

## 伽马射线辐照对掺铅石英光纤的磁光特性影响

文建湘, 王文娜, 郭 琪, 黄 恽, 董艳华,  
庞拂飞, 陈振宜, 刘云启, 王廷云

(上海大学 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

**摘 要:** 研究了伽马射线辐照对掺铅石英光纤磁光特性的影响。实验结果表明: 掺铅石英光纤样品辐照前, 在 660、808、980、1310 和 1550 nm 波长处的费尔德常数分别为 3.093、1.676、1.240、0.705 和 0.538 rad/(T·m), 均高于单模光纤的费尔德常数, 且费尔德常数随着波长的增加而减小, 尤其在 660 nm, 相比较单模光纤, 掺铅石英光纤样品费尔德常数提高了 20.82%。经伽马射线辐照后, 掺铅石英光纤样品的费尔德常数随着辐照剂量的增加而增大, 尤其在 5 kGy 剂量, 其费尔德常数增加了 41.94%, 而单模光纤仅增加了 33.04%。掺铅石英光纤通过掺杂及辐照的手段提高了费尔德常数, 在大电流传感领域具有重要意义。

**关 键 词:** 掺铅石英光纤; 磁光特性; 费尔德常数; 伽马射线辐照

中图分类号: TQ171 文献标识码: A

## Gamma-ray Radiation on Magneto-optical Property of Pb-doped Silica Fiber

WEN Jian-Xiang, WANG Wen-Na, GUO Qi, HUANG Yi, DONG Yan-Hua, PANG Fu-Fei,  
CHEN Zhen-Yi, LIU Yun-Qi, WANG Ting-Yun

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Effect of gamma-ray radiation on magneto-optical properties of Pb-doped optical silica fiber before and after irradiation were investigated. The experiment results indicated that Verdet constants of the fiber samples at 660, 808, 980, 1310, and 1550 nm were 3.093, 1.676, 1.240, 0.705, and 0.538 rad/(T·m), respectively, larger than these of single mode fiber. Verdet constants decreased with the increase of wavelength. It increased by 20.82% at 660 nm. After the fiber samples being irradiated from 0.8 kGy to 5 kGy, Verdet constants of Pb-doped silica fibers increased with the increase of radiation dose. Especially, Verdet constant of Pb-doped silica fiber irradiated at 5 kGy is 41.94% larger than that of the un-radiation treated fiber, and increased by 33.04% for SMF with the same doses treatment. Verdet constant of the Pb-doped silica fiber can be increased by doping and radiation methods, which is of great significance in the field of current sensing.

**Key words:** Pb-doped silica fiber; magneto-optical property; Verdet constant; gamma-ray radiation

基于法拉第效应的电流传感器作为传统光学装置的替代品已经得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。众所周知, 具有高磁光旋转角的磁光材料是获得高灵敏度传感的基

础。近年来人们研发了一些具有高费尔德常数的光纤传感器, 例如,  $Tb^{3+}$  掺杂顺磁玻璃制作的光纤传感器<sup>[4-5]</sup>。虽然顺磁性玻璃的法拉第效应比逆磁性玻

收稿日期: 2017-05-03; 收到修改稿日期: 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61475096, 61520106014, 61422507, 61635006); 上海市科委项目(15220721500, 152R1415900)  
National Natural Science Foundation of China (61475096, 61520106014, 61422507, 61635006); Science and Technology Commission of Shanghai(15220721500, 152R1415900)

作者简介: 文建湘(1975-), 男, 副教授. E-mail: wenjx@shu.edu.cn

璃的大,但是它对温度的依赖性很高,而逆磁材料对温度的依赖性较小<sup>[6]</sup>,因此逆磁掺杂材料在电流传感器中的应用开始引起关注。 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Bi}^{3+}$ 掺杂逆磁玻璃都具有较高费尔德常数<sup>[7-9]</sup>,使其在传感器领域有很好的应用价值。掺铅石英光纤具有良好的温度不敏感特性,但是有关掺铅石英光纤的磁光特性研究非常少。

