

光纤辐射致衰减效应

宋镜明 郭建华* 王学勤 胡姝玲

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 在空间辐射环境下, 光纤会产生辐射致衰减(RIA), 严重影响光纤在辐射环境中的应用。为了保证光纤在辐射环境中的工作性能, 需要对光纤辐射致衰减效应进行研究。从辐射与光纤相互作用的机理出发, 说明了辐射条件下引起光纤主要衰减的色心的形成和退化, 并详细分析了辐射条件、光纤参数和传导光波等因素对光纤辐射致衰减的影响。在此基础上, 总结了光纤辐射致衰减的主要模型, 包括幂律模型、多成分饱和指数模型和拓展多成分饱和指数模型等。最后, 介绍了光纤辐射致衰减效应的应用。

关键词 光纤光学; 辐射致衰减; 损耗; 辐射效应

中图分类号 O436.2; V520.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.080008

Radiation Induced Attenuation Effect for Optical Fibers

Song Jingming Guo Jianhua Wang Xueqin Hu Shuling

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract In space radiation environment, optical fiber can experience great attenuation additionally, which can bring many disadvantages for its application in radiation environment. In order to guarantee the performance of optical fiber in radioation environment, much attention should be paid for research on radiation induced attenuation (RIA) for optical fibers. Starting from the interaction mechanism between radiation and optical fiber, we explain the formation process of color centers, which are the primary reason for the RIA of optical fiber. More information about annealing of color centers is also mentioned. Then a detailed analysis of influence of related factors on RIA for optical fibers, such as radiation conditions, parameters of optical fiber and light waves characteristic, is given. A summary of the RIA models for optical fibers and a brief introduction to the application of the radiation-induced attenuation effects are also shown.

Key words fiber optics; radiation induced attenuation; loss; radiation effect

OCIS codes 060.2310; 350.5610; 060.2400; 060.2300

1 引言

光纤具有体积小、重量轻、结构灵活、抗电磁干扰和电绝缘的优点, 广泛应用于光通信和光纤传感^[1~3]。传输损耗是光纤性能最重要的指标之一, 决定了光信号在光纤中传输的最大距离和系统的稳定性。通常引起光纤损耗的主要因素有本征吸收、杂质吸收、瑞利散射损耗以及弯曲损耗^[4,5]等。通过对光纤制作工艺的改进, 目前光纤在 1.31 μm 和 1.55 μm 的损耗分别降到 0.3 dB/km 和 0.2 dB/km 左右^[6]。然而, 在空间等辐射环境中, 光纤损耗会显著增加, 即产生所谓的辐射致衰减(RIA)。而光纤的辐射致衰减比光纤的本征损耗高一个数量级以上, 成为了辐射环境下影响光纤光学系统性能的主要因素^[7]。

本文从辐射与光纤的相互作用出发, 在说明辐射条件下光纤中色心如何形成的基础上, 分析了辐射条件、光纤参数和传导光波特性等因素对光纤辐射致衰减的影响, 总结了光纤辐射致衰减的主要模型, 并简要

收稿日期: 2012-02-28; **收到修改稿日期**: 2012-03-28; **网络出版日期**: 2012-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(61007040)资助课题。

作者简介: 宋镜明(1974—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤陀螺、光纤传感与光纤空间应用等方面的研究。

E-mail: saskm@163.com

* **通信联系人**。E-mail: guojianhua581qq@163.com

介绍了光纤辐射致衰减效应在辐射传感和光学滤波中的应用。

2 光纤辐射致衰减效应

辐射条件下,辐射粒子如 γ 射线、电子等与光纤相互作用,导致光纤中大量色心的产生,色心对光纤中传导光有强烈的吸收作用,导致光纤衰减显著增加。但光纤中的色心并不完全稳定,可能会发生热退火和光致褪色等退化。因此,色心的产生和退化共同决定了光纤的辐射致衰减效应。

