

doi:10.3788/gzxb20134211.1272

# 辐射剂量对光纤辐射致衰减及温度依赖性的影响

金靖, 徐烧美, 刘纪勋, 宋凝芳

(北京航空航天大学 光电技术研究所, 北京 100191)

**摘要:**研究了辐射剂量对光纤辐射致衰减及其对辐射致衰减温度依赖性的影响. 对锗磷光纤进行不同辐射剂量的辐照, 搭建了光纤辐射致衰减实验装置用以分析辐射剂量对光纤辐射致衰减的影响. 用辐照并充分退火后的光纤搭建光纤辐射致衰减温度依赖性实验装置进行测试, 对锗磷掺杂光纤的辐射致衰减与辐射剂量间进行了模型分析. 分析发现: 锗磷掺杂光纤在 1 310 nm 的辐射致衰减主要取决于 P1 心, 但吸收峰位于紫外可见波段的 POHC 色心等也会对光纤在 1 310 nm 波段的光纤辐射致衰减产生影响, 尤其是在高辐照剂量的情况下. 实验结果表明, 随着辐照剂量的增加, 光纤的辐射致衰减显著增加. 经过不同辐射剂量辐照并充分退火的锗磷光纤, 在  $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$  温度范围内光纤辐射致衰减具有单调稳定的温度依赖性. 且光纤辐射致衰减的温度灵敏度随着辐照剂量的增加而增加. 该研究不仅可以使光纤在复杂辐射环境中更好地使用, 而且还可以利用光纤辐射致衰减稳定的温度依赖性研制温度传感器.

**关键词:** 光纤光学; 温度依赖性; 辐射致衰减; 多成分饱和指数模型

中图分类号: O436.2; V520.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)11-1272-5

## Effect of Radiation Dose on Radiation-induced Attenuation and Temperature Dependence in Optical Fiber

JIN Jing, XU Rao-mei, LIU Ji-xun, SONG Ning-fang

(*Institute of Optics and Electronics, Beihang University, Beijing 100191, China*)

**Abstract:** The effect of total dose on radiation-induced attenuation and temperature dependence of radiation-induced attenuation in optical fibers was investigated. The Ge-P doped fibers were irradiated with different total doses and test systems for radiation induced attenuation and temperature dependence were built up. The relation between radiation induced attenuation and radiation dose was analyzed. The results show that the radiation induced attenuation at 1 310 nm in fiber is primarily dependent on P1 center. The POHC center also has obviously effect on radiation induced attenuation at 1 310 nm irradiated at high dose. The radiation induced attenuation in fiber increases with increasing radiation dose. The radiation induced attenuation of irradiated Ge-P doped fibers after sufficient annealing exhibit steady and monotonic temperature dependence in the temperature range from  $-40$  to  $60^{\circ}\text{C}$ . The higher radiation dose, the stronger temperature dependence of radiation induced attenuation in the irradiated fiber there will be. The investigation on total dose influencing radiation induced attenuation and temperature dependence in Ge-P co-doped fibers can better apply the optical fiber in complex radiation environment and utilize stable temperature dependence of radiation induced attenuation for temperature sensor.

**Key words:** Fiber optics; Temperature dependence; Radiation induced attenuation; Multi-components saturating exponential model

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61007040)资助

第一作者: 金靖(1975-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术和辐射效应. Email: jinjing@buaa.edu.cn

通讯作者: 徐烧美(1989-), 女, 硕士, 主要研究方向为光纤传感和辐射效应. Email: xuraomei@163.com

收稿日期: 2013-05-03; 录用日期: 2013-06-09

## 0 引言

光纤具有体积小、重量轻、结构灵活、电绝缘性好、抗电磁干扰等优点,现已作为重要的信息功能材料,广泛地应用于数据通信、传感器等领域<sup>[1]</sup>.在空间等辐射环境中,光纤的损耗会显著增加,即所谓的辐射致衰减(Radiation Induced Attenuation, RIA)<sup>[2-3]</sup>.在辐射条件下,光纤中的原子与辐射粒子相互作用时会引起光纤的电离或者位移损伤,这些损失主要表现为辐射致衰减效应<sup>[4]</sup>.

