纯硅芯光纤的空间辐照环境适应性

贾 晓,朱恒静,张红旗,毛喜平,王 征,贾秋阳

(中国空间技术研究院,北京 100094)

摘 要: 研究了光纤的辐照损伤机理,对纯硅芯光纤与传统芯层掺杂光纤的结构特点进行了系统地分析,从结构组成特点上分析了两者的抗辐照性能差异。研究了国内外关于光纤的抗辐照试验标准,对各标准中剂量率、总剂量等试验条件差异进行了对比,并对不同剂量率对光纤辐照试验结果的影响进行了分析,给出了光纤在空间辐照环境条件下应用的 γ 辐照试验条件的选择原则。最后,采用 0.1 rad(Si)/s 剂量率对某国产纯硅芯光纤的抗辐照性能进行了试验评估,光纤在 20 k rad(Si)总剂量辐照后光纤损耗为 1.934 dB/km。空间辐照性能评估结果满足该项目的宇航型号的空间环境使用需求,辐照评估结论为可用。

关键词: 光纤; 纯硅芯; 辐照; 适应性

中图分类号: TN244 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0822002

Space radiation applicability of pure silicon-core optical fibers

Jia Xiao, Zhu Hengjing, Zhang Hongqi, Mao Xiping, Wang Zheng, Jia Qiuyang

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The mechanism of the radiation-induced loss in optical fibers was researched in this paper. Firstly, the structure characteristics of the pure silicon core optical fibers and traditional doped silica-core optical fibers were systematically analyzed. According to their structure characteristics, the difference of the resistance to radiation between the pure silicon core optical fibers and traditional doped silica-core optical fibers was studied. Secondly, the experimental conditions of anti-radiation standards at home and abroad were investigated. The experimental conditions including the dose rate and total dose used as anti-radiation standards had been compared. The effect of different radiation dose rates on the radiation experiments of optical fibers was analyzed. The selection principle of gamma radiation experimental conditions used in space radiation environments for fibers was given. Finally, the anti-radiation properties of a domestic pure silicon-core optical fiber with the dose rate of 0.1 rad(Si)/s were estimated, and the fiber loss after the radiation with the total dose of 20 k rad(Si) was 1.934 dB/km. The assessment results of the space radiation performances satisfied the needs of space environments for the aerospace model in the project, and the conclusion of the radiation assessment was available.

Key words: optical fibers; pure silicon-core; radiation; applicability

收稿日期: 2016-12-11; **修订日期:** 2017-01-22

作者简介: 贾晓(1987-),男,高级工程师,硕士,主要从事宇航用电子元器件可靠性方面的研究。Email: sparkjx@163.com

0 引 言

光纤最早在 1970 年由美国康宁公司(Corning Inc)成功研制出来,光纤传输具有宽频带、低损耗、重量轻和抗电磁干扰等传统电磁信号传输不可比拟的优点。光纤传输在通信、医学、传感、测量、控制等领域取得了广泛的应用[1-2],地面光纤通信成为信息传输网络和信息高速公路的主体结构,是世界各国竞相研究和发展的战略目标。

随着空间技术的发展,宇航型号对信息传输速率的要求不断提升,光纤逐渐被应用于宇航领域。NASA 在 2011 年发布的报告中提到,Goddard 飞行中心光学组研究的光纤组件首次应用在高性能飞行器—月球探测器上,2010 年以后光纤在国内宇航型号上也得到了陆续的应用。纯硅芯光纤由于其芯层无掺杂的结构特点,使其具有较低的衰减和较高的稳定性,近年来成为抗辐照光纤的主要研究方向之一。

光纤的纤芯是透明的光传输介质,透明材料能够传输光线而不吸收是因为它们具有很大的禁带宽度。当禁带宽度大于 3.1 eV 时,光子能量小于 3.1 eV 的可见光就不能激发载流子,光就不会被吸收而在材料介质中传输。在高能粒子的辐射环境下,透明材料可能产生新的能级,载流子被激发进入新的能级后,可见光会在新的能级激发载流子而本身能量被吸收。此时表现为透明材料变暗,产生吸收某几种颜色可见光的“色心”。

以目前应用最为广泛的石英光纤为例,它的纤芯主要成分为 SiO_2,与晶体结构类似也以 $Si(O_{1/2})_4$ 四面体的组成,呈现短程有序长程无序的状态。在光纤制造过程中,往往需要掺杂 GeO_2 等碱金属氧化物改变本体的折射率。由于掺杂和制造工艺不一致性缺陷的存在,石英光纤在 γ 射线等高能射线辐照环境下,通过光电效应、康普顿效应和电子对效应在石英光纤内引起物质电离,自由电子被产生的新能级捕获形成色心,光纤传输效率随之下降[3-5]。

