



REVISTA DA

sbfoton

Vol. 2 - Mar/2023

ISSN-2966-0726



Foto: Danilo Franco de Godoy



Revista de divulgação científica da Sociedade Brasileira de Ótica e Fotônica

Expediente

Editor-chefe

Marcio Peron Franco de Godoy

Colaboradores: Camilla Teodoro e Raquel Q. Santos

Autores dos artigos

Alexandre de Almeida Prado Pohl, Cristiano M. B. Cordeiro, Filippo Ghiglieno, Jonas H. Osório, Luiz Vicente Gomes Tarelho, Marcelo de Oliveira, Muriel A. de Souza, Paulo Henrique Dias Ferreira, Roberto Osellame, Vinicius Tribuzi.

Diretoria SBFoton

Presidente: Alexandre de Almeida Prado Pohl/ UTFPR

Diretor Administrativo: André Luiz Nunes de Souza/ Infinera

Diretor de Relações Institucionais: Claudio Costa Motta/ USP

Diretor de Relações com Empresas: Alberto Paradisi/ Fundação CPqD

Diretor de Eventos: Uiara Celine de Moura/ NKT Photonics

Diretor de Publicações: Marcio Peron Franco de Godoy/ UFSCar

Diretor de Educação: Manuel Steidle/ Fundação CERTI

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

Após um período de chuva e com a umidade ainda incipiente na atmosfera, é muito comum a formação do arco-íris, como o que ilustra a capa desta segunda edição da Revista da SBFoton. A fotografia ainda nos remete a um caminho, um pouco íngreme é verdade, porém amplo para o deslocamento. De certa maneira, ela expressa o otimismo de um novo ano somado aos desafios inerentes às atividades técnico-científicas.

A luz é este fenômeno fascinante que encanta a humanidade há tanto tempo quanto sua própria existência. Desvendar sua natureza é a obsessão de muitos e, outros, ainda, tentam domá-la e utilizar suas propriedades em prol do desenvolvimento tecnológico, científico e, por que não, social.

Esta edição conta com uma série de artigos que tratam de assuntos relacionados à comunicação sem fio, ao uso de princípios quânticos em números aleatórios, à nova geração de fibras de núcleo oco e uma nova técnica para avaliar as perdas em guias de onda. São artigos elaborados por especialistas nas áreas, os quais agradecemos muito pela sua contribuição.

Nesta fase de consolidação da revista, seguimos abertos a críticas e sugestões, para que possamos crescer agradando os anseios de nossos leitores.

Ótima leitura!



Marcio Peron Franco
de Godoy
Editor-Chefe

Mensagem do Presidente

Nada nos traz maior felicidade do que acompanhar o desenvolvimento bem sucedido de um empreendimento. De uma ideia e desejo iniciais surge algo que, com dedicação e comprometimento, acaba se tornando realidade. Este certamente é o caso da revista de divulgação da Sociedade Brasileira de Ótica e Fotônica, que lança neste início de 2023 o seu segundo número. Naturalmente, ainda há um longo caminho a percorrer, mas este é um pequeno passo no sentido de se afirmar como importante veículo de comunicação entre aqueles que acompanham o desenvolvimento da ótica e fotônica em nosso país.

Esta revista não deve ser vista apenas como um meio de comunicação, mas também como um tributo a centenas de alunos, docentes, pesquisadores e empreendedores que, através de seu denodado entusiasmo e esforço, procuram manter acesa a chama que impulsiona o desenvolvimento científico e tecnológico e o empreendedorismo inovador, repleto de desafios, em um segmento de crescente significado no cenário internacional.

Este segundo número não teria vindo à luz sem a liderança e dedicação de nosso diretor de publicações e editor responsável, Prof. Marcio Godoy, da Universidade Federal de São Carlos. Gostaria imensamente de agradecê-lo, em nome de nossos associados, pela sua contribuição e contínuo esforço. Não menos, agradeço também a singela contribuição dos autores que participam deste número. Que outros possam seguir o seu exemplo e contribuir para edições futuras. Finalmente, um agradecimento especial é endereçado à Thorlabs Vendas de Fotônicos Ltda, na figura de sua sempre presente gerente geral, Marilde Courteille, que nos tem apoiado desde sempre.

Desejo a todos uma estimulante e descontraída leitura, enriquecida pelos conhecimentos e informações presentes nos artigos aqui publicados.



Alexandre Pohl

Presidente da SBFoton

SUMÁRIO

3 Carta do Editor

4 Mensagem do Presidente

6 Notícias da SBFoton

8 Comunicação sem Fio em Luz Visível

16 Aleatoriedade quântica e sua aplicação em geração de números verdadeiramente aleatórios

23 Fibras ópticas de núcleo oco de nova geração e suas promissoras oportunidades

31 Evolução na medida de perdas pela técnica interferométrica para guias de ondas em vidros

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 mais de 100 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

Periodicamente, a SBFoton realiza eventos de forma presencial e remota. Destacam-se o encontro anual SBFoton Conference e os webinars. No caso dos eventos remotos, sua acessibilidade é aberta na [página](#).



Thorlabs Brasil agora oferece:

RECALIBRAÇÃO DE SENSORES!

Os sensores calibrados recebem um certificado no padrão NIST/PTB* com duração de 1 ano!



*Todos os nossos equipamentos usados para calibração são rastreáveis a padrões nacionais e internacionais (NIST e PTB) e são recalibrados periodicamente para manter os padrões exigidos.

THORLABS

PEÇA JÁ A SUA COTAÇÃO!

Nos envie um e-mail para brasil@thorlabs.com ou nos contate no telefone +55 (21) 2018 6490



Comunicação sem Fio em Luz Visível

Marcelo de Oliveira e Alexandre de Almeida Prado Pohl
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

RESUMO: Ao se estudar a evolução das comunicações vislumbra-se uma extensa área de conhecimentos e tecnologias. O envio de informação entre um transmissor e um receptor requer a alteração de alguma característica de uma onda eletromagnética, seja ela sua amplitude, sua frequência, sua fase ou mesmo polarização. O espectro eletromagnético usado em comunicações compreende uma larga faixa de frequências que se estende desde as ondas de rádio com frequências da ordem de quilohertz (kHz) até a faixa do infravermelho, com frequências da ordem de centenas de Terahertz (THz). Tais faixas são largamente exploradas para transmissão de sinais de rádio e TV, de telefonia móvel e de dados. A transmissão pode ser realizada através do ar sendo, neste caso, denominada sem fio, ou então por meio de cabos metálicos e ópticos.

ABSTRACT: When studying the evolution of communications, we can see a large and extensive knowledge area and technologies can be seen. Sending information between a transmitter and a receiver requires changing some characteristic of an electromagnetic wave, be it its amplitude, frequency, phase or even polarization. The electromagnetic spectrum used in communications comprises a wide range of frequencies that extends from radio waves with frequencies on the order of kilohertz (kHz) to the infrared range, with frequencies on the order of hundreds of Terahertz (THz). Such bands are widely used for transmitting radio and TV signals, mobile telephony and data. Transmission can be carried out through the air, in which case it is called wireless, or through metallic and optical cables.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.14890119>



INTRODUÇÃO

Ao se estudar a evolução das comunicações vislumbra-se uma extensa área de conhecimentos e tecnologias. O envio de informação entre um transmissor e um receptor requer a alteração de alguma característica de uma onda eletromagnética, seja ela sua amplitude, sua frequência, sua fase ou mesmo polarização. O espectro eletromagnético usado em comunicações compreende uma larga faixa de frequências que se estende desde as ondas de rádio com frequências da ordem de quilohertz (kHz) até a faixa do infravermelho, com frequências da ordem de centenas de Terahertz (THz). Tais faixas são largamente exploradas para transmissão de sinais de rádio e TV, de telefonia móvel e de dados. A transmissão pode ser realizada através do ar sendo, neste caso, denominada sem fio, ou então por meio de cabos metálicos e ópticos. O emprego de faixas de frequência mais elevadas permite aumentar significativamente a capacidade de transmissão de informação. As comunicações ópticas fazem uso do espectro na faixa do visível, que se estende de 400 a 790 THz (comprimentos de onda de 750 a 380 nanômetros), na qual o olho humano possui sensibilidade. Seu emprego mais bem sucedido ocorre na transmissão em fibras ópticas, que utiliza atualmente a faixa do infravermelho, entre 1300 e 1650 nm, em razão de sua baixa atenuação pelo meio, mas que no início de seu desenvolvimento utilizava fontes com emissão em 850 nm, próxima ao visível.

Atualmente verifica-se um crescimento exponencial da conectividade com emprego da tecnologia sem fio. Em 2023, estima-se que 5,7 bilhões de pessoas estarão usando dispositivos móveis. As redes móveis estão evoluindo para redes 5G de maior capacidade. No ambiente de acesso, as redes Wi-Fi, que operam nas frequências de 2,4 e 5,0 GHz, devem atingir uma saturação em sua capacidade. Assim, novas faixas de frequências e novas tecnologias devem ser exploradas. Este é o caso da utilização das comunicações sem fio em luz visível nas redes de acesso, como forma de complementar ou substituir as redes Wi-Fi existentes. A transmissão de sinais usando a luz não é nova. Em 1880, Graham Bell demonstrou a comunicação por voz usando a luz solar em um dispositivo conhecido como fotofone [1]. Contudo, somente após o desenvolvimento de fontes de estado sólido, LEDs (*Light Emitting Diodes*) e lasers, a partir de 1960, que a área tomou maior impulso. Em 1979, Gfeller and Bapst descreveram um modelo de



propagação para ambientes internos, cujos fundamentos são empregados ainda hoje [2]. Desde então diversos trabalhos foram publicados, demonstrando a transmissão de sinais com taxas de dados que ultrapassam uma dezena de Gigabits por segundo, entretanto a distâncias curtas [3]. Nos dias atuais, LEDs são cada vez mais usados na infraestrutura de iluminação, em razão de seu baixo custo e eficiência luminosa e podem, simultaneamente, ser empregados na transmissão de sinais [4]. Neste breve artigo descrevemos os principais aspectos desta relevante tecnologia.