光纤中的吸收缺陷,即色心是引起辐射致衰减的原因.经过30年的研究,已经识别出了多种色心<sup>[5-7]</sup>.但是目前还是有很多色心未被识别出来,如掺锗光纤中的近红外色心.之前研究普遍认为,由于高温退火引起色心退化从而使得温度越高光纤的辐射致衰减越小.然而在2001年,SCK. CEN核研究中心的P. Borgermans等在掺磷光纤和掺铈光纤中观察到了辐射致衰减随温度增加<sup>[8]</sup>.法国科学家S. Girard认为掺磷光纤中温度推动的POHC色心向P1色心的转化造成了在近红外波段相反的温度依赖性<sup>[9]</sup>.磷掺杂光纤中的近红外波段的P1色心的吸收峰位于1 620 nm附近,且其吸收能力特别强.在1 310 nm波段,光纤受P1色心的影响辐射致衰减显著增加,使掺磷光纤的辐射致衰减比无磷光纤的辐射致衰减高约一个数量级<sup>[10]</sup>.研究表明,在相当长的高温退火后,辐照后的光纤辐射致衰减的温度特性趋于稳定,此时光纤辐射致衰减的温度特性主要取决于色心吸收的温度依赖性,且色心吸收具有稳定的温度依赖性<sup>[11-12]</sup>.

本文研究了不同辐照剂量对光纤辐射致衰减和对温度依赖性的影响.分析了光纤辐射致衰减与辐射剂量间的多成分饱和指数模型.研究表明光纤辐射致衰减随着辐射剂量的增加而增加.对辐照和充分高温退火后的光纤辐射致衰减的温度依赖性进行了分析,发现其具有稳定单调的温度依赖性.

## 1 光纤辐射致衰减模型

由于光纤辐射致衰减主要受辐照剂量的影响,且辐照过程中光纤参量、工作条件等可以认为是不变的,变化的只有辐照剂量一个变量.因此本文针对辐射致衰减与辐射剂量的关系建立光纤辐射致衰减模型.一般常用的模型有幂率模型和多成分饱和指数模型.其中幂率模型是经验模型,没有明确的物理意义<sup>[13]</sup>.多成分饱和指数模型是从色心的形成过程出发,建立色心数密度变化率与辐照剂量率之间关

系的模型,推导得到光纤辐射致衰减和辐照剂量的关系.研究表明多成分饱和指数模型要优于幂率模型<sup>[14]</sup>.本文采用多成分饱和指数模型对光纤的辐射致衰减效应进行模型分析.

根据能级跃迁理论,每一个缺陷能级中色心产生的数目与光纤受到的辐射剂量成正比,在相应的缺陷能级上色心由于激发跃迁到导带而使色心退化,因此具有各自的寿命 $\tau_i$ ,则把辐射过程中光纤某个缺陷能级的色心数目变化率表示为

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = k_i \dot{D} - \frac{n_i(t)}{\tau_i} \quad (1)$$

式中 $n_i$ 为第 $i$ 个能级的色心数目, $\dot{D}$ 为辐照剂量率, $k_i \dot{D}$ 为色心产生的速率, $k_i$ 为色心产生数目相对于辐照剂量的比例因子.根据辐照开始时由辐射引起的色心数目为0这个边界条件求解式(1)得

$$n_i(t) = k_i \dot{D} \tau_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (2)$$

由于每种色心对特定波长的光具有一定的吸收系数,因此第 $i$ 个缺陷能级的色心引起的辐射致衰减表示为

$$A_i(t) = k_i' k_i \dot{D} \tau_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) = a_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (3)$$

式中 $a_i$ 表示此类色心对光的吸收能力,是一个实验常量.

设光纤中的色心种数为 $n$ ,则光纤的辐射致衰减的多成分饱和指数模型<sup>[15]</sup>为

$$A(D) = \sum_{i=1}^n a_i (1 - e^{-\frac{D}{d_i}}) \quad (4)$$

式中 $d_i = \dot{D} \tau_i$ 为第 $i$ 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.

## 2 实验设计与装置

本文选取纤芯为锗磷掺杂的光纤作为测试对象进行光纤辐射致衰减及光纤辐射致衰减温度特性的研究.所选光纤包层直径为80  $\mu\text{m}$ ,涂层直径为165  $\mu\text{m}$ ,衰减常量为0.8 dB/km.

