

γ 辐射对光纤色散的影响

刘福华, 王平, 冯刚, 陈绍武, 武俊杰, 刘卫平, 谢红刚

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要: 提出了基于能量沉积的 γ 辐射对光纤折射率的影响分析方法, 计算了光纤的色散变量随光纤的 V 参数、折射率变化, 开展了 γ 辐射对光纤色散影响的测量实验, 得到了光纤的色散系数随辐射剂量变化数据。实验及理论计算结果表明: (1) 光纤的色散系数随 γ 辐射剂量的增加而增大, 在一定的剂量(0~500 Gy)范围内, 光纤色散增加量呈逐渐饱和趋势; (2) γ 辐射导致光纤折射率发生变化, 从而引起材料色散的变化, 辐射效应中的电子密度增大是折射率改变的主要因素; (3) 辐射感生损耗引起的信号幅度降低要比辐射感生色散引起的脉冲展宽明显, 对于暴露在核辐射环境中的长距离光纤, 其脉冲信号产生的畸变是两者同时存在并共同作用的结果。

关键词: γ 辐射; 光纤; 色散; 折射率

中图分类号: TN253; TL814 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0118001

Influence of Gamma-ray radiation on optical fiber dispersion

Liu Fuhua, Wang Ping, Feng Gang, Chen Shaowu, Wu Junjie, Liu Weiping, Xie Honggang

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The method based on energy deposition to analyze the influence of γ -ray radiation on fiber refractive index was proposed. The fiber dispersion variable which changes with the fiber V parameters and refractive index was analyzed and calculated. The γ radiation effects on fiber dispersion measurement experiments were accomplished, which demonstrates that the γ radiation impact on the presence of fiber dispersion. The fiber dispersion coefficient variation data with radiation dose were obtained. Experimental and theoretical results show that: (1) fiber dispersion coefficient increases with γ radiation dose, within the dose range of (0–500 Gy) fiber dispersion coefficient showed a gradual increase in the amount of saturated trends; (2) changes in the refractive index of the fiber lead to the additional material dispersion. The electron density increases caused by γ radiation is the major factor that results in changes in the refractive index; (3) the decrease of ultra-fast pulsed signal amplitude caused by radiation-induced loss is more significant than pulse broadening caused by radiation-induced dispersion. Both effects exist simultaneously. The pulsed signal distortion is the result of two joint action of especially for long distance optical fiber with nuclear radiation exposure.

Key words: Gamma-ray radiation; optical fiber; dispersion; refractive index

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(11275148)

作者简介: 刘福华(1967-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光测量和光纤应用技术方面的研究。Email: liufuhua@nint.ac.cn

0 引言

损耗(loss)和色散(dispersion)是表征光纤性能的主要参数,是光纤固有的性质,也是影响快脉冲信号在光纤中传输性能的主要因素^[1-4]。光纤的损耗直接决定着光波信号的幅度衰减量,而色散则会影响脉冲光波信号的时间宽度。 γ 辐射光子对普通熔融石英光纤的电磁作用以康普顿(Compton)效应为主,还有光电效应、电子对效应和散射效应等^[5-7],辐射效应的存在将会导致光纤产生感生损耗和感生色散。当光纤受到 γ 辐射时,其损耗和色散性能将发生变化,利用光纤作为传输、传感介质的系统性能也将随之恶化,而感生损耗和感生色散是进行光纤核辐射效应评价的主要性能参数。

对于光纤的辐射感生损耗,人们一直在不断地探索研究^[8-11]。利用这些研究成果,预估在核辐射环境下光纤系统的性能变化及使用寿命,寻求减小核辐射对光纤性能影响的技术途径。并试图利用光纤参数的变化来监测近地面核爆炸辐射、空间辐射以及反应堆等核设施的辐射^[12-16]。

对于光纤的核辐射感生色散的研究相对较少^[17],光纤在核辐射作用下产生的附加色散将会影响到快脉冲信号的传输性能,开展辐射对光纤的色散性能研究,其结果对于研究核试验中的光纤测量系统、航天器中的光纤陀螺系统等的性能变化具有一定的实际意义。

