



REVISTA DA

sbfoton

Vol. 7 - Dez/2025

ISSN-2966-0726



Foto: Grupo de Fotônica IFSC/USP



Revista de divulgação científica da Sociedade Brasileira de Ótica e Fotônica

Expediente

Editor-chefe

Jonas Henrique Osório

Corpo Editorial: Alexandre de Almeida Prado Pohl, Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro, Luciana Reyes Pires Kassab, Marcio Peron Franco de Godoy

Colaboradores: Gabriela Pinheiro

Autores dos artigos

Ana Elisa Berno, Adriano J. G. Otuka, Caio Rodrigo Macedo, Cleber R. Mendonça, Daniel A. Matos, Douglas Faza Franco, Eduardo Ghezzi, Elias Paiva F. Neto, Fábio J. Caixeta, João Paulo P. Rodrigues, Leonardo V. Albino, Marcelo Nalin, Nathalia B. Tomazio, Sidney J. L. Ribeiro, Silvia H. Santagneli, Thiago Augusto Lodi, Younès Messaddeq

Diretoria SBFoton

Presidente: Denise Maria Zezell/ IPEN

Diretor Administrativo: Eric Fujiwara/ UNICAMP

Diretor de Relações Institucionais: Hugo Enrique Hernandez Figueroa/ UNICAMP

Diretor de Relações com Empresas: Bruno Rodrigues Gama/ ANRITSU

Diretor de Eventos: Herculano da Silva Martinho/ UFABC

Diretor de Publicações: Jonas Henrique Osório/ UFLA

Diretor de Educação: Luciana Reyes Pires Kassab/ FATEC-SP

ISSN 2966-0726

Os artigos publicados nesta Revista representam a visão e opinião dos autores e podem não representar a opinião da Editoria da Revista.

ENDEREÇO

Cidade universitária Zeferino Vaz, Av. Albert Einstein, 400.
Distrito de Barão Geraldo, CEP 13083-852 - Campinas - SP

Carta do Editor

Com grande entusiasmo, apresentamos o sétimo volume da Revista da SBFoton, uma edição que contempla artigos redigidos por pesquisadores de excelência, discutindo temas que abrangem desde o desenvolvimento de materiais avançados até as mais recentes tecnologias de micro e nanofabricação.

Nesse contexto, gostaríamos de expressar nossa gratidão aos pesquisadores que aceitaram o desafio de elaborar seus trabalhos no formato de divulgação científica aqui proposto. Esta iniciativa é, inegavelmente, de grande importância para a SBFoton, pois permite que os temas de dedicação de nossos pesquisadores se tornem acessíveis a um público mais amplo, fomentando o interesse pela ciência e, mais especificamente, pela fotônica.

Por fim, reforçando o papel fundamental da divulgação científica, esta edição também destaca o trabalho exemplar desenvolvido pelo *Optica Student Chapter Recife*, que há mais de duas décadas promove atividades de grande relevância no Nordeste brasileiro.

Desejamos a todos uma ótima leitura!



Jonas Henrique Osório
Editor-Chefe

Mensagem da Presidente

É com grande satisfação que a Sociedade Brasileira de Ótica e Fotônica apresenta o Sétimo Volume da Revista da SBFoton, cujo conteúdo reflete a excelência da pesquisa nacional em fotônica.

Esta edição traz destaques relevantes, como a microfabricação por Polimerização por Absorção Multifotônica (PAM) e a inauguração do novo *Nanophotonic Technologies Laboratory* (NatLab) na USP. Cobrimos também avanços em vidros e fibras ópticas magneto-ópticas e o valioso trabalho de divulgação científica do *Optica Student Chapter* Recife.

A SBFoton reitera seu enorme esforço para a divulgação da ótica e fotônica em nosso país. Desejamos a todos uma leitura instrutiva e gratificante, fazendo votos que os trabalhos aqui publicados enriqueçam o conhecimento de um grande número de leitores!

Aproveitamos para desejar a toda a comunidade um Feliz Natal e um Próspero Ano Novo!



Denise Maria Zezell

Presidente da SBFoton

SUMÁRIO

3 Carta do Editor

4 Mensagem da Presidente

6 Notícias da SBFoton

7 *Chapters* no Brasil: *Optica Student Chapter* Recife

10 A arte de esculpir com a luz: fundamentos e aplicações da polimerização via absorção multifotônica

24 Materiais Vítreos com propriedades magneto-ópticas: avanços recentes e perspectivas aplicadas

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

NOTÍCIAS DA SBFOTON

A [SBFoton](#), fundada em 2017, é pessoa jurídica de direito privado, sob a forma de associação civil sem fins lucrativos, exclusivamente de caráter científico, tecnológico e de inovação. Seus objetivos são o incremento da pesquisa e inovação em ótica e fotônica e a criação no Brasil de um ambiente propício ao seu desenvolvimento.

Seus associados são docentes, pesquisadores, empresários, engenheiros, técnicos, estudantes e empresas, todos interessados no estudo, desenvolvimento e aplicação da luz em diversas áreas do conhecimento.

Faça parte desta sociedade clicando [aqui](#).

NEWSLETTER

A *Newsletter da SBFoton* é um veículo de comunicação quinzenal com as principais notícias de Ótica e Fotônica do Brasil e do mundo. Com quase 190 edições, conta com editorias especializadas em biofotônica, comunicações e redes óticas, lasers, ótica e instrumentação, ótica integrada e sensores. Além das notícias técnicas, divulga também convites para eventos, conferências e oportunidades profissionais e acadêmicas.

[Acesse](#) as edições anteriores e [assine](#) nossa newsletter.

EVENTOS

O *International Optics and Photonics Conference* (IOPC) é o evento anual da Sociedade Brasileira de Fotônica. Em 2025, realizado de 21 a 24 de setembro em São Pedro-SP, o congresso consolidou-se como um dos maiores da área na América Latina, com programação científica de alto nível.

Destacamos temas como Biofotônica, Agrofotônica e Tecnologias Quânticas. Recebemos pesquisadores internacionais da NASA, Leibniz IPHT/FSU Jena), Delft University e DIT-Dublin entre outros, além de sediarmos a 5ª Reunião do BRICS *Working Group on Photonics*, organizada pelo MCTI, reforçando o papel estratégico do Brasil na área.

A formação de novos talentos, por meio da Escola de Biospectroscopia e do Workshop de Empreendedorismo, também foi um pilar de sucesso.

A SBFOTON agradece a participação de todos, incluindo convidados, diretores, organizadores e secretariado, que muito contribuíram para o sucesso do evento!





sbfoton

CHAPTERS NO BRASIL

Optica Student Chapter Recife

O *Optica Student Chapter Recife*, fundado em 2003 pelo professor Cid Bartolomeu de Araújo, é o segundo capítulo estudantil da OPTICA no Brasil. Surgiu como uma forma de integrar o Departamento de Física da UFPE às demais atividades acadêmicas da instituição, já que o departamento se encontra geograficamente isolado no campus. Desde então, o capítulo promove a divulgação científica em ótica no Nordeste, realizando ações para estudantes do ensino básico e superior, com forte ênfase em projetos de extensão.

O principal evento organizado pelo *Chapter* é o Simpósio de Lasers e Suas Aplicações, que fortalece a interação científica entre instituições por meio de palestras e atividades e chegou à 17ª edição em 2025. O simpósio já contou com convidados de grande prestígio, como Donna Strickland, laureada com o Prêmio Nobel de Física em 2018 e ex-presidente da Optica, e Eric Van Stryland, renomado pesquisador na área de óptica não-linear e ex-presidente da Optica.

Além do Simpósio, o grupo também organiza o Dia Internacional da Mulher na Ciência, dedicado a promover diversidade, igualdade e inclusão com foco em mulheres cientistas. Sua programação inclui *workshops* e mesas-redondas que valorizam o papel das mulheres em diversas áreas, incentivando a participação de estudantes do ensino médio e da comunidade universitária.

DISCENTE ORGANIZADOR:

Yohan Szuszkó Soares

DOCENTE ORIENTADOR:

Cid Bartolomeu de Araújo



Simpósio de Lasers e Suas Aplicações de 2013 com a presença de Donna e Eric



Simpósio de Lasers e Suas Aplicações de 2025



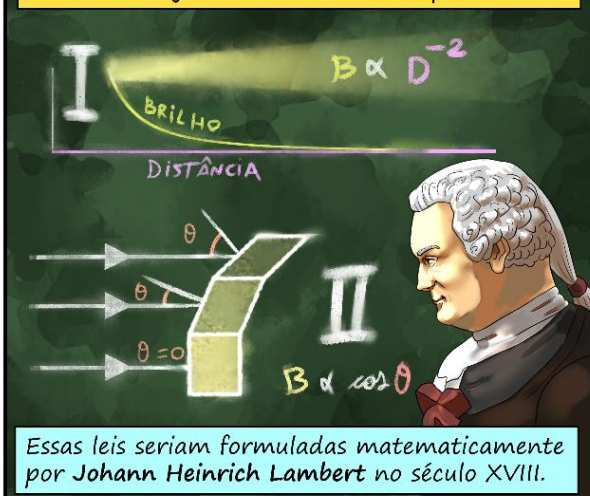
Leonardo di ser Piero da Vinci (1452-1519) foi polímata italiano e um dos principais nomes do Renascimento. As suas motivações, descobertas e obras mesclaram arte e ciência, com ideias muito à frente do seu tempo, muitas das quais não foram publicadas em vida.



da Vinci era entusiasmado pelo sentido da visão. Fez estudos pioneiros de anatomia, mas seus métodos para enrijecer olhos a fim de cortá-los e ver seu interior deformavam e deslocavam suas componentes, levando-o à conclusão errônea de que a imagem se forma reta sobre a retina, ao invés de invertida.



