. Essas microestruturas são demasiadamente complexas para serem fabricadas por técnicas litográficas tradicionais, mas passíveis de serem fabricadas a partir da técnica de F2F. A técnica de F2F também poderá ser utilizada para a fabricação de microdispositivos fotônicos voltados ao processamento de informação quântica. Alguns exemplos de aplicações nessa direção são sistemas ultra-sensíveis de metrologia quântica usando fontes compactas de estados comprimidos da luz (*squeezed states*) [14], e a conexão entre bandas espectrais separadas de mais de uma oitava usando protocolos de teletransporte quântico [15], visando o acoplamento de linhas atômicas à faixa de telecomunicações em fibras óticas.

Um outro resultado importante deste laboratório será a demonstração da integração de plataformas microfluídicas com um sistema fotônico integrado em chip de espectroscopia no infravermelho médio, permitindo uma estratégia *in situ* de detecção e quantificação bioquímica com alta taxa de aquisição e sensibilidade. Sobretudo, esta proposta dá passos importantes na direção de uma plataforma optofluídica totalmente integrada, escalável e portátil. Uma aplicação que pode se beneficiar de nossa tecnologia proposta é a síntese de nanopartículas para o tratamento e diagnóstico de câncer. Por exemplo, foi demonstrado que uma nanopartícula artificial chamada de emulsão de baixa densidade (LDE), que se assemelha à lipoproteína de baixa densidade (LDL) presente na corrente sanguínea, é capturada preferencialmente pelas células malignas do paciente, tornando possível usá-la como um carreador seletivo de medicamentos na terapia do câncer [16]. Apesar do progresso significativo no uso das LDEs para fins terapêuticos, sua produção ainda depende de métodos que carecem de controle sobre o tamanho e composição das partículas. A síntese baseada em microfluídica, que permite uma mistura e manipulação mais eficientes de fluidos, pode ser uma solução promissora para produzir as nanopartículas de maneira controlada. Nesses sistemas, as

LDEs podem ser produzidas seguindo uma estratégia de *droplet-making* [17], que permite encapsular materiais ativos e servir como modelos para construir novas estruturas. Nesse sentido, nossa tecnologia de integração optofluídica seria útil como uma ferramenta analítica para caracterizar as nanopartículas *in-situ*.

Outro campo em que nossa tecnologia de integração optofluídica pode ter consequências disruptivas é na análise bioquímica. Doenças cardiovasculares (DCV), como hipertensão, diabetes e aterosclerose subclínica, são doenças de morbidade grave em todo o mundo. Embora diversos dispositivos *lab-on-a-chip* tenham sido criados para investigar a patogênese, diagnóstico e tratamento de DCVs, o desenvolvimento de estratégias compactas que ofereçam alta especificidade e amplo intervalo de detecção para avaliar a eficácia de certos medicamentos no tratamento e prevenção de DCVs ainda é uma grande demanda [18]. Nesse sentido, nossa plataforma de optofluídica pode ser usada para detectar medicamentos amplamente prescritos para prevenir hipertensão (*e.g.*, succinato de metoprolol e candesartana cilexetila) e aterosclerose subclínica (*e.g.*, rosuvastatina e ezetimiba) e monitorar sua concentração em amostras de sangue para estudos farmacodinâmicos e farmacocinéticos. Também vamos avaliar possibilidades de biosensoriamento com base da resposta de transmissão de microcavidades ópticas funcionalizadas [19] e em dispositivos que explorem o fenômeno de ressonância plasmônica de superfície [20], ambos em contato com canais microfluídicos.

Além disso, esperamos explorar essa combinação de tecnologias fotônica e microfluídica para desenvolver um método de determinação de tamanho de partículas nanométricas e de separação dessas partículas por tamanho. Isso será extremamente relevante para estudar o papel desempenhado pelas lipoproteínas do tipo HDLs (*high density lipoproteins*) [21], que têm dimensões da ordem de dezenas de nanômetros, no combate a doenças cardiovasculares. Ainda no campo da biomedicina, pretendemos fabricar estruturas que mimetizem sistemas biológicos para estudos de patologia e testagem de fármacos [22], e microambientes 3D para o estudo de proliferação, adesão e migração celular [23].

