

Fabricação e Caracterização de Grades de *Bragg* através do Uso da Técnica da Máscara de Fase

Carmem L. Barbosa, Renato C. Rabelo, Osni Lisbôa,
Instituto de Estudos Avançados -IEAv-CTA. São José dos Campos -SP-12231-970,

Haroldo T. Hattori, Rogério M. Cazo
Instituto Tecnológico de Aeronáutica -ITA-CTA. São José dos Campos - SP-12228900

Resumo — Neste trabalho, alguns resultados experimentais obtidos na fabricação e caracterização, em tempo real, de grades de *Bragg* em fibras ópticas são apresentados. A técnica da máscara de fase, utilizada na fabricação destas grades, é descrita, assim como os aparatos necessários a sua caracterização. Este trabalho experimental faz parte do projeto de pesquisa em grades de *Bragg* desenvolvido pelo ITA/IEAv-CTA, cujo objetivo é desenvolver a tecnologia de fabricação, caracterização e aplicações de dispositivos baseados em grades de *Bragg* para aplicações em sensores e comunicações ópticas.

Palavras-chaves — Grades de *Bragg*, comunicações ópticas, dispositivos a fibra óptica.

I. INTRODUÇÃO

A partir de 1978, tornou-se possível a gravação de grades de *Bragg* em fibras ópticas (FBG) [1]. A técnica utilizada foi a da gravação lateral que consegue criar uma grade de *Bragg* diretamente no núcleo da fibra, através da utilização de um interferômetro iluminado por uma fonte coerente no ultravioleta. A versatilidade da fabricação das FBG's deve-se à independência do comprimento de onda de *Bragg* em relação ao laser utilizado na inscrição [2,3]. Esses processos foram considerados difíceis devido à necessidade de controle de resolução sub-micrométrico e instabilidade, mas atualmente isto já é considerado rotina nos laboratórios.

Uma FBG, gravada em um pedaço de uma fibra monomodo com núcleo dopado com germânio, apresenta uma modulação periódica do índice de refração do núcleo, que foi formada através de uma exposição a um padrão espacial de luz ultravioleta na região de 244 - 248 nm. O período das FBG's são da ordem de 1-200 nm e as refletividades das grades podem se aproximar de 100%. Quando a FBG é iluminada por um fonte de luz de grande largura espectral ocorre uma modulação periódica do índice de refração do núcleo. A interferência é destrutiva a menos que cada feixe esteja em fase com todos os demais.

carmi@ieav.cta.br, rabelo@ieav.cta.br, lisbao@ieav.cta.br, Tel 55-12-347-5442, Fax 55-12-344-1177, haroldo@ele.ita.cta.br, Tel +55-12-347-6819.

O autores gostariam de agradecer o financiamento `a Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP) e ao Centro Técnico Aeroespacial (CTA-ITA/IEAv).

De acordo com a lei de *Bragg* [3], esta condição é satisfeita apenas por um comprimento de onda, o comprimento de onda de *Bragg* λ_B , dado por:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

onde n é o índice de refração efetivo do núcleo e Λ é o período de modulação do índice de refração.

A refletividade, no comprimento de onda de *Bragg* [4], pode ser estimada pela seguinte equação,

$$R = \tanh^2 \Omega, \quad (2)$$

onde,

$$\Omega = \pi n (L/\lambda_B)(\Delta n/n) \eta(V) \quad (3)$$

O fator $\eta(V) \cong 1 - 1/V^2 \geq 2,4$, é a fração da intensidade do modo fundamental contido no núcleo (V é a frequência normalizada da fibra). Foi visto que R é diretamente proporcional ao comprimento da grade L e a perturbação do índice ($\Delta n/n$), a qual é normalmente determinada pela potência e tempo de exposição à radiação ultra-violeta da fibra.

