

# 石英光纤近红外波段 $\gamma$ 辐照效应实验研究

王 昭, 杨 军, 张 敏, 刘文祥, 史国凯, 惠海龙

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘 要:** 为提高某光学干涉测量系统的耐辐射能力, 开展耐辐射光纤选型实验。以剂量率为  $0.5 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$  的稳态  $\gamma$  射线和剂量率为  $5.0\times 10^9 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ 、脉冲宽度约 20 ns 的瞬态强  $\gamma$  射线为辐照源, 获得掺锗、掺氟耐辐射单模光纤和常规 G.652 光纤在工作波长 1 550 nm、注入光功率 40 mW 工况下的辐射感生损耗, 结果表明, 实验获得的在线辐射感生损耗数据真实可靠; 在稳态  $\gamma$  射线作用下, 掺锗和掺氟耐辐射光纤的性能差异不大, 辐射感生损耗小于  $17 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ , 随着辐射时间的增加, 辐射损耗呈现饱和, 耐辐射光纤的性能均优于常规单模 G.652 通信光纤; 在瞬态强  $\gamma$  射线作用下, 两个不同型号掺氟光纤的性能最优, 辐射感生损耗峰值分别为  $471.5 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  和  $608.6 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ , 恢复通信时长约  $\mu\text{s}$  量级。掺锗光纤的瞬态辐照性能最差, 辐射感生损耗峰值为  $2\,691.3 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ , 在  $\mu\text{s}$  时间尺度维持感生损耗饱和状态。

**关键词:** 辐射感生损耗; 石英光纤; 稳态辐照; 瞬态辐照

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240188

## 0 引 言

由于光纤具备抗电磁干扰能力强、信号传输损耗小、传输速度快、质量轻等优点, 光纤传感技术在航空航天领域、核辐射探测领域<sup>[1-4]</sup>等特殊环境中得到了广泛应用。但实验表明, 光纤在 X 射线、 $\gamma$  射线、电子和中子等辐射源的作用下, 会产生辐射感生损耗<sup>[5]</sup>。特别是在强脉冲辐射场中, 光纤的瞬态感生损耗可高达数千 dB, 低剂量率环境下的长期辐照积累, 也会产生较大的永久损伤<sup>[6]</sup>。

为开展射线束与物质相互作用而产生的力学效应实验研究<sup>[7]</sup>, 建立了一套光纤位移干涉测量系统<sup>[8]</sup>, 用于获取各种材料在辐照作用下的动态力学响应参数。光纤作为干涉测量系统的信号传输介质, 在辐照区域将直接受辐照影响, 而激光器、光电探测器等器件将置于防护区域内, 因此减弱光纤的辐射感生损耗是提高干涉测量系统耐辐射能力的关键。参考建立的光纤位移干涉测量系统, 需要比各类耐辐射单模光纤在红外波段的稳态和瞬态辐照作用下的在线感生损耗值, 目前国内外还未见相关数据。文中重点开展了掺锗、掺氟耐辐射单模石英光纤和 G.652 普通单

模光纤的辐射比对实验, 分别获取剂量率为  $0.5 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $5\times 10^9 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$  的两种  $\gamma$  射线辐照作用下各型号光纤的感生损耗曲线, 并开展比对分析, 为干涉测量系统中耐辐射光纤的选取提供依据, 为光纤在红外波段耐辐射性能研究提供参考。

## 1 实验设计

参考国内外相关研究, 降低光纤辐射感生损耗的途径主要有:

1) 在辐射区域布置防护屏障, 减小作用于光纤上的辐射剂量和剂量率。

对稳态辐照, 在剂量率相同的条件下, 光纤的辐射感生损耗随剂量增大而增加, 并趋于饱和<sup>[1, 9-10]</sup>; 对脉冲辐射, 光纤的辐射感生损耗同样随着剂量增大而增加<sup>[11]</sup>。与低剂量率的辐照相比, 光纤在高剂量率辐照下的感生损耗要更高<sup>[6, 12]</sup>。因此, 合理地增加防护屏障可以有效降低辐射损耗, 然而在辐照源近区, 由于空间的限制, 部分光纤仍然不能得到有效地防护。

