

染料掺杂液晶可调谐光纤荧光光源的研究

吕月兰 尹向宝 杨月 刘永军 苑立波

Tuning characteristics of fluorescent light source by dye-doped liquid crystal filled hollow fiber

Lü Yue-Lan Yin Xiang-Bao Yang Yue Liu Yong-Jun Yuan Li-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 154205 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.154205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大变焦范围电调谐液晶变焦透镜的研究

Liquid crystal lens with large-range electrically controllable variable focal length

物理学报.2015, 64(18): 184212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184212>

紧聚焦飞秒脉冲与石英玻璃相互作用过程中的电子动量弛豫时间研究

Analysis of electron momentum relaxation time in fused silica using a tightly focused femtosecond laser pulse

物理学报.2014, 63(7): 074209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074209>

基于液晶和DSP的强光局部选通智能网络摄像系统研究

Study on the partial gating smart network camera for controlling strong light intensity based on DSP and liquid crystal

物理学报.2013, 62(21): 214210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214210>

楔形盒染料掺杂胆甾相液晶激光器研究

Investigation of the laser action in a dye-doped cholesteric liquid crystal wedge cell

物理学报.2013, 62(4): 044219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044219>

四光束干涉单次曝光构造含平面缺陷三维周期性微纳结构

Fabricating three-dimensional periodic micro-structure with planar defects via a single exposure

物理学报.2012, 61(17): 174211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.174211>

染料掺杂液晶可调谐光纤荧光光源的研究*

吕月兰¹⁾ 尹向宝¹⁾²⁾ 杨月¹⁾ 刘永军^{1)†} 苑立波¹⁾

1)(哈尔滨工程大学, 纤维集成光学教育部重点实验室, 哈尔滨 150001)

2)(黑龙江科技大学理学院, 哈尔滨 150022)

(2017年2月4日收到; 2017年4月7日收到修改稿)

本文提出了染料掺杂液晶填充空心光纤构造荧光可调谐光源. 基于染料分子能级结构理论分析 B4400 荧光光谱依赖温度的变化特性, 采用脉宽 8 ns, 波长为 532 nm YAG 倍频脉冲激光器抽运, 向列相液晶作基体, 实验分析染料 B4400 掺杂液晶填充空心光纤荧光光谱选择性荧光放大规律及温度调谐特性. 结果表明: 通过控制染料浓度可控制荧光输出功率水平; 当温度升高时, 中心波长发生红移, 中心波长调谐范围为 590—605 nm; 荧光谱宽呈单调展宽, 调制范围为 228—236 nm; 染料掺杂液晶填充空心光纤荧光光源可实现一定范围内的温度调谐.

关键词: 向列相液晶, 荧光染料, 温度调谐, 荧光光源

PACS: 42.70.Df, 42.81.Wg

DOI: 10.7498/aps.66.154205

1 引言

宽带连续荧光光源在光纤传感器^[1]、探测器^[2]和调制器^[3,4]等领域的应用非常广泛. 目前常用的宽带光源是超发光二极管(super luminescent diode, SLD), 但 SLD 的空间相干性较差, 使得其与单模光纤耦合时有损耗. 与 SLD 相比, 荧光光纤光源(fluorescent fiber light source, FLS)具有宽的荧光输出光谱、使用寿命长及价格低廉等优点, 在光纤通信、医学成像等方面有潜在的应用.

在 FLS 中, 可用不同材料填充空心光纤空气孔, 以此调节空心光纤的光学传输特性, 拓宽光源的调谐范围^[5-7]. 由于液晶分子具有光学各向异性, 其折射率具有随温度、电磁场等外场变化的特性^[8-10], 成为近年来备受关注的填充材料. 将染料掺杂液晶填充到空心光纤空气孔中, 通过调节温度就可以很容易地控制荧光空心光纤光源的传输特性. 目前研究较多的是用液晶填充光子晶体光纤(PCF)包层空气孔, 实现光纤的温控调谐. 2013