不同的色心各自的饱和剂量不同,因此辐照剂量不同,光纤中不同种类的色心对光纤辐射致衰减的贡献也有区别.实验选取100 Gy、1 000 Gy和10 000 Gy三辐照剂量对同种光纤进行辐照实验.由于光纤辐射致衰减效应主要受到辐照剂量的影响,而辐照剂量率主要通过影响辐照过程中色心退化的时间,而影响光纤辐射致衰减.因此辐照后,经过长时间放置的辐照光纤剩余的“稳定”衰减受剂量率影响不大.而本文主要是获取经受不同辐照剂量的辐照光纤,来研究其辐射致衰减的温度特性.考虑到实

验的可行性,对于辐照剂量较高的实验,采取较高的剂量率,以缩短实验时间.辐照实验的辐照参量如表1所示.

表1 辐射实验的参量

Table 1 Parameters of radiation experiments

Dose rate/(Gy · min <sup>-1</sup> )	Total dose/Gy
0.5	100
2.5	1 000
25	10 000

## 2.1 光纤辐射致衰减实验装置

图1给出了光纤辐射致衰减测试的装置图.为了消除光源输出光功率波动对测试结果的影响,本文采用旁路光纤监测法以消除测量环境所引起的误差.用光分路器分出一束光作为参考信号,对光功率波动进行实时监测,以对辐射致衰减测试结果进行校正;其他通道的光作为测试光束,以进行光纤辐射致衰减效应的测试.

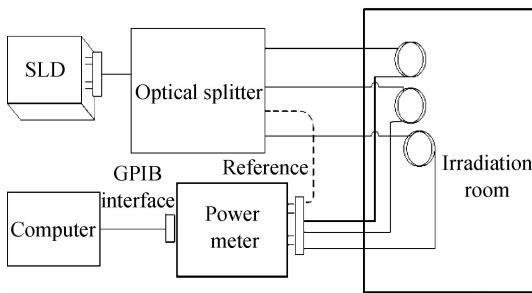


图1 光纤辐射致衰减测试的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for RIA in fiber

记录辐照开始前光源输出参考通道和待测光纤输出的信号功率,分别记为  $P_R(0, \lambda)$ 、 $P_T(0, \lambda)$ . 实验过程中实时监测参考通道信号和测试通道输出信号,分别记为  $P_R(t, \lambda)$ 、 $P_T(t, \lambda)$ . 根据式(5)可获得光纤的辐射致衰减. 在稳定的辐照情况下,将测试时间  $t$  乘以剂量率,则光纤的辐射致衰减可表示为辐照剂量的函数

$$A(D, \lambda) = -10 \lg \frac{P_T(D, \lambda) P_R(0, \lambda)}{P_T(0, \lambda) P_R(D, \lambda)} \quad (5)$$

## 2.2 光纤辐射致衰减温度依赖性实验装置

把辐照完的光纤放置于室温下两个星期,进行初步常温退火.然后,放入温箱在  $70^\circ\text{C}$  下对光纤进行高温退火,直到其在  $60^\circ\text{C}$  时的光纤衰减变化可以被忽略,这样就可使  $60^\circ\text{C}$  以下的不稳定色心被退色或转化为稳定色心.图2为光纤辐射致衰减温度依赖性的实验装置图.

图2中,参考通道的光功率记为  $P_1(T)$ ,当温度变化时,测试光纤中的功率会随着温度发生变化,从而导致光功率的衰减记为  $A(T)$ ,测试通道的输出功率记为  $P_2(T)$ . 则光纤的辐射致衰减  $A(T)$  计算

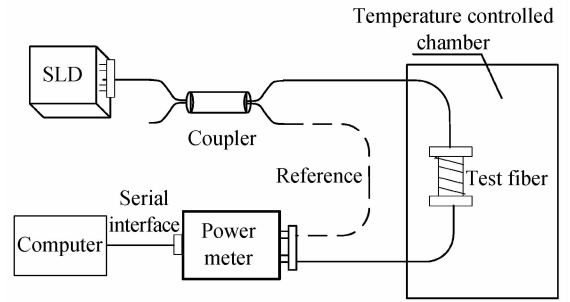


图2 光纤辐射致衰减温度依赖性的实验装置

Fig. 2 Experimental setup for temperature dependence of RIA in fiber

公式为

$$A(T) = -10 \lg \frac{P_2(T)}{P_1(T)} \quad (6)$$

为了消除测试通道其他因素引起的光功率的波动,因此本文对测得的辐射致衰减都用  $20^\circ\text{C}$  测得的值进行归一化处理. 则归一化的光纤辐射致衰减计算公式为

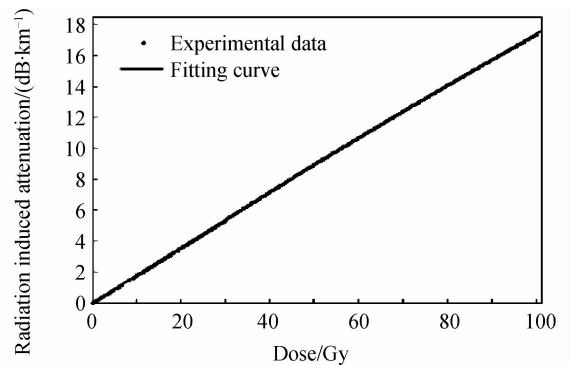
$$A(T) = -10 \lg \frac{P_2(T) P_1(20)}{P_2(20) P_1(T)} \quad (7)$$

式中  $P_1(20)$  和  $P_2(20)$  分别为温度在  $20^\circ\text{C}$  时,参考通道和测试通道的光功率.

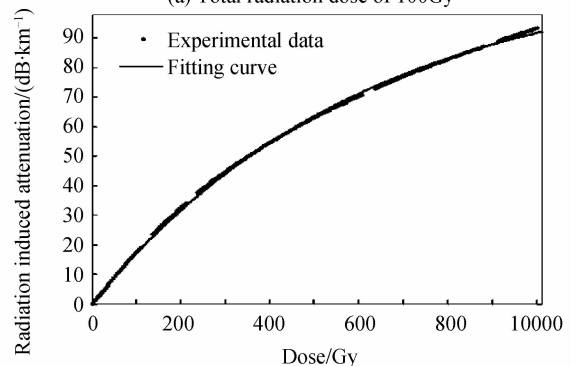
## 3 实验结果和讨论

### 3.1 光纤辐射致衰减模型分析

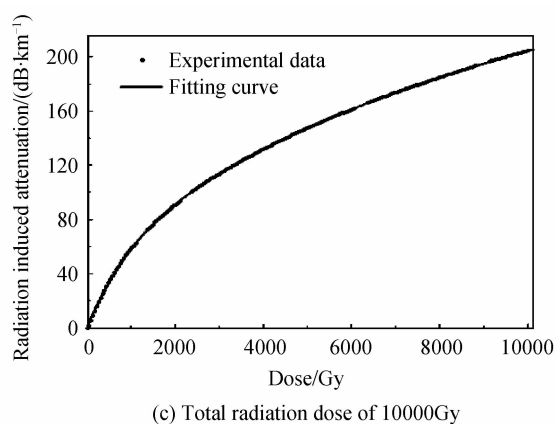
图3给出了锗磷掺杂光纤在不同辐照剂量下的辐射致衰减随辐照剂量的变化关系及用多成分饱和和指数模型的拟合曲线,其拟合参量如表2. 由图2和



(a) Total radiation dose of 100Gy



(b) Total radiation dose of 10000Gy



(c) Total radiation dose of 10000Gy

图3 锗磷光纤辐射致衰减与辐射剂量的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of RIA vs radiation dose for Ge-P dosed fibers

表2可以看出,当辐射剂量为100 Gy和1000 Gy时,锗磷掺杂光纤的多成分饱和指数模型的拟合阶数为1阶,拟合曲线和试验曲线的拟合系数分别为0.9999和0.9997.因此推测光纤在1310 nm波段的光衰减主要贡献的色心只有一种.而研究表明,掺P光纤在1310 nm波段的辐射致衰减主要取决于吸收峰位于1620 nm附近的P1心.因此,P1心应该就是对锗磷掺杂光纤的辐射致衰减起主要作用的色心.

