

文章编号: 1000-7032(2025)11-2129-09

基于液晶芯光栅阵列反馈的光纤随机激光器

王龙超^{1,2}, 高少华^{1,2*}, 谢书浩^{1,2}, 党杰^{1,2}, 李阳^{1,2},
朱益志^{1*}, 张明江^{1,2*}

(1. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030600;

2. 太原理工大学 精密测量物理山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 随机光纤激光器在成像、传感、医学检测等领域具有广阔的应用前景。本文提出了一种基于液晶芯随机光栅阵列反馈的随机光纤激光器。利用随机光栅阵列掩膜板以及光诱导相分离技术,在空芯光纤内实现了具有随机分布光栅的液晶芯光栅阵列,将其接入光路为激光器提供随机反馈。室温下该随机光纤激光器的阈值为49.3 mW,随着泵浦强度的逐渐增加,激射模式的数量增多,激射模式随时间动态分布于1 529~1 532 nm范围内且激射强度变化范围较小。随机光栅阵列的温度变化会影响该随机光纤激光器的激射特性,随着温度升高光栅阵列的反馈强度有所降低,导致该随机激射阈值增加且激射强度有所下降。此外,激射模式在1 530.9, 1 531.3 nm附近出现概率显著增加。这种基于液晶芯随机光栅阵列反馈的多模随机光纤激光器在传感、通信以及成像等领域有很大的应用潜力。

关键词: 随机光纤激光器; 液晶芯随机光栅阵列; 光诱导相分离

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250121 CSTR: 32170. 14. CJL. 20250121

Random Fiber Laser Based on Liquid Crystal Core
Grating Array FeedbackWANG Longchao^{1,2}, GAO Shaohua^{1,2*}, XIE Shuhao^{1,2}, DANG Jie^{1,2}, LI Yang^{1,2},
ZHU Yizhi^{1*}, ZHANG Mingjiang^{1,2*}

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Precision Measurement Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

* Corresponding Authors, E-mail: gaoshaohua@tyut.edu.cn; zmxzzhu@163.com; zhangmingjiang@tyut.edu.cn

Abstract: Random fiber lasers have significant application potential in areas such as imaging, sensing, and medical diagnostics. This paper proposes a random fiber laser based on feedback from a liquid crystal core random grating array, by utilizing a random grating array mask and light-induced phase separation technology, a liquid crystal core grating array with randomly distributed gratings was realized within a hollow-core optical fiber, which is integrated into the optical path to provide random feedback for the laser. The threshold of the random fiber laser at room temperature is 49.3 mW. As the pump intensity gradually increases, the number of lasing modes increases, with the lasing modes dynamically distributed over the range of 1 529–1 532 nm and exhibiting a relatively small range of lasing intensity variations. The temperature variation of the random grating array will affect the lasing characteristics of the random fiber laser. As the temperature rises, the feedback strength of the grating array decreases, resulting in an increased lasing threshold and a decreased lasing intensity. Additionally, the probability of lasing modes around 1 530.9 nm and 1 531.3 nm significantly increases. This kind of multi-mode random fiber laser based on liquid crystal core random grating array feedback has great application potential in the fields of sensing,

收稿日期: 2025-04-17; 修订日期: 2025-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(12104335); 山西省基础研究计划资助项目(20210302124609, 202403021211010)

Supported by National Natural Science Foundation of China (12104335); Shanxi Provincial Basic Research Program Funded Project (20210302124609, 202403021211010)

communication and imaging.

Key words: random fiber laser; liquid crystal core fiber grating array; light-induced phase separation

1 引 言

随机激光器的反馈机制与传统激光器不同,无需谐振腔结构而是依靠光在无序介质中的多重散射提供反馈。因此,随机激光器具有结构简单、低空间相干性等特点,在生物医学检测^[1]、传感^[2-4]、通信^[5]、成像^[6-7]等领域有广泛的应用。随机激光器常用纳米颗粒^[8-11]、聚合物^[12-14]、液晶^[15-18]等散射材料作为反馈介质,因此随机激光具有多方向性,且阈值较高。光纤对光的传输有束缚作用,将光限制在一维方向传播,将其用于实现随机激光可有效地提高光反馈,因此随机光纤激光器具有能量利用率高、阈值相对低、方向性好等优点。

按照随机反馈类型,光纤随机激光器可以分为四类:瑞利散射型、空芯填充型、光栅反馈型、聚合物光纤型。瑞利散射型随机光纤激光器基于光纤中随机分布的瑞利背散射反馈,利用光纤内非线性散射或有源光纤提供增益,进而在光纤内实现了随机激射^[19-22];但由于光纤中的瑞利背散射系数较小,因此通常需要几十公里长的光纤提供反馈。空芯填充型随机光纤激光器是在空芯光纤填充纳米颗粒掺杂的无序介质^[23-26],利用介质中激光染料作为增益进而实现随机激光;但其激射范围受限于激光染料的增益范围,且其腔内损耗大,阈值较高。聚合物光纤随机激光器是基于聚合物光纤纤芯内纳米散射颗粒的多重散射提供随机反馈而实现随机激射的,该聚合物光纤以掺杂纳米颗粒和荧光染料的聚合物作为纤芯,并以纯聚合物作为包层,通过拉丝工艺制作而成^[27-28],其制作过程较为复杂。2005年,Shapira和Fischer在实验上观察到随机排列的光纤光栅存在光局域化现象,并建议用来实现随机激光^[29]。在此基础上发展的光栅反馈型随机光纤激光器利用随机光纤光栅或光纤随机光栅阵列提供更强的随机反馈,或利用弱反馈的光栅获得单模激射效果^[30]。因此,利用随机光栅可以有效缩短反馈光纤的长度,简化激光器结构,降低随机光纤激光器的阈值。

