

Efeitos da Radiação Ionizante em Fibras Ópticas para Sensores e para Transmissão de Dados: Primeiros Ensaios

Odair L. Gonzalez, Angelo Passaro, Erik R. Ribeiro, Jonas Rubini Jr., Wagner A. de Oliveira e Josiel U. de Arruda
Instituto de Estudos Avançados - Rodovia dos Tamoios, km 5,5, Torrão de Ouro, São José dos Campos, SP - Cep 12228-001

Resumo — Neste trabalho são apresentados os resultados preliminares do estudo dos efeitos da radiação ionizante em fibras ópticas com potencial uso em giroscópios de fibra óptica e em transmissão de dados. O primeiro ensaio com radiação foi realizado com raios gama de um irradiador de ^{60}Co em duas fibras ópticas comerciais, uma com características normais e outra tolerante à radiação. O aumento da atenuação da luz transmitida durante o tempo de irradiação foi medido e pode ser explicado em termos de um modelo da dinâmica de formação de centros absorvedores de luz pelo aprisionamento de cargas elétricas (elétrons e buracos) em impurezas e/ou imperfeições da matriz de sílica.

Palavras-chaves — Fotônica, fibra óptica, giroscópio, radiação.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de qualquer projeto visando aplicações espaciais ou aplicações aeronáuticas em vôos de grande altitude deve considerar os efeitos que a contínua ação da radiação cósmica provoca em materiais e componentes. Os efeitos da radiação devem ser conhecidos para que medidas corretivas possam ser consideradas no projeto de equipamentos que deverão operar por tempo prolongado imersos em um ambiente com radiação ionizante permanente. A aplicação de circuitos eletrônicos, circuitos e componentes de óptica integrada, fibras ópticas, semicondutores e outros materiais em projetos espaciais depende de dados sobre as suas características e de como essas características variam em função da dose de radiação cósmica acumulada [1,2]. Tais informações têm caráter estratégico e muitas vezes não estão disponíveis na literatura. A participação de um país no mercado internacional de produtos aeronáuticos e espaciais de alta tecnologia está relacionada com sua capacitação para desenvolver e qualificar novos materiais e produtos com aplicação espacial e em grandes altitudes de vôo. O desenvolvimento desses produtos no país exige o investimento na criação de sistemas adequados para sua

O. L. Gonzalez, odairl@ieav.cta.br, Tel. +55-12-39475501, Fax +55-12-39441177; A. Passaro, angelo@ieav.cta.br, Tel +55 12 39475563; E. R. Ribeiro, erik@ieav.cta.br, Tel +55-12-39475442; J. Rubini Jr, jonas@ieav.cta.br, Tel +55 12 39475529; W. A. Oliveira, wagner@ieav.cta.br, Tel. +55-12-39475493; J. U. Arruda, josiel@ieav.cta.br, Tel. +55 12 39475428

Os autores agradecem o apoio dos pesquisadores do IEAV Cláudio Antonio Federico, Leda Shizue Yanagihara Rigolon, Octávio Pereira Silva Filho e Antônio Carlos Cintra pelo apoio nas irradiações.

Este trabalho foi financiado pela FINEP (Projeto PEICE - Convênio 01.07.0628.00)

qualificação.

Os giroscópios a fibra óptica [3] quando integrados em sistemas inerciais e submetidos a radiações espaciais, sofrem o efeito do escurecimento da fibra óptica, resultado da absorção de luz ocorrida em determinados centros de cor [4]. Os centros de cor correspondem a impurezas ou imperfeições no meio óptico que servem como armadilhas de cargas (elétrons ou buracos). Essas cargas aprisionadas possuem energias de excitação na faixa de energia da luz transmitida, funcionando como absorvedor de luz em determinadas bandas e provocando aumento da atenuação da fibra óptica ao longo do tempo. Este efeito deteriora a relação sinal-ruído do giroscópio devido à redução da potência óptica detectada. O conhecimento da taxa de deterioração em função da dose acumulada e da taxa de dose de radiação é fator fundamental para permitir o projeto de um dispositivo cujo desempenho deve ser garantido em longas missões no espaço.