2.1 辐射与光纤相互作用

不同辐射粒子与光纤的相互作用如图 1 所示^[8]。光纤辐射效应可分为初级阶段、次级阶段和缺陷形成三个阶段。以 γ 射线为例,首先, γ 射线通过光电效应、康普顿散射和电子对效应等与光纤直接相互作用,导致光纤内原子电离出电子-空穴对;其次,当电子-空穴对被光纤中的本征缺陷、掺杂缺陷、杂质缺陷和辐射诱导缺陷等俘获,就会形成一种带有效电荷的特殊点缺陷。这种缺陷能束缚电子和空穴,引起光纤中的电子或空穴激发而产生光吸收。其吸收带常落在可见光范围,故称为色心。物质中能够引起光吸收(包括紫外和红外光吸收)的这类点缺陷中心统一称为色心。研究人员已经识别出了许多色心,如纯 SiO_2 纤芯光纤中的本征缺陷,包括非桥键氧空心(NBOHC)、过氧自由基(POR)、Si-E'心、自捕获空穴心(STH);P掺杂光纤中的POHC心和P1色心等^[9]。但目前还有许多色心未被识别出来,如掺锗光纤中的近红外吸收色心^[10]。

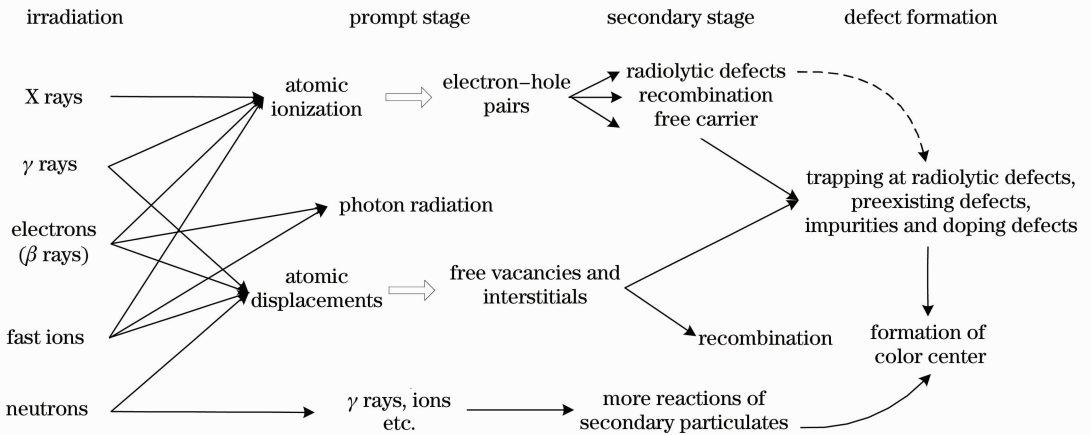


图 1 辐射与光纤相互作用示意图

Fig. 1 Sketch map of interaction between radiation and optical fiber

2.2 热退火效应

在特定温度条件下,光纤中的色心有稳定和不稳定两种。稳定色心一旦形成就不再退去,在辐照后也能稳定存在于光纤中,并形成稳定的光吸收。而不稳定色心则在热驱动下发生退化。因此,在辐照后的光纤衰减并不稳定,而会发生所谓的热退火效应。

热退火效应是色心退化的一种重要表现,与光纤有关,且在不同的波长具有不同的表现形式。例如,P掺杂石英光纤有两种主要色心——POHC色心和P1色心,这两种色心的吸收谱在1200~1400 nm处相接。两种色心的不同温度特性导致P掺杂光纤在长波和短波段的退火效应不同:经过辐照的P掺杂光纤中的POHC色心会发生分解,导致该色心吸收波段(小于1200 nm)的RIA随退火时间的增加而有所降低,最后趋于稳定(称为退火类型1);而“退火”后P掺杂光纤中短波段的光吸收色心POHC分解过程中向P1色心转化,导致该色心的吸收波段(大于1400 nm)RIA在辐照后随时间有所增加(称为退火类型2)^[11]。

2.3 光褪色效应

光纤中色心退化还受到光纤中传导光的影响。如果在光纤辐照过程中,将传导光由“弱光”换成功率较大的“强光”,光纤中色心的数目会发生退化,导致光纤衰减明显偏离“弱光”时的衰减曲线,这种现象被称为光褪色效应。一般认为,在传导光波长较短、环境温度较低时,光褪色效应比较明显^[12]。研究表明,在纯 SiO_2 纤芯光纤中的光褪色现象较为显著,而常温下,Ge掺杂光纤中的光褪色可以忽略^[13]。