文中采用能量沉积的方法计算了 γ 辐射时光纤中自由电子密度、光纤折射率的变化,以及光纤的材料色散和波导色散随折射率的变化,开展了稳态 γ 射线对技术指标分别符合 ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Sector) G.652、G.655 规范的普通高纯度熔融石英单模光纤、色散位移光纤的辐照实验,搭建了利用时域法测量光纤色散系数的实验测量系统,实验验证了 γ 辐射对光纤产生感生损耗和感生色散,得到了在相同辐射剂量条件下两型光纤的色散系数变化量,分析了 γ 辐射产生附加色散的原因,计算与实验测量结果的变化趋势相符合。

1 γ 辐射对光纤色散影响的基本理论

1.1 光纤的色散

色散是由于光波信号中的不同频率成分之间的

群速度不同而导致信号在传输一定距离后发生不同频率成分分离的物理现象。由于色散的存在会导致脉冲光波信号在光纤中传输一定距离后发生因脉冲波形展宽而导致的波形畸变。色散的大小取决于光纤的折射率分布,并与光纤材料的波长特性相关。光波信号沿光纤单位长度传输后产生的延迟时间称为群延时,设光波的角频率 ω ,相位常数为 β ,群速度、群延时分别为^[2]:

$$v_g = d\omega/d\beta, \tau = 1/v_g = d\beta/d\omega \quad (1)$$

色散系数(dispersion coefficient)定义为单位波长间隔(1 nm)的两个频率成分在光纤中传输单位距离(1 km)时所产生的群时延,单位是 ps/km·nm。单模光纤中的波长色散为^[2-3]:

$$D(\lambda) = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{1}{c\lambda} k_0 \frac{d^2\beta}{dk_0^2} \quad (2)$$

式中: λ 为光波波长; $k_0 = 2\pi/\lambda$,为自由空间的相位常数; c 为真空中的光波速度。如果定义归一化传输常数(normalized propagation constant)为^[17]:

$$b = \frac{\beta^2 - n_2^2 k^2}{n_1^2 k^2 - n_2^2 k^2} = \frac{n_{\text{eff}}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

式中: n_1 、 n_2 分别为光纤纤芯和包层的折射率; $n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0}$ 为模式的有效折射率; $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为自由空间的波数; λ 为真空中光波波长; β 为模式的传输常数。从而计算得传输常数为:

$$\beta = k_0 n_1 \left(\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 + \frac{2(n_1^2 - n_2^2)b}{2n_1^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

则波长色散系数为:

$$D(\lambda) = \frac{k_0}{c\lambda} \frac{dN_1}{dk_0} - \frac{k_0}{c\lambda} (N_1 - N_2) \frac{V}{k_0} \frac{d^2(bV)}{dV^2} \quad (5)$$

式中: $N_1 = \frac{d}{dk_0} (k_0 n_1)$, $N_2 = \frac{d}{dk_0} (k_0 n_2)$, $V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$; a 为光纤纤芯半径。如果将公式(5)写成:

$$D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_w(\lambda) \quad (6)$$

式中: $D_m(\lambda) = \frac{1}{c\lambda} \frac{dN_1}{d\lambda}$ 为光纤的材料色散,由光纤材料的折射率随光波波长变化决定的; $D_w(\lambda) = \frac{N_1 - N_2}{c\lambda} V$

$\frac{d^2(bV)}{dV^2}$ 为光纤的波导色散,由光纤中传输模式的归

一化参数及归一化频率决定的,与纤芯半径、相对折射率差以及折射率分布相关。

由公式(5)可知光纤的色散包括材料色散和波导色散,材料色散包含变量项 $\frac{d(Vb)}{dV}$,波导色散包含变量项 $V\frac{d^2(Vb)}{dV^2}$,而光纤的归一化频率 V 和归一化传输常数 b 是由光纤的边界条件所决定的,如果光纤的边界条件发生变化(如折射率分布变化等),会导致光纤的归一化频率 V 和归一化传输常数 b 发生变化,从而导致光纤色散的改变。

1.2 光纤色散随 V 参数及折射率的变化

从上面的理论分析可知,引起光纤波导性能变化的关键参数是光纤的归一化频率,计算普通光纤的色散变量项、约束系数、模式的归一化传输常数随归一化频率 V 的变化,结果如图 1 所示。

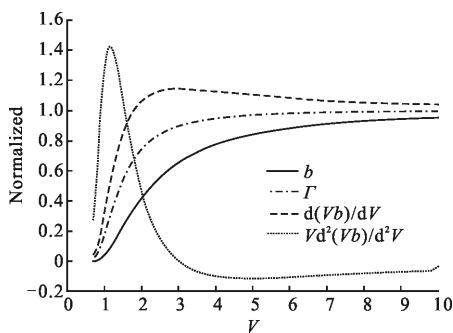


图 1 光纤的色散变量、约束系数、模式归一化传输常数随 V 变化曲线

Fig.1 Curves of $b, \Gamma, \frac{d(Vb)}{dV}, V\frac{d^2(Vb)}{dV^2}$ varying with V

计算结果表明:光纤的约束系数、模式的归一化传输常数随 V 参数的增大而增大,变化量逐渐减小并趋于稳定。波导色散变量项在 V 的取值区间 0.6~4.0 范围内变化较大,曲线较陡,在 $V=1.1\sim 1.2$ 附近达到最大值,当 V 值超过 4.0 以后,随 V 值的继续增大而变化缓慢。材料色散变量项在 V 的取值区间 0.6~2.0 内变化较大,曲线较陡,随 V 值继续增大而变化缓慢,在 $V=2.9\sim 3.0$ 附近达到最大值。通过以上的计算结果分析可以预测,核辐射导致普通光纤的纤芯、包层的折射率增大,光纤的归一化 V 参数值相应变化,光纤的色散将发生变化。

光纤的材料色散、波导色散随光波信号波长的变化如图 2 所示。计算结果表明:材料色散系数随信

号波长的变化相对较大,而波导色散在能够维持单模边界条件情况下则变化非常小。

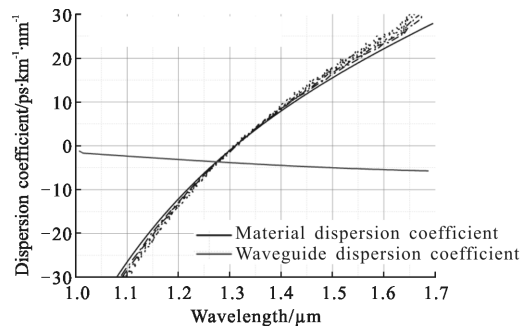


图 2 光纤的材料色散、波导色散随光波信号波长变化曲线

Fig.2 Curves of material dispersion and waveguide dispersion varying with signal wavelength

1.3 γ 辐射对光纤折射率的变化

光纤的折射率是由光纤中材料原子的极化率和体积决定的,表征物质的折射率与分子(原子)极化率关系的洛伦兹-洛伦茨(Lorentz-Lorenz)公式为^[18]:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \quad (7)$$

分子(原子)折射度与物质折射率的关系为:

$$R = \frac{M}{\rho} \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} = \frac{M}{\rho} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad (8)$$

式中: R 为分子(原子)折射度; M 为分子(原子)量; N 为单位体积中的分子(原子)数; ϵ_r 为物质的相对介电常数; ρ 为物质密度; α 为分子的极化率; ϵ_0 为真空中的介电常数。与原子的极化率呈正比,与原子体积呈反比。

当光纤受到 γ 辐射时,由于自由电子及极化电荷的密度随着辐射剂量的增加而增加,必然会导致折射率的变化。此时光纤波导边界条件将改变,即 $\rho=0, J=0, \nabla \epsilon=0$ 均不满足,此时求解光纤中传输模式电磁场的解析解将非常困难。可以认为 γ 辐射光纤时产生的康普顿效应对光纤波导的影响是对折射率的扰动。利用 Matlab 程序计算光纤芯径、包层折射率的扰动对电场幅值的影响,可以分析光纤波导在辐射作用时波导性能的变化^[19-20]。

γ 辐射作用光纤时以康普顿效应为主,从能量沉积的角度来分析光纤中的电子密度可得光纤中的康普顿电子的密度为^[21-22]:

$$n_e = \frac{E_{dep} N_\gamma}{17 V_o} \quad (9)$$

式中： E_{dep} 为 γ 辐射光子在光纤中的平均沉积能量； N_γ 为光纤吸收的 γ 辐射光子总数； V_0 为受辐射的光纤体积。

计算得到 γ 辐射产生光纤折射率的变化，从而导致光纤感生色散量增大，如图 2 所示(虚线部分)。在相同剂量条件下， γ 辐射导致材料色散增加量比波导色散增加量要大得多，光纤总辐射感生色散主要是材料色散增量。

2 测量实验及结果分析

2.1 时域法光纤色散测量系统

采用时域法对经受 γ 辐射光纤的色散进行实时测量^[23]，以分析辐射对光纤色散的影响。时域法测量光纤色散的装置如图 3 所示。实验中采用自行研制的脉冲半导体激光器作为测量光源，输出脉冲时间宽度(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 300 ps，探测器采用 New focus 的 1592 型 DC-3.5 GHz 带宽的 InGaAs 近红外探测器，波形记录仪为 LeCroy 640Zi WaverRunner 瞬态数字示波器，其采样速率为 40 GS/s、模拟带宽为 4 GHz，触发器为 HP8131A。触发器产生脉冲信号，使脉冲半导体激光器和瞬态数字示波器在时间上同步关联。被测光纤为 ITU G.652、ITU G.655 光纤。

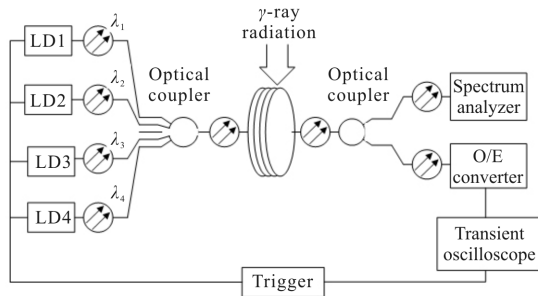


图 3 用时域法测量光纤色散实验系统构成示意图

Fig.3 Schematic experimental setup for measuring dispersion by time domain method

半导体激光器的中心波长随结区温度的变化会略有改变，实验中用 Agilent86140B 光谱仪实时监测脉冲半导体激光器的输出光谱，实验中监测某时刻四只脉冲激光器输出光谱曲线如图 4 所示(由 1306 nm 处及 1550 nm 处两幅图合成)。其中心波长如表 1 所示，4 只脉冲光源的光谱宽度均为 0.06 nm。

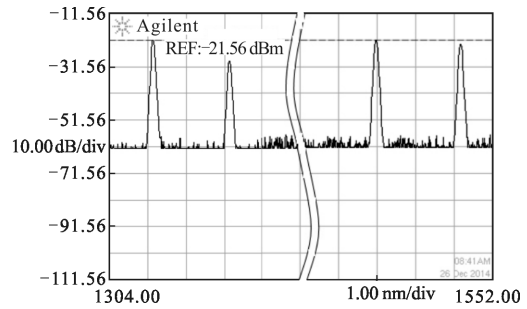


图 4 半导体激光的光谱曲线

Fig.4 Curves of laser diode output spectra

表 1 半导体激光的中心波长

Tab.1 Center wavelengths of pulsed laser diodes

Pulsed LD	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
Wavelength/nm	1 305.65	13 07.63	1 549.49	1 551.68

2.2 测量结果及分析

实验记录典型脉冲信号及延时信号波形如图 5 所示。为在同一幅图像上同时显示四个波长脉冲信号及其延时信号，示波器扫速设定为 5 ns/div，在实际测量时示波器的扫速设定为 200 ps/div。从图 5 的记录波形能够观察到不同脉冲信号间因 γ 辐射而产生的延时变化量，同时能够测量其幅度随剂量的变化量，辐射感生损耗引起的信号幅度降低要比辐射感生色散引起的脉冲展宽明显得多。

