

## 脉冲 $\gamma$ 射线对光纤的辐射感生损耗

刘福华<sup>1</sup>, 安毓英<sup>1</sup>, 王平<sup>2</sup>, 陈绍武<sup>2</sup>, 谢红刚<sup>2</sup>, 刘卫平<sup>2</sup>, 邵碧波<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071;

2. 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:** 研究了光纤受  $\gamma$  射线辐照响应机制, 计算了光纤对  $\gamma$  射线吸收率、效应截面、Compton 电子的能通量及角度分布; 提出了瞬态辐射感生损耗的测量方法, 采用波长分别为 405、660、850、1 310、1 550 nm 的模拟宽带光纤传输系统, 设计了瞬态辐射感生损耗的实验测量系统。在平均光子能量 0.3 MeV、剂量率  $2.03 \times 10^7$  Gy/s 和平均光子能量 1.0 MeV、剂量率  $5.32 \times 10^9$  Gy/s 的两种脉冲  $\gamma$  射线辐照条件下, 获得了 4 种光纤瞬态辐射感生损耗与剂量的关系、永久性感生损耗的谱分布和折射率变化结果: (1) 脉冲  $\gamma$  射线对光纤的瞬态辐射感生损耗随探测波长在近红外到可见光范围内的减小而增大; (2) 在相同辐照条件下, 多模光纤的瞬态辐射感生损耗稍大于单模光纤; (3) 辐射致光纤折射率降低; (4) 在一定剂量范围内, 多模光纤瞬态辐射感生损耗和剂量呈近似线性关系。研究表明,  $\gamma$  射线导致光纤基质原子产生新的色心和光纤折射率降低, 色心对传输光子的共振吸收导致光纤吸收损耗增加, 折射率降低导致光纤波导损耗增加, 感生损耗是两种机制共同作用的结果。

**关键词:** 瞬态辐射感生损耗; 脉冲  $\gamma$  射线; 光纤; 色心; 折射率

**中图分类号:** TN253; O436.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1056-07

## Radiation-induced loss of pulsed $\gamma$ -ray on optical fibers

Liu Fuhua<sup>1</sup>, An Yuying<sup>1</sup>, Wang Ping<sup>2</sup>, Chen Shaowu<sup>2</sup>, Xie Honggang<sup>2</sup>, Liu Weiping<sup>2</sup>, Shao Bibo<sup>2</sup>

(1. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China,

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

**Abstract:** General mechanisms for effects of  $\gamma$ -ray radiation on optical fibers were studied. Absorption coefficient of  $\gamma$ -ray, cross sections of different effects, energy and flux and angle distributions of resulting Compton recoil electrons in optical fibers were calculated. An experimental method for transient radiation-induced loss measurement was presented. In order to measure transient radiation loss induced by pulsed  $\gamma$ -ray in optical fibers, it was developed that an experimental measurement system which applied analog broad bandwidth optical fiber links with five different wavelength lasers such as 405, 660, 850, 1 310 and 1 550 nm. Two different kinds of pulsed  $\gamma$ -ray devices with average photon energy of 0.3 MeV, dose rate of  $2.03 \times 10^7$  Gy/s and average photon energy of 1.0 MeV, dose rate of  $5.32 \times 10^9$  Gy/s were used to irradiate four types of optical fibers in experiments. The transient radiation-induced loss and its

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61107041)

作者简介: 刘福华(1967-), 男, 研究员, 主要从事激光测量和光纤应用技术方面的研究。Email: liufuhua\_2000@sohu.com

relationship with total doses of exposure were measured, and also the permanent radiation-induced losses with light spectrum, changes of refractive index. The experimental results show that: (1) The transient radiation-induced loss will increase as the detecting laser wavelength shifts from near-infrared to visible regions of optical spectrum.(2) Under the same experimental condition, the transient radiation-induced loss of multimode fibers is slightly larger than single-mode fibers.(3) The radiation of  $\gamma$ -ray will slightly decrease the refractive index of optical fibers.(4) Within a certain dose range transient radiation-induced loss in multi-mode fiber displays a nearly linear dependence upon total dose. The conclusion can be deduced that the generation of new color centers in fiber materials due to Compton electrons will increase the absorption loss and the changes of refractive index will lead to additional waveguide loss in optical fibers. Both radiation-induced loss mechanisms exist simultaneously; therefore, radiation-induced loss is the result of joint action of the two.