年, Marzena 等^[11]研究设计了填充液晶的温控可调 PCF 级联滤波器, 实验得到了其光子带隙随温度变化的关系; 2015 年, 乌日娜等^[12]将染料掺杂液晶填充全反射型 PCF 中, 室温下, 在 600—650 nm 范围内出现多个线宽 0.2—0.3 nm 随机激光辐射峰, 在不同温度的液晶中呈现出不同的折射率分布, 当温度升高至清亮点温度时辐射峰消失. 但上述研究大多是针对填充某一种液晶的 PCF, 而 PCF 制作工艺复杂、成本较高, 空心光纤则制备简单、成本低, 且鲜见关于染料掺杂液晶填充空心光纤传输特性的实验研究. 本文提出利用染料掺杂液晶填充空心光纤制作可调谐荧光光源, 并研究其温度调谐可行性, 研究结果对于开发基于染料掺杂液晶填充空心光纤荧光可调谐光源有理论指导意义.

2 染料掺杂光纤荧光光源发光机理

荧光染料 B4400 具有很高的量子效率和较小的三重态吸收, 荧光染料 B4400 分子结构如图 1 所示, 其能级图如图 2 所示. 从图 2 可以看出

* 国家自然科学基金(批准号: U1531102, 61107059, 61290314)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn

B4400分子的能级是一种宽带能级结构^[13],由单态(S_0, S_1, S_2)和三重态(T_1, T_2)两部分组成,由于三重态荧光猝灭的影响,本文选用纳秒级的脉冲激光器作为抽运源.由图2可见,B4400分子每一个能态上存在大量的转振能级,每一个能态都具有很宽的带宽,因此发射谱具有宽带可调谐特性^[14],可以通过改变某些外界参数,比如磁场、温度等,使得激光跃迁能级发生移动.2007年,Yu等^[15]研究了荧光染料掺杂脱氧核糖核酸-十六烷基三甲基胺(DNA-CTMA)薄膜结构的光致发光和激光特性,发现染料掺杂DNA-CTMA薄膜放大自发辐射的峰值位置产生了红移.2014年,詹永波等^[16]研究了染料掺杂聚合物光纤的荧光发射,发现染料掺杂的聚合物光纤能够实现较高效率的光谱下转换,如果将其与大芯径的石英玻璃光纤耦合,就可以对石英玻璃光纤所传输的光进行有效的光谱调控.

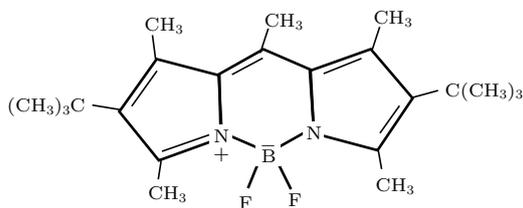


图1 荧光染料 B4400 分子结构图

Fig. 1. Structure of B4400 molecular.

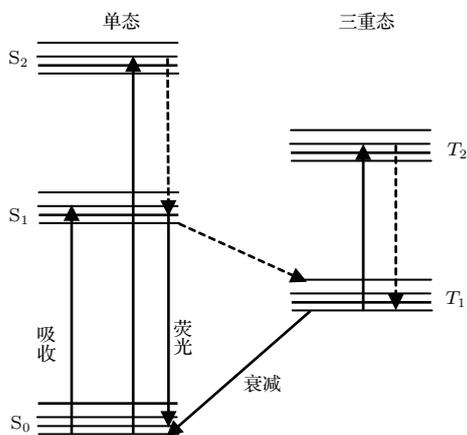


图2 荧光染料 B4400 分子能级结构图

Fig. 2. Molecular energy level structure of B4400.