空间辐照环境会在一定程度上对光纤产生损伤,导致光纤信号传输能力降低,甚至影响光纤传输的可靠性和功能实现。研究纯硅芯光纤的结构特点、抗辐照性能和光纤的空间辐照试验方法,设法获得光纤的辐照性能数据,成为拓展光纤在宇航领域应用的基础。

1 纯硅芯光纤的特点及抗辐照性能

传统的石英光纤,以石英玻璃作为低折射率的包层,在芯层中掺入 GeO_2、P_2O_5 等提高折射率。光纤的损耗主要来源于 Rayleigh 散射损耗和吸收损耗,其中吸收损耗由紫外吸收、红外吸收和氢氧根离子吸收损耗构成;Rayleigh 散射损耗则是光纤中材料不可避免的密度或浓度波动引起的散射[6-7]。由于结构和工艺特点,传统石英光纤存在以下缺点:

(1) 芯层掺杂破坏了石英玻璃作为传导介质的单一成分,加工制造过程引入杂质机会增加,光纤损耗难以控制。

(2) GeO_2、P_2O_5 等掺杂氧化物使石英光纤芯内产生点缺陷和位错,在辐照环境下产生缺陷能级,降低了光纤的抗辐照性能。

(3) GeO_2、P_2O_5 等掺杂氧化物本身存在可见光的吸收峰。

纯硅芯光纤以纯石英玻璃作为光纤芯层,在包层中掺杂硼或氟降低折射率,具有较低的衰减和较高的稳定性。掺入硼和氟均能降低石英玻璃的折射率,但是掺硼降低折射率的同时会在红外区产生很大的吸收,而且会引起石英玻璃的结构缺陷[8]。掺氟引起的石英玻璃折射率降低比硼大,能使玻璃在红外区的吸收向更长波侧移动,有利于获得长波长低损耗的光纤。氟在玻璃中的存在,不会带来石英玻璃的结构缺陷,而且还能在一定程度上提高光纤的抗辐照性能[9]。纯硅芯光纤具有较低的衰减和较高的辐照稳定性,在辐照环境条件下有广阔的应用前景。

2 光纤抗辐照试验标准和方法

光纤易受到 γ 射线辐照引起的暂时和永久损坏,试验已经表明伽玛辐照对光纤衰减的影响比质子辐照或中子辐照大得多[10],文中重点对光纤的 γ 射线辐照试验方法展开讨论。

关于光纤总剂量辐照试验的剂量率和总剂量等试验条件,目前不同标准中并不统一。在国家军用标准中,GJB1427《光纤总规范》规定,γ 射线稳态总剂量

辐照施加剂量率为 0.5 Gy(Si)/s、总剂量为 100 Gy(Si)的辐照来确定光纤的稳态核辐照效应；而在GJB915《纤维光学试验方法》中，在辐照源选择中规定，本底辐照试验规定应采用钴 60 或等效电离源，提供不大于 0.2 Gy/h 的低剂量 γ 辐照，有害环境辐照试验应采用钴 60 或等效电离源，提供 0.05~2.5 Gy/s 的 γ 辐照。有害环境辐照试验给出的 γ 射线辐照试验条件有 4 种剂量率和总剂量的组合，剂量率分别为 0.05、0.50、2、2 Gy/s，总剂量分别为 30、100、1 000、10 000 Gy。

在 NASA 的元器件选用、筛选、鉴定和降额标准 EEE-INST-002 中，关于光纤 γ 辐照试验的试验参照标准为 FTOP-64，即 EIA/TIA 455-64，是美国电子工业协会和通信工业联合会的标准。EEE-INST-002 中规定光纤 γ 辐照计量率应小于 100 rad(Si)/min，并采用两个剂量率达到相同的总剂量来推导低剂量率的辐照效应，各标准的 γ 辐照试验条件及测试参数见表1。

表 1 国内外关于光纤的 γ 辐照试验标准及条件

Tab.1 Standards and conditions of radiation experiment of optical fibers both at home and abroad

Standard number	Dose rate	Total dose
GJB1427	0.5 Gy(Si)/s	100 Gy(Si)
GJB915 background radiation	≤0.2 Gy(Si)/h	>1 Gy(Si)
GJB915 harmful environment radiation	0.05-2.5 Gy(Si)/s	/
EEE-INST-002	<100 rad(Si)/min	/
EIA/TIA455-64 background radiation	0.2 Gy(Si)/h	/
EIA/TIA455-64 nuclear environment radiation	3-100 Gy(Si)/min	/

从表 1 中可以看出，对于稳态 γ 射线辐照剂量率，GJB1427 只给出了高剂量率的辐照条件；GJB915 与 EIA/TIA 455-64 给出了背景辐射和有害环境辐射的两类剂量率标准，对于背景辐射给出的剂量率均为 0.2 Gy(Si)/h，即 0.056 rad(Si)/s；NASA 的 EEE-INST-002 中给出的试验剂量率小于 100 rad(Si)/min，即小于 1.67 rad(Si)/s。

