

文章编号: 1001-3806(2005)02-0148-02

基于太空环境下的光纤辐照损伤理论

张 蓓, 李荣玉*, 俞忠兴, 王 炯, 韦正辉

(上海交通大学 光纤技术研究所 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200030)

摘要: 为了用实验室中得到的数据来模拟光纤在太空环境中的辐照损伤情况, 通过将辐照损伤效应考虑为激励及响应过程的叠加, 提出了一种新的理论模型。光纤在太空环境下的可能受到的最主要的辐照情况是宇宙背景辐射和太阳耀斑。针对背景辐射均匀稳定, 剂量速率较小和太阳耀斑突发、剂量速率大的特点, 对激励函数进行不同处理, 从而得到不同的理论模型。结果表明, 综合不同模型, 可得到一种可行的理论方法来预测太空中的光纤损耗。

关键词: 光纤; 辐照; 背景辐射; 太阳耀斑

中图分类号: TN913.7 **文献标识码:** A

Theory of radiation-induced absorption in optical fibers in space environment

ZHANG Ben, LI Rong-yu, YU Zhong-xing, WANG Jiong, WEI Zheng-hui

(National Laboratory on Local Fiber-Optical Communication Networks Advanced Optical Communication System, Institute of Optical Fiber Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Treating radiation-induced absorption as superposition of process of excitation and response, a new model is proposed to describe the radiation-induced absorption in optical fibers in space environment using the data obtained in the ground-based laboratory. There are two kinds of most important radiation in space environment: background radiation which is stable and low radiation rate and solar flare which is paroxysmal and high radiation rate. Considering the different characteristics of background radiation and solar flare, the exciting function is treated in different ways, resulting in different models. Synthesizing the different models, a new theory is obtained out to describe the loss of optical fiber in space environment.

Key words: optical fiber; radiation; background radiation; solar flare

引 言

光通信自从问世 30 多年以来, 已经成为现代传输通信网的主体, 光纤由于其损耗低、速率高、体积小、质量轻和抗静电干扰等优点, 也成为通信网中的重要传输媒质。随着光纤技术的发展, 它在通信领域的应用也越来越广泛。尤其随着我国航天事业的快速发展, 太空卫星、载人飞船, 乃至未来的空间站中的通讯系统都处于长期的辐照环境中, 而光纤在太空环境中的抗辐照能力则成为必须考虑的问题。如何通过实验室中数据来模拟及推算太空中光纤的辐照损伤情况, 本文中试图针对太空中不同的辐照情况, 对这一问题做一些探讨。

1 理论基础

在以前的一些研究中, 通过对大量实验数据的分

作者简介: 张 蓓 (1978-), 男, 硕士研究生, 从事光纤技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ryli@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2004-03-24; 收到修改稿日期: 2004-06-16

析, 人们发现光纤的辐照损伤公式可以用下面这个方程来描述^[1,2]:

$$A = aD^b \quad (1)$$

式中, A 是辐照损耗, D 是总的辐照剂量, a 和 b 是常数, 可以通过实验数据来确定。但是 (1) 式只反应出了辐照损耗和总的辐照剂量之间的关系, 而不能反应辐照损耗和辐照剂量速率之间的关系。由于太空中的辐照剂量速率一般都小于地面实验中所采用的剂量速率, 而且在太空环境中, 既有长时间的、较低剂量速率的背景辐射, 又有突发的、较高剂量速率的太阳耀斑等现象。它们的剂量速率, 辐照时间和总辐照剂量都不尽相同, 所以, 上述公式并不能很好的预测太空环境中的辐照现象。

本文中的理论模型是假定线性叠加效应成立, 即色心的产生是一个线性效应。所以, 整个过程可以看作是极小时间内依次发生各个独立事件的线性叠加^[3]。若整个事件是在 $0 \sim t$ 时间内发生的, 则:

$$R(t) = \int_0^t f(t') h(t-t') dt' \quad (2)$$

式中, $R(t)$ 是总的响应函数, 用来描述从 0 到 t 的整个响应; $f(t')$ 是在 t' 时刻的激发损耗的激发函数, 表示

为辐照剂量速率; $h(t-t')$ 是响应函数, 代表系统对激励的响应, 反应辐照后的恢复, $(t-t')$ 代表被辐照后系统有 $(t-t')$ 的时间来完成响应 (即恢复时间)。

石英光纤受到辐照后会产生损伤, 但在辐照的同时由于热退火的作用而会部分恢复, 其恢复过程可用下面这个公式来描述^[2,4]:

$$A = (A_0 - A_f) (1 + ct)^{-1/(n-1)} + A_f \quad (3)$$

式中, A_0 和 A_f 是由辐照导致的初始附加损耗和最终附加损耗; n 是由材料决定的动力学常数:

$$c \equiv (1/\tau) (2^{n-1} - 1) \quad (4)$$

式中, τ 是半恢复期, 即为 $A - A_f$ 从 $A_0 - A_f$ 恢复到 $1/2(A_0 - A_f)$ 的时间。

则可以假定 (2) 式中的响应函数 $h(t-t')$ 是与 (3) 式对应的, 而激励函数 $f(t')$ 由与时间有关的剂量速率函数 $D'(t')$ 给出。则 (2) 式变为:

$$A(t) = \int_0^t f'(t') \{ (a_0 - a_f) \times [1 + c'(t-t') \bar{J}^{n-1} + a_f] dt' \quad (5)$$

式中, a_0 和 a_f 是 (3) 式中 A_0 和 A_f 的微元形式, c 的定义与 (4) 式基本相同, 只是这里的参数 τ 表示的是每个极小时间激励过程的半衰期。

1.1 背景辐射

在太空中, 最重要的辐射就是宇宙空间的背景辐射。背景辐射的特点是均匀稳定的, 在这种情况下, a_0 和 a_f 都是相对稳定的量, 可作为常数提出积分符号。由于每个激励过程的半衰期 τ 都相对稳定, 所以 c 也可认为是一个稳定的量来处理。则对 (5) 式积分运算, 可以得到:

$$A_b(t) = a_0 D_b(t) - \frac{(a_0 - a_f) c'}{n-1} \times \int_0^t f_b'(t') [1 + c'(t-t') \bar{J}^{n-1} dt' \quad (6)$$

因为背景辐射的均匀性, 辐照剂量速率可以认为是常数, 而总的辐照剂量可以认为是时间的线性函数, 即 $D_b(t) = D_b'(t) t$ 。带入 (6) 式并进行积分运算, 得到:

$$A_b(t) = a_0 D_b(t) - (a_0 - a_f) D_b'(t) \times \left\{ t + \frac{n-1}{c'(n-2)} \left[1 - (1 + c't)^{\frac{n-2}{n-1}} \right] \right\} \quad (7)$$

1.2 太阳耀斑

在太空环境中, 另一个不能忽视的辐射是太阳耀斑。在以前的一些相关文章中, 对于太阳耀斑现象产生的辐射效应都讨论较少, 实际上虽然太阳耀斑现象发生的时间较为短暂, 但是由于其辐照剂量速率远大于背景辐射, 为其数十倍甚至上百倍^[5], 故其所造成的影响也是不能忽视的。

太阳耀斑是多种多样的, 根据形态和性质的不同,

学者对太阳耀斑进行了分类。由于各人运用的资料不同, 以及分类的依据和参量不同, 得出了许多不同的分类标准^[6]。其中根据所感兴趣的流量特性来分, 太阳耀斑可分为“脉冲耀斑”和“缓变耀斑”两大类^[6,7]。

对于脉冲耀斑, 特点是其射线流量呈尖峰脉冲结构, 其周期在 1s 以下, 而尖峰结构的上升和衰减时间在 10ms ~ 100ms 之间。所以对于脉冲耀斑, 可以把 $D_i'(t')$ 作为一个幅值为 $D_i(t')$ 脉冲函数来处理。设在 t_i 时刻发生脉冲耀斑, 则 $D_i'(t') = D_i(t') \delta(t_i)$ 。带入 (5) 式即得到:

$$A_i = D_i'(t_i) \{ (a_0 - a_f) [1 + c'(t-t_i) \bar{J}^{n-1} + a_f] \quad (8)$$

对于缓变耀斑, 由于其爆发过程会持续一个较长的时间 (几分钟甚至几十分钟), 所以, 不能再将其视为脉冲函数处理。事实上, 它的流量变化并不规则, 其数学模型也是相当复杂的。但由于其变化较为平缓, 且相对于整个辐照过程来讲, 它的辐照时间也是很短暂的。所以在许多相关的研究中^[5,8], 都采用其爆发过程中的平均剂量速率作为模拟实验的辐照剂量速率。设辐照平均剂量速率为 $D_g'(t')$, 辐照时间是从 t_1 开始, 到 t_2 结束。与 (6) 式类似, a_0 , a_f 和 c 均可认为是常数来处理, 由 (5) 式得:

$$A_g(t) = a_f D(t_2) + (a_0 - a_f) D(t_2) \times [1 + c'(t-t_2) \bar{J}^{n-1} - \frac{(a_0 - a_f) c'}{n-1} \times \int_{t_1}^{t_2} f_g'(t') [1 + c'(t-t') \bar{J}^{n-1} dt' \quad (9)$$

经过积分运算后可得:

$$A_g(t) = a_f D(t_2) + (a_0 - a_f) D(t_2) \times [1 + c'(t-t_2) \bar{J}^{n-1} - \frac{(a_0 - a_f) c'}{c'} D_g'(t_2) \times \{ c't_2 [1 + c'(t-t_2) \bar{J}^{n-1} - c't_1 [1 + c'(t-t_1) \bar{J}^{n-1} + \frac{n-1}{n-2} [1 + c'(t-t_2) \bar{J}^{n-2} - \frac{n-1}{n-2} [1 + c'(t-t_1) \bar{J}^{n-2} \} \quad (10)$$

2 结 论

通过以上分析可以看出, 通过将辐照损伤效应考虑为激励及响应过程的叠加, 导出了一个新的方程来描述光纤在辐照环境中的辐照损伤情况。这个方程很好地反应了辐照损耗和辐照剂量速率之间的关系。并且通过对辐照剂量速率函数即激励函数的不同处理, 即可实现对不同辐照条件下 (在太空环境中主要为背景辐射和太阳耀斑) 的辐照损伤模拟。从而解决了以往在实验室里难以模拟太空环境而造成石英光纤辐照损耗难以推算的困难, 这样, 就为在实验室中预测太空

(下转第 164 页)

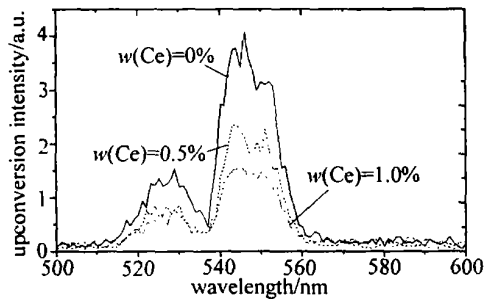


Fig 5 Comparisons of upconversion intensities of various samples

玻璃上转换发光图。从图中可以看出,在相同抽运条件下,随着 Ce^{3+} 的离子浓度的增加,上转换发光强度逐渐减弱。因此, Ce^{3+} 离子的加入为 Er^{3+} 离子 $^4 I_{1/2} \rightarrow ^4 I_{3/2}$ 的跃迁提供了通道,从而缩短粒子在 $^4 I_{1/2}$ 能级上的寿命,增加激光上能级 $^4 I_{3/2}$ 的集居数,提高了 976nm 抽运的效率。

3 结论

分别以 TeO_2 , Nb_2O_5 , ZrO , Na_2O 和 TeO_2 , ZrO , Na_2O 为基质制备了掺铒碲酸盐玻璃 (EDTnb) 和碲酸盐玻璃 (EDT), 差热分析表明, EDTnb 玻璃具有更高的热稳定性。应用 McCumber 原理, 根据 EDTnb 玻

璃和 EDT 玻璃的吸收谱研究了两种玻璃的光谱特性。结果表明, EDTnb 玻璃在 1.53 μ m 处的峰值受激发射截面为 $8.9 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, 大于 EDT 玻璃的值, 而其受激发射截面的有效带宽为 65.7nm, 与 EDT 玻璃的值几乎相同。因此, Nb_2O_5 的加入可明显改善碲酸盐玻璃的热稳定性, 并使其在 1.53 μ m 处的受激发射截面大约提高 8%。

参考文献

- [1] WANG J S, VOGEL E M, SNIZER E Tellurite glass a new candidate for fiber devices [J]. *Opt Mater*, 1994, 3(4): 187~203.
- [2] KOLOBKOVA E V, LIPOVSKII A A, MONTETOC J *et al* Formation and modelling of optically waveguiding structures in a high-concentration Er-doped phosphate glass [J]. *J Phys*, 1999, D32L: 9~12.
- [3] McCUMBER D E Theory of phonon-terminated optical masers [J]. *Phys Rev*, 1964, A134(2): 299~306.
- [4] MINISCALCO W J, QUIMBY R S General procedure for the analysis of Er^{3+} cross sections [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(4): 258~260.
- [5] ROLL I R, MONTAGNA M Erbium-doped tellurite glasses with high quantum efficiency and broadband stimulated emission cross section at 1.5 μ m [J]. *Opt Mater*, 2003, 21(4): 743~748.
- [6] CHOI Y G, LIM D S, KIM K H *et al* Enhanced $^4 I_{1/2} \rightarrow ^4 I_{3/2}$ transition rate in Er^{3+}/Ce^{3+} -codoped tellurite glasses [J]. *Electron Lett*, 1999, 35(20): 1765~1767.

(上接第 149 页)

中光纤损耗提供了一种可行的理论计算方法。当然, 也由前面的分析可知, 这种计算方法对于恢复特性比较明显的光纤才有用, 比如说掺 Ge 的光纤, 掺 P 的光纤计算起来就要出错了。不过在实际辐照环境中, 一般不使用掺 P 的光纤, 所以推出的理论模型还是很有意义的。

参考文献

- [1] PFEFFER R L. Damage center formation in SiO_2 thin films by fast electron irradiation [J]. *J A P*, 1985, 57: 5176~5180.
- [2] FRIBELE E J, LONG K J, ASKINS C G Overview of radiation

effects in fiber optics [J]. *SPIE*, 1985, 541: 70~88.

- [3] LUDTH, JOHNSTON A R. Theory of radiation-induced absorption in optical fibers [J]. *Opt Lett*, 1994, 19(8): 548~550.
- [4] FRIBELE E J, GINGERICH M E, GRISCOM D L. Survivability of optical fibers in space [J]. *SPIE*, 1993, 1791: 177~188.
- [5] OTTM N. Radiation effects data on commercially available optical fiber database summary [A]. *Radiation Effects Data Workshop [C]*. Phoenix: IEEE, 2002. 24~31.
- [6] 王家龙. 太阳耀斑的分类 [J]. *天文学进展*, 1994, 12(1): 11~19.
- [7] OHKIK, TAKAKURA T, TSUNETAS General aspects of hard X-ray flares observed by HINOTORI gradual burst and impulsive burst [J]. *Solar Physics*, 1983, 86: 301~312.
- [8] OTTM, FRIBERGER P. Technology validation of optical fiber cables for space flight environments [J]. *SPIE*, 2000, 4216: 206~217.