通常制作随机光栅需要使用飞秒激光刻写、化学刻蚀、电弧放电等技术^[31-34],这需要昂贵的制造设备或复杂的制备流程,增加了实现随机光纤激光器

的难度和成本,因此有必要发展一种制备简单、成本较低的随机光栅制作方法。光聚合诱导相分离技术常用于制作基于聚合物液晶体系的薄膜^[35-37],该技术实用性高,原理简单,可以较低的成本制备具有不同结构特征的薄膜材料,可制造多种光学元件,例如菲涅尔透镜和液晶光栅^[38-39]。该技术基于液晶和聚合物混合液实现区域性相分离机制,在空芯光纤中同样适用,辅助在空芯光纤中获得液晶芯光栅阵列。在聚合物液晶体系中,液晶分子取向及其折射率可通过外场(如电场或磁场)实现调控,基于这一特性可实现多种融合液晶分子与光纤技术的新型光子器件,例如基于蓝相液晶的长周期光纤光栅^[40]、基于液晶膜的级联 Sagnac 干涉仪的光纤温度传感器^[41]、基于填充液晶的双芯光子晶体光纤的超短偏振分束器^[42]。

本研究提出了一种基于液晶芯随机光栅阵列反馈的随机光纤激光器。在空芯光纤中填充聚合物单体与液晶的混合液,利用随机光栅阵列掩模版和光聚合诱导相分离技术,可在空芯光纤中简单、低成本地制备液晶芯随机光栅阵列,并将其接入到光纤光路中作为光纤随机激光器的反馈单元。随着该随机光栅阵列温度升高,光栅阵列的结构可保持稳定,其光反馈强度会有所下降。室温下基于液晶芯随机光栅阵列反馈的随机激光器阈值为 49.3 mW,激射模式随时间动态分布在 1 529~1 532 nm 范围内。当液晶芯光栅阵列的温度逐步升高,随机光纤激光器的阈值随之升高,输出的激射强度呈下降趋势。探究了温度对激射模式分布的影响,当随机光栅阵列的温度在液晶清亮点温度以下时,激射模式在 1 529~1 532 nm 范围内多个波长处出现概率较高;当其温度在液晶清亮点温度以上时,激射模式在 1 530.5~1 531.5 nm 波长范围出现概率显著增加,在 1 529~1 530.5 nm 附近激射概率降低。这种多波长随机光纤激光器在诸如无散斑成像技术、高灵敏度光纤传感系统以及精准生物医学诊断等前沿领域展现出极大的应用潜力。

2 样品制备及实验装置

2.1 液晶芯随机光栅阵列制备

图 1 展示了随机光栅阵列的制备过程,首先将

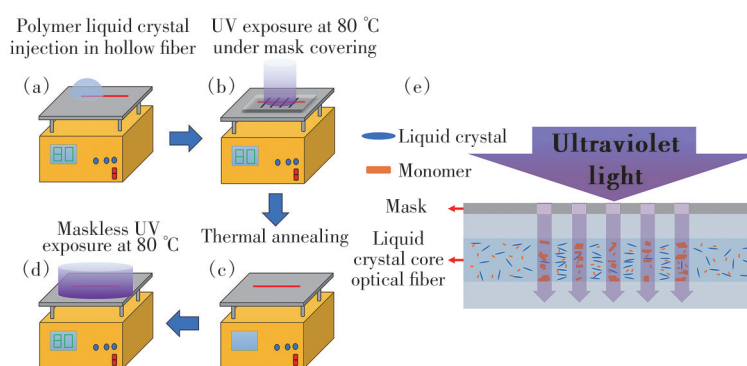


图1 液晶芯随机光栅阵列制备流程。(a)液晶聚合物单体混合液注入空芯光纤;(b)掩膜曝光;(c)热退火;(d)无掩膜曝光;(e)掩膜曝光过程中聚合物单体与液晶的相分离及光栅形成示意图

Fig.1 Preparation process of liquid crystal core random grating array. (a) Injection of liquid crystal polymer monomer mixed solution into hollow-core optical fibers. (b) Exposure with mask. (c) Thermal annealing. (d) Mask-free exposure. (e) Schematic diagram of the phase separation of polymer monomers and liquid crystals during the mask exposure process and the formation of gratings

置于加热台上的空芯光纤(图中用置于加热台上的红色圆柱表示)加热至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 随后将液晶与聚合物单体混合液滴在光纤的一端, 通过毛细作用使混合液注入到空芯光纤中, 该空芯光纤的内径为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 外径为 $125\text{ }\mu\text{m}$, 整个过程在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行, 如图 1(a)。该液晶聚合物单体混合液是由质量分数为 40% 的向列液晶 E7(北京八亿时空液晶科技股份有限公司)、60% 的聚合物单体 TMPTA(上海引昌新材料有限公司)、2% 的光引发剂 184(上海引昌新材料有限公司)配制而成。为使该混合液充分混合均匀, 将装有混合液的玻璃瓶加热到清亮点温度以上, 瓶内放置磁力搅拌子, 并用磁力搅拌器搅拌 1 h。图 1(b)为掩膜曝光过程, 先将填充好的液晶芯光纤擦拭清洁, 把光栅掩膜版水平覆盖在光纤上, 然后用紫外光进行曝光。为了使光纤内形成高质量的液晶芯光栅结构, 需要较慢的光诱导相分离速度, 因此需使用较弱的紫外光强, 使用的紫外光曝光强度为 0.03 mW/cm^2 , 紫外曝光时间为 90 min, 温度一直保持在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为使单体聚合得更加彻底, 提高液晶芯光栅阵列质量, 接下来进行液晶芯光栅阵列热退火过程, 如图 1(c), 先将光纤加热到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 30 min 后再自然降温。最后, 将整根光纤进行无掩膜曝光以提高光纤内结构的稳定性, 曝光过程中光纤温度保持在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 如图 1(d)所示。曝光完成后, 将该光纤一端插入到 APC 形式的陶瓷插芯中进行斜 8 度处理, 便于将其接入光纤光路中。单体与液晶的相分离过程如图 1(e)所示, 紫外光经过掩膜版后照射到光纤上, 曝光区内聚合物单体发生聚合, 导致该区域内单体浓度下降, 而