对于不同剂量率对光纤辐照特性的影响，武汉理工大学邓涛等在 0.1、1、10 kGy/h 等三种剂量率条件下，研究了纯硅芯单模光纤、掺锗石英芯单模光纤和氟锗共掺石英芯单模光纤的辐照衰减特性[11]。试验结果证明，上述三种单模光纤的衰减都随着辐照剂量率、辐照总剂量的加大而出现不同程度增加，即剂量率越大同等总剂量条件下衰减越大，同等剂量率条件下总剂量越大衰减越大。从理论上分析，上述现象出现的原因是辐照对光纤的破坏为动态过程，一方面光纤中的辐照缺陷产生，另一方面是辐照缺陷的恢复过程[9]。在稳态 γ 辐照试验过程中，低剂量率辐照下，恢复过程要比高剂量率的辐照充分，低剂量率产生的辐致损耗要低于高剂量率。

在飞行器运行的空间环境下，空间辐照环境的实际稳态辐照剂量率水平约为 0.000 1~0.01 rad(Si)/s，辐射剂量率很低，在实验室再现这种环境下若干年后的累加总剂量效应需要大量的试验资源消耗且试验时间无法满足宇航型号的需求。从国内外相关标准分析来看，对于背景辐照的试验条件，剂量率推荐均为较低的剂量率。而通过理论分析和试验验证可知，低剂量率产生的辐致损耗要小于高剂量率，在实验环境下采用高剂量率加速试验得到的辐照衰减要大于实际空间环境衰减量。因此，在进行光纤辐照试验时，采用可到达的尽量低的辐照剂量率进行 γ 射线总剂量试验可以得到实际辐照衰减的上限值，可作为空间应用依据。辐照剂量越低试验结果越接近于实际辐照环境的衰减，在航天器用光纤辐照试验时应尽可能选择低剂量率的试验条件。

3 某纯硅芯光纤空间辐照性能评估

该部分设计辐照试验条件，对国内某光纤生产单位为中国空间技术研究院宇航型号研制的单模光纤的辐照性能进行了评估。该光纤芯层为纯硅芯，包层为掺氟玻璃包层，涂覆层为丙烯酸树脂涂层。

在辐照剂量率选取方面，根据文中第 2 部分的讨论结果，在试验条件允许情况下尽量降低剂量率。

空间辐照环境的实际稳态辐照剂量率水平约为 0.000 1~0.01 rad(Si)/s，此次根据试验室条件允许的最低剂量率采用了 0.1 rad(Si)/s 剂量率开展辐照试验，光传输损耗测量波长为 1 310 nm，辐照试验的

结果见表 2。

表 2 某国产纯硅芯光纤辐照试验剂量与辐射损耗

Tab.2 Total dose and radiation induced loss of one of the domestic pure silicon-core optical fiber

Sample number	Length/km	Radiation time/h (Total dose rad(Si))	Induced loss/dB·km^{-1}	Increasing induced loss/dB
1	10.3	0	0.295	0
		27.8(10 k)	1.036	0.741
		55.6(20 k)	1.862	0.826
		83.4(30 k)	2.277	0.415
		111.2(40 k)	2.602	0.325
		138.9(50 k)	2.927	0.325
2	10	0	0.323	0
		27.8(10 k)	1.000	0.677
		55.6(20 k)	1.737	0.737
		83.4(30 k)	2.190	0.453
		111.2(40 k)	2.576	0.386
		138.9(50 k)	2.973	0.397
3	10	0	0.326	0
		27.8(10 k)	1.112	0.786
		55.6(20 k)	1.841	0.729
		83.4(30 k)	2.332	0.491
		111.2(40 k)	2.744	0.412
		138.9(50 k)	3.184	0.44
4	10	0	0.325	0
		27.8(10 k)	0.988	0.663
		55.6(20 k)	1.600	0.612
		83.4(30 k)	2.011	0.411
		111.2(40 k)	2.373	0.362
		138.9(50 k)	2.739	0.366
5	9.2	0	0.319	0
		27.8(10 k)	1.168	0.849
		55.6(20 k)	1.934	0.766
		83.4(30 k)	2.550	0.616
		111.2(40 k)	3.095	0.545
		138.9(50 k)	3.663	0.568

图 1 为根据试验结果绘制的该型号纯硅芯光纤辐照损耗随总剂量的变化曲线。从辐照试验结果可以看出，五个样品辐照衰减一致性较好，5 号样品辐照耗最大，在剂量率 20 k rad(Si)以上的损耗均高于其他样品，4 号样品辐照耗最小。