Outro interesse do laboratório se dá na construção de rochas e amostras geológicas sintéticas para investigação de suas propriedades petrofísicas, geomecânicas, e características de molhabilidade em condições extremas de forma análoga aos



ambientes geológicos de formação [24]. Por exemplo, reatores e dispositivos microfluídicos do tipo *rock-on-a-chip* podem ser usados para investigar as interações fluido/rocha para mineralização de CO₂ e recuperação melhorada de petróleo e em processos de catálise do CO₂ via técnicas baseadas em síncrotron [25].

Sobretudo, o NatLab beneficiará a comunidade da Universidade de São Paulo e outros centros de pesquisa nacionais e internacionais, impulsionando o desenvolvimento de ciência, tecnologia e inovação, fortalecendo a formação de recursos humanos e promovendo a interação entre pesquisadores de diferentes áreas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Fluidos Complexos (INCT-FCx) e ao Grupo de Fluidos Complexos do IFUSP pelo apoio para a aquisição de equipamentos e adequação da infraestrutura física que abriga o NatLab. Agradecemos também às agências de fomento FAPESP e CNPq pela concessão de auxílios à pesquisa e bolsas.



REFERÊNCIAS

- [1] D. Thomson *et al.*, “Roadmap on silicon photonics”, *Journal of Optics*, volume 18, no. 7, página 073003, 2016, doi: www.doi.org/10.1088/2040-8978/18/7/073003.
- [2] B. W. Smith, “Optical projection lithography”, *Nanolithography: The Art of Fabricating Nanoelectronic and Nanophotonic Devices and Systems*, páginas 1–41, 2014, doi: www.doi.org/10.1533/9780857098757.1.
- [3] R. Samad *et al.*, “Ultrashort laser pulses machining”, *Laser Pulses – Theory, Technology, and Applications*, IntechOpen, 2012, doi: <http://doi.org/10.5772/46235>.
- [4] A. J. G. Otuka *et al.*, “Two-Photon Polymerization: Functionalized Microstructures, Micro-Resonators, and Bio-Scaffolds”, *Polymers*, volume 13, no. 12, página 1994, 2021, doi: www.doi.org/10.3390/polym13121994.
- [5] P. Del’Haye *et al.*, “Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator”, *Nature*, volume 450, no. 7173, páginas 1214–1217, 2007, doi: www.doi.org/10.1038/nature06401.
- [6] C. T. Phare *et al.*, “Graphene electro-optic modulator with 30 GHz bandwidth”, *Nature Photonics*, volume 9, no. 8, páginas 511–514, 2015, doi: www.doi.org/10.1038/nphoton.2015.122.
- [7] X. Hu *et al.*, “Picosecond and low-power all-optical switching based on an organic photonic-bandgap microcavity”, *Nature Photonics*, volume 2, no. 3, páginas 185–189, 2008, doi: www.doi.org/10.1038/nphoton.2007.299.
- [8] C. N. LaFratta *et al.*, “Multiphoton fabrication”, *Angewandte Chemie International Edition*, volume 46, no. 33, páginas 6238–58, 2007, doi: www.doi.org/10.1002/anie.200603995.
- [9] W. Feng *et al.*, “RGB Achromatic Metalens Doublet for Digital Imaging”, *Nano Letters*, volume 22, no. 10, páginas 3969–3975, 2022, doi: www.doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c00486.
- [10] S. Liu *et al.*, “Anomalous Refraction and Nondiffractive Bessel-Beam Generation of Terahertz Waves through Transmission-Type Coding Metasurfaces”, *ACS Photonics*, volume 3, no. 10, páginas 1968–1977, 2016, doi: www.doi.org/10.1021/acsphotonics.6b00515.
- [11] D. Palaferri *et al.*, “Room-temperature nine- μ m-wavelength photodetectors and GHz-frequency heterodyne receivers”, *Nature*, volume 556, no. 7699, páginas 85–88, Apr. 2018, doi: www.doi.org/10.1038/nature25790.
- [12] N. Lindenmann *et al.*, “Connecting Silicon Photonic Circuits to Multicore Fibers by Photonic Wire Bonding”, *Journal of Lightwave Technology*, volume 33, no. 4, páginas 755–760, 2015, doi: www.doi.org/10.1109/JLT.2014.2373051.
- [13] Y. Chen *et al.*, “Mapping Twisted Light into and out of a Photonic Chip”, *Physical review letters*, volume 121, no. 23, página 233602, 2018, doi: www.doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.233602.
- [14] J. P. Dowlin *et al.*, “Quantum Optical Technologies for Metrology, Sensing, and Imaging”, *Journal of Lightwave Technology*, volume 33, no. 12, páginas 2359–2370, 2015, doi: www.doi.org/10.1109/JLT.2014.2386795.
- [15] B.-H. Wu *et al.*, “Quantum computing with multidimensional continuous-variable cluster states in a scalable photonic platform”, *Physical Review Research*, volume 2, no. 2, página 023138, 2020, doi: www.doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.023138.
- [16] R. Maranhao *et al.*, “Plasma kinetics and biodistribution of a lipid emulsion resembling low-density lipoprotein in patients with acute leukemia”, *Cancer Research*, vol. 54, no. 17, páginas 4660–4666, 1994. Available: <https://aacrjournals.org/cancerres/article-abstract/54/17/4660/500420>
- [17] A. R. Abate *et al.*, “High-throughput injection with microfluidics using picoinjectors using picoinjectors”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 45, páginas 19163–19166, 2010, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1006888107>.
- [18] Q. Ma *et al.*, “Microfluidics in cardiovascular disease research: state of the art and future outlook”, *Microsystems & Nanoengineering* 2021, volume 7, no. 1, páginas 1–19, 2021, doi: www.doi.org/10.1038/s41378-021-00245-2.
- [19] L. Kelemen *et al.*, “Direct writing of optical microresonators in a lab-on-a-chip for label-free biosensing”, *Lab on a Chip*, volume 19, no. 11, páginas 1985–1990, 2019, doi: www.doi.org/10.1039/C9LC00174C.
- [20] S. Wang *et al.*, “Selective determination of potassium ions by SPR based molecularly imprinted sensor”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, volume 585, no. 1, página 012173, 2020, doi: www.doi.org/10.1088/1755-1315/585/1/012173.



- [21] F. H. Rached *et al.*, “HDL particle subpopulations: Focus on biological function”, *BioFactors*, volume 41, no. 2, páginas 67–77, 2015, doi: www.doi.org/10.1002/biof.1202.
- [22] A. Marino *et al.*, “A 3D Real-Scale, Biomimetic, and Biohybrid Model of the Blood-Brain Barrier Fabricated through Two-Photon Lithography”, *Small*, volume 14, no. 6, página 1702959, 2018, doi: www.doi.org/10.1002/SMLL.201702959.
- [23] P. Tayalia *et al.*, “3D Cell-Migration Studies using Two-Photon Engineered Polymer Scaffolds”, *Advanced Materials*, volume 20, no. 23, páginas 4494–4498, 2008, doi: www.doi.org/10.1002/adma.200801319.
- [24] L. Kong *et al.*, “3D Printing for Experiments in Petrophysics, Rock Physics, and Rock Mechanics: A Review”, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, volume 24, no. 04, páginas 721–732, 2021, doi: www.doi.org/10.2118/206744-PA.
- [25] K. W. B. Hunvik *et al.*, “Influence of CO₂ on Nanoconfined Water in a Clay Mineral”, *The Journal of Physical Chemistry C*, volume 126, no. 40, páginas 17243–17254, 2022, doi: www.doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c03310.
- [26] I. Agha *et al.*, “Low-noise chip-based frequency conversion by four-wave-mixing Bragg scattering in SiN_x waveguides”, *Optics Letters*, volume 37, no. 14, página 2997, 2012, doi: www.doi.org/10.1364/OL.37.002997.
- [27] Z. Liu *et al.*, “Polarization Multiplexing Bifunctional Metalens Designed by Deep Neural Networks”, *Advanced Physics Research*, volume 2, no. 6, 2023, doi: www.doi.org/10.1002/apxr.202200105.
- [28] J. Bürger *et al.*, “Ultrahigh-aspect-ratio light cages: fabrication limits and tolerances of free-standing 3D nanoprinted waveguides”, *Optical Materials Express*, volume 11, no. 4, página 1046, 2021, doi: www.doi.org/10.1364/OME.419398.
- [29] M. Zhang *et al.*, “Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator”, *Optica*, volume 4, no. 12, página 1536, 2017, link: www.doi.org/10.1364/OPTICA.4.001536.