

基于单模光纤的分布式辐射传感可行性研究

吴江钊¹, 马麟^{1*}, 涂峰², 何祖源¹

(1. 上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240;

2. 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 为了提高辐射传感技术的探测精度、探测剂量范围以及监测点数量, 研究了使用光时域反射仪(OTDR)技术观测单模光纤的辐射致衰减(RIA)效应, 从而实现分布式辐射传感应用的可行性。通过计算 OTDR 曲线中光功率衰减斜率, 建立了单模光纤 RIA 与辐射剂量的线性关系。采用具有合适 RIA 效应的单模光纤, 有望实现具有高空间分辨率的长距离分布式辐射剂量监测。

关键词: 伽马辐射; 光纤传感; 单模光纤; 光时域反射仪; 辐射致衰减

中图分类号: TN914 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2020)08-0001-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the feasibility of distributed radiation sensing based on single mode fiber

WU Jiangchuan¹, MA Lin^{1*}, TU Feng², HE Zuyuan¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University,

Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices and Institute of

Optical Communication Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to improve the detection accuracy, detection dose range and the number of monitoring points of radiation sensing technology, the optical time domain reflectometer(OTDR) technology is used to observe the radiation induced attenuation(RIA) effect of single-mode optical fiber, so as to realize the feasibility of distributed radiation sensing application. The linear relationship between radiation dose and RIA of single-mode fiber is established by calculating the attenuation slope of optical power in OTDR curve. Using single-mode fiber with suitable RIA effect is expected to realize long-distance distributed radiation dose monitoring with high spatial resolution.

Key words: gamma radiation; optical fiber sensing; single mode fiber; optical time domain reflectometer; radiation induced attenuation

0 引言

随着核工业、核电站、核废料处理设施以及高能加速器现代核设施的迅速发展, 对辐射剂量监测的需求正不断增大^[1-3]。但是, 由于辐射设施面积广、地形

复杂, 传统的辐射传感设备无法很好地对其进行监测, 因此对这些设施的辐射剂量监测以及预测辐射设施中的设备寿命极具挑战^[4]。

光纤传感技术具有尺寸小、重量轻和抗电磁干扰等优点, 并能实现长距离、高精度和高空间分辨率下温度和应变等物理量的测量^[5-6]。石英光纤在受到伽马射线辐射后会导致其光信号传输能力的下降, 光纤的损耗值显著增加, 这种现象称为辐射致衰减(RIA)效应, 基于这一效应有望实现光纤的辐射传感应用。现有研究表明 RIA 是由于色心的形成导致的^[7-8], 德国学者 H. Henschel 等人^[9]基于这一原理开始了对磷掺杂渐变折射率光纤的损耗与辐射剂量之间关系的研究, 并提出了光纤作为辐射剂量计的可能性。由于光纤掺杂类

收稿日期: 2019-10-22。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405500)资助; 国家自然科学基金(61775138)资助。

作者简介: 吴江钊(1996—), 男, 硕士, 现就读于上海交通大学电子信息与电气工程学院电子科学与技术专业, 主要研究方向为光纤分布式辐射传感以及灵敏度可调辐射传感。曾参与光纤中的光致连续损伤及其监测和阻断技术的基础研究项目, 并于 2018 年参加了亚洲通信与光子学国际会议(ACP)。

* 通信作者: 马麟(E-mail: ma.lin@sjtu.edu.cn)。



吴江钊,马麟,涂峰,等:基于单模光纤的分布式辐射传感可行性研究

型的不同,光纤的 RIA 在相同剂量率、累积剂量以及监测波长下具有不同表现。在对磷掺杂光纤的辐射特性研究中发现:300 Gy 的剂量辐射下,被测光纤的 RIA 在辐射剂量率 1~6 Gy/min 范围内线性增加^[10]。欧洲核子研究组织(CERN)使用多模光纤开展的分布式辐射剂量测试研究结果表明:在 400 Gy 辐射剂量、830 nm 波长下实验光纤的最大 RIA 为 6 dB/m^[11]。

本文对比相同辐射剂量水平和剂量率下不同单模光纤的 RIA,讨论各类光纤用于分布式辐射传感的可能性。

1 实验准备

本文采用 3 种不同掺杂成分的光纤进行辐射传感实验,实验光纤的主要掺杂成分如表 1 所示。实验采用上海市

表 1 实验光纤的主要掺杂成分

实验纤维编号	纤芯掺杂	包层掺杂
甲	Ge、F	纯 SiO ₂
乙	Ge	纯 SiO ₂
丙	纯 SiO ₂	F

农业科学院的 Co-60 设施作为辐射源。辐射场地半径为 5 m,Co-60 辐射源位于辐射场地中心,放射源升源高度为 46 cm,辐射期间平均温度为 35 ℃,最大辐射强度为 3.7×10¹⁵ Bq。辐射总剂量以及剂量率的标定得到中国国家计量院认证的化学剂量法测定,标准偏差小于 5%。

本文采用光时域反射仪(OTDR,安利 MT9082)连续测量辐射过程中光纤不同位置的 RIA 的变化情况。为了在空间分辨率合适的情况下得到尽可能大的动态测量范围,实验选择脉冲宽度为 10 ns、空间分辨率为 1 m。OTDR 的测量在 3 个不同的波长(λ₁=1310 nm、λ₂=1550 nm 和 λ₃=1625 nm)下进行,在实验中单次测量的最长时间少于 2 min,较短的测量时间间隔减少了辐射剂量不同带来的误差。同时,考虑到信噪比的改善和合适的测量时间,OTDR 采用的平均次数为 30 次。

2 实验系统和设置

实验系统的结构示意图如图 1 所示。为了获得分布式辐射传感的光纤样品衰减系数,实验将甲、乙、丙 3 类光纤制备成 940 m 长的三芯光缆,并将该光缆分为连续的 6 段,每段长度分

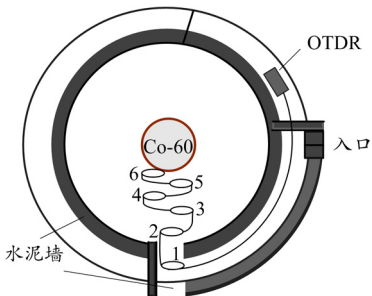


图 1 分布式辐射传感实验装置

别为 500 m、260 m、120 m、30 m、20 m 和 10 m。各段光缆缠绕成直径为 50 cm 的光纤束,一致面向 Co-60 辐射源的方向放置于离地 50 cm 处以降低剂量误差带来的影响。光缆由近到远依次放置在距离辐射源 30 cm、75 cm、105 cm、140 cm、240 cm 和 500 cm 处,各处的辐射强度通过测试场地的标准辐射剂量表读出,其误差标准小于 5%。具体辐射参数如表 2 所示,可以看出,最大和最小辐射剂量率分别约为 9000 Gy·h⁻¹ 和 40 Gy·h⁻¹。辐射总时长为 6 h,最大累积剂量为 54000 Gy。

表 2 具体辐射参数

光缆编号	距离/cm	光纤长度/m	辐射剂量率/(Gy·h ⁻¹)	辐射时间/h	剂量/Gy	甲类光纤 RIA/(dB·km ⁻¹)
1	500	500	40	6	240	4.2
2	240	260	185		1110	12.9
3	140	120	520		3120	24.4
4	105	30	910		5460	38.2
5	75	20	1800		10800	73.1
6	30	10	9000		54000	280.4

为了消除 OTDR 测试死区对实验结果的影响,本文将长度为 1 km 的标准单模光纤放置于实验光缆前,并通过 30 m 长的标准单模光纤跳线相连。实验每 30 min 测量一次波长在 1310 nm、1550 nm 和 1625 nm 下光纤的 RIA。