五个样品辐照损耗之间的差别原因可能是承受辐射剂量的细微区别或产品本身加工过程的工艺波动造成。对比表 1 国内外相关标准的试验条件可知，此次试验的剂量率设置符合 GJB915 与 EIA/TIA 455-64 给出的背景辐射剂量率要求和 NASA 的 EEE-INST-002 中的空间辐照试验剂量率要求，且更低的剂量率使试验结果更接近实际空间环境下的抗辐照水平。该次对于该光纤给出的抗辐照试验能力评价结果为 10 k rad(Si)，总剂量辐照后光纤损耗为 1.168 dB/km，20 k rad(Si)后为 1.934 dB/km，30 k rad(Si)后为 2.550 dB/km，40 k rad(Si)后为 3.095 dB/km，50 k rad(Si)后为 3.663 dB/km。

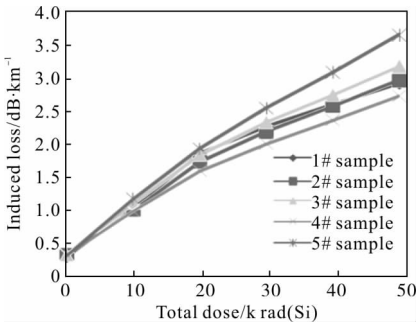

图 1 某国产纯硅芯光纤样品辐照损耗对比曲线

Fig.1 Curve of radiation induced loss of one of the domestic pure silicon core optical fiber sample

该项目宇航型号对光纤辐照指标要求为在 20 k rad(Si)总剂量条件下损耗低于 2.5 dB/km，该光纤可应用于型号。

4 结 论

光纤通信的诸多优势使它在未来航天型号中将得到越来越多的应用，研究光纤的抗辐照试验技术是其在空间环境应用的基础和保障。通过对光纤空间辐照试验条件和纯硅芯光纤的抗辐照性能研究，结论如下：

(1) 纯硅芯光纤与传统芯层掺杂光纤相比，具有较低的衰减和较高的辐照稳定性，更适于在空间环境应用。

(2) 光纤在稳态 γ 辐照试验环境中，低剂量率产

生的辐致损耗要小于高剂量率。

(3) 空间环境用光纤的稳态 γ 辐照试验剂量率，可在试验允许情况下选择高于实际空间辐照的剂量率，高剂量率的辐照损耗大于实际空间低剂量率下的损耗，可作为空间应用的最坏情况判断依据。

(4) 对某国产纯硅芯光纤的抗 γ 辐照试验能力进行评估，20 k rad(Si)总剂量辐照后光纤损耗为 1.934 dB/km，满足该项目的宇航型号的空间环境使用需求，辐照评估结论为可用。

参考文献：

[1] Sun Qian, Feng Hao, Zeng Zhoumo. Recognition of optical fiber pre-warning system based on image processing [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23(2): 334-341. (in Chinese)
孙茜, 封皓, 曾周末.基于图像处理的光纤预警系统模式识别[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 334-341.

[2] Zhang Da, Xu Shuyan. High-speed CCD image data fiber transmission system [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2009, 17(3): 669-675. (in Chinese)
张达, 徐抒岩. 高速 CCD 图像数据光纤传输系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 669-675.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Liu Fuhua, Wang Ping, Feng Gang, et al. Influence of Gamma-ray radiation on optical fiber dispersion [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(1): 0118001. (in Chinese)
刘福华, 王平, 冯刚, 等. γ 辐射对光纤色散的影响 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0118001.

[6] Tao Mengmeng, Yang Pengling, Liu Weiping, et al. Response characteristics of fiber Bragg gratings irradiated by high energy lasers[J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5(5): 544-549. (in Chinese)
陶蒙蒙, 杨鹏翎, 刘卫平, 等. 高能激光辐照下光纤布拉格光栅响应特性[J]. 中国光学, 2012, 5(5): 544-549.

[7] Wang Xun, Jin Chunshui, Kuang Shangqi, et al. Techniques of radiation contamination monitoring for extreme ultraviolet devices[J]. ***Chinese Optics***, 2014, 7(1): 79-88. (in Chinese)
王珣, 金春水, 匡尚奇, 等. 极紫外光学器件辐照污染检测技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 79-88.

[8] Cao Jun. The characteristic of pure-silica-core fiber [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005: 20-23. (in Chinese)
曹骏. 对纯硅芯光纤的特性分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2005: 20-23.

[9] Han Yanling, Xiao Wen, Yi Xiaosu, et al. Active recovery effect of irradiati on 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.

[10] Zabezhailov M O. The role of fluorine-doped cladding in radiation induced absorption of silica optical fibers [J].***IEEE Transaction on Nuclear Scienc***e, 2002, 49(3): 1410-1413.

[11] Deng Tao. Researches on radiation resistance of silica glass and silica optical fibers [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010: 85-90. (in Chinese)
邓涛. 石英玻璃及石英光纤的抗辐照性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 85-90.