2) 选择光学系统的工作波长为 1 550 nm。

对于常见的石英光纤, 在相同的辐照条件下, 光

收稿日期: 2024-03-05; 修订日期: 2024-05-12

作者简介: 王昭, 男, 副研究员, 博士, 主要从事爆炸与冲击动力学光学测试技术方面的研究。

纤的辐射感生损耗随着工作波长的增大而基本呈现减小趋势<sup>[1, 6, 9, 11, 13]</sup>。

### 3) 选择耐辐射光纤。

光纤的辐射感生现象与辐照作用下石英材料“色心”的形成有关<sup>[6, 10-11, 14]</sup>, 而“色心”与光纤自身的缺陷、杂质浓度、受辐射强度等因素相关<sup>[6]</sup>。参考文献<sup>[10]</sup>综述了掺杂对光纤耐辐射性能的影响, 包括掺 F<sup>[2]</sup>、N、H 和 P 等。经实验验证, 耐辐射光纤相比普通石英光纤而言, 具备良好的耐辐射性能。市售的耐辐射光纤型号较多, 知名的生产厂商包括 Draka、j-fiber、Leoni 和 AFL 等。然而, 市售耐辐射光纤一般只是提供了光纤在稳态辐射源作用下的感生损耗值, 且辐射剂量率不尽相同。因此, 需要开展光纤的辐照实验, 测量各个型号耐辐射光纤的辐射感生损耗值, 为耐辐射光纤型号的选择提供依据。

### 4) 其他方法。

包括升高光纤所在的环境温度<sup>[1, 4, 15]</sup>, 为光纤注入高功率的激光<sup>[16]</sup> 和对光纤进行预先辐照<sup>[6]</sup> 等方法。

然而, 结合光纤干涉测量系统的应用实际, 升高光纤温度的可行性不大; 参考文献<sup>[6]</sup> 指出预先辐照来增强光纤耐辐射能力的方法仅适用于剂量小于 30 Gy 的工况。

综上所述, 为提高光纤干涉测量系统的耐辐射能力, 采取的措施包括: 应在辐射区域适当布置防护屏障; 光纤干涉测量系统的工作波长应选取 1550 nm(大于该波段时, 与之配套的光纤激光器、光电探测器等器件不易采购获取); 需要增大注入光纤的光功率; 需要选择耐辐射性能优良的光纤。

文中重点在于开展辐照实验, 选择耐辐射性能优良的光纤, 对于增大注入光功率等方法将另文讨论。设计了用于实时获取光纤辐射感生损耗数值的测量系统, 如图 1 所示。激光器输出的激光经过 1×8 分光器和 50 m 铠装光纤输入至各光纤样品, 之后再经过另外一组 50 m 铠装光纤输入至光电转换器转变为电压信号, 并利用示波器实时记录。辐照实验的主要参数为: 工作波长 1550 nm、光纤样品入射光功率约 40 mW。

激光器输出功率 0~2 W 可调, 工作中心波长 1550.24 nm, 线宽小于 200 kHz; 50 m 铠装光纤型号 G.652; 光电转换器响应带宽 0~500 MHz, 灵敏度系数约 50 V/W; 示波器带宽 1 GHz。

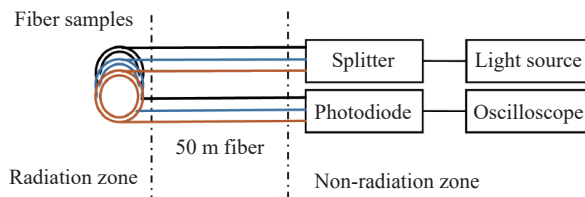


图 1 光纤辐照实验示意图

Fig.1 Schematic of irradiation experiment

经过较为广泛地市场调研, 选取了四个型号单模石英光纤开展辐照实验, 包括进口某型号掺锗耐辐射光纤、国产两个型号的掺氟耐辐射光纤、型号为 G.652 的通信单模光纤, 依次编号为 No.1~No.4。各待辐射光纤样品长度均为 10 m, 裸光纤结构, 为配合脉冲  $\gamma$  射线输出窗口的大小, 将所有待测试光纤整理为直径约 60 mm 的圆环, 均匀布置在直径为 100 mm 的有机玻璃底板上。各待测试光纤留有 1 m 长尾纤, 与铠装光纤利用 FC/APC 接头连接, 为量化  $\gamma$  射线对辐射区域内铠装光纤的影响, 设置了参考光路。参考光路与常规测试光路类似, 但无需接入光纤样品, 2 根 50 m 铠装光纤直接连接。