表2 光纤辐射致衰减的多成分饱和指数模型拟合参量  
Table 2 Fitting parameters of RIA in fibers by multi-components saturating exponential model

Total dose/Gy	$a_1$	$d_1$	$a_2$	$d_2$	$R^2$
100	205.4	1 130	-	-	0.9999
1 000	118	648.4	-	-	0.9997
10 000	243	10 730	57.22	974.5	1.000

对于辐射剂量达到10000 Gy的情况,则需要2阶多成分饱和指数模型才达到很好地拟合结果,这时的拟合系数为1.该结果表明当辐射剂量达到10000 Gy时,除P1心外,还存在另外一种色心对锗磷光纤在1310 nm波段的辐射至衰减产生显著的影响.但此时,P1心对1310 nm光纤衰减的影响依然占主导地位.研究表明在该辐射剂量条件下,吸收峰位于紫外波段的与P相关的POHC心和Ge(1)心都会对该波段光纤辐射致衰减产生较为显著影响.因此,本文采用的多成分饱和指数模型表征的除P1心外的色心应该是POHC心和Ge(1)心之一,或者是二者共同作用的结果.随着辐射剂量增加,紫外和可见光波段的吸收色心尾带对1310 nm波段的衰减贡献越来越显著.

表3给出了三种辐射剂量的辐射致衰减值.实验结果表明,随着辐射剂量的增加,光纤的辐射致衰减也显著增加.

表3 不同辐照剂量下的光纤辐射致衰减

Table 3 The RIA in fibers with different radiation doses

Total dose/Gy	RIA/(dB·km <sup>-1</sup> )
0	0.8
100	17.46
1 000	93.58
10 000	204.12

### 3.2 光纤辐射致衰减的温度依赖性

图4给出了测试锗磷光纤从-40℃升到60℃过程中,经过不同辐射剂量辐照并充分退火后的光纤辐射致衰减温度特性曲线.如图4所示,辐照处理后的光纤辐射致衰减具有单调稳定的温度依赖性,且辐射剂量不同,辐射致衰减的温度灵敏度也不同.利用这个特性进行光纤温度传感器的研究.由温度引起的辐射致衰减结果如表4.通过表4可以看出,当辐射剂量为10000 Gy时,其温度灵敏度最高,更加具有作为光纤温度传感器敏感光纤的潜质,为研究基于光纤辐射致衰减温度依赖性的光纤温度传感器提供更好的依据.

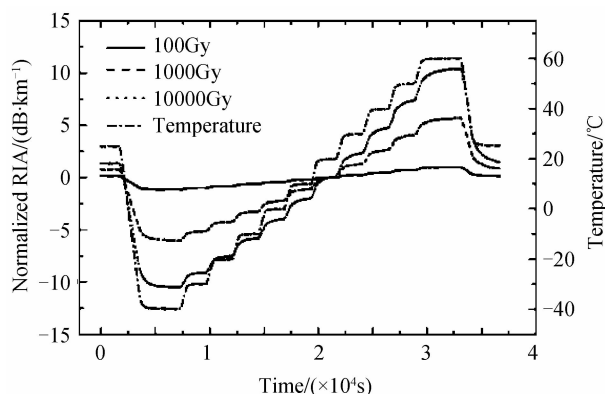


图4 辐照并充分退火后的光纤辐射致衰减的温度依赖性  
Fig. 4 The RIA temperature dependence in irradiated fibers after sufficient annealing

表4 光纤辐射致衰减的全温变化值

Table 4 Variation of RIA in full temperature range

Total dose/Gy	Variation of RIA/(dB·km <sup>-1</sup> )
100	2.15
1 000	11.72
10 000	20.96

## 4 结论

本文通过对不同辐射剂量的锗磷光纤进行实验,研究了辐射剂量对光纤辐射致衰减及其对辐射致衰减温度依赖性的影响.并且用多成分饱和指数模型对辐射致衰减效应进行了模型分析.实验结果表明:辐射剂量为100 Gy和1000 Gy时,在1310 nm波段的辐射致衰减主要取决于P1心.而当辐射剂量达到10000 Gy的情况,发现除了P1心

外,还存在另一种色心对 1 310 nm 波段的辐射致衰减会产生显著影响. 但此时 P1 心对光纤辐射致衰减的影响依然占主导地位. 通过辐射致衰减的实验发现,随着辐照剂量的增加,光纤的辐射致衰减也显著增加.