Ele esboçava geometricamente a formação das sombras de objetos bloqueando a luz, além de estudar a diferença de brilho nos próprios objetos pela distância (I) e a reflexão difusa (II): o brilho de uma fonte diminui com o inverso do quadrado da distância até ela; quanto menor o ângulo de incidência da luz sobre um objeto, maior o brilho aparente;



Esses e diversos outros estudos, como sobre a perspectiva e a percepção visual, culminaram em novas técnicas artísticas, proporcionando maior realismo às obras renascentistas. Foi assim que da Vinci deu à pintura Mona Lisa uma expressão tão enigmática e marcante até hoje!



Ilustração e roteiro: Marcelo Prado Cionek



A arte de esculpir com a luz: fundamentos e aplicações da polimerização via absorção multifotônica

Adriano J. G. Otuka¹ e Cleber R. Mendonça²

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP);

² Universidade de São Paulo (USP)

adriano.otuka@unesp.br e crmendon@ifsc.usp.br

RESUMO: A confecção de dispositivos miniaturizados, em escala micro e/ou nanométrica, é uma demanda frequente para as mais diversas áreas tecnológicas. Técnicas de processamento a laser tem sido amplamente empregada para a fabricação dessas estruturas. Em especial, a polimerização via absorção multifotônica (PAM) tem se destacado como uma ferramenta versátil, dinâmica e de fácil operação, permitindo alcançar dispositivos com resolução que superam o limite de difração. Nesse trabalho, descreveremos os principais fundamentos teóricos envolvidos na PAM, bem como as potenciais aplicações dos dispositivos fabricados. Em especial, discutiremos sobre as aplicações em bioengenharia, destacando alguns trabalhos recentes.

Palavras-chave: Aplicações em bioengenharia. Microfabricação a laser. Polimerização via absorção multifotônica.

ABSTRACT: The fabrication of miniaturized devices at the micro- and/or nanoscale is a frequent requirement across various technological fields. Laser processing techniques have been widely employed for the manufacturing of these structures. In particular, Multiphoton Absorption Polymerization (MAP) has stood out as a versatile, dynamic, and easy-to-operate tool, enabling the creation of devices with resolutions that surpass the diffraction limit. In this work, we will present the main theoretical fundamentals involved in MAP, as well as the potential applications of the fabricated devices. In particular, we will discuss bioengineering applications, highlighting some recent works.

Keywords: Bioengineering Applications. Laser Microfabrication. Multiphoton Absorption Polymerization.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.17967243>



A IMPORTÂNCIA ESTRATÉGICA DA MINIATURIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS E AS TÉCNICAS DE MICROFABRICAÇÃO

A busca por dispositivos miniaturizados, nas escalas micrométrica e nanométrica, transcende a mera redução de tamanho; ela representa uma prioridade estratégica para o avanço de diversas áreas tecnológicas [1]. Esta tendência, impulsionada pelo conceito de que a função, o desempenho e a eficiência muitas vezes melhoram à medida que as dimensões diminuem, é o cerne da microengenharia e da nanotecnologia modernas [2]. A miniaturização de dispositivos também viabiliza a integração e portabilidade essenciais para as tecnologias modernas. Essa escala permite a combinação de múltiplas funções – como detecção, processamento e atuação – em uma única plataforma minúscula [3]. O resultado direto dessa integração são, por exemplo, os sistemas conhecidos como “*Lab-on-Chip*”, que são plataformas compactas e altamente eficientes. Essa capacidade de concentrar um laboratório inteiro em um pequeno chip é fundamental para o desenvolvimento de diagnósticos rápidos e portáteis, revolucionando a saúde e a análise ambiental [4]. Além disso, a transição para a nanoescala pode induzir novas fenomenologias. Por exemplo, os materiais passam a exibir propriedades quânticas, ópticas e de superfície radicalmente diferentes daquelas observadas no mundo macroscópico [5]. A habilidade de manipular essas propriedades inéditas é a base da fotônica [6], que pode descrever detalhadamente a interação da luz com a matéria, e também de metamateriais [7], estruturas projetadas para apresentar características não encontradas na natureza.

Técnicas de microfabricação são fundamentais para a criação de componentes essenciais em eletrônica, medicina, óptica e biotecnologia, como microprocessadores, sensores, micro-sistemas eletromecânicos (MEMS – *Micro-Electro-Mechanical Systems*) [8]. A importância da microfabricação reside na sua capacidade de conferir aos dispositivos características únicas, como alta eficiência, baixo consumo de energia e, em muitos casos, a integração complexa com outros sistemas. Utiliza-se de ferramentas interdisciplinares que integram design, engenharia e produção para criar estruturas funcionais nas escalas micrométrica e nanométrica. Essas técnicas podem ser divididas em duas grandes categorias: métodos subtrativos e métodos aditivos. No primeiro grupo, destaca-se a indústria de semicondutores e envolve a remoção seletiva de



material para esculpir as estruturas desejadas a partir de um substrato maior. Como exemplo, a litografia óptica permite que um padrão geométrico seja transferido para uma camada de material sensível à luz (fotorresiste). Embora a litografia óptica utilize luz UV para exposição, sua resolução é limitada pelo limite de difração da luz [9]. Por sua vez, a litografia por feixe de elétrons (*E-beam*) oferece resolução sub-nanométrica [10], sendo crucial para diversas pesquisas, mas é dispendiosa para produção em massa. Tais técnicas são excelentes para a produção de estruturas planas e de alta precisão em 2D, mas enfrentam dificuldades significativas na criação de geometrias verdadeiramente tridimensionais (3D). Por outro lado, as técnicas aditivas constroem as estruturas camada por camada, muitas vezes, a nível atômico, sendo fundamentais para a nanotecnologia. Uma das técnicas aditiva mais notável é a Polimerização via Absorção Multifotônica (MAP) [11].

POLIMERIZAÇÃO VIA ABSORÇÃO MULTIFOTÔNICA: UMA VISÃO GERAL E DIVERSAS APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS

A Polimerização via Absorção Multifotônica (PAM), também referida como polimerização via absorção de dois fótons, consolidou-se como uma das técnicas mais sofisticadas e versáteis no cenário da micro e nanofabricação moderna [12]. Diferente das metodologias convencionais de litografia óptica, que operam fundamentalmente em processos planares, a MAP permite a verdadeira fabricação aditiva tridimensional com uma liberdade de *design* sem precedentes. A essência desta técnica reside na utilização de fenômenos ópticos não-lineares para confinar a reação química de polimerização a um volume espacial extremamente reduzido, superando as barreiras tradicionais impostas pelo limite de difração da luz e permitindo a construção de arquiteturas complexas, impossíveis de serem obtidas por métodos de moldagem ou corrosão.

O fundamento físico que viabiliza essa precisão extrema é o fenômeno da absorção de dois fótons, que atua na convergência entre a óptica não-linear e a fotoquímica de polímeros. Diferentemente da litografia convencional, que depende da absorção linear de um único fóton de alta energia (geralmente ultravioleta) para iniciar uma reação, a PAM utiliza a interação simultânea de múltiplos fótons de menor energia (geralmente no infravermelho próximo) para alcançar o mesmo estado de excitação



molecular. A premissa fundamental, prevista teoricamente por Maria Goeppert-Mayer na década de 1930, é que um átomo ou molécula pode absorver dois fótons em um único evento quântico, desde que a soma das energias desses fótons seja igual ao *gap* de energia necessária para promover o elétron do estado fundamental para o estado excitado [13]. Para que esse fenômeno ocorra com probabilidade estatística relevante, é necessário um fluxo de fótons extremamente alto (alta intensidade luminosa). Isso ocorre porque a transição não é direta; ela passa por um estado intermediário "virtual" de curtíssima duração (na ordem de femtossegundos), determinado pelo princípio da incerteza de Heisenberg. Se um segundo fóton não chegar dentro dessa janela temporal infinitesimal, a molécula relaxa e a absorção não se concretiza. Para satisfazer essa condição de alto fluxo de fótons, a técnica emprega lasers de femtossegundos pulsados, focados através de objetivas de alta abertura numérica. O uso de pulsos ultracurtos é crucial, pois permite atingir as intensidades de pico necessárias para a absorção de dois fótons, sem transferir calor excessivo que poderia danificar termicamente a amostra. O aspecto mais revolucionário da técnica de PAM reside na dependência não-linear da taxa de absorção em relação à intensidade da luz. Enquanto na absorção linear a probabilidade de excitação é proporcional à intensidade incidente (I), na absorção de dois fótons essa probabilidade é proporcional ao quadrado da intensidade (I^2). Essa relação quadrática tem uma implicação espacial profunda: a absorção cai drasticamente assim que nos afastamos do centro do foco do laser. Consequentemente, a excitação do fotoiniciador e a subsequente polimerização ficam estritamente confinadas a um volume minúsculo no ponto focal, denominado *voxel* (pixel volumétrico). Fora desse micro-volume, a densidade de fótons é insuficiente para sustentar a absorção de dois fótons, deixando a resina inalterada, permitindo que o feixe penetre profundamente no material sem causar solidificação indesejada na superfície ou no trajeto óptico. Além do confinamento óptico, a microfabricação via PAM incorpora um limiar químico de polimerização que permite resoluções espaciais que superam o limite de difração da luz [11]. Embora o foco do laser tenha um tamanho físico definido pela difração (o disco de Airy), a reação de polimerização só se sustenta nas regiões onde a taxa de geração de radicais livres supera a taxa de inibição (geralmente causada pelo oxigênio dissolvido na resina) [14]. Ajustando a energia do pulso para ficar ligeiramente acima desse limiar, é possível polimerizar apenas a parte central da distribuição gaussiana de intensidade. Isso

permite a criação de estruturas com detalhes na ordem de dezenas de nanômetros [15], muito menores do que o comprimento de onda do laser utilizado, conferindo à técnica sua capacidade inigualável de precisão e a habilidade de "escrever" geometrias 3D complexas livremente no espaço.