FUNDAMENTOS

A. Canal de Comunicação

A comunicação sem fio em luz visível ocorre através do ar, um meio cujas propriedades estão sujeitas a alterações em razão de condições climáticas. Entretanto, em ambientes internos torna-se um meio estável e bem controlado. O sinal emitido por uma fonte deve ser preferencialmente recebido por um receptor em linha de visada, onde não haja obstáculos entre ambos, situação mostrada na Figura 1a. Entretanto, a transmissão através de forma indireta também pode ocorrer, como mostra a Figura 1b, embora com menor eficiência e sujeita a atrasos que são compensados no processo de recepção.

B. Fontes Ópticas

A emissão da radiação eletromagnética na faixa do visível por meio de diodos semicondutores ocorre através de dois mecanismos. Em um deles, emprega-se um diodo com emissão em 450 nm, correspondente à cor azul, cuja radiação incide sobre uma camada de fósforo. Baseado no efeito de luminescência, comprimentos de onda maiores são gerados por essa camada, cuja combinação com a radiação emitida pelo diodo em 450 nm resulta em um padrão de luz branca à saída do dispositivo. No outro mecanismo, são utilizados três diodos emissores, cada qual emitindo em comprimento de onda distinto, a saber: no azul (450 nm), verde (530 nm) e vermelho (630 nm), cuja combinação resulta na luz branca, formando um padrão conhecido como RGB (Red/Green/Blue).

Diodos emissores de luz são fontes lambertianas, onde a distribuição de intensidade segue uma função cosseno, com grande divergência dos raios luminosos. Sob o aspecto

de iluminação, tal característica é bastante útil, pois permite que a radiação seja distribuída sobre uma superfície maior, iluminando adequadamente um ambiente. Entretanto, sob o ponto de vista de comunicação, tal divergência reduz enormemente a intensidade do sinal que chega ao receptor, impactando a razão sinal-ruído (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*) e a performance do enlace de comunicação. Para minimizar tal efeito concentradores e lentes podem ser empregados do lado da transmissão e recepção, de forma a direcionar e convergir o feixe luminoso entre os elementos que compõe o enlace.

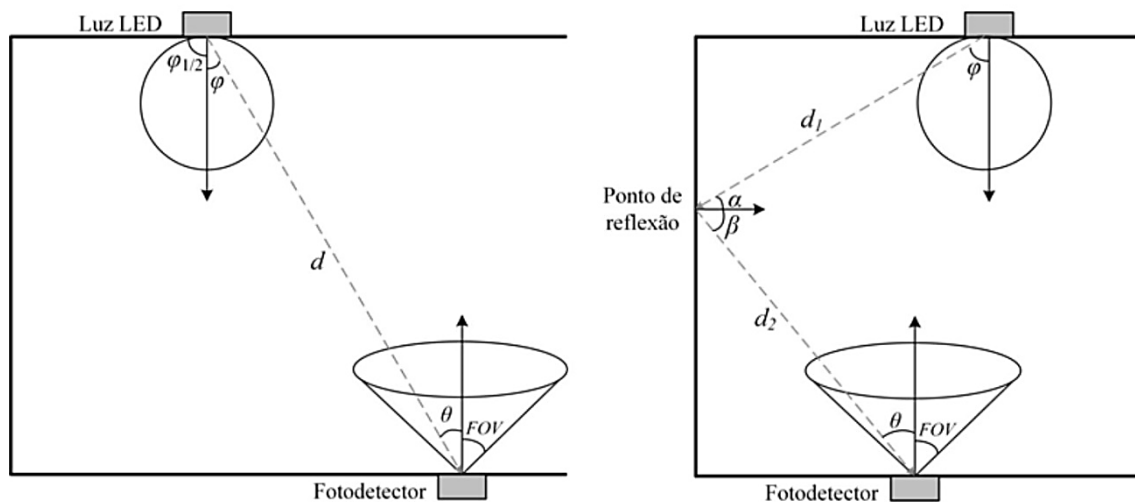


Figura 1 - Comunicação por LED: (a) linha de visada e (b) caminho indireto

C. Recepção

Na recepção são utilizados fotodiodos do tipo PIN ou APD, sendo esta última a que possibilita maior responsividade em função do ganho de avalanche obtido na estrutura semicondutora ao se aplicar uma tensão reversa maior entre os polos do dispositivo. A resposta de um fotodiodo empregado em comunicação sem fio em luz visível depende muito de suas características, que podem limitar a transmissão de dados. Por um lado, pode-se empregar fotodiodos com área efetiva maior, que permite coletar maior quantidade de energia luminosa, o que propicia um aumento da SNR. Por outro lado, uma área efetiva maior torna a resposta do dispositivo mais lenta, limitando a taxa de dados. Assim, um balanço entre resposta rápida e área efetiva deve ser encontrado.



Recentemente, esforços são dedicados a projetos de sistemas de recepção que possam atender às exigências de enlaces sem fio de maior alcance e maiores taxas.

D. Modulação e Desempenho

Os enlaces de comunicação sem fio em luz visível empregam técnicas diversas de modulação. A norma IEEE 802.15.7, em sua versão inicial, estabelece o uso das técnicas OOK (*On-Off Keying*), VPPM (*Variable Pulse Position Modulation*) e CSK (*Color Shift Keying*). Em particular, a técnica VPPM permite ajustar a posição e o tempo de duração do pulso dentro do intervalo de bit, o que permite a transmissão da informação sob o efeito de dimerização, isto é, em uma situação em que a intensidade da energia luminosa irradiada é diminuída. Atualmente empregam-se técnicas mais avançadas, como a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Modulation*), que permite maior robustez no enlace e maior capacidade de transmissão de dados. Entretanto, seu uso em LEDs comerciais, com largura de banda de 1,5 a 2 MHz, utilizados em iluminação, impõe um limite à capacidade de transmissão. Uma melhor solução seria o emprego de μ -LEDs, possibilitando taxas de Gigabit/s, mas que, entretanto, ainda não são empregados em iluminação [3].

E. Canal de Retorno

O canal de retorno diz respeito ao sinal transmitido do lado oposto em comunicação bidirecional. Isto implica em reproduzir o esquema de transmissão e recepção no sentido contrário. Entretanto, deve-se considerar que outros tipos de emissores podem ser usados, uma vez que em sentido contrário não há necessidade de se atender a demanda de iluminação. Portanto, LEDs não são a única opção. Ao mesmo tempo, dado que a taxa de transmissão usualmente é menor no sentido usuário-central, pode-se utilizar faixas de frequência de RF como as empregadas em redes WiFi. Ao mesmo tempo, há necessidade de se projetar dispositivos compactos, uma vez que do lado do usuário lida-se com dispositivos como tablets e smartphones.

DEMONSTRAÇÃO FUNCIONAL DE UM ENLACE

Na prática, ao se utilizar fontes LEDs, lida-se com um arranjo de elementos emissores dispostos em uma luminária, como mostra a Figura 2a, que apresenta 7 dispositivos montados em uma placa PCB (*Printed Circuit Board*). A este arranjo pode-se acoplar um concentrador, que permite conformar o feixe luminoso dentro de um menor ângulo de emissão. A Figura 2b mostra a simulação do padrão de distribuição de potência de um único LED. A Figura 3a mostra o arranjo experimental montado sobre uma bancada para transmissão em linha de visada. De um lado encontra-se a luminária e um bias-T, que é usado para acoplar o sinal DC que polariza o LED e o sinal modulante (AC) oriundo de um gerador de formas de onda arbitrária. No lado da recepção utilizou-se um módulo com um fotodiodo APD. Para transmissão um código de modulação específico é embarcado no gerador de formas de onda. A performance do enlace é verificada afastando-se o módulo de recepção em distâncias pré-fixadas até o limite em que se observa a degradação do sinal. A Figura 3b mostra a constelação obtida após a transmissão em modulação 16-QAM OFDM a uma distância de aproximadamente 2 m [5].

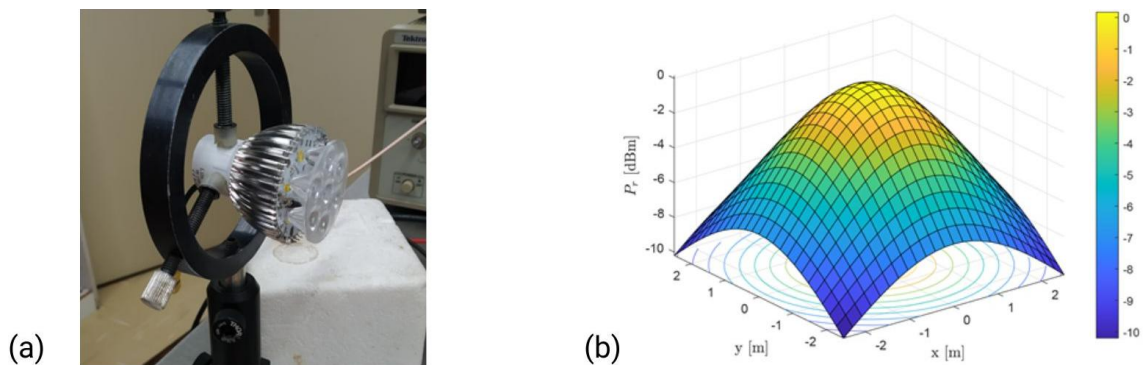
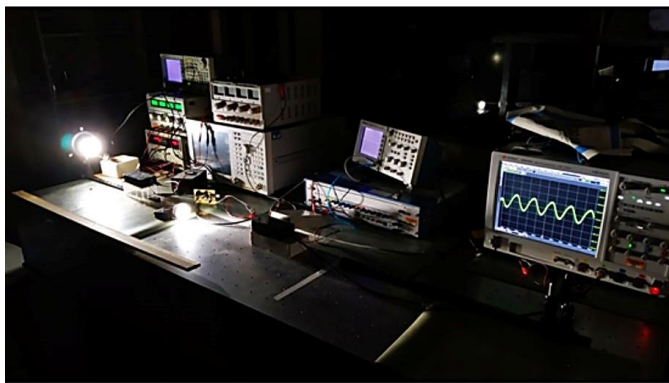


Figura 2 - (a) Luminária LED; (b) distribuição de potência em uma superfície.

