

石英光纤 γ 辐照损伤及其对近红外导波特性的影响 *

姜 辉¹⁾ 陈抱雪^{1)†} 傅长松¹⁾²⁾ 隋国荣¹⁾ 犇 守³⁾

1) (上海理工大学光电信息与计算机学院, 上海 200093)

2) (上海航天控制技术研究所, 上海 200233)

3) (日本东京农工大学工学院 应用化学系, 日本 184-8588)

(2009 年 10 月 4 日收到; 2010 年 1 月 20 日收到修改稿)

围绕光纤陀螺的近红外工作波长, 从回波损耗、偏振相关损耗、散射损耗、吸收损耗、模场分布以及导模传播常数等方面实验考察了总剂量为 120 krad (1.2 kGy) 的 γ 辐照对石英单模光纤导波特性的影响; 用近红外光谱技术和受激喇曼散射实验估计了相应的隙内缺陷能级及其增量; 用 X 衍射考察了介质密度变动; 采用高灵敏度干涉回路观察到了 γ 辐照光纤的光热效应, 测试数据表明紫外退火具有一定的修复作用, 揭示了紫外退火作为一种主动加固方式用于抗 γ 辐照的可能性。

关键词: 光电子学, 石英光纤, 光纤陀螺, γ 辐射损伤

PACC: 3300, 2930K

1. 引 言

处在地球轨道空间的介质受到的 γ 辐照尽管很小, 但是存在着长时间低剂量辐照积累的总剂量效应问题^[1, 2], 特别是对于像光纤陀螺仪这类利用长距离光纤作为相移介质的高灵敏度干涉型传感器件, 微小的光纤介质参量漂移都有可能因长距离累积而使器件发生性能失控或可靠性失效^[1, 3]. 迄今的许多试验都证实了光纤陀螺中使用的石英光纤在 γ 辐照下会发生光学参量的变化, 表观现象主要反映在传输损耗的明显增加, 一般认为与光纤内部色心缺陷的增多有关, 报道的研究工作多集中在传输损耗与 γ 辐照的关联上^[4-6]. 实际上, 作为长距离波导介质的光纤的折射率分布如果发生变化, 导模的有效折射率就要发生变化, 由此引起的相位差变动会随距离累积而成比例放大, 这种现象对干涉型器件的性能影响在很多情况下要比传输损耗的增加来得大. 此外, 来自于光纤环路的反射光以及途经光纤环路发生的与偏振相关的光功率变动等现象也都是光纤陀螺传感技术力图抑制的误差源^[7, 8]. 本工作围绕光纤陀螺的工作波长, 从回波损耗、偏振相关损耗、散射损耗、吸收损耗、模场分布

变动以及导模有效折射率变动等方面实验考察了 γ 辐照对石英单模光纤导波特性的影响; 用 X 衍射考察了介质密度变动; 用近红外光谱技术和受激拉曼散射实验估计了相应的隙内缺陷能级及其增量; 采用高灵敏的光纤型干涉回路首次观察到了 γ 辐照光纤的光热效应, 实验数据表明紫外退火具有一定的修复作用, 有力提示了紫外退火作为一种主动加固方式用于抗 γ 辐照的可能性.

2. γ 辐照石英光纤的损伤特征测试及其讨论

实验样品是光纤陀螺仪中使用的近红外单模石英光纤, 辐照源是⁶⁰Co, 考虑到轨道空间的 γ 辐照具有低剂量率、长期累积形成中等程度总剂量的特点, 实验的辐照剂量率取 1 rad/s (1 rad = 10⁻² Gy), 总剂量是 120 krad. γ 辐照引起石英光纤色心增加、导致紫外谱和可见谱明显变动的情况已被不少实验证实^[9-11], 本工作围绕光纤陀螺的工作波长展开, 损耗谱在 600—1700 nm 范围测试, 扫描线宽是 10 nm, γ 辐照光纤和正常基底光纤的长度均为 2800 m, 仪器是 Agilent 公司的 86140B 光谱仪. 待测光纤的两端通过 FC 接口分别与光谱仪的光源口和探测