3 实验结果与讨论

3.1 样品制备

染料掺杂液晶填充空心光纤荧光光源样品的制备选用芯径 $50\ \mu\text{m}$ 、涂覆层直径 $125\ \mu\text{m}$ 的空心光纤,空心光纤剖面图如图3所示.实验所用的

液晶由北京八亿时空液晶科技股份有限公司生产的向列相液晶 BHR33200, $20\ ^\circ\text{C}$ 常温下波长在 $589.3\ \text{nm}$ 处,寻常光折射率 $n_o = 1.522$,非寻常光折射率 $n_e = 1.692$,清亮点温度为 $61.2\ ^\circ\text{C}$;荧光染料选用东京化成工业株式会社提供的[[[4-tert-Butyl-3, 5-dimethyl-1H-pyrrol-2-yl) (4-tert-butyl-3, 5-dimethyl-2H-pyrrol-2-ylidene) methyl] methane] (difluoroborane) B4400型染料和美国 Exciton 公司提供的(4-二氰基亚甲基-2-甲基-6-(4-二甲基氨基苯乙烯基)-4H-吡喃) DCM型染料.由于液晶的填充,使空心光纤有较大损耗,采用功率密度较高的 $532\ \text{nm}$ 脉冲激光抽运,测量得到染料掺杂液晶填充空心光纤损耗值为 $80\ \text{dB/km}$,其传输模式为多模传输,实现荧光的效率为 50% .实验所用激光器为波长 $1064\ \text{nm}$ 、功率 $80\ \text{mW}$ 的超连续激光器和北京镭宝光电公司提供的激光脉冲宽度 $8\ \text{ns}$ 、重复频率 $1\ \text{Hz}$ 、波长 $532\ \text{nm}$ 、功率 $10\ \text{mW}$ 的 Dawa-100 Nd:YAG 倍频脉冲激光器,利用海洋光学提供测量精度 $0.8\ \text{nm}$ 的光纤光谱仪进行透射谱及发射谱的测试.实验装置如图4所示.

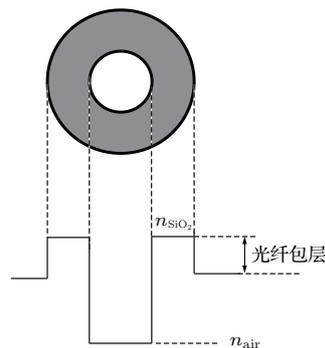


图3 空心光纤剖面图

Fig. 3. Cross section of the hollow fiber.

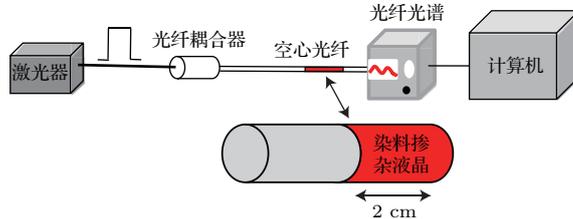


图4 实验装置图

Fig. 4. Experimental setup for measuring spectra.

在激光进入染料掺杂空心光纤的过程中,随着染料浓度的增大,染料分子增多,荧光加强,光强放大倍数增大;但是当掺杂浓度增加到一定程度时,由于荧光再吸收作用,会引起荧光浓度猝灭效

应, 不利于产生荧光, 导致光强放大倍数减小^[17]. 为确定掺杂染料的最佳浓度, 利用超连续激光器测量空心光子晶体光纤(HC-PCF)中向列相液晶掺杂不同B4400浓度的透射谱, 如图5所示. 实验表明, 通过HC-PCF透射谱可以得到对于质量浓度为B4400:BHR33200 = 1 wt%的溶液光强放大倍数最大, 表明1 wt%为掺杂染料最佳浓度.

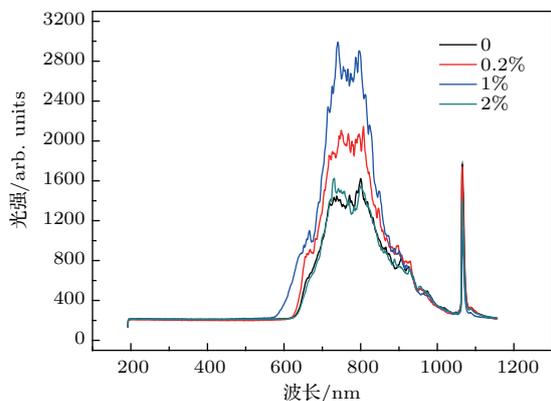


图5 (网刊彩色) B4400不同浓度的辐射谱
Fig. 5. (color online) The radiation spectra of B4400 dependent on concentrations.