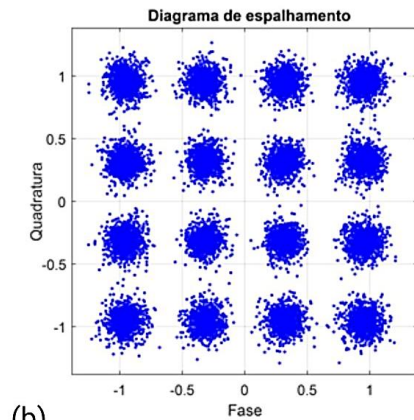
APLICAÇÕES

A comunicação sem fio em luz visível é usada em diversas aplicações, aproveitando-se da infraestrutura de iluminação com LEDs. A existência de um LED em um *smartphone* permite seu emprego, por exemplo, em um sistema de controle de acesso, onde se pode transmitir um código ou chave para uma unidade de processamento, liberando uma porta ou mesmo acesso a outro dispositivo. Em outra, aplicação, pode-se utilizar tal

comunicação em sistemas de posicionamento e localização em ambientes internos, onde luminárias LEDs fixas no teto atuam como pontos de referência para o cálculo da posição de um objeto no ambiente em aplicações de IoT. Em outro emprego, faróis de LEDs são usados para comunicação entre veículos e também com a infraestrutura de ruas e rodovias, podendo-se vislumbrar uma situação em que veículos estejam conectados e serem controlados pela gerência da rede. Em outra aplicação, a iluminação pública pode servir de ponto de acesso, permitindo que usuários tenham acesso à internet através de seus dispositivos. Em conclusão, esta tecnologia permitirá atender a crescente demanda por maiores taxas e conectividade, auxiliando na implantação da rede de Internet das Coisas (IoT).



(a)



(b)

Figura 3 - (a) Comunicação por luz visível; (b) constelação 16-QAM recebida.



REFERÊNCIAS

- [1] A. G. Bell, W. G. Adams, Tyndall, and W. H. Preece, "Discussion on the photophone and the conversion of radiant energy into sound," *J. Soc. Telegraph Eng.*, vol. 9, no. 34, pp. 375–383, 1880.
- [2] F. Gfeller and U. Bapst, "Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation," *Proc. IEEE*, vol. 67, no. 11, Nov. 1979, pp. 1474–86.
- [3] M. S. Islam et al, "Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexingbased visible light communication using a GaN violet micro-LED", *Photon. Res.*, v. 5, issue 2, A35-A43, 2017.
- [4] S. Vappangi and V. V. Mani, "Concurrent illumination and communication: A survey on Visible Light Communication," *Physical Communication*, vol. 33, pp. 90–114, 2019.
- [5] M. de Oliveira, "Comunicações por Luz Visível: análise de comunicação cooperativa e amplificação", Tese de Doutorado, CPGEI/UTFPR, 2022.



Aleatoriedade quântica e sua aplicação em geração de números verdadeiramente aleatórios

Muriel A. de Souza e Luiz Vicente Gomes Tarelho
Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)

RESUMO: A geração de números verdadeiramente aleatórios é algo que tem se tornado cada dia mais importante. Experimentos que utilizam física quântica têm sido largamente utilizados para essa finalidade, devido à sua aleatoriedade intrínseca. O presente artigo faz uma comparação entre a física clássica e a física quântica quanto às suas imprevisibilidades, fornece uma explicação sobre superposição de estados quânticos e comenta a utilização desse “colapso” na função de onda para a geração de números aleatórios, uma das formas utilizadas para a geração de números aleatórios quânticos.

ABSTRACT: The true generation of random numbers is something that has become increasingly most important day. Experiments that use quantum physics have been widely used for this purpose, due to its intrinsic randomness. THE This article makes a comparison between classical physics and quantum physics in terms of its unpredictability, providing a explanation about superposition of states quantum and comments on the use of this in the wave function “collapse” for generation of random numbers, one of the ways used to generate quantum random numbers.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.14890174>



INTRODUÇÃO

Em nosso cotidiano, muitas coisas são atribuídas ao acaso e, por isso, são chamadas de aleatórias. A aleatoriedade tem diversas aplicações que vão desde jogos como loteria, cartas de baralho, cassinos, até simulações de Monte Carlo, modelagem de sistemas complexos, como na meteorologia, e chaves criptográficas. Números aleatórios são usados diariamente em inúmeras atividades, como em *CAPTCHAs* antes de *login*, ou quando são geradas senhas únicas para liberar o uso de determinado aparelho, por exemplo. Um número é considerado aleatório quando, se extraído de um conjunto de números possíveis, todos os números deste conjunto têm a mesma probabilidade de serem selecionados [1]. Ou seja, os números devem obedecer ao princípio da uniformidade e independência, o que significa que todos os valores devem ser equiprováveis e não correlacionados [2]. Todos os mecanismos de segurança em informática, desde a criptografia, senhas de acesso, segurança de transações bancárias pela internet, etc., dependem da geração de números aleatórios. O grande problema está em como gerar números que sejam realmente aleatórios. Na prática, é usual a utilização de números chamados “pseudoaleatórios”, que se aproximam de um número realmente aleatório, mas possuem vulnerabilidades no processo de produção. Ou seja, se um hacker obtiver informação suficiente e repetir o mesmo processo, poderá encontrar esse número “aleatório” [3], quebrando a segurança do processo. Em um computador, por exemplo, é impossível gerar algo que seja completamente imprevisível, por ser um dispositivo determinístico. Por isso, recorre-se ao mundo físico para realizar medições que se comportam aleatoriamente e, com isso, possam gerar números aleatórios. Mas, quais são os processos físicos verdadeiramente aleatórios? É esse assunto que o presente artigo mostra: como utilizar a física para a geração de números verdadeiramente aleatórios.

FÍSICA CLÁSSICA X FÍSICA QUÂNTICA

Quando se trabalha com medições no contexto da física clássica, entende-se que certa propriedade da natureza possui um valor numérico. Por esse motivo ela é considerada realista e determinística: porque acredita que as partículas por si só possuem características bem definidas e seus processos podem ser calculados e



previstos através de suas condições iniciais. A imprevisibilidade encontrada em sistemas clássicos complexos de muitos corpos interagindo, por exemplo, implica em indeterminismo, mas não implica em aleatoriedade, porque as quantidades mensuráveis podem ser determinadas classicamente a cada momento utilizando medições apropriadas, maiores resoluções, ajuda de computadores etc. O surgimento da mecânica quântica revolucionou a física no início do século passado e foi desenvolvida para calcular e demonstrar fenômenos que não tinham explicação na visão da física clássica. O seu desenvolvimento provocou uma quebra de paradigma ao não contemplar o realismo e o determinismo, pois na mecânica quântica não se pode afirmar o estado de um sistema sem antes realizar uma medição sobre ele. Quando se realiza uma medição o resultado é totalmente imprevisível, porque as propriedades dos objetos são incertas e só podem ser descritas probabilisticamente por uma função de onda. Para entender melhor esses argumentos, é necessário entender sobre superposição de estados.

SUPERPOSIÇÃO DE ESTADOS

Superposição, matematicamente falando, refere-se a uma combinação linear de inúmeros estados simultâneos. Para explicar essa superposição, seu caráter quântico e aleatoriedade, imagine um sistema composto por setas. Você preparou esse sistema com todas as setas apontando para a direita. Se você perguntar para o sistema se as setas estão para a direita ou para a esquerda, sua resposta será 100% para a direita. Porém, se você perguntar para cada seta se ela é para cima ou para baixo, sua resposta será 50% para cima e 50% para baixo (figura 1). Isso porque setas apontadas para a direita podem ser descritas como uma superposição de 'para cima' e 'para baixo' [4]. 14 Agora você prepara outro estado com as respostas obtidas anteriormente, em que metade das setas apontam para cima e metade das setas apontam para baixo. Se você refizer a pergunta, você terá o mesmo resultado do sistema anterior: 50% 'para cima' e 50% 'para baixo' (figura 2). Ou seja, para dois sistemas diferentes, tem-se o mesmo resultado [4].

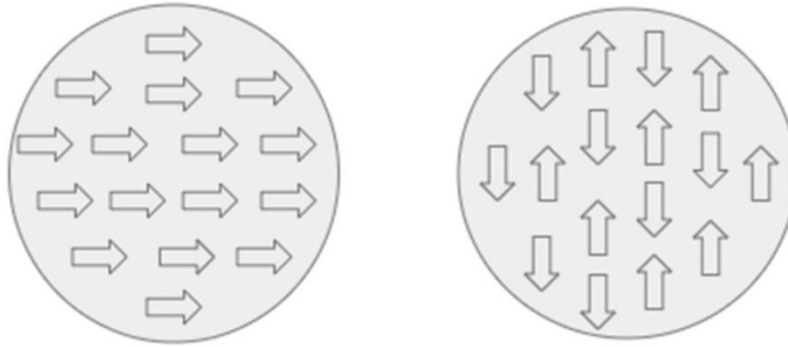


Figura 1 – Esquerda: sistema inicial, 100% das setas para a direita; direita: sistema após ser interrogado, com 50% das setas ‘para cima’ e 50% das setas ‘para baixo’.