* 国家自然科学基金(批准号:60677032)资助的课题

† 通讯联系人. E-mail: bxchen@online.sh.cn

口连接,为了对接口拔插引起的对接耦合变动有个估计,分别对 γ 辐照光纤以及正常基底光纤与光谱仪的连接做了插拔测试,各端均插拔21次,测试结果表明 γ 辐照光纤的接口拔插最大变动量在光源口和探测口分别为0.035 dB和0.038 dB,正常基底光纤的接口拔插最大变动量在光源口和探测口分别为0.042 dB和0.033 dB。其影响可以忽略。辐照后的损耗谱增量示于图1,1310和1550 nm窗口以外的谱损耗增加了1 dB左右,且具有短波长一侧的损耗增量较大的瑞利散射特征,可以认为 γ 辐照导致了光纤玻璃微结构缺陷的增加。在1310 nm和1550 nm窗口,损耗大幅增加,显然不同于瑞利散射,表明除了瑞利散射机理以外,还存在吸收机理。由于Si—O—Si键的O离子和Si离子的拉伸振动谱以及Si—O的弯曲振动谱分别在9090,12500和20833 nm附近,1310和1550 nm窗口的吸收应该来自于新增的隙内缺陷能级,处在浅能级位置,不同于紫外—可见谱观察到的深能级隙内缺陷。1280—1370 nm窗口和1510—1600 nm窗口的传输损耗增量几乎相同,约在2.4 dB/km左右,两个窗口80 nm带宽输入光功率分别是 3.2×10^{-2} mW和 2.0×10^{-2} mW, γ 辐照引入的新增缺陷主要是E'色心^[12—16],每个色心有1个自陷电子,据此算得两个窗口对应的新增隙内浅能级缺陷的浓度分别在 $1.7 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 和 $1.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 量级。对于1510—1600 nm窗口的吸收增加,一种可能的原因是,E'色心的形成通常伴有氧空位并释放一个自陷电子,该自陷电子通过库仑作用容易被非着色性杂质正离子P⁺俘获,还原的P原子可以与OH⁻构成≡P—OH键合,≡P—OH键在1600 nm附近有振动吸收,由于≡P部分可以与游离的氧原子构成单键或双键,因此≡P部分的等效质量是变动的,较小的等效质量会造成振动吸收波长的蓝移,结果是吸收带展宽。对于1280—1370 nm窗口的吸收增加,可能的原因是,伴随氧空位游离出来的氧原子在高能辐照的激发下,与光纤中残余的结合水发生相互作用增生OH⁻基,OH⁻基振动的二次谐波吸收在1380 nm附近,而OH⁻基振动的二次谐波与Si—O基振动的耦合波吸收在1240 nm附近^[17],与观察到的吸收窗口十分符合。另外, γ 辐照导致的色心浓度约在 10^{17} — 10^{18} cm^{-3} 量级^[10],与此比较,与上述两个窗口对应的新增浅能级缺陷的浓度是非常低的,由于光纤长

距离传输的累积效应,即使光纤中残余的P⁺离子和结合水的浓度很低,仍然会表现出明显的吸收现象。

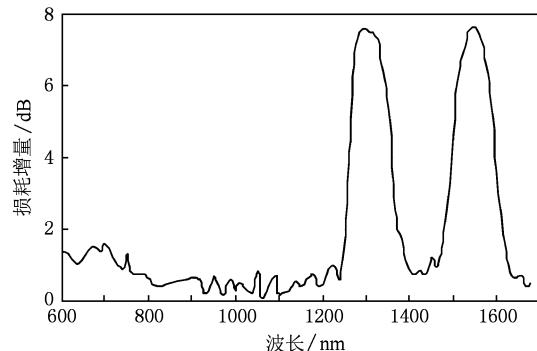


图1 γ 辐照后的损耗谱增量

与1310和1550 nm窗口相比,1420 nm附近的损耗要小得多,这意味着受激拉曼散射所需的1420 nm抽运阈值可以得到保证,比对实验采用了背向抽运的受激拉曼散射,抽运光源是IPG公司的光纤拉曼激光器(波长1427.2 nm,线宽0.67 nm),抽运光经定向耦合器导入光纤,有效抽运功率是500 mW。信号光由调谐范围为80 nm的外腔式半导体激光器提供, γ 辐照单模光纤和正常单模光纤先后被用作有源光纤,长度都是20 km。图2给出了实验结果,在1504—1570 nm带宽上,正常光纤的受激斯托克斯拉曼增益在3.2—7.6 dB之间,而 γ 辐照光纤的增益仅为0.3 dB左右。这与图1的结果符合, γ 辐照光纤的隙内浅能级自陷电子的吸收阻断了受激辐射斯托克斯光子的累积。

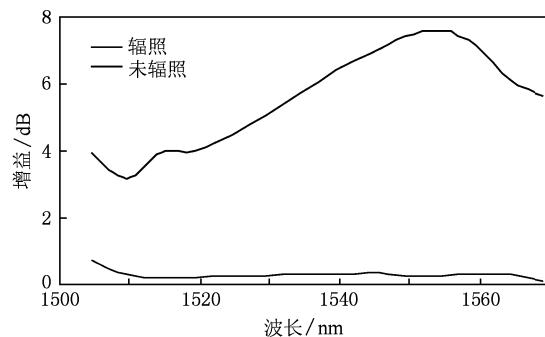


图2 受激喇曼散射测试结果

用回波损耗测试实验对 γ 辐照光纤的瑞利散射做了进一步的考察,光源是Agilent公司81654A双波长(1310 nm/1550 nm)模块,探测器是Agilent公司81637A双口模块。功分器是3 dB光纤耦合器,光纤的终端处理利用了曲率半径为4 mm的环绕消

反射法。为了减少对反射光的吸收影响,取10和20 m两种较短的 γ 辐照光纤,衬底测试使用了同样长度的同型号正常光纤,光纤更换采用了切断融接技术。实验结果显示,无论是10 m还是20 m的 γ 辐照光纤,1310和1550 nm的回波损耗增量都在2 dB附近,从图1的瑞利散射损耗来估计,这个数值显然偏大。通常在非同类光纤之间做切断融接时会有这种现象,为此,使用上海电缆研究所的光纤参数测试仪对 γ 辐照光纤的导模模场分布做了考察。结果列于表1, γ 辐照光纤的模场直径变小,意味着光纤芯的折射率增量大于包层的,原因可能在于光纤芯掺有 GeO_2 。回波损耗增量中不排除瑞利散射的成分,但 γ 辐照光纤与正常光纤之间的非同类光纤融接是回波损耗增加的主要原因。

表1 辐照前后光纤的模场直径

波长/nm	光纤状况	模场直径/ μm
1310	正常	9.04
	γ 辐照	8.89
1550	正常	10.03
	γ 辐照	9.89

X线衍射的比对实验使用了0.1542 nm的 $Cu-K\alpha$ -X射线,测试速率是0.1°/20 s,测试样品是面积为 $25 \times 20 \text{ mm}^2$ 的多层密排裸光纤篱笆,裸光纤的涂覆层用丙酮剥除,结果示于图3,显示了很宽的衍射光晕,表明 γ 辐照前后的样品都是无规网络玻璃态。 γ 辐照前的主峰值衍射角 2θ 是13.2°,对应的平均网格线度为0.6708 nm, γ 辐照后的主峰值衍射角增大至13.6°,对应的平均网格线度为0.6512 nm,变化率 $(0.6512 - 0.6708) / 0.6708 = -2.92\%$,显示石英光纤经 γ 辐照后密度增加。根据Lorenz-Lorentz关系,折射率与材料密度成正比,光纤密度提