3 光纤辐射致衰减影响因素分析

由以上分析,光纤辐射致衰减主要是光纤中色心光吸收的结果,而各种因素主要通过影响色心产生、色心退化而对光纤辐射致衰减产生作用。研究表明辐射环境因素、光纤参数以及传导光波特性等都会对光纤辐射致衰减产生影响。

3.1 辐射环境

辐射环境条件主要包括辐射类型、辐射总剂量、剂量率和温度等。

3.1.1 辐射类型

常见的辐射粒子包括 X 射线、 γ 射线、电子、质子、中子和重带电粒子等。不同辐射粒子会导致光纤色心的形成产生显著差异,从而影响光纤衰减。例如, X 射线只能使光纤中的原子发生电离损伤,而其他辐射粒子可以使光纤发生原子位移损伤,而中子还能与原子发生核反应生成次级辐射粒子,与光纤进行次级相互作用。不同辐射粒子与光纤相互作用不同,辐射响应也有差异,例如,在辐射总剂量相同的情况下, 60 MeV 的质子要比 γ 射线对光纤造成的损伤少 25%^[14]。

3.1.2 辐射总剂量与剂量率

辐射总剂量是光纤吸收辐射能量的多少,会对光纤中的色心形成和退化都产生显著影响。通常,在辐射剂量较小时,色心的形成占主导地位,光纤衰减随辐射剂量快速增加;当辐射剂量较大时,色心退化(主要是热退火)加剧,光纤衰减增加缓慢;最终,色心的形成和退化达到平衡,光纤衰减发生饱和。图 2 给出了在恒定辐射剂量率(0.06 Gy/min)的 γ 射线辐射条件下,一种普通 Ge 掺杂光纤的 RIA 随辐射剂量的变化曲线^[15]。可见,在该光纤的衰减随辐射剂量增加的同时,辐射感应度也逐渐变小,衰减曲线趋于平坦。

光纤辐射致衰减是色心产生和色心退化两个因素综合作用的结果。而辐射剂量率决定了单位时间内辐射到光纤中的能量。一般剂量率越低,色心退化越多,辐射致衰减越小。图 3 是相同辐射剂量条件下,一种 P 掺杂光纤在 1500 nm 和 1300 nm 波段的辐射感应度随辐射剂量率的变化关系^[16]。由图可见,总体上,该光纤的辐射感应度随辐射剂量率的增加而减小,但在 10 Gy/h 附近,辐射感应度变化较为平坦。

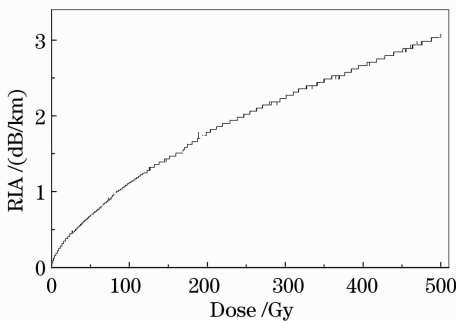


图 2 一种 Ge 掺杂光纤辐射致衰减随辐射总剂量的变化^[15]

Fig. 2 Change of RIA along with the total dose of radiation for a Ge-doped fiber^[15]

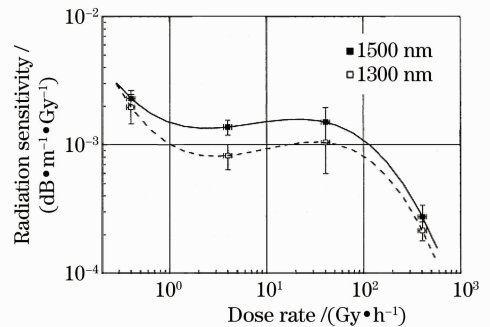


图 3 一种 P 掺杂光纤辐射感应度随辐射剂量率的变化关系^[16]

Fig. 3 Radiation sensitivity as a function of the dose rate of radiation for a P-doped fiber^[16]

3.1.3 温度

温度是微观粒子热运动程度的度量,对色心的稳定性会产生显著影响,是色心热退火效应的重要影响因素。一般认为,温度越高,色心退火越严重^[17]。图 4 给出三个温度条件下 Ge 掺杂光纤在辐射过程及辐射后的退火过程中 980 nm 波段辐射致衰减对比^[18]。可见,温度越高,该光纤辐射致衰减越小。