Para focalizar o feixe laser dentro da amostra fotossensível, utiliza-se objetivas de microscópios. Quando maior for sua abertura numérica, menor será o *voxel* polimerizado. A varredura do feixe pode ser realizada a partir da movimentação da amostra, utilizando estágios de translação, ou espelhos galvanométricos, que direcionam o feixe para as regiões de interesse. Um sistema independente de iluminação e imageamento permite acompanhar em tempo real o processo de microfabricação. A Fig. 1 apresenta um esquema típico de aparato experimental utilizado na PAM.

A seleção e o desenvolvimento de materiais para a PAM constituem um pilar tão fundamental quanto a própria configuração óptica do sistema a laser [16]. A amostra utilizada nesta técnica de microfabricação não é um simples consumível, mas sim um sistema químico complexo projetado para responder a requisitos físicos específicos: deve ser transparente ao comprimento de onda do laser (geralmente no infravermelho próximo) para permitir a penetração profunda do feixe, e, simultaneamente, possuir uma elevada secção transversal de absorção de dois fótons para garantir uma polimerização eficiente e confinada no volume focal. A formulação básica de qualquer resina para PAM consiste, essencialmente, numa mistura de monômeros ou oligômeros,

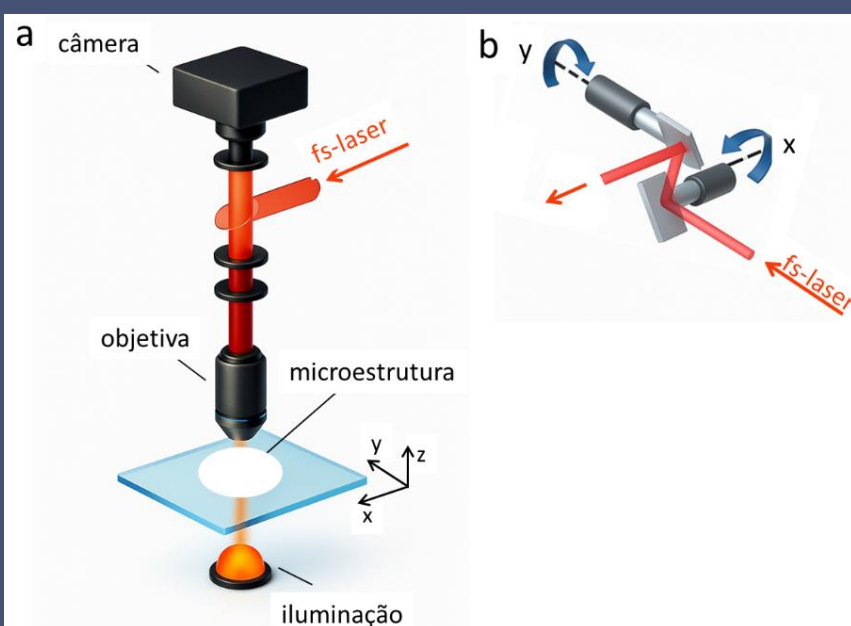


FIGURA 1 - ESQUEMATIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE MICROFABRICAÇÃO VIA POLIMERIZAÇÃO MULTIFOTÔNICA

a) Um laser de alta intensidade (por exemplo, femtossegundos) é focalizado através de lentes objetivas na amostra fotossensível. A varredura do feixe pode ser realizada a partir da movimentação da amostra, utilizando estágios de translação, ou b) espelhos galvanométricos, que direcionam o feixe para regiões de interesse. Um sistema independente de iluminação e imageamento permite acompanhar em tempo real o processo de microfabricação.



que constituem a base estrutural, e um fotoiniciador, a molécula responsável por absorver a energia luminosa e desencadear a reação de polimerização que leva à solidificação.

No universo dos materiais sintéticos, as resinas à base de acrilatos e epóxi têm sido as pioneiras da tecnologia. As resinas de acrilato caracterizam-se pela sua reatividade extremamente rápida, o que permite velocidades de escrita elevadas, essenciais para a viabilidade industrial da técnica. No entanto, sofrem frequentemente com uma contração volumétrica significativa durante a cura, o que pode distorcer as microestruturas finais. Em contrapartida, as resinas epóxi, como o famoso fotorresiste negativo SU-8, oferecem uma estabilidade mecânica e química superior, sendo ideais para componentes de MEMS e microfluídica, embora o seu processo de polimerização catiônica seja tipicamente mais lento. Para mitigar as limitações de ambos, foram desenvolvidos materiais híbridos orgânico-inorgânicos, conhecidos como ORMOCERs (*Organically Modified Ceramics*). Estes materiais combinam a facilidade de processamento dos polímeros orgânicos com a rigidez e estabilidade térmica de uma rede inorgânica de silício-oxigênio, apresentando uma contração mínima e uma excelente qualidade óptica, tornando-os ideais para a fabricação de microlentes e guias de onda.

Paralelamente, a expansão da PAM para a bioengenharia exigiu uma revolução na química dos materiais, deslocando o foco de resinas rígidas e insolúveis para hidrogéis macios e biocompatíveis. Neste contexto, o desafio reside em formular materiais que possam ser processados em ambiente aquoso e na presença de células vivas sem causar toxicidade. Materiais naturais modificados, como a gelatina metacrilada (GelMA), tornaram-se populares por preservarem sequências de reconhecimento celular essenciais para a adesão e proliferação biológica. Simultaneamente, polímeros sintéticos como o polietilenoglicol diacrilato (PEGDA) oferecem um controle preciso sobre a rigidez mecânica e a porosidade da estrutura, permitindo adaptar o ambiente para tipos celulares específicos. Um obstáculo crítico nesta vertente tem sido o desenvolvimento de fotoiniciadores solúveis em água que sejam eficientes na absorção de dois fótons, uma vez que os iniciadores tradicionais são frequentemente hidrofóbicos ou citotóxicos.

A fronteira mais recente na ciência dos materiais para PAM envolve a funcionalização ativa e a criação de materiais compósitos. Pesquisadores têm incorporado, por exemplo, nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono ou pontos quânticos (*quantum dots*) nas matrizes poliméricas para conferir propriedades elétricas, magnéticas ou luminescentes às microestruturas. Além disso, o conceito de "impressão 4D" [17] tem sido explorado através do uso de polímeros responsivos a estímulos, que alteram a sua forma ou propriedades químicas em resposta a variações de pH, temperatura ou humidade após a fabricação. Esta versatilidade material transforma a PAM em uma ferramenta de microfabricação extremamente atraente e competitiva.

As aplicações tecnológicas decorrentes dessa capacidade única são vastas e impactam setores estratégicos. A Fig. 2 exemplifica diversas possibilidades de aplicações de microestruturas fabricadas via Polimerização via Absorção Multifotônica. A fabricação de microestruturas ópticas via PAM representa um avanço significativo na engenharia de precisão, permitindo a criação de componentes tridimensionais complexos. No campo dos sistemas de imagem, a técnica viabiliza a produção de microlentes esféricas e de forma livre (*free-form*), fundamentais para corrigir aberrações em dispositivos miniaturizados onde o espaço é restrito e a qualidade da imagem não pode ser comprometida. Inspirados na natureza, pesquisadores têm utilizado a PAM para mimetizar os olhos compostos de insetos, fabricando arranjos densos de microlentes em superfícies curvas, o que proporciona um campo de visão ampliado e alta sensibilidade

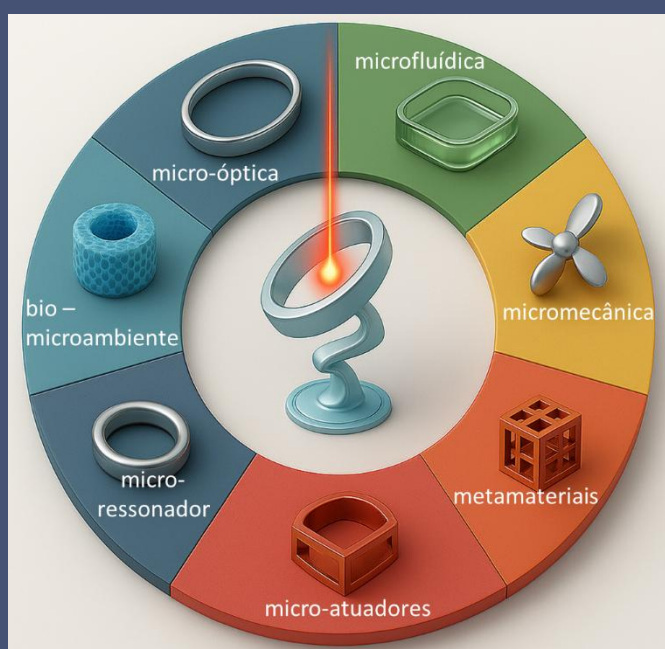


FIGURA 2 - EXEMPLOS DE MICROESTRUTURAS FABRICADAS VIA POLIMERIZAÇÃO MULTIFOTÔNICA

A versatilidade da técnica permite que dispositivos específicos sejam confeccionados para as mais diversas áreas tecnológicas, como por exemplo, óptica, fotônica, microfluídica e bioengenharia.



ao movimento, características ideais para endoscopia médica e visão de máquina avançada. Além disso, a versatilidade da técnica permite a escrita direta de elementos ópticos, como lentes e prismas, na ponta de fibras ópticas, transformando-as em sondas ativas para aplicações de "*Lab-on-Fiber*".

