

基于闪烁光纤的低剂量率长距离辐射传感研究

刘 昆¹, 吴长进², 刘海锋²

(1. 三沙市海洋保护区管理局, 海南 三沙 573199; 2. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300350)

摘要:针对当前传统的辐射传感器低剂量率条件下探测范围小、位置分辨率低的现状, 提出并研究了一套基于塑料闪烁光纤的低剂量率长距离辐射传感实验系统。基于闪烁光纤辐射传感原理, 搭建了低剂量率传感实验系统并进行了相关实验研究。在验证该实验系统可行的基础上, 提出了闪烁光纤与传输光纤相连接方案, 有望应用于实现广域海洋水体低剂量率人工放射性核素传感。

关键词: 闪烁光纤; 低剂量率; 长距离; 辐射传感

中图分类号: TL81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)02-0059-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.02.016

Research on low-dose-rate and long distance radiation detection based on scintillating fibers

LIU Kun¹, WU Changjin², LIU Haifeng²

(1. Sansha Marine Protected Area Management Bureau, Sansha Hainan 573199, China;

2. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: A low-dose-rate and distributed monitoring system of radioactive source based on scintillating fibers have been proposed to overcome the shortcomings of current typical radiation sensors, which have a small detection range. Firstly, based on the principle of scintillation optical fiber for radiation sensing, the construction of experimental and some related experiments have been carried out. On the basis of validating the feasibility of the experimental system, a scheme of linking scintillation fiber with transmission optical fiber is put forward, which is expected to be applied to realize low dose rate artificial radionuclide sensing in wide area marine waters.

Key words: scintillating fibers; low-dose-rate; long distance; radiation detection

0 引言

近些年邻海核电站的建设以及 2011 年日本福岛核事故造成大量人工放射性物质泄漏到海洋中, 人们对海洋水体的辐射监测需求日益提高。当前广泛应用的辐射传感器包括闪烁晶体类探测器、半导体类探测器和离子电离室等^[1,2], 主要实现“点”式探测。如常见的 NaI 晶体探测器, 探测范围仅为 NaI 晶体周围, 此类探测器在陆地条件下具有突出的性能^[3]。但是, 随着距离的增加和穿透物质密度的变大, 辐射能量将显著衰减, 因而此类探测器应用到海洋环境中, 其性能将明

收稿日期: 2017-10-11。

基金项目: 天津市科技支撑计划项目(16YFZCSF00400)资助。

作者简介: 刘昆(1978-), 男, 工程师, 主要从事海洋生态环保与技术应用方面的工作。

显下降。此外, 晶体探测器使用过程当中, 闪烁晶体与后端电子处理设备封装在一起, 使得电子设备容易受到电磁场及大剂量辐射的干扰, 造成测量结果的误差甚至实验装置的损伤。综合以上因素, 新型的低剂量率放射源监测系统不仅要实现放射源的一维“线”式长距离探测, 还要解决后端电子设备与传感探头相分离的问题。

光纤传感技术历经几十年的发展, 在高新工程领域取得了广泛的应用^[4-6]。闪烁光纤作为一种特种光纤, 有着结构紧凑、响应快和抗辐射损伤等诸多优点^[7], 是结合光纤传感技术与辐射探测技术实现广域放射源在线监测的最佳选择之一。本文进行塑料闪烁光纤低剂量率长距离辐射监测系统的搭建, 并提出闪

刘昆,吴长进,刘海锋:基于闪烁光纤的低剂量率长距离辐射传感研究

闪烁光纤与传输光纤耦合以延长探测距离,有望将其应用于广域海洋水体低剂量率人工放射性辐射监测。

1 国内外闪烁光纤辐射探测领域的研究现状

国内外的核科学工作者和光纤领域研究人员在闪烁光纤辐射探测领域取得了显著的成果。国内的主要研究单位有北京高能物理研究所、西安交通大学核科学与技术学院及中国科学技术大学近代物理系。中国工程物理研究院研制了高剂量率条件下的光纤辐射探测器^[8]。西安交通大学和中国科学技术大学均利用 Geant4 与 MCNPX 进行基于蒙特卡洛的模拟分析,阐述闪烁光纤对辐射的响应机理以及闪烁光纤的传输特性^[9-12]。日本、法国等国家已掌握闪烁光纤的拉制工艺,因此相关方面的实验研究和成果也相对较多。David L. Chichester 等人^[13]利用法国 Saint-Gobain(圣戈班)公司生产的 BCF-10、BCF-12 和 BCF-20 三种型号的闪烁光纤设计了一维线性光纤辐射传感器并对其性能进行了比较。A. Nohtomi 等人^[14]利用闪烁光纤搭建了 15m 长的空间剂量分布辐射探测器,进行了放射源定位实验。