在遮光区未发生单体的聚合, 所以单体浓度较高。因此, 两个区域产生单体浓度差, 进而使单体分子从遮光区向曝光区扩散, 同时液晶分子会从曝光区向遮光区扩散, 由此使得曝光区富集聚合物单体, 遮光区富集液晶分子, 最终曝光完成后形成由聚合物区和液晶区交替排列组成的光栅结构。制作的随机光栅阵列成本低且过程简单, 简化了传统随机光栅制备中依赖复杂光刻或精密对准的步骤。

按照图 2(a)所示的结构示意图设计了液晶芯随机光栅阵列, 实线方框为光栅间隔部分, 虚线方框为一个光栅单元, 内部为聚合物区与液晶区交替排列结构, 每个光栅单元的周期数为 5, 聚合物区和液晶区宽度均为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。整个随机光栅阵列由 40 个周期性光栅单元随机排列组成, 相邻光栅单元的间隔长度 D_i 在 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 之间随机分布, 间隔长度的平均值为 $150\text{ }\mu\text{m}$, 多个光栅单元随机排列在空芯光纤中, 光栅分布如图 2(b)所示。图 2(c)为液晶芯随机光栅阵列在偏光显微镜下的织构图, 曝光区富集各向同性的聚合物, 因此在偏光显微镜下呈现暗场, 遮光区和光栅间隔区域则富集液晶, 在偏光显微镜下呈现亮场。

2.2 实验装置

基于液晶芯随机光栅反馈的随机光纤激光器实验装置如图 3 所示。使用 980 nm 激光器作为泵浦源, 激光通过 $1\text{ }550\text{ nm}/980\text{ nm}$ 波分复用器(WDM)进入并泵浦一段 10 m 长的掺铒光纤, 掺铒光纤的发射光通过光纤环形器进入到液晶芯随机光栅阵列光纤中, 光栅阵列产生的背向随机反馈光经过一个 90:10 的耦合器分光, 90% 的光输

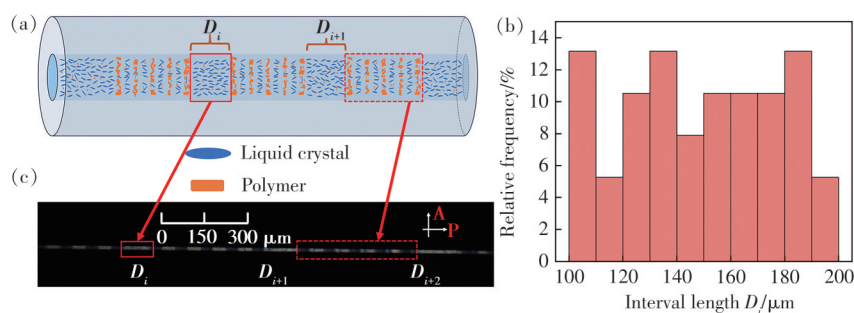


图 2 (a)液晶芯随机光栅阵列结构示意图;(b)光栅阵列中光栅间隔长度统计分布;(c)偏光显微镜下光栅阵列织构图
Fig.2 (a)Schematic diagram of the liquid crystal core random grating array. (b)Statistical distribution of grating interval length in the grating array. (c)Texture image of grating array under polarized light microscopy

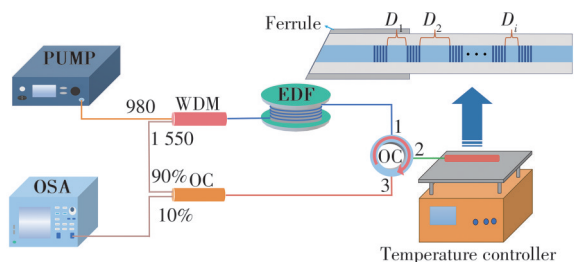


图 3 基于液晶芯随机光栅阵列反馈的随机光纤激光器装置示意图
Fig.3 Schematic diagram of a random fiber laser based on liquid crystal core random grating array feedback

出到 WDM 的 1 550 nm 端口使系统形成环形光路,10%的光输出到光谱分析仪(横河, AQ6370D)中记录数据。随着泵浦光强的增大,增益强度最

高的波长模式首先满足激射条件,随着泵浦功率进一步增加,更多的模式被激发,将出现多模式且激射峰随机分布的随机激射谱形。随机光栅阵列置于加热台上,方便后续研究不同温度对其反馈特性以及对随机光纤激光器输出特性的影响。

3 结果与讨论

3.1 液晶芯随机光栅阵列反馈特性

图 4(a)为不同温度下随机光栅阵列在偏光显微镜下的织构图。室温下光栅的遮光区富集液晶,在偏光显微镜下是亮场,曝光区富集聚合物,在偏光显微镜下是暗场。随着温度升高,遮光区亮度增加,这是因为温度升高后液晶的寻常光与