Outra aplicação crítica reside nas interconexões fotônicas, onde a PAM soluciona o desafio do acoplamento eficiente de luz entre chips fotônicos distintos ou entre fibras e guias de onda. Através da técnica conhecida como *Photonic Wire Bonding* [18], é possível "desenhar" conexões de polímero tridimensionais que se adaptam adiabaticamente ao modo óptico e corrigem desalinhamentos físicos, eliminando a necessidade de montagens mecânicas complexas e dispendiosas. Paralelamente, a capacidade de estruturar a matéria em escalas sub-micrométricas habilita a criação de cristais fotônicos 3D, como as estruturas *woodpile*, que manipulam o fluxo de luz criando bandas proibidas fotônicas, essenciais para filtros e espelhos de alta seletividade.

A técnica também se destaca na fabricação de microressonadores ópticos de alto fator de qualidade, como microdiscos e toróides suspensos que operam em modos de galeria sussurrante. A baixa rugosidade superficial obtida pela polimerização permite o confinamento da luz nesses volumes por longos períodos, tornando-os ideais para aplicações em sensores biológicos excepcionalmente sensíveis. Finalmente, a PAM é uma das poucas ferramentas capazes de concretizar os designs teóricos de metamateriais e metasuperfícies ópticas tridimensionais, como hélices quirais que controlam a polarização da luz ou lentes planas difrativas, abrindo novas fronteiras para a manipulação da luz em escalas menores que o seu próprio comprimento de onda. A viabilidade de todas essas aplicações depende intrinsecamente do uso de materiais especializados, como os ORMOCERs, que garantem transparência nas janelas de telecomunicações e estabilidade mecânica a longo prazo.

No campo da bioengenharia e medicina regenerativa, a técnica desempenha um papel revolucionário devido à sua compatibilidade com materiais biomédicos e à natureza menos agressiva da luz infravermelha [19]. Essa janela de transparência biológica, aliada à capacidade de processar hidrogéis e resinas biocompatíveis com resolução sub-micrométrica, permite transcender a fabricação de suportes inertes para a criação de interfaces ativas que dialogam diretamente com o tecido vivo [20]. Contudo, para maximizar o potencial terapêutico desses dispositivos, é fundamental ir além dos

polímeros sintéticos isolados e investigar estratégias de bio-hibridização. É nesse contexto que surge a motivação para explorarmos a sinergia entre a precisão da microfabricação a laser e as propriedades intrínsecas de biopolímeros naturais, uma fronteira que promete redefinir os padrões de biocompatibilidade e funcionalidade em, por exemplo, implantes médicos.

RECENTES APLICAÇÕES EM BIOENGENHARIA E MEDICINA REGENERATIVA DE MICROESTRUTURAS FABRICADAS A PARTIR DA POLIMERIZAÇÃO VIA ABSORÇÃO MULTIFOTÔNICA

Devido à sua precisão inigualável e liberdade de escrita 3D, a Polimerização via Absorção Multifotônica apresenta-se como a ferramenta ideal para a mimetização de sistemas biológicos, tornando esta, uma área de pesquisa particularmente atraente. A avaliação da difusão medicamentosa pode ser compreendida através de plataformas biocompatíveis confeccionadas via PAM. A geometria de microambientes tem se demonstrado uma característica fundamental para o desenvolvimento de microrganismos celulares e bacterianos [21–23]. A fronteira entre o sintético e o natural é dissolvida em sistemas híbridos inovadores. O uso de microestruturas fabricadas via PAM para modular o crescimento de materiais biológicos, como a celulose bacteriana,

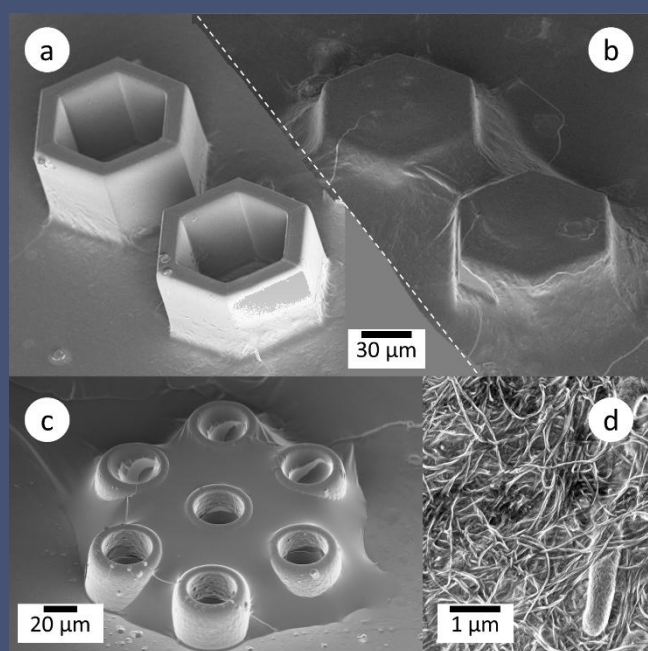


FIGURA 3 - MICROESTRUTURAS FOTOPOLIMERIZADAS PARA INVESTIGAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE MICROORGANISMOS BACTERIANOS

O desenvolvimento da bactéria *Komagataeibacter xylinus* em plataformas confeccionadas via PAM resulta na produção natural de celulose bacteriana cuja as propriedades são similares aos biofilmes crescidos em ambientes macroscópicos. a) Filme de celulose bacteriana crescida em estruturas poliméricas por um período de 6h e b) 24h. c) Filme de celulose bacteriana crescida em estruturas confeccionadas a partir de materiais híbridos por um período de 24h e d) Detalhe da biocelulose crescida em microambientes. Adaptado com permissão da Ref. [22]. Licenciado sob *Creative Commons Attribution 4.0 International*.



exemplifica essa simbiose (Fig. 3). Ao invés de apenas tentar replicar a natureza, utiliza-se a precisão da PAM para criar moldes ou reforços estruturais sobre os quais as bactérias depositam suas fibras de celulose, resultando em materiais compósitos que unem a biocompatibilidade e a porosidade da celulose com a resistência mecânica e o design complexo dos polímeros sintéticos.

A convergência da Polimerização via Absorção Multifotônica com a bioengenharia contemporânea inaugurou uma nova era na fabricação de microdispositivos médicos, transcendendo a simples produção de estruturas passivas para a criação de sistemas funcionais complexos que emulam os biológicos. No cerne dessa revolução está a capacidade da técnica de estruturar materiais tridimensionalmente com resolução sub-micrométrica, o que permitiu um salto qualitativo do cultivo celular estático para plataformas dinâmicas como os sistemas *Lab-on-Chip* (LoC) e *Organ-on-Chip* (OoC) [24,25]. Diferentemente das técnicas de litografia tradicionais, que se limitam a canais planares ou empilhados, a PAM possibilita a escrita direta de componentes microfluídicos intrínsecos – como válvulas, misturadores passivos em 3D e filtros porosos – diretamente no interior de microcanais fechados. Essa liberdade arquitetônica é fundamental para a miniaturização de laboratórios inteiros em um único chip, permitindo o processamento preciso de fluidos biológicos para diagnósticos rápidos e a triagem de fármacos com um consumo mínimo de reagentes.

A sofisticação trazida pela PAM é ainda mais evidente quando aplicamos esses conceitos à tecnologia de *Organ-on-Chip* (OoC). Nestes dispositivos, o objetivo é recapitular a fisiologia humana em microescala, e a PAM atua como a ferramenta chave para construir o alicerce desses micro-tecidos. Por exemplo [26,27], pesquisadores têm utilizado a técnica para fabricar redes vasculares artificiais complexas que garantem a perfusão de nutrientes e oxigênio para camadas espessas de tecido, superando um dos maiores gargalos da engenharia de tecidos: a necrose central em organoides volumosos. Além disso, a técnica permite a criação de barreiras biológicas artificiais, como modelos da barreira hematoencefálica ou da interface alvéolo-capilar, onde a porosidade da membrana fabricada é controlada com precisão nanométrica para estudar a permeabilidade de novos medicamentos. A integração de *scaffolds* impressos via PAM dentro desses chips fornece o suporte mecânico e topográfico necessário para que



células-tronco se auto-organizem em organoides funcionais – como mini-fígados ou glomérulos renais – mantendo a arquitetura tridimensional fiel ao órgão nativo [28,29].

Aprofundando-se na engenharia de tecidos, a personalização dos *scaffolds* via PAM atinge um nível de detalhe onde a própria geometria dita o destino celular. Em aplicações de regeneração óssea, por exemplo, a técnica não apenas cria estruturas que suportam carga, mas desenha poros com geometrias específicas que maximizam a difusão de nutrientes e facilitam a vascularização pelo corpo do hospedeiro. No sistema nervoso, a capacidade de alinhar microtúbulos e guias com precisão micrométrica é explorada para orientar o crescimento axonal, promovendo a reconexão de nervos lesionados através de "pontes" bioengenhadas que mimetizam a anisotropia do tecido neural [30–32]. Essa biomimética estrutural é reforçada pelo uso de materiais avançados, como hidrogéis de gelatina metacrilada (GelMA), que permitem a bioimpressão direta de células vivas, inserindo os componentes biológicos na estrutura durante o próprio processo de fabricação [33].

Paralelamente às estruturas fixas, a microrrobótica médica impulsionada pela PAM representa o ápice da funcionalidade dinâmica. Aproveitando conceitos de "impressão 4D", onde o quarto eixo é a resposta temporal a estímulos, cientistas desenvolvem microrrobôs capazes de navegar pela corrente sanguínea ou fluidos viscosos. Estas microestruturas, frequentemente inspiradas em flagelos bacterianos, podem ser carregadas com agentes terapêuticos e guiadas magneticamente até locais de difícil acesso, como tumores profundos ou coágulos em capilares estreitos, realizando a liberação controlada do fármaco *in situ*. A precisão da PAM é vital para garantir que as propriedades hidrodinâmicas e magnéticas desses robôs sejam perfeitamente calibradas para a propulsão eficiente em microescala [34,35].

Essas abordagens integradas consolidam a Polimerização via Absorção Multifotônica não apenas como uma ferramenta de fabricação, mas como um pilar central na construção da próxima geração de terapias regenerativas e diagnósticos de precisão.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os colaboradores que contribuíram de alguma forma para a realização dos trabalhos aqui apresentados, e também as agências de fomento à pesquisa FAPESP (2016/20094-8 e 2018-1283-7), CNPq (INFo – Instituto Nacional de Fotônica) e CAPES.

REFERÊNCIAS

- [1] Drexler, K.E., “Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation”, Wiley, 1992;
- [2] Madou, M.J., “Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization”, 2nd ed.; CRC Press, 2002;
- [3] Manz, A.; Graber, N.; Widmer, H.M., “Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing”, *Sensors Actuators B Chem.* 1990, 1, 244–248, doi:[https://doi.org/10.1016/0925-4005\(90\)80209-I](https://doi.org/10.1016/0925-4005(90)80209-I).
- [4] Yager, P.; Edwards, T.; Fu, E.; Helton, K.; Nelson, K.; Tam, M.R.; Weigl, B.H., “Microfluidic diagnostic technologies for global public health”, *Nature* 2006, 442, 412–418, doi:[10.1038/nature05064](https://doi.org/10.1038/nature05064).
- [5] Poole, C.P.; Owens, F.J., “Introduction to nanotechnology”, Wiley, 2003;
- [6] Saleh, B. E. A., Teich, M.C., “Fundamentals of Photonics”, Wiley, 1991;
- [7] Smith, D.R.; Padilla, W.J.; Vier, D.C.; Nemat-Nasser, S.C.; Schultz, S., “Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity”, *Phys. Rev. Lett.* 2000, 84, 4184–4187, doi:[10.1103/PhysRevLett.84.4184](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184).
- [8] Xia, Y.; Whitesides, G.M., “Soft Lithography”, *Angew. Chemie Int. Ed.* 1998, 37, 550–575, doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3773\(19980316\)37:5<550::AID-ANIE550>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3773(19980316)37:5<550::AID-ANIE550>3.0.CO;2-G).
- [9] Mack, C.A., “Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication”, Wiley, 2007;
- [10] Vieu, C.; Carcenac, F.; Pépin, A.; Chen, Y.; Mejias, M.; Lebib, A.; Manin-Ferlazzo, L.; Couraud, L.; Launois, H., “Electron beam lithography: resolution limits and applications”, *Appl. Surf. Sci.* 2000, 164, 111–117, doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00352-4).
- [11] Kawata, S.; Sun, H.B.; Tanaka, T.; Takada, K., “Finer features for functional microdevices”, *Nature* 2001, 412, 697–698, doi:[10.1038/35089130](https://doi.org/10.1038/35089130).
- [12] Otuka, A.J.G.; Tomazio, N.B.; Paula, K.T.; Mendonça, C.R., “Two-Photon Polymerization: Functionalized Microstructures, Micro-Resonators, and Bio-Scaffolds. *Polymers (Basel)*”, 2021, 13, 1–30.
- [13] Goeppert-Mayer, M., “Über Elementarakte mit zwei Quantensprüngen”, *Ann. Phys.* 1931, 401, 273–294.
- [14] Sun, H.B.; Kawata, S., “Two-photon photopolymerization and 3D lithographic microfabrication”, *Adv. Polym. Sci.* 2004, 170, 169–273, doi:[10.1007/b94405](https://doi.org/10.1007/b94405).



- [15] Takada, K.; Sun, H.B.; Kawata, S., "Improved spatial resolution and surface roughness in photopolymerization- based laser nanowriting", *Appl. Phys. Lett.* 2005, 86, 1–3, doi:10.1063/1.1864249.
- [16] Carlotti, M.; Mattoli, V., "Functional Materials for Two-Photon Polymerization in Microfabrication", *Small* 2019, 15, 1–22, doi:10.1002/smll.201902687.
- [17] Spiegel, C.A.; Hippler, M.; Münchinger, A.; Bastmeyer, M.; Barner-kowollik, C.; Wegener, M.; Blasco, E., "4D Printing at the Microscale", 2019, 1907615, 1–16, doi:10.1002/adfm.201907615.
- [18] Lindenmann, N.; Balthasar, G.; Hillerkuss, D.; Schmogrow, R.; Jordan, M.; Freude, W.; Koos, C., "Photonic wire bonding : a novel concept for chip- scale interconnects", 2012, 20, 17667–17677.
- [19] El-Tamer, A.; Hinze, U.; Chichkov, B.N., "Two-Photon Polymerization in Optics, Microfluidics, and Biomedicine", 2020, ISBN 9783319695372.
- [20] Torgersen, J.; Qin, X.-H.; Li, Z.; Ovsianikov, A.; Liska, R.; Stampfl, J., "Hydrogels for Two-Photon Polymerization: A Toolbox for Mimicking the Extracellular Matrix", *Adv. Funct. Mater.* 2013, 23, 4542–4554, doi:https://doi.org/10.1002/adfm.201203880.
- [21] Otuka, A.J.G.; Corrêa, D.S.; Fontana, C.R.; Mendonça, C.R., "Direct laser writing by two-photon polymerization as a tool for developing microenvironments for evaluation of bacterial growth", *Mater. Sci. Eng. C* 2014, 35, 185–189, doi: 10.1016/j.msec.2013.11.005.
- [22] Otuka, A.J.G.; Domenegueti, R.R.; Moraes, J.Q.R.; Balogh, D.T.; Ribeiro, S.J.L.; Mendonça, C.R., "Bacterial cellulose growth on 3D acrylate-based microstructures fabricated by two-photon polymerization", *JPhys Photonics* 2021, 3, doi:10.1088/2515-7647/abe02c.
- [23] Otuka, A.J.G.; Moraes, J.Q.R.; de Oliveira, A.B.; Fonseca, E.J.S.; Fontana, C.R.; Mendonca, C.R., "Evaluation of Probiotic Growth in Microenvironments Sculpted with Different Geometries", *ACS Omega* 2025, 10, 22679–22684, doi:10.1021/acsomega.4c11168.
- [24] Huh, D.; Hamilton, G.A.; Ingber, D.E., "From 3D cell culture to organs-on-chips", *Trends Cell Biol.* 2011, 21, 745–754, doi: 10.1016/j.tcb.2011.09.005.
- [25] Bhatia, S.N.; Ingber, D.E., "Microfluidic organs-on-chips", *Nat. Biotechnol.* 2014, 32, 760–772, doi:10.1038/nbt.2989.
- [26] Marino, A.; Tricinci, O.; Battaglini, M.; Filippeschi, C.; Mattoli, V.; Sinibaldi, E.; Ciofani, G., "A 3D Real-Scale, Biomimetic, and Biohybrid Model of the Blood-Brain Barrier Fabricated through Two-Photon Lithography", *Small* 2018, 14, doi:10.1002/smll.201702959.
- [27] Rekštytė, S.; Malinauskas, M., & Juodkazis, S., "Three-dimensional laser micro-sculpturing of silicone: towards bio-compatible scaffolds", *Opt. Express* 2013, 21, 17028–17041, doi:10.1364/OE.21.017028.
- [28] Liu, J.; Du, Y.; Xiao, X.; Tan, D.; He, Y.; Qin, L., "Construction of in vitro liver-on-a-chip models and application progress", *Biomed. Eng. Online* 2024, 23, 33, doi:10.1186/s12938-024-01226-y.
- [29] Homan, K.A.; Kolesky, D.B.; Skylar-Scott, M.A.; Herrmann, J.; Obuobi, H.; Moisan, A.; Lewis, J.A., "Bioprinting of 3D Convolved Renal Proximal Tubules on Perfusable Chips", *Sci. Rep.* 2016, 6, 34845, doi:10.1038/srep34845.
- [30] Melissinaki, V.; Gill, A.A.; Ortega, I.; Vamvakaki, M.; Ranella, A.; Haycock, J.W.; Fotakis, C.; Farsari, M.; Claeysens, F., "Direct laser writing of 3D scaffolds for neural tissue engineering applications", *Biofabrication* 2011, 3, 45005, doi:10.1088/1758-5082/3/4/045005.
- [31] Marino, A.; Ciofani, G.; Filippeschi, C.; Pellegrino, M.; Pellegrini, M.; Orsini, P.; Pasqualetti, M.; Mattoli, V.; Mazzolai, B., "Two-Photon Polymerization of Sub-micrometric Patterned Surfaces: Investigation of Cell-Substrate Interactions and Improved Differentiation of Neuron-like Cells", *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2013, 5, 13012–13021, doi:10.1021/am403895k.



- [32] Accardo, A.; Blatché, M.-C.; Courson, R.; Loubinoux, I.; Vieu, C.; Malaquin, L., “Two-photon lithography and microscopy of 3D hydrogel scaffolds for neuronal cell growth”, *Biomed. Phys. Eng. Express* 2018, 4, 27009, doi:10.1088/2057-1976/aaab93.
- [33] Engelhardt, S.; Hoch, E.; Borchers, K.; Meyer, W.; Krüger, H.; Tovar, G.E.M.; Gillner, A., “Fabrication of 2D protein microstructures and 3D polymer-protein hybrid microstructures by two-photon polymerization”, *Biofabrication* 2011, 3, 25003, doi:10.1088/1758-5082/3/2/025003.
- [34] Ceylan, H.; Yasa, I.C.; Yasa, O.; Tabak, A.F.; Giltinan, J.; Sitti, M., “3D-Printed Biodegradable Microswimmer for Theranostic Cargo Delivery and Release”, *ACS Nano* 2019, 13, 3353–3362, doi:10.1021/acsnano.8b09233.
- [35] Peyer, K.E.; Zhang, L.; Nelson, B.J., “Bio-inspired magnetic swimming microrobots for biomedical applications”, *Nanoscale* 2013, 5, 1259–1272, doi:10.1039/C2NR32554C.

Materiais Vítreos com propriedades magneto-ópticas: avanços recentes e perspectivas aplicadas

Douglas Faza Franco¹, Leonardo V. Albino¹, Thiago Augusto Lodi¹, Eduardo Ghezzi¹, João Paulo P. Rodrigues¹, Caio Rodrigo Macedo¹, Ana Elisa Berno¹, Fábio J. Caixeta¹, Elias Paiva F. Neto¹, Sidney J. L. Ribeiro¹, Silvia H. Santagneli¹, Younès Messaddeq¹, Marcelo Nalin¹

¹Instituto de Química de Araraquara (IQCAR), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP),

douglas.franco@unesp.br e marcelo.nalin@unesp.br

RESUMO: Ao longo do último século, os materiais vítreos transformaram a ciência e a tecnologia. O Laboratório de Vidros Especiais (LAViE) e o Laboratório de Materiais Fotônicos (LAMF), do Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), em Araraquara-SP, têm se destacado no desenvolvimento de vidros e fibras ópticas com propriedades magneto-ópticas (MO). Esses materiais, baseados em íons de terras raras como Tb^{3+} , Dy^{3+} e Ho^{3+} , são promissores para sensores ultrasensíveis de corrente elétrica e/ou campo magnético. O reconhecimento científico dos resultados impulsionou, em 2023, a criação da startup GlassGlass Technologies, nascida no IQCAR-Unesp, com o propósito de transformar o conhecimento acadêmico em soluções reais para o setor fotônico e energético, consolidando seu protagonismo na ciência brasileira.

Palavras-chave: Efeito Faraday, fibras ópticas, terras raras, vidros magneto-ópticos.

ABSTRACT: In the last century, glassy materials have transformed science and technology. The Special Glasses Laboratory (LAViE) and the Photonic Materials Laboratory (LAMF), of the Institute of Chemistry at São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp) in Araraquara-SP, have distinguished themselves in the development of optical glasses and fibers with magneto-optical (MO) properties. These materials, which are based on rare-earth ions such as Tb^{3+} , Dy^{3+} , and Ho^{3+} , are promising for ultrasensitive electric current and/or magnetic field sensors. The scientific recognition of these results led to the creation, in 2023, of the startup GlassGlass Technologies. The company aims to translate academic knowledge into real-world solutions for the photonics and energy sectors, solidifying Brazilian science's leading role.

Keywords: Faraday effect, magneto-optical glasses, optical fibers, rare earth.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.17966833>

No século passado, diversas composições vítreas revolucionaram o mundo científico em razão de suas amplas aplicações tecnológicas. Nas últimas décadas, a busca incessante por novos materiais tecnologicamente inovadores tem contribuído para o crescimento do campo que estuda materiais com propriedades magneto-ópticas (MO) [1]. Atualmente, os materiais MO vêm despertando o interesse de diversos grupos de pesquisa ao redor do mundo, em razão de suas diferentes possibilidades de aplicações, tais como isoladores ópticos, transdutores, moduladores, armazenamento de informações e sensores baseados em fibras magneto-ópticas [2]. O crescente avanço do setor industrial, especialmente dos segmentos automobilístico e de geração de energia, demandará, no futuro, sensores com tecnologias mais avançadas e maior sensibilidade para o monitoramento de corrente elétrica e/ou campo magnético. Neste contexto, destacam-se os materiais com propriedades MO, em especial os vidros e as fibras ópticas.

Em termos históricos, o efeito MO foi descoberto em 1845 por Michael Faraday por meio de um experimento que consistiu em posicionar um pedaço de vidro de borossilicato entre os polos de um eletroímã. O efeito Faraday, por sua vez, se caracteriza pela rotação do plano de polarização de um feixe de luz linearmente polarizado que atravessa um meio sob a influência de um campo magnético externo (B) [3]. Tal efeito poder ser descrito pela Equação 1:

$$\theta = V_B \cdot B \cdot l \quad (1)$$

onde θ é o ângulo de rotação de Faraday (tipicamente expresso em radianos), V_B é a constante de Verdet, B é o campo magnético externo aplicado ao meio e l é o caminho óptico do material. A constante de Verdet (V_B) é intrínseca ao material e expressa a magnitude do efeito Faraday, dependendo do campo magnético aplicado, de sua composição química e do comprimento de onda da radiação incidente. Em síntese, o desempenho MO de um material é determinado a partir dos valores de V_B em diferentes regiões do espectro eletromagnético; quanto maior o valor de V_B , maior será a rotação do plano da luz polarizada [3]. Tecnicamente, tais materiais são conhecidos como Rotadores de Faraday, pois são sensíveis à presença de um campo magnético externo e capazes de rotacionar o plano da luz polarizada que os atravessa.



Quanto à rotação da luz plano polarizada, a configuração eletrônica das espécies que compõem um material MO desempenha um papel fundamental no sentido da rotação da luz ao atravessar o meio. Por definição, átomos ou íons com camadas eletrônicas preenchidas ou semipreenchidas dão origem a dois tipos de materiais, conhecidos como diamagnéticos e paramagnéticos, respectivamente.

A constante de Verdet (V_B) reflete a resposta magneto-óptica do material e resulta da soma de contribuições diamagnéticas e paramagnéticas. Quando o valor de V é positivo, ou seja, a rotação ocorre no sentido anti-horário, os efeitos diamagnéticos predominam. Por outro lado, quando a rotação é no sentido horário e V_B assume valor negativo, as contribuições paramagnéticas tornam-se dominantes na amostra. Devemos considerar que os efeitos diamagnéticos são ordens de grandeza menores que os efeitos paramagnéticos, por essa razão materiais com alta suscetibilidade paramagnética são requisitados como os melhores rotadores de Faraday.

Atualmente, diversos estudos na literatura reportam o desenvolvimento de Rotadores de Faraday, incluindo vidros, fibras ópticas e cristais com altos valores de V_B [4-8].

Entre esses materiais, destaca-se o “*Terbium-Gallium Garnet*” ($\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$), comercialmente conhecido como cristal TGG. O TGG é considerado um dos principais materiais MO pelo seu alto valor de constante de Verdet em 632,8 nm ($V_B = -134 \text{ rad T}^{-1} \text{ m}^{-1}$) [9] e pela aplicabilidade em sistemas ópticos [10]. Entretanto, o método de síntese destas granadas, comumente conhecido como Czochralski, apresenta algumas desvantagens, como o alto custo, o longo tempo de síntese e a limitação no tamanho dos cristais obtidos, geralmente com dimensões inferiores a 10-20 cm. Essa restrição dimensional compromete o desempenho MO, uma vez que reduz o ângulo de rotação (θ) devido ao menor caminho óptico (l) [6]. Portanto, o desenvolvimento de novas composições vítreas, capazes de solubilizar elevadas concentrações de íons paramagnéticos, como os íons terras raras, possibilita o design e a fabricação de fibras com propriedades MO. Deve-se destacar que, na literatura, poucos trabalhos relatam a fabricação de fibras MO, uma vez que tais composições devem atender aos pré-requisitos mencionados anteriormente. A possibilidade de fabricar fibras a partir de

vidros MO representa uma alternativa plausível e vantajosa para o aumento do ângulo de rotação Faraday (θ), já que este é proporcional ao caminho óptico (l) e ao campo magnético (B) aplicado, conforme destacado na Equação (1) [3].

Como informação complementar, o vidro de sílica pura, popularmente conhecido por ser o principal precursor de fibras ópticas comerciais, apresenta baixos valores de V_B em 632 e 1550 nm, iguais a 3,48 e 0,470 rad T⁻¹ m⁻¹, respectivamente [11]. Uma das alternativas para aumentar o valor de V_B de um material, e consequentemente, melhorar sua performance MO, consiste na incorporação de íons paramagnéticos com altos valores de momento magnético (μ_{eff}), tais como os íons terras raras Tb³⁺, Dy³⁺, Ho³⁺ e Gd³⁺ [6, 12-15].

Neste sentido, nos últimos anos, o Laboratório de Vidros Especiais (LAViE), liderado pelos professores e pesquisadores Dr. Marcelo Nalin e Dr. Douglas Faza Franco, em colaboração com o Laboratório de Materiais Fotônicos (LAMF), ambos do Instituto de Química de Araraquara (IQCAR) da Universidade Estadual Paulista (Unesp), vem se dedicando ao estudo e caracterização de vidros, fibras ópticas e cristais com propriedades MO [5-7, 14-19].

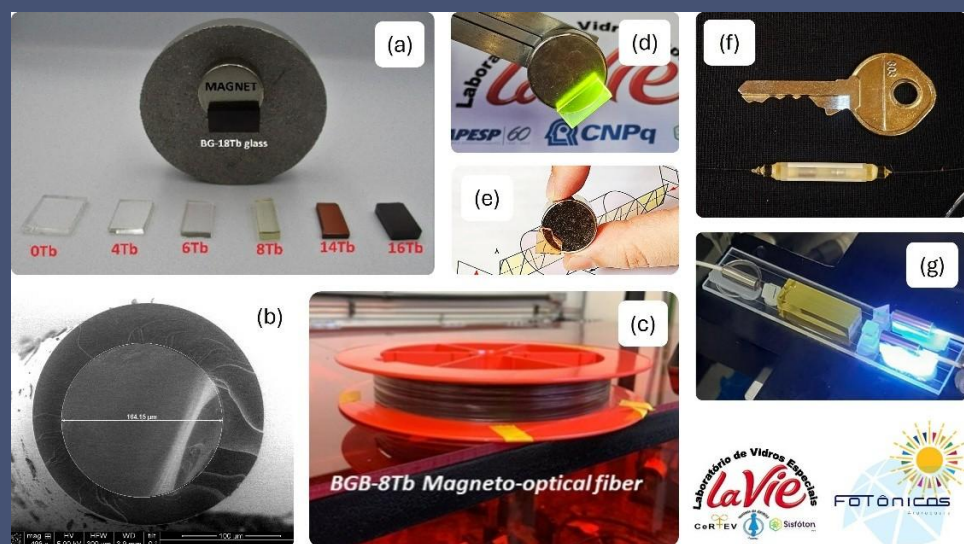


FIGURA 1 - (a) Vidros borogermatos (BGB) contendo alta concentração de Tb₄O₇. (b) e (c) Fibra magneto-óptica obtida a partir do vidro BGB-8Tb [5]. (d) Vidro boroaluminato (BAG) com alta concentração de Tb₄O₇ sob luz ultravioleta e sendo atraído por um ímã. (e) Vidro SbPO₄ dopado com alta concentração de MnO sendo atraído por um ímã [20]. (f) e (g) Rotadores de Faraday baseados em vidros MO desenvolvidos pela GlassGlass Technologies, para monitoramento de campo magnético e corrente elétrica.

Dentre os trabalhos publicados, destacam-se os de Franco *et al.*, que reportam a síntese de vidros borogermanatos com composições (60GeO₂–25B₂O₃–4Al₂O₃–10Na₂O–1PbO e 41GeO₂–25B₂O₃–4Al₂O₃–10Na₂O–20BaO) contendo altas concentrações de íons Tb³⁺ [5,7]. Nestes trabalhos, todos os vidros tiveram as suas propriedades térmicas,



estruturais, ópticas e magnéticas estudadas sistematicamente. Em 2021, alguns desses trabalhos ganharam destaque na mídia e foram mencionados no boletim da Agência FAPESP e em outros canais de comunicação [17].

Como citado anteriormente, para se obter uma boa resposta magnética é necessário que haja altas concentrações de íons paramagnéticos, como o Tb^{3+} , dissolvidos em uma matriz vítrea que permita a solubilização de terras raras, como ocorre nos vidros baseados em borogermanatos. No entanto, nos últimos anos, o preço do óxido de germânio tem aumentado significativamente, tornando esses vidros comercialmente inviáveis. Dessa forma, a busca por novos sistemas vítreos que não utilizem germânio vem sendo intensificada e estudada como alternativa pelo nosso grupo de pesquisa. Recentemente, a primeira tese de doutorado em vidros magneto-ópticos intitulada *"Synthesis and study of glasses with magneto-optical properties containing transition metals and rare earths"* foi defendida por Leonardo V. Albino, sob orientação do Prof. Dr. Marcelo Nalin e em co-tutela com o Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux da Université de Bordeaux (ICMCB-UB), França, sob orientação do Dr. Thierry Cardinal e gerou três trabalhos sobre vidros magneto-ópticos que não utilizam germânio [20].

Além disso, a crescente tensão comercial em torno das terras raras, marcada pela restrição das exportações chinesas e pela taxaçoão norte-americana, mostra a fragilidade do modelo atual de suprimento mundial destes metais estratégicos. Diante desse cenário, a mineração urbana desponta como uma alternativa ambientalmente viável, permitindo a recuperação de elementos de alto valor tecnológico agregado a partir de resíduos eletrônicos, ímãs permanentes e lâmpadas fluorescentes descartadas. Utilizando esse princípio, um trabalho publicado recentemente reportou a síntese de vidros MO utilizando o resíduo de lâmpadas fluorescentes como fonte de terras raras, principalmente európio (Eu) e térbio (Tb). Publicado pela estudante de graduação em química do IQCAR-Unesp e bolsista de iniciação científica (CNPq), Ana Elisa Berno, sob a orientação do professor Dr. Douglas Faza Franco, o trabalho utilizou vidros borogermanatos contendo diferentes proporções em massa (%m/m) de resíduo de lâmpadas fluorescentes (até 50% m/m) atingindo um valor máximo de constante de Verdet (V_B) $-40,9 \text{ rad T}^{-1}\text{m}^{-1}$ em 632,8 nm, destacando o potencial desses vidros como

rotadores de Faraday. Esse foi o primeiro trabalho publicado a empregar resíduos de lâmpadas para a síntese de vidros para aplicações magneto-ópticas [14].

Os trabalhos publicados por nossos grupos de pesquisa nos últimos anos permitiram a ampliação de novos horizontes, especialmente no que se refere à imersão no empreendedorismo. Diante do enorme potencial de aplicação dos materiais desenvolvidos nas áreas de fotônica e magneto-óptica, surgiu, em 2023, a *startup GlassGlass Technologies*, uma empresa com o DNA IQCAR-Unesp, totalmente brasileira, com o objetivo de desenvolver novos rotadores de Faraday, com potencial aplicação na criação de sensores magneto-ópticos voltados à detecção de corrente elétrica e/ou campo magnético.

O nosso grupo de pesquisa segue com o propósito de fortalecer a ciência brasileira por meio da inovação em materiais vítreos avançados. Os trabalhos desenvolvidos no Instituto de Química da Unesp demonstram o papel essencial da universidade pública na geração de conhecimento científico e tecnológico de ponta, com aplicações diretas em setores estratégicos como energia e sensoriamento.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos (no 2013/07793-6; 2023/04832-2; 2016/16900-9; 2018/19272-4; 2023/09906-4 e 2025/10231-7); ao CNPq (no 407747/2022-2); ao Sisfóton-MCTI (Sistema Nacional dos Laboratórios de Fotônica, no 384430/2024-4); a Université Laval (COPL); ao IQCAR-Unesp e a *GlassGlass Technologies*.