2 闪烁光纤基本原理

2.1 闪烁光纤结构

闪烁光纤在结构上类似于普通光纤,由纤芯和包层组成,依靠光线在纤芯与包层之间的全反射进行光传输。在辐射探测领域,闪烁光纤兼具辐射传感与光信号传输双重功能^[15,16]。闪烁光纤在中子成像、粒子甄别、量热计、追踪探测器和宇宙射线望远镜等领域都具有广泛应用。闪烁光纤的优良特性使得其具有较大的有效探测距离,并且可以分离探测装置和后端电子处理装置,最大限度地保障设备的稳定性和核工作人员的安全性。

本文选用的闪烁光纤是法国 Saint-Gobain 公司拉制的塑料闪烁光纤 BCF-12,该型号光纤相对于 BCF-10 和 BCF-20 优化了长距离传输性能,其结构如图 1 所示。纤芯和包层材料分别为聚苯乙烯和 PMMA,EMA 层主要用于消除光学串扰。光纤直径为 1mm,结构上纤芯占绝大部分,约为 96%~97%;包层占 3%左右。芯层折射率略高于包层折射率,芯层当中为了激发闪烁光脉冲、波长转换和抗辐射特性而掺杂了荧光掺杂物。这种荧光掺杂物在辐射条件下能够激励出 435nm 波长的蓝色光脉冲,在光纤内衰减至 $1/e$ 的距离,约为 2.7m,损耗远大于通信用光纤^[17]。

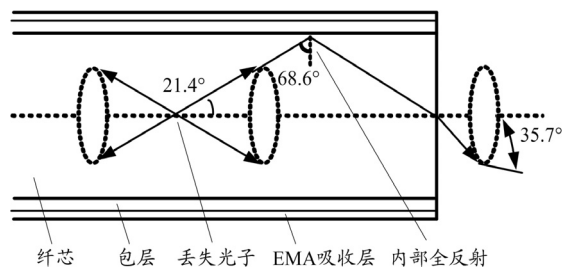


图 1 BCF-12 闪烁光纤结构示意图

2.2 辐射传感原理

闪烁光纤进行辐射探测可以分为 3 个过程,这 3 个过程可以通过携带有放射源信息的闪烁光来进行考察^[3]。

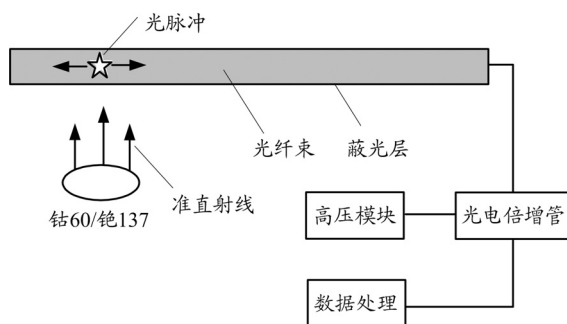
①闪烁光的产生。当闪烁光纤周围放置有放射源时,放射源原子核衰变产生的高能粒子或电子束与闪烁光纤内掺杂的闪烁体相互作用,粒子能量被闪烁材料吸收,产生激发电离,当处于激发态的分子或原子重新回到基态时,能量便以光子的形式释放出来,从而产生闪烁光。

②闪烁光的传输。闪烁光的传输条件与普通光纤中光线传输条件类似,放射源在闪烁光纤内部激励起闪烁光,光纤的纤芯折射率(1.60)大于包层折射率(1.49)。因此,满足全反射条件的闪烁光可以沿着光纤传输到达光电倍增管,其余部分则被包层吸收或从光纤逸散出去。