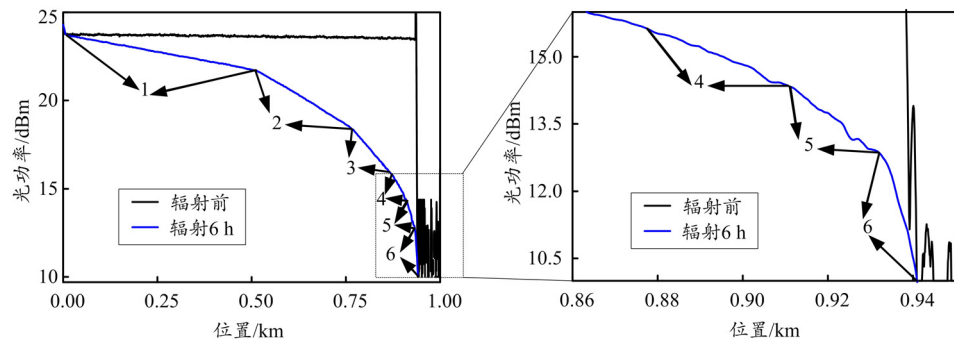
3 实验结果

OTDR 测量曲线代表着光功率沿光纤样品的衰减情况,甲、乙、丙 3 类光纤在 1310 nm 处辐射前和辐射 6 h 后的 OTDR 曲线如图 2 所示。6 h 辐射后,乙、丙类光纤中光功率损耗超出了在最大脉宽为 10 ns、测量时长为 30 s、测试光波长为 1310 nm 时的 OTDR 动态范围(即 15 dB),甲类光纤还能在该 OTDR 的动态范围内进行 940 m 长的光功率分布测量。

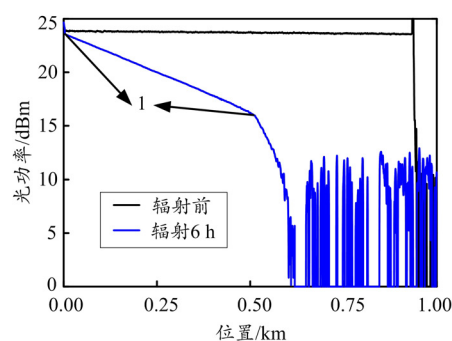
从图 2(a)可以观察到,光纤在 6 种不同辐射剂量下的 OTDR 曲线表现为层次分明的 6 段。每段折线中,光功率沿该段光纤以一定的斜率连续衰减,这表明光纤在受到稳定剂量率的辐射时光功率沿光纤线性衰减。结合各段光纤受到的辐射剂量得知,光纤折线的斜率随着接受到的辐射剂量的增加而增加,这表明光纤受到辐射剂量率越大则衰减的速度越快。另

外,在每2段光纤的相邻处都可以看到明显的转折点,转折点的产生是由于两端的光纤受到不同辐射剂量率辐照导致的。

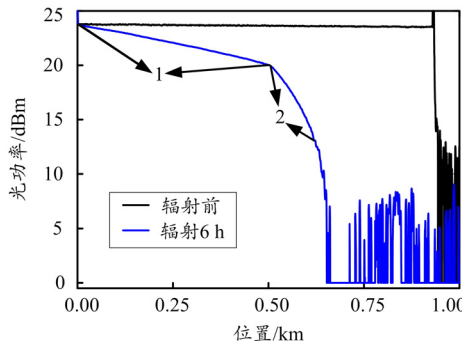
本文通过对每段光纤的 OTDR 曲线进行分析可以获得各段光纤的 RIA。以图 2(a)中甲类光纤为例,当辐射剂量从 240 Gy 增加到 54000 Gy 时,测得的 RIA 由 $4.2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 增加到约 $280.4 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$,表 2 列举了 6 段光缆的具体辐射参数。



(a) 甲类光纤

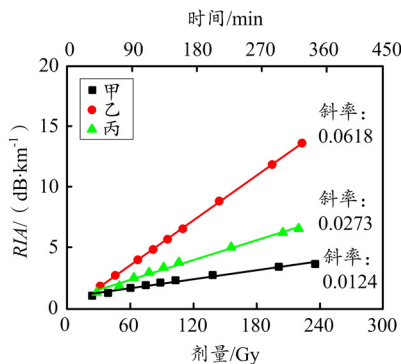


(b) 乙类光纤

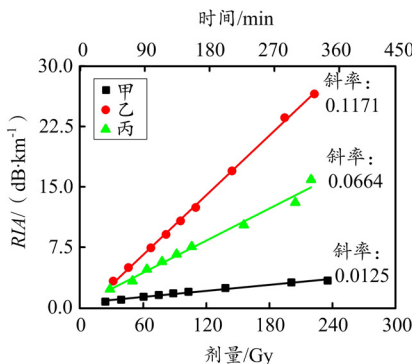


(c) 丙类光纤

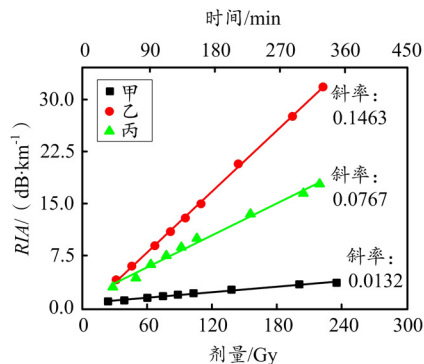
图 2 1310 nm 波长时 3 类光纤在辐射前与 6 h 辐射后测量的 OTDR 曲线



(a) 1310 nm



(b) 1550 nm



(c) 1625 nm

图 3 波长分别为 1310 nm、1550 nm 和 1625 nm 时第一段光缆上光纤 RIA 与辐射剂量的关系

4 实验结果分析

4.1 伽马辐射对不同掺杂光纤 RIA 的影响

辐射剂量率为 40 Gy/h 、辐射时长为 6 h 的第一段光缆上光纤 RIA 与辐射剂量关系如图 3 所示。实验中每隔 30 min 测试一次光纤的 RIA,结果表明:随着辐射时长的增加,光纤的 RIA 线性增加;在剂量 $<240 \text{ Gy}$ 辐照下,3 类光纤的 RIA 效应明显,甲、乙、丙 3 类光纤的 RIA 与辐射剂量呈线性相关,通过线性拟合并根据光纤上的光功率损耗情况可以估算出沿光纤的辐射

剂量;相比乙类光纤(普通掺锗光纤)、丙类光纤(纯 SiO_2 光纤),甲类光纤(Ge、F 共掺纤芯,纯 SiO_2 包层)的 RIA 与辐射剂量函数的拟合曲线的斜率值是最小的,这表明 3 类光纤中甲类光纤具有最强的 RIA 抗性,这使得在相同的 OTDR 测量动态范围内,甲类光纤可以实现更远距离的分布式光纤传感;3 类光纤对辐射具有不同的 RIA 灵敏度,因此,选择光纤种类可以实现在不同灵敏度要求下的辐射传感。

4.2 波长对光纤的分布式辐射传感的影响

在波长分别为 1310 nm、1550 nm 和 1625 nm 时,甲类光纤 RIA 与辐射剂量的关系如图 4 所示。可以看出,RIA 在 3 个波长中都随着辐射剂量线性增加。在波长为 1310 nm 和 1550 nm 时,随着辐射剂量率的增大,光

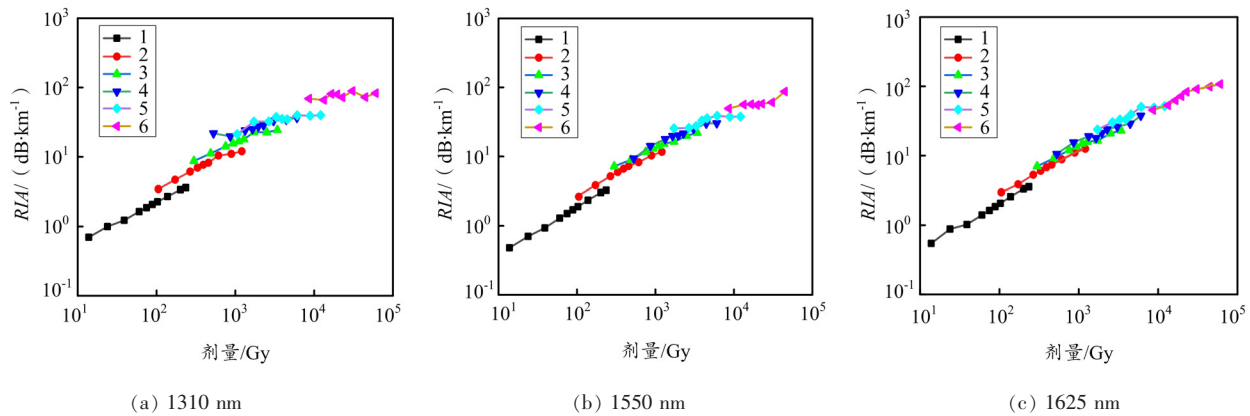


图4 在波长分别为 1310 nm、1550 nm 和 1625 nm 时甲类光纤 RIA 与辐射剂量的关系

纤 RIA 与辐射剂量之间的斜率随着剂量的增加而减小。在波长为 1625 nm 时测试的不同辐射剂量率下 RIA 线性度最好。实验结果表明:可以在校准斜率之后通过 OTDR 曲线估计辐射剂量和辐射剂量率;甲类光纤在波长为 1625 nm 下最适用于大辐射剂量条件下的分布式辐射传感应用。

5 结束语

本文研究了使用 OTDR 观测单模光纤的 RIA 效应,从而实现分布式辐射传感应用的可行性。首先对比了不同单模光纤类型对具有相同辐射剂量水平和辐射剂量率下辐射敏感性。3 类光纤的 RIA 与辐射剂量都具有很好的线性关系,但不同掺杂光纤对辐射具有不同的 RIA 灵敏度。这一现象表明,通过对光纤种类的选择,可以实现不同灵敏度要求的分布式辐射传感。本文对甲类光纤进行了进一步的分析,研究光纤 RIA 与工作波长的关系。当波长为 1310 nm 和 1550 nm 时,随着辐射剂量的增加 RIA 值趋于饱和,而这种趋势在 1625 nm 的波长下不明显。同时,辐射剂量率对甲类光纤 RIA 也没有显著影响,这使得甲类光纤在 1625 nm 的波长下有望实现分布式辐射传感。

参考文献:

- [1] HENSCHER H, KÖRFER M, KUHNENH J, et al. Fiber optic radiation sensor systems for particle accelerators[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research (Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment), 2004, 526(3): 537–550.
- [2] FERNANDEZ A F, BRICHARD B, O'KEEFFE S, et al. Real-time fiber optic radiation dosimeters for nuclear environment monitoring around

thermonuclear reactors [J]. Fusion Engineering and Design, 2008, 83 (1): 50–59.

- [3] TOCCAFONDO I, THORNTON A, GUILLERMAIN E, et al. Distributed Optical Fiber Radiation Sensing at CERN High Energy Accelerator Mixed Field Facility (CHARM)[C]//2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), September 14–18, 2015, Moscow, Russia. Moscow: IEEE, 2015: 1–4.

- [4] FRIEBELE E J, ASKINS C G, GINGERICH M E, et al. Optical fiber waveguides in radiation environments II [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms), 1984, 1(2-3): 355–369.

- [5] EASON G, NOBLE B, SNEDDON I N. On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London (Series A: Mathematical and Physical Sciences), 1955, 247(935): 529–551.

- [6] ALAHBABY M N. 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(6): 1321–1324.

- [7] FRIEBELE E J, GRISCOM D L. Color centers in glass optical fiber waveguides [J]. MRS Online Proceedings Library Archive, 1985, 61: 319–331.

- [8] NEUSTRUEV V B. Colourcentres in germanosilicate glass and optical fibers[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 1994, 6(35): 6901–6939.

- [9] HENSCHER H, O KÖHN, SCHMIDT H U. Optical fibers as radiation dosimeters [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1992, 69(2-3): 307–314.

- [10] RAHMAN A K M, ZUBAIR H T, BEGUM M, et al. Germanium-doped optical fiber for real-time radiation dosimetry [J]. Radiation Physics & Chemistry, 2015, 116: 170–175.

- [11] TOCCAFONDO I, MARIN Y E, GUILLERMAIN E, et al. Distributed optical fiber radiation sensing in a mixed-field radiation environment at CERN[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3303–3310.