本工作主要利用改进化学气相沉积法(MCVD),并结合原子层沉积技术(ALD)制备掺铅石英光纤,研究并分析它与常规单模光纤经伽马射线不同辐照剂量处理后,其费尔德常数与消光比的变化情况。同时,搭建掺杂石英光纤的磁光特性测量分析系统。

### 1 实验方法

光纤样品采用 MCVD 结合 ALD 工艺技术制造而成。首先,使用 MCVD 工艺在石英基管内壁沉积  $\text{SiO}_2$  疏松层,然后,利用 ALD 掺杂技术在石英基管内壁的  $\text{SiO}_2$  疏松层沉积氧化铅及氧化铝材料,掺杂后的石英基管再利用 MCVD 工艺沉积  $\text{SiO}_2$  和  $\text{GeO}_2$  芯层,经玻璃化、收棒后形成光纤预制棒,最后,将光纤预制棒拉丝成石英光纤,其详细制作过程见参考文献[10-12]。

利用扫描电子显微镜(SEM, JEM-2010F, Japan)并结合能谱分析仪(EDS, OXFORD, England)进行光纤掺杂材料的组分分析,首先剥离光纤涂覆层,切割光纤端面,并在样品端面处喷 Pt 处理;然后,放置样品仓,抽真空再加压,利用高能粒子轰击样品的切割端表面,经 X 射线与掺杂物质相互作用,则在激发区域产生二次电子,从而获取被测样品的组分信息,其光纤样品详细组分如表 1 所示。

掺铅主要是为了提高光纤的磁光特性,样品中铅的浓度为 0.3mol%;掺铝是为了增加掺杂离子与石英基质材料的相溶性,其浓度为 2.5mol%;掺锗是为了提高光纤纤芯折射率,其浓度为 0.2mol%。

磁光光纤的应用主要利用法拉第旋转效应原理,即指一束与外加磁场方向相同的线偏振光通过置于

磁场中的介质时,偏振面方向相对于入射光的偏振面方向角度偏转的现象。入射线偏振光可以分解为右旋圆偏振光和左旋圆偏振光,由于二者对称性不同,当偏振光在介质中传输一定距离  $L$  后,相速度  $C/n_+$  和  $C/n_-$  的不同引起相位差,其偏振面相对于入射线偏振光发生旋转即法拉第偏转,偏转角度  $\theta$  为:

$$\theta = \frac{\omega L}{2C}(n_+ - n_-)$$

(1)

其中,  $n_-$  为左旋圆偏振光的折射率,  $n_+$  为右旋圆偏振光的折射率,偏转角度与左右旋圆偏振光的折射率差成正比,并且偏转角度  $\theta$  与费尔德常数之间的关系如式(2)所示:

$$\theta = V \cdot H \cdot L$$

(2)

其中,  $V$  为费尔德(Verdet) 常数,反映材料的磁光特性灵敏度,是物质材料的固有属性,单位  $\text{rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ 。 $L$  为样品在螺线管中的有效长度,  $H$  为施加的磁场强度。根据公式(2),可以算出费尔德常数  $V$  值大小。

光纤样品的费尔德常数测量系统如图 1 所示,实验中所使用的光纤样品长度均为 1.0 m 左右。激光器中心波长为 980 nm,发出的光依次经过准直器、1/2 波片和 1/4 波片转变为圆偏振光,其消光比小于 0.5 dB,再经 1/2 波片转变为线偏振光,其消光比大于 35.0 dB。线偏振光入射到光纤样品的中心轴,螺线管与直流电源相连,为其提供磁场。本系统使用的电流强度为 2.0 A,磁场强度为 0.045 T。在磁场作用下,输出偏振光经过外部传感探头,并利用偏振分析仪(PA, PAX5710-T, America)分析偏振面偏转的角度,计算出费尔德常数。

光纤在拉制过程中易产生内应力,导致光纤自身的双折射现象明显,并影响线偏振光的偏振态测量分析。线偏振光可以分解为相互正交的两个偏振分量,其对应的折射率在传输方向上不稳定,因此传输光的瞬时偏振态发生随机变化<sup>[13-15]</sup>。当线偏振光耦合到光纤的慢(快)轴时,聚焦的输出光通过可旋转检偏器检测消光比的大小。检偏器每旋转 90°,起偏方向就与慢、快轴各重合一次,探测器可周期性地获取两个偏振分量的功率:  $P_{\text{max}}$ 、 $P_{\text{min}}$ 。通过公

表 1 掺铅石英光纤不同元素组分分析  
Table 1 Contents of different elements in the fiber

Elements	wt%	at%
Pb	2.4	0.3
Al	0.2	2.5
Ge	7.9	0.2
O	38.3	54.9
Si	51.2	42.1
Total	100.0	100.0

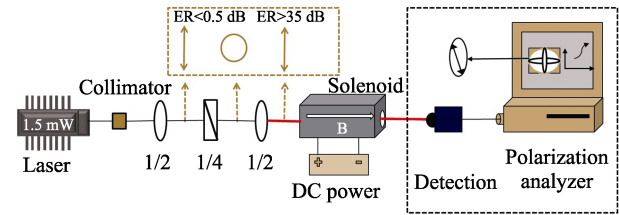


图 1 费尔德常数测量系统  
Fig. 1 Experimental setup for the measurement of Verdet constant

式(3)计算光纤消光比(ER):

$$ER = 10 \lg \left( \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) \quad (3)$$

实验中伽马射线辐照处理利用苏州大学辐照中心的  $\text{Co}^{60}$  辐射源, 辐照剂量率为 1000 Gy/h, 光纤样品接收的总剂量范围为 0.8~5.0 kGy, 所有实验均在室温条件下进行。

## 2 结果与讨论

实验使用不同中心波长的激光光源(660、808、980、1310、1550 nm)测量掺铅石英光纤的费尔德常数。费尔德常数与波长之间存在一定依赖性<sup>[16]</sup>, 如公式(4)所示:

$$V(\lambda) = \frac{A}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (4)$$

其中  $\lambda$  是入射光的波长,  $\lambda_0$  是离子跃迁的波长,  $A$  是比例因子<sup>[17]</sup>。如图 2 所示, 掺铅石英光纤在 660、808、980、1310 和 1550 nm 波长处的费尔德常数分别为 3.093、1.676、1.240、0.705、0.538 rad/(T·m), 对应波长的单模光纤(SMF)的费尔德常数分别为 2.560、1.450、1.150、0.651、0.514 rad/(T·m)。光纤的费尔德常数随着波长的减小而增加, 且掺铅石英光纤的费尔德常数高于单模光纤, 尤其是在 660 nm 波长处, 掺铅石英光纤的费尔德常数比单模光纤提高了 20.82%, 如图 2 所示。

掺铅石英光纤比单模光纤具有更好的磁光特性是因为在石英材料中掺杂了铅元素,  $\text{Pb}^{2+}$  的电子构型是  $6s^1 6p^1$ , 基态能级为  $^1S_0$ , 激发态能级有  $^3P_0$ 、 $^3P_1$ 、 $^3P_2$  和  $^1P_1$  四种原子态<sup>[9]</sup>, 如图 3 所示。法拉第效应源于塞曼分裂, 对于逆磁性掺铅材料, 激发态在磁场作用下分裂。  $\text{Pb}^{2+}$  在磁场作用下,  $SP-S^2$  电子

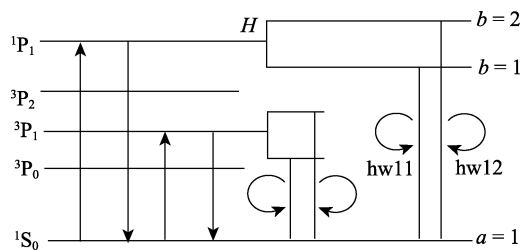


图 3 在磁场作用下  $\text{Pb}^{2+}$  离子的能级示意图

Fig. 3 Energy level diagram of  $\text{Pb}^{2+}$  at magnetic field

层发生跃迁, 由于  $^3P_0$ 、 $^3P_2$  轨道自旋禁止,  $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ ,  $^3P_1$  有自旋轨道耦合作用, 因此, 在施加磁场后, 激发态  $^1P_1$ 、 $^3P_1$  不再简并发生能级劈裂, 导致左右旋偏振光激发的电子跃迁概率不同, 即  $\hbar\omega_{11} \neq \hbar\omega_{12}$ , 引起左右旋圆偏振差  $n_+ - n_-$  增大, 从而使法拉第偏转角增大, 最终导致掺杂光纤的费尔德常数增加<sup>[18-19]</sup>。

石英光纤的固有双折射对光纤传感器的灵敏度影响较大, 而对磁光光纤而言, 费尔德常数测量精度受双折射的干扰。因此本实验将对掺铅石英光纤伽马射线辐照前后的消光比进行测量对比。掺铅石英光纤经不同辐照剂量伽马射线处理后的消光比测试系统参见文献[13], 本实验采用中心波长为 980 nm 的光源, 光纤长度为 1.0~1.2 m。为了保证测试结果的准确性, 光纤样品经伽马-射线不同辐照剂量处理后, 每个剂量的掺铅石英光纤和单模光纤的消光比分别测量五次, 如表 2 所示。对五次消光比测量取其平均值( $\bar{S}$ ), 掺铅光纤经不同辐照剂量处理后的消光比分别为 3.40(0 kGy)、3.86(0.8 kGy)、4.09(1 kGy)、4.20(1.5 kGy)、6.00(2.5 kGy)和 8.50 dB(5 kGy), 如图 4 黑线所示, 消光比随着伽马射线辐照剂量增加而增大; 而单模光纤经不同辐照剂量处理后的消光比分别为 1.90(0 kGy)、2.50(0.8 kGy)、3.20(1 kGy)、3.60(1.5 kGy)、3.62(2.5 kGy)和 5.00 dB(5 kGy), 如图 4 红线所示, 消光比也随着伽马射线辐照剂量的增加而增大。实验结果表明, 光纤样品经伽马射线辐照后, 其消光比将增大, 而且, 掺铅石英光纤的消光比增加较大。

另外, 对五次消光比的测量取均方差( $\sigma =$

$\sqrt{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}$ ,  $n=5$ )。未辐照的单模光纤和掺铅石英光纤的消光比均方差分别为 5.25% 和 14.18%, 经过伽马射线辐照后, 光纤样品的消光比均方差均大于未辐照光纤样品的消光比均方差, 且随着辐照剂量的增加, 光纤辐照样品的均方差呈现逐渐增加的趋势, 特别是在 5 kGy 剂量时, 掺铅石英光纤消光比的均方差更是高达 33.42%, 如表 2 中  $\sigma$  值所示。

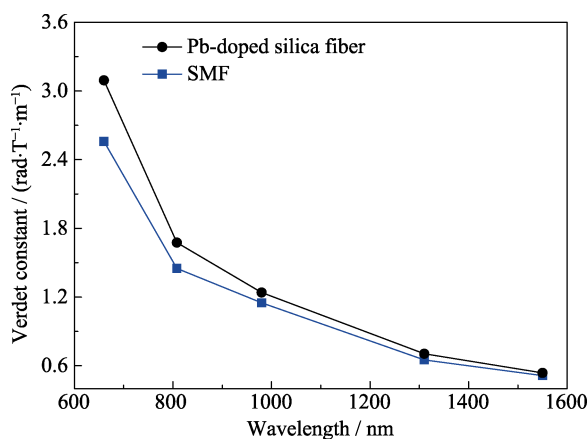


图 2 掺铅光纤和单模光纤的费尔德常数对比

Fig. 2 Verdet constants of the optical fibers

表 2 掺铅石英光纤和单模光纤经不同辐照剂量处理后的消光比对比  
Table 2 Extinction ratios of the Pb-doped silica fiber and SMF with different irradiation doses

Doses /kGy	ER of Pb-doped fiber/dB					$\bar{S}$ /dB	$\sigma$ /%	ER of SMF/dB					$\bar{S}$ /dB	$\sigma$ /%
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>			S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>		
0.0	3.25	3.62	3.45	3.24	3.44	3.40	14.18	1.95	1.90	1.93	1.80	1.92	1.90	5.25
0.8	3.85	4.10	3.78	3.34	4.21	3.86	30.20	2.58	2.40	2.52	2.55	2.45	2.50	6.60
1.0	4.30	4.35	4.25	3.80	3.75	4.09	25.96	3.10	3.23	3.25	3.22	3.20	3.20	5.35
1.5	4.45	4.08	4.27	4.10	4.10	4.20	14.27	3.66	3.45	3.65	3.59	3.65	3.60	7.90
2.5	5.95	6.25	6.10	5.90	5.80	6.00	15.81	3.65	3.61	3.50	3.65	3.69	3.62	6.51
5.0	8.20	8.12	8.39	8.90	8.89	8.50	33.42	5.10	5.12	4.95	5.08	4.75	5.00	13.84

实验结果表明, 伽马射线辐照不仅导致了掺铅石英光纤消光比的增加, 同时, 也影响掺杂光纤消光比的稳定性。

由公式(2)可知, 磁场下左右旋圆偏振光的折射率发生改变, 左右旋圆偏振光经  $L$  距离传输后的相位形成了法拉第旋转。伽马射线辐照增强了掺铅石英光纤的消光比, 导致测量的费尔德常数偏小。通过测量光纤的消光比, 排除双折射对费尔德常数的影响, 从而分析伽马射线辐照对于光纤样品磁光特性的影响。

同时, 对辐照后光纤样品的法拉第转角和费尔德常数进行测量计算, 实验中激光器中心波长选用 980 nm, 输入功率为 1.5 mW, 光纤样品长度为 1.0 m, 实验过程中保证样品摆放位置、室温和光入射角度等实验条件一致, 每一个样品重复进行五次测量, 经过不同剂量伽马射线辐照后, 测量的法拉第转角变化情况, 如图 5 中右下角的插图所示。法拉第旋转角度随辐照剂量的增加而增大。根据公式(2)可知法拉第旋转角与费尔德常数成正比例关系, 可得光纤的费尔德常数如图 5 所示。

对单模光纤而言, 经不同辐照剂量作用(0.8、1.0、1.5、2.5、5 kGy), 其费尔德常数分别为 1.403、1.428、1.505、1.517、1.530 rad/(T·m)。费尔德常数随着伽马-射线辐照剂量(0.8~1.5 kGy)的增加而增大, 而当辐照剂量在 1.5~5.0 kGy 时, 其费尔德常数增加缓慢。在低剂量辐照作用下, 单模光纤的费尔德常数增加, 可能主要来自于石英基质材料缺陷结构引起的磁光特性; 辐照剂量继续增大后, 基质材料对单模光纤的磁光特性不再影响, 导致费尔德常数增加减缓。经 5.0 kGy 剂量处理后, 费尔德常数提高了 33.04%, 其变化趋势如图 5 蓝线所示。

对掺铅石英光纤而言, 在伽马射线不同辐照剂量(0.8、1.0、1.5、2.5、5 kGy)作用下, 其费尔德常数分别为 1.505、1.530、1.556、1.658、1.760 rad/(T·m), 费尔德常数随着伽马射线辐照剂量的增加而增大,