Porém, o que difere esses sistemas? O segundo caso pode ser pensado de acordo com o realismo da física clássica: o sistema desde o início possui determinada característica que independe do observador. Uma medição apenas revela informações desse objeto, mas não altera o sistema. O mesmo não acontece no primeiro caso, em que as setas não estão ‘para cima’ ou ‘para baixo’, mas em uma superposição desses dois estados. E, ao realizar a medição, houve alteração no sistema. Isso é o que acontece na mecânica quântica. Quando você tem uma superposição de estados, você não consegue ter um resultado determinístico, o que você tem são funções de probabilidade que descrevem o estado. Houve o acréscimo de um sujeito, o observador, que, ao realizar a medição, provoca uma perturbação no sistema, o chamado “colapso da função de onda”. No caso do exemplo acima, a medição seria a resposta à pergunta. No sistema de setas para a direita, ao perguntar se elas estavam ‘para cima’ ou ‘para baixo’, a resposta foi uma ou outra. Essa superposição deixou de existir. Fisicamente falando, na quântica não se tem um único estado, mas sim uma função de onda de muitos autoestados e, ao realizar a medição, ela provoca um “colapso” nessa função de onda, pois os muitos autoestados se desdobram em um único autoestado específico relacionado a essa medição. Ou seja, tem-se uma perturbação provocada pelo observador no sistema que está sendo observado.

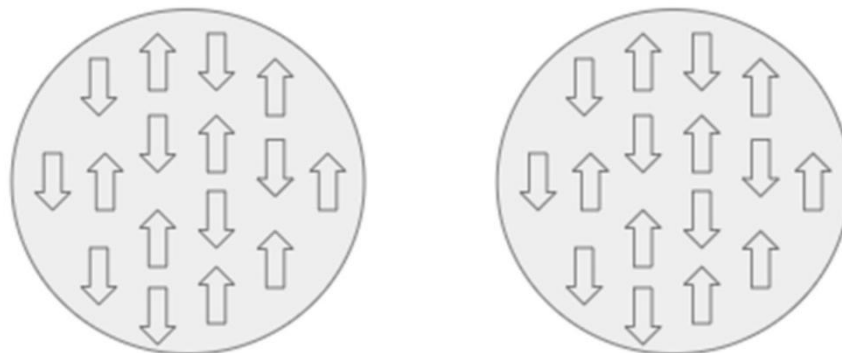


Figura 2 – Esquerda: sistema inicial, com 50% das setas ‘para cima’ e 50% das setas ‘para baixo’; direita: sistema após ser interrogado, igual ao sistema inicial.



UTILIZANDO A SUPERPOSIÇÃO QUÂNTICA PARA A GERAÇÃO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS QUÂNTICOS

Uma vez que a mecânica quântica é intrinsecamente aleatória, ela tem sido amplamente estudada para a geração de números verdadeiramente aleatórios. Já existem diversos geradores de números aleatórios quânticos (QRNG) implementados, e os sistemas que utilizam fótons têm vantagem na geração de bits aleatórios devido à existência de inúmeros componentes ópticos de alta qualidade e fácil manuseio [5]. Basicamente um QRNG inclui uma fonte de entropia para gerar estados quânticos bem definidos e um sistema de medição correspondente [6]. Uma forma bastante utilizada para produzir QRNG ópticos é utilizando um sistema quântico em superposição dos estados básicos, em que, após a medição, o sistema colapsaria para um dos estados básicos [6]. Isso pode ser feito através da medição de um fóton que pode estar em superposição de estados de polarização ou de caminho. Em computação, esse fóton em estado de superposição é chamado de *qubit*, que corresponde a uma superposição das bases computacionais $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Um *qubit* é a base da computação quântica: enquanto um bit na computação clássica corresponde a 0 ou 1, um *qubit* é uma superposição desses valores. A medição de um *qubit* produzirá um dos dois estados possíveis, ou seja, cada medição irá gerar um bit aleatório.

CONCLUSÃO

Uma vez que a mecânica quântica é intrinsecamente aleatória, ela pode ser utilizada para geração de números aleatórios, conhecidos como números verdadeiramente aleatórios, que têm se tornado cruciais com o advento da computação quântica, pois a criptografia, toda a segurança de transações bancárias pela internet etc., dependem da geração desses números. Diversos experimentos têm sido desenvolvidos utilizando a mecânica quântica para tal e nesse artigo é destacado o uso da superposição. Estados em superposição quântica são representados por uma função de onda de autoestados e que, ao realizar uma medição, se desdobra em um único autoestado específico e aleatório. Esse é um dos princípios que pode ser utilizado para gerar números aleatórios, em que os estados superpostos são *qubits*, que são superposições das bases computacionais $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, e que, ao serem medidos, irão colapsar em $|0\rangle$ ou $|1\rangle$, gerando assim, sequências de bits aleatórios.



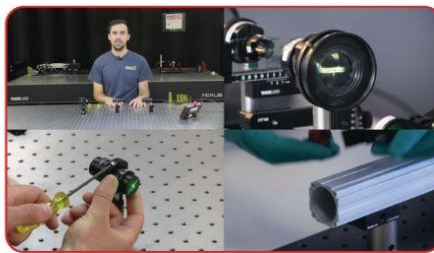
REFERÊNCIAS

- [1] [1] GUIDE, S., HAAHR, M., & CHAITIN, G. J. (s.d.). RANDOM.ORG - Introduction to Randomness and Random Numbers. <https://www.random.org/randomness/>
- [2] MANNALATH, V., MISHRA, S., & PATHAK, A. (outubro de 2022). A Comprehensive Review of Quantum Random Number Generators: Concepts, Classification and the Origin of Randomness. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.00261>
- [3] PIRONIO, S., ACÍN, A., & MASSAR, S. (2010). Random numbers certified by Bell's theorem. *Nature*, 464, 1021–1024. <https://doi.org/10.1038/nature09008>
- [4] GERSHIN, T. Quantum Computing: you know it's cool, now find out how it works IBM ResearchBlog https://www.ibm.com/blogs/research/2017/09/qc-how-it-works/?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=superposition
- [5] MA, X., YUAN, X., CAO, Z. et al. Quantum random number generation. *npj Quantum Inf* 2, 16021 (2016). <https://doi.org/10.1038/npjqi.2016.21>
- [6] MANNALATH, V., MISHRA, S., & PATHAK, A. A Comprehensive Review of Quantum Random Number Generators: Concepts, Classification and the Origin of Randomness. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.00261>



Insights no nosso site –
sempre novos vídeos com dicas

Legendas em Português!



Email: brasil@thorlabs.com | Vendas: +55 (21) 2018 6490 | www.thorlabs.com

OMN 2023

International Conference
On Optical MEMS & Nanophotonics

**SBFOTON
CONFERENCE
NCE 2023**



SBFoton
International Optics and Photonics Conference, IOPC

International Optics and Photonics Conference, IOPC

LIGHTING A SMART DIGITAL FUTURE

CAMPINAS

Unicamp, Convention Center
July 30th – August 3rd





Fibras ópticas de núcleo oco de nova geração e suas promissoras oportunidades

Jonas H. Osório e Cristiano M. B. Cordeiro
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
jhosorio29@gmail.com cmbc@ifi.unicamp.br

RESUMO: Nos anos 1990, o conceito de se utilizar fibras ópticas micro-estruturadas revolucionou o campo de atuação desta família de guias de onda. À época, pôde-se demonstrar que a existência de buracos de ar adequadamente dispostos na seção transversal da fibra oferecia um controle de suas propriedades a nível sem precedentes, motivando a realização de uma ampla gama de aplicações inacessíveis a partir do uso de fibras ópticas convencionais. Tais aplicações abrangeram diversas áreas em fotônica, a exemplo do campo da óptica não-linear e o de sensoriamento.

ABSTRACT: In the 1990s, the concept of using micro-structured optical fibers revolutionized the field of action of this family of waveguides. At the time, it was possible to demonstrate that the existence of properly arranged air holes in the cross-section of the fiber offered control of its properties at an unprecedented level, motivating the realization of a wide range of applications inaccessible from the use of conventional optical fibers. Such applications covered several areas in photonics, such as the field of nonlinear optics and sensing.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.14890269>



Nos anos 1990, o conceito de se utilizar fibras ópticas microestruturadas revolucionou o campo de atuação desta família de guias de onda. À época, pôde-se demonstrar que a existência de buracos de ar adequadamente dispostos na seção transversal da fibra oferecia um controle de suas propriedades a nível sem precedentes, motivando a realização de uma ampla gama de aplicações inacessíveis a partir do uso de fibras ópticas convencionais. Tais aplicações abrangeram diversas áreas em fotônica, a exemplo do campo da óptica não-linear e o de sensoriamento.

Nesse contexto, uma das implicações mais importantes deste desenvolvimento consistiu na possibilidade de se guiar luz por fibras de núcleo oco com baixos níveis de perda. A proposição deste novo grupo de fibras, historicamente chamadas de fibras de cristal fotônico de núcleo oco, ou *hollow-core photonic crystal fibers* (HCPCFs), remonta ao ano de 1995 e representa uma quebra de paradigmas para a área de fibras ópticas.

Guiar luz através de um núcleo oco com baixa perda inspirou grande expectativa da comunidade científica no sentido da obtenção de fibras potencialmente capazes de superar as limitações das fibras tradicionais, tais como a transmissão de feixes a níveis de potência não toleráveis por fibras de núcleo sólido. Outra limitação a ser superada pelo uso das fibras de núcleo oco seria a transmissão de feixes com comprimentos de onda tais que os meios sólidos fossem virtualmente opacos. Igualmente, especulou-se sobre a possibilidade de as HCPCFs poderem atingir níveis de perda inferiores àqueles restringidos pelos fundamentais processos de espalhamento nos materiais sólidos.