高,折射率增加,这与上述模场分布实验结果一致。

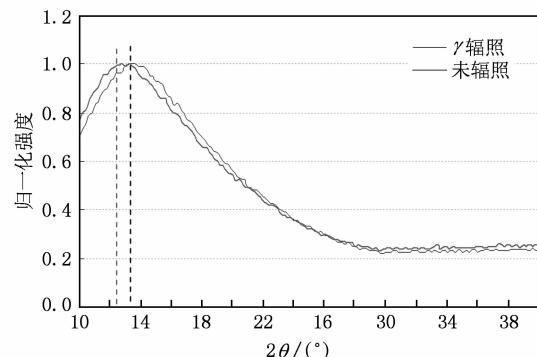


图3 X线衍射比对

为了获得相对折射率增量的定量数据,采用图4的马赫-曾德尔干涉回路结合多波长方法分别测定了 γ 辐照单模光纤和正常单模光纤的导模传播常数,光源和探测器由Agilent-86140B光谱仪提供,前后两个光纤型1310 nm宽带3 dB耦合器的交叉耦合比 $\eta_{x1}(\lambda)$ 和 $\eta_{x2}(\lambda)$ 事前测得,一对耦合臂由两根同类型单模光纤构成,对于确定的波长,决定输出端交叉耦合比 $\eta_x(\lambda)$ 的因素有两个,一个是导模的传播常数 $\beta(\lambda)$,另一个是耦合臂的长度差 ΔL ,可表示成

$$\eta_x = (1 - \eta_{x1})\eta_{x2} + (1 - \eta_{x2})\eta_{x1} + 2 \sqrt{(1 - \eta_{x1})(1 - \eta_{x2})\eta_{x1}\eta_{x2}} \cos(\beta\Delta L), \quad (1)$$

在1310 nm窗口以间隔 $\Delta\lambda$ 取M个波长,各波长对应的传播常数可写成

$$\begin{aligned} \beta(\lambda_i) &= \beta(\lambda_1) + (i-1)\Delta\beta, \quad i = 1, 2, \dots, M, \\ \Delta\beta &= \frac{d\beta}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda. \end{aligned} \quad (2)$$

由于测试波段很窄, $d\beta/d\lambda$ 可以看成是常数。于是(1)式改写为

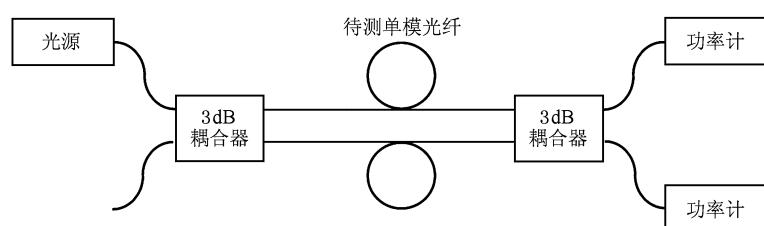


图4 马赫-曾德尔干涉回路

$$\begin{aligned} \eta_x(\lambda_i) &= [1 - \eta_{x1}(\lambda_i)]\eta_{x2}(\lambda_i) + [1 - \eta_{x2}(\lambda_i)]\eta_{x1}(\lambda_i) \\ &\quad + 2 \sqrt{[1 - \eta_{x1}(\lambda_i)][1 - \eta_{x2}(\lambda_i)]\eta_{x1}(\lambda_i)\eta_{x2}(\lambda_i)} \cos\{\beta(\lambda_1) + (i-1)\Delta\beta\}\Delta L, \\ i &= 1, 2, \dots, M, \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式是由 M 个方程构成的联立方程组,3个待求量分别是 $\beta(\lambda_1)$, $\Delta\beta$ 和 ΔL .采用 $M > 3$ 的多波长测试,可以通过统计优化手段减小测试误差.用遗传算法求解(3)式,评价函数定义为

$$\delta = \sum_{i=1}^M [\eta_x(\lambda_i)_d - \eta_x(\lambda_i)_c]^2, \quad (4)$$

这里 $\eta_x(\lambda_i)_d$ 是实测值, $\eta_x(\lambda_i)_c$ 是由(3)式得到的计算值.目标是 $\delta \rightarrow \min$,显然 δ 愈小,解得的3个参量 $\beta(\lambda_1)$, $\Delta\beta$ 和 ΔL 愈接近事实.实验的测试波段是1298—1326 nm,以间隔 $\Delta\lambda = 4$ nm分成8个波长.测得 γ 辐照单模光纤和正常单模光纤的 δ 分别是0.0026和0.0018,在1310 nm上, γ 辐照单模光纤和正常单模光纤的传播常数 β 分别是7.953 μm^{-1} 和7.013 μm^{-1} ,相当于光纤的有效折射率约

增加了0.19.这与模场分布实验和X衍射的结果相符.