REFERÊNCIAS

- [1] Blanc, W *et al.*, “The past, present and future of photonic glasses: A review in homage to the United Nations International Year of Glass 2022, Progress in Materials Science”, Vol. 134, p. 101084, 2023, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101084.
- [2] Franco, D.F *et al.*, “Magneto-optical borogermanate glasses and fibers containing Tb³⁺”, Scientific Reports, Vol. 11, p. 9906, 2021, DOI:10.1038/s41598-021-89375-1.
- [3] Yamane, M *et al.*, “Glasses for photonics”, Cambridge University Press, 2000. DOI: 10.1017/CBO9780511541308.
- [4] Cabral, T. D *et al.*, “Magnetic field fiber specklegram sensors based on Tb³⁺-doped magneto-optical glasses with high verdet constants”, IEEE Sensors Journal, Vol. 23, p. 6872-6879, 2023, DOI: 10.1109/JSEN.2023.3244120.
- [5] Franco, D.F *et al.*, “Magneto-optical borogermanate glasses and fibers containing Tb³⁺”, Scientific Reports, Vol. 11, p. 9906, 2021, DOI:10.1038/s41598-021-89375-1.
- [6] Albino, L. V *et al.*, “Paramagnetic borotungstate glasses with high terbium concentration for magneto-optical applications”, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 627, p. 122811, 2024, DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2023.122811.
- [7] Franco, D.F *et al.*, “Fundamental studies of magneto-optical borogermanate glasses and derived optical fibers containing Tb³⁺”, Journal of Materials Research and Technology. 2021, Vol. 11, p. 312–327, DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.01.010.
- [8] Franco, D. F *et al.*, “Multimode magneto-optical fiber based on borogermanate glass containing Tb³⁺ for sensing applications”, Materials, Vol. 18, p. 4736, 2025, DOI: doi.org/10.3390/ma1820473.
- [9] Jin, W *et al.*, “Fabrication and magneto-optical properties of TGG transparent ceramics”, Physica B: Condensed Matter, Vol. 555, p. 96-98, 2019, DOI: 10.1016/j.physb.2018.11.053.
- [10] Elliott, R (Ed.), “Magnetic properties of rare earth metals”, Springer Science & Business Media, 1972, DOI: 10.1007/978-1-4757-5691-3.
- [11] Liu, Z *et al.*, Study of the Verdet constant of the holmium-doped silica fiber, OSA Continuum, Vol. 3, p. 1096-1104, 2020, DOI: 10.1364/OSAC.390111.
- [12] Elisa, M *et al.*, “Thermal, structural, magnetic and magneto-optical properties of dysprosium-doped phosphate glass”, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 521, p. 119545, 2019.
- [13] Fan, X *et al.*, “Spectroscopic properties and quenching mechanism of 2 μ m emission in Ho³⁺ doped germanate glasses and fibers”, Optical Materials Express, Vol. 5, p. 1356-1365, 2015, DOI:10.1364/OME.5.001356.
- [14] Elisa Berno, A *et al.*, “Recycled rare earth ions from e-waste in borogermanate glasses for magneto-optical applications”, Chemistry – An Asian Journal, Vol. 20, p. e202401613, 2025, DOI: 10.1002/asia.202401613.
- [15] Fernandes, R. G *et al.*, “Thermal and structural modification in transparent and magnetic germanoborate glasses induced by Gd₂O₃”, Ceramics International, Vol. 46, p. 22079-22089, 2020, DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.05.227.
- [16] Albino, L. V *et al.*, “Magnetic and magneto-optical properties of manganese-containing antimony phosphate glasses – An alternative to Faraday rotators”, Optical Materials, Vol. 147, p. 114674, 2024, DOI: 10.1016/j.optmat.2023.114674.
- [17] Arantes, J. T., “Fibra capaz de detectar campos magnéticos extremamente fracos é produzida na Unesp”, FAPESP, 2021, <https://agencia.fapesp.br/fibra-capaz-de-detectar-campos-magneticos-extremamente-fracos-e-produzida-na-unesp/36509>.
- [18] Agência FAPESP. “Fibra detecta campos magnéticos do cérebro aos vulcões”. Inovação tecnológica, 2021, <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/>.
- [19] Douglas F. F *et al.*, “Structural Study of the Germanium–Aluminum–Borate Glasses by Solid State NMR and Raman Spectroscopies, The Journal of Physical Chemistry C”, Vol 124, p. 24460-24469, 2020, DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c07810.
- [20] Albino, L. V., “Síntese e estudo de vidros magneto-ópticos contendo metais de transição e terras raras”. Tese de doutorado, 2023, <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/3326b73b-9095-4a86-a461-51bc753d05e0>.

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.

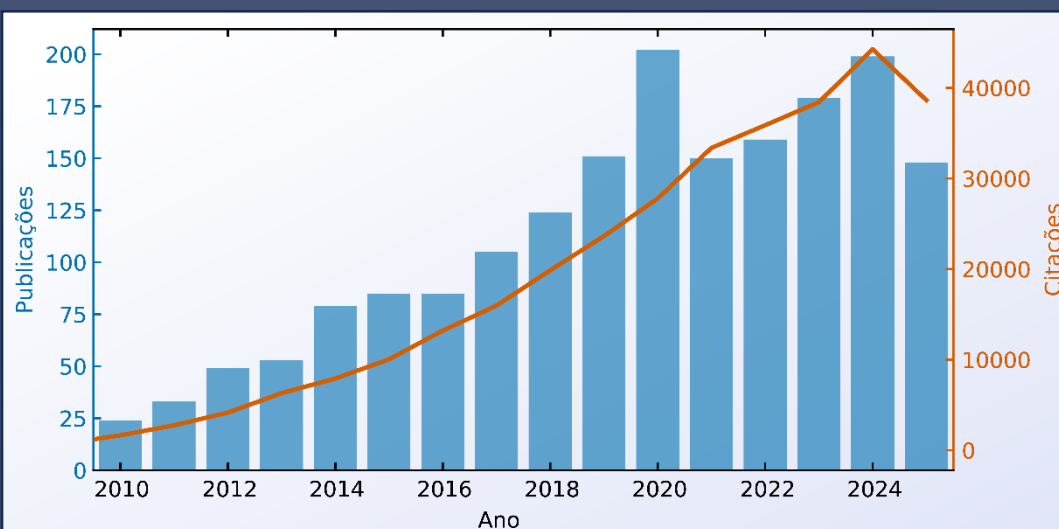


FIGURA 1 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DE PUBLICAÇÕES E CITAÇÕES EM NANOFOTÔNICA E FOTÔNICA INTEGRADA

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.

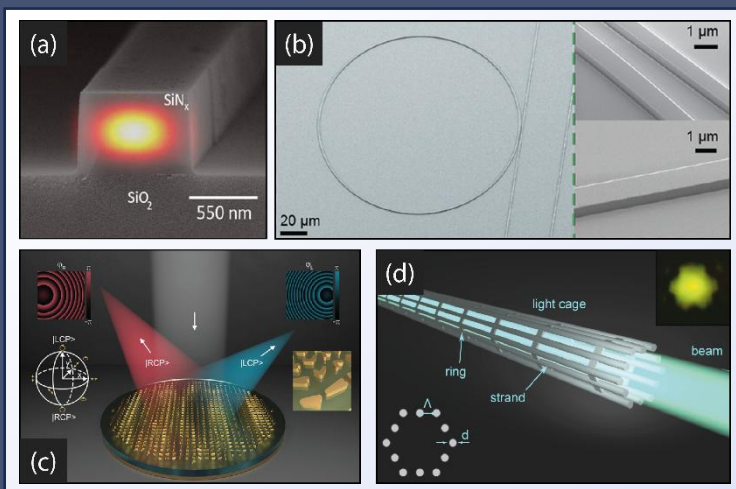


FIGURA 2 - EXEMPLOS REPRESENTATIVOS DE SISTEMAS E ESTRUTURAS ESTUDADOS NO CAMPO DA NANOFOTÔNICA

(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

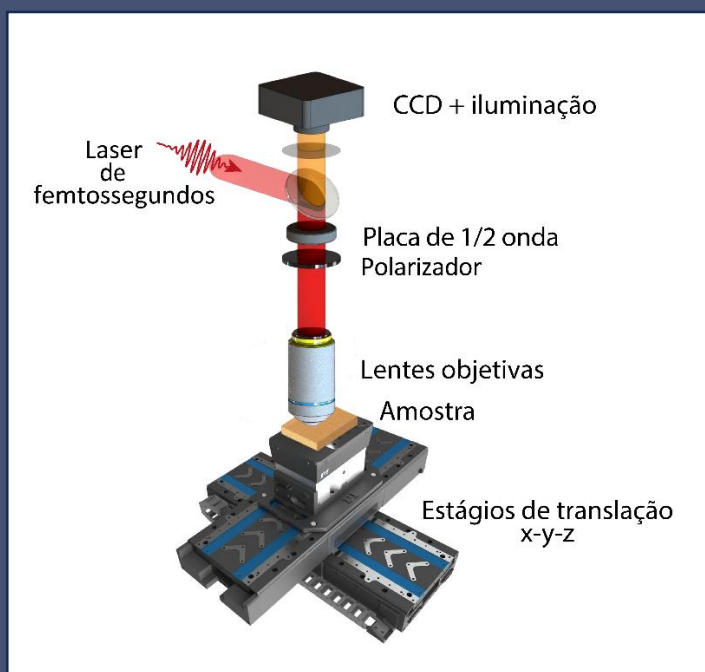


FIGURA 3 - ESQUEMA DO SISTEMA DE MICRO/NANOFABRICAÇÃO A LASER VIA F2F

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](https://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](https://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](https://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](https://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](https://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](https://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](https://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](https://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](https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.001536).



REVISTA DA

sbfoton

Vol. 7 - Dez/2025