A primeira geração das HCPCFs, no entanto, ao terem seu guiamento baseado no efeito de *bandgap* fotônico, não pôde corresponder a tais expectativas devido a fatores como a forte superposição entre o modo óptico guiado no núcleo e a microestrutura da fibra, a existência de modos de superfície e o espalhamento de luz devido à rugosidade das membranas que definem o núcleo. Em 2007, entretanto, um novo mecanismo de guiamento, cunhado de acoplamento inibido [1], foi identificado no contexto das HCPCFs, inicialmente em uma estrutura chamada de Kagomé (Fig. 1a). Tal mecanismo se baseia em uma robusta minimização do acoplamento entre os modos de núcleo e os modos suportados pela microestrutura (casca) da fibra, que é atingida ao se reduzir a sobreposição espacial e ao se obter um forte desacordo de fase entre tais modos. Do ponto de vista prático, o espectro de transmissão de tais fibras intercala intervalos de baixa perda (minimização entre os acoplamentos, conforme apontado acima) e regiões

de maior atenuação devidas a ressonâncias na microestrutura (cujas posições espectrais dependem das espessuras dos elementos que a compõem).

A compreensão do mecanismo de transmissão de luz pelas HCPCFs permitiu demonstrar o amplo potencial de redução de perdas das HCPCFs com guiamento por acoplamento inibido ante àquelas com guiamento pelo efeito de *bandgap* fotônico e, por conseguinte, motivou nova esperança sobre as potencialidades das HCPCFs perante as fibras ópticas tradicionais, principalmente depois da introdução do conceito de curvatura negativa (i.e., a modificação do contorno do núcleo de forma que este apresente protuberâncias projetadas em direção ao centro da fibra – Fig. 1b) que, ao prover uma acentuada redução do recobrimento espacial entre os modos de núcleo e casca (e, logo, do acoplamento entre estes), permitiu obter uma drástica redução de perdas [2].

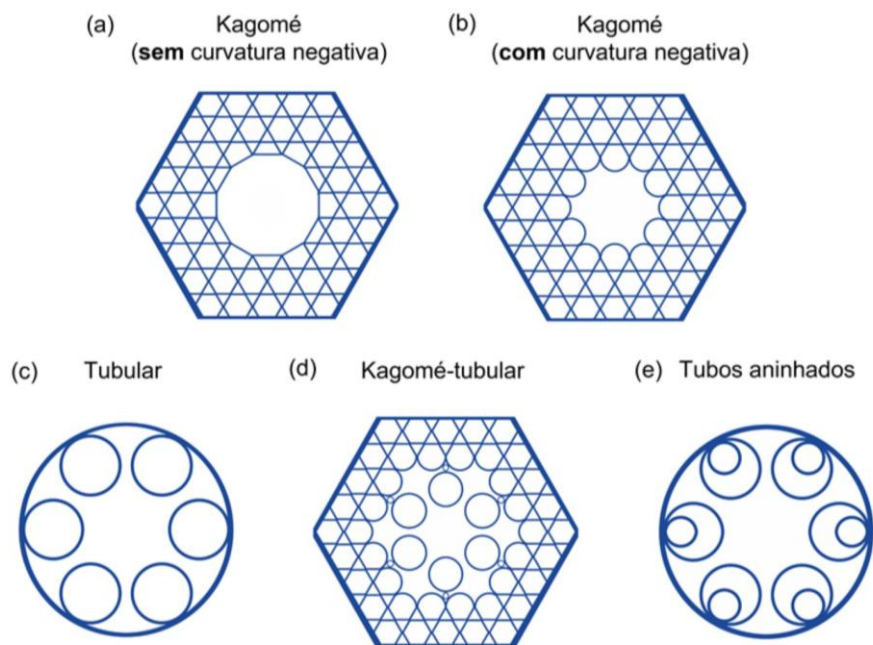


Figura 1 – *Designs* de HCPCFs. (a) Fibra Kagomé sem curvatura negativa, (b) fibra Kagomé com curvatura negativa, (c) fibra tubular, (d) fibra híbrida Kagomé-tubular e (e) fibra com tubos aninhados.

Em 2011, uma nova arquitetura de fibra com guiamento por acoplamento inibido (por vezes identificada como fibras antirressonantes), a fibra tubular (Fig. 1c), foi proposta. Tal estrutura, dotada de notória simplicidade, é formada por uma coleção de tubos que não se tocam e que definem o núcleo da fibra. A simplicidade do design das fibras tubulares faz com que estas sejam muito atrativas do ponto de vista de sua

fabricação. Ademais, cálculos atestam seu grande potencial para proverem perdas ultra baixas, especialmente em comprimentos de onda curtos, a saber, no espectro visível e ultravioleta. O grande interesse sobre as fibras tubulares produziu, portanto, acentuada dedicação por parte da comunidade internacional no sentido da otimização de suas performances. Notoriamente, em 2019, pôde-se demonstrar fibras tubulares com, virtualmente, o mesmo nível de perdas do que fibras convencionais no espectro visível [3] e, em 2022, pôde-se estabelecer, também a partir do uso de fibras tubulares, novos valores de atenuação recordes para toda a área de fibras ópticas com guiamento no espectro visível e ultravioleta [4]. A Fig. 2a reproduz os resultados reportados em [4], que são notadamente inferiores ao limite definido pelo espalhamento Rayleigh na sílica (linha tracejada), uma restrição fundamental à diminuição de perdas em fibras sólidas. As fibras tubulares (Fig. 1c), no entanto, apesar de se consolidarem atualmente como as fibras ópticas com menor perda no espectro visível e ultravioleta, apresentam perdas relativamente altas na região do infravermelho (dezenas de decibéis por quilômetro, dB/km, tipicamente). Assim, para se obter melhores níveis de perdas no infravermelho, outras arquiteturas de HCPCFs podem ser utilizadas, ao passo que são capazes de prover maior confinamento de luz nesta região do espectro. Exemplos de tais arquiteturas são apresentadas na Fig. 1d e 1e, a saber, a fibra híbrida Kagomé-tubular [5], que tem a capacidade de fornecer uma operação efetivamente monomodal associada a baixos níveis de perda (um binômio deveras desafiador no âmbito das HCPCFs), e a fibra com tubos aninhados [6], que atualmente rivaliza os níveis de atenuação de fibras convencionais na região do infravermelho, como se observa na Fig. 2b.

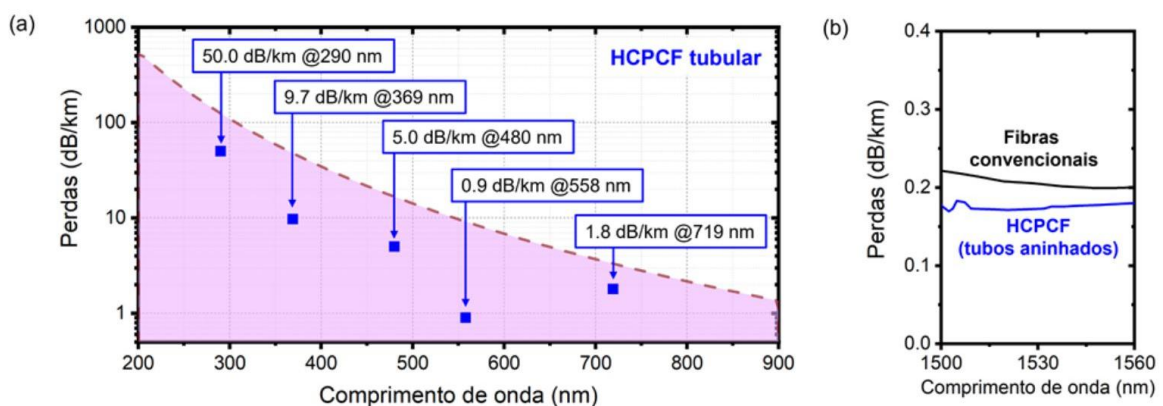


Figura 2 – (a) Novos valores recordes para atenuação de fibras ópticas com guiamento no espectro visível e ultravioleta obtidos a partir da utilização de fibras tubulares [4]. Linha tracejada: limite de espalhamento Rayleigh da sílica. (b) Resultados de atenuação recordes para HCPCFs com tubos aninhados e perdas de fibras tradicionais no infravermelho (gráfico adaptado de [6]).

Assim, constata-se que os expressivos avanços da tecnologia das HCPCFs hoje consolidam esta família de fibras como tecnologia habilitadora para os novos desenvolvimentos em fotônica. Tais fibras tornam-se, portanto, elementos constituintes e/ou atuam como plataforma para uma ampla gama de aplicações que abrangem desde a obtenção de fontes ópticas e sensores até a construção de dispositivos para entrega de feixes de alta potência e novas demonstrações em telecomunicações. A Fig. 3 ilustra as oportunidades de aplicações das HCPCFs a serem comentadas nos parágrafos que seguem. Conforme ilustrado na Fig. 3, a realização de fontes ópticas consiste em uma importante área de aplicação das HCPCFs, tendo sido, de fato, uma das primeiras vertentes de sua utilização. A oportunidade de se utilizar HCPCFs para a obtenção de fontes ópticas é beneficiada pelo fato de a microestrutura das HCPCFs ser capaz de abrigar moléculas de gases que permitem que, via interação com feixes laser, efeitos não-lineares sejam explorados. Assim, pode-se obter fontes ópticas baseadas em pentes de frequência Raman [7], fontes do tipo *dual wavelength* (emissão em dois comprimentos de onda pré-selecionados) [7] e fontes supercontínuo [8].