用偏振相关损耗(PDL)测试实验考察了 γ 辐照对光纤内部残留应力的影响,光源和探测器分别是Agilent公司81654A模块和81637A模块,偏振控制器是Agilent公司11896A.表2归纳了测试结果, γ 辐照光纤的PDL较无 γ 辐照的正常光纤来得大,PDL增量随光纤长度增加而增大,这种与光纤长度相关的PDL增量一般与端面耦合的影响无关,表明折射率各向异性的增加可能源于 γ 辐照导致了光纤内部非对称残留应力的增加.另外,PDL相对增量与波长有关,长波长的较大,这是由于长波长导模的功率约束系数较小,对折射率各向异性较敏感造成的.

表2 γ 射线辐照前后光纤的PDL值

光纤长 度/m	1310 nm PDL/dB			1550 nm PDL/dB		
	无 γ 辐照		相对增量	无 γ 辐照		相对增量
	a_1	a_2	$((a_2 - a_1)/a_1)\%$	b_1	b_2	$((b_2 - b_1)/b_1)\%$
10	0.0122	0.0199	64	0.0022	0.0047	114
20	0.0122	0.0216	77	0.0027	0.0069	156

为了进一步加深对 γ 辐照光纤缺陷特性的了解,做了光热效应的实验.实验回路如图5(a)所示,马赫-曾德尔干涉回路的两根干涉臂使用了 γ 辐照单模光纤,其中一根的部分光纤的石英包层用氢氟酸腐蚀去除,构造示于图5(b),裸露纤芯的长度是30 cm,直径在12 μm 左右.裸露纤芯被浸没于注满

了无水乙醇的培养皿中,UV辐照限定在裸露纤芯区域.光源和探测器分别是Agilent公司81654A模块和81637A模块,工作波长是1310 nm,光功率是1 mW.紫外光源是HOYA公司的LED单色冷光源EXECURE-LH-1V,波长是365 nm,光纤作用面上的光强是6.75 mW/cm².

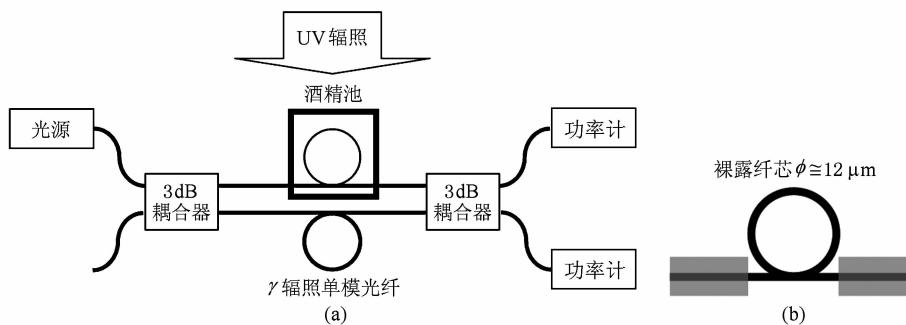


图5 (a)光热效应实验结构;(b)裸露纤芯构造

实验基本原理是,裸露纤芯中被色心缺陷俘获的、处在隙内能级上的亚稳态电子吸收了365 nm紫外光子后跃迁至导带迁移率边以上,由于扩展态受激电子是不稳定的,可以通过辐射跃迁或驰豫跃迁退激,由于120 krad总剂量的 γ 辐照属中等剂量辐照,没有观察到荧光^[18],因此扩展态受激电子通过

原子弛豫退激,紫外光子能量除了部分贡献给弛豫位移作功外,其它主要转移为发热.由于裸露纤芯周边、充当包层的无水乙醇有非常好的热传导特性,吸热后发生热折变,结果使得通过裸露纤芯的导模的传播常数发生变化,导致通过两根干涉臂的导模之间产生额外的相位差.由于马赫-曾德尔干

对相位差极为灵敏,可以通过测量输出端的功率耦合比的变动来观察。另外,石英光纤的本征吸收在140 nm附近^[19],365 nm紫外光辐照不涉及价带迁移率边以下的电子跃迁,观测到的光热效应主要源于隙内缺陷能级电子的受激和退激举动。图6给出了实测结果,前10 min的UV辐照使交叉耦合比发

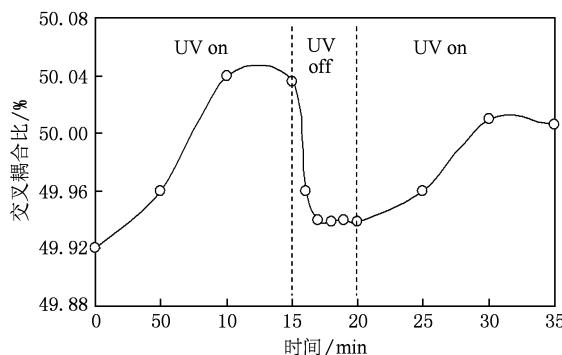


图6 光热效应实测结果

生明显变动,10 min的UV辐照剂量约为4050 mJ/cm²,之后交叉耦合比几乎不动,意味着热平衡建立。切断UV辐照后,由于无水乙醇散热良好,很快降到室温,然而实验显示交叉耦合比不能回复到初始水平。再次开启UV辐照,交叉耦合比的变动趋势与初次UV辐照时的相同,但是同为4050 mJ/cm²辐照剂量得到的交叉耦合比的变化量小于初次辐照的。这两个现象可能意味着一定剂量的365 nm紫外辐照具有修复缺陷的作用,经初次15 min(相当于6075 mJ/cm²UV剂量)辐照后的裸露纤芯的隙内缺陷已有部分修复,修复机理可能出于原子弛豫,类似于一种紫外退火效应,由于色心缺陷释

放的自陷电子本质上是一种亚稳的激发态电子,很不稳定,在紫外退火作用下,可以越出浅势阱退激,色心缺陷还原为氧空位中心,这个过程伴有原子弛豫,结果是玻璃网格中因色心形成引起的额外畸变得到部分修复,由于介电系数与网格畸变呈正比,因此折射率伴随修复过程的完成而不可逆地下降,这个现象在光纤的光折变过程中也已经看到^[20]。正是这种折射率的变化导致了光学回路的原始相位差变化,交叉耦合比回不到初始值。同样是由于隙内缺陷的部分修复,光热效应减小,结果导致再次开启UV辐照后的交叉耦合比的变动减小。这个实验结果提示了一个重要的可能性,紫外辐照可以部分修复 γ 辐照带来的缺陷,如果在低剂量 γ 辐照累积环境中,始终辅以适当的紫外辐照,也许可以作为一种主动加固方式降低石英光纤对 γ 辐照的动态灵敏度。

3. 结 论

围绕光纤陀螺的工作波长,从回波损耗、偏振相关损耗、散射损耗、吸收损耗、模场分布变动、导模有效折射率变动以及介质密度变动等方面实验考察了由 γ 辐照带来的影响,用近红外光谱技术和受激拉曼散射实验估计了相应的隙内缺陷能级及其增量,采用高灵敏度光纤型干涉回路观察到了 γ 辐照光纤的光热效应,实验数据表明紫外退火具有一定的修复作用,提示了紫外退火作为一种主动加固方式用于抗 γ 辐照的可能性。

- [1] Friebel E J, Gingerich M E, Griscom D L 1993 *Proceeding of SPIE*, vol. 1791, *Optical Materials Reliability and Testing: Benign and Adverse Environments*, Boston, MA, USA, September 8—9, 1992 p177
- [2] Williams G M, Putnam M A, Friebel E J 1996 *Proceeding of SPIE*, vol. 2811, *Photonics for Space Environments IV*, Denver, CO, USA, August 6—7, 1996 p32
- [3] Boucher R H, Woodward W F, Lomheim T S, Shima R M, Asman D J, Killian K M, LeGrand J, Goellner G J 1996 *Opt. Eng.* **35** 955
- [4] Toh K, Shikama T, Nagata S, Tsuchiya B, Yamauchi M, Nishitani T 2006 *Meas. Sci. Technol.* **17** 955
- [5] Brichard B, Borgermans P, Fernandez A, Lammens K, Decréton M 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 2069
- [6] Ilenschel H, Köhn O, Schmid H U 1992 *IEEE RADECS 91: First European Conference on Radiation and its Effects on Devices and Systems*, La Grande-Motte, France, September 9—12, 1991 p380
- [7] Szafraniec B, Sanders G A 1999 *J. Lig. Tech.* **17** 579
- [8] Lu Y H, Zhong S X 2004 *Optoelectronic Technology* **24** 68 (in Chinese) [陆永红、钟生新 2004 光电子技术 **24** 68]
- [9] Ilenschel H, Köhn O, Schmid H U 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 1050
- [10] Gao S J, Ouyang S X 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1292 (in Chinese) [高祀建、欧阳世翕 2003 物理学报 **52** 1292]
- [11] Jiang X W, Qiu J R, Zhu C S, Ouyang S X, Hirao K, Gan F X 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 871 (in Chinese) [姜雄伟、邱建荣、朱从善、欧阳世翕、Hirao K、干福熹 2001 物理学报 **50** 871]

- [12] Xiao Z Y, Luo W Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2731 (in Chinese) [肖中银、罗文芸、王廷云 2007 物理学报 **56** 2731]
- [13] Weeks R A 1956 *J. Appl. Phys.* **27** 1376
- [14] Nagasawa H, Hoshi Y, Ohki Y 1987 *Jpn. J. Appl. Phys.* **26** 554
- [15] Imai H, Arai K 1988 *Phys. Rev. B* **38** 12772
- [16] Nishikawa H, Nakamura R, Tohmon R 1990 *Phys. Rev. B* **41** 7828
- [17] Rich T C, Pinnow D A 1972 *Appl. Phys. Lett.* **20** 264
- [18] Han Y L, Xiao W, Yi X S, Zhang Y C 2008 *Infrared and Laser Engineering* **37** 128 (in Chinese) [韩艳玲、肖文、伊小素、张运春 2008 红外与激光工程 **37** 128]
- [19] Gan F X 2002 *Infrared and Laser Engineering* **21** 64 (in Chinese) [干福熹 2002 红外与激光工程 **21** 64]
- [20] He W, Li J Z, Mei J C 2005 *Journal of Inorganic Materials* **20** 210 (in Chinese) [何伟、李剑芝、梅家纯 2005 无机材料学报 **20** 210]

γ -irradiation damage of quartz fiber and its effects on near-infrared transmission characteristics *

Jiang Hui¹⁾ Chen Bao-Xue^{1)†} Fu Chang-Song¹⁾²⁾ Sui Guo-Rong¹⁾ Mamoru Iso³⁾

1) (*Department of Optical-Electrical and Computer Engineering, University Of Shanghai for Science and Technology Shanghai 200093, China*)

2) (*Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 200233, China*)

3) (*Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 184-8588, Japan*)

(Received 4 October 2009; revised manuscript received 20 January 2010)

Abstract

Around the near-infrared wavelength at which optical fiber gyroscope works, the effects of 120 krad γ -irradiation on single-mode quartz fiber are studied experimentally from the following several aspects: return loss, polarization dependent loss, scattering loss, absorption loss, mode field distribution and guided-mode propagation constants. The gap defect energy level and its increment are estimated from near-infrared spectroscopy and stimulated raman scattering experiment. The medium density change is studied by x-ray diffraction. The photothermal effect of irradiated fiber with γ -ray is observed by a high sensitivity interference circuit. The test data show that the UV anneal has some repairing effect, revealing the possibility that UV annealing method can serve as a means of active reinforcement.

Keywords: optoelectronics, Quartz fiber, optical fiber gyroscope, γ -irradiation damage

PACC: 3300, 2930K

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60677032).

† Corresponding author. E-mail: bxchen@online.sh.cn