辐射剂量对光纤辐射致衰减温度依赖性的影响研究发现,在  $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$  温度范围内光纤辐射致衰减具有单调稳定的温度依赖性. 且光纤辐射致衰减的温度灵敏度随着辐照剂量的增加而增加. 当辐照剂量为 100 Gy 时,其全温的辐射致衰减变化为 2.15 dB/km; 当辐照剂量为 1 000 Gy 时,其全温的辐射致衰减变化为 11.72 dB/km; 当辐照剂量为 10 000 Gy 时,其全温的辐射致衰减变化为 20.96 dB/km. 本文研究辐射剂量对辐射致衰减及其温度依赖性的影响不仅可以更好地在复杂辐射环境中使用光纤还可利用其稳定的温度依赖性研制温度传感器并提高传感器性能.

#### 参考文献

- [1] LI En-bang, WANG Xiao-lin, ZHANG Chao. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(9): 091119.
- [2] BERGHMANS F, BRICHARD E, FERNANDEZ A, *et al.* An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors [C]. *Optical Waveguide Sensing and Imaging*, 2008: 127-165.
- [3] GRISCOM D L. Trapped-electron centers in pure and doped glassy silica: a review and synthesis [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, **357**(8-9): 1945-1962.
- [4] BUEKER H, HAESING F W. Fiber-optic radiation sensors [C]. SPIE, 1994, **2425**: 106-114.
- [5] REGNIER E, FLAMMER I, GIRARD S, *et al.* Low-dose radiation-induced attenuation at infrared wavelengths for P-doped, Ge-doped and pure silica-core optical fibers [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, **54**(4): 1115-1119.
- [6] GIRARD S, BOUKENTER A, OUERDANE Y, *et al.* Properties of phosphorous-related defects induced by  $\gamma$ -rays and pulsed X-ray irradiation in germanosilicate optical fibers [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, **322**: 78-83.
- [7] WIJNANDS T, DE JONGE L, KUHNHENN J, *et al.* Optical absorption in commercial single mode optical fibers in a high energy physics radiation field [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, **55**(4): 2216-2222.
- [8] BORGEMANS P, BRICHARD B, BERGHMANS F, *et al.* Dosimetry with optical fibres: results for pure silica, phosphorous and erbium doped samples [C]. SPIE, 2001, **4204**: 151-159.
- [9] GIRARD S, KEURINCK J, OUERDANE Y, *et al.*  $\gamma$ -rays and pulsed X-ray radiation responses of Germanosilicate single-mode optical fiber: influence of cladding codopants [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(8): 1915-1922.
- [10] WANG Xue-qin, ZHANG Chun-xi, JIN Jing, *et al.* Radiation-induced effects in polarization-maintaining optical fibers for interferometric gyroscope [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(6): 060601.
- [11] SONG Jing-ming, GUO Jian-hua, WANG Xue-qin, *et al.* Temperature dependence of radiation-induced attenuation of optical fibers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(11): 110604.
- [12] JIN Jing, LIU Ji-xun, WANG Xue-qin, *et al.* Effect of color center absorption on temperature dependence of radiation-induced attenuation in optical fibers at near infrared wavelengths [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(6): 839-845.
- [13] BORGEMANS P, BRICHARD B, DECRETON M. Models for the radiation induced attenuation in pure silica optical fibres: spectral dependencies and absorption band kinetics [C]. SPIE, 2002, **4547**: 53-60.
- [14] WANG Xue-qin, ZHANG Chun-xi, JIN Jing, *et al.* Investigation of radiation-induced attenuation effect for special optical fibers applied in space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(12): 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**(12): 2516-2520.
- [15] PRESLAND A, WIJNANDS T, DE JONGE L, *et al.* Gamma-ray induced optical absorption in Ge and P-doped fibres at the LHC [C]. RADECS 2005 Proceedings, 2005: 1-5.