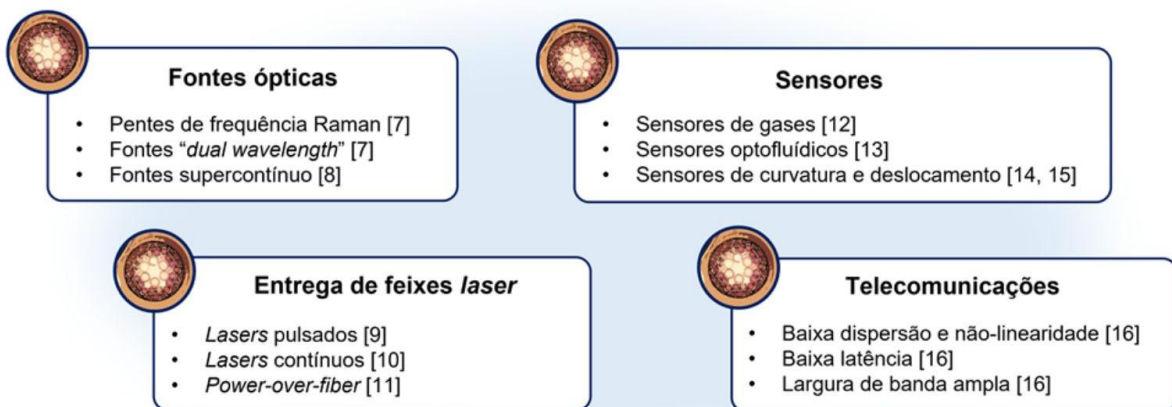


Figura 3 – Oportunidades de aplicações utilizando HCPCFs e relacionadas aos campos de fontes ópticas, entrega de feixes laser, sensores e telecomunicações.

Ademais, como as HCPCFs com guiamento por acoplamento inibido são capazes de transportar luz com mínima interação com a microestrutura da fibra, tal classe de fibras emerge como uma plataforma muito interessante para atividades de entrega de feixes de alta potência. Assim, pôde-se demonstrar excelentes performances das HCPCFs para o transporte e entrega de feixes lasers tanto no regime pulsado (a níveis de potência



de pico da ordem de dezenas de gigawatts [9]) quanto contínuo (com potências da ordem de quilowatts [10]).

Muito recentemente, nosso laboratório no Instituto de Física da UNICAMP (Laboratório de Fibras Especiais & Sensores Ópticos, LaFE, que tem estudado fibras ópticas não convencionais desde 2008 e que possui interesse na fabricação e pós-processamento destes guias de onda, além do estudo e desenvolvimento de sensores e dispositivos ópticos), juntamente com colegas do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações, CPQD, e da Universidade de Limoges, propôs a utilização das HCPCFs como plataforma para *Power-over-Fiber* [11], tecnologia que faz uso da potência óptica transmitida pela fibra para ativar circuitos eletrônicos. Esta nova vertente de aplicação das HCPCFs se apresenta como proposta interessante para os próximos desenvolvimentos na área de *Power-over-Fiber*, visto que as HCPCFs poderão, potencialmente, permitir obter novos sistemas capazes de superar as restrições de potências ópticas utilizáveis em arranjos tradicionais.

Outrossim, as HCPCFs despontam como promissora plataforma para a construção de sensores. Dada a estrutura alveolar de sua microestrutura e, portanto, a possibilidade preenchê-la com gases e líquidos, o estudo de sensores de gases e optofluídicos se mostra deveras atrativo, haja vista que a fibra, ao atuar simultaneamente como guia de onda e microrreservatório, pode prover uma efetiva sobreposição entre a luz guiada e o gás/líquido por ela abrigado por comprimentos de interação significativamente superiores aos acessíveis em configurações em espaço livre. Sensores de gases baseados em HCPCFs permitem, por exemplo, a detecção de moléculas ao nível de partes-por-trilhão [12]. No âmbito da optofluídica, as HCPCFs permitem a realização de medidas a partir de técnicas de espectroscopia de absorção e Raman, por exemplo [13].

Para além das oportunidades em sensoriamento de gases e líquidos, as possibilidades da utilização de HCPCFs na área de sensoriamento são vastas e relativamente ainda pouco exploradas. Nesse sentido, recentemente nossa equipe na UNICAMP, juntamente com colegas no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) e Universidade de Limoges, propôs e demonstrou novas rotas de aplicação das HCPCFs para o monitoramento de variações de curvatura e deslocamento [14, 15]. Tais novas



demonstrações sinalizam um campo com forte potencial de expansão e de geração de resultados de interesse.

Finalmente, pode-se também mencionar o também recente aquecimento das atividades relacionadas às HCPCFs em telecomunicações que, de fato, muito se deve à expressiva redução dos níveis de perda obtida nos últimos anos. Alia-se aos níveis de perda ultrabaixos recentemente reportados, o fato de as HCPCFs possuírem vantagens no sentido de permitirem, naturalmente pelo guiamento acontecer em espaço vazio, o desenvolvimento de novos sistemas de telecomunicações com menores níveis de latência, dispersão e não-linearidade, bem como arranjos com, potencialmente, maior largura de banda [16]. Enfim, pode-se hoje reconhecer as HCPCFs como verdadeira tecnologia habilitadora para os novos avanços em óptica e fotônica, haja vista o avançado grau de maturidade atingido pelas ferramentas de *design* das microestruturas, pelos processos de fabricação e pelas atividades visando aplicações. Tendo-se em vista tal cenário, é possível vislumbrar um futuro muito promissor para as HCPCFs, tanto do ponto de vista de ciência básica quanto aplicada, que certamente impactará as novas realizações em áreas que vão desde o campo de fontes ópticas e sensores até oportunidades em telecomunicações.

AGRADECIMENTOS

J. H. O. agradece à FAPESP (processo 2021/13097-9) e C. M. B. C. agradece ao CNPq (processo 309989/2021-3) pelo apoio financeiro.



REFERÊNCIAS

- [1] F. Couny, F. Benabid, P. J. Roberts, P. S. Light, M. G. Raymer, "Generation and photonic guidance of multi-octave optical frequency combs," *Science* 318, 5853, 1118-1121 (2007).
- [2] Y. Y. Wang et al., "Low loss broadband transmission in hypocycloid-core kagome hollowcore photonic crystal fiber," *Optics Letters* 36, 669-671 (2011).
- [3] M. Chafer et al., "1-km hollow-core fiber with loss at the silica Rayleigh limit in the green spectral region," *IEEE Photonics Technology Letters* 31, 9 (2019). K.C. Kao, G.A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies", *Proc.of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 113, No. 7, pp. 1151 – 1158, Jul 1966.
- [4] J. H. Osório et al., "Hollow-core fibers with reduced surface roughness and ultralow loss in the short-wavelength range," *Nature Communications* 14, 1146 (2023).
- [5] F. Amrani et al., "Low-loss single-mode hybrid lattice hollow-core photonic-crystal fibre," *Light: Science and Applications* 10, 7 (2021).
- [6] G. T. Jasion et al., "0.174 dB/km hollow core double nested antiresonant nodeless fiber (DNANF)," *Optical Fiber Communication Conference 2022*, paper Th4C.7.
- [7] M. Chafer et al., "Near- and middle-ultraviolet reconfigurable Raman source using a record-low UV/visible transmission loss inhibited-coupling hollow-core fiber," *Optics & Laser Technology* 147, 107678 (2022).
- [8] A. I. Adamu et al., "Deep-UV to mid-IR supercontinuum generation driven by mid-IR ultrashort pulses in a gas-filled hollow-core fiber," *Scientific Reports* 9, 4446 (2019).
- [9] B. Debord et al., "2.6 mJ energy and 81 GW peak power femtosecond laser-pulse delivery and spectral broadening in inhibited coupling Kagome fiber," *CLEO:2015*, paper STh4L.7.
- [10] H. C. H. Mulvad et al., "Kilowatt-average-power single-mode laser light transmission over kilometre-scale hollow-core fibre," *Nature Photonics* 16, 448-453 (2022).
- [11] J. H. Osório et al., "Hollow-core photonic crystal fibers for Power-over-Fiber systems," *Optical Fiber Technology* 73, 103041 (2022).
- [12] P. Zhao et al., "Mode-phase-difference photothermal spectroscopy for gas detection with an anti-resonant hollow-core optical fiber," *Nature Communications* 11, 847 (2020).
- [13] E. Miele et al., "Hollow-core optical fibre sensors for operando Raman spectroscopy investigation of Li-ion battery liquid electrolytes," *Nature Communications* 13, 1651 (2022).
- [14] W. M. Guimarães, C. M. B. Cordeiro, M. A. R. Franco, J. H. Osório, "Angle-resolved hollow-core fiber curvature sensing approach," *Fibers* 9, 11, 72 (2021).
- [15] J. H. Osório et al. "Hollow-core fiber-based speckle displacement sensor," *arXiv:2211.10217* (2022).
- [16] P. Poggiolini, F. Poletti, "Opportunities and challenges for long-distance transmission in hollow-core fibers," *J. Light. Technol.*, 40, 6, 1605- 1616 (2022)"Nortel unveils 40/100G optical system, announces new customers," *IEEE Communications Society*, [Online]. Available: <https://www.comsoc.org/node/19246> [Acessado em 27/09/2023].



Evolução na medida de perdas pela técnica interferométrica para guias de ondas em vidros

¹Paulo Henrique Dias Ferreira, ¹Vinicius Tribuzi, ¹Filippo Ghiglieno, ²Roberto Osellame,

¹Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

²Istituto di Fotonica e Nanotecnologie (IFN) – Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

RESUMO: A produção de dispositivos fotônicos cresceu exponencialmente nas últimas duas décadas devido às diversas possibilidades de aplicações em diferentes áreas do conhecimento humano, seja em computação quântica, sensoriamento, microfluídica, dentre outros [1].