A largura espectral a metade da potência (FWHM) [5] de uma grade, $\Delta\lambda$ é dada aproximadamente por

$$\Delta\lambda = \lambda_{Bs} \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda}{2n}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (4)$$

onde $s \approx 1$ para grades fortemente reflexivas (aproximadamente 100% de reflexão) e $s \approx 0,5$ para grades fracamente reflexivas, e N é o número de planos da grade. Devido à pequena mudança no índice, a maior contribuição para a mudança na largura de linha é atribuída à mudança na profundidade de modulação da perturbação do índice. Ao contrário dos sensores interferométricos a fibras ópticas convencionais iluminados por *lasers* altamente coerentes, os sensores a FBG requerem uma fonte de luz de grande largura espectral e uma alta resolução na detecção de deslocamentos de comprimentos de onda do sistema.

II. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem experimental é feita utilizando-se um laser de Argônio (457 nm para 528 nm) com um dobrador de frequência intra-cavidade. Este sistema é equipado com um cristal não-linear de BBO (beta borato de bário: BaB_2O_4) para produzir a geração de segunda harmônica, gerando um feixe de saída no ultravioleta (UV). Este feixe de luz produz uma radiação de luz de onda contínua na faixa do ultravioleta, da ordem de 0.25mW, para frequências especificadas entre 229 nm para 264 nm.

Uma máscara de fase com uma grade de transmissão e um período de $1,0526 \mu m$ para um comprimento de onda de $\lambda=248 \text{ nm}$ é colocada na saída do feixe da radiação UV. O feixe de radiação UV [6] atravessa a máscara e se difrata em primeira ordem em duas direções simétricas com a mesma potência. Com dois espelhos (R=100%) paralelos, torna-se possível a recombinação destes dois feixes resultantes através de reflexão interna segundo o ângulo determinado pela máscara, conforme pode ser observado na Fig.1. Estes dois

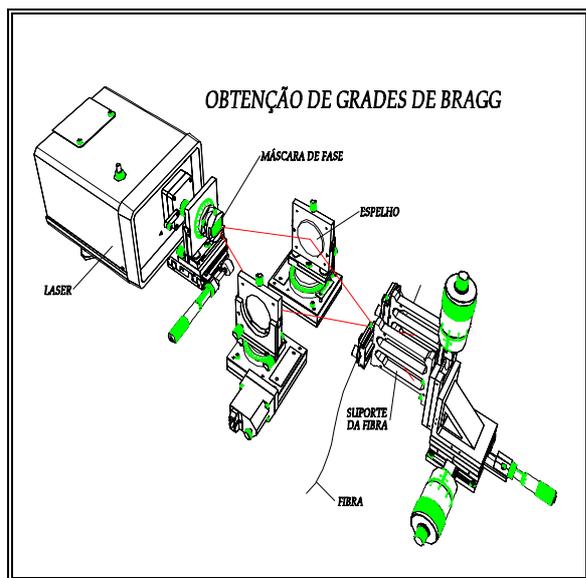


Figura 1: Esquema experimental de fabricação de grades de Bragg em fibras

feixes, após incidirem nos espelhos, sofrem interferência segundo o ângulo formado pelos espelhos. Este espelhos são fixos em placas móveis e estes posicionadores são controlados por um motor de passos que permite o ajuste da velocidade do movimento angular dos mesmos.

A combinação dos feixes de radiação UV, após sofrerem reflexão nos espelhos, se recombinam no plano onde as fibras são cuidadosamente fixas e posicionadas. A superposição dos dois feixes gera um padrão de interferência periódica, o qual se reproduz no núcleo da fibra já descascada e hidrogenada [6,7]. Esta forma de inscrição pode ser observada no esquema da Fig. 2.

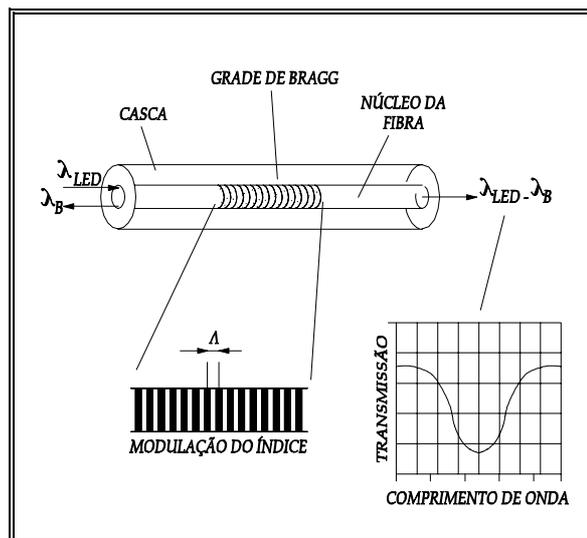


Figura 2: Diagrama esquemático de grade de Bragg em fibra óptica

O refletor de Bragg é o mais simples de ser fabricado através da técnica da máscara de fase [8,9]. Estes tipos de fibras com grades uniformes, onde as frentes de fase são perpendiculares ao eixo longitudinal e com planos tendo um período constante, são as estruturas de grades de Bragg mais facilmente construídas (Fig. 2). A luz é guiada ao longo do núcleo da fibra óptica, onde é espalhada por cada plano da grade. Dependendo dos parâmetros tais como mudança do índice de refração induzido e comprimento da grade, o refletor de Bragg [9] pode funcionar para transmissão de banda larga, filtro refletor ou espelho com grande largura espectral. Através de combinações de refletores de Bragg em fibras pode-se fabricar sensores de temperatura e deformação, além de muitos outros dispositivos já conhecidos [9].

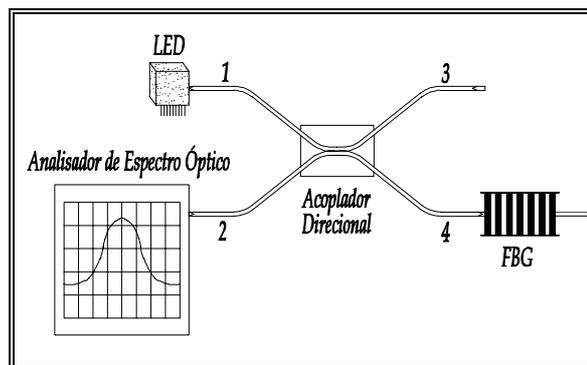


Figura 3: Esquema experimental para caracterizar em tempo real, as FBG

A inscrição de grades de Bragg em fibras, é feita em tempo real e conseqüentemente sua caracterização é imediata, podendo ser observada na tela do analisador de espectro óptico de alta resolução. Uma montagem experimental para esse fim é apresentada nas Figs. 1 e

3. Nesta montagem, são necessários os seguintes componentes: *a)* uma fonte de óptica de grande largura espectral; *b)* um circulador óptico ou mesmo um simples acoplador direcional; e *c)* um analisador de espectro óptico de alta resolução. O principal requisito da fonte óptica utilizada na montagem da Fig. 3 é que ela tenha uma grande largura espectral, de forma que a potência se mantenha em níveis razoáveis numa grande gama de comprimentos de onda. Ao mesmo tempo, a potência emitida pela fonte óptica deve permanecer relativamente estável para se medir os parâmetros de transmissividade e refletividade. Um LED ou um diodo super-luminescente satisfazem essas condições e podem ser usados na caracterização de grades de *Bragg*. O sinal CW transmitido pelo LED entra no terminal 1 do acoplador ou de um circulador. Do terminal 1 do acoplador, esse sinal será transmitido ao terminal 2 do acoplador e irá diretamente à grade de *Bragg* em teste. A grade de *Bragg* refletirá (parcialmente ou totalmente) uma determinada componente espectral do sinal e deixará passar as demais, criando um “vale” no espectro da fonte óptica, o que permite determinar diretamente a transmissividade e indiretamente a refletividade, além do comprimento de onda de *Bragg*. Entretanto, se a refletividade for baixa, a medida de refletividade baseada na medida direta da transmissividade se torna imprecisa, daí a necessidade de se tentar medir diretamente a refletividade. Isso é feito através do circulador ou mesmo do acoplador direcional, visto que o sinal refletido pela FBG retorna ao terminal 2 e desse terminal irá ao terminal 3, onde se pode medir diretamente o sinal que foi refletido. Portanto, essa montagem permite medir simultaneamente a transmissividade, refletividade e comprimento de onda de *Bragg* de uma grade de *Bragg* que opere perto do comprimento de onda central da fonte óptica. Além disso, essa montagem pode ser usada para caracterizar outros componentes como, por exemplo, multiplexadores *add-drop* e sensores. Uma alternativa ao uso do circulador ou mesmo do acoplador é o uso de um divisor de potência de 3dB, com um funcionamento muito parecido ao descrito neste texto, mas com pior desempenho.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho, mostra-se um dos resultados obtidos para uma das grades inscritas na fase inicial da montagem experimental e a fabricação para as primeiras aplicações do nosso projeto. A fibra óptica é mantida durante uma semana em um tubo de cobre, hermeticamente fechado com hidrogênio de alta pureza e com uma pressão aproximadamente 120 psi. De acordo com alguns cálculos efetuados para sintonia em um comprimento de onda da ordem de $\lambda=1,3\mu\text{m}$, os espelhos foram inclinados de $1,42^\circ$ (142 passos através do motor de passo). O esquema experimental está ilustrado na Fig. 1. Antes da inscrição da grade na

fibra, levanta-se o espectro do LED (fonte de banda larga) que é utilizado durante toda a fabricação da grade. Este espectro do LED é a referência dos 4% de reflexão da fonte na fibra. É possível adicionar ao espectro total do LED, uma porção da luz transmitida ou refletida ao passar pela grade. Este espectro do LED será a referência dos 4% de reflexão da fonte na fibra. É possível adicionar ao espectro total do LED, uma porção da luz transmitida pela grade construída na extremidade da fibra. Na Fig. 4, mostra-se esta adição no espectro total do LED. O espectro do LED possui um comprimento de onda de $\lambda_c = 1296 \text{ nm}$ e $\Delta\lambda = 60 \text{ nm}$, sendo relativamente possível visualizar a resposta no espectro de transmissão na grade através desta figura.

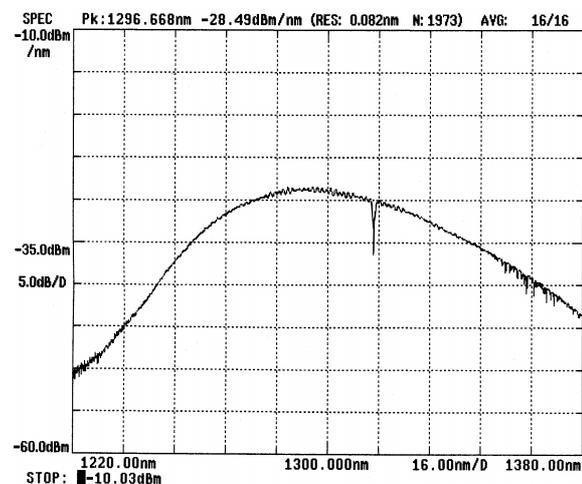


Figura 4: Curva espectral do LED e à adição do espectro transmissão da grade

O resultado obtido na Fig. 5, foi uma inscrição de uma grade de *Bragg* numa fibra óptica monomodo. A resposta espectral da FBG apresenta um comprimento de onda central de $\lambda=1314 \text{ nm}$, com uma largura espectral de $\Delta\lambda=0,403 \text{ nm}$, medido em tempo real através do uso do analisador espectro óptico com uma resolução de $0,005 \text{ nm}$. A refletividade obtida foi de $R=76\%$. Este alto valor de refletividade foi obtido através da hidrogenação da fibra.

Quanto mais tempo a fibra permanece num ambiente de hidrogênio, maior será a variação do índice de refração do núcleo. A hidrogenação aumenta o número de defeitos na fibra óptica dopada com germânio, aumentando a variação do índice de refração induzido pelo laser operando no ultravioleta.

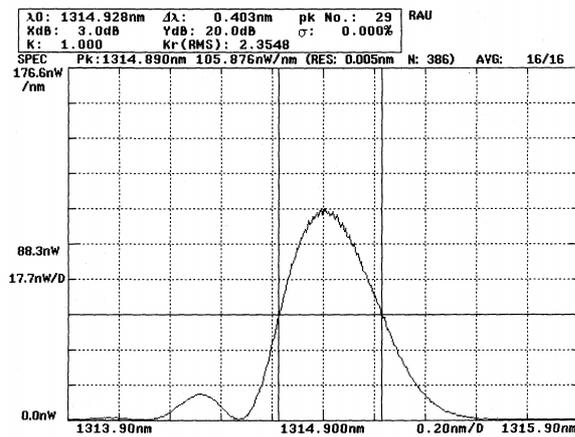


Figura 5: Espectro óptico de reflexão obtido de uma FBG

CONCLUSÃO

Este trabalho mostra um dos resultados experimentais da fabricação e caracterização, em tempo real, de grades de *Bragg* em fibras ópticas monomodos. Utilizou-se a técnica de gravação da máscara de fase, pois esta fornece os resultados experimentais mais repetitivos. Obteve-se refletividade próxima a 80%. Espera-se, num futuro próximo, obter grades com refletividade próxima a 100%. Além disso, espera-se fabricar novos dispositivos para sensores e comunicações ópticas utilizando-se estas grades com refletividades variadas dependendo da aplicação desejada. A vantagem de hidrogenar as fibras é o aumento da fotosensibilidade da radiação UV ao inscrever a grade no núcleo da fibra.

REFERÊNCIAS

- [1] Hill K. O., Fuji F., Johnson D. C. and Kawasaki B. S., "Photosensitivity on optical fibre waveguides: applications to rejection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, pps. 647-9, 1978.
- [2] Meltz G, Morey W. W. and Glenn W. H., "Formation of Bragg gratings in optical fibre by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, vol. 14, pps. 823-5, 1989
- [3] Dockney, M. L., J. W. James at al. "Fiber Bragg grating fabricated using a wavelength tunable source and phase mask based interferometer", *Mesurements Science and Technology*, Vol. 7, pp 445, 1996.
- [4] Lam D. K. W. and Garside B. K., "Characterization of single mode fibre filters," *Appl. Opt.*, vol. 20, pps. 440-5, 1981.
- [5] Russel P. J., Archarnbault J. and Reekie L., "Fibre gratings," *Phys. World*, vol. 6, pps. 41-6, 1993.
- [6] Hill K O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D. C. and Albert J., "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fibre by LTV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pps. 1035-7, 1993.
- [7] Lemaire P. J., Atkins R. M., Mizrahi V. and Reed W. A., "High pressure H2 loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO2 doped optical fibres," *Electron. Lett.*, vol. 29, pps. 1191-3, 1993.
- [8] Kashyap R., Wyatt R. and Campbell R. J. "Wideband gain attenuated erbium fibre amplifier using a photosensitive fibre blazed grating," *Electron. Lett.*, vol. 29, pps. 154-6, 1993.

- [9] Othonos A., and Kalli Kyriacos. *Inscribing Bragg Gratings in Optical Fiber*, In "Fiber Bragg Gratings". Artech House. Boston., USA, 1999. Cap. 4, pps.149-170.

Carmem L. Barbosa – Doutora em Engenharia Elétrica. área de concentração Engenharia Eletrônica/Microeletrônica. Trabalho desenvolvido na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. Mestre em Eletrônica e Telecomunicações, área de Materiais. Trabalho desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, em São José dos Campos – SP. De 1985 a 2000 – Cargo de Pesquisador, no Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, SP. Grupo de Óptica Aplicada: desenvolvimento do trabalho de pesquisa e produção de componentes ópticos tais como espelhos com reflexão total e parcial em vidros e fibras ópticas, polarizadores, divisores de feixe e acopladores em fibra. Desenvolvimento de camadas anti-refletoras em superfícies de laser a semiconductor. Grupo de Sensores à fibra óptica: fabricação de redes de Bragg em fibra óptica, sensores para medir deformação mecânica e variação de temperatura utilizando redes de Bragg em fibras multimodo e monomodo.

Renato Cunha Rabelo nasceu em Brasília, em novembro de 1969. Graduou-se Engenheiro Eletrônico pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em dezembro de 1992. Graduou-se Mestre em Ciências, área de Microondas e Eletroóptica, também pelo ITA, em dezembro de 1998. Trabalha com experimentos em fotônica desde 1990, quando começou a estagiar no Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA) como aluno de graduação, realizando estudos em dispositivos de Óptica não-linear. Após sua graduação, trabalhou como Engenheiro de manutenção de equipamentos RADAR e de tratamento e visualização de imagens RADAR. Em 1996 voltou a trabalhar com fotônica, mais especificamente na área de sensores a fibra óptica. Seus interesses de pesquisa concentram-se em Sensores a Fibra Óptica, fabricação e utilização de Grades de Bragg em fibras ópticas, Óptica Integrada, Dispositivos eletroópticos e não-lineares em óptica guiada, bem como processamento de sinais para dispositivos ópticos interferométricos.

Osni Lisbôa nasceu em São Paulo, SP, Brasil a 17 de fevereiro de 1957. Concluiu o Curso para Oficiais da Aeronáutica em 1979 (Curso de Formação de Oficiais Intendentes da Academia da Força Aérea - CFOInt/AFA). Graduou-se em Ciência da Computação em 1983 (Curso Superior de Tecnologia de Computação no Instituto Tecnológico de Aeronáutica - CSTC/ITA). Graduou-se em Engenharia Eletrônica em 1988 e recebeu o título de Mestre em Ciência em Engenharia Eletrônica em 1990, ambos no ITA. Em 1995, obteve o Título de Doutor em Filosofia (Engenharia Elétrica) pela *McGill University* (Montreal, Canadá). Sua dissertação analisava sensores em fibra óptica para aplicação em estruturas mecânicas. Desde 1982 está lotado ao

Centro Técnico Aeroespacial (CTA), em São José dos Campos, SP. Atualmente é o Vice-diretor do Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA) e sua Patente é Tenente-Coronel. Seus principais interesses são em sensores a fibra óptica (principalmente rotação, temperatura e deformação mecânica - distribuídos e/ou localizados - , utilizando efeito *Sagnac*, efeitos não-lineares , redes de *Bragg*, etc.) e processamento de sinais. Possui cerca de 11 publicações em revistas internacionais indexadas e 19 publicações em congressos nacionais e internacionais.

Haroldo Takashi Hattori nasceu em São José dos Campos, SP, Brasil a 22 de outubro de 1965. Graduou-se em engenharia eletrônica no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) (com menções honrosas) em 1988 e recebeu o título de Mestre em Ciência em Engenharia Eletrônica em 1993, também pelo ITA. Em 1998, obteve o grau de Doutor em Engenharia Elétrica pela Virginia Polytechnic Institute and State University (Blacksburg VA, USA). Sua dissertação analisava fibras ópticas multi-camadas para reduzir os efeitos de dispersão e não-linearidades ópticas. Em 1989 juntou-se à Alcatel (Brasil e Espanha), onde trabalhou no desenvolvimento de sistemas de comunicações ópticas operando de 2 a 560 Mb/s. Em 1994, saiu da Alcatel para o curso de doutorado. Desde 1998, está trabalhando no ITA, onde é professor adjunto. Seus principais interesses são em grades de Bragg em fibras ópticas, projeto de fibras ópticas, óptica integrada, processamento de sinais, materiais com *photonic bandgap*, e comunicações ópticas. Possui cerca de 10 publicações em revistas internacionais indexadas e 17 publicações em congressos nacionais e internacionais, além de ser o gerente do projeto da FAPESP de grades de Bragg. Dr. Hattori é membro das Sociedades Honoríficas Phi Kappa Phi e Eta Kappa Nu, além de ser membro da Optical Society of America.

Rogério Moreira Cazo nasceu em São Paulo, SP, Brasil em 05 de março de 1976. Concluiu o curso técnico em eletrônica na Escola Técnica Federal de São Paulo em 1995 e graduou-se em engenharia eletrônica no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em 2000. O seu trabalho de graduação consistiu na análise de sensores de deformação e de temperatura baseados em grades de Bragg em fibras ópticas. Este trabalho foi considerado o melhor trabalho de graduação da Divisão de Eletrônica do ITA do ano 2000. Em 2000, juntou-se à Divisão de Fotônica do Instituto de Estudos Avançados do Centro Técnico Aeroespacial (IEAv-CTA). Suas áreas de interesse incluem grades de Bragg em fibras ópticas, optoeletrônica, sensores a fibra óptica, estruturas com *photonic bandgap* e projeto de circuitos digitais.