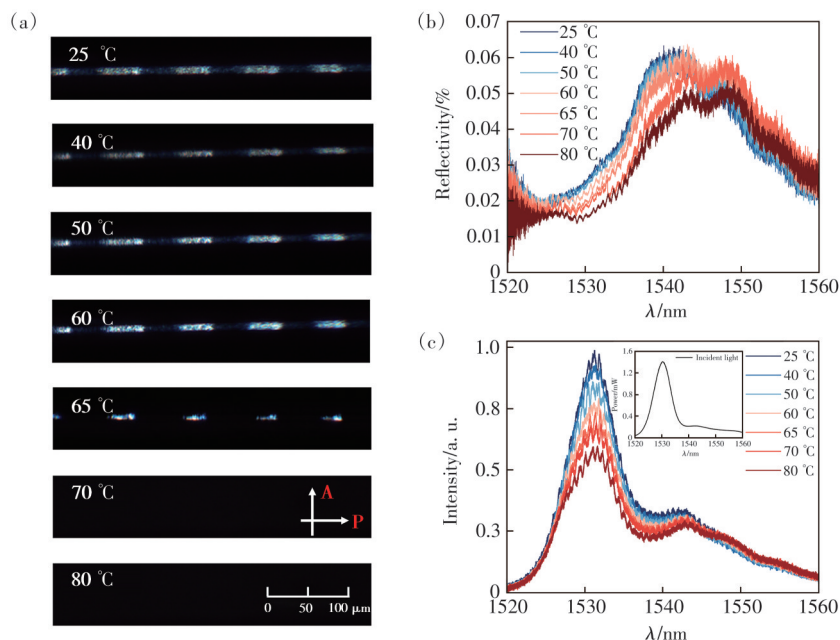


图 4 (a)不同温度时偏光显微镜下光栅的织构图;(b)不同温度下随机光栅阵列的反射光谱;(c)不同温度下随机光栅阵列反射光的光谱,插图为光源的输出光谱
Fig.4 (a)The texture map of the grating under the polarized microscope at different temperatures. (b)Reflection spectra of random grating arrays at different temperatures. (c)The spectra of reflected light from a random grating array at different temperatures, the inserted illustration depicts the light source output spectrum

非常光折射率差变小,液晶芯随机光栅内的散射变弱,从侧面观察会有更多的光透过该液晶芯光纤。由于曝光区是单体聚合形成网络结构,始终处于各向同性,因此偏光显微镜下一直为暗场。当随机光栅温度升高到接近液晶的清亮点温度时,液晶分子的取向有序度变小,液晶逐渐转变为各向同性状态,导致遮光区域逐渐由亮场转变为暗场。当温度超过液晶清亮点温度后,即 70°C 以上,液晶完全转变为各向同性状态,整个光栅体系转变为各向同性状态,因此,偏光显微镜下全部为暗场。图 4(b) 为液晶芯随机光栅阵列的反射光谱,表征了光栅阵列反射率随波长的变化,反映了阵列结构对光的反射特性。随着温度升高,在 $1525\sim 1545\text{ nm}$ 波长范围内随机光栅阵列的反射率下降, $1545\sim 1560\text{ nm}$ 范围内随机光栅阵列的反射率先升高后下降。图 4(c) 为液晶芯光栅阵列反射的光强随波长的分布情况,可以直接展示该阵列的光反馈强度随波长的分布,该反射光是由液晶芯光纤内的液晶微畴与聚合物的散射光以及随机光栅的反射光叠加而成,图中的插图为光源光谱。液晶芯随机光栅阵列在 $1525\sim 1535\text{ nm}$ 波长范围内光反馈强度更高,这导致了随机激射模式更容易出现在该范围内。随着温度升高,在 $1525\sim 1535\text{ nm}$ 波长范围内,随机光栅阵列的光

反馈强度逐渐下降。这是因为温度升高会导致液晶芯随机光栅内的光散射变弱,并且在该波长范围内随机光栅阵列的反射率随温度升高而下降,随机光栅的反射光变弱,两种类型的光均随温度升高而减弱。液晶芯随机光栅阵列反射率较高的波长范围与反射光强度较高的范围有明显区别,这是因为在 $1525\sim 1535\text{ nm}$ 波长范围内光源输入光强度最高,虽然该范围内光栅的反射率较低,但受入射光强影响,该范围内产生的反射光强度更高。

3.2 随机激光器的激射特性

基于液晶芯随机光栅阵列反馈的随机光纤激光器在不同温度下的输出特性如图 5 所示,图 5(a)~(f) 分别展示了不同温度下该随机光纤激光器的输出光谱随泵浦功率变化。虽然液晶芯随机光栅的反馈强度较低,但弱反馈强度下通过增强泵浦功率仍可以实现随机激射^[42]。如图 5(a) 所示,当泵浦功率较低时,随机激光器输出的是放大的自发辐射光谱;当泵浦功率高于阈值增加到 50.3 mW 时,发射光谱中出现少量激射模式;当继续增加泵浦功率时,发射光谱中更多的激射模式被激发出来。在其他温度条件下,该随机光纤激光器均能实现随机激射,其激射光谱表现出相似的特性,增加泵浦功率均能实现多模式激射。