ABSTRACT: The production of photonic devices has grown exponentially in the last two decades due to the diverse possibilities of applications in different areas of human knowledge, whether in quantum computing, sensing, microfluidics, among others [1].

<http://doi.org/10.5281/zenodo.14890315>



A produção de dispositivos fotônicos vem tendo um crescimento exponencial nas últimas duas décadas devido as diversas possibilidades de aplicações em diferentes áreas do conhecimento humano, seja em computação quântica, sensoriamento, microfluídica, dentre outros [1]. Um dos motivos para esse rápido desenvolvimento é em virtude do grande avanço nos processos de fabricação. Dentre as diversas técnicas utilizadas em vidros, destaca-se uma conhecida como “*Microfabricação via Laser de Femtossegundos (fs)*” ($1 \text{ fs} \equiv 10^{-15}$ do segundo, representa a duração do pulso quando a luz pisca por um quintilionésimo de segundo), que permite o processamento direto em uma etapa única, sem necessidade de máscara (como na litografia), para fabricar guias de onda ópticos tridimensionais permanentes de alta qualidade dentro do volume de uma amostra vítrea [2, 3]. Pode-se atualmente produzir facilmente sistemas ópticos com várias geometrias e propriedades atraentes que os tornam aplicáveis, por exemplo, como sensores de Bragg, interferômetros, acopladores direcionais, divisores de potência, conversores de frequência, moduladores, etc [4].

No entanto, uma etapa fundamental é necessária a todos os dispositivos produzidos: a caracterização óptica. Dentre as mais diversas caracterizações, é fundamental medir as perdas por propagação da luz. Em particular, as guias de onda monomodo são o que chamamos de “*building blocks*” para os dispositivos fotônicos [5-8]. Ou seja, elas são componentes fundamentais de circuitos ópticos integrados para muitas das aplicações mencionadas, porém são particularmente sensíveis as perdas dos guias de onda podendo comprometer o bom funcionamento do sistema como um todo. Na verdade, a atenuação, ou perdas provocadas pela propagação, que um dispositivo óptico integrado causa ao sinal representa verdadeiramente uma de suas características mais importantes, sendo um fator de qualidade crucial para otimizar as performances. Desta forma, para criar circuitos ópticos integrados de alta qualidade, é essencial conhecer o coeficiente de atenuação da luz no guia de onda α , que pode ser apresentado em cm^{-1} ou em dB/cm . Logo, alguns métodos foram desenvolvidos e adaptados para medir perdas ópticas em guias de onda monomodo em materiais vítreos.

Pode-se obter o coeficiente de atenuação pela coleta direta de luz espalhada ou por acoplamento de um prisma. Estes dois métodos, no entanto, não funcionam muito bem para guias com baixas perdas. Para isso, utiliza-se normalmente outros três métodos: (1) *cutback*; (2) métodos de transmissão e (3) medição de cavidade Fabry-



Perot (FP) (uma cavidade FP por efeito da interferência através de múltiplas reflexões nas interfaces gera na saída uma intensidade da luz modulada em função do comprimento de onda ou alguma modificação externa, como fonte termal ou elétrica) [9-11]. Embora o método (1), onde a perda de propagação é avaliada pelo contraste de duas potências ópticas antes e depois do corte do guia de onda, seja preciso, existe um problema inevitável: a dificuldade em manter uma eficiência de acoplamento com a guia de onda constante nessas medições. Além disso, esta técnica de medição é prejudicial e irreversível devido ao processo de corte, ou seja, o dispositivo que passar por essa caracterização não pode ser reutilizado. O método (2), também conhecido como *end-coupling*, permite avaliar a perda de propagação de guias de onda sem a necessidade de estruturas adicionais adjacentes à guia de onda na amostra (como anéis ressonadores ou revestimentos ópticos (*coating*) nas superfícies). No entanto, pode ser um desafio alcançar o alinhamento ideal para fornecer os melhores resultados. Além disso, quando a luz coerente é usada, alguns efeitos ressonantes desfavoráveis podem surgir entre o guia de onda da superfície de entrada fechada e a fibra, resultando em uma modulação da potência transmitida e comprometendo a precisão da medição do método de acoplamento final. Esses efeitos ressonantes podem ser eliminados com o uso de líquidos de imersão (*index-matching fluids*) entre a amostra e a face final da fibra e/ou o uso de luz incoerente.

Por outro lado, o método convencional de medição da cavidade FP (3) requer uma fonte robusta com largura de linha estreita, mas em compensação não precisa de nenhuma otimização no acoplamento de entrada do guia de onda. Naturalmente, um guia de onda pode ser considerado uma cavidade FP com suas duas faces polidas e espelhadas. Ao final, usando essas ressonâncias FP, também conhecidas como franjas de Fabry-Perot, com refletividade conhecida, é possível estimar a perda de propagação. Além disso, as franjas FP são frequentemente produzidas por atuação externa, como aquecimento controlado do guia de onda ou aplicação de um campo elétrico, como mencionado anteriormente. Como resultado, para guias de onda ópticos passivos, utilizados conforme fabricados, o método FP convencional não tem sucesso, a menos que o comprimento de onda de uma luz de entrada coerente seja alterado de maneira bem controlada. Além disso, é necessário que as faces sejam altamente reflexivas, ou seja, interferômetros com alta precisão, para que a medida forneça um resultado com

grande confiabilidade. Como resultado, a **técnica de ressonância de Fabry-Perot não é ideal para medir a atenuação de guias de ondas de vidro**. No entanto, a medição da ressonância FP tem a vantagem de ser independente da eficiência de acoplamento inicial entre o laser e o modo do guia de ondas, o que a torna mais estável, reproduzível e com resultados mais confiáveis.

Em um trabalho recentemente publicado, os autores analisaram e planejaram uma estratégia para contornar esse problema da impossibilidade de medir as perdas de propagação em guias de onda em vidro devido à baixa refletividade das faces [12]. Para isso, um guia de onda monomodo reto foi fabricado diretamente por escrita via laser de femtossegundos no volume de um vidro comercial (*Gorilla Glass Non-iox* – fornecido pela *Corning* antes de realizar a troca iônica para fortalecimento), que mostrou excelentes propriedades mecânicas e ópticas. A figura 1 mostra, de forma esquemática, o processo de microfabricação, assim como o dispositivo produzido. Para acessar a ressonância FP, as faces de entrada e saída do guia de ondas foram revestidas com um filme com uma alta refletividade conhecida. Além disso, também precisaríamos comparar nosso resultado com uma técnica já bem estabelecida para a medida realizada em vidros (método *fiber-butt*) e foi obtido uma excelente concordância entre ambos.

Para demonstrar a viabilidade da estratégia proposta, primeiramente foram fabricados os guias de onda com condições de exposição otimizados utilizados para produzir guias monomodo na região de TELECOM do espectro eletromagnético, em 1550 nm. Após a microfabricação, as faces do dispositivo foram polidas para permitir um acoplamento eficiente entre a fibra e os guias de onda.

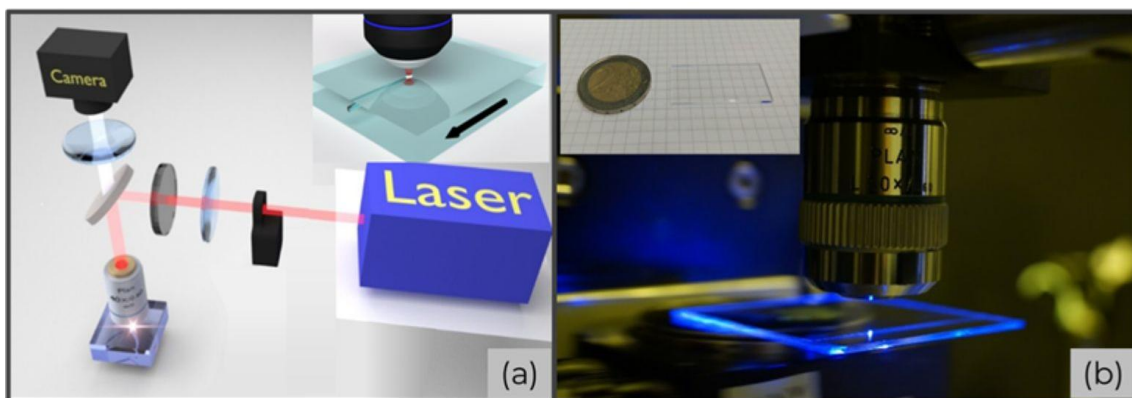


Figura 1 – (a) Esquema da configuração de fabricação. Um feixe de laser de femtossegundos é direcionado a um estágio de translação 3D, onde o substrato em processamento é colado. Inserção: Fabricação esquemática da direção de guia de onda em relação ao feixe de laser. (b) Foto da microfabricação do guia de ondas em tempo real. Inserção: Comparação final do dispositivo com a moeda de 2 euros.

A figura 2 inclui uma imagem de microscópio da seção transversal do guia de onda resultante, juntamente com os parâmetros de fabricação otimizados utilizados para produzir guias de onda monomodo em 1550 nm. O perfil do guia de ondas (painel central da figura 2) suporta um único modo gaussiano. O painel direito mostra o perfil de campo próximo do modo guiado medido da fibra clivada utilizada para realizar as medidas de perda. As perdas de propagação dos guias de onda fabricados com esses parâmetros foram medidas como $0,47 \pm 0,04$ dB/cm usando o método *fiber-butt*, onde a incerteza surge principalmente das perdas de acoplamento. Tanto a microfabricação da guia de onda quanto a análise das perdas foram realizadas em Milão (Itália), nos laboratórios do Prof. Roberto Osellame (*Politecnico di Milano*). O dispositivo foi transportado para o Brasil, para o laboratório do Grupo de Óptica, Laser e Fotônica (GOLF), onde foram iniciadas as medidas de caracterização utilizando a técnica FP. Devido às muitas reflexões entre as interfaces envolvidas (as interfaces de fibra clivada/face de entrada da amostra no lado da injeção de luz e face de saída da amostra/superfície da lente no lado da coleta) e a baixa refletividade das faces, notamos uma oscilação ruidosa nas franjas ao longo da caracterização. De fato, como a refletividade R das faces do vidro é pequena, as oscilações afetam muito as franjas e, conseqüentemente o contraste real da amostra, reduzindo muito a visibilidade e resultando enganosamente em um alto valor nas perdas, como mostrado na figura 3 (a).