No caso de fibras ópticas utilizadas na transmissão de dados, onde o sinal de interesse é representado por pulsos quadrados rápidos, efeitos de deformação dos pulsos podem corromper a informação, além do que, a atenuação da amplitude de pulso, quando não compensada, pode resultar na total perda da capacidade de transmissão da linha de comunicação de dados. Assim, a verificação dos efeitos da radiação na dispersão de pulsos, além da dinâmica da atenuação da sua amplitude, poderá contribuir de maneira significativa na seleção de fibras a serem utilizadas em linhas de transmissão de dados em ambientes sujeitos a doses elevadas de radiação.

II. A DINÂMICA DO ESCURECIMENTO DA FIBRA ÓPTICA

Sistemas espaciais em situação de operação normal estão sujeitos a baixas taxas de dose e grande variação de temperatura por longo tempo. Estas condições são diferentes das existentes nos ensaios acelerados nos quais são empregadas altas taxas de dose e as condições ambientais (temperatura) podem ser controladas. A modelagem física da dinâmica da formação de centros de cores em função da temperatura, da dose acumulada e da taxa de exposição à radiação é fundamental para que se possa prever, com base nos ensaios acelerados, o comportamento de sistemas de aplicação espacial, para apreciáveis doses de radiação, acumuladas por longo tempo e variações de temperatura, apesar de estarem sujeitos a baixas taxas de dose.

A radiação gama, ao atravessar o meio óptico provoca a ionização e excitação de moléculas dos constituintes do meio.

As cargas livres geradas no meio são capturadas por irregularidades ou impurezas do meio, formando os centros de cor. A atenuação induzida pela radiação, expressa em dB por unidade de comprimento da fibra óptica, pode ser relacionada com a quantidade de armadilhas populadas em função do tempo expressando-se, em primeiro lugar, a conhecida equação de atenuação em função de parâmetros microscópicos:

$$I = I_0 e^{-Kz} = I_0 e^{-n\sigma z} \quad (1)$$

onde I é a intensidade transmitida, I_0 é a intensidade incidente e K é a constante de atenuação do meio, que é igual ao produto da densidade de armadilhas populadas n com a secção de choque de absorção do fóton σ . A seguir, aplicando-se a definição de atenuação, tem-se:

$$A(\text{dB}/m) = \frac{1}{z} \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \frac{10 \cdot \sigma}{\ln 10} n = \alpha n \quad (2)$$

Durante a irradiação haverá um processo dinâmico de captura e de fuga de cargas aprisionadas nos diferentes tipos "i" de centros de cor, que pode ser descrito pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{dn_i}{dt} = \beta_i \dot{D} - \lambda_i n_i \quad (3)$$

O primeiro termo do lado direito da equação (3) corresponde à taxa de armadilhamento de cargas liberadas pela radiação, onde β_i é uma constante de proporcionalidade e \dot{D} é a taxa de dose absorvida no material. O segundo termo é a taxa de fuga de cargas da armadilha, onde λ_i é a constante de decaimento da armadilha e n_i é a quantidade de cargas aprisionadas na armadilha i por unidade de volume.

A constante de decaimento é composta por um termo devido ao efeito térmico, λ_i^{th} e outro devido a fuga induzida pela radiação λ_i^{ir} :

$$\lambda_i = \lambda_i^{th} + \lambda_i^{ir} \quad (4)$$

A vida média da armadilha é o inverso da constante de decaimento da armadilha ($\tau_i = 1/\lambda_i$).

Aplicando-se o resultado da resolução da equação diferencial (Eq. 3) na expressão da atenuação (Eq. 2) e considerando-se M diferentes tipos de armadilhas a atenuação por unidade de comprimento da fibra induzida pela radiação é dada por:

$$A = \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i \beta_i \dot{D}}{\lambda_i} [1 - \exp(-\lambda_i t)] = \sum_{i=1}^M a_i [1 - \exp(-\lambda_i t)] \quad (5)$$

As constantes a_i e λ_i da Eq. 5 podem ser obtidas experimentalmente por ajuste desta equação aos dados experimentais da atenuação em função do tempo durante a irradiação.

Após a irradiação ($\dot{D} = 0$ e $\lambda_i^{ir} = 0$) e, de acordo com a Eq. 3, a quantidade de cargas aprisionadas na armadilha irá decair por efeito térmico, de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{dn_i}{dt} = -\lambda_i^{th} n_i \quad (6)$$

Assim, haverá uma recuperação da transmissibilidade da fibra, sendo que a atenuação irá diminuir ao longo do tempo segundo:

$$A = \sum b_i \exp(-\lambda_i^{th} t) \quad (7)$$

onde b_i e λ_i^{th} podem ser obtidos a partir do ajuste da Eq. 7 aos dados experimentais da recuperação da fibra após a irradiação, com a restrição de que $\sum_{i=1}^M b_i = A_{ir}$, onde A_{ir} é a atenuação no final da irradiação.

A vida média das cargas aprisionadas nas armadilhas pode ser relacionada com parâmetros microscópicos da armadilha por:

$$\tau_i = \frac{1}{\lambda_i^{th}} = \frac{1}{s_i \cdot \exp(-E_i / KT)} \quad (8)$$

onde s_i é o fator de frequência da armadilha, E_i é a sua energia de ativação, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura em graus Kelvin.

Esta dependência da recuperação da fibra com a temperatura indica a viabilidade de um processo de tratamento térmico ("annealing") pós-irradiação. Além disso, durante a irradiação, mediante um exame na Eq. 7, observa-se que, para longos tempos de irradiação, a atenuação tende a atingir um valor de saturação, valor este que será tanto menor quanto for menor a vida média da armadilha. Dessa forma, pode-se prever que a atenuação máxima provocada pela radiação, ocorre para baixas temperaturas.

III. APARATO EXPERIMENTAL

O experimento realizado visou uma análise preliminar do efeito da radiação na intensidade de sinal em duas fibras ópticas comerciais disponíveis irradiadas na temperatura ambiente. A primeira fibra óptica, tipo HB1500G, lote AD595-OOE, produzida pela "Fibercore", já utilizada em protótipos de giroscópios a fibra óptica produzidos pelo IEAv, apresentava inicialmente atenuação de 1,8dB/km no comprimento de onda de operação de 1550nm. A segunda fibra, também da "Fibercore", tipo HB1500G-RT é, conforme catálogo, tolerante à radiação ionizante e foi adquirida para ser avaliada, visando seu uso em giroscópios para aplicações em sistemas de satélites

A plataforma de ensaios utilizada neste teste é apresentada na Fig. 1. O sinal óptico, com comprimento de onda de 1550nm, é gerado de por uma fonte SLD (Diodo Super Luminescente), que é direcionado para as duas bobinas de fibras ópticas a serem irradiadas com o uso de um acoplador óptico. O sinal do SLD, após percorrer as fibras sob irradiação, é convertido em sinal elétrico por um fotodetector e condicionado por um circuito de transimpedância (conversor I/V + amplificador de banda larga). O sinal elétrico é submetido ao sistema de aquisição, composto pelo módulo de aquisição de dados modelo NI-USB 6251 da "National Instruments", o qual permite amostragens em 16 bits e taxas na ordem de 1M Samples/s. Os dados são

armazenados em computador (tempo e intensidade do sinal). O software de aquisição de dados, desenvolvido em LabView (National Instruments – versão 8.0), permite definir o número de amostras e a taxa de amostragem de uma medida e armazena a resposta do aparato em função do tempo, além de permitir a monitoração da temperatura, por meio de sensores tipo NTCs (Negative Temperature Coefficient), um deles na área exposta à radiação e o outro em uma área blindada ou afastada do campo de radiação (medida de controle).

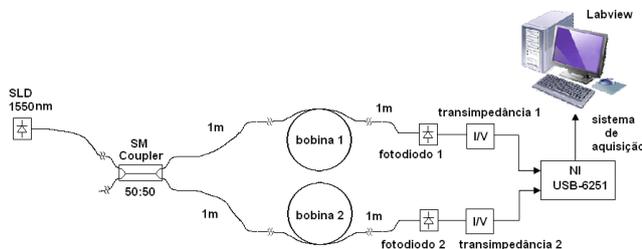


Fig. 1. Aparato experimental.

Os componentes utilizados no aparato de medida (acoplador, fotodiodos e transimpedâncias) podem apresentar pequenas diferenças de resposta (erro sistemático). A fim de caracterizar o aparato e o sistema de aquisição, algumas medidas foram efetuadas em ambiente monitorado (temperatura e umidade), o qual pode ser a própria área de irradiação sem o feixe de radiação. O procedimento consiste em realizar uma série de medidas, nas mesmas condições da irradiação, por um período de tempo adequado e fazer a análise de comportamento do aparato, gerando dados que servirão de referência para avaliar os resultados da irradiação.

No experimento realizado, as duas fibras ópticas de comprimento de 20m foram enroladas em um carretel confeccionado em acrílico. A espessura das paredes do carretel foi dimensionada de forma a se obter o equilíbrio eletrônico no material do carretel durante a irradiação, de forma que as fibras estejam submetidas à mesma dose de radiação em toda a superfície exposta.

IV. RESULTADOS E ANÁLISE

No ensaio efetuado a irradiação foi realizada continuamente por um intervalo de tempo de 144 horas, num total de 6 dias, com o irradiador operando 24 horas por dia. A taxa de dose utilizada foi de, aproximadamente, 33 Gy/h (3,3 krad/h), totalizando uma dose acumulada de, aproximadamente, 4,75 kGy (475 krad) no material da fibra (Si). Esta dose e o tempo de exposição, foram escolhidos para a simulação acelerada da dose de radiação típica para satélites de baixa órbita (20-50krad), com um fator de segurança igual a 10 para o teste acelerado.

Na Fig. 2 é apresentada a variação do sinal transmitido durante a irradiação para as amostras das fibras ópticas, onde se pode visualizar a redução na transmissão de luz durante a irradiação. Para a fibra tolerante à radiação, HB1500G-RT, observa-se que a redução da transmissão ocorre numa taxa muito menor que a da fibra comum, HB1500G.

Após a irradiação, as medidas foram continuadas por 20 dias, visando acompanhar a recuperação das fibras. Na Fig. 3 é mostrada a recuperação das fibras ao longo do tempo na temperatura ambiente.

As medidas da temperatura ambiente e da fibra indicam

que a variação de temperatura na área de teste, causada pela deposição de energia do feixe de radiação gama no aparato experimental, é pequena (aproximadamente 1°C). A temperatura ambiente durante a irradiação manteve-se no intervalo entre 24 e 24,4°C e a temperatura do arranjo cresceu de 23,8 a 25°C nas primeiras 10 horas de irradiação, manteve-se fixa em 25°C até a 25ª hora e depois decresceu lentamente para 24,6°C até o final da irradiação. Durante o período de observação após a irradiação, tanto a temperatura do arranjo, quanto a temperatura do ambiente, variaram de 24.4 a 23,6°C.

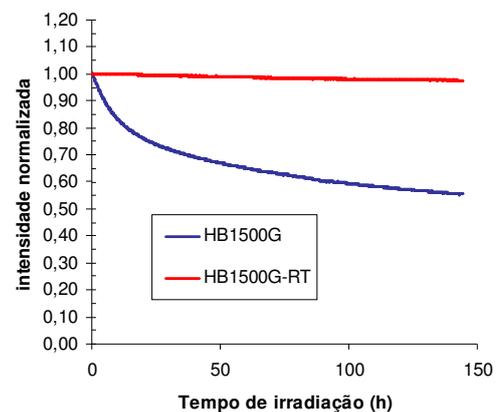


Fig. 2. Intensidade de luz transmitida nas fibras durante a irradiação, normalizada em relação ao valor da intensidade antes da irradiação.

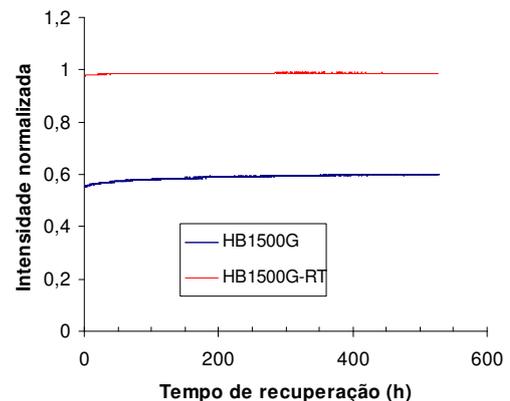


Fig. 3. Intensidade de luz transmitida nas fibras após a irradiação, normalizada em relação ao valor da intensidade antes da irradiação.

O número de centros de cor e suas respectivas vidas médias são obtidos a partir de um ajuste por mínimos quadrados dos parâmetros da Eq. 5 (durante a irradiação) e da Eq. 7 (após a irradiação). Nas Fig. 4 e 5 são apresentados os ajustes realizados com os valores de atenuação das fibras calculados a partir dos dados experimentais durante a irradiação.

Com relação à fibra comum (Fig. 4) o melhor ajuste foi conseguido para duas armadilhas (M=2), com chi-quadrado reduzido igual 0,611 e coeficiente de correlação R^2 igual a 0,993. As vidas médias, calculadas a partir dos parâmetros obtidos nos ajustes para as duas armadilhas, foram de $9,99 \pm 0,06$ e 115 ± 1 horas, respectivamente. A atenuação tende, para longos tempos de irradiação, a um valor assintótico de $160,4 \pm 0,4$ dB/Km.

No caso da fibra resistente à radiação (Fig. 5), o melhor ajuste (chi-quadrado reduzido igual a 0,0256 e coeficiente de correlação R^2 igual a 0,99) é obtido assumindo apenas um

centro de cor (M=1), com vida média de 202±5 h. A atenuação observada desta fibra é pouco acentuada de modo que houve pequena variação entre a atenuação no início e no final da irradiação. Nas primeiras 20 horas de irradiação a atenuação em função do tempo não obedeceu ao comportamento previsto pela Eq. 5, provavelmente por ter sido a medida influenciada pela variação de temperatura do arranjo irradiado, associado à pequena variação do sinal decorrente do efeito da radiação. Esta instabilidade do sinal pode ter mascarado a visualização do efeito de armadilhas de meia vida curtas (menores de 10 horas). Para as armadilhas com vida média de 202 horas, mais longa, portanto, do que o tempo de irradiação, os dados obtidos não são suficientes para caracterizar o comportamento dessa fibra em termos de centros de cor. Medidas adicionais devem ser realizadas, utilizando comprimentos de fibras maiores, visando caracterizar esses parâmetros com menores tempos de irradiação.

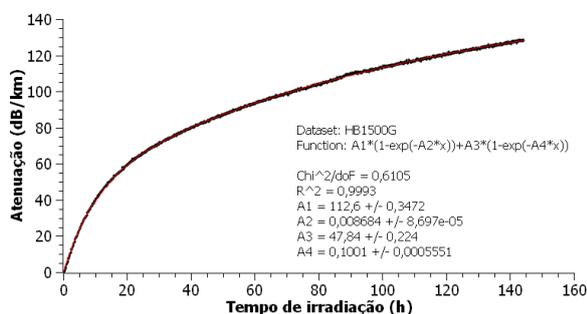


Fig. 4. Ajuste da função à atenuação medida durante a irradiação para a fibra comum HB1500G.

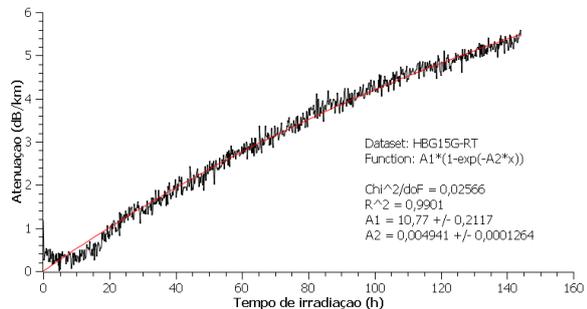


Fig. 5. Ajuste dos parâmetros da atenuação medida durante a irradiação para a fibra tolerante à radiação HB1500G-RT

Nas Figs. 6 e 7 são apresentados os ajustes realizados para a obtenção da vida média dos centros de cor das duas fibras a partir dos dados colhidos durante o período de recuperação das fibras, ou seja, após o término de irradiação. Neste caso, são ajustados para cada fibra os parâmetros da Eq. 7, permitindo determinar a vida-média das armadilhas devida ao efeito térmico. No caso da fibra comum, Fig. 6, o melhor ajuste também é obtido supondo dois centros de cor com meias vidas de efeito térmico de aproximadamente 62 e 8503h. Para a Fibra resistente à radiação, Fig. 7, o melhor ajuste é obtido, novamente, assumindo-se dois centros de cor com vidas médias de aproximadamente 28 e 1482h.

Novamente, no caso da fibra resistente à radiação, esses resultados indicam a necessidade da realização de medidas com amostras de fibras ópticas de maior comprimento, para uma melhor definição da variação da atenuação dessa fibra ao longo do tempo.

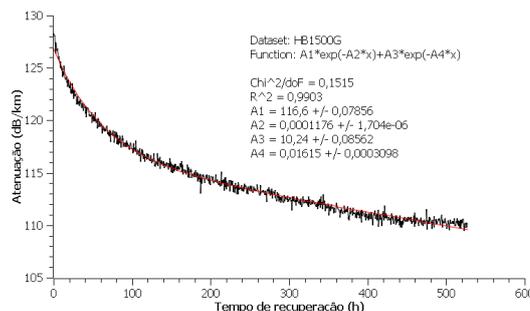


Fig. 6. Ajuste da Eq. 7 à atenuação medida após a irradiação para a fibra comum HB1500G

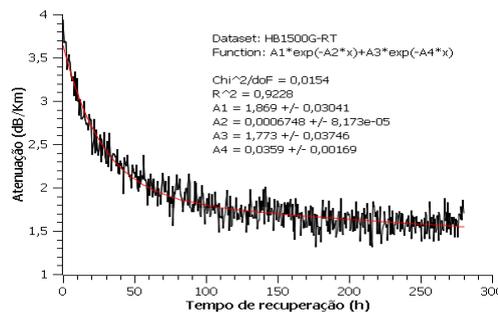


Fig. 7. Ajuste da Eq. 7 à atenuação medida após a irradiação para a fibra tolerante à radiação HB1500G-RT

V. CONCLUSÃO

Os modelos físicos apresentados permitiram explicar a atenuação durante as irradiações com base em dois centros de cor. Contudo, novos experimentos devem ser planejados para melhor compreender a dinâmica de formação desses centros. Para viabilizar medidas com diferentes taxas de dose é fundamental que experimentos com maiores comprimentos de fibras ópticas sejam realizados, já que a atenuação é função do comprimento da fibra.

Os demais componentes presentes no arranjo da Fig.1 deverão ser também avaliados quanto à sua suscetibilidade à radiação ionizante. A plataforma desenvolvida deverá ser utilizada para a realização dessas avaliações, expondo, em cada caso, um componente de interesse e blindando os demais. A plataforma não será utilizada para avaliação dos SLDs. Nesse caso, um aparato diferente será utilizado, o qual medirá diretamente a emissão do SLD em função da dose acumulada para diversas taxas de dose.

REFERÊNCIAS

- [1] O. L. Gonzalez et al. "Projeto PEICE: Efeitos da Irradiação de Componentes Elet4ônicos e Fotônicos", *Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento*, vol. 1, pp.118, São José dos Campos: Instituto de Estudos Avançados, 2008.
- [2] C. A. Federico et al. "Estudo da dose Devida à Radiação C4smica no Espaço A4reo Brasileiro". Trabalho submetido ao VII SITRAER/II RIDITA, 3-5 nov 2009, São Paulo.
- [3] H. Lefèvre, "The Fiber-Optic Gyroscope", Artech House, Inc., Norwood, M.A, 1993
- [4] E. J. Friebele, M. E. Gingerich, D.L. Griscom. "Survivability of Optical fiber in Space". *SPIE: Optical Materials Reliability and Testing: Benign and Adverse Environment*, vol. 1791, pp. 177-188, 1992..