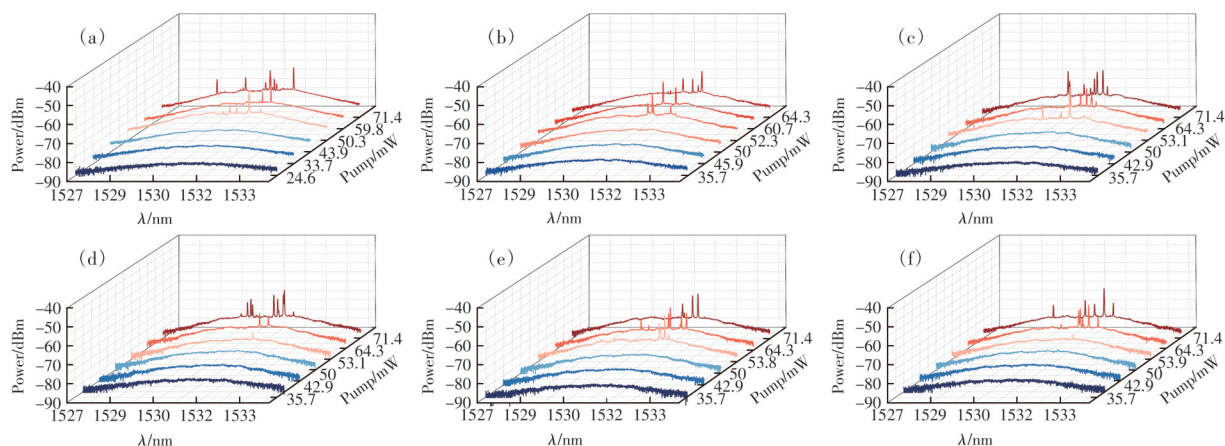


图 5 液晶芯随机光栅阵列处于不同温度时随机光纤激光器发射光谱随泵浦强度的变化。(a) 25°C ; (b) 40°C ; (c) 50°C ; (d) 60°C ; (e) 70°C ; (f) 80°C

Fig.5 The emission spectra of the random fiber laser changes with the pump intensity when the liquid crystal core random grating array is at different temperatures. (a) 25°C . (b) 40°C . (c) 50°C . (d) 60°C . (e) 70°C . (f) 80°C

随机光栅阵列在不同温度下随机激光的峰值强度随泵浦强度的变化曲线如图 6(a) 所示,通过峰强度随泵浦强度的变化可以获得不同温度下随机光纤激光器的阈值。在相同泵浦强度下,随着随机光栅阵列的温度升高,激射光谱的峰值强度

逐渐减弱。图 6(b) 为阈值随温度的变化曲线, $25\sim 80^{\circ}\text{C}$ 时随机光纤激光器的阈值分别为 49.3 mW 、 51 mW 、 52.5 mW 、 52.7 mW 、 53.4 mW 和 53.6 mW , 温度越高随机激光器的阈值越高。液晶芯随机光栅阵列由富集液晶区以及聚合物区交替排列组

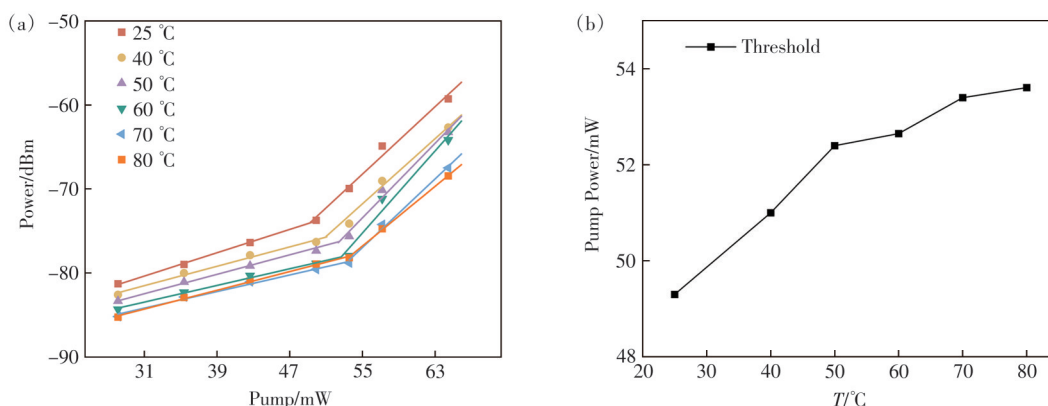


图6 (a)随机光栅阵列处于不同温度时随机光纤激光器激励的最高峰值强度随泵浦强度的变化;(b)随机光纤激光器阈值随温度的变化曲线

Fig.6 (a)The peak intensity of the random fiber laser emission varies with the pump intensity when the random grating array is at different temperatures. (b)The threshold of the random fiber laser varies with temperature

成,富集液晶区内包含许多液晶微畴,光在该区域内部传播时会产生强烈的背向散射为系统随机反馈。虽然随机光栅阵列反射中心波长不与增益最高的波长范围重合,但该增益范围内随机光栅阵列仍存在微弱反射为系统提供随机反馈,因此液晶芯随机光栅阵列的随机反馈包括来自液晶微畴的散射反馈和光栅结构的弱反馈。虽然反馈强度较低,但可以通过增加泵浦功率来获得更大的增益强度,从而实现随机激励。

图7为不同温度下随机光纤激光器的激励波长分布,对应的泵浦强度均为71 mW,激励模式均分布在1529~1532nm范围内。25~50 °C范围内激励

模式分布相对分散,25 °C时激励模式在1529.9 nm、1530.4 nm、1530.7 nm和1531.3 nm附近出现概率相对较高,40~50 °C时在1530 nm、1530.9 nm、1531.3 nm和1531.7 nm附近出现概率相对较高。60~80 °C时激励模式在1530.9 nm和1531.3 nm波长附近出现概率明显增加。随着随机光栅阵列所处温度升高,液晶芯光纤中的散射反馈减弱,因此,部分随机路径不再满足激励条件,使得激励在光反馈更高的波长附近出现概率增加。随机光栅阵列的温度升高后,激励范围并不会改变,这是因为增益不变,随机光栅阵列始终在1529~1532 nm波长范围内光反馈强度最高。图8(a)~(f)展示了