Key words: transient radiation-induced loss; pulsed  $\gamma$ -ray; optical fiber; color center; refractive index

## 0 引言

在快脉冲信号传输技术方面, 光纤与同轴电缆相比, 具有频带宽、传输容量大、损耗低、抗电磁干扰能力强等优点, 已经在工业、军事等领域得到广泛应用。然而当受到核辐射时, 光纤的光学参数将发生变化, 光纤系统的性能也将随之恶化。如何评价在核辐射环境中的光纤系统性能、如何实现光纤的抗核辐射加固、能否利用光纤的性能变化与辐射之间的关系实现光纤辐射探测等问题, 一直伴随着光纤应用技术的发展过程。自从光纤问世之初, 人们就开始研究光纤受核辐射而产生的感生损耗等<sup>[1-7]</sup>。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, 如研制出抗辐射光纤<sup>[8-9]</sup>。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<sup>[10-14]</sup>。文中对 $\gamma$ 射线对光纤的作用效应进行了分析, 利用 Monte Carlo 方法对 $\gamma$ 射线的吸收、效应截面、Compton 效应中的反冲电子的能量及角度分布等进行了计算, 利用电磁场理论研究了光纤波导约束系数随折射率的变化, 利用 2 种不同光子能量和剂量率的脉冲 $\gamma$ 辐射源分别对 4 种光纤开展了辐照实验, 对光纤瞬态辐射感生损耗进行了测量, 同时对光纤感生损耗热稳定性以及折射率的变化进行实验测量, 分析了不同光纤的感

生损耗差异及损耗产生的机理。

## 1 $\gamma$ 射线对光纤作用效应分析

### 1.1 光纤损耗机制

损耗是光纤固有的性质。按照产生机制的不同, 光纤损耗主要分为: 吸收损耗、散射损耗、波导损耗以及弯曲损耗等<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 $\gamma$ 射线对光纤辐射效应

针对常规的融硅光纤,  $\gamma$ 辐射的电磁作用有如下几种效应:(1) 光电效应: 单个光子把能量全部转移给光纤原子中的电子, 其中一部分能量用来克服电子的结合能, 剩下的能量作为电子的动能, 即为光电效应, 当辐射光子能量较低时这种效应起主导作用;(2) Compton 效应: 光子被原子中的电子散射, 其飞行方向发生偏转, 光子的部分能量转移给电子, 使电子脱离原子核束缚;(3) 电子对效应: 辐射光子与原子核中的库仑场作用, 光子转化为正、负电子对;(4) 散射效应: 光子被原子中的电子散射, 飞行方向发生偏移。当光子能量低、其波长和原子线径差不多时, 散射是相干的, 光子能量不变, 即为 Thomson 散射<sup>[17-18]</sup>。

### 1.3 效应分析

#### (1) 光纤对 $\gamma$ 射线吸收率

利用 Monte Carlo 方法的 Geant4 程序, 计算光纤对 $\gamma$ 射线的透过率随光子能量变化如图 1 所示。可以看出, 光纤对 $\gamma$ 射线的吸收率非常低。

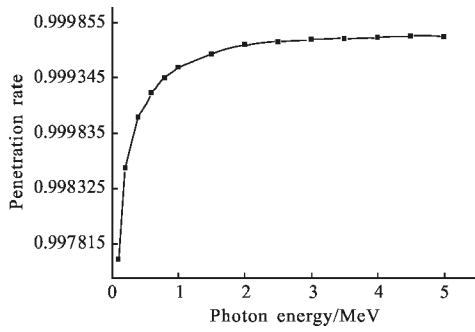


图 1 光纤对  $\gamma$  射线的透过率随光子能量变化曲线

Fig.1 Curve of penetration rate of  $\gamma$ -ray into optical fibers as a function of photo energy

(2) 不同效应截面

4 种不同效应截面及总截面随光子能量变化如图 2 所示。从结果可以看出,当光子能量在 0.1~1.0 MeV 时,以 Compton 效应为主。

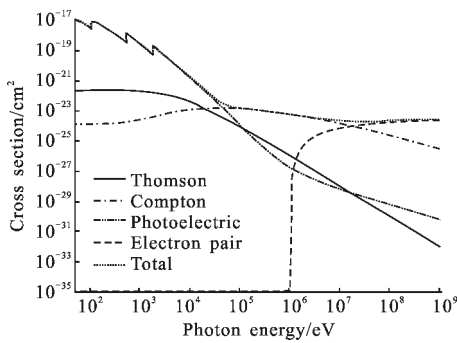


图 2 不同效应截面及总截面随光子能量变化曲线

Fig.2 Curve of different effect and total cross sections varying with photon energy