3.2 温度对染料掺杂液晶填充空心光纤荧光光谱特性的影响

利用YAG倍频脉冲激光器抽运测得2 cm的荧光染料B4400掺杂液晶填充空心光纤在不同温度时的透射谱宽(半高谱宽), 如图6所示. 由于液晶在温度变化时具有折射率可调谐特性, 可以看出当温度由40 °C升到85 °C时, 染料掺杂液晶填充空心光纤荧光光源半高谱宽先展宽后变窄, 谱宽

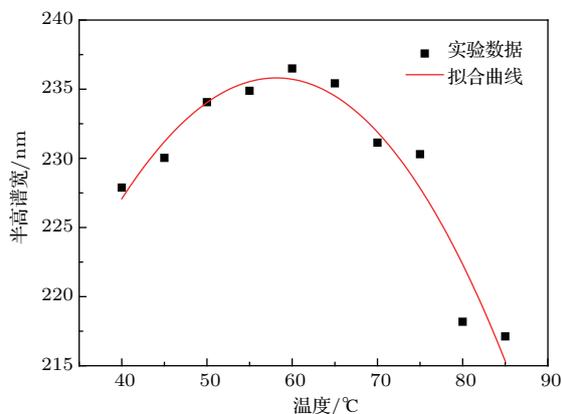


图6 温度对染料B4400掺杂液晶填充空心光纤半高谱宽的影响
Fig. 6. Temperature dependent half tall spectral width of hollow fiber with dye B4400 doped liquid crystal.

调制范围为9 nm(液晶各向异性), 即227—236 nm. 这是由于液晶折射率 $\Delta n = n_o - n_e$ 的各向异性, 随着温度升高, 寻常光折射率 n_o 增大, 非常光折射率 n_e 减小, 因此两者折射率之差 Δn 减小^[18], 使得空心光纤纤芯内液晶与空心区域之间的折射率差减小, 导致光纤传输损耗增大, 透射谱宽呈单调增大, 当靠近清亮点温度时发生突变, 液晶各向异性消失, 表现为各向同性折射率, 散射损耗比各向异性时小, 所以出现样品谱宽的骤减, 同时荧光相对辐射光强增加, 如图7所示.

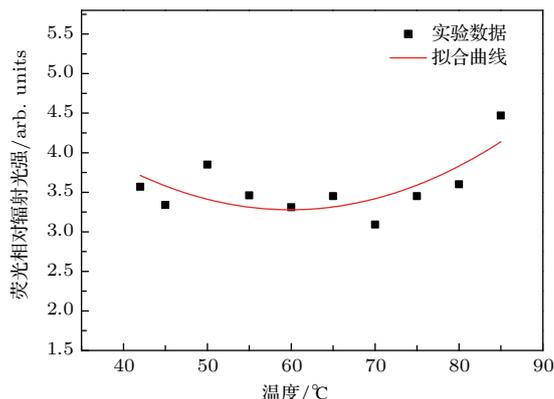


图7 温度对染料B4400掺杂液晶填充空心光纤荧光相对辐射光强的影响
Fig. 7. Temperature dependent fluorescence intensity of hollow fiber with dye B4400 doped liquid crystal.

3.3 温度对染料掺杂液晶填充空心光纤中心波长的影响

液晶填充空心光纤双折射与温度的关系为 $\Delta n_{\text{相对}} = \Delta n_{\text{SiO}_2} - \Delta n_0(1 - T/T_C)^\beta$, 其中 Δn_0 为液晶0 K时的折射率, Δn_{SiO_2} 为光纤包层折射率, T_C 为清亮点温度, β 为材料常数^[19,20]. 用matlab模拟给出液晶掺杂染料B4400空心光纤在升温时的相对折射率, 如图8所示. 可以看出随着温度从室温升高到80 °C, 由于液晶有效折射率的减小, 染料B4400掺杂液晶填充空心光纤相对折射率 $\Delta n_{\text{相对}}$ 先呈线性增加后呈指数快速增加; 当达到清亮点61.9 °C后, $\Delta n_{\text{相对}}$ 单调缓慢减小, 这是由于向列相液晶光学特性由各向异性转变为各向同性, 液晶散射增强引起的. 因此, 在实验中可以看到, 随温度升高, 中心波长先“红移”, 当达到清亮点后, 中心波长发生“蓝移”, 但并没有明显变化, 这说明超过清亮点温度之后, 液晶的光吸收损耗减少, 但光散射损耗增加^[21], 液晶材料的折射率不再随着温度发生太大变化, 使得中心波长向短波移动, 如

图9所示, 相应的发射光谱见图9内插图.

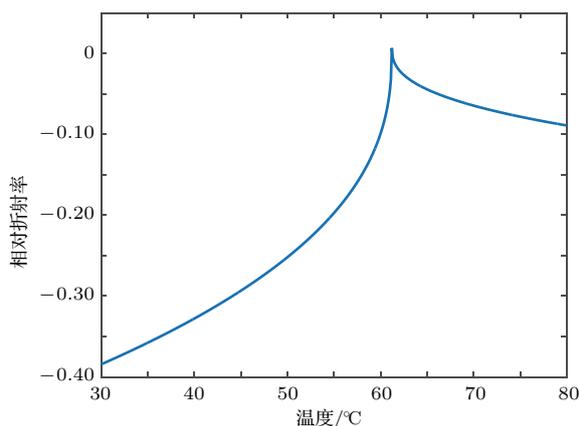


图8 温度对染料 B4400 掺杂液晶填充空心光纤相对折射率的影响

Fig. 8. Temperature dependent relative refractive index of hollow fiber with dye B4400 doped liquid crystal.

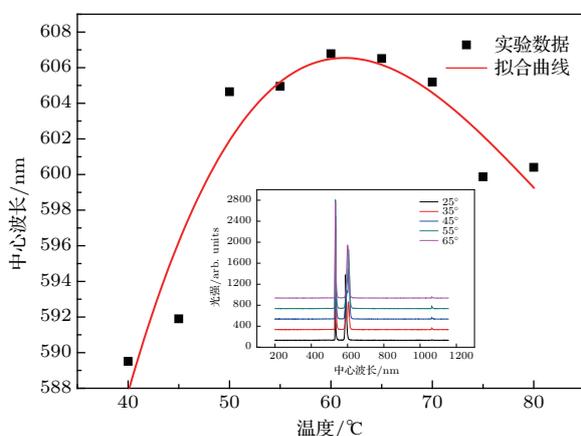


图9 (网刊彩色) 温度对染料 B4400 掺杂液晶空心光纤中心波长的影响

Fig. 9. (color online) Temperature dependent center wavelength of hollow fiber with dye B4400 doped liquid crystal.

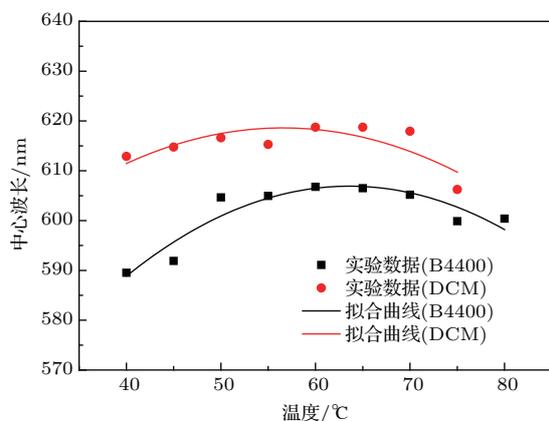


图10 (网刊彩色) 空心光纤中液晶分别掺杂两种染料时, 温度对其中心波长的影响

Fig. 10. (color online) Temperature dependent center wavelength of hollow fiber with liquid crystal doped two kinds of dye respectively.