但也有研究表明,温度增加可能导致光纤中色心转化而引起光纤在特定波段的辐射致衰减随之减小,这可能是升温过程中一种色心向另一种色心转化的结果^[11,19]。总之,光纤的辐射致衰减受环境温度影响较为显著,理论解释需要进一步研究。

3.2 光纤参数

由于光纤辐射致衰减是辐射粒子与光纤中原子相互作用的结果,因此,几乎所有的光纤参数都会影响到

色心的形成和退化,从而对光纤辐射致衰减效应产生影响,例如材料、制作工艺、纤芯/包层掺杂、纯度、涂覆层材料和辐射历史等。

图5给出了一种 Ge-P(F1)光纤和两种 Ge-B 共掺杂光纤(F2,F3)在 γ 射线辐射下(剂量率 0.42 Gy/min) 1310 nm 波段的 RIA 随辐射总剂量的变化关系^[20]。三种光纤具有相同的掺杂浓度,其中光纤 F1 和 F2 都是由相同 SiO₂ 玻璃沉积控制而成,掺杂类型不同;光纤 F2 和 F3 的区别是采用的 SiO₂ 玻璃的杂质组分不同。由三种光纤的辐射致衰减曲线对比可知,不同掺杂对光纤 RIA 影响较为显著,而杂质组分也会对光纤的 RIA 产生影响。研究表明,不同掺杂浓度的光纤辐射致衰减特性也不相同^[21]。另外,光纤的辐射历史也会影响光纤的辐射感应度,如经过 γ +中子预辐照的纯 SiO₂ 纤芯光纤,要比纯 γ 射线预辐照处理过的光纤,在 RIA 的 γ 射线辐射感应度上更高一些^[22]。

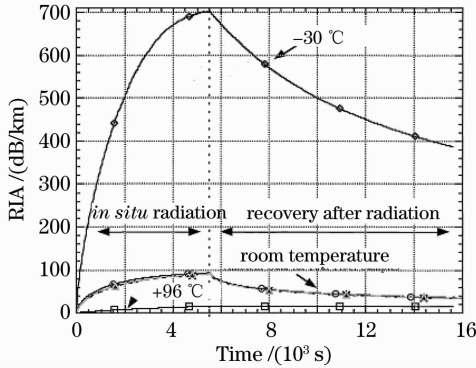


图4 三个温度条件下 Ge 掺杂光纤辐射衰减和退火曲线^[18]

Fig. 4 Growth and recovery of RIA in Ge-doped fibers irradiated at three temperatures^[18]

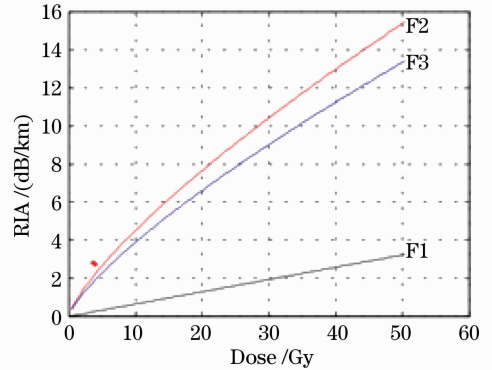


图5 一种 Ge-P 掺杂光纤和两种 Ge-B 共掺杂光纤的辐射致衰减随辐射总剂量的变化^[20]

Fig. 5 RIA data of a Ge-P co-doped fiber and 2 kinds of Ge-B co-doped fibers versus the total dose^[20]

3.3 传导光波特性的影响

辐射致衰减效应也受光纤中传导光波特性的影响。一般影响辐射致衰减的光波参数包括波长、光功率和测量时间等。由于色心在不同波段的吸收特性存在显著差异,因此,波长对光纤辐射致衰减效应的影响较为显著。图6给出了一种 Ge-Al 掺杂单模光纤在 γ 射线辐照前后的衰减谱线^[23]。可见,该光纤在 850 nm 和 1400 nm 波段有两个显著的 RIA 峰值,而且总体上近红外波段的辐射致衰减要比远红外波段明显。如 2.3 节所述,光褪色效应受光功率影响较大。因此,光功率的增加会加剧光纤辐射致衰减的光褪色效应,从而影响光纤的辐射响应。另外,通光测量时间也会对辐射致衰减产生影响^[8]。

