

# 辐射对光纤传感器性能影响的研究进展

周次明 张方\* 丁立 姜德生

(武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要** 介绍了在辐射环境中研究应用前景较好的几种主要的光纤传感器。结合已初步完成的布里渊传感器的相关实验,详细阐述了光纤布拉格光栅传感器、法布里-珀罗光纤传感器、分布式光纤传感器和传输光纤在受到辐射时其性能发生变化的研究进展。简要分析了辐射对光纤传感器性能影响的几种不同观点,并分别展望了光纤传感器在辐射环境中的应用前景。

**关键词** 光纤光学;光纤传感器;辐射效应;光纤布拉格光栅

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.040601

## Progress of Radiation Effects on Performance of Optical Fiber Sensors

Zhou Ciming Zhang Fang Ding Li Jiang Desheng

(National Engineering Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract** The principles and characteristics of several major optical fiber sensors which have a good prospect in the radiation environment are introduced. Based on the preliminary experimental results obtained by Brillouin sensor, the radiation effects on performance of several fiber optic sensors, such as optical fiber Bragg grating sensors, Fabry-Perot fiber optic sensors, distributed fiber optic sensors and transmission fiber, have been described. Several different points are briefly analyzed, and the prospects of different fiber optic sensors in the radiation environment are presented respectively.

**Key words** fiber optics; fiber optic sensors; radiation effect; fiber Bragg grating

**OCIS codes** 060.2270 060.2290 060.2370

## 1 引言

在太空、核反应和高能粒子实验等环境中,各种仪器设备由于不同程度地受到 $\alpha, \beta, \gamma$ 和脉冲电子等粒子的辐照,这都显著地改变其材料或器件的特性,可能导致严重的系统故障,甚至威胁到设备的安全。而因为辐射等原因,工作人员还不能直接在此环境中对其部件或系统进行修复,有可能引起巨大的经济损失。例如,工作在宇宙空间的卫星,一旦送入轨道,其中的设备就几乎不可能进行修复,特别是在对直接暴露在强辐射环境中各种部件的温度、应变和位移等参量实时在线监测时,对传感器抗辐射性能的要求更高。因此,必须仔细研究辐射对这些仪器设备的影响,并采用特殊措施进行设计与安装,尤其是在此环境中应用各类传感器更是人们关注的热点<sup>[1]</sup>。

光纤传感器利用光纤感测外界物理量及其变化,同时,光纤将此携带被测参量的光学信号传输到远端,成为集传感和传输为一体的新型传感器。经过几十年的发展,光纤传感器受到广泛重视,并已经在一些军用和民用领域得到应用,取得了很好的效果,被普遍认为是一类在传统传感器难以应用的恶劣环境中具有很好应用前景的传感器<sup>[2]</sup>。辐射环境中的光纤传感器是一个关键的研究方向,国内外已经对各类主要光纤传感

**收稿日期**: 2010-11-17; **收到修改稿日期**: 2010-11-30

**基金项目**: 国家自然科学基金(61077061)和湖北省自然科学基金(2009CDA128)资助课题。

**作者简介**: 周次明(1973—),男,博士,教授,主要从事光纤传感方面的研究。

\* **通信联系人**。E-mail: zfl630@163.com

器在辐射环境中的特性做了大量研究,并且有一些已经得到实用<sup>[3~7]</sup>。本文对光纤布拉格光栅(FBG)传感器、法布里-珀罗(F-P)光纤传感器、分布式光纤传感器和传输光纤在辐射中的性能以及一些实验结果做了综合介绍,为辐射环境中的传感光纤和耐辐射光纤传感器的研制提供参考。

## 2 光纤布拉格光栅传感器

FBG的基本原理是由于外界环境的作用导致布拉格中心波长发生漂移,测量此波长的漂移量就可检测外界温度、应力等的变化。光纤光栅传感器在很多军事和民用领域已经有大量应用实例,在辐射环境中应用的研究也很多,但是辐射对光纤光栅影响的作用机理方面,仍然存在一些争议观点。比如,K. Fujita等<sup>[8]</sup>认为,辐射对光纤光栅的影响与光纤本身的化学组成和光栅的写入方法有关。因此他们用相位掩模法在不同光纤上写入光栅,并将FBG传感器放于中子和 $\gamma$ 辐射环境中进行测量。在中子辐射环境中,随中子流量的增加,波长有轻微的增长趋势,流量和波长的关系如图1所示。流量超过 $1.0 \times 10^7/\text{cm}^2$ 时,FBG2的波长有明显的变动,且波长变化呈现可逆性,这种变化是由应力或光栅弯曲而非辐射造成。该实验还证明 $\gamma$ 辐射和中子辐射的结果基本相同,辐射导致了波长移动,且波长的移动是可以预见和校准的。

但是,H. Henschel等<sup>[9]</sup>则认为,辐射导致的光栅波长移动与光纤的化学组成关系不大,而在光纤载氢过程中,由于氢气压强的不同会导致波长变化不一样,且在写入光栅过程中光纤的拉力增大,可能会导致光栅折射率变大从而影响光栅的辐射敏感性。他们在实验中用不同氢气压强对康宁光纤和FiberLogix光纤载氢,在写光栅时,对实验光纤分别施加标准拉力和光纤能承受的最大拉力,写入光栅后,部分光栅重新涂覆<sup>[10]</sup>。对比辐射前后各光栅波长的变化,辐照期间布拉格光栅波峰变高,没有载氢的光栅波长移动减小,载氢氢气压强为 $1 \times 10^7$  Pa, $2 \times 10^7$  Pa的光栅没有明显的变化趋势,而在压强 $3 \times 10^5$  Pa时,康宁光纤变化很小,FiberLogix光纤相比 $1 \times 10^7$  Pa, $2 \times 10^7$  Pa时变化明显。光栅写入时拉力的变化对康宁光纤几乎没有影响,对FiberLogix光纤来说,拉力最大的光栅的波长移动减小了24%,如图2,3所示。

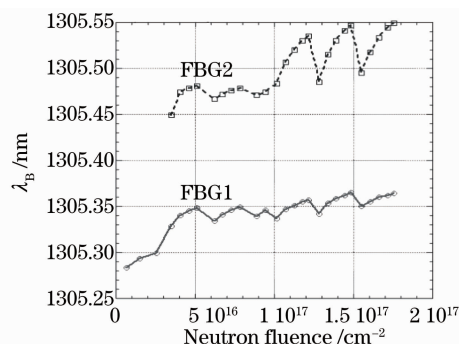


图1 波长随中子流量的变化

Fig. 1  $\lambda_B$  shifts during fast neutron irradiation

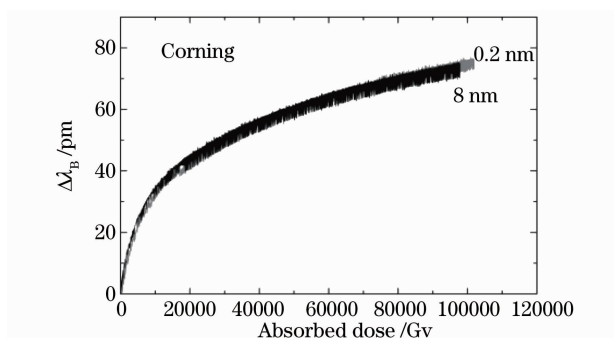


图2 康宁光纤的波长移动

Fig. 2 Corning fiber's Bragg shifts

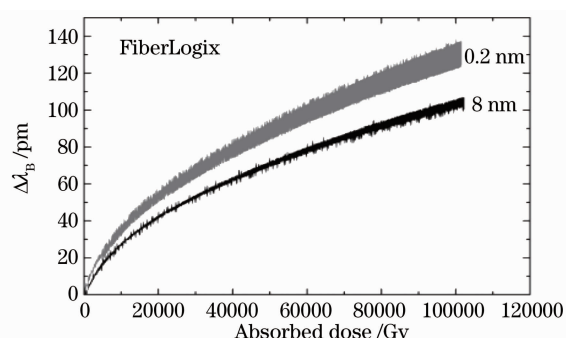


图3 FiberLogix光纤的波长移动

Fig. 3 FiberLogix fiber's Bragg shifts

因此,辐射对光纤光栅影响的作用机理研究还有必要继续深入进行。对于不同辐射剂量、不同掺杂与涂覆材料,以及刻写方法对光纤光栅耐辐射性能的影响研究,也已有大量实验结果。A. I. Gusarov等<sup>[11]</sup>分别通过一系列实验发现,在高剂量的 $\gamma$ 辐照下,辐射几乎只影响光纤光栅波长的改变,长时间受到低剂量辐射的光栅中光敏光纤变化最小,而对于不同涂覆材料和掺杂纤芯的光纤,裸光纤有最低的辐射敏感特性,涂覆层光纤光栅有最大的峰值偏移<sup>[12,13]</sup>。他们还将不同掺杂纤芯的光纤光栅放于核辐射环境中观察其稳定性,发现载氢光栅有较高的辐射敏感特性,高浓度掺锗光纤光栅则更稳定<sup>[14]</sup>。传统的刻写光栅的激光是低强度

的紫外激光, A. Gusarov 等<sup>[15]</sup>采用高强度飞秒紫外激光在不同类型的光纤上写入光栅, 发现在  $\gamma$  辐射下, 所有光纤的波长移动几乎完全相同, 不同类型光纤的光栅强度有很小的变化差异。这种紫外照射技术为研究光栅在辐射环境中进一步的应用发展提供了可能。

上述光纤光栅传感器在辐射环境中的实验研究表明,  $\gamma$  辐射对 FBG 影响的特点是布拉格峰移向长波长方向移动, 传感器的抗辐射性能不但与光纤材料、掺杂浓度以及写入光栅的方法相关, 而且由于写光纤光栅过程中的氢的压强、光纤拉力、以及重新涂覆光栅的过程的不同而有所差异。

### 3 F-P 传感器

光纤 F-P 传感器的基本原理就是当作用在 F-P 腔体上的外界物理量发生变化时, 腔体长度也会随之变化, 导致输出的干涉条纹变化, 通过检测条纹变化的大小和方向即可求出外界物理量变化的大小<sup>[16]</sup>。Francis Berghmans 等<sup>[17]</sup>分别用剂量率 114 Gy/h, 3.4 kGy/h 对 F-P 温度和应力传感器进行辐射, 温度传感器测得的温度值有很明显的降低, 停止辐照后传感器也只有很小的恢复, 这是由辐射导致的波长选择吸收引起的。应力传感器接受的辐照总剂量不同, 测量发现辐射导致了信号衰减且消除了有效波长区域的干涉条纹, 使传感器在受辐照后不能正常运行, 且这个衰减与辐照总剂量无关, 三个 F-P 传感器所出现的现象是一致的。

在温度传感实验中, 光纤的热光系数是衡量温度变化的重要因素, Lai Cheng -Chih 等<sup>[18]</sup>通过测量分析辐射前后康宁单模光纤热光系数的变化得到, 辐照后所有传感器的测量结果基本相同, 且输出信号在  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内呈周期性的变化, 与信号强度和温度变化关系的理论曲线基本吻合。实验结果还表明, 这种 F-P 温度传感器适用于热光系数相对变化量小于 3%, 辐射量不高于 1 MGy 的环境中。Han Ying Liu 等<sup>[19]</sup>介绍了另一种 F-P 传感器, 这种传感器有其独特的信号处理技术及降低功率损耗的特性, 在辐照剂量超过 1.33 MGy 时, 传感器性能没有明显的降低, 能正常运行工作。

因此, F-P 传感器在受到较大剂量 (3.3 kGy) 辐照时, 温度误差大, 有效区域的信号衰减严重, 但在低剂量辐射水平的环境中效果较好。若在信号处理和减小功率损耗方面的技术有所改进, 也能在较高辐射环境中起到好的效果。

### 4 分布式光纤传感器

相对于光栅传感器和 F-P 传感器, 分布式光纤传感器将整根光纤作为传感介质, 可以实现分布式测量, 且不受波长变化的限制, 在辐射环境中的应用有很好的发展前景。瑞利传感器由于其制造和使用的不便, 温度测量范围小等因素在传感技术中的研究和应用越来越少, 目前, 布里渊传感器和拉曼传感器成为人们的研究重点。

#### 4.1 分布式布里渊传感器

由于介质分子的内部存在着一定形式的振动, 引起介质折射率随时间和空间周期性起伏, 从而产生自发声波场, 光定向入射到光纤介质时受到该声波场的作用则产生布里渊散射。当外界温度或应力发生变化时, 布里渊频率就随之发生变化<sup>[20]</sup>。

尽管辐射会导致很大的辐照吸收, 增大损耗, 但布里渊传感器受频率调制, 在辐射环境中有很好的应用潜力。目前, 由于布里渊传感器属于较新的一类光纤传感器, 在辐射环境中的研究与应用相对较少, 还处于起步阶段。D. Alasia 等<sup>[21]</sup>研究了核辐射对布里渊传感的影响, 实验采用标准掺锗光纤, 将光纤分为 4 段 50 m 长的样品, 同时用 27 kGy/h 剂量率进行辐照, 但 4 段光纤吸收的辐照总剂量不同。实验结果表明, 辐照感生损耗影响了信噪比, 而随着辐照总剂量的增加, 布里渊频率和线宽呈非线性增加。辐照剂量最大时 (约 10 MGy), 布里渊频率和线宽变化约 5 MHz (如表 1)。

所以, 在实际应用中, 辐射导致的布里渊频移很小, 说明频率调制的光纤传感器耐辐射水平较高。但是, 辐射对布里渊光纤传感器的影响, 是否也和辐射对 FBG 的影响一样, 与光纤材料、掺杂和涂覆层等因素有关, 值得进一步深入研究。

表 1 布里渊特性参数  
Table 1 Brillouin parameters

	Reference	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Dose /MGy	0	0.33	0.97	4, 7	9.9
Brillouin frequency /GHz	10.8413	10.8417	10.8426	10.8451	10.8462
Brillouin linewidth /MHz	43.2	43.6	44.4	46	48

因此,分别对几种不同涂层材料的光纤做了初步的实验。将碳涂覆光纤、涂铜光纤、普通康宁光纤和长飞光纤分成 6 段,放于 0.1 mSv/h 的辐射环境中,照射时间分别为 1~6 个月。实验中用到 DiTeSt STA-R 布里渊传感器,传感原理如图 4 所示。

将所有辐照后的光纤同未受辐照的光纤焊接在一起放在温度试验箱中,用布里渊传感器进行测量,温度循环范围为 0 °C~80 °C,每变化 10 °C 测量一次,结果如图 5 所示,发现辐照后的涂碳光纤的布里渊频率比辐照前变化了约 4 MHz,与 D. Alasia 等的研究结果基本一致,但仍然有约 1 MHz 的差别,可能与光纤芯层材料、涂层材料或辐照剂量有关。光纤部分有突起的地方是光纤之间焊接点所致,光纤其他部位辐照前后几乎没有变化。涂铜光纤每增加 10 °C 后布里渊频率的变化比其他光纤略大,这是由其自身的涂层材料引起的,与辐射无关。

#### 4.2 拉曼传感器

拉曼散射对应力不敏感而对温度敏感,因此常作为温度传感器使用。为了准确估计冷却结构循环的热疲劳损伤,进行温度监测是很有必要的。F. Jensen 等<sup>[22]</sup>将拉曼温度传感器(RDTS)用于核电厂反应堆的冷却循环实验中进行观察,当反应堆温度维持在 80 °C 以下,辐射对拉曼传感器的影响很小,与室温时相比,系统在 300 °C 时由辐射引起的损耗降低了 10 倍。实验结果表明,在辐照为 2 Gy/h 时,拉曼传感器可以用于核反应堆的冷却循环中,受辐射影响较小。

A. Kimura 等<sup>[23]</sup>认为,辐射会导致拉曼散射斯托克斯和反斯托克斯光的变化,为了消除这种变化产生的误差,他们用两种校准装置来对拉曼传感器进行了改进。一是用热电偶校准,如图 6 所示,另一种是环形装置,如图 7 所示。实验测得的误差值和损耗值随辐照剂量的增加都趋于饱和。实验还发现,掺 F 光纤比掺 OH 光纤更耐辐射,且两种校准装置都可用于温度测量中,但在温度发生急剧变化时,环形装置比热电偶装置更稳定、更准确。但是校准技术增加了系统复杂性,而且在恶劣环境中进行安装的费用昂贵,因此 A. F. Fernandez 等<sup>[24]</sup>提出用基于商用多模光纤的双端拉曼检测方法来解决辐照产生的损耗及误差,而不需特定的校准技术。双端检测可以提高系统测量准确性,且光纤本身的强度使得系统更适用于辐射环境中的应用。