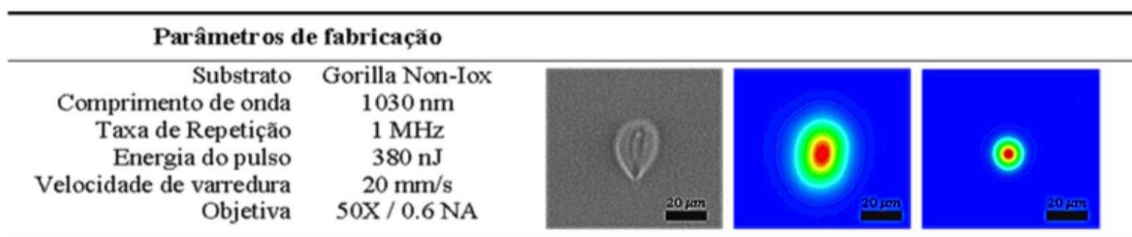


Figura 2 – Parâmetros de escrita para a fabricação de guias de onda monomodo de baixa perda a 1550 nm. Na figura, uma imagem de microscópio da seção transversal do guia de ondas é mostrada (painel esquerdo), juntamente com os perfis de campo próximo do modo guiado medidos do guia de ondas produzido (painel central) e da fibra clivada (painel direito).

Uma análise minuciosa dos mais de 20 guias de onda da amostra destacou um padrão estatístico de perdas que era claramente inconsistente com os achados da mesma amostra usando o método *fiber-butt* na Itália. Portanto, para comparar os métodos, as faces laterais (entrada e saída) da amostra de vidro foram revestidas com

um *coating*, fornecendo uma refletância de 40% em torno da faixa de comprimento de onda medida. É importante destacar que o revestimento altamente reflexivo usado para avaliar as perdas por propagação é removível, por exemplo, usando um raspador de plástico para retirar mecanicamente o revestimento após enfraquecê-lo com álcool isopropílico, tornando o dispositivo utilizável após a caracterização.

A figura 3 (b) mostra a medição das franjas FP. É evidente que o aumento da visibilidade foi naturalmente causado pelo *coating* da superfície (maior finesse). Consequentemente, é possível medir a perda de propagação do guia de onda usando o padrão de franjas obtido através da potência óptica transmitida. O resultado, exibido dentro do gráfico da figura 3 (b), é bastante comparável ao obtido pela abordagem *fiber-butt*, demonstrando a aplicabilidade e utilidade do método apresentado neste trabalho. O valor da incerteza é devido ao ruído do espectro de transmissão.

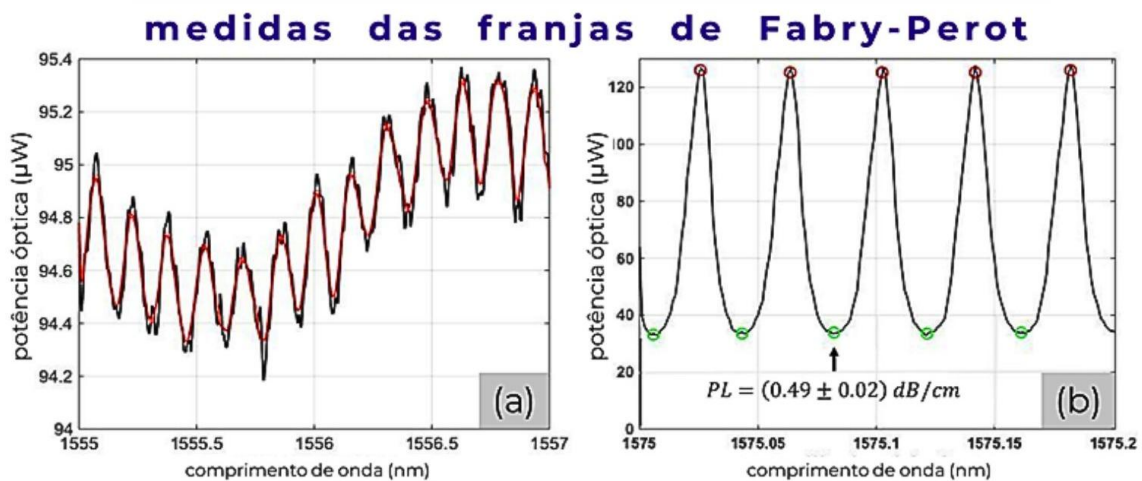


Figura 3 – (a) Oscilação das franjas de *Fabry-Perot* devido às múltiplas reflexões nas interfaces ópticas no setup de medição do laboratório ÓLAF (DF/UFSCar). O guia de ondas em teste na amostra apresenta pouca visibilidade, refletindo em alto valor de perdas (tipicamente na melhor situação > 6,5 dB/cm). (b) Franjas de oscilação *Fabry-Perot* com revestimento altamente reflexivo nas faces da amostra de vidro. O gráfico representa a potência transmitida versus o comprimento de onda.



REFERÊNCIAS

- [1] Osellame, R., G. Cerullo, e R. Ramponi, "*Femtosecond Laser Micromachining - Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials*". 2012: Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] Malinauskas, M., *et al.*, "*Ultrafast laser processing of materials: from science to industry*". Light: Science & Applications, 2016. 5: p. e16133.
- [3] Sugioka, K. and Y. Cheng, "*Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing*". Light: Science & Applications, 2014. 3: p. e149
- [4] Correa, D.S., *et al.*, "*Femtosecond Laser in Polymeric Materials: Microfabrication of Doped Structures and Micromachining*". Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, 2012. 18(1): p. 176-186.
- [5] Flamini, F., *et al.*, "*Thermally reconfigurable quantum photonic circuits at telecom wavelength by femtosecond laser micromachining*". Light Sci Appl, 2015. 4: p. e354.
- [6] Itoh, K., *et al.*, "*Ultrafast Processes for Bulk Modification of Transparent Materials*". MRS Bulletin, 2006. 31(08): p. 620-625.
- [7] Meany, T., *et al.*, "*Laser written circuits for quantum photonics*". Laser & Photonics Reviews, 2015. 9(4): p. 363-384.
- [8] Musgraves, J.D., K. Richardson, and H. Jain, "*Laser-induced structural modification, its mechanisms, and applications in glassy optical materials*". Optical Materials Express, 2011. 1(5): p. 921-935.
- [9] Hunsperger, R., "*Integrated Optics, Theory and Technology*". sixth edition ed. 2009: Springer-Verlag New York. XXVIII, 513.
- [10] Jackel, J.L. and J.J. Veselka, "*Measuring losses in optical waveguides: a new method*". Applied Optics, 1984. 23(2): p. 197-199.
- [11] Tittelbach, G., B. Richter, and W. Karthe, "*Comparison of three transmission methods for integrated optical waveguide propagation loss measurement*". Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A, 1993. 2(6): p. 683-700.
- [12] Ferreira, P.H.D., *et al.*, "*Improvement in measuring losses by interferometric technique for glass waveguides produced by femtosecond laser writing*". Optics Communications, 2022: p. 129132.



Iluminação Pública e Cidades Inteligentes

Webinar organizado pela SBFoton

No dia 22 de março de 2023 ocorreu o *Webinar*: "Iluminação Pública e Cidades Inteligentes" organizado pela SBFoton, moderado pelo MBA/Eng. Manuel Steidle, e protagonizado por nossos associados. O evento foi transmitido em nosso canal do YouTube das 10h às 12h. Por meio de 5 palestras de 15 minutos, proferidas por especialistas na área, foram apresentados os seguintes temas:

- Princípios físicos de fontes de luz estado sólido e sua aplicação em iluminação e Comunicação por Luz Visível-CLV: Prof. Alexandre Pohl, Universidade Tecnológica Federal do Paraná
- Módulos LED e drivers utilizados em iluminação pública, estado da arte e inovações tecnológicas para o mercado Brasileiro: Fabio Delavy de Andrade, ams OSRAM Group
- Luminárias de Iluminação pública, características e diferenciais para ambiente urbano Brasileiro: Anderson Soares dos Santos, Intral SA
- Visão da indústria brasileira de Iluminação dos desafios e oportunidades de desenvolvimento de iluminação pública e cidades inteligentes: Dr. Isac Roizenblatt, ABILUX
- 5G Smart Campus: Um protótipo de cidade inteligente, sustentável e segura: Profa. Regiane Relva Romano, Centro Universitário FACENS

O evento foi um sucesso e pode ser assistido neste link. A seguir está a imagem de divulgação.



Webinar:
Iluminação pública e Cidades Inteligentes

Dia 22 de Março de 2023 das 10:00 às 12:00
<https://youtube.com/live/Z1DF8ef4a9Y>

Participantes:

- Prof. Alexandre Pohl, Universidade Tecnológica Federal do Paraná
- Fabio Delavy de Andrade, ams OSRAM Group
- Anderson Soares dos Santos, Intral SA
- Dr. Isac Roizenblatt, ABILUX
- Profa. Regiane Relva Romano, Centro Universitário FACENS



REVISTA DA

sbfoton

Vol. 2 - Mar/2023