实验表明, 在 X 射线、 $\gamma$  射线、电子和中子等辐射源的作用下, 光纤的辐射感生损耗灵敏度基本一致<sup>[6]</sup>, 因此仅开展  $\gamma$  辐照实验。为提高该光纤干涉测量系统在各种辐射环境下的适用性, 根据项目需求, 分别在西北核技术研究所的钴源<sup>[17]</sup> 和“强光一号”装置<sup>[18]</sup> 上, 开展稳态  $\gamma$  射线和瞬态强  $\gamma$  射线辐照效应实验。相比较而言, 稳态实验注重辐射总剂量效应, 而瞬态实验更注重辐射剂量率效应。

为便于各光纤辐射感生损耗的定量比较, 沿用光纤损耗系数  $\alpha$  来表征损耗的程度, 其定义为<sup>[1, 19]</sup>:

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (1)$$

式中:  $L$  为光纤长度, km;  $P_{in}$  为输入光功率;  $P_{out}$  为输出光功率。为突出辐射感生损耗, 需要忽略各光纤的固有损耗 (一般小于 0.4 dB/km), 即  $P_{in}$  取未辐照时输出光功率,  $P_{out}$  取辐照时的输出光功率。

## 2 稳态辐照实验

辐照实验系统如图 1 所示。根据实验需求,  $^{60}\text{Co}$  辐照实验的剂量率为  $0.5 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ , 辐照总剂量为 2.5 kGy, 对应的辐照时间约为 1.39 h。辐照现场如

图 2 所示,图中光纤样品置于辐照箱体内,光纤样品 1 m 长的尾纤与铠装光纤连接。



图 2  $^{60}\text{Co}$  辐照现场

Fig.2  $^{60}\text{Co}$  irradiation experiment

由于辐照时间较长,为便于记录,设定每隔 2 min 记录一次各通道电压数据,数据长度 1 s,采样率 10 kHz。获得表征光强的电压信号之后,利用公式 (1) 获得的辐射损耗-剂量曲线如图 3 所示。

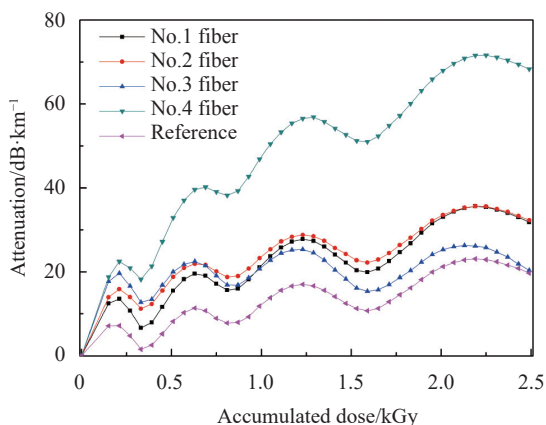


图 3  $^{60}\text{Co}$  辐照下的辐射损耗

Fig.3 Attenuation under  $^{60}\text{Co}$  irradiation

如图 3 所示,各测试通道的损耗值随着辐射剂量的增大而逐步增大,且存在周期震荡。参考光路损耗值的变化有以下原因: 1) 激光器输出光功率的不稳定性; 2)  $\gamma$  辐照导致铠装光纤出现辐射感生损耗; 3) 光电转换器灵敏度的不稳定性。由于示波器经过标定,可忽略示波器精度对测量的影响。测量系统中, No.1~No.4 测试通道与参考光路相比,只是增加了光纤样品,其余设置和所处环境均相同。为突出光纤样品的辐射感生损耗,需要消除激光器和光电转换器的波动以及铠装光纤的辐射损耗,具体操作为: No.1~No.4 光路各时刻的损耗值减去参考光路对应时

刻的损耗值,获得补偿后的损耗曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, No.1 和 No.2 光纤样品的损耗随着辐照剂量的增大而逐步趋于饱和; No.3 光纤样品的损耗随着辐照剂量的增大呈现出先增大后减小的显现; No.4 光纤样品的损耗随着辐照剂量的增大而不断增大。因此,结合图 4 可得出耐辐射能力由强到弱依次为: No.3 光纤、No.1 光纤、No.2 光纤和 No.4 光纤。

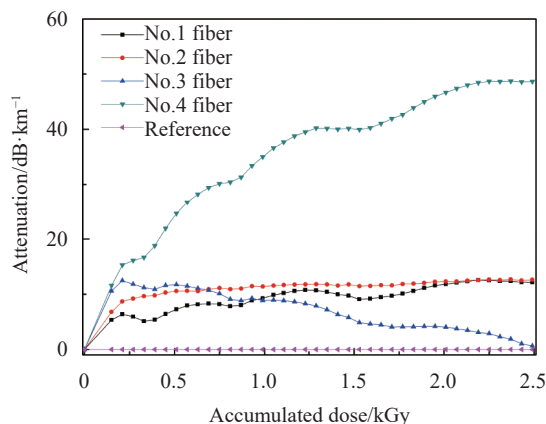


图 4  $^{60}\text{Co}$  辐照下补偿后的辐射损耗

Fig.4 Attenuation under  $^{60}\text{Co}$  after compensation

No.4 光纤样品为 G.652 单模光纤,该光纤样品的损耗值不断增大,说明辐照导致了“色心”不断生成。辐射感生损耗出现饱和现象<sup>[1, 9-10]</sup>的原因是,辐照导致“色心”生成的速度与“色心”由于不稳定而消散的速度相当。而 No.3 光纤样品损耗值出现先增大后减弱的现象,与辐射加固现象<sup>[6, 10]</sup>类似,对该现象还有待进一步开展相关验证实验,整体上,3 个型号的耐辐射光纤的性能优于通讯用 G.652 单模光纤。

对测量各种力学效应的光纤位移干涉测量系统而言,在辐射环境中,不能有效防护的光纤长度一般小于 10 m。根据图 4, No.1~No.3 光纤样品在剂量率为  $0.5 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ ,总剂量约 2.5 kGy 的  $^{60}\text{Co}$  辐照下,其辐射损耗小于  $17 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ ,对应的 10 m 光纤样品的损耗小于 0.2 dB,因此 No.1~No.3 光纤均可应用于稳态辐照环境中。

在  $^{60}\text{Co}$  辐照实验中,当辐照剂量达到 2.5 kGy 之后,由于防护门的开启,使得测试间铠装光纤原有的弯曲状态突然改变,引入了新的干扰,随即终止实验,因此并没有获得各光纤样品在辐照后的恢复特性,是此次实验的缺憾。然而,作为光纤的选型实验,已经

达到实验目的。

### 3 瞬态辐照实验

由于光纤在高剂量率辐照下的感生损耗要更高<sup>[6,12]</sup>,为拓展光纤干涉测量系统的应用范围,直接在“强光一号”装置上开展强 $\gamma$ 辐照实验。辐照实验系统如图 1 所示。

实验预设剂量率峰值  $5 \times 10^9 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ ,脉宽约 20 ns,平均光子能量 1.0 MeV。 $\gamma$  出射窗口及光纤样品布置现场如图 5 所示。

利用“强光一号”装置配套的零时输出脉冲信号进行采集示波器的同步触发,采样率 1.0 GHz。经测量, $\gamma$  辐射剂量率和脉宽输出符合预设。与静态实验相同,在获得表征光强的电压信号之后,利用公式

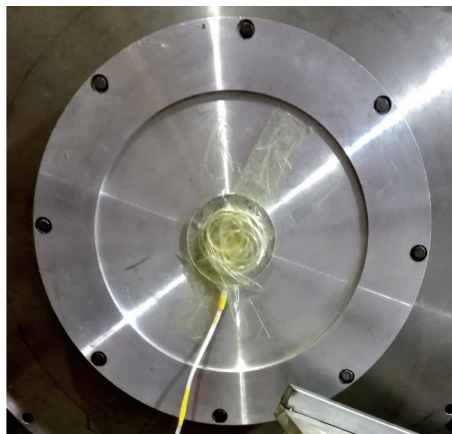


图 5 “强光一号”辐照现场

Fig.5 “Qiangguang- I ” irradiation experiment

(1) 得到辐射损耗-时间波形,如图 6 所示。

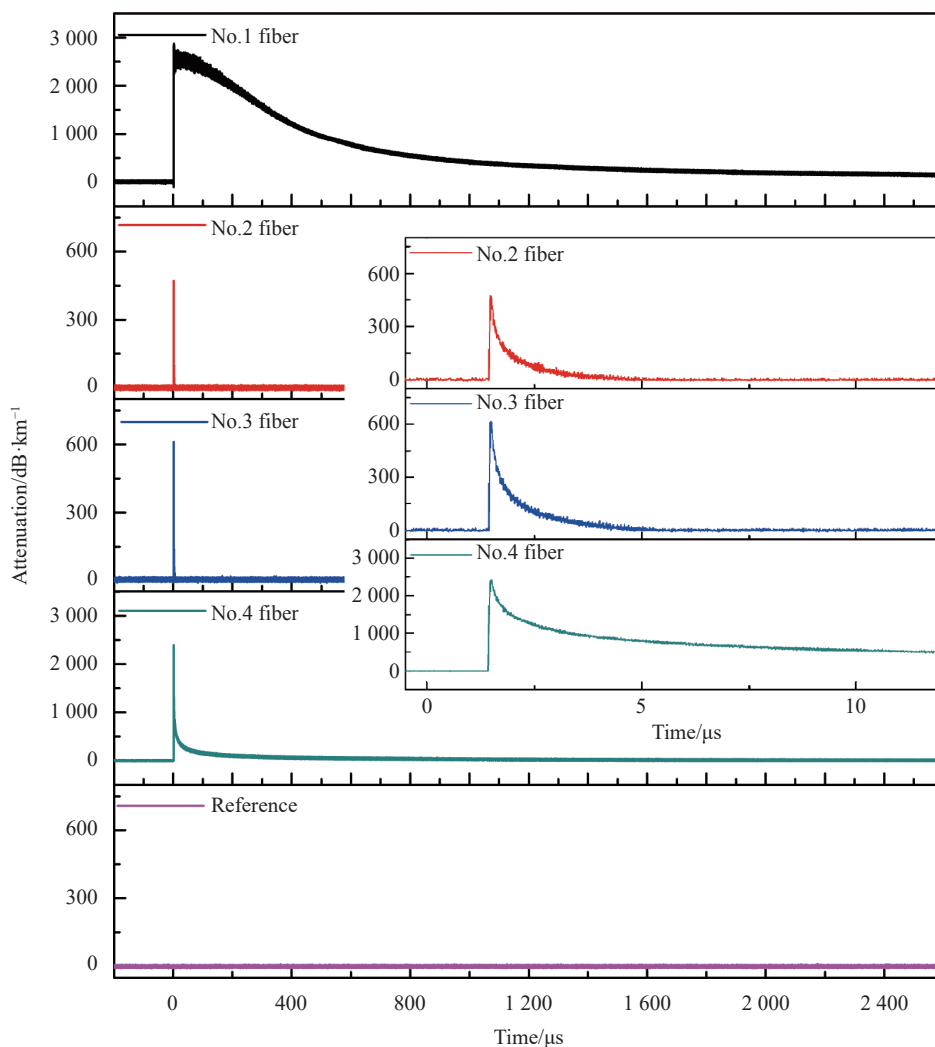


图 6 “强光一号”辐照下的辐射损耗

Fig.6 Attenuation under “Qiangguang- I ” irradiation



如图 6 所示,除参考光路外,其余测试通道均在约 1.4  $\mu\text{s}$  突然出现损耗,判断该损耗是由  $\gamma$  脉冲导致。参考光路未见损耗出现,说明其未受激光器和光电转换器的不稳定性影响,且铠装光纤的辐射损耗可以忽略。No.2~No.4 光纤样品的辐射损耗均呈现阶跃式上升,然后以类指数规律消散,该特征符合预期<sup>[6]</sup>,No.1 光纤样品实际同样存在该特征,需要在更大的时间范围内观测,如图 7 所示。

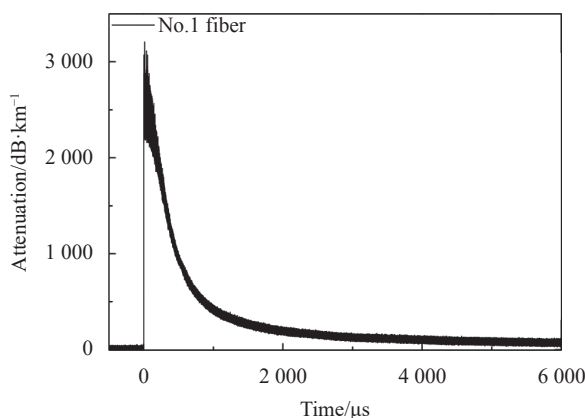


图 7 No.1 光纤样品的辐射损耗

Fig.7 Attenuation of No.1 optical fiber sample

在同一个辐射源的作用下,光纤耐辐射能力的强弱可以用辐射损耗值的大小进行评判,但光纤的恢复特性也十分重要<sup>[20]</sup>。为了更加全面地进行各光纤样品耐辐射性能的评价,需要量化光纤损耗的恢复特性。参考一阶线性系统的脉冲响应,估算各通道损耗值从峰值降低到 36.8%、13.5%,所需要的时间  $t_1$ 、 $t_2$  分别对应着一阶系统的  $\tau$  和  $2\tau$  ( $\tau$  为系统的时间常数)。

根据获得的各光纤样品瞬态辐射损耗曲线,得到各个参数见表 1。表中  $t_1$ 、 $t_2$  值的获取方法为:以 No.1 光纤样品  $t_1$  为例,损耗峰值为 2 691.3  $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ ,对应时刻为 1.48  $\mu\text{s}$ ;损耗峰值的 36.8% 为 990.4  $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ ,对应时刻为 479.76  $\mu\text{s}$ ,由此得出  $t_1$  值为 478.28  $\mu\text{s}$ 。

根据表 1 中的各个参数,可以得出光纤样品的耐辐射强弱顺序。无论是辐射感生损耗峰值,还是辐照后的恢复速度, No.2 光纤样品均表现优异。

表 1 中,各光纤  $t_1$  值的 2 倍均小于  $t_2$  值,因此,光纤的瞬态辐射损耗不能简单地近似为一阶线性系统的脉冲响应,实际损耗的消散速度要慢于一阶系统,特别是 No.4 光纤样品。导致该现象的原因分析如

下: 1) 与钴源辐照不同,“强光一号”装置出射  $\gamma$  射线的光子能量较高。随着光子能量的增大,  $\gamma$  射线与原子相互作用时除了产生光电效应外,还会出现康普顿效应和正负电子对效应<sup>[21]</sup>,这三种效应均可导致各种电子的产生,而后电子在俘获中心(一般为杂质或者缺陷处)沉积而形成“色心”。各效应产生电子机理的不同,会导致辐射损耗消散速度的差异。在实际辐照中,受到三种效应叠加的影响,总损耗的消散过程有可能呈现复杂的模式。2) 光纤辐射损耗的产生,不但与纤芯材料的“色心”有关,同样也会受到光纤结构和包层材料的影响,增加了光纤损耗消散过程的复杂程度。

表 1 光纤样品瞬态辐照效应参数

Tab.1 Transient radiation parameters of fiber samples

	Attenuation peak/ $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$	Performance ranking
No.1	2 691.3	478.28	1 134.98	4
No.2	471.5	0.35	1.10	1
No.3	608.6	0.39	1.28	2
No.4	2 378.2	2.69	26.40	3

在示波器记录信号的末尾时刻,即辐射完成后约 9 ms, No.2~No.4 光纤样品的辐射损耗已经降低至约 0  $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ ,因此 No.2~No.4 光纤样品在瞬态辐照下未见有明显的永久损伤。

由表 1 可知,可获得各光纤样品在“强光一号”辐射源作用下的辐射参数。与其他光纤样品相比较, No.2 和 No.3 掺氟光纤样品均表现优异。No.2 光纤的损耗峰值为 471.5  $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ ,对应的 10 m 光纤样品的损耗为 4.7 dB,该损耗会对光纤干涉测量系统产生一定的影响;但是在辐射后的 0.35  $\mu\text{s}$  和 1.10  $\mu\text{s}$ , 10 m 光纤样品的损耗将降低至 1.7 dB 和 0.6 dB。因此,若使用 No.2 光纤作为测试光纤,虽然在强辐射瞬间光纤干涉测量系统会受到干扰,但辐射后,该干扰将在 1  $\mu\text{s}$  后快速消失,而一般结构体的力学响应较慢( $\mu\text{s}$  量级以上),即辐射损耗对力学测量的影响较小, No.2 光纤可以满足测试需求。

No.1 掺锗耐辐射光纤的瞬态辐照性能最差,由图 6 可知,该光纤在  $\mu\text{s}$  时间尺度表现出辐射感生损

耗饱和,由表 1 可知,该光纤的恢复周期  $\tau$  是 No.2 掺氟耐辐射光纤的恢复周期  $\tau$  的 1 360 倍。因此在瞬态高剂量率的实验中,不能使用掺锗类型的掺杂光纤。掺锗光纤可应用于稳态辐射环境而不能用于瞬态辐射环境,导致该现象原因为:掺锗光纤更容易在辐照作用下产生缺陷,但该类光纤缺陷的恢复速度也相对较快,在瞬态强辐射作用下,掺锗光纤产生的缺陷更为明显,出现了较长时间的“色心”现象。

## 4 结 论

综合稳态和瞬态辐照的实验结果可以得出:1) 所设计光纤辐照实验成功获取了稳态和瞬态辐照条件下,各光纤样品的辐射感生损耗。尤其是参考光路的引入,不但消除了激光器、光电转换器的波动等因素对测量的影响,而且提升了测量数据的可信度,发挥了重要作用;2) 在 1 550 nm 工作波长,成功获得了掺锗、掺氟和 G.652 单模石英光纤,在同一辐射源作用下的实时感生损耗曲线,并对比分析了各类型耐辐射光纤对辐射的响应差异;3) 相比较而言,掺锗耐辐射单模石英光纤对辐照剂量率更加敏感,可应用于稳态辐照工况中,在瞬态强辐射作用下的感生损耗达到饱和,耐辐射性能甚至劣于常规 G.652 通信光纤。掺氟耐辐射单模石英光纤具有良好的耐辐射性能,在剂量率峰值为  $5 \times 10^9 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ ,脉宽约 20 ns 的强  $\gamma$  脉冲作用下,恢复通信时间仅约为  $\mu\text{s}$  量级。

## 参考文献:

- [1] CHOI D, HAN B, PARK S H, et al. Effect of radiation on the transmission rate of emission intensity of optical fiber cable used in a nuclear material facility [J]. *Nuclear Technology*, 2017, 197(3): 320-328.
- [2] ZABEZHAIOV M O, TOMASHUK A L, NIKOLIN I V, et al. The role of fluorine-doped cladding in radiation-induced absorption of silica optical fibers [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 49(3): 1410-1413.
- [3] Blair G R, TANGONAN G L. Metal coated fibers for use in the radiation environment [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1982, 29(6): 1489-1492.
- [4] TOOSSI R, MODARRESS D. Radiation and temperature survivability of multimode step-index fluorine-doped silica fibers [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1991, 38(5): 985-993.
- [5] LIU Fuhua, WANG Ping, LIU Weiping, et al. Analysis of Gamma-Ray radiation effects on optical fiber waveguides [J]. *Modern Applied Physics*, 2015, 6(3): 202-208. (in Chinese)
- [6] DONG Yanbin. Overview of radiation damage in optical fiber[C]//Proceedings of the 7th National Conference on Nuclear Electronics & Nuclear Detection Technology, 1994: 47-49. (in Chinese)
- [7] LIN Peng, WANG Dengwang, CHEN Bo. Vaporized blow-off impulse induced by pulse soft X-ray [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013(S1): 111-115. (in Chinese)
- [8] YANG Jun, WANG Keyi, XU Haibin, et al. Development of an optical-fiber displacement interferometer and its application in Hopkinson pressure bar experiment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 102-107. (in Chinese)
- [9] LI Jingfei, CHEN Weimin, LEI Xiaohua, et al. Gamma radiation effects on erbium-doped optical fibers properties [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1882-1887. (in Chinese)
- [10] DENG Tao, XIE Junlin, LUO Jie, et al. Review of study on irradiation resistance properties of optical fibers [J]. *Optical Communication Technology*, 2007(9): 58-61. (in Chinese)
- [11] LIU Fuhua, AN Yuying, WANG Qunshu, et al. Effects of pulse Gamma-ray radiation on optical fibers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1668-1672. (in Chinese)
- [12] SHARE S, WASILIK J. Radiation effects in doped-silica optical waveguides [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1979, 26(6): 4802-4807.
- [13] LIU Peng, LIAO Lei, CHU Yingbo, et al. Irradiation and temperature influence on the Bi-doped silica fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 1-6. (in Chinese)
- [14] ZHOU Haifeng. Development of radiation resistant multimode optical fiber for spacecraft [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2022(1): 20-23. (in Chinese)
- [15] ZHAO Ming, LIN Chen, MU Wei. Development of a non-metallic radiation resistant optical cable [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2017(6): 4-6, 32. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] CHEN Yun, YANG Zhen, CHEN Qiao, et al.  $^{60}\text{Co}$ -ray radiation effect and strain regulation on  $\alpha$ -in2se3-based phototransistor [J]. *Modern Applied Physics*, 2021, 12(2): 20605. (in Chinese)

- [18] WANG Liangping, ZHANG Jinhai, ZHANG Xinjun, et al. Laser probing for wire array Z-pinches on Qiangguang generator [J]. *Modern Applied Physics*, 2014, 5(1): 26-31. (in Chinese)
- [19] ZHAO Jizhen, ZHANG Mei, SHENG Liang, et al. Research of gamma ray radiation effect of large-core quartz optical fiber [J]. *Optical Technique*, 2015, 41(1): 7-10. (in Chinese)
- [20] LIU Rui, YIN Zongmin, LI Rongyu, et al. The experiment on optical fiber under  $\gamma$  ray radiation [J]. *Optical Technology*, 2000, 26(1): 81-83. (in Chinese)
- [21] DENG Tao. Study on radiation resistance properties of silica glass and silica optical fibre [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)