尤其在 5 kGy 辐照剂量, 费尔德常数提高了 41.94%, 而单模光纤仅提高了 33.04%。当掺铅石英光纤经低剂量辐照(~1.5 kGy)处理后, 费尔德常数增大与单模光纤几乎一致, 其费尔德常数增大也可能来自于基质材料的辐射诱导缺陷结构引起的磁光特性; 当辐照剂量继续增大时(>1.5 kGy), 单模光纤的费尔德常数基本不变, 也许是由于石英基质材料的辐射诱导缺陷结构基本饱和, 而对掺铅石英光纤的费尔德

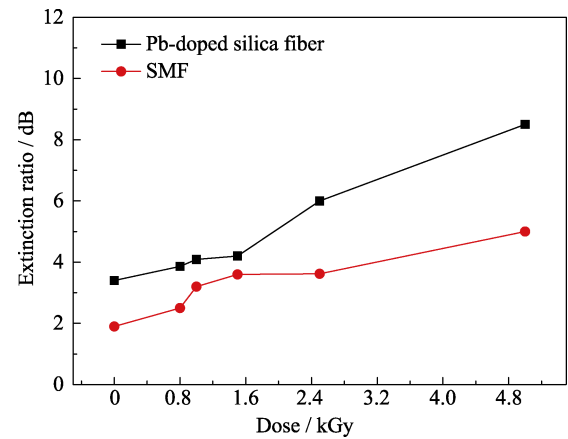


图 4 不同辐照剂量伽马射线处理样品的消光比  
Fig. 4 Extinction ratios of the Pb-doped silica fiber and SMF with different irradiation doses

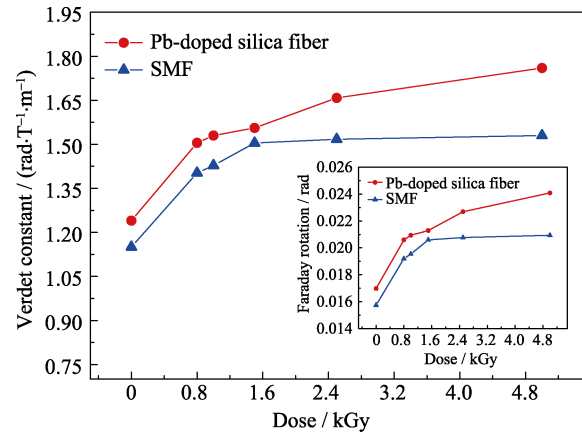


图 5 不同辐照剂量处理样品的费尔德常数  
Fig. 5 Verdet constants of samples with different doses

常数增加仍然明显,可能是由于铅离子对磁光效应发挥了主要作用,如图 5 红线所示。在高剂量伽马射线辐照作用下, $\text{Pb}^{2+}$ 的价态向低价态转变,铅离子的电子层结构可能变为  $6\text{S}^16\text{P}^2(\text{Pb}^{1+})$ 或  $6\text{S}^16\text{P}^3(\text{Pb}^0)$ ,铅离子的  $6\text{S}6\text{P}$  轨道上的单电子数增多,顺磁特性增强,因此掺铅石英光纤经伽马射线辐照处理后,在磁场作用下,其法拉第旋转角提高,从而导致掺铅光纤的费尔德常数增大。

### 3 结论

研究了伽马射线辐照对掺铅石英光纤的磁光特性影响。掺铅石英光纤辐照前,在不同波长处的费尔德常数均优于单模光纤的费尔德常数,尤其在 660 nm 波长,费尔德常数提高了 20.82%;经辐照剂量(0.8~5 kGy)处理后,掺铅石英光纤的费尔德常数随着辐照剂量的增加而增加,尤其在 5 kGy 剂量,掺铅石英光纤的费尔德常数提高了 41.94%,而单模光纤的费尔德常数经辐照处理仅增加了 33.04%,这主要是由于铅离子的作用;另外,掺铅石英光纤费尔德常数随着波长的增加而减小。研究表明,掺铅石英光纤具有良好的磁光特性,并且通过伽马射线辐照可以进一步提高掺铅石英光纤的磁光特性,以提高大电流传感器的灵敏度。

### 参考文献:

- [1] CHEN Q L, MA Q H, WANG H, *et al.* Properties and structure of Faraday rotating glasses for magneto optical current transducer. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2017, **56**(1): 1–12.
- [2] ZHANG C X, YIN H R, LIU L Y, *et al.* Typical effects of magneto-optical materials and their applications. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2008, **39**(3): 8–11.
- [3] FANG X L, YANG Q H, ZHANG H W. Magneto-optical materials and their application in magneto-optical switch. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2013, **44**(1): 68–72.
- [4] SLEZAK O, YASUHARA R, LUCIANETTI A, *et al.* Wavelength dependence of magneto-optic properties of terbium gallium garnet ceramics. *Optics Express*, 2015, **23**(10): 13641–13647.
- [5] CHEN Q, WANG H, WANG Q, *et al.* Faraday rotation influence factors in tellurite-based glass and fibers. *Applied Physics A*, 2015, **120**(3): 1001–1010.
- [6] CHEN J, WANG S, DU Y, *et al.* Temperature-dependent photoluminescence study of  $\text{Pb}^{2+}$  doped strontium iodide. *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*. 2013: 1–6.
- [7] QIU J, HIRAO K. The Faraday effect in diamagnetic glasses. *Journal of materials research*, 1998, **13**(05): 1358–1362.
- [8] ZHANG X W, LIANG J, ZHANG S Y. Study on composite rare earth iron garnet  $\text{ReYbBiIG}$  single crystal materials for high performance optical isolator. *Journal of Inorganic Materials*, 2003, **18**(4): 731–736.
- [9] PEDROSO C B, MUNIN E, VILLAVERDE A B, *et al.* Magneto-optical rotation of heavy-metal oxide glasses. *Journal of Non Crystalline Solids*, 1998, **231**(1/2): 134–142.
- [10] DONG Y H, WEN J X, PANG F F, *et al.* Optical properties of  $\text{PbS}$ -doped silica optical fiber materials based on atomic layer deposition. *Applied Surface Science*, 2014, **320**: 372–378.
- [11] I PONSODA J J M, NORIN L, YE C, *et al.* Ytterbium-doped fibers fabricated with atomic layer deposition method. *Optics Express*, 2012, **20**(22): 25085–25095.
- [12] CARRILLO-CASTILLO A, LAZARO R C A, JIMENEZ-PEREZ A, *et al.* Role of complexing agents in chemical bath deposition of lead sulfide thin films. *Materials Letters*, 2014, **121**(1): 19–21.
- [13] ZHAO S Y, WANG X H, ZHANG N W, *et al.* Polarization extinction ratio measurement in optical communication systems. *Infrared*, 2007, **28**(9): 25–28.
- [14] HAO Y Q, LI H N, YANG K, *et al.* Polarization-beam-splitter measurement of rotary angle for Faraday mirror. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(4): 626–630.
- [15] PENNINGCKX D, BECK N. Definition, meaning, and measurement of the polarization extinction ratio of fiber-based devices. *Applied Optics*, 2005, **44**(36): 7773–7779.
- [16] BU S L, YANG Y H, MA J. Wavelength dependence of Verdet constant of magneto-optic glass and corresponding problems in magneto-optical glass fiber current sensor. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2003, **34**(1): 14–16.
- [17] VILLORA E G, MOLINA P, NAKAMURA M, *et al.* Faraday rotator properties of  $\{\text{Tb}_3[\text{Sc}_{1.95}\text{Lu}_{0.05}](\text{Al}_3)\text{O}_{12}\}$ , a highly transparent terbium-garnet for visible-infrared optical isolators. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(1): 011111–1–3.
- [18] BORRELLI N F. Faraday rotation in glasses. *Journal of Chemical Physics*, 1964, **41**(41): 3289–3293.
- [19] SUITS J. Faraday and Kerr effects in magnetic compounds. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1972, **8**(1): 95–105.