

高费尔德常数掺铽石英光纤的磁光特性

肖湘杰¹,车倩倩²,卫广远¹,文建湘²

(1.深圳太辰光通信股份有限公司,广州 518040;2.上海大学 特种光纤与光接入网省部共建国家重点实验室,上海 200444)

摘要:针对掺杂石英光纤的磁光效应比较弱的特点,利用改进化学气相沉积法(MCVD)结合高温蒸发热源方法制备掺铽石英光纤,测量分析磁光光纤基本结构特性;搭建掺杂光纤的费尔德常数测量系统,研究掺铽石英光纤的磁光特性,并与单模光纤进行比较。实验结果表明:在波长为 1310nm 时,掺铽石英光纤的费尔德常数为 3.12rad/Tm,大约是单模光纤的 4 倍。

关键词:掺铽石英光纤;磁光特性;费尔德常数

中图分类号:TN818 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)03-0027-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Magneto-optical properties of Tb-doped silica optical fiber with high Verdet constant

XIAO Xiangjie¹, CHE Qianqian², WEI Guangyuan¹, WEN Jianxiang²

(1. Shenzhen Taichen Optical Communication Co., Ltd., Guangzhou 518040, China;

2. Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: For the weak magneto-optical effect of the doped silica optical fibers, in this paper, the terbium(Tb)-doped silica optical fiber is fabricated by the modified chemical vapor deposition (MCVD) with high temperature evaporation heat source method. Then, the basic structural characteristics of the optical fiber are measured and analyzed. Finally, the Verdet constant measurement system of Tb-doped quartz fibers is built, and the magneto-optical properties of Tb-doped quartz fibers are studied, and compared with single-mode fibers. The experimental results show that Verdet constant of the fiber at the wavelength of 1310nm is 3.12rad/Tm, which is about 4 times larger than that of single mode fiber.

Key words: Tb-doped silica optical fiber; magneto-optical properties; Verdet constant

0 引言

法拉第效应是磁光效应之一,即材料在与入射光束平行的磁场作用下将线偏振光的偏振平面旋转一定角度的能力。具有大法拉第效应的材料已被用作光学隔离器、光环行器和电流或磁场传感器。材料的磁光性能与费尔德常数成正比,可通过掺杂稀土氧化物(如 Tb_4O_7 、 Eu_2O_3 和 CeO_2)来提高材料的磁光性能。近年来,铽铝石榴石晶体(TAG)、铽镓石榴石晶体(TGG)应用较为广泛,主要是由于其内部掺杂了 Tb^{3+} 。

收稿日期:2018-12-05。

基金项目: 深圳市战略新兴产业发展专项资金(CXZ-Z20150401141931365)资助。

作者简介: 肖湘杰(1963-),男,博士,高级工程师。

2001 年至今就职于深圳太辰光通信股份有限公司,现担任公司副总经理兼技术总监,在光通信器件的研究制造方面具有丰富经验。



大大提高了磁光性能^[1,2]。但是,目前研究物质磁光性能主要集中在磁光玻璃、晶体、陶瓷和薄膜等材料上,对损耗小、成本低、制作简单、可靠性高和易于集成的光纤研究甚少。因此,本文针对具有强法拉第效应的高费尔德常数掺铽石英光纤展开研究^[3,4]。

1 费尔德常数概述

磁光效应是光与具有磁矩的物质共同作用的产物,且此效应主要包括法拉第效应、克尔效应和塞曼效应^[5]。在光学电流传感器领域,法拉第磁光效应的应用最广泛。本实验系统应用的正是法拉第效应,它指的是当线偏振光穿过介质时,若在介质中加一平行于光的传播方向的磁场,则光的振动面将发生旋转,振动面转过的角度称为法拉第效应旋光角^[6]。法拉第效应的实质为磁致圆双折射,即线偏振光可分解为正交

的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,由于磁光介质中存在双折射,使得左旋光和右旋光的折射率不同,光波在磁光介质中传输一段距离后两者产生相位差,从而造成光波的偏振面发生一定旋转,费尔德常数可通过法拉第偏转角求出。

本文所研究的是掺铽石英光纤,呈顺磁性,其顺磁费尔德常数随着入射光波长的增大而增大,但因为顺磁性物质的费尔德常数为负数,所以费尔德常数的绝对值大小与波长呈负相关^[7-9]。

2 掺铽石英光纤的制备与性能测试

一般情况下,光纤的制备一般主要分两步进行,第一步是制备光纤预制棒,第二步是光纤拉丝。光纤预制棒的制备包括制备芯棒和外包层沉积^[10]。制备光纤预制棒的技术有改进的化学气相沉积(MCVD)、等离子体激活化学气相沉积(PCVD)、气相轴向沉积(VAD)和棒外气相沉积(OVD)^[11,12]。

我们制备掺铽石英光纤的具体步骤如下:首先,通过MCVD技术在石英基管内壁沉积SiO₂疏松层;然后,结合高温蒸发热源在石英基管内壁的SiO₂疏松层沉积氧化铽和氧化铝材料,制备掺铽石英光纤;其次,在掺杂后的石英基管上利用MCVD技术沉积SiO₂和GeO₂芯层,再经高温玻璃化、收棒完成光纤预制棒的制备;最后,将光纤预制棒拉丝成掺铽石英光纤。

本文利用折射率测试仪(S14)测试拉制的掺铽石英光纤的折射率分布及光纤端面如图1所示。其中,纤芯直径为9.07μm,包层直径为123.01μm,纤芯和包层相对折射率差约为0.88%。

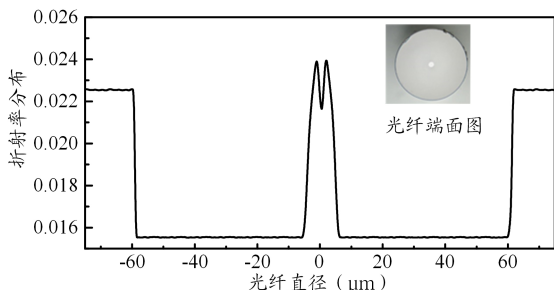


图1 掺铽石英光纤端面图与折射率分布

3 掺铽石英光纤费尔德常数测量

3.1 实验测试系统与原理

为保证测量结果的精度和测量过程偏振光的稳定性,本文建立了基于斯托克斯参数原理的光纤费

尔德常数测量系统。此测量系统由4部分组成,分别为:激光器、偏振控制部分、螺线管和偏振分析仪,如图2所示。偏振控制部分由准直器(L)、2个偏振片(P₁、P₂)和1个四分之一波片(Q)组成,此部分保证了线偏振光的线性度和光束的稳定性。首先,激光器(S1FC980、S1FC1310和S1FC1550)产生的光束由单模光纤跳线耦合进L(F220FC-980、F220FC-C和F220FC-1550),L可以使光束平行注入光纤。光束通过L后,进入P₁和Q。转动P₁,在点B处得到最大功率,经测量,此点的消光比(ER)接近35dB,C点处偏振光的ER小于0.5dB;P₂将C点处的圆偏振光转化为线偏振光,此点的线偏振光的ER大于35dB。线偏振光通过10倍透镜耦合进光纤,光纤样品放置在螺线管下。实验过程中,光纤应水平放置,避免其弯曲。保持光纤直的状态,不仅可以减少外加线性双折射,还能减少由于弯曲或外加应力引起的高阶模激发。螺线管与直流电源相连,为其提供磁场,实验使用的磁场强度为0~118mT。光纤样品的总长度为70cm,磁场下光纤样品的长度为30cm,应控制光纤样品的长度,防止光在传输过程中激发出高阶模式。最后,斯托克斯参量探测器(PAX5710)可探测到出射偏振光的实时斯托克斯参量。ER的表达式如下:

$$ER=10\lg(P_{\max}/P_{\min}) \quad (1)$$

其中, $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别表示在待测波片后旋转偏转片时测量得到的最大功率和最小功率。