(3) Compton 效应分析

Compton 效应产生的反冲电子是光纤光学性能发生变化的主要因素,下面分析 Compton 电子在融硅光纤中的能通量和角度分布。设  $h\nu$  和  $h\nu'$  分别为入射光子和散射光子的能量,  $\theta$  和  $\varphi$  分别为散射光子、反冲电子与入射光子方向间的夹角,电子动量为  $P$ 、动能为  $E_e$ ,  $m_e$  为电子静止质量,则电子的总能量  $E$  为:

$$E = E_e + m_e c^2 \tag{1}$$

根据能量和动量守恒定律,以及能量和动量的关系可得:

$$h\nu = h\nu' + E_e \tag{2}$$

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos\theta + P \cos\varphi \tag{3}$$

$$\frac{h\nu'}{c} \sin\theta = P \sin\varphi \tag{4}$$

相对论能量和动量的关系<sup>[18]</sup>:

$$E^2 = m_e^2 c^4 + P^2 c^2 \tag{5}$$

利用 Geant4 程序计算电子的能通量分布随光子能量在 0.1~1.0 MeV 之间的变化。当光子能量为 0.3 MeV 和 1.0 MeV 时,电子的能、通量分布分别如图 3 和 4 所示。

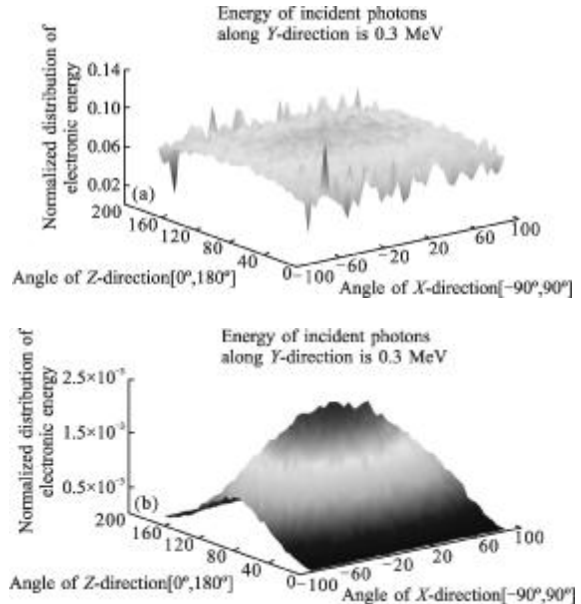


图 3 光子能量为 0.3 MeV 时 Compton 电子能量通量分布图  
Fig.3 Distribution of resulting Compton recoil electronic energy and intensity in horizontal profile of optical fiber while photo energy of  $\gamma$ -ray is 0.3 MeV respectively

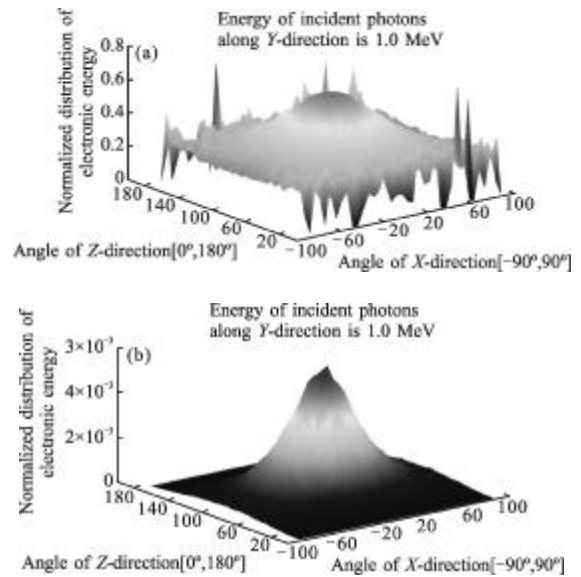


图 4 光子能量为 1.0 MeV 时 Compton 电子能量通量分布图  
Fig.4. Distribution of resulting Compton recoil electronic energy and intensity in horizontal profile of optical fiber while photo energy of  $\gamma$ -ray is 1.0 MeV respectively

图中竖坐标表示电子的能、通量分布,  $\gamma$  射线沿该方向垂直作用于光纤, 水平坐标表示以  $\gamma$  射线作用于光纤点为中心的角度。可以看出, 随  $\gamma$  射线光子能量的增加, 电子的能、通量均增加, 且沿  $\gamma$  射线作用方向集中。

当  $\gamma$  射线辐照到光纤上时发生 Compton 效应, 光纤基质及掺杂粒子原子吸收部分光子能量, 产生新的色心, 反冲电子通过电离损失继续与光纤基质及掺杂粒子原子相互作用, 产生新的色心; 同时光纤材料中的电子和极化电荷浓度相应增大, 从而改变材料的介电常数。

(4) 光纤模场分析

利用 Maxwell 方程组及光纤边界条件, 可推导出正则光纤波导中传输主模的场解为:

$$E_{x(y)} = E_0 \begin{cases} J_0(Ur/a)/J_0(U) & 0 \leq r \leq a \\ K_0(Wr/a)/K_0(W) & r > a \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $U = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} a$ ;  $W = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} a$ ;  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  为自由空间的波数;  $\lambda$  为真空中光波波长;  $n_1, n_2$  分别为纤芯和包层的折射率;  $\beta$  为电磁波沿光纤方向的传输常数。

当光纤受到  $\gamma$  辐射时, 由于自由电子及极化电荷的产生, 材料介电常数增大, 波导边界条件将改变, 即  $\rho=0, \vec{J}=0, \nabla \cdot \epsilon=0$  均不满足, 此时求解光纤中传输主模电磁场的解析解非常困难, 可以认为 Compton 效应对光纤波导的影响是折射率的微扰。利用 Matlab 程序计算纤芯折射率微扰对电场分布的影响如图 5 所示。

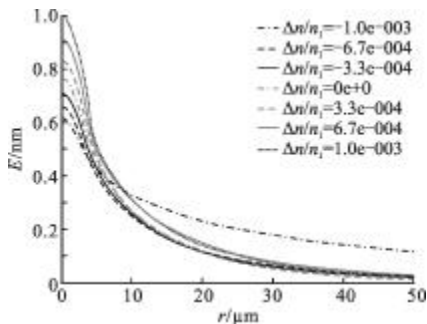


图 5 相对场强分布随折射率变化曲线

Fig.5 Relative distribution of electric field intensity in optical fiber as a function of refractive index changes

可以引入约束系数(Confinement factor)来分析因折射率微扰而引起的场强分布变化, 即在横跨纤

芯和包层的光功率, 纤芯中所占总功率的比例。根据 Poynting 定理可知, 约束系数用极坐标可表示为<sup>[19]</sup>:

$$\Gamma = \frac{\frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-a}^a \int_0^{2\pi} (\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot \vec{g} r \, dr \, d\theta}{\frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} (\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot \vec{g} r \, dr \, d\theta} \quad (7)$$

式中: 带 \* 号表示复共轭。对于阶跃型折射率分布光纤, 约束系数可简化为:

$$\Gamma = \frac{V + \sqrt{b}}{V + \frac{1}{\sqrt{b}}} \quad (8)$$

式中:  $b = \frac{(\beta/k_0)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$  为归一化传输常数。

利用 Matlab 程序计算纤芯、包层折射率微扰对约束系数的影响如图 6 所示。

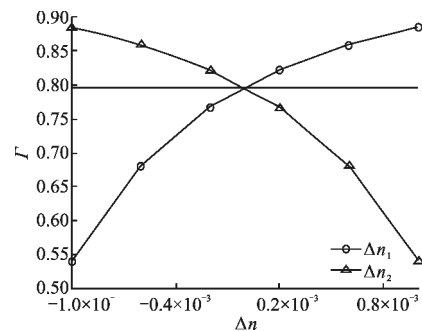


图 6 约束系数随纤芯及包层折射率变化曲线

Fig.6 Confinement factors as a function of refractive index changes

2 测量系统构成

脉冲  $\gamma$  射线在光纤中产生的瞬态辐射感生测量系统设计构成如图 7 所示。系统主要由四部分组成:

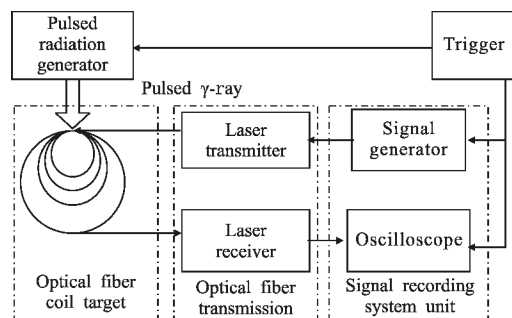


图 7 脉冲  $\gamma$  射线辐照光纤产生的瞬态辐射感生损耗测量系统结构

Fig.7 Schematic diagram of experimental setup for measuring transient radiation-induced loss in optical fibers under pulsed  $\gamma$ -ray exposure

脉冲辐射源、信号记录单元、模拟宽带光纤传输组件和光纤测量靶。脉冲  $\gamma$  射线由大型电子加速器打靶产生, 选用 2 种脉冲辐射源: 平均光子能量 0.3 MeV、剂量率  $2.03 \times 10^7$  Gy/s, 和平均光子能量 1.0 MeV、剂量率  $5.32 \times 10^9$  Gy/s。测试光纤选用 4 种: 符合 ITU G.651 (62.5/125  $\mu\text{m}$ 、50/125  $\mu\text{m}$ )、G.652、G.655 规范的裸光纤。

### 3 实验结果及数据分析

#### 3.1 瞬态辐射感生损耗的幅度特性

高通量脉冲  $\gamma$  辐射对 4 种光纤的瞬态辐射感生损耗平均值如表 1 所示。低通量脉冲  $\gamma$  辐射对 2 种光纤的瞬态辐射感生损耗平均值如表 2 所示。从实验结果可以看出, 在相同实验条件下, 多模光纤的瞬态辐射感生损耗大于单模光纤; 瞬态辐射感生损耗随探测波长在近红外到可见光区域的减小而增大。

表 1 高通量脉冲  $\gamma$  辐射辐照时光纤平均感生损耗  
Tab.1 Average transient radiation-induced loss of optical fibers under high flux pulsed  $\gamma$ -ray radiation

Optical fiber types	Radiation-induced loss at different detection wavelength/(dB/m · Gy <sup>-1</sup> )	
	1 310 nm	1 550 nm
G.651(50/125 $\mu\text{m}$ )	0.027	0.016
G.651(62.5/125 $\mu\text{m}$ )	0.037	0.017
G.652	0.023	0.015
G.655	0.031	0.011

表 2 低通量脉冲  $\gamma$  辐射辐照时光纤平均感生损耗  
Tab.2 Average transient radiation-induced loss of optical fibers under low flux pulsed  $\gamma$ -ray radiation

Optical fiber types	Radiation-induced loss at different detection wavelength/(dB/m · Gy <sup>-1</sup> )		
	405 nm	660 nm	850 nm
G.651(50/125 $\mu\text{m}$ )	6.94	6.34	1.87
G.651(62.5/125 $\mu\text{m}$ )	7.55	6.92	2.15

在低通量脉冲  $\gamma$  辐射作用下, 利用波长为 850 nm 的激光测量系统探测 G.651 62.5/125  $\mu\text{m}$  光纤的瞬态辐射感生损耗, 总剂量范围为 0.1~3.5 Gy, 测量数据点及拟合曲线如图 8 所示。在该剂量范围内, 瞬态辐射感生损耗和辐射剂量呈近似线性关系。但随着总剂量的增大, 辐射感生损耗出现饱和趋势。

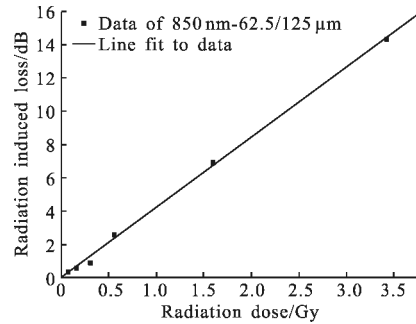


图 8 瞬态辐照感生损耗和剂量关系数据及拟合曲线

Fig.8 Experimental data and fitting curve of transient after exposure radiation-induced loss

#### 3.2 瞬态辐射感生损耗的时间特性

瞬态辐射感生损耗测量实验中典型波形如图 9 所示(图中纵坐标为 200mV, 横坐标为 50ns)。由此可知, 光纤对脉冲  $\gamma$  辐射作用产生瞬态辐射感生损耗响应

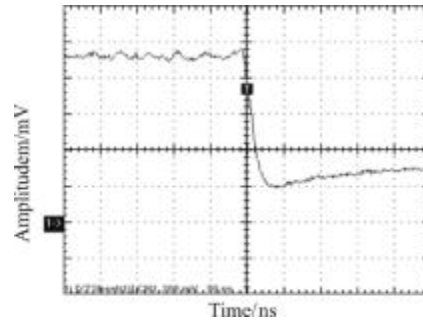


图 9 脉冲辐射测量实验记录典型波形

Fig.9 Typical signal waveform of transient radiation-induced loss recorded in the experiment

前沿时间为 5 ns, 后沿约为 1  $\mu\text{s}$ 。为了进一步探索辐射感生损耗的恢复情况, 对经受辐照过的光纤在环境实验箱中加热到 80  $^{\circ}\text{C}$  并保持 2 h, 测量 700~1 600 nm 范围内的光谱损耗, 并与辐射前进行比较, G.651(62.5/125  $\mu\text{m}$ ) 光纤的测量结果如图 10 所示。

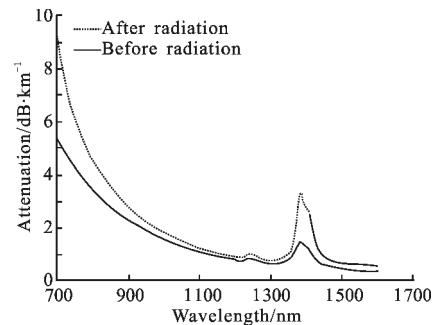


图 10 辐照前后光纤的光谱损耗对比曲线

Fig.10 Spectrum loss curve comparison before and after exposure

从实验结果可以看出:瞬态辐射感生损耗已经恢复,但永久性感生损耗仍然存在,瞬态辐射感生损耗比永久性辐射感生损耗要大得多。短时间热漂白过程对光纤的永久性感生损耗恢复效果不大。

### 3.3 辐射对光纤折射率的影响

对经受不同辐照剂量脉冲 $\gamma$ 辐照的光纤折射率分布进行测量,并与辐照前进行比较,G.651(62.5/125 $\mu\text{m}$ )光纤的测量结果如图11所示。从实验结果可以看出,辐射致光纤折射率降低,变化值随辐射剂量的增大而增大。

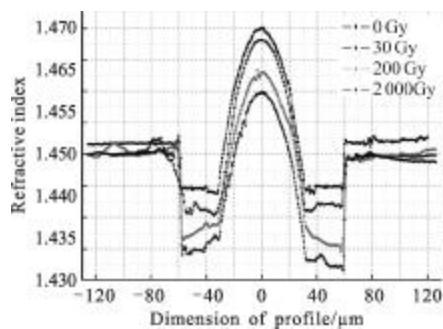


图11 光纤的折射率分布随辐射总剂量变化曲线

Fig.11 Changes of refractive index distribution curve with total dose

### 3.4 辐射感生损耗形成机制分析

色心是光纤中杂质、原子缺陷、原子排列不整齐或载流子被束缚在某些缺失或杂质原子周围而形成对特定光谱的吸收。 $\gamma$ 射线作用光纤时 Compton 效应会产生电子和空穴,形成新色心,将导致光纤在可见光和近红外区域产生辐射感生吸收损耗。新色心的寿命很短,光纤对脉冲辐射响应较快,复合会降低其继续形成的速率。所以在一定的辐射剂量范围内,光纤辐射感生损耗和剂量呈线性关系,但随着剂量的增加,光纤辐射感生损耗会呈现饱和趋势。

Compton 效应还会导致光纤中自由电子和极化电荷的浓度增加,介电常数梯度发生改变,从而影响光纤对传输模式的选择能力,宏观上表现为折射率分布的改变,约束系数降低,导致光纤产生附加波导损耗。

光纤辐射感生损耗是由上述两种机制共同作用的结果。

## 4 结论

采用2种不同光子能量和剂量率的脉冲 $\gamma$ 辐射

源装置分别对4种光纤进行了辐射实验,利用可见光和近红外波长测量系统探测到光纤的瞬态辐射感生损耗。从实验结果中可以得出:在相同实验条件下,多模光纤比单模光纤的辐射感生损耗要稍大;辐射感生损耗随测量系统的激光波长变化较大,波长越短,辐射感生损耗越大;Compton 效应导致光纤产生新色心的同时也改变了光纤材料的介电常数,使光纤在近红外和可见光波段产生附加吸收损耗和附加波导损耗,辐射感生损耗是两种机制共同作用的结果。

### 参考文献:

- [1] Mattern P L, Watkins L M, Skoog C D, et al. The effects of radiation on the absorption and luminescence of fiber optic waveguides and materials [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1974, NS-21: 81-95.
- [2] Evans B D, Sigel G H, Jr. Permanent and transient radiation induced losses in optical fibers [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1974, NS-21: 113-118.
- [3] Golob J E, Lyon P B and Looney L D. Transient radiation effects in low-loss optical waveguides [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1977, NS-24(6): 2164-2168.
- [4] Friebele E J. Optical fiber waveguide in radiation environments [J]. Optical Engineering, 1979, 18(6): 552-561.
- [5] Friebele E J, Lyon P B, Blackburn J, et al. Interlaboratory comparison of radiation-induced attenuation in optical fibers. Part III: Transient exposures [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(6): 977-989.
- [6] Han Yanling, Xiao Wen, Yi Xiaosu, et al. Active recovery effect of irradiation optical fiber [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 128-131. (in Chinese)  
韩艳玲,肖文,伊小素,等.辐照光纤的主动恢复效应[J].红外与激光工程,2008,37(1):128-131.
- [7] 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.红外与激光工程,2011,40(12):2516-2520.
- [8] Tsunemi Kakuta, Naoki Wakayama, Kazuo Sanada, et al. Radiation resistance characteristics of optical fibers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(8): 1139-1143.
- [9] Akira Iino, Junich Tamura. Radiation resistivity in silica

- optical fibers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(2): 145-149.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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
- [13] 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.
- [14] Klein D M, Yukihiro 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.
- [15] Liu Songhao, Li Chunfei. Optoelectronic Technology and Application [M]. Guangzhou, Hefei: Guangdong Science and Technology Press, Anhui Science and Technology Press, 2006: 800-801. (in Chinese)
- 刘颂豪, 李淳飞. 光电子学技术与应用 [M]. 广州, 合肥: 广东科技出版社, 安徽科学技术出版社, 2006: 800-801.
- [16] Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 54-91. (in Chinese)
- 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 54-91.
- [17] Mei Zhenyue. Nuclear Physics [M]. Beijing: Science Press, 1966: 1-36.
- 梅镇岳. 原子核物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1966: 1-36.
- [18] Fudan University, Tsinghua University and Peking University. Nuclear Physics Experimental Methods [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1981: 36-72. (in Chinese)
- 复旦大学, 清华大学, 北京大学合编. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1981: 36-72.
- [19] Yasuo Kokubun. Lightwave Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002, 131-136. (in Chinese)
- 国分泰雄, 光波工程. 北京: 科学出版社, 2002, 131-136.

## 下期预览

# 基于欠采样的激光测距数字鉴相方法研究

王心遥<sup>1,2</sup>, 张珂殊<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 欠采样方法为实现全数字化接收、降低激光测距系统复杂性提供了有效途径。针对传统欠采样数字同步解调法引入干扰大的缺点, 为提高系统的测量精度, 提出了欠采样频域谱分析鉴相法。方法基于 Nyquist 采样谱分析鉴相思想, 通过对欠采样后搬移到低频的频谱成分进行分析获取相位信息实现鉴相, 在抵抗干扰方面具有较好的性能。在加入信噪比 40 dB、杂散频率、频率偏移 0.1 MHz、2 次谐波的综合影响因素的仿真结果表明, 在 1 MHz 测距速率下, 欠采样谱分析鉴相法精度为 0.13°, 调制频率 80 MHz 时测距精度为 0.68 mm, 优于传统的欠采样数字同步解调法。因此, 欠采样谱分析法更适用于高速、高精度的数字化相位差测量, 提出的实现方案具有实际意义。