相应地, 我们也测量了空心光纤中液晶分别掺杂两种荧光染料时的温度调谐, 发现温度对其中心波长的调谐作用一致, 如图10所示. 在60 °C处出现样品谱宽的骤减(如图6所示), 中心波长在60 °C处出现“蓝移”. 由于局限在中心波长调谐范围以及谱宽调制范围较窄, 需要进一步研究.

4 结 论

本文理论和实验研究了染料掺杂液晶填充空心光纤的荧光光源功率输出及温度调谐特性. 获得该结构荧光光源在不同荧光掺杂浓度下的光强放大倍数, 确定荧光光强在掺杂浓度为1 wt%时输出最高, 说明荧光输出具有选择性放大作用; 中心波长随温度升高发生红移, 同时荧光谱宽随温度不断展宽, 说明具有一定的调谐范围. 本研究对开发基于染料掺杂液晶填充空心光纤温度调谐荧光光源、放大器以及光开关等器件, 都具有积极理论指导意义.

参考文献

- [1] Miao Y P, Liu B, Zhang K L, Liu Y, Zhang H 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 021103
- [2] Yan L S, Yi A, Pan W 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 1391
- [3] Zhou F, Hao R, Jin X F, Zhang X M, Li E P 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 1867
- [4] Ren C Y, Shi H X, Ai Y B, Yin X B 2016 *Chin. Phys. B* **25** 094218
- [5] Malmström M, Margulis W, Tarasenko O, Pasiskevicius V, Laurell F 2012 *Opt. Express* **20** 2905
- [6] Lee S, Park J, Jeong Y, Jung H 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 4919
- [7] Yu G Y, Song Y F, Wang Y, He X, Liu Y Q, Liu W L, Yang Y Q 2011 *Chem. Phys. Lett.* **517** 242
- [8] Qiu X Q, Li X T, Niu K, Lee S Y 2011 *J. Raman Spectrosc.* **42** 563
- [9] Qian W W, Zhao C L, He S L, Dong X Y, Zhang S Q, Zhang Z X, Jin S Z, Gou J T, Wei H F 2011 *Opt. Lett.* **36** 1548
- [10] Wang D D, Wang L L, Li D D 2011 *Acta Phys. Sin.* **61** 128101 (in Chinese) [王豆豆, 王丽莉, 李冬冬 2011 物理学报 **61** 128101]
- [11] Marzena M T, Sławomir E, Tomasz R W 2013 *Photon. Lett.* **5** 14
- [12] Wu R N, Wu X J, Wu J, Dai Q 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0223003 (in Chinese) [乌日娜, 郭小娇, 吴杰, 岱钦 2015 光学学报 **35** 0223003]

- [13] Fan R W, Liu W, Li X H, Zhang X L, Xia Y Q, Chen D Y 2007 *Infrared and Laser Eng.* **36** 50 (in Chinese) [樊荣伟, 刘维, 李晓晖, 张秀丽, 夏元钦, 陈德应 2007 红外与激光工程 **36** 50]
- [14] Johnson S G, Joannopoulos J D 2001 *Opt. Express* **8** 173
- [15] Yu Z, Li W, Hagen J A, Zhou Y, Klotzkin D 2007 *Appl. Opt.* **46** 1507
- [16] Zhan Y B, He L, Mo J Y, Li R H 2014 *Chin. J. Lumin.* **35** 269 (in Chinese) [詹永波, 何磊, 磨俊宇, 李润华 2014 发光学报 **35** 269]
- [17] Ma M X, Zhu D C, Tu M J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1526 (in Chinese) [马明星, 朱达川, 涂铭旌 2009 物理学报 **58** 1526]
- [18] Wang J L, Du M Q, Zhang L L, Liu Y J, Sun W M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 120702 (in Chinese) [王家璐, 杜木清, 张伶俐, 刘永军, 孙伟民 2015 物理学报 **64** 120702]
- [19] Ozbek H, Ustunel S, Kutlu E, Cetinkaya M C 2014 *J. Molecular Liquids* **199** 275
- [20] Bi W H, Wang Y Y, Fu G W, Wang X Y, Li C L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 047801 (in Chinese) [毕卫红, 王圆圆, 付广伟, 王晓愚, 李彩丽 2016 物理学报 **65** 047801]
- [21] Ma H, Wang J Z, Abakar A M A, Yang M C, Zhao X, Liu L H 2016 *Laser Optoelectron. Prog.* **5** 213 (in Chinese) [马洪虎, 王金忠, Abakar A M A, 杨明超, 赵霞, 刘礼华 2016 激光与光电子学进展 **5** 213]