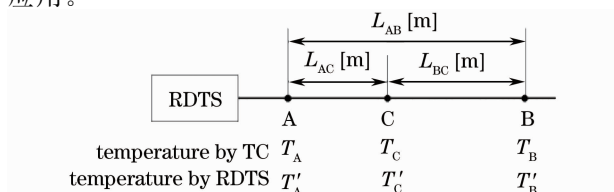


图 6 热电偶校准装置

Fig. 6 Thermocouple calibration device

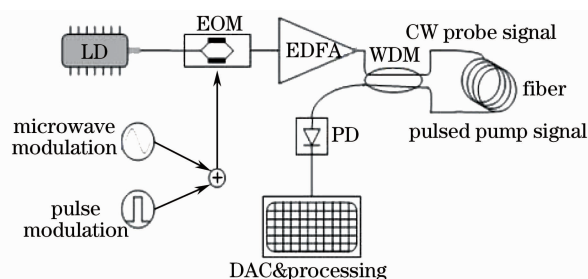


图 4 布里渊传感装置

Fig. 4 Schematic setup of the DiTeSt instrument

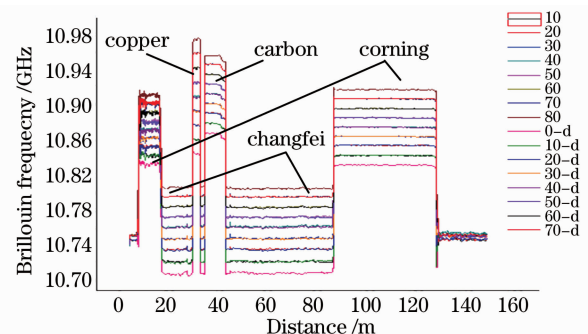


图 5 温度循环实验

Fig. 5 Temperature cycling test

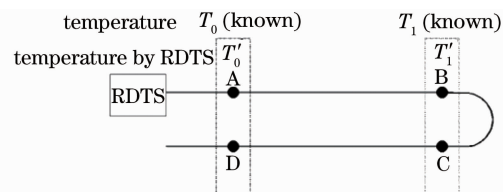


图 7 环形校准装置

Fig. 7 Loop calibration device

实验表明拉曼传感器由于其对温度的敏感性及分布式的测量原理,适用于冷却循环系统、核废物处理、大型核设施监测等辐射环境中。

## 5 辐射对传输光纤的影响

在整个光纤传感系统中,传输光纤是其中极为重要的部分,因此研究不同传输光纤在辐射环境中的表现,对整个传感系统是很有必要的。已有研究成果证实,光纤涂覆层材料会影响光栅的光敏性从而影响其抗辐射性能<sup>[13]</sup>,辐照产生的损耗与光纤掺杂是密切相关的<sup>[25~27]</sup>,此外,根据光纤模式的选择以及辐照剂量率的不同,光纤的抗辐射性能也有变化<sup>[28]</sup>。

辐射对传输光纤的影响主要是产生吸收损耗和荧光效应<sup>[29]</sup>。光纤作为光纤传感器的重要组成部分,对整个系统的抗辐射水平起着关键的作用,需要根据不同的辐射剂量水平和应用环境,选择合适的传输光纤尽量减少传感信号在传输过程中的失真。

## 6 结 论

核辐射环境中的参量检测和监测控制一直是难点问题,而光纤传感器的发展为此提供了可供选择的新技术。光纤光栅可以多点测量且结构简单,但辐射影响携带被测参量信息的布拉格波长,且这种影响程度与光纤材料、掺杂浓度以及写入光纤光栅的方法等很多因素相关,并且还还与光纤光栅的涂覆过程有关,需要进一步研究;F-P传感器和拉曼传感器在低辐射水平环境中测量效果都较好;布里渊传感器是频率调制的传感器,实验结果初步表明核辐射对布里渊频率的影响很小,且其测量距离长,精度高,很有发展前景。

### 参 考 文 献

- 1 F. Berghmans, Alberto Fernandez, Sylvain Girard *et al.*. Optical Waveguide Sensing and Imaging[M]. Berlin: Spring, 2008. 127~165
- 2 J. W. Berthold Iii. Overview of prototype fiber optic sensors for future application in nuclear environments[C]. *SPIE*, 1994, **2425**: 74~83
- 3 J. A. C. Heijmans, L. K. Cheng, F. P. Wieringa. Optical fiber sensors for medical applications-Practical engineering considerations[C]. *IFMBE Proceedings*, 2008, **22**: 2330~2334
- 4 Shi Bin. HV switchgear temperature on-line monitoring system with distributed optical fiber sensor[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, **33**(8): 169~173  
时 斌. 光纤传感器在高压设备在线测温系统中的应用[J]. *高电压技术*, 2007, **33**(8): 169~173
- 5 Guo Tuan, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Technology of fiber gratings sensing and its applications in petroleum industry[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, **18**(3): 208~213  
郭 团, 乔学光, 贾振安 等. 光纤光栅传感技术及其在石油工业中的应用[J]. *测试技术学报*, 2004, **18**(3): 208~213
- 6 W. Ecke, Latka Ines, Willsch Reinhardt *et al.*. Fibre optic sensor network for spacecraft health monitoring [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(1): 974~980
- 7 E. J. Friebele, C. G. Askins, A. B. Bosse *et al.*. Optical fiber sensors for spacecraft applications[J]. *Smart Materials and Structures*, 1999, **8**(6): 813~838
- 8 K. Fujita, A Kimura, M Nakazawa *et al.*. Bragg peak shifts of fiber Bragg gratings in radiation environment[C]. *SPIE*, 2001, **4204**: 184~191
- 9 H. Henschel, Stefan K. Hoeffgen, Katerina Kriebber *et al.*. Influence of fiber composition and grating fabrication on the radiation sensitivity of fiber Bragg gratings[C]. *IEEE*, 2008. 2235~2242
- 10 H. Henschel, Stefan K. Hoeffgen, Jochen Kuhnenn *et al.*. Influence of manufacturing parameters and temperature on the radiation sensitivity of fiber Bragg gratings[C]. *IEEE*, 2010, **57**(4): 2029~2034
- 11 A. I. Gusarov, F. Berghmans, O. Deparis *et al.*. High total dose radiation effects on temperature sensing fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(9): 1159~1161
- 12 G. Fernandez Fernandez, A. Gusarov F. Berghmans *et al.*. Long-term irradiation of fibre Bragg gratings in a low dose rate gamma-neutron radiation field[C]. *Photonics for Space Environments VIII*, 2002, **4823**: 205~212
- 13 A. Gusarov, C. Chojetzki, I. McKenzie *et al.*. Effect of the fiber coating on the radiation sensitivity of Type I FBGs[J].

- IEEE, Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(21): 1802~1804
- 14 A. Gusarov, S. Vasiliev, O. Medvedkov *et al.*. Stabilization of fiber Bragg gratings against gamma radiation[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, **55**(4): 2205~2212
- 15 A. Gusarov, B. Brichard, D. N. Nikogosyan. Gamma-radiation effects on Bragg gratings written by femtosecond UV laser in Ge-doped fibers[C]. *IEEE*, 2010, **57**(4): 2024~2028
- 16 Bi Weihong, Li Yiliang, Zhang Rui. Novel optic fiber pressure sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008, **8**: 8~9+17
- 毕卫红, 李一良, 张睿. 新型光纤压力传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2008, **8**: 8~9+17
- 17 Francis Berghmans, Alberto Fernandez Fernandez, Frans Vos *et al.*. Radiation hardness of fiber optic sensors for monitoring and remote handling applications in nuclear environments[C]. *SPIE*, 1998, **3538**: 28~39
- 18 Lai Chengchih, Lee Weiyu, Wang Wayseen. Gamma radiation effect on the fiber Fabry-Perot interference sensor[J]. *IEEE, Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(8): 1132~1134
- 19 H. Y. Liu, Don W. Miller, Joseph Talnagi. Gamma radiation resistant Fabry-Perot fiber optic sensors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, **73**(8): 3112~3118
- 20 M. Nikles. Fibre optic distributed scattering sensing system: perspectives and challenges for high performance applications[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**: 1345~1352
- 21 D. Alasia. Study of the radiation effects on the properties of Brillouin scattering in standard Ge-doped optical fibres[C]. *SPIE*, 2005, **5855**: 180~183
- 22 F. Jensen, Eiji Takada, Masaharu Nakazawa *et al.*. Distributed Raman temperature measurement system for monitoring of nuclear power plant coolant loops[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2895**: 132~143
- 23 A. Kimura, Eiji Takada, Kaoru Fujita *et al.*. Application of a Raman distributed temperature sensor to the experimental fast reactor JOYO with correlation techniques[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(7): 966~973
- 24 A. F. Fernandez, P. Rodeghiero, B. Brichard *et al.*. Radiation-tolerant Raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, **52**(6): 2689~2694
- 25 B. Tortech, M. Van Uffelen, A. Gusarov *et al.*. Gamma radiation induced loss in erbium doped optical fibers[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, **353**(5-7): 477~480
- 26 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]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009, **355**(28-30): 1496~1507
- 27 S. Girard, J. Keurinck, A. Boukenter *et al.*. Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen-germanium-doped and pure silica core optical fibers[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2004, **215**(1-2): 187~195
- 28 B. Arvidsson, K. Dunn, C. Issever *et al.*. The radiation tolerance of specific optical fibres exposed to 650 kGy(Si) of ionizing radiation[J]. *Journal of Instrumentation*, 2009, **4**: P07010
- 29 M. Sreckovic, A. Marinovic, V. Rajkovic *et al.*. Properties of fiber optical materials after exposure to nuclear radiation[C]. *PROC*, 1995, **1**: 289~292