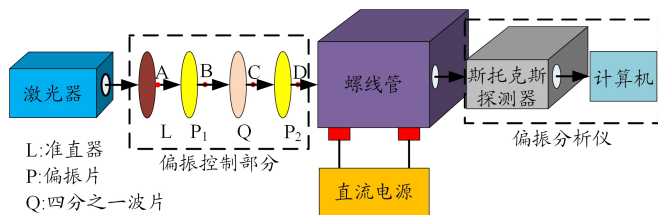


图2 掺铽石英光纤费尔德常数的测量系统^[13]

斯托克斯探测器以50次/s的采样频率对线偏振光的偏振态进行采样,加磁场前后,线偏振光的偏振角度发生阶跃变化,通过计算加磁场前后偏振角度的平均值,得到磁场作用下线偏振光偏振片的偏转角度,进而计算光纤费尔德常数。

3.2 实验结果与讨论

当入射光波长为1310nm时,掺铽石英光纤在磁场强度为22.5mT、45.0mT、67.5mT、90.0mT和112.5mT处的法拉第偏转角分别为1.21°、2.39°、3.63°、4.85°和6.03°,而单模光纤在相应磁场强度下的法拉第偏转角

分别为 0.30° 、 0.62° 、 0.95° 、 1.24° 和 1.55° , 如表 1 所示。

从表 1 可看出, 在各个磁场强度下掺铽石英光纤的偏转角度均大于单模光纤, 且随着磁场强度的增加, 光纤样品偏转角均增大, 如图 3 所示。当偏振光波长为 1310nm 时, 磁场强度为 112.5mT 。在这种情况下, 光纤在磁场下的有效作用长度为 30cm 时, 掺铽石英光纤和单模光纤在加磁场前后的法拉第偏转角的变化如图 4 所示, 分别为 6.03° 、 1.55° 。根据 $V=BL/\theta$ (其中, B 是磁场强度, L 是光在磁场介质下的长度, θ 为法拉第偏转角, V 是待求解的费尔德常数) 计算出掺铽石英光纤和单模光纤的费尔德常数分别为 3.12rad/Tm

表 1 掺铽石英光纤和单模石英光纤偏转角和磁场强度的关系

磁场强度 (mT)	单模光纤 偏转角($^\circ$)	掺铽石英光纤 偏转角($^\circ$)
22.5	0.30	1.21
45.0	0.62	2.39
67.5	0.95	3.63
90.0	1.24	4.85
112.5	1.55	6.03

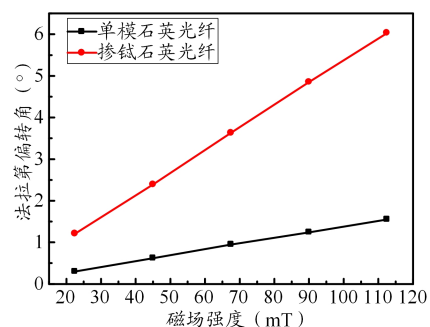


图 3 不同磁场强度下单模光纤和掺铽石英光纤的偏转角($\lambda=1310\text{nm}$)

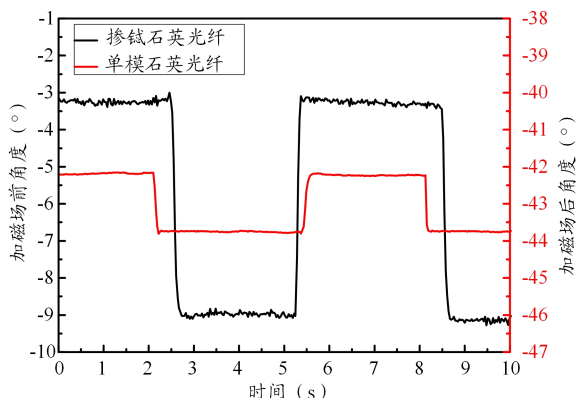


图 4 掺铽石英光纤和单模石英光纤在加磁场前后的偏转角变化对比图

和 0.80rad/Tm , 掺铽石英光纤的费尔德常数大约是单模光纤的 4 倍。掺铽石英光纤具有高费尔德常数是因为光纤中掺杂了稀土元素铽, 而铽的磁性主要与其未充满的 $4f$ 壳层有关, 而且光纤基质材料的结构也影响着磁性变化。在磁场中, 物质中分子的未成对电子的固有磁矩与磁场方向一致, 故呈顺磁性。相对于逆磁性物

质, 顺磁性物质费尔德常数绝对值明显大于逆磁性物质, 其磁光效应灵敏度更高, 应用价值也相应更高更广泛。

4 结束语

本文利用改进 MCVD 结合高温蒸发热源方法, 在石英基质材料内实现稀土铽元素的掺杂, 制备出掺铽石英光纤, 测量其费尔德常数。同时, 我们搭建了掺杂光纤的费尔德常数测量系统, 在波长为 1310nm 时, 计算出单模光纤的费尔德常数为 0.80rad/Tm , 而掺铽石英光纤为 3.12rad/Tm 。制备的掺铽石英光纤具有良好的磁光特性, 通过掺杂铽离子可明显提高石英光纤的磁光特性, 其在大电流光纤传感中具有非常重要的实际应用价值。

参考文献:

- [1] YASUHARA R, TOKITA S, KAWANAKA J, et al. Cryogenic temperature characteristics of Verdet constant on terbium gallium garnet ceramics [J]. Opt. Express, 2007, 15(18): 11255–11261.
- [2] SUN L, JIANG S, MARCIANTE J R. Compact all-fiber optical Faraday components using 65-wt%-terbium-doped fiber with a record Verdet constant of $-32\text{rad}/(\text{Tm})$ [J]. Opt. Express, 2010, 18(12): 12191–12196.
- [3] BERGER S, RUBINSTEIN C, KURKJIAN C, et al. Faraday rotation of rare-earth (III) phosphate glasses [J]. Journal of Applied Physics, 1964, 35(8): 2338–2340.
- [4] BINNEMANS K, GÖRLLERWALRAND C. Magnetic circular dichroism and optical absorption spectra of Eu^{3+} in $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG) [J]. Journal of the Chemical Society Faraday Transactions, 1996, 92(13): 2487–2493.
- [5] MALEWSKI R. High-Voltage Current Transformers With Optical Signal Transmission [J]. Optical Engineering, 1981, 20(1): 54–57.
- [6] PETRICEVIC S J, MIHAILOVIC P M. Compensation of Verdet Constant Temperature Dependence by Crystal Core Temperature Measurement [J]. Sensors (Basel), 2016, 16(10): 1627–1633.
- [7] RASHLEIGH S C. Measurement of fiber birefringence by wavelength scanning: effect of dispersion [J]. Opt. Lett., 1983, 8(6): 336–338.
- [8] TAN C Z, ARNDT J. Faraday effect in silica glasses [J]. Physica B Condensed Matter, 1997, 23(1): 1–7.
- [9] XU Y, DUAN M. Theory of Faraday rotation and susceptibility of rare-earth trifluorides [J]. Physical Review B Condensed Matter, 1992, 46(18): 11636–11641.
- [10] 查健江. 光纤制备中的外汽相沉积工艺研究 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2004(4): 14–19.
- [11] 覃惠. 光纤制造技术的进展和趋势 [J]. 武汉纺织大学学报, 2005, 18(11): 17–19.
- [12] RITALA M, LESKEL M. Atomic layer epitaxy - a valuable tool for nanotechnology [J]. Nanotechnology, 1999, 10(1): 19–24.
- [13] GUO Q, WEN J, HUANG Y, et al. Magneto-optical properties and measurement of the novel doping silica optical fibers [J]. Measurement, 2018, 127: 63–67.