Tuning characteristics of fluorescent light source by dye-doped liquid crystal filled hollow fiber*

Lü Yue-Lan¹⁾ Yin Xiang-Bao¹⁾²⁾ Yang Yue¹⁾ Liu Yong-Jun^{1)†} Yuan Li-Bo¹⁾

1) (Key Lab of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

2) (College of Science, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

(Received 4 February 2017; revised manuscript received 7 April 2017)

Abstract

The fluorescent fiber light source has been widely used in many areas, such as optical fiber communication and medical imaging, owing to its low cost and wide optical spectrum. The temperature-sensitive refractive index of liquid crystal makes it a suitable filling material used in the fluorescent light source. The existing work has investigated the filling of liquid crystal into the air holes in cladding of photonic crystal fiber. However, the photonic crystal fiber has the disadvantages of complicated craft and high cost. As is well known, the hollow fiber has the advantages of the easy preparation and low cost, but the filling of liquid crystal into the hollow fiber of fluorescent light source is rarely investigated. In this paper, we investigate that a tunable hollow fiber of fluorescent light source is filled with dye doped liquid crystals. The transmission characteristics of the fluorescent light source are theoretically analyzed. The variation in property of the B4400 fluorescent spectrum is numerically discussed with the dye molecule energy level structure theory. The numerical simulation results show that the relative refractive index is dependent on temperature. It first increases linearly with the increase of temperature and then exponentially increases rapidly till clearing point 61.9 C, finally decreases slowly to a saturated value. In order to find an optimum doping concentration, the doping-concentration-dependent fluorescence output intensity is analyzed by using the super continuum spectrum of YAG pump with a wavelength of 1064 nm. The fluorescence light intensities are amplified at three different selective dye doping concentrations, namely 0.2 wt%, 1 wt% and 2 wt% in the experiment, respectively. The highest output is obtained at the 1 wt% doping concentration, which verifies the selective fluorescence amplification property of the fluorescent source. It is also demonstrated that the transmission characteristics and the tunable range of the liquid crystal filled fluorescent light source can be adjusted by modulating the temperature in experiment. And the temperature-dependence of the fluorescence source is experimentally demonstrated by using the 1 wt% doping concentration dye-doped liquid crystal. Using a pulsed YAG pump with a wavelength of 532 nm, tunable characteristics of the fluorescent light source composed of a dye-doped liquid crystal filled hollow fiber, are studied and show that the central wavelength increases from 590 nm to 605 nm and the spectral width broadens from 228 nm to 236 nm with the increase of the temperature. The proposed fluorescent light source can be controlled by adjusting the temperature within limits. These findings will give a guidance for the practical applications of the dye doped liquid crystal based fluorescent light source, and offer a theoretical foundation for the further study of the liquid crystal filled fluorescent fiber light source.

Keywords: liquid crystal, fluorescent dye, temperature tuning, fluorescent light source

PACS: 42.70.Df, 42.81.Wg

DOI: 10.7498/aps.66.154205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1531102, 61107059, 61290314).

† Corresponding author. E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn