



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.

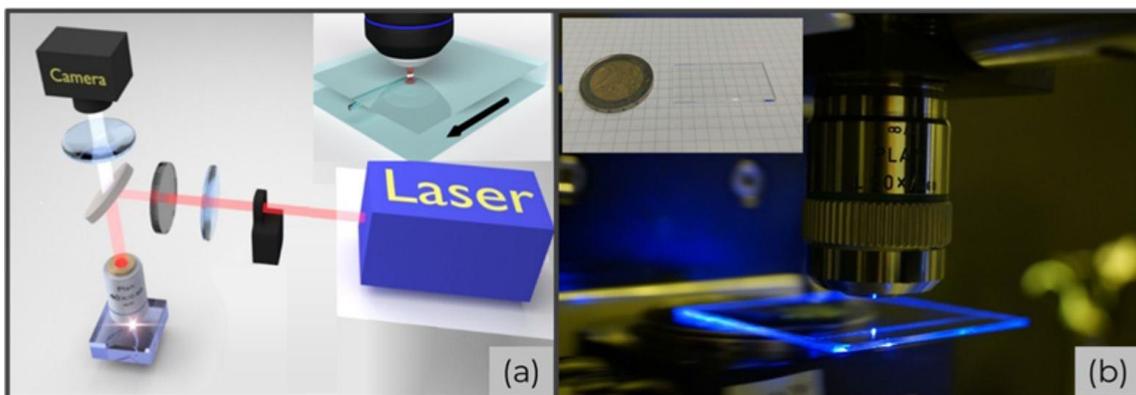


Figura 1 – (a) Esquema da configuração de fabricação. Um feixe de laser de femtossegundos é direcionado a um estágio de translação 3D, onde o substrato em processamento é colado. Inserção: Fabricação esquemática da direção de guia de onda em relação ao feixe de laser. (b) Foto da microfabricação do guia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

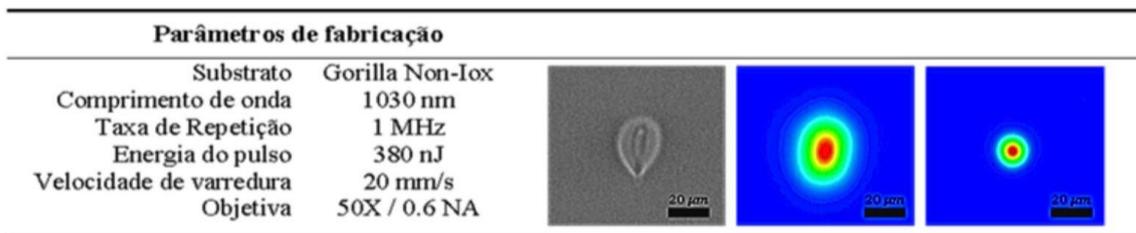


Figura 2 – Parâmetros de escrita para a fabricação de guias de onda monomodo de baixa perda a 1550 nm. Na figura, uma imagem de microscópio da seção transversal do guia de ondas é mostrada (painel esquerdo), juntamente com os perfis de campo próximo do modo guiado medidos do guia de ondas produzido (painel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

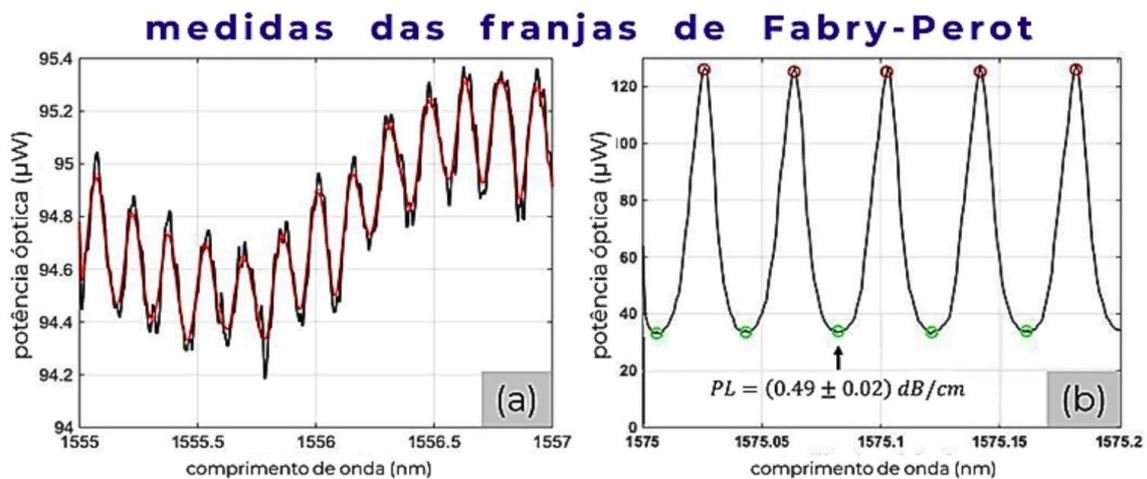


Figura 3 – (a) Oscilação das franjas de *Fabry-Perot* devido às múltiplas reflexões nas interfaces ópticas no setup de medição do laboratório ÓLAF (DF/UFSCar). O guia de ondas em teste na amostra apresenta pouca visibilidade, refletindo em alto valor de perdas (tipicamente na melhor situação $> 6,5 \text{ dB/cm}$). (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.