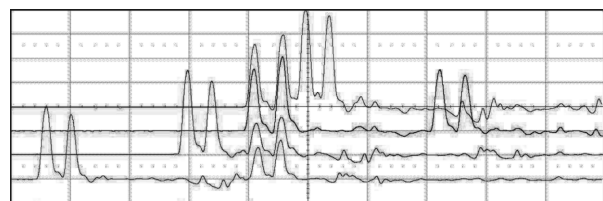


图 5 实验中记录信号波形

Fig.5 Waveforms recorded in the experiments

在中心波长 1306 nm、1550 nm 附近，分别测量各自两脉冲信号间的延时，同时监测中心波长间的光谱宽度，事先测量两型光纤的长度，根据脉冲信号延时、光纤长度、两中心波长间的光谱宽度，可以计算得到光纤的平均色散系数，结果如表 2 所示。 L 为光纤长度， \bar{D} 为该长度光纤的平均色散系数，实验采用 ^{60}Co 稳态 γ 源，剂量率 0.12 Gy/s，辐射总辐射剂量为 500 Gy。

表 2 实验数据及结果

Tab.2 Data of experiments and results

Fiber type	L/km	λ_0/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$\Delta\tau/\text{ps}$	\bar{D} / $\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$
G.652	8.262	1 306.6	1.98	-40	-2.4
		1 550.6	2.19	298	16.4
G.652 under test	2.079	1 306.6	1.99	-12	-2.9
		1 550.6	2.20	80	17.5
G.655	6.802	1 306.8	1.94	-190	-14.4
		1 550.8	2.16	64	4.4
G.655 under test	3.547	1 306.8	1.96	-104	-15.0
		1 550.8	2.18	36	4.7

表 2 结果表明： γ 辐射导致两型光纤的色散系数均有增加，即辐射感生色散，远离零色散波长处的色散系数比零色散附近波长处的要大些，测量结果与图 2 模拟计算结果相符合。

在中心波长 1 306 nm 附近，对 ITU G.652 光纤色散系数随辐射剂量变化进行了测量，实验数据及拟合曲线如图 6 所示。

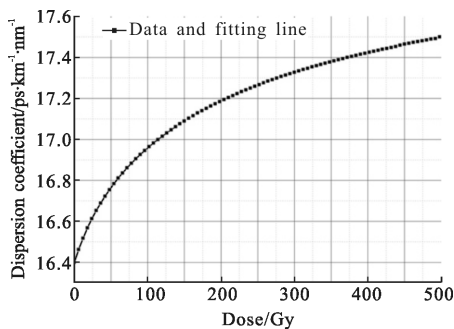


图 6 色散系数随辐射剂量变化数据

Fig.6 Data of dispersion coefficient related to irradiation dose

图 6 的实验结果表明：该型光纤的色散系数随辐射剂量的增加而增大，在一定的剂量范围内 (0~500 Gy) 逐渐增大并呈现饱和趋势。

3 结 论

对 γ 辐射作用于融石英单模光纤产生的色散影响进行了分析和模拟计算，实验测量了两型单模光纤在 1 306 nm、1 550 nm 处的色散量随稳态 γ 辐射

剂量的变化，验证了辐射对色散影响的存在，得到了色散随辐射剂量变化数据并分析了其变化趋势，实验测量与理论计算结果相符合。

由于自行研制的脉冲半导体激光器时间宽度的限制，对脉冲波形的时间间隔测量造成一定的影响，为更加准确测量光纤色散，需要进一步提高调制信号源的性能，使半导体激光器输出光信号的时间宽度更窄。

参 考 文 献：

- [1] Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 54-91. (in Chinese)
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 54-91.
- [2] Li Yuquan, Cui Min. Theory and Technology of Light Waveguide [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2002: 157-166. (in Chinese)
李玉权, 崔敏. 光波导理论与技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002: 157-166.
- [3] Liu Deming, Xiang Qing, Huang Dexiu. Fiber Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 122-135. (in Chinese)
刘德明, 向清, 黄德修. 光纤光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 122-135.
- [4] Ye Peida, Wu Yizun. Foundation Principle of Lightwave Technology [M]. Beijing: People's Post and Telecommunication Press, 1984: 165-319. (in Chinese)
叶培大, 吴彝尊. 光波导技术基本理论 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1984: 165-319.
- [5] Mei Zhenyue. Nuclear Physics [M]. Beijing: Science Press, 1966: 1-36. (in Chinese)
梅镇岳. 原子核物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1966: 1-36.
- [6] Fudan University, Tsinghua University, Peking University. Nuclear Physics Experimental Methods [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1981: 36-72. (in Chinese)
复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法 [M]. 北京: 原子能出版社, 1981: 36-72.
- [7] Li Xinghong. Foundation of Radiation Protection [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982: 17-27. (in Chinese)
李星洪. 辐射防护基础 [M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 17-27.
- [8] Friebele E J, Lyon P B, Blackburn J, et al. Interlaboratory comparison of radiation-induced attenuation in optical fibers.

- Part III: Transient exposures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(6): 977-989.
- [9] Girard S, Keurincq J, Ouerdane Y, et al. γ -ray and pulsed X-ray radiation responses of germanosilicate single-mode optical fibers: influence of cladding co-dopants [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(8): 1915-1922.
- [10] Wang Xueqin, Zhang Chunxi, Jin Jing, et al. Radiation-induced attenuation effect on special optical fibers applied in space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2516-2520. (in Chinese)
王学勤, 张春熹, 金靖, 等. 空间用特种光纤的辐射致衰减效应[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2516-2520.
- [11] Liu Fuhua, An Yuying, Wang Ping, et al. Radiation-induced loss of pulsed γ -ray on optical fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1056-1062. (in Chinese)
刘福华, 安毓英, 王平, 等. 脉冲 γ 射线对光纤的辐射感生损耗[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 1056-1062.
- [12] Moss C E, Casperson D E, Echave M A, et al. A space fiber-optic X-ray burst detector [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, 41(4): 1328-1332.
- [13] Deparis O, Mégret P, Decréto M, et al. Gamma radiation tests potential optical fiber candidates for fibroscopy[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, 43(6): 3027-3031.
- [14] Borgermans P, Noël M. Multiple wavelength analysis of radiation-induced attenuation on optical fibers: a novel approach in fiber optic dosimetry [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1998, 47(5): 1255-1258.
- [15] Naka R, Watanabe K, Kawarabayashi J, et al. Radiation distribution sensing with normal optical fiber [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001, 48(6): 2348-2351.
- [16] Klein D M, Yukihara E G, Bulur E, et al. An optical fiber radiation sensor for remote detection of radiological materials [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(4): 581-588.
- [17] Mohamed A E -N A, Rashed A N Z, El Tokhy M S, et al. An accurate model for chromatic dispersion in optical fibers under radiation and thermal effects [C]//2013 Proceedings of International Conference on Modeling, Identification & Control (ICMIC), 2013: 10-15.
- [18] Yasuo Kokubun. Lightwave Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002, 131-136. (in Chinese)
国分泰雄. 光波工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 131-136.
- [19] Li Jingzhen. Optics Handbook [J]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2010: 273-278. (in Chinese)
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010: 273-278.
- [20] Ou Pan, Dai Yitang, Wang Aimin, et al. Senior Optical Numerical Computing[M]. Beijing: Beihang University Press, 2011: 88-128. (in Chinese)
欧攀, 戴一堂, 王爱民, 等. 高等光学仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 88-128.
- [21] Liu Fuhua, Wang Ping, Chen Shaowu, et al. Influence of gamma-ray radiation on electromagnetic field distribution of optical fiber waveguide [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1788-1792. (in Chinese)
刘福华, 王平, 陈绍武, 等. γ 辐射对光纤波导电磁场分布的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1788-1792.
- [22] Ma Tengcai, Hu Xiwei, Chen Yinhua, et al. Principle of Plasma Physics [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1988: 170-175. (in Chinese)
马腾才, 胡希伟, 陈银华, 等. 离子体物理原理 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1988: 170-175.
- [23] Ma Rende, Wang Zhengping, Wang Feng, et al. Calculation of electron energy deposition at fiber core [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(5): 55-58. (in Chinese)
马任德, 王政平, 王峰, 等. 辐照电子在光纤芯处能量沉积的计算[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(5): 55-58.
- [24] Zhang Rongjun, Zheng Yuxiang, Li Jing, et al. The dispersion and attenuation measurement system for single mode optical fiber [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2009, 28(10): 28-32. (in Chinese)
张荣君, 郑玉祥, 李晶, 等. 单模光纤的色散和损耗特性测量系统[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(10): 28-32.