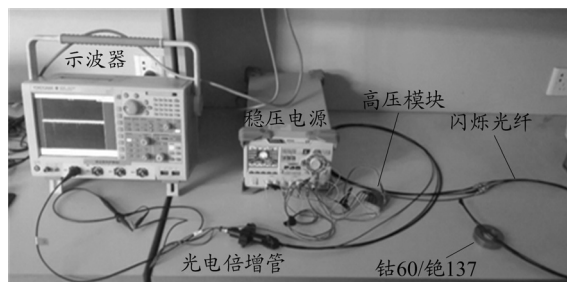
③闪烁光的采集。由于闪烁光的信号非常微弱,若要实现高效的辐射探测,需要保证高效的信号传输以及实现高增益对信号放大。闪烁光纤的一端连接到光电倍增管的阴极,当闪烁光产生并传输到光电倍增管阴极时,阴极向真空中激发光电子,这些光电子经过倍增系统,进一步二次发射倍增放大,通过阳极收集电子作为信号的输出。信号传递给后端的电子处理设备,完成闪烁光的采集。

3 实验方法

实验装置系统结构示意图及实物图如图 2 所示,主要包括闪烁光纤、放射源、光电倍增管模块和后端数据处理模块几个部分。闪烁光纤选用 BCF-12,光电倍增管选用滨松公司生产的 H3164-10,其最大增益为 10^6 ,响应波长范围为 300~650nm,此范围能够有效覆盖 BCF-12 产生的 435nm 波长的闪烁光脉冲。放射源采用钴 60(活度 $9 \times 10^4 \text{Bq}$)和铯 137(活度 $9 \times 10^3 \text{Bq}$),用于模拟低剂量率辐射环境,实验当中采用铅板对放射源进行准直。数据处理部分,用示波器采集光电倍



(a) 实验系统结构示意图



(b) 实验装置实物图

图2 实验装置结构示意图与实物图

增管的电信号数据,后端再通过计算机对数据进行处理。

本文通过图2所示的实验装置验证闪烁光纤辐射传感的可行性,然而海洋探测中更多情况下需要10m甚至更长距离的辐射传感。如果采用更长距离闪烁光纤,由于闪烁光纤内传输损耗很大,难以实现长距离的闪烁光纤信号传输。当闪烁光纤的长度超过10m,探测到的信号将湮没在噪声之中。实验对图2所示的实验装置进行了改进,采用闪烁光纤与相对较低传输损耗的传输光纤“错位连接”的耦合方式,4段各2.5m长的闪烁光纤错位排列,通过连接不同长度的传输光纤耦合到光电倍增管中,实现10m甚至更长距离辐射传感。实验中选用的传输光纤为日本三菱公司拉制的外径为1mm的GH-4001塑料光纤,在不减少有效传感范围的前提下,极大地提高了信号的传输距离。改进后光纤束部分示意图如图3所示。

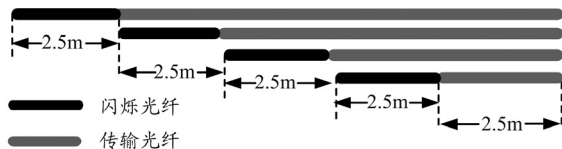


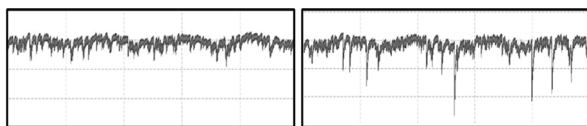
图3 闪烁光纤与传输光纤连接示意图

为了保证闪烁光纤与光电倍增管、闪烁光纤与传输光纤之间具有较高的耦合效率,需要对闪烁光纤端面进行处理。由于闪烁光纤与传输光纤均为塑料光

纤,传统的熔接方案会使得光纤变性。本文采用热切割法(刀片温度 $<100^{\circ}\text{C}$)截取所需长度的光纤,用研磨纸仔细研磨,在显微镜下观察确保光纤端面平整;将闪烁光纤与传输光纤通过SMA905连接器连接,用532nm波长的激光器测试连接处的损耗约为1.7dB,后续的等效剂量测量表明上述连接损耗在实验可接受范围之内。由于单根闪烁光纤激发出的闪烁光信号量较少,因此实验中采用了4根光纤合束的方式。通过实验设计了光纤套筒,将光纤整齐排列在套筒内,为了保证光纤之间相对位置固定,光纤两端用环氧树脂粘接,牢固后涂抹导光硅脂增强其导光特性,套筒端面连接到光电倍增管阴极。然后,采用热缩管对闪烁光纤以及闪烁光纤和光电倍增管的连接处进行严格遮光处理,以避免外界光的干扰。

4 结果分析

在没有放置放射源时,我们通过示波器观察到的波形如图4(a)所示,波形由一些低幅度的噪声信号引起,主要来源有宇宙射线、周围环境当中的微弱天然放射性以及仪器噪声等^[18]。当在闪烁光纤附近放置放射源时,通过示波器观察到的波形如图4(b)所示,除了一些低幅度的噪声信号外,波形上还出现了幅度较大的脉冲信号,这是由实验放置的模拟低剂量率环境的放射源引起的。有无放射源环境下的对比,证实了低剂量率长距离辐射传感系统的可行性。



(a) 无放射源

(b) 有放射源

图4 无放射源和有放射源示波器波形

为了更加方便地分析实验现象,我们将图4(b)截取部分波形,利用计算机还原后如图5所示。从图5中可以看出有两个明显向下的脉冲尖峰,此尖峰即为闪烁光脉冲经光电倍增管进行光电转换之后放大所得的信号。测量过程中射线与物质相互作用的过程是随机的,因此观察到的尖峰信号也是随机信号。由于放射性核衰变具有统计分布,因此脉冲信号出现的时刻以及脉冲信号的幅度服从统计分布规律^[18]。闪烁光纤置于辐射场中,放射源的活度越强,单位时间内发射出来的射线就越多,与闪烁体发生作用的几率就越大,一般来讲,放射源活度越高单位时间内产生的脉冲信号越多^[19]。

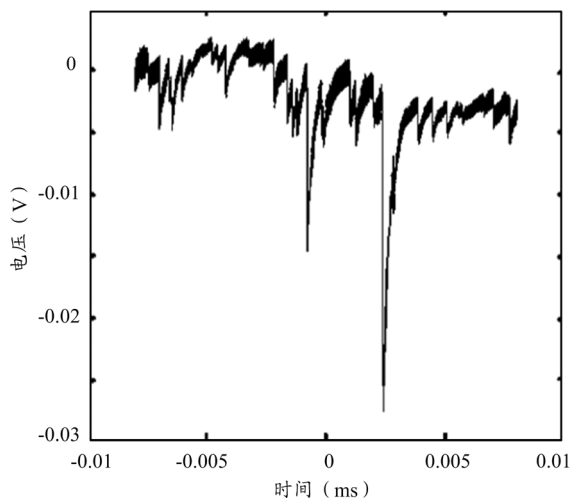


图5 数据处理结果图

为了进一步验证实验装置剂量率传感的有效性,我们采用上述装置进行了等效剂量测量,将图2所示装置的光电倍增管输出连接到多道计数器。实验中每3分钟统计一次脉冲计数,实验进行60分钟,所得等效剂量测量及拟合曲线如图6所示。该曲线线性拟合系数 $R^2=0.99782$,具有很高的线性度,表明系统进行剂量测量的稳定度足够高。

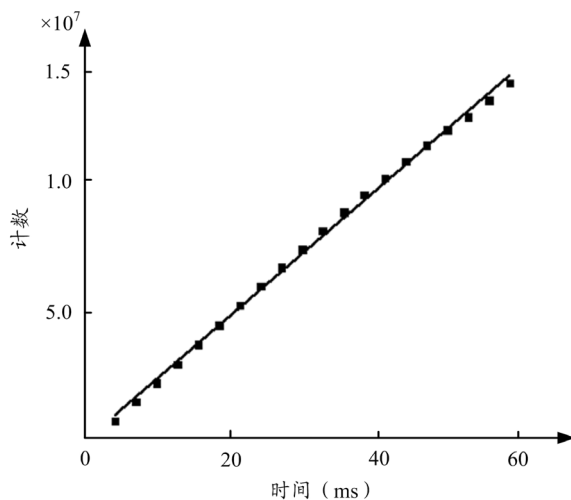


图6 等效剂量测量及拟合曲线

综合以上分析,实验所得结果图包含所需剂量率信息,根据测得等效剂量曲线对应的斜率即可得到等效剂量率,实现了闪烁光纤剂量率初步传感。

5 结束语

本文对闪烁光纤低剂量率条件下长距离、大范围辐射探测的可行性进行了验证,实现了10m探测范围内低剂量率辐射传感,并对扩展探测范围提供了切实可行的实验方案,为闪烁光纤进行放射源在线监测系

统的研制提供了一定的实验基础。后续工作将继续围绕更低剂量率、更大探测范围的辐射传感开展,以实现更高精度的定量分析。

参考文献:

- [1] TORU OKA, HIROTSUGU FUJIWARA, KAZUO TAKASHIMA, et al. Development of Fiber Optic Radiation Monitor using Plastic Scintillation Fibers [J]. Journal of Nuclear Science & Technology, 1998, 35 (12): 857-864.
- [2] 方方,周建斌,马英杰,等. 低本底伽玛能谱仪的研制[C]. 中国地球物理学会年会.[出版者不详],2002.
- [3] 张小龙. 光纤 γ 辐射探测技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- [4] 陈继宣,龚华平,张在宣. 光纤传感器的工程应用及发展趋势[J]. 光通信技术,2009,33(10):38-40.
- [5] 陶智勇,蔡进. 我国光纤技术演进与发展的几个阶段 [J]. 光通信技术,2010,34(1):59-61.
- [6] 黎敏,廖延彪. 光纤传感器及其应用技术 [M]. 武汉:武汉大学出版社,2012.
- [7] DAMYANOVA A, BRAVAR A. Scintillating fiber detectors for precise time and position measurements read out with Si-PMs [J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research A, 2017(845): 475-480.
- [8] 张燕,曾光宇. 闪烁体与闪烁探测器的研究动态[J]. 科技信息:学术版,2007(8):87-89.
- [9] 贾清刚,王东明,安洪振,等. 基于蒙特卡洛方法的闪烁光纤阵列空间分辨率模拟[J]. 中国科学:技术科学,2013(12):1432-1438.
- [10] 马庆力,吴彦华. 低能X射线线下阵塑料闪烁光纤的传输特性分析[J]. 核技术,2013,36(11):45-48.
- [11] 马庆力,唐世彪,吴彦华. 基于塑料闪烁光纤阵列的 γ 射线位置灵敏探测器数值模拟[J]. 强激光与粒子束,2015,27(7):285-289.
- [12] 马庆力,阴泽杰,吴孝义. 闪烁光纤在 γ 射线辐照下部分特性的蒙特卡罗模拟[J]. 强激光与粒子束,2004,16(3):385-389.
- [13] CHICHESTER D L, WATSON S M, JOHNSON J T. Comparison of BCF-10, BCF-12, and BCF-20 Scintillating Fibers for Use in a 1-Dimensional Linear Sensor [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60 (5): 4015-4021.
- [14] NOHTOMI A, SUGIURA N, ITOH T, et al. On-line evaluation of spatial dose-distribution by using a 15m-long plastic scintillation-fiber detector [C]// Nuclear Science Symposium Conference Record, October19-25, 2008, Dresden, Germany. Piscataway: IEEE, 2009: 965-968.
- [15] BEDDAR A S. Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy[J]. Radiation Measurements, 2006, 41(12): S124-S133.
- [16] YOO W J, JEON D, SEO J K, et al. Development of a scintillating fiber-optic dosimeter for measuring the entrance surface dose in diagnostic radiology[J]. Radiation Measurements, 2013, 48(1): 29-34.
- [17] Saint-Gobain Ceramics & Plastics. SGC fibers brochure[Z/OL].www.crystalss.saint-gobain.com, 2014.
- [18] 复旦大学. 原子核物理实验方法[D]. 北京:原子能出版社,1985.
- [19] 潘兴宇,曾志,程建平,等. 极低辐射本底实验材料放射性筛选要求及实现手段[J]. 现代应用物理,2017,8(2):36-43.