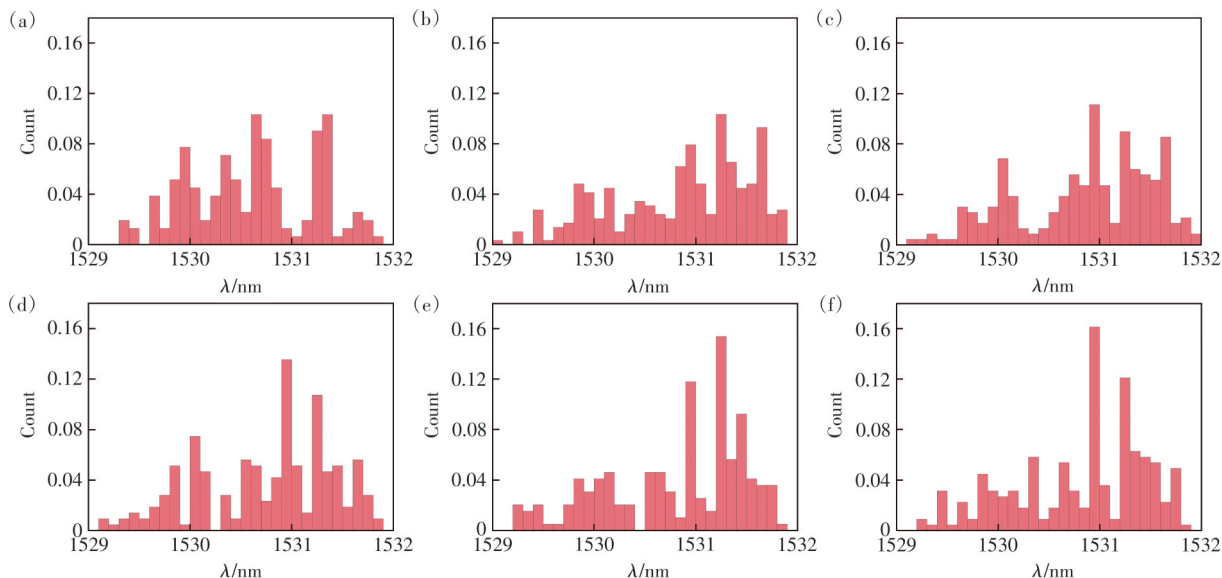


图7 随机光栅阵列在不同温度时随机光纤激光器的激励模式波长的统计分布。(a)25 °C;(b)40 °C;(c)50 °C;(d)60 °C;(e)70 °C;(f)80 °C

Fig.7 Statistical distribution of the wavelength of the laser mode of a random fiber laser when the random grating array is at different temperatures. (a)25 °C. (b)40 °C. (c)50 °C. (d)60 °C. (e)70 °C. (f)80 °C

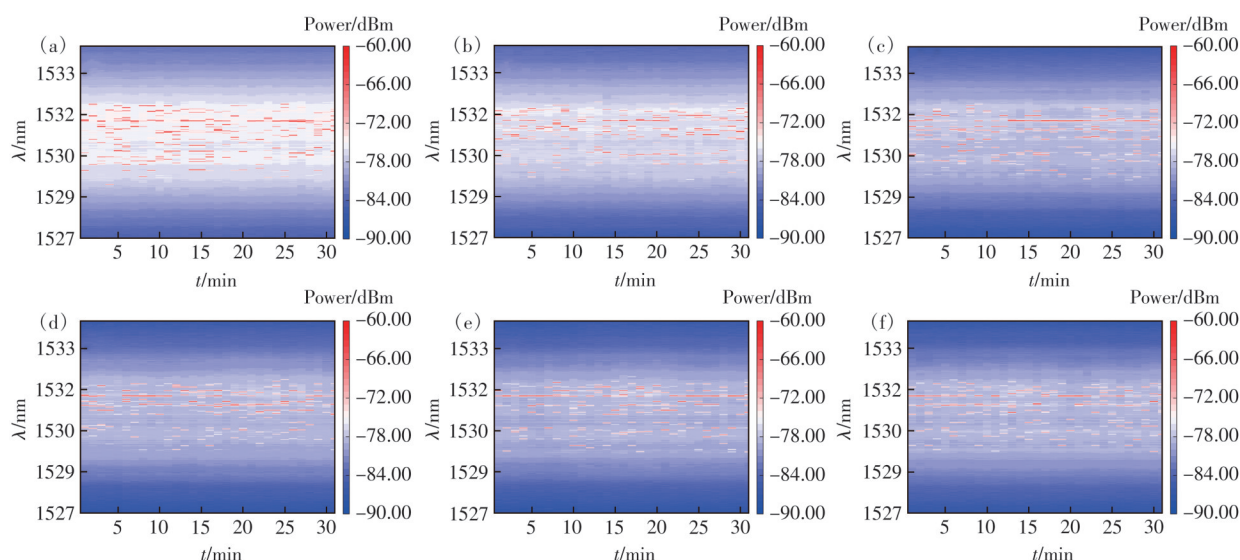


图 8 随机光栅阵列在不同温度时随机光纤激光器的激射光谱随时间的变化情况。(a)25 °C;(b)40 °C;(c)50 °C;(d)60 °C;(e)70 °C;(f)80 °C

Fig.8 The variation of the lasing spectra of the random fiber laser with time when the random grating array is at different temperatures. (a)25 °C. (b)40 °C. (c)50 °C. (d)60 °C. (e)70 °C. (f)80 °C