4 光纤辐射致衰减模型

由于光纤辐射致衰减受辐射总剂量影响最为显著,目前的光纤辐射致衰减模型主要针对辐射致衰减-辐射剂量的关系。常见的模型包括幂律模型、多成分饱和和指数模型和拓展多成分饱和指数模型。

4.1 幂律模型

幂律模型是光纤辐射致衰减分析中最常见的一种经验模型,数学表达式为

$$A(D) = CD^f, \quad (1)$$

式中 A 表示光纤的辐射致衰减, D 为辐射总剂量, C, f 为实验常数。国外很多研究结构采用该模型对辐射致

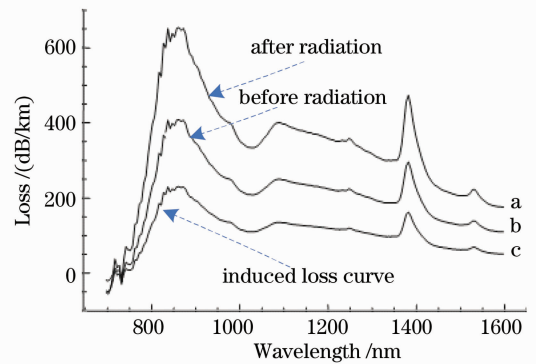


图6 一种 Ge-Al 共掺杂光纤传输谱线的辐射响应^[23]

Fig. 6 Effect of transmission wavelength on the radiation response of Ge-Al co-doped fiber^[23]

衰减数据进行分析,并且已采用该模型成功地对多种光纤的辐射衰减数据进行了拟合^[14]。但是该模型是经验模型,没有明确的物理意义,而且也有与实验不符的情况^[25]。

4.2 多成分饱和指数模型

多成分饱和指数模型假定光纤辐射致衰减 A 取决于单位长度光纤中色心的数目 n 及色心对光信号的吸收能力,并采用能带理论分析光纤中色心数密度与辐射剂量之间的关系。该理论认为,色心会在相应的缺陷能级上由于激发跃迁到导带而使色心退化。假设每种色心具有各自的寿命 τ_i ,则辐射过程中光纤某个缺陷能级的色心数目变化率可表示为

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = k_i \dot{D} - \frac{n_i(t)}{\tau_i}, \quad (2)$$

式中 n_i 为第 i 个能级的色心数目, \dot{D} 为辐照剂量率, $k_i \dot{D}$ 表示色心产生的速率, k_i 为色心产生数目相对于辐照剂量的比例因子。

假设辐照开始时色心数目为零,求解(2)式,并考虑光纤中有多个色心,光纤辐射致衰减与色心数密度成正比,最后得到光纤辐射致衰减的多成分指数模型^[26]:

$$A(D) = \sum_{i=1}^n a_i [1 - \exp(-D/D_{si})], \quad (3)$$

式中 a_i 为实验常量, D_{si} 为第 i 个缺陷能级的色心饱和剂量,即色心生成和退化达到平衡时的辐射剂量。2011年,研究人员通过对单模光纤、多模光纤、保偏光纤、掺铒光纤(EDF)以及光子晶体光纤的多成份饱和指数模型的拟合对比分析,认为多成分饱和指数模型要优于幂律模型^[27]。

实际上,该模型假设所有色心都不稳定,即色心寿命有限。但在特定条件下,有些色心可以稳定存在。因此,解(2)式时应考虑这种情况,此时方程的解为

$$A_j(t) = b_j D(t), \quad (4)$$

式中 b_j 表示此类色心对光的吸收能力,是一个与色心生成系数、色心对光的吸收系数、辐照剂量率、色心寿命有关的量。因此,光纤辐射致衰减与辐照剂量的关系应该考虑两种色心更为合适,即

$$A(D) = \sum_{i=1}^{n_1} a_i [1 - \exp(-D/D_{si})] + \sum_{j=1}^{n_2} b_j D. \quad (5)$$

4.3 拓展多成分饱和指数模型

拓展多成分饱和指数模型表达式为

$$A(D) = C_0 D^f + \sum_{i=1}^n a_i \left\{ 1 - \exp \left[\left(-\frac{D}{D_{si}} \right)^f \right] \right\}. \quad (6)$$

该模型是幂律模型和饱和指数模型的综合,相当于把将饱和指数模型的变量 D 换成了 D^f ($0 < f < 1$),并加上幂律表达式,来“补偿”单一幂律模型在曲线拟合上的不足。拓展多成分饱和指数模型拟合光纤辐射致衰减-辐射剂量也取得了很好的效果^[25,28]。

另外,2010年 Gilard 等^[29]假设色心的复合速率受到色心扩散过程的限制,提出了一种解释辐射致衰减随辐射剂量、剂量率和温度的变化关系的扩散动力学模型,也与实验结果具有很好的一致性。

5 光纤辐射致衰减的应用

利用光纤辐射致衰减效应与辐射剂量之间的关系,合理选择光源、光纤,可以研制光纤辐射传感器。由于纯 SiO_2 光纤的辐射感应度很小,通常要通过掺杂来提供光纤的辐射感应度,其中 P 掺杂光纤常被用于研制辐射致衰减型光纤辐射传感器^[21]。文献^[23]中报道的 P 掺杂光纤能探测的最小电离辐射剂量能达到 2×10^{-3} Gy。

辐射不仅改变光纤在特定波长的输出光功率,同时对光纤的输出光谱有调制作用。因此,可以选择适当光纤,进行特定的辐照处理,用于光学滤波^[30]。可能由于光纤辐射效应的控制难度较大,相关研究较少。

6 结束语

从辐射与光纤相互作用出发,说明了辐射条件下导致光纤主要衰减的色心的产生和退化。在此基础上,

分析了辐射条件、光纤参数和传导光波等因素对光纤辐射致衰减的影响,并总结了光纤辐射致衰减的主要模型。最后,简要介绍了光纤辐射致衰减效应在辐射传感和光学滤波中的应用,对光纤辐射效应及其应用的研究有一定意义。

参 考 文 献

- 1 Meng Li, Pan Zhengqing, Geng Jianxin *et al.*. A short-cavity phosphate glass fiber laser and its output characteristics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 362~366
孟 莉,潘政清,耿建新等.短腔磷酸盐玻璃光纤激光器及其输出特性[J].中国激光,2010,**37**(2):362~366
- 2 Yuan Libo. Overview and forecast of fiber optic white light interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900137
苑立波.光纤白光干涉技术的回顾与展望[J].光学学报,2011,**31**(9):0900137
- 3 Hong Lingfei, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Frequency tracking and locking methods in resonator micro-optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0905003
洪灵菲,张春熹,冯丽爽等.谐振式微光学陀螺频率跟踪与锁定技术研究[J].中国激光,2011,**38**(9):0905003
- 4 Lü Yuelan, Xing Yongwei. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0819001
吕月兰,行永伟.相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J].光学学报,2011,**31**(8):0819001
- 5 Jiang Yajun, Zhao Jianlin, Tang Daqing *et al.*. Measurement of the bending loss of single-mode fiber by use of fiber loop cavity ring-down technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 971~975
姜亚军,赵建林,汤大卿等.利用光纤环腔衰荡技术测量单模光纤的弯曲损耗[J].光学学报,2010,**30**(4):971~975
- 6 Yuan Rong. Fiber Communication [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 57~58
原 荣.光纤通信[M].北京:电子工业出版社,2010.57~58
- 7 F. Berghmans, E. Brichard, A. F. Fernandez *et al.*. An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors [C]. *Optical Waveguide Sensing and Imaging*, 2008, 127~165
- 8 David L. Griscom. Self-trapped holes in glassy silica; basic science with relevance to photonics in space [C]. *SPIE*, **8164**: 816405
- 9 David L. Griscom. Trapped-electron centers in pure and doped glassy silica: a review and synthesis [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2011, **357**(8-9): 1945~1962
- 10 Elise Regnier, Ivo Flammer, Sylvain Girard *et al.*. Low-dose radiation induced attenuation at infra-red wavelengths for P-doped, Ge-doped and pure silica-core optical fibres [J]. *IEEE Trans. Nuclear Science*, 2007, **54**(4): 1115~1119
- 11 B. Brichard, P. Borgermans, F. Berghmans *et al.*. Dedicated optical fibres for dosimetry based on radiation-induced attenuation; experimental results [C]. *SPIE*, 1999, **3872**: 36~42
- 12 E. J. Friebele, C. G. Askins, M. E. Gingerich *et al.*. Optical fiber waveguides in radiation environments II [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1984, **1**(2-3): 355~369
- 13 R. H. West. Predicting the radiation induced loss in Ge doped optical fibres at different temperatures [C]. *Radiation and Its Effects on Components and Systems*, 1999, 483~490
- 14 E. J. Friebele, M. E. Gingerich, D. L. Griscom. Survivability of optical fibers in space [C]. *SPIE*, 1992, 177~188
- 15 Wang Xueqin, Zhang Chunxi, Jin Jing *et al.*. Radiation-induced attenuation effect in hydroxyl-rich pure-silica-core photonic crystal fiber [J]. *Optik*, 2011, **122**(21): 19818~1921
- 16 B. Brichard, A. F. Fernandez, H. Oomsa *et al.*. True dose rate enhancement effect in phosphorous doped fibre optic radiation sensors [C]. *SPIE*, 1990, **5502**: 184~187
- 17 Roger A. Greenwell, Charles E. Barnes, David M. Scott *et al.*. Optical fibers in the adverse space environment: the space station [C]. *SPIE*, 1990, **1314**: 100~104
- 18 J. McFadden, R. Greenwell, J. Hatch *et al.*. Measurements and results of gamma radiation induced attenuation at 980 nm of single mode fiber [C]. *SPIE*, 1996, **2811**: 77~86
- 19 Y. Morita, W. Kawakami. Dose rate effect on radiation induced attenuation of pure silica core optical fibers [J]. *IEEE Trans. Nuclear Science*, 1989, **36**(1): 584~592
- 20 M. N. Ott, P. Friedberg. Technology validation of optical fiber cables for space flight environments [C]. *SPIE*, 2001, **4216**: 206~217
- 21 M. C. Paul, D. Bohra, A. Dhar *et al.*. Radiation response behavior of high phosphorous doped step-index multimode optical fibers under low dose gamma irradiation [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2009, **355**(28-30): 1496~1507

- 22 O. Deparis, J. Noel, M. Decréton. Radiation induced attenuation in SiO₂/F-SiO₂ fibres under low neutron flux [C]. Fourth European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 1997, 456~470
- 23 M. C. Paul, R. Sen, S. K. Bhadra *et al.*. Radiation response behaviour of Al codoped germano-silicate SM fiber at high radiation dose [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(5): 872~878
- 24 Duncan T. H. Liu, Alan R. Johnston. Theory of radiation-induced absorption in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8): 548~550
- 25 P. Borgermansa, B. Brichard, M. Decréton. Models for the radiation induced attenuation in pure silica optical fibres: spectral dependencies and absorption band kinetics [C]. *SPIE*, 2002, **4547**: 53~61
- 26 A. Presland, T. Wijnands, L. Jonge *et al.*. Gamma-ray induced optical absorption in Ge and P-doped fibres at the LHC [C]. Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2005, PA1
- 27 Wang Xueqin, Zhang Chunxi, Jin Jing. Radiation induced attenuation effect on special optical fibers applied in space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(11): 2516~2520
王学勤, 张春熹, 金靖等. 空间用特种光纤的辐射致衰减效应研究 [J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(10): 2516~2520
- 28 David L. Griscom. Fractal kinetics of radiation-induced point-defect formation and decay in amorphous insulators: application to color centers in silica-based optical fibers [J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **64**(17): 174201
- 29 O. Gilard, M. Caussanel, H. Duval. New model for assessing dose, dose rate, and temperature sensitivity of radiation-induced absorption in glasses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **108**(9): 093115
- 30 Yin Zongmin, Li Xinwan, Yu Xiaojing. The fiber-optic filtering under γ -radiation [J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 1995, **29**(6): 88~90
殷宗敏, 李新碗, 余筱箭. 光纤辐照的光学滤波作用 [J]. *上海交通大学学报*, 1995, **29**(6): 88~90