## Experimental study on $\gamma$ ray radiation effect of silica optical fiber near infrared band

WANG Zhao, YANG Jun, ZHANG Min, LIU Wenxiang, SHI Guokai, HUI Hailong

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

### Abstract:

**Objective** With the continuous development of optical fiber production technology, optical fiber sensing technology has been widely used in radiation environments such as outer space and nuclear power plants. However, under the action of radiation sources such as X-ray,  $\gamma$ -ray, electron and neutron, optical fiber will produce radiation induced loss especially in the intense pulse radiation field, the transient induced loss of optical fiber can reach thousands of dB, which has been widely concerned. To carry out the experimental study on the mechanical effect of radiation beam acting on materials, a set of optical fiber displacement interferometry system was established to obtain the dynamic mechanical response parameters of various materials under irradiation. In order to improve the radiation resistance of the interferometry system, it is necessary to carry out the examination experiments of various types of radiation-resistant quartz optical fibers and select the optical fibers with excellent radiation resistance.

**Methods** Based on the established optical fiber displacement interferometry system, it is necessary to carry out irradiation experiments. Under the conditions of working wavelength of 1 550 nm and injected optical power of 40 mW, the online induced loss values of various radiation-resistant single-mode fibers under steady and transient irradiation are obtained, and there is no relevant data at home and abroad at present. The radiation sources selected in the experiment include  $^{60}\text{Co}$  radiation source and " Qiangguang- I "  $\gamma$  pulse radiation source, respectively with radiation dose rates of  $0.5 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $5.0\times 10^9 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ , where the pulse width of the pulse radiation source is about 20 ns. The fiber samples selected in the experiment include Ge-doped radiation-resistant single-mode quartz fiber, F-doped radiation-resistant single-mode quartz fiber and G.652 ordinary single-mode fiber. All optical fiber samples were arranged in the radiation window, and the radiation induced loss of optical fiber in steady and transient irradiation experiments was obtained at the same time to obtain its radiation resistance.

**Results and Discussions** Under the steady irradiation of  $^{60}\text{Co}$  with a dose rate of  $0.5 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$  and a total dose of about 2.5 kGy, the radiation-induced loss of the samples of Ge-doped and F-doped radiation-resistant fiber is less than  $17 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ , and that of the corresponding 10 m optical fiber is less than 0.2 dB. With the increase of irradiation time, the radiation-induced loss is saturated. However, the radiation-induced loss of conventional G.652 single-mode fiber increases with the increase of irradiation time, and the induced loss is more than

$40 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ . Under the action of intense  $\gamma$  pulse with a peak dose rate of  $5 \times 10^9 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$  and a pulse width of about 20 ns, two different types of F-doped optical fibers have the best radiation resistance, respectively with the peak radiation-induced loss of  $471.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  and  $608.6 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ , and the recovery time of communication is about  $\mu\text{s}$ . The peak radiation-induced loss of conventional G.652 single-mode fiber is  $2\,378.2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ . Ge-doped fiber has the worst radiation resistance, and the peak radiation-induced loss is  $2\,691.3 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ , which keeps the induced loss saturated in  $\mu\text{s}$  time scale. Ge-doped fiber can be used in steady-state radiation environment, but not in transient radiation environment. The reason for this phenomenon is that Ge-doped fiber is easier to produce defects under irradiation, but the recovery speed of defects in this kind of fiber is relatively fast. Under transient strong radiation, the defects produced by Ge-doped fiber are more obvious, and the phenomenon of "color center" appears for a long time.

**Conclusions** The experimental results of steady-state and transient irradiation can be summarized as follows: 1) The designed optical fiber irradiation experiment successfully obtained the radiation-induced loss of each optical fiber sample under steady-state and transient irradiation conditions. Especially, the introduction of reference light path not only eliminates the influence of the fluctuation of laser and photoelectric converter on the measurement, but also improves the reliability of the measurement data and plays an important role. 2) The real-time induced loss curves of Ge-doped, F-doped and G.652 single-mode fibers under the same radiation source are successfully obtained at the working wavelength of 1 550 nm, and the response differences of various types of radiation-resistant fibers are compared and analyzed. 3) Compared with others, Ge-doped radiation-resistant single-mode fiber is more sensitive to irradiation dose rate and can be used in steady-state irradiation. F-doped radiation-resistant single-mode fiber has good radiation resistance, which can be used in steady and transient intense irradiation conditions.

**Key words:** radiation-induced loss; quartz optical fiber; steady-state irradiation; transient irradiation