不同温度下激射光谱的时变特性,泵浦强度均为 71 mW。结果显示,激射波长随时间动态分布在 1 529~1 532 nm 范围内且呈现多峰分布特征,随机光纤激光器输出波长范围随时间保持稳定,激射范围无明显漂移,随着随机光栅阵列温度的升高,激光的整体强度会有所下降。

4 结 论

本文提出了一种基于液晶芯随机光栅阵列反馈的随机光纤激光器。将配制好的液晶聚合物混合液注入到空芯光纤中,通过光聚合诱导相分离技术结合掩膜板来制作液晶芯随机光栅阵列,然后用光纤连接器将随机光栅阵列接入光路作为反馈单元。光栅的曝光区富集聚合物,遮光区富集液晶,在液晶的清亮点温度以下,偏光显微镜下两个区域可以看到明显的亮暗区分;清亮点温度以上时光栅整体变为各向同性,但光栅结构仍然存在。随机光栅阵列的光反馈强度在 1 525~1 535 nm 范围内更高,随着温度升高,其光反馈强度下降。室

温下随机激光器的阈值为 49.3 mW,增加泵浦功率后激射模式数量显著增加,激射分布在 1 529~1 532 nm 范围内,该随机光纤激光器的激射强度随时间变化较小,激射范围稳定。当随机光栅阵列处于不同温度时,该随机光纤激光器表现出相似特性,即激射波长范围不变,同一温度下激射强度随时间无明显变化。随着随机光栅阵列的温度升高,该随机光纤激光器的阈值增加,激射强度明显降低。随机光栅阵列处于不同温度时,激射模式的统计分布有明显变化。在清亮点温度以下,激射在多个波长附近出现概率较高;温度升高到清亮点以上,激射在 1 530.9,1 531.3 nm 波长附近出现概率显著增加。该随机光纤激光器的多模输出特性使其在无散斑成像、随机码生成、光通信、光学传感等领域具有很大的应用潜力。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250121>

参 考 文 献:

- [1] XU Z Y, HONG Q H, GE K, *et al.* Random lasing from label-free living cells for rapid cytometry of apoptosis [J]. *Nano Lett.*, 2022, 22(1): 172-178.
- [2] HAN B, WU H, LIU Y, *et al.* Ultralong single-ended random fiber laser and sensor [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(6): 2200797.
- [3] 曹健华, 林圣淘, 王子南, 等. 超长距离光纤随机激光多点传感系统的设计与实现 [J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306006.

- CAO J H, LIN S T, WANG Z N, *et al.* Design and implementation for ultra-long-distance multi-point sensing system based on random fiber laser [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2021, 41(13): 1306006. (in Chinese)
- [4] XU Y P, ZHANG M J, LU P, *et al.* Multi-parameter sensor based on random fiber lasers [J]. *AIP Adv.*, 2016, 6(9): 095009.
- [5] LIMA B C, VON DER WEID J P. Fast true random bit generation with an SOA-based random fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2023, 35(4): 191-194.
- [6] REDDING B, CHOMA M A, CAO H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination [J]. *Nat. Photonics*, 2012, 6(6): 355-359.
- [7] GOSYSTHRI R, SANDEEP C S S, GUMMALURI V S, *et al.* Plasmonic random laser enabled artefact-free wide-field fluorescence bioimaging: uncovering finer cellular features [J]. *Nanoscale Adv.*, 2022, 4(10): 2278-2287.
- [8] 李志全, 赵晶晶, 孟晓云, 等. 基于波导、金和氧化锌的随机激光器的研究 [J]. *发光学报*, 2015, 36(5): 557-562.
- LI Z Q, ZHAO J J, MENG X Y, *et al.* Research of random laser based on waveguide, Au and ZnO [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(5): 557-562. (in Chinese)
- [9] TSAI C Y, LIAO Y M, LIAO W C, *et al.* Magnetically controllable random lasers [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2017, 2(12): 1700170.
- [10] LUAN F, GU B B, GOMES A S L, *et al.* Lasing in nanocomposite random media [J]. *Nano Today*, 2015, 10(2): 168-192.
- [11] 杜江林, 高炳荣, 王海宇, 等. 基于 TiO₂ 纳米粒子薄膜的低阈值随机激光器的动力学研究 [J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 249-254.
- DU J L, GAO B R, WANG H Y, *et al.* Dynamics of low-threshold random laser based on TiO₂ nanoparticle films [J]. *Chin. Opt.*, 2016, 9(2): 249-254. (in Chinese)
- [12] SZNITKO L, MYSLIWIEC J, MINIEWICZ A. The role of polymers in random lasing [J]. *J. Polym. Sci. B: Polym. Phys.*, 2015, 53(14): 951-974.
- [13] DAI G, WANG L, DENG L G. Flexible random laser from dye doped stretchable polymer film containing nematic liquid crystal [J]. *Opt. Mater. Express*, 2020, 10(1): 68-75.
- [14] TULEK A, POLSON R C, VARDENY Z V. Naturally occurring resonators in random lasing of π -conjugated polymer films [J]. *Nat. Phys.*, 2010, 6(4): 303-310.
- [15] ZHU J L, LI W H, SUN Y B, *et al.* Random laser emission in a sphere-phase liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 106(19): 191903.
- [16] QU G Y, ZHANG X J, LI S Q, *et al.* Liquid crystal random lasers [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2023, 25(1): 48-63.
- [17] HUANG Y X, ZHANG X J, YU B L, *et al.* Waveguided nematic liquid crystal random lasers [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(13): 3541-3547.
- [18] QU G Y, HU L, LI S Q, *et al.* Efficient fluorescence utilization and photon density of states-driven design of liquid crystal lasers [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(6): 2301122.
- [19] TURITSYN S K, BABIN S A, EL-TAHER A E, *et al.* Random distributed feedback fibre laser [J]. *Nat. Photonics*, 2010, 4(4): 231-235.
- [20] TURITSYN S K, BABIN S A, CHURKIN D V, *et al.* Random distributed feedback fibre lasers [J]. *Phys. Rep.*, 2014, 542(2): 133-193.
- [21] PANG M, BAO X Y, CHEN L, *et al.* Frequency stabilized coherent Brillouin random fiber laser: theory and experiments [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(22): 27155-27168.
- [22] JIANG Y K, ZHANG L, SHOU H Z, *et al.* Laser linewidth compression in cascading Brillouin random fiber lasers [J]. *IEEE Photonics J.*, 2022, 14(5): 1547506.
- [23] DE MATOS C J S, DE S MENEZES L, BRITO-SILVA A M, *et al.* Random fiber laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99(15): 153903.
- [24] YANG T H, CHEN C W, JAU H C, *et al.* Liquid-crystal random fiber laser for speckle-free imaging [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 114(19): 191105.
- [25] HU Z J, ZHANG Q, MIAO B, *et al.* Coherent random fiber laser based on nanoparticles scattering in the extremely weakly scattering regime [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 109(25): 253901.
- [26] 陈茂洲, 戴海涛, 罗丹, 等. 纳米颗粒掺杂的聚合物稳定液晶微管随机激光器性能研究 [J]. *液晶与显示*, 2018, 33(1): 14-22.

- CHEN M Z, DAI H T, LUO D, *et al.* Properties of random laser based on polymer stabilized liquid crystal doped with nanoparticles [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2018, 33(1): 14-22. (in Chinese)
- [27] HE J J, CHAN W K, CHENG X, *et al.* Experimental and theoretical investigation of the polymer optical fiber random laser with resonant feedback [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(7): 1701187.
- [28] HU Z J, GAO P F, XIE K, *et al.* Wavelength control of random polymer fiber laser based on adaptive disorder [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(24): 6911-6914.
- [29] SHAPIRA O, FISCHER B. Localization of light in a random-grating array in a single-mode fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, 22(12): 2542-2552.
- [30] HU Z J, MA R, ZHANG X J, *et al.* Weak feedback assisted random fiber laser from 45°-tilted fiber Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(3): 3255-3263.
- [31] FANG X, LIAO C R, WANG D N. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(7): 1007-1009.
- [32] REGO G. Arc-induced long period fiber gratings [J]. *J. Sens.*, 2016, 2016: 3598634.
- [33] XU C C, JIANG C, LIU Y Q. High diffraction order cladding modes of helical long-period gratings inscribed by CO₂ laser [J]. *Appl. Opt.*, 2020, 59(10): 3086-3092.
- [34] IADICICCO A, CAMPOPIANO S, PALADINO D, *et al.* Micro-structured fiber Bragg gratings: optimization of the fabrication process [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(23): 15011-15021.
- [35] VORFLUSEV V, KUMAR S. Phase-separated composite films for liquid crystal displays [J]. *Science*, 1999, 283(5409): 1903-1905.
- [36] NICOLETTA F P, CHIDICHIMO G, CUPELLI D, *et al.* Electrochromic polymer-dispersed liquid-crystal film: a new bifunctional device [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2005, 15(6): 995-999.
- [37] KAMAL W, LI M, LIN J D, *et al.* Spatially patterned polymer dispersed liquid crystals for image-integrated smart windows [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(3): 2101748.
- [38] AVCI N, LEE Y H, HWANG S J. Switchable polarisation-independent blue phase liquid crystal Fresnel lens based on phase-separated composite films [J]. *Liq. Cryst.*, 2017, 44(7): 1078-1085.
- [39] ZOLA R S, BISOYI H K, WANG H, *et al.* Dynamic control of light direction enabled by stimuli-responsive liquid crystal gratings [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(7): 1806172.
- [40] CHAN K H, LIN H J, HWANG S J. Long-period fiber gratings based on blue phase liquid crystal/polymer composites [J]. *Liq. Cryst.*, 2022, 49(1): 50-58.
- [41] FAN X Y, CHEN H L, ZHENG Y, *et al.* Ultrasensitive fiber-optic temperature sensor based on cascaded Sagnac interferometers with a nematic liquid crystal film [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 152: 108169.
- [42] XU Y N, YUAN J H, QU Y W, *et al.* Ultra-short polarization beam splitter based on rhombic structure dual-core photonic crystal fiber with a central hole filled nematic liquid crystal [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2023, 40(1): 206-214.



王龙超(2000-),男,山东青岛人,硕士研究生,2022年于太原理工大学获得学士学位,主要从事随机激光器方面的研究。

E-mail: wanglongchao1148@link.tyut.edu.cn



朱益志(1989-),男,贵州平塘人,博士,副教授,2021年于东南大学获得博士学位,主要从事半导体光电子器件、新能源材料与器件、超快光谱学的研究。

E-mail: zmxzzhu@163.com



高少华(1989-),男,山西吕梁人,博士,讲师,2019年于南开大学获得博士学位,主要从事随机激光器及其传感应用、液晶激光器等领域的研究。

E-mail: gaoshaohua@tyut.edu.cn



张明江(1976-),男,山西介休人,博士,教授,2011年于天津大学获得博士学位,主要从事光子集成混沌半导体激光器、分布式光纤传感技术等领域的研究。

E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn