

光子晶体液晶光纤随机激光研究

乌日娜 邬小娇 吴杰 岱钦*

沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159

摘要 将掺杂激光染料DCM的手性向列相液晶注入全反射型光子晶体光纤微孔中,研究了激光辐射行为。采用固体Nd:YAG倍频532 nm激光作为抽运光,室温下,在各个方向上均能探测到随机激光辐射谱。当抽运光的入射方向与样品轴向成30°,光纤光谱仪沿样品轴向方向以及垂直样品轴向方向探测时,在600~650 nm范围内不同波段测得多个离散的尖锐随机激光辐射峰,其线宽约为0.2~0.3 nm。当加热样品至各向同性温度时,激光辐射峰消失。光子晶体光纤的微孔中,作为较强散射介质的手性向列相液晶在不同温度下呈现不同分子取向和折射率分布,这是随机激光产生和关闭的根本原因。

关键词 光学器件;光子晶体液晶光纤;随机激光;染料掺杂;多重散射

中图分类号 TN241; O753+.2

文献标识码 A

doi: 103788/AOS201535.0223003

Research of Laser Emission in the Photonic Liquid Crystal Fiber

Wu Rina Wu Xiaojiao Wu Jie Dai Qin

School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China

Abstract The random laser radiation is researched by filling the air hole of photonic crystal fiber with dye-doped DCM chiral nematic liquid crystal. At room temperature, by using doubled frequency 532 nm Nd:YAG laser as optical excitation, the emission spectrum of random laser can be detected in all directions. When the angle between the incident direction of the laser and the axial direction of the sample is 30°, the random laser radiation is obtained in the horizontal direction and vertical direction and a plurality of discrete and sharp random laser radiation peak can be measured in the range from 600 nm to 650 nm, with the line-width of multi-mode peaks less than 0.3 nm. When the sample is heated up to the isotropic temperature, the laser radiation peaks disappear. Among the photonic crystal fiber, the chiral nematic liquid crystal as a strong scattering medium exhibits different molecular orientations and refractive index distributions at various temperatures, which is the fundamental cause of the random laser generation and disappearance.

Key words optical devices; photonic crystal liquid fiber; random laser; dye doped; multiple scattering

OCIS codes 230.3720; 060.5295; 140.2050; 140.3600; 290.4210

1 引言

近年来,随机激光器作为一种新型的微腔激光器,在微尺寸光源和生物医药领域有广阔的应用前景,因而备受关注。随机激光器中,激光的受激放大是由随机介质对光波的无规则多重散射提供的相干反馈获得,因此无需外加谐振腔,具有制备简单、体积小等优点^[1]。液晶是一种强散射介质,具有光学各向异性。利用液晶的光学特性在外场下(电场、磁场、温度等)的可调制特性,能够获得可调制的随机激光器。并且制作

收稿日期:2014-09-22;收到修改稿日期:2014-10-20

基金项目:国家自然科学基金(61378075)、辽宁省教育厅项目(L2012070)、辽宁省高校杰出青年学者成长计划(LJQ2013022)、沈阳理工大学激光与光信息辽宁省重点实验室开放基金

作者简介:乌日娜(1978—),女,博士,副教授,主要从事光电功能材料及器件方面的研究。

E-mail: wurina2007@126.com

*通信联系人。E-mail: daiqin2003@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

液晶器件的工艺已经比较成熟,使随机激光器的制备更加简便。染料掺杂向列相液晶器件中实现外场下可调制的随机激光的研究报道较多^[2-4]。

光子晶体光纤是一种包层含有大量空气孔的微孔光纤,可以向微孔中填充对外界场敏感的物质来改变光纤导光特性^[5-7]。相比普通光纤,全反射型光子晶体光纤对光具有更强的控制作用,导光机制为全内反射。它具有传统光纤无法实现的诸多优越特性,如无截止波长单模传输特性、可调色散、高双折射、极强的非线性特性等。手性向列相液晶与向列相液晶比较,由于其螺旋周期排列结构,将能够提供更强的光散射。

本文将掺有激光染料DCM的手性向列相液晶注入全反射型光子晶体光纤微孔中,获得了随机激光辐射。在Nd:YAG倍频532 nm波长激光的抽运下,测量分析了光纤轴向方向、垂直光纤轴向方向的辐射光谱以及不同温度下光纤轴向方向的辐射光谱,分析讨论了随机激光产生的机制,为随机激光器的研究提供了参考。

2 实 验

将向列相液晶TEB30A、手性剂S-811、激光染料DCM[4-(二氰基来甲基)-2-甲基-6-(4-二甲基氨基苯乙烯基)-4H-吡喃]分别按68.6%、29.4%、2%的质量百分比混合均匀,制成染料掺杂手性向列相液晶。利用毛细作用注入到2 cm长的光子晶体光纤的微孔中,完成样品制备。向列相液晶TEB30A相变的温度是晶体(-10 ℃)一向列相-(63 ℃)各向同性。所选取的光纤为武汉长盈通光电有限公司提供的单一材料高纯二氧化硅构成的全反射型光子晶体光纤。利用南京麦迪森仪器有限公司(OLYMPUS)制造的系统工业显微镜BX51观察光纤微孔中注入液晶的情况。采用白光光源,测量样品的透射谱。实验及探测装置示意图如图1所示。溴钨灯发出的光经准直透镜成平行光束,光束经过微调耦合进入被测光纤端面,另一端面进行探测。激光辐射谱的测量采用532 nm Nd:YAG脉冲固体激光器作为抽运,光谱仪采用多通道光纤光谱仪(Avantes)。抽运光由光纤的侧面入射,与光纤的轴向约成30°角,进而探测光纤轴向方向(即端面)以及垂直光纤轴向方向(即侧面)出射的激光辐射谱。

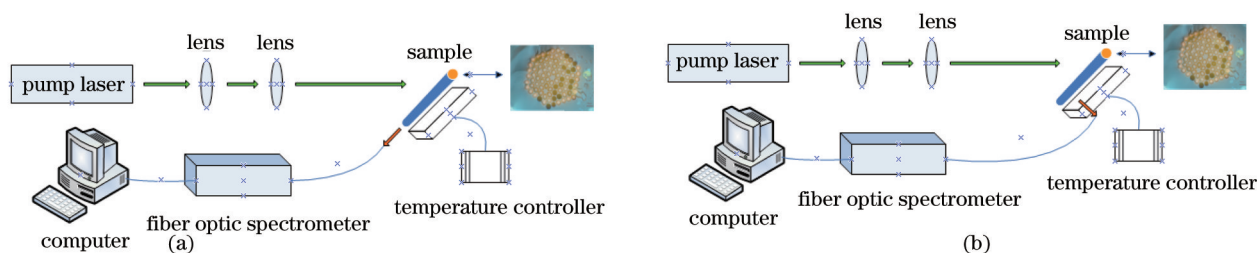


图1 实验及探测装置示意图。(a)端面探测;(b)侧面探测

Fig.1 Framework of experiment and detection device. (a) Face direction; (b) side direction

3 结果与分析

透射谱测试结果如图2所示。图2左上角为直接测量的溴钨灯光谱图。图中可知,400~800 nm范围内连续。经过空的光纤以及注入液晶的光纤样品的透射光谱仍为连续谱,显示了光子晶体光纤无截止波长单

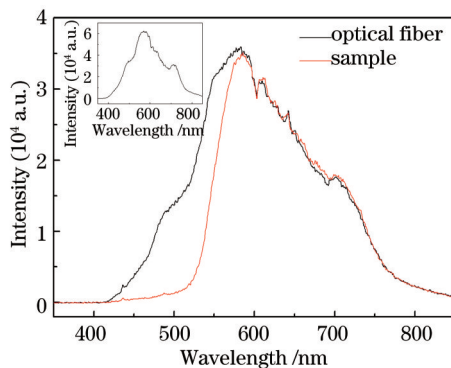


图2 透射谱图

Fig.2 Transmission spectra

模传输特性。但与光源发出的光强比较,强度减弱明显,该现象说明产生了较大的耦合损耗。比较通过空光纤和注入染料掺杂手性向列相液晶光纤的光强,在420~582 nm波段相差较大,这主要是由激光染料的吸收损耗引起,而在582~800 nm波段几乎一致。

利用偏光显微镜观察样品的照片如图3所示,光子晶体光纤由内包层以及外包层构成。外包层主要起隔离的作用。图3(a)中外包层直径为330 μm,内包层直径为80 μm。图3(b)为横截面图。空气孔的直径约为8 μm,孔间距约为2 μm。观察空气孔内颜色的变化,可以判断是否有液晶注入。显示黑色的孔为无液晶。这是由于在切割光纤时,用刀片手工操作,导致有些孔被堵塞。

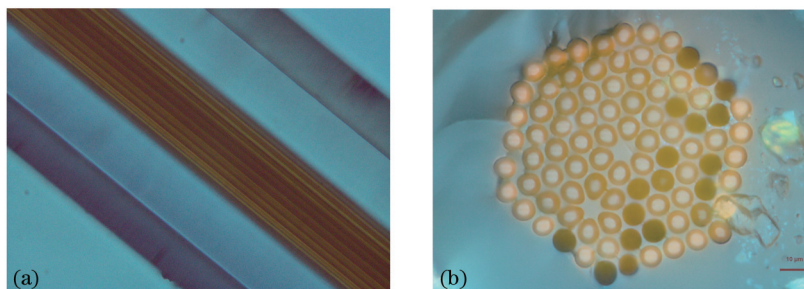


图3 样品显微镜照片。(a)侧面探测;(b)内包层端面探测

Fig.3 Microscope images of sample. (a) Picture of side; (b) end face picture of the inner cladding

室温下,当抽运光的入射方向与样品轴向成30°,单次抽运能量为14.58 mJ时,光纤光谱仪的探头在各个方向上都能探测到随机激光辐射,且谱线结构随观察角度和时间而变,变化范围为600~650 nm。由于进行探测的光纤光谱仪为多通道,不同通道之间会发生重叠影响观察,在此仅选取一个通道内的探测值进行说明。图4为辐射谱随温度的变化图,在600~625 nm范围内均出现了多个离散的尖锐的随机激光辐射峰,线宽约为0.2~0.3 nm,该现象说明样品中存在不同空间模式共振腔。

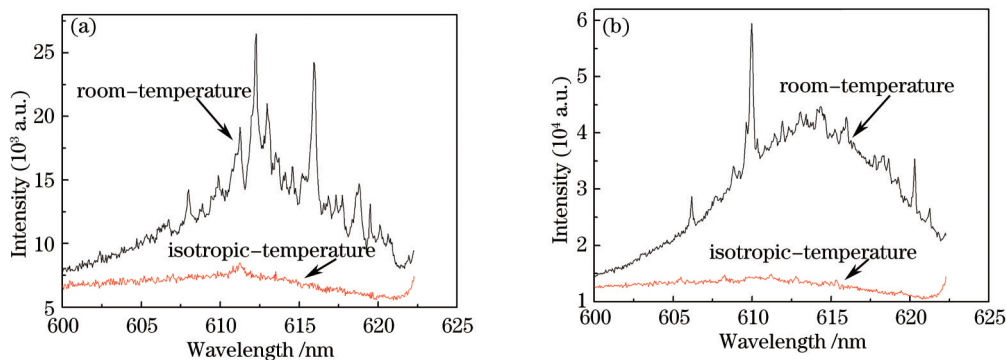


图4 辐射谱随温度的变化。(a)端面探测;(b)侧面探测

Fig.4 Changes of radiation spectra with temperatures. (a) Face direction; (b) side direction

由于光子晶体光纤在注入液晶之前没有经过任何取向处理,因此光子晶体微孔中手性向列相液晶处于焦锥织构态排列,如图5所示。在焦锥织构态中,具有很多螺旋结构畴,并且畴的布局是无序混乱的,即每个畴的螺旋轴指向方向不同,利于光子在螺旋结构畴之间形成多重散射。光子通过多次散射有可能形成一个闭合回路或环形腔,这些闭合环类似于一个环形谐振腔^[8],如图5中虚线所示。由激光染料获得增益,不断反馈放大产生共振,这样光子被局域在微腔中,当增益超过损耗时将产生激光辐射^[9-11]。故激光辐射是光在谐振腔中多次散射相干叠加的结果。光子晶体的微孔中的环形腔随机分布在液晶中,每个环形腔的频率、位置、发光方向都是不同的。实验观察到的辐射谱是一部分环形腔共同作用的结果。由于环形腔的随机分布,样品在不同方向都有激光输出,但性质不同,包括线宽、谱线结构等,因此形成了离散的随机辐射峰。如光子晶体光纤微孔中手性向列相液晶形成平面态的排列,则将显示较强的禁带末端激光辐射峰^[12],对应光子禁带的长波或短波边沿。

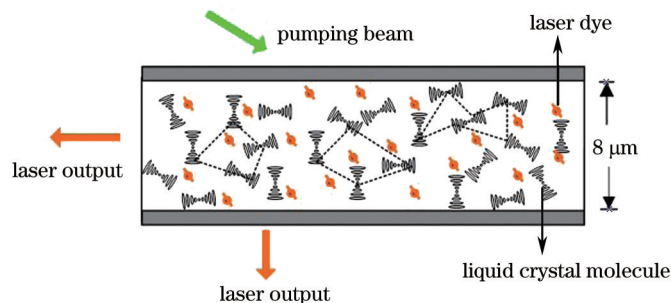


图5 样品织构

Fig.5 Texture of an air hole of the photonic crystal fiber

对样品进行加温处理,如图4红色曲线所示。当温度升高至63℃及各向同性温度时,激光辐射峰消失,可以认为辐射激光被关闭。这是由于作为散射介质的液晶在不同温度下将呈现不同的液晶相,具有不同的分子取向和折射率分布。在室温下处于手性向列相液晶相,呈现双折射,对光的散射较强,有利于随机激光的产生,阈值较小。而温度达到63℃时,液晶呈现光学各向同性,光散射大大减弱,使产生随机激光的阈值增大。这和染料掺杂向列相液晶器件在各向同性相温度随机激光辐射消失的原因是相同的^[4]。

4 结 论

由向列相液晶TEB30A、手性剂S-811、激光染料DCM制备了染料掺杂手性向列相液晶,并利用毛细作用注入全反射型光子晶体光纤的微孔中。在脉冲Nd:YAG倍频532nm抽运光的作用下,入射方向与样品轴向方向成30°,沿着光纤轴向方向以及垂直光纤轴向方向获得了随机激光辐射。室温下,在600~650nm范围内出现了多个离散的尖锐的随机激光辐射峰,线宽约为0.2~0.3nm。温度升高至各向同性温度时,激光辐射峰消失。光子晶体光纤微孔中手性向列相液晶处于焦锥织构排列,光子在螺旋结构瞬间多重散射,形成闭合回路或环形腔,这些闭合环类似于一个环形谐振腔,光在谐振腔中多次散射相干叠加,这是出现多个离散的随机激光辐射峰的根本原因。而在各向同性温度下,焦锥织构态排列被破坏,光散射减弱,激光阈值提高,导致激光辐射峰消失。

参 考 文 献

- 1 Zhou Libing, Liu Jinsong, Wang Kejia, *et al.*. Research progress of random laser action in liquid crystal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(9): 16-24.
周利兵, 刘劲松, 王可嘉, 等. 随机激光器的最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(9): 16-24.
- 2 S Ferjani, V Barna, A De Luca, *et al.*. Thermal behavior of random lasing in dye doped nematic liquid crystals [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(12): 121109.
- 3 Lihua Ye, Cong Hou, Changgui Lü. Tailoring of random lasing characteristics in dye-doped nematic liquid crystals [J]. *Appl Phys B*, 2014, 115(3): 303-309.
- 4 D S Wiersma, S Cavaleri. Temperature-controlled random laser action in liquid crystal infiltrated systems [J]. *Phys Rev E*, 2002, 66(5): 056612.
- 5 T R Wolinski, K Szaniawska, K Bondarczuk, *et al.*. Propagation properties of photonic crystal fibers filled with nematic liquid crystals [J]. *Opto-Electronics Review*, 2005, 13(2): 177-182.
- 6 Yang Qianqian, Hou Lantian. A novel polarization splitter based on three-core photonic crystal fibers [J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(1): 33-36.
- 7 Huang Fangyun, Yang Dong. Optical waveguide properties of photonic crystal liquid crystal fibers [J]. *Optoelectronic Technology*, 2009, 29(1): 47-50.
黄芳云, 杨东. 光子晶体液晶光纤的光波导特性[J]. *光电子技术*, 2009, 29(1): 47-50.
- 8 Wang Hong, Liu Jinsong. Recent investigation on random lasers in theories and achievements [J]. *Physics*, 2003, 32(4): 235-241.
王宏, 刘劲松. 随机激光器的理论与研究现状 [J]. *物理*, 2003, 32(4): 235-241.
- 9 Liu Yongjun, Sun Weimin, Liu Xiaoqi, *et al.*. Investigation of the tunable laser of one-dimensional photonic crystal with dye-doped

- nematic liquid crystal defect layer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(11): 114211.
- 刘永军, 孙伟民, 刘晓硕, 等. 向列相液晶染料可调谐激光器的研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(11): 114211.
- 10 Li Longwu, Deng Luogen. Random lasing from dye-doped chiral nematic liquid crystals in oriented and non-oriented cells [J]. *Eur Phys J B*, 2013, 86(3): 112.
- 11 Yao Ke, Feng Guoying, Yang Liling, *et al.*. Properties of random radiation in two-dimensional disordered medium [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0606004.
- 姚 轲, 冯国英, 杨丽玲, 等. 二维无序介质中随机激光辐射的特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0606004.
- 12 Dai Qin, Li Yong, Wu Rina, *et al.*. Investigation of the laser action in a dye-doped cholesteric liquid crystal wedge cell [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044219.
- 岱 钦, 李 勇, 乌日娜, 等. 楔形盒染料掺杂胆甾相液晶激光器研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(4): 044219.

栏目编辑: 王晓琰