

文章编号:1007-2780(2020)07-0697-13

胆甾相液晶多重乳液微结构激光特性的研究进展

罗炜程, 车凯军, 李森森, 陈鹭剑*

(厦门大学 电子科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘要:染料掺杂的带边胆甾相液晶微激光器因阈值低、无需反射镜的特点,自提出以来便一直是研究热点。具有复杂微结构的胆甾相液晶液滴是一种新颖的三维全向微激光器,兼具有小型化、集成化与波长可调谐的特性,更是引起了液晶非显示领域研究者的广泛兴趣。其复杂的球形核壳微结构,促使诸如分布反馈、回音壁和法布-珀罗等多种激光模式的产生。而玻璃毛细管微流控技术的出现,使大规模制备单分散、尺寸可控的胆甾相液晶液滴成为可能,同时为制备结构复杂的多重乳液提供了必要条件。本文简要介绍了制备液晶乳液所使用的玻璃毛细管微流控技术,并综述了近年来与单重乳液胆甾相液晶液滴及多重乳液胆甾相液晶核壳微结构中的激光行为相关的研究工作。

关键词:全向激光;玻璃毛细管微流控技术;胆甾相液晶;乳液;液滴;核壳微结构

中图分类号:O753⁺.2;TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203507.0697

Review on laser properties of cholesteric liquid crystals with multiple-emulsion microstructures

LUO Wei-cheng, CHE Kai-jun, LI Sen-sen, CHEN Lu-jian*

(School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Dye-doped band-edge cholesteric liquid crystal (CLC) microlaser has been one of the focus of academic researches ever because of intrinsic properties, such as low threshold and mirrorless. As a novel three-dimensional omnidirectional microlaser, CLC emulsion droplets with complex microstructures exhibit appealing characteristics, such as miniaturization, integration and wavelength tunabilities, etc., arousing broad interests in the research field of liquid crystals (LCs) for non-display applications. The complex spherical core-shell microstructure results in the generation of a variety of laser modes such as distributed feedback (DFB) mode, whispering gallery (WG) mode and Fabry-Pérot (FP). The rapid development of glass-capillary microfluidic technique makes it possible to produce monodispersed CLC droplets with controllable sizes, providing conditions that are necessary for the fabrication of multiple emulsions with complex microstructures. In this review, the glass-capillary microfluidic technique is briefly introduced for the production of monodispersed LC emulsions. And the recent studies on the laser behavior in both the single-emulsion CLC droplets and multiple-emulsion CLC core-shell microstructures are presented and well discussed.

收稿日期:2020-03-06;修订日期:2020-03-22.

基金项目:国家自然科学基金(No.61675172)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61675172)

* 通信联系人, E-mail: lujanchen@xmu.edu.cn

Key words: omnidirectional laser; glass-capillary microfluidic technique; cholesteric liquid crystal; emulsion; droplets; core-shell microstructures

1 引言

作为一种“自下而上”的自组装微结构,胆甾相液晶(Cholesteric liquid crystals, CLCs)能够自发地形成周期性的螺旋结构,引起了人们的广泛关注。其液晶分子的指向矢沿着螺旋轴的方向均匀扭转,从而形成折射率的周期性调制并表现出一维的光子带隙。基于独特的手性结构,当入射光的波长位于光子带隙内时,胆甾相液晶表现出了特有的选择性反射,即具有相同手性的光将被反射,而具有相反手性的光将完全透过^[1-2]。反射光的中心波长由公式 $\lambda = np$ 决定, n 是平均折射率,而 p 则是胆甾相液晶的螺距,等于指向矢沿着螺旋轴方向旋转 360° 后所经过的长度。而胆甾相液晶的螺距 p 对温度、光场、磁场以及电场等外界条件敏感,因而在外场作用下可以调控布拉格反射(Bragg Reflection)波长的移动,大量的可调谐反射型光学器件研究基于该原理展开。

胆甾相液晶通常被约束在厚度为几微米到几十微米的传统液晶盒中,导致器件整体体积的增大,不利于器件的集成化。同时,内部液晶分子的排布受到液晶盒表面锚定条件的影响较大,因此,波长的调谐过程通常是不连续的,且器件只有在特定的方向上才能工作^[3]。另一方面,通过乳化(Emulsification)技术,特别是微流控制备技术,使得胆甾相液晶的结构和尺寸调控成为可能。每个胆甾相液晶液滴及液晶核壳微结构都可以看成是一个小型化的光学器件,方便集成化,且易于大规模生产。液滴及核壳微结构中的胆甾相液晶的螺旋轴方向排布受外侧水相溶液及胆甾相液晶两侧水相溶液的调控,当水相溶液对液晶层提供平面取向(Planar alignment)或者切向取向(Tangential alignment)的锚定条件时,螺旋轴将垂直于水相与油相的交界面,沿着径向方向排布,整体上呈现球形对称性,此时器件将具有三维的全向工作的特性。

作为一种新型的三维光学器件,核壳微结构中的胆甾相液晶的螺距仍然受到外界温度的调控,其反射带将随温度发生改变,从而有望被用于

室温的温度传感器^[4]。特别地,液滴及核壳微结构中的液晶排列有序性容易被外界水溶液中引入的表面活性剂或者生物分子所破坏,因此可以被用在高灵敏度和快速响应的PH值的传感及酶的生物传感上^[5-6]。与此对应,通过混配出含有反应型液晶单体(Reactive mesogen, RM)的胆甾相液晶混合物,在光聚合的条件下,可以制备出结构稳定,机械强度高以及具有良好可逆性的胆甾相液晶液滴及胆甾相液晶球壳结构^[7-10]。当多个胆甾相液晶液滴或核壳微结构之间的距离足够近时,由于特殊的选择性光反射,可以在正交偏光反射的条件下观测到多彩的反射斑点,该现象称为“交叉通信”(Cross-communication),有望应用于全光通信光开关及光学防伪标签上^[11]。更为有趣的是,当胆甾相液晶的反射带波长与可见光的波长相当时,整体上呈现出的“结构色”(Structural colors),更是引起了研究者的兴趣。基于这种新颖的结构色特征, Kim 课题组提出了一种由水凝胶包覆的尺寸与壳厚可控的具有核壳微结构的胆甾相液晶光子墨水微胶囊(Photonic ink capsule)^[12]。并更进一步通过在光聚合的油性球壳与胆甾相液晶内核之间引入一层取向层或是选择手性相反的胆甾相液晶作为内核和外球壳,制备出了具有油/水/油/水(Oil-in-water-in-oil-in-water, O/W/O/W)三重乳液结构的新型光子墨水微胶囊,在可分散与可注射的微传感器及光学防伪上具有潜在的应用^[13-14]。此外,研究者们更是基于胆甾相液晶特有的光子带隙,通过在水/油/水(Water-in-oil-in-water, W/O/W)结构中采用发光氨溶液内核和胆甾相液晶外壳实现化学发光的调控,或是在 O/W/O/W 结构中采用上转换(Upconversion)油性内核和胆甾相液晶外壳产生三重态-三重态湮灭(Triplet-triplet-annihilation, TTA)上转换发光^[15-16]。

除此之外,胆甾相液晶液滴及核壳微结构中的激射行为更是成为近年来的研究热点。自1998年 Kopp 等人和 Taheri 等人首次报道了胆甾相液晶中的带边激射(Band-edge lasing)行为以来,染料掺杂胆甾相(Dye-doped CLC, DDCLC)液晶激光器由于阈值低、波长可调及无

需反射镜(Mirrorless)的特点,迅速成为了激光领域的研究热门^[17-18]。带边激光的基本原理是:位于胆甾相液晶光子带隙带边的光子群速度最小,从而使光子态密度(Density of state, DOS)得以积累并达到最大值,若此时掺杂的染料的荧光谱与光子带隙的带边重合,在合适的光泵条件下,便会产生对应波长的激光。然而,传统的平面态 DDCLC 激光器仍然存在体积较大,不利于集成的特点。同时,由于激光是沿着螺旋轴的双向出射,因此限制了其应用领域。而胆甾相液晶液滴及核壳微结构激光器则具有易于大量制造,方便小型化和集成化的特点。由于螺旋轴方向是沿着径向排列的,因此,泵浦光可以从任意方向入射,且出射的激光的方向也是全向的(Omnidirectional),是一种三维的全向激光。基于独特的全向激光的特性,有望被应用在全息、激光显示、集成光子学、生物与化学传感以及生物医学成像等方面。更为有趣的是,由于特有的球形结构,除了基于胆甾相液晶光子带隙的分布反馈(Distributed feedback, DFB)激光外,诸如回音壁模(Whispering gallery mode, WGM)激光和分布布拉格反射(Distributed Bragg reflection, DBR)模式激光同样可以在该结构中被观测到。

因此,本文将重点介绍近年来与胆甾相液晶液滴及多重核壳微结构中的激光行为相关的工作。

2 微流控制备技术

通过将少量的胆甾相液晶分散在不相溶的液体中,并使用如机械搅拌、超声和振荡等乳化方式,可以在短时间内得到大量的单重胆甾相液晶乳液。在该过程中,所选取的液体除了需要满足互不相溶的要求外,往往还起到界面稳定与诱导液晶取向的作用。比如,常见的甘油和聚乙烯醇(PVA)能够为界面处的液晶分子提供平面锚定条件,从而使胆甾相液晶的螺旋轴沿着径向排列。然而,通过上述方法得到的单重乳液往往尺寸上不均匀,且形态难以控制。尤其在制备多重乳液的过程中,往往需要进行多步的乳化过程,而前一步得到的乳液的多分散性(Polydispersed)会进一步影响后续乳液的尺寸和形态,因此,得到单分散(Monodispersed)的多重乳液将变得尤为困难。

微流控技术的出现,为制备单分散的单重或多重乳液提供了有效的解决方案。常见的制备微流控芯片的材料可以是硅、石英、玻璃或是诸如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)等有机聚合物^[19-20]。而硅、石英和玻璃这类材料具有良好的化学惰性和热稳定性,且具有良好的可重复使用性,因此常常被用在制备单重的胆甾相液晶乳液与多重的核壳微结构乳液上。尤其是 Weitz 课题组发明的基于同轴聚焦流(Coaxial flow-focusing)乳化的玻璃毛细管微流控装置,更是在制备多重乳液的胆甾相液晶核壳微结构中得到了广泛的应用^[21]。

制备单重乳液胆甾相液晶液滴的玻璃毛细管装置图如图 1(a)所示,装置左端的注射管和右端的收集管是由外径相同的玻璃毛细圆管经过拉锥(tapered)形成的,且收集管的锥口口径大于左侧注射管的口径。同时,将注射管和收集管嵌套在内径与圆管外径相同的方管中,由于三者之间的尺寸匹配关系,此时三者将同轴。在制备单重乳液的过程中,胆甾相液晶在微流泵的推动下,由左侧的发射管注入装置中,而作为外相的水相溶液则由发射管与外侧方管间的间隙注入,形成同轴流体并破碎成壳形成液滴。而制备双重乳液(Double emulsion)的装置与制备单重乳液的装置类似,如图 1(b)所示。内相液体同样从左侧的发射管注入,中间相液体从发射管与方管间的间隙注入,而外相液体则由收集管与方管间的间隙注入。

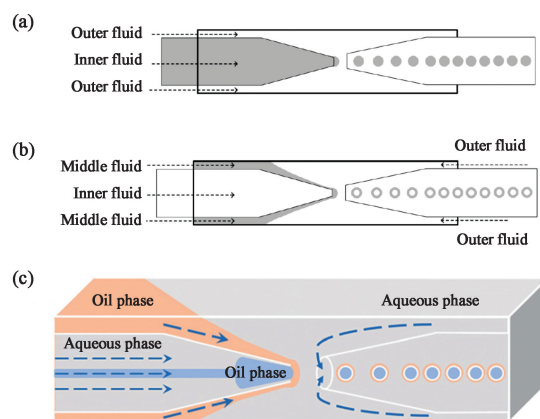


图1 制备单重(a),双重(b)以及三重(c)乳液的同轴玻璃毛细管微流控装置示意图^[22-23]。

Fig.1 Schematic diagram of coaxial glass capillary microfluidic setups for producing single (a), double (b) and triple emulsions (c)^[22-23].

反向注入,从而形成三相的同轴流体,并最终形成双重乳液。值得注意的是,相邻相的液体之间需要满足互不相溶的特点。因此,通过该装置可以制备出以胆甾相液晶作为中间相球壳的 W/O/W 结构或是以胆甾相液晶作为内相球核的 O/W/O 结构的双重乳液。而在制备更为复杂的三相乳液 (Triple emulsions) 的过程中,改进的装置则是在左侧已有的注射管中再嵌入一根直径与锥口口径更小的毛细玻璃圆管,同样地,该圆管需要经过校准以满足与其他圆管同轴的要求,如图 1(c) 所示。因此,通过该装置可以制备出将胆甾相液晶作为内相球核和最外相球壳的 O/W/O/W 结构的三重乳液。

除了可以获得单分散特性外,采用微流控制制备技术的另一优点是制备出来的乳液尺寸可控。各相的尺寸除了与流体本身的粘度、相邻液相之间的表面张力相关外,玻璃毛细管的直径、锥口的口径以及各相的流速都可以用来调整制备出来的液滴与壳的尺寸。其中,从同轴流体形成液滴的过程与 Rayleigh-Plateau 不稳定性相关,此时,在界面张力和外相液体剪切力的共同作用下,同轴流体通过破碎成壳减小了总体的表面积,从而形成了稳定的液滴。而胆甾相液晶的粘滞性高,因此通常会导致射流 (Jet) 的产生。在不同的流速条件下,形成过程可基于滴落 (Dripping) 或喷射 (Jetting) 机制^[12,21]。在较低的流速下,其形成机制与滴落相关,此时,各相流体的速度剖面大致上是平坦的,射流的成长时间大于流体的切断 (Pinch-off) 时间,一旦射流直径足够大时,就会在 Rayleigh-Plateau 不稳定性的驱动下形成液滴。因此液滴或球壳在收集管的入口处产生,直径随着流速的增加而减小,且直径趋近于锥口的口径。而当流速超过阈值时,其形成机制则转变为喷射,流体间粘度差导致两相流体之间的流速不同,其速度剖面呈现出抛物线形的层流状态,并使界面处的粘性应力增大,抑制了 Rayleigh-Plateau 不稳定性,射流的成长时间小于流体的切断时间,导致乳液在收集管内产生。此时,乳液的生成频率下降,且尺寸大于射流的尺寸,并随着流速的增加呈现出连续的增大。在制备多重乳液过程中,多种流体同轴流动,每一相流体都可以基于上述两种机制之一形成液滴或球壳。尤其当内相与中间相液滴形成的相对速度接近时,且同时为滴落

机制或喷射机制时,可以保证产生的多重乳液中只含有一个内核。Uchida 等人研究了流速对制备出来的胆甾相液晶球壳尺寸的影响,并进一步研究了球壳厚度对液滴光子带隙的影响^[24]。除了上述方法外,制备出的液滴及多重乳液的结构及尺寸同样可以通过交变电压、添加特定溶剂以及渗透压的作用来调节^[25-28]。

3 核壳微结构的激光特性研究

3.1 单重乳液胆甾相液晶液滴的激光特性

对于平面态的胆甾相液晶而言,在垂直于螺旋轴的方向上呈现出一维的光子带隙,其结构示意图如图 2 所示。此时,通过掺杂有机染料,并在合适的光泵条件下,带边激光将沿着垂直于螺旋轴方向出射。类似的,胆甾相液晶液滴中的带边激射行为的研究也同样基于该原理展开。

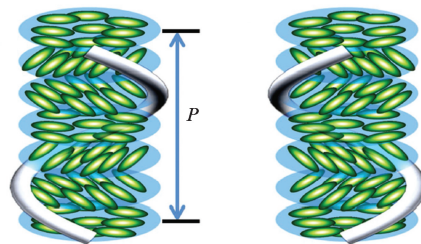


图 2 胆甾相液晶的结构示意图^[2]

Fig.2 Schematic diagram of cholesteric liquid crystals^[2]

胆甾相液晶液滴中的激光行为由 Humer 和 Mušević 首次提出^[29]。通过将掺杂有染料的胆甾相液晶与甘油混合,由于两者之间的不相混溶的特性,能够自发地形成直径为 15~50 μm 的胆甾相液晶液滴。同时,甘油能够诱导界面处的液晶分子的平行取向,因此,在自组装的作用下,液滴内的螺旋轴将沿着径向排布,在径向方向上产生了折射率的周期性调制,从而形成了布拉格“洋葱”谐振腔 (Bragg onion resonator),液晶分子的排列结构示意图如图 3(a) 所示。当泵浦光的能量大于阈值 (threshold) 时,可以在液滴的中心观测到明亮的红色激光光斑,且随着泵浦能量的进一步增强,亮度得到了显著的增强。同时,随着液滴尺寸的增大,阈值将进一步降低。此外,如图 3 (b) 所示,通过对比液滴的激射谱与相同样品的平面态 (Planar state) 的反射谱可以发现,其激射

波长位于反射带的带边,可以推断这是一种典型的带边激射现象。且在整个立体角范围内,激射光的强度具有极高的均匀性。更重要的是,液晶的螺距仍然受到外界温度的影响,在温度改变的情况下,激射波长也会发生对应的移动,因此,这种三维全向发射的微激光器有望被用在远程非接触式的自主的温度传感器上^[30]。

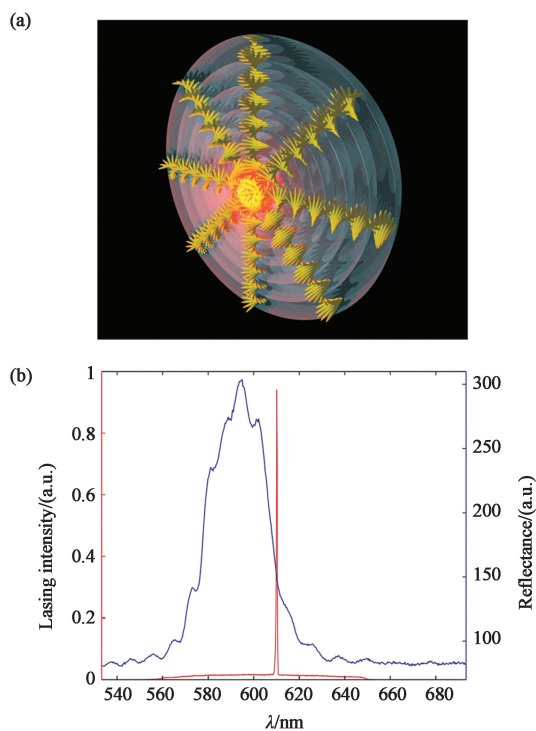


图3 (a)表面平行取向胆甾相液晶液滴内液晶分子的排列示意图;(b)胆甾相液晶液滴的激光谱与相同配比的液晶混合物的平面态反射谱^[29]。

Fig.3 (a) Schematic view of the arrangement of CLC molecules in a cholesteric microdroplet with parallel anchoring at the surface; (b) Lasing spectrum of a CLC droplet and the reflectance spectrum of the planar state with the same CLC mixture^[29].

通过改变温度可以实现对胆甾相液晶液滴的激光波长的调节,同样,在样品中添加光敏的偶氮手性剂(Azo-chiral dopant),通过光控的方式来调整出射的激光波长也是一种可行的方式。李佳荣团队通过在CLC液滴中添加偶氮手性剂,在弱紫外光(Ultraviolet, UV)及强紫外光条件下,分别实现了激光波长的可调性和开关切换^[31]。如图4(a)所示,在强度为 $472 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的弱紫外光

照射条件下,偶氮手性分子以较低的速率发生光致异构化,导致螺距的缓慢增大,从而使激光的波长在0~20 min内从563 nm红移到586 nm处。相对地,在强度为 $2.8 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 的强紫外光条件下照射5 s后,大量的偶氮分子迅速发生光致异构化,严重破坏了内部液晶分子排列的有序性,引起激光强度的迅速下降。此后,在强度为 $2.03 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 的强蓝光(波长为442 nm)条件下照射30 s后将发生相反的异构化过程,重构内部的分子排列,因此激光的强度再次上升,实现了激光的开关切换,该过程如图4(b)所示。实验还证明这种激光强度的开关切换过程具有良好的重复性。郑致刚等人通过将含有光敏手性剂的胆甾相液晶乳液涂覆在单层的基板上,实现了宽调谐范围的光可调激光^[32]。如图4(c)所示,在强度为 $9.2 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 的紫外光(波长为365 nm)照射下,该激光波长在50 s内从566 nm红移到578 nm处,波

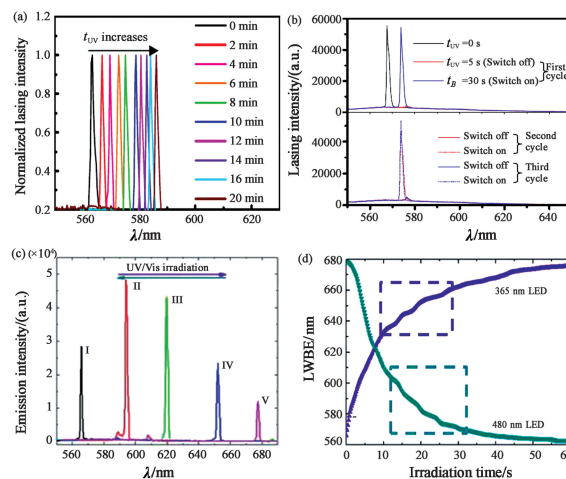


图4 染料掺杂胆甾相液晶液滴在(a)弱紫外光条件下的激光波长随时间的变化曲线及(b)强紫外光和强蓝光条件下的激光强度可切换性及重复性曲线^[31]。光敏胆甾相液晶乳液的(c)光调谐过程中的激光光谱及(d)长带边随照射时间的变化曲线^[32]。

Fig.4 (a) Variation of the lasing wavelength with increasing irradiation time under weak UV light; (b) Spectrum of laser intensity-switchability and repeatability under strong UV light and strong blue light of a dye-doped CLC microdroplet^[31]; (c) Laser spectrum during the photo-tuning; (d) Long wavelength band-edge versus irradiation time of photoresponsive CLC emulsion^[32].

长的可调谐范围达到了 112 nm,且在强度为 7.3 mW/cm^2 的可见光(波长为 480 nm)照射下,波长在 55 s 内从 578 nm 处蓝移到起始的 566 nm 处,证明该过程是可逆的。此外,作者还从分子尺度上对这种波长调整机制做了详细地研究。更重要的是,如图 4(d)所示,长带边的位置随照射时间的变化基本上是连续的,只有少量的地方出现了不明显的跳跃,这意味着,在光调谐过程中,激光的波长是准连续(Quasi-continuous)的,这是通常的平面取向盒中无法达到的。

除了上述所提到的带边激光外,胆甾相液滴中还存在着另一种特殊的激光模——回音壁模式。回音壁模的产生需要借助光的全内反射(Total

internal reflection, TIR)。实际上,在前述的工作中,通过采用折射率更高的外相溶液(如甘油)来抑制回音壁模的产生。基于向列相液晶液滴中的回音壁模式激光已有不少的工作基础^[33-37]。李寒阳和刘永军等团队则对空气环境中胆甾相液晶液滴中的回音壁模式激光做了详细的研究^[38-40]。如图 5(a)所示,通过采用 532 nm 的激光对直径 $\sim 17 \mu\text{m}$ 的染料掺杂胆甾相液晶液滴直接耦合泵浦,在染料的荧光谱的范围内可以观测到多峰的回音壁模式的激光输出。类似的,如图 5(b)所示,回音壁模激光的波长同样受到温度的调控。带边激光波长的移动通常是由于螺距的改变引起的。然而,在该研究中,由于折射率受到温度的调控,从而使光程发生变化而引起波长的移动,同样可以作为温度传感器使用。如图 5(b)中的插图所示, TM_{175}^1 模的波长随温度的变化是线性的,且热灵敏度约为 $0.96 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。除此之外,与单独研究一个胆甾相液晶内的激光行为不同,罗丹等人还研究了多个胆甾相液滴之间由于多重散射(multiple scattering)而引起的随机激光现象^[41]。

3.2 双重乳液胆甾相液晶核壳微结构的激光特性

Uchida 等人最先制备出可以产生激光发射的双重乳液(W/O/W)胆甾相液晶核壳微结构。其结构示意图如图 6(a)所示^[42]。在该结构中,外相的球壳由胆甾相液晶构成,而最内相和最外侧的水相溶液均是含有 10% PVA 的水溶液。水相溶液在稳定双重乳液的同时,也为胆甾相液晶两侧提供平面锚定条件。而该结构的一个重要特点是,通过在内核的水相溶液或外壳的胆甾相液晶中添加亲水(Hydrophilic)或疏水(Hydrophobic)的有机染料,可以实现不同模式的激光输出。如图 6(b)所示,在侧向泵浦条件下,当在内相的 PVA 水溶液中添加有机染料若丹明 B 时,在 510 nm 的泵浦光下,产生了中心波长为 619 nm 的 DBR 模式激光。此外,如图 6(c)所示,若在胆甾相液晶的球壳中添加另一种有机染料 DCM,在 450 nm 的泵浦光作用下,可以在 566 nm 和 640 nm 附近处分别产生单峰的 DFB 模式激光和多峰的激光,作者认为,多峰应该与球腔的回音壁模式激光有关。

本课题组通过在胆甾相液晶球壳中添加新型的可见光驱动手性分子,实现了具有“光泵浦-自

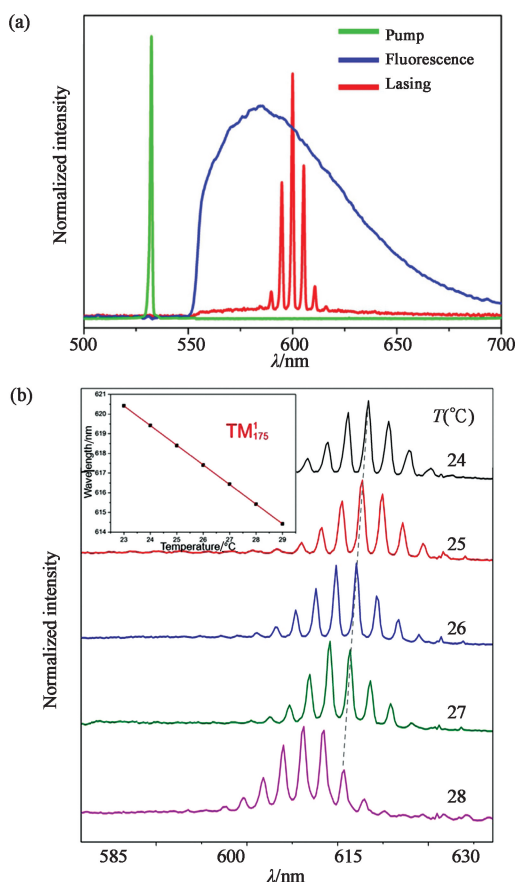


图 5 (a)泵浦光、DCM 荧光及胆甾相液晶液滴的激光发射归一化强度谱^[38]; (b)胆甾相液晶液滴的激光光谱随温度的变化曲线^[39]。插图: TM_{175}^1 模的激光波长随温度的变化曲线。

Fig.5 (a) Normalized intensity spectrum of pump laser, DCM fluorescence and lasing emission from a CLC microdroplet^[38]; (b) Lasing spectrum as a function of temperature^[39]. Inset: temperature dependence of the lasing wavelength of the mode TM_{175}^1 .

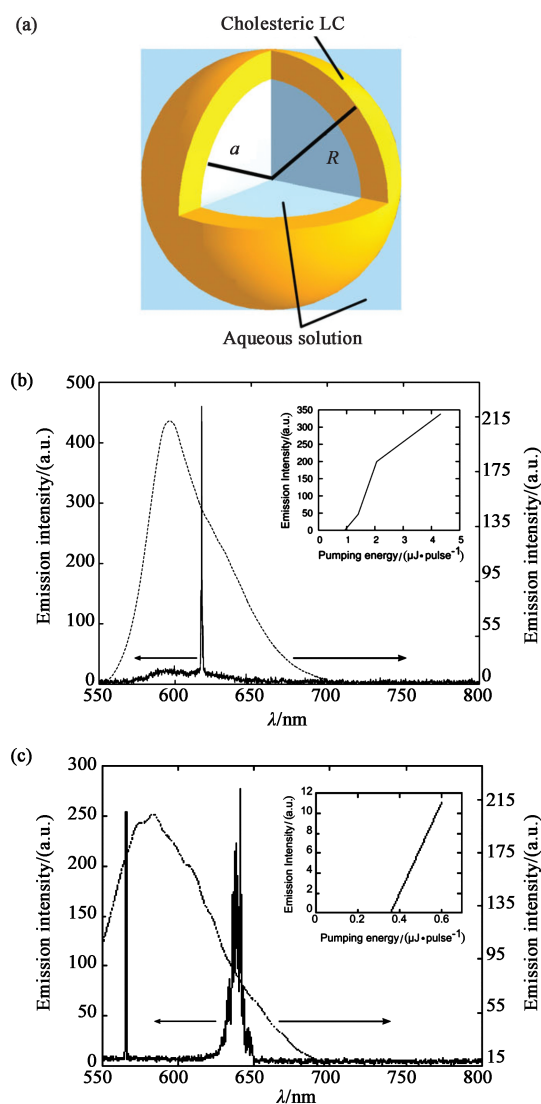


图 6 (a)含有胆甾相液晶球壳的水/油/水双重乳液的结构示意图;(b)溶解在水相中的若丹明 B 染料及胆甾相液晶球壳的 DBR 模式发射谱;(c)溶解在液晶中的 DCM 染料及胆甾相液晶球壳的 DFB 模式发射谱。(b)和(c)中的插入图分别表示胆甾相液晶球壳在 619 nm 和 566 nm 处的 DBR 模式和 DFB 模式激光强度随泵浦能量的变化曲线^[42]。

Fig.6 (a) Schematic of a W/O/W double emulsions with a CLC shell; (b) Emission spectrum of rhodamine B dissolved in water and a CLC shell of DBR mode; (c) Emission spectrum of DCM dissolved in CLC and a CLC shell of DFB mode. The inset in (b) and (c) show the emission intensity as a function of pumping energy at wavelength of 619 nm for DBR mode and 566 nm for DFB mode of CLC shells, respectively^[42].

调谐”(Pumping-self-tuning)特性的核壳微结构^[43]。在第一次泵浦能量下,该结构产生了波长为 596.6 nm 的 DFB 模式激光,有趣的是,泵浦光不仅会激发其中的染料分子,同样也会导致光敏手性分子发生异构化,因此,随着泵浦次数的增加,激射的波长逐渐红移到 640 nm 处,该过程如图 7(a)所示。此外,我们还研究了波长的移动速度与泵浦能量和泵浦时间间隔间的关系。如图 7(b)所示,更短的泵浦时间间隔和更强的泵浦能量均能加快波长的移动速度,然而,波长的移动范围始终维持在约 590~640 nm 之间,证明其移动范围只与泵浦光的波长相关。同时,通过将样品放置在黑暗的环境中 12 h,激射波长能够回到其初始位置。因此,该结构有可能被应用在特征识别及传感上。

通过在 W/O/W 双重乳液的内核水相中添加 Fe_3O_4 磁性纳米粒子,本课题组展示了一种非侵入式(noninvasive)的磁性可移动的微激光器^[44]。

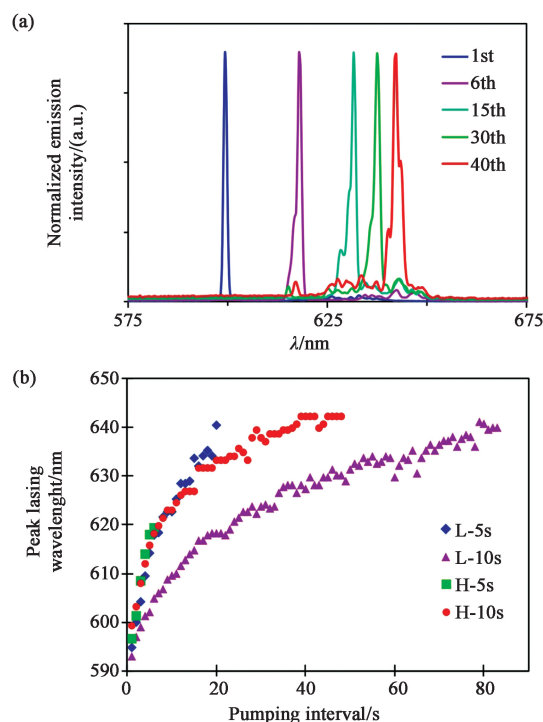


图 7 (a)不同泵浦次数下的光响应胆甾相液晶球壳的激光波长变化;(b)不同泵浦能量的不同泵浦时间间隔下的激光波长变化^[43]。

Fig.7 (a) Variation of lasing wavelength of CLC shells after different pumping times; (b) Shift of lasing wavelength after different pumping intervals with different pumping energy^[43].

基于“水-油不相溶”的特性,内核水相中的磁性粒子难以进入外层胆甾相液晶球壳的增益物质中,因而不会对激光性能造成明显的影响。由于胆甾相液晶所采用的手性剂的螺旋扭转力(Helical twisted power, HTP)对温度敏感,因此,随着温度从 28 °C 升高到 32 °C,激光的波长从 637 nm 逐渐蓝移到 590 nm,如图 8(a)所示。此外,我们研究了球壳的厚度对激光阈值的影响。如图 8(b)所示,当壳厚从 12 μm 增大到 24 μm 时,增益随着壳厚的增大而增大,因而激光阈值逐渐降低,当进一步增大壳厚时,所增加的增益不能够明显地补偿增加的损耗,因而阈值无法进一步显著降低。

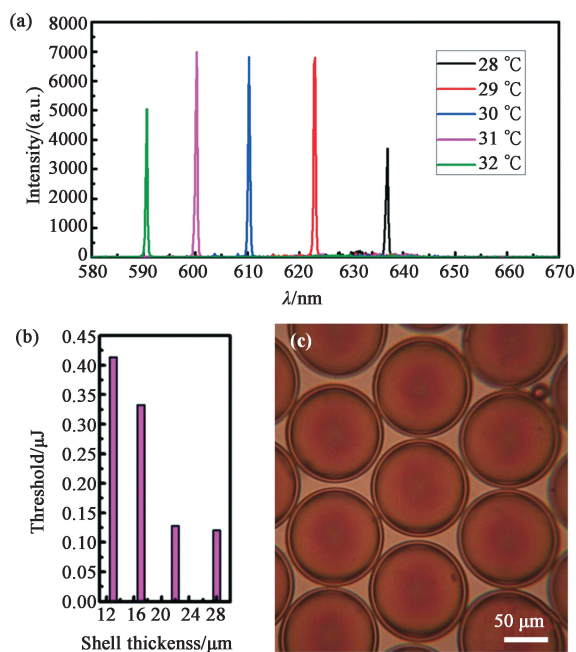


图 8 (a) 磁性可移动的胆甾相液晶球壳的激光波长随温度的变化曲线; (b) 激光的阈值与球壳厚度间的关系图; (c) 球壳在磁场作用下的二维六边形排列的显微图^[44]。

Fig.8 (a) Variation of the lasing wavelength of magnetically transportable CLC shells with different temperatures; (b) Lasing threshold versus the thickness of shells; (c) Microphotograph of shells packed into two dimensional hexagonal arrays under magnetic fields^[44].

该结构中的最显著特点是磁性可移动性,如图 8(c)所示,在磁场的控制下,双重乳液的核壳微结构实现了二维六边形的紧密排列。虽然在强磁场作用下可能会破坏该结构,但是通过增加球

壳厚度的方法能够增加其稳定性,且在磁场作用下发生变形的乳液在移去磁场后能够自动恢复为原有的状态。同时,在该工作中,我们还通过建立模型分析了球壳的移动速度与最外相的溶液浓度及内核的直径间的关系。理论和实验结果均表明,较高的连续相溶液浓度和较小的内核直径均会导致移动速度的下降。此外,使用磁性笔可以将胆甾相液晶微球壳排列成更为复杂的几何图形^[22]。这种磁性可移动的微激光器为微通道内的可控制照明及新型的防伪识别提供新的可能。

如前所述,在胆甾相液晶核壳微结构中可能存在 DBR(即法布-珀罗, Fabry-Pérot, FP)、DFB 及 WGM 三种模式的激光,因此,本课题组进一步研究了在端面泵浦下这 3 种激光模式行为及模式之间的竞争关系^[45]。如图 9(a)~(c)所示,在不同的泵浦光束直径下,出现了不同的激光模式。当泵浦光束直径为 1.2 mm 时,出现了单峰的激光,且激光的波长与胆甾相液晶的长带边吻合,应该对应于 DFB 模式激光。当泵浦光束直径扩大到 4.5 mm 时,在 DFB 模式激光的两侧均有不同模式的激光产生,右侧多峰的激光模式位于增益的最大处,对应于 WGM 模式。而左侧的激光模式则位于胆甾相液晶的禁带内,对应的模式最可能为 FP 模式,在该结构中,产生该模式的 FP 腔的模型如图 9(d)所示。而当进一步增大光束直径时,DFB 模式的激光消失,FP 及 WGM 模式激光得到了增强,可见,3 种激光模式间存在着竞争关系。通过改变温度调节胆甾相液晶的反射带位置时,我们发现,DFB 模式和 FP 模式的激光波长的移动方向与反射带的移动方向一致,且两种模式的激光波长始终位于长带边位置和光子带隙内。如图 9(e)~(g)所示,除了已有的样品,我们选取了胆甾相液晶液滴及在已有样品的水相内核中加入聚苯乙烯(Polystyrene, PS)纳米粒子的样品进行观测对比。可以看到,前者液滴不存在 FP 腔结构,而后者引入的纳米粒子导致光的散射,增大了 FP 腔内的损耗。在这两个样品中均抑制了 FP 型激光的产生,验证了之前的模型。此外,我们还通过渗透压作用调控核壳微结构的尺寸及胆甾相液晶球壳的厚度,对不同的激光模式的产生进行了调控。对不同尺寸下的自由谱宽(Free spectral range, FSR)的计算也进一步证实了 WGM 模式激光的存在。

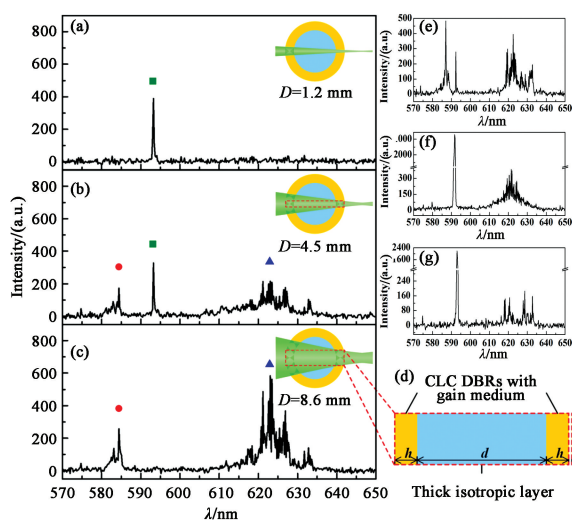


图9 胆甾相液晶球壳在泵浦光束直径为(a)1.2 mm, (b)4.5 mm 及(c)8.6 mm 下的激光发射谱; (d)核壳微结构构成的法布里-珀罗谐振腔模型。在相同的泵浦能量下, (e)胆甾相液晶球壳, (f)胆甾相液晶液滴及(g)水相内核含有聚苯乙烯纳米粒子的胆甾相液晶球壳的激光发射谱^[45]。

Fig.9 Lasing emission spectrum of CLC shells pumped with beam diameters of 1.2 mm (a), 4.5 mm (b) and 8.6 mm (c); (d) Model of FP resonator in the core-shell structures; Lasing emission spectrum of (e) a CLC shell, (f) a CLC droplet and (g) a CLC shell with PS nanoparticles in aqueous core under same pumping energy^[45].

将上述实验结果与已知的单重乳液胆甾相液晶液滴的激光特性进行对比分析,进一步确认下述事实:(1)使用折射率高于液晶的水相作为外相,可以有效抑制 WGM 模式;(2)对于单重乳液胆甾相液晶液滴而言,使用折射率高于液晶油相的甘油水相作为外相时,由于 WGM 模式集中于靠近壳的位置,而 DFB 模式集中于核,两者难以产生竞争;(3)对于双重乳液而言,由于内核水相的增大,DFB 模式将更集中于靠近壳的位置。因此,DFB、FP 将与 WGM 模式共同竞争壳上的增益。这种竞争关系可以简单地通过改变端泵激光的光束直径进行改变,这本质上是改变不同模式的增益体积。上述研究为此类胆甾相液晶核壳微结构中不同激光模式的调控提供思路。

Uchida 等人还基于渗透压作用降低了胆甾

相液晶 W/O/W 双重乳液中的 DBR 模式激光的阈值^[28]。作者认为,最内相在渗透压的作用下减小了内核的直径,从而在减小腔体长度的同时,也抑制了光损耗,从而达到了降低全向 DBR 模式激光阈值的目的。激光阈值的降低,有助于该微激光器被应用在更多潜在的设备上。

3.3 三重乳液胆甾相液晶核壳微结构的激光特性

Kim 课题组制备了复杂的重重乳液(O/W/O/W)中的胆甾相液晶核壳微结构激光器,结构示意图如图 10(a)所示。其内核是染料掺杂的胆甾相液晶,内壳是含有 PVA 和甘油的水相溶液,作用同样是为内核的液晶提供表面锚定条件。外壳则是有机硅先驱体,在光交联的作用下能够形成弹性固体的球壳,从而增强了结构的机械稳定性并令该结构的形态具有可调性^[46]。如图 10(b)所示,在两块玻璃平板的压缩下,整体

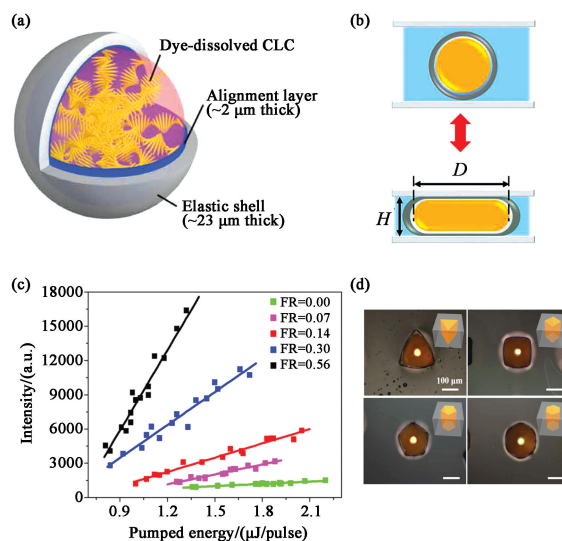


图 10 (a)胆甾相液晶光子胶囊谐振腔的结构示意图;(b)两片玻璃板压缩后的胶囊结构的侧视示意图;(c)5 种不同压缩率下的胶囊的激光强度随泵浦能量的变化曲线;(d)嵌入多边形孔中的胶囊的反射非偏光显微图^[46]。

Fig.10 (a) Schematic of a CLC photonic capsule resonator; (b) Schematic of side view of a capsule compressed by two glass plates; (c) Lasing emission intensity as a function of pumping energy with five different FRs; (d) Microphotograph of capsules inserted in polygonal holes taken in the reflection mode without polarization^[46].

结构从球体变为圆盘状,但内部水相溶液和油相的胆甾相液晶仍然是互不相溶的,在水相溶液的锚定作用下,内部胆甾相液晶的螺旋轴排列方向将发生改变。由于激光将沿着螺旋轴的方向出射,因此,在圆盘状的结构中,激光的出射方向将由原来的全向转变为垂直于玻璃平板的双向输出。此外,如图 10(c)所示,随着压缩率(Flattening ratio, FR)的升高,在垂直于玻璃平板的方向上,出射的激光强度发生了显著的增强。更进一步地,如图 10(d)所示,作者通过将该胶囊嵌入到具有多边形孔的 PDMS 模板中,使胶囊具备更为复杂的几何结构。除了垂直于模板的方向上有激光出射外,该多边形的胶囊中在垂直于多边形边的方向上,同样可以观测到激光输出。基于此,实现了对胶囊的激光出射方向及强度的控制,这种特性有望被应用于面向化学及生物医学应用的局部照明。

近期,本课题组深入研究了 O/W/O/W 三重乳液结构中的激光行为,与上述工作不同的是我们所采用的油性外壳是胆甾相液晶^[23]。在第一部分的工作中,三重乳液的内核和外壳均是由胆甾相液晶掺杂有机染料构成的,内核的染料是 DCM,而外壳掺杂的染料则是 PM597,从而构成了双增益(dual-gain)的三重乳液结构。如图 11(a)所示,在较小的光束直径下,只有球壳上的 DFB 模式能够得到足够的增益而产生激光。随着泵浦光直径增大到 4.5 mm,球壳及内核的 DFB 模式激光同时被激发,且球壳上产生了 WGM 激光。而在另一个样品中,由于内核直径较小,因此在相同的能量下,内核无法得到足够的增益,从而内核的 DFB 模激光无法被激发(图 11(a)下)。当泵浦光直径进一步增大到 8.6 mm 时,由于球壳上的 DFB 与 WGM 激光之间的竞争关系,导致 DFB 模式被抑制,而 WGM 得到了增强。除此之外,该结构的另一设计特点是:内核的胆甾相液晶的螺距对温度敏感,而外壳则不具有热敏性。因此,如图 11(b)所示,随着温度从 27 °C 增大到 32 °C 时,外壳产生的 DFB 及 WGM 激光的波长基本是不变的,而内核的 DFB 激光波长则会发生移动。值得注意的是,在 27 °C 到 29 °C 时的波长红移是由于激射波长从光子带隙的短带边跳跃到长带边导致的,而在 29 °C 以上的波长蓝移则与光子带隙长带边的移动密切相关。因此,

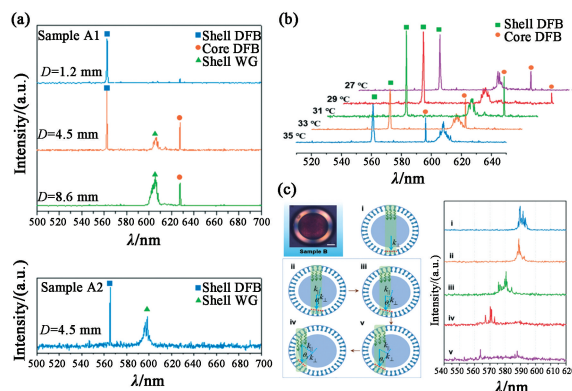


图 11 (a)不同泵浦光束直径下的两个双增益乳液的激光发射谱;(b)不同温度下的双增益乳液的激光发射谱;(c)单增益乳液的偏光显微镜图,5 个不同位置的泵浦光与乳液的耦合示意图及对应位置的激光发射谱^[23]。

Fig.11 (a) Lasing emission spectrum of two dual-gain emulsions with different pumping beam diameters; (b) Lasing emission spectrum of a dual-gain emulsion at various temperatures; (c) Polarized optical micrograph of a single-gain emulsion, schematic of the coupling between the pumping beam and the emulsion at five different positions and the corresponding lasing emission spectrum^[23].

这种结构有望被应用于双波长比值式温度计(Dual-wavelength-ratiometric thermometer)的应用上。

后续工作中,通过将各向异性的胆甾相液晶内核替换为各向同性的溴十六烷(1-bromohexadecane),同时移去了胆甾相液晶外壳中的有机染料,构成了一个单增益(single-gain)的三重乳液结构。在该结构中,我们研究了泵浦光与乳液的耦合位置对激光发射谱的影响。如图 11(c)所示,可以观测到多峰的激光输出,该激光输出可能与外壳构成的布拉格反射镜及内核与内壳水相溶液界面处构成的弱反射镜之间的光反射导致的混合模式(hybrid mode)或者内核与内壳水相溶液界面处的全反射导致的 WGM 相关。通过对乳液的不同位置进行泵浦,观测到发射波长移动的现象,符合混合模式的判断,同时从实验上验证了该模式与 WGM 之间的差异。通过对三重乳液结构的组合,实现了对双增益激光和单增益激光的灵活控制。

4 总 结

本文简要介绍了在制备单分散、尺寸可控的多重乳液胆甾相液晶核壳微结构中所采用的玻璃毛细管微流控技术及其原理,并综述了近年来科研工作者们对单重乳液胆甾相液晶液滴及多重乳液胆甾相液晶核壳微结构中的激光特性的研究。

其中,玻璃毛细管装置的出现,为大规模制备单分散的多重乳液提供了必要条件,且制备出的乳液的各相尺寸可以进行灵活的调节。而制备出的乳液内部的胆甾相液晶螺旋轴在两侧流体的作用

下呈现径向排布,使其成为一种全新的三维光学器件。通过添加有机染料分子并结合复杂的多重乳液核壳微结构,形成了一种小型化、集成化与波长可调谐的三维全向微激光器。除了传统的分布反馈模激光外,诸如回音壁和法布里-珀罗等模式的激光同样可以在该独特的球形微结构中被观测到。最新, Kim 团队报道了利用多组分混合溶液的液-液相分离机制制备多重核壳微结构的方法,且其微结构可以灵活地通过改变各组分的比例来进行调节^[47]。基于独特的激光特性,此类微激光器有望在全息、激光显示、集成光子学、生物与化学传感以及生物医学成像等方面发挥重要的作用,应用于“芯片实验室”(Lab-on-chip, LOC)。

参 考 文 献:

- [1] 李昌立,孙晶,蔡红星,等.胆甾相液晶的光学特性[J].液晶与显示,2002,17(3):193-198.
LI C L, SUN J, CAI H X, *et al.* Optical properties of cholesteric liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2002, 17(3): 193-198. (in Chinese)
- [2] BISOYI H K, BUNNING T J, LI Q. Stimuli-driven control of the helical axis of self-organized soft helical superstructures [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(25): 1706512.
- [3] FUNAMOTO K, OZAKI M, YOSHINO K. Discontinuous shift of lasing wavelength with temperature in cholesteric liquid crystal [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(12B): L1523-L1525.
- [4] IWAI Y, KAJI H, UCHIDA Y, *et al.* Temperature-dependent color change of cholesteric liquid crystalline core-shell microspheres [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2015, 615(1): 9-13.
- [5] JANG J H, PARK S Y. pH-responsive cholesteric liquid crystal double emulsion droplets prepared by microfluidics [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 241: 636-643.
- [6] LEE H G, MUNIR S, PARK S Y. Cholesteric liquid crystal droplets for biosensors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(39): 26407-26417.
- [7] KIM J G, PARK S Y. Photonic spring-like shell templated from cholesteric liquid crystal prepared by microfluidics [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(13):1700243.
- [8] NOH K G, PARK S Y. Smart molecular-spring photonic droplets [J]. *Materials Horizons*, 2017, 4(4): 633-640.
- [9] SEO H J, LEE S S, NOH J, *et al.* Robust photonic microparticles comprising cholesteric liquid crystals for anti-forgery materials [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(30): 7567-7573.
- [10] MYUNG D B, PARK S Y. Optical properties and applications of photonic shells [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(22): 20350-20359.
- [11] NOH J, LIANG H L, DREVENSEK-OLENIK I, *et al.* Tuneable multicoloured patterns from photonic cross-communication between cholesteric liquid crystal droplets [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(5): 806-810.
- [12] LEE S S, KIM B, KIM S K, *et al.* Robust microfluidic encapsulation of cholesteric liquid crystals toward photonic ink capsules [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(4): 627-633.
- [13] LEE S S, KIM S K, WON J C, *et al.* Reconfigurable photonic capsules containing cholesteric liquid crystals with planar alignment [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(50): 15266-15270.
- [14] LEE S S, SEO H J, KIM Y H, *et al.* Structural color palettes of core-shell photonic ink capsules containing cholesteric liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(23):1606894.
- [15] IWAI Y, KAJI H, UCHIDA Y, *et al.* Chemiluminescence emission in cholesteric liquid crystalline core-shell mi-

- crocapsules [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(25): 4904-4908.
- [16] KAND J H, KIM S H, FERNANDEZ-NIEVES A, *et al.* Amplified photon upconversion by photonic shell of cholesteric liquid crystals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(16): 5708-5711.
- [17] KOPP V I, FAN B, VITHANA H K M, *et al.* Low-threshold lasing at the edge of a photonic stop band in cholesteric liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(21): 1707-1709.
- [18] TAHERI B, MUNOZ A F, PALFFY-MUHORAY P, *et al.* Low threshold lasing in cholesteric liquid crystals [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology Section A Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2006, 358(1): 73-82.
- [19] 范一强,王洪亮,高克鑫,等.模块化微流控系统与应用[J].分析化学,2018,46(12):1863-1871.
FAN Y Q, WANG H L, GAO K X, *et al.* Applications of modular microfluidics technology[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(12): 1863-1871. (in Chinese)
- [20] 韩县伟,张洪武,罗洪艳,等.基于微流控液滴形成技术的聚乙烯醇微球制备[J].分析化学,2018,46(8):1269-1274.
HAN X W, ZHANG H W, LUO H Y, *et al.* Preparation of poly (vinyl alcohol) microspheres based on droplet microfluidic technology[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(8): 1269-1274. (in Chinese)
- [21] UTADA A S, LORENCEAU E, LINK D R, *et al.* Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device [J]. *Science*, 2005, 308(5721): 537-541.
- [22] LIN Y L, YANG Y J, SHAN Y W, *et al.* Magnetic nanoparticle-assisted tunable optical patterns from spherical cholesteric liquid crystal bragg reflectors [J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2017, 7(11):376.
- [23] CHE K J, YANG Y J, LIN Y L, *et al.* Microfluidic generation of cholesteric liquid crystal droplets with an integrative cavity for dual-gain and controllable lasing [J]. *Lab on a Chip*, 2019, 19(18): 3116-3122.
- [24] UCHIDA Y, IWAI Y, AKITA T, *et al.* Size control of cholesteric liquid crystalline microcapsules [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2015, 613(1): 82-87.
- [25] BELLOUL M, BARTOLO J F, ZIRAOUI B, *et al.* High-throughput formation and control of monodisperse liquid crystals droplets driven by an alternating current electric field in a microfluidic device [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(3):033112.
- [26] AKITA T, KOUNO H, IWAI Y, *et al.* Room-temperature fabrication of mono-dispersed liquid crystalline shells with high viscosity and high melting points [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(6): 1303-1307.
- [27] LOPEZ-LEON T, KONING V, DEVAIAH K B S, *et al.* Frustrated nematic order in spherical geometries [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(5): 391-394.
- [28] IWAI Y, IJIMA R, YAMAMOTO K, *et al.* Shrinkage of cholesteric liquid crystalline microcapsule as omnidirectional cavity to suppress optical loss [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020,8(6):1901363.
- [29] HUMAR M, MUŠEVIČ I. 3D microlasers from self-assembled cholesteric liquid-crystal microdroplets [J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 26995-27003.
- [30] PIRNAT G, HUMAR M, MUŠEVIČ I. Remote and autonomous temperature measurement based on 3D liquid crystal microlasers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 22615-22625.
- [31] LIN J D, HSIEH M H, WEI G J, *et al.* Optically tunable/switchable omnidirectionally spherical microlaser based on a dye-doped cholesteric liquid crystal microdroplet with an azo-chiral dopant [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15765-15776.
- [32] ZHENG Z G, LIU B W, ZHOU L, *et al.* Wide tunable lasing in photoresponsive chiral liquid crystal emulsion [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(11): 2462-2470.
- [33] HUMAR M, MUŠEVIČ I. Surfactant sensing based on whispering-gallery-mode lasing in liquid-crystal microdroplets [J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 19836-19844.
- [34] JAMPANI V S R, HUMAR M, MUŠEVIČ I. Resonant transport of light from planar polymer waveguide into liquid-crystal microcavity [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20506-20516.
- [35] WANG Y, LI H Y, ZHAO L Y, *et al.* Tapered optical fiber waveguide coupling to whispering gallery modes of liquid crystal microdroplet for thermal sensing application [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 918-926.
- [36] MUR M, SOFI J A, KVAŠIČ I, *et al.* Magnetic-field tuning of whispering gallery mode lasing from ferromagnet-

- ic nematic liquid crystal microdroplets [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1073-1083.
- [37] DUAN R, HAO X L, LI Y Z, *et al.* Detection of acetylcholinesterase and its inhibitors by liquid crystal biosensor based on whispering gallery mode [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 308:127672.
- [38] WANG Y, LI H Y, ZHAO L Y, *et al.* Tunable whispering gallery modes lasing in dye-doped cholesteric liquid crystal microdroplets [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(23):231906.
- [39] ZHAO L Y, WANG Y, YUAN Y G, *et al.* Whispering gallery mode laser based on cholesteric liquid crystal microdroplets as temperature sensor [J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 181-185.
- [40] ZHANG C, FU D Y, XIA C L, *et al.* Lasing emission of dye-doped cholesteric liquid crystal microdroplet wrapped by polyglycerol in hollow glass microsphere [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(1):011402.
- [41] LI Y, LUO D, CHEN R. Random lasing from cholesteric liquid crystal microspheres dispersed in glycerol [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(31): 8864-8867.
- [42] UCHIDA Y, TAKANISHI Y, YAMAMOTO J. Controlled fabrication and photonic structure of cholesteric liquid crystalline shells [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(23): 3234-3237.
- [43] CHEN L J, LI Y N, FAN J, *et al.* Photoresponsive monodisperse cholesteric liquid crystalline microshells for tunable omnidirectional lasing enabled by a visible light-driven chiral molecular switch [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(9): 845-848.
- [44] CHEN L J, GONG L L, LIN Y L, *et al.* Microfluidic fabrication of cholesteric liquid crystal core-shell structures toward magnetically transportable microlasers [J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(7): 1206-1213.
- [45] LIN Y L, GONG L L, CHE K J, *et al.* Competitive excitation and osmotic-pressure-mediated control of lasing modes in cholesteric liquid crystal microshells [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(22):223301.
- [46] LEE S S, KIM J B, KIM Y H, *et al.* Wavelength-tunable and shape-reconfigurable photonic capsule resonators containing cholesteric liquid crystals [J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaat8276.
- [47] PARK S, LEE S S, KIM S H. Photonic multishells composed of cholesteric liquid crystals designed by controlled phase separation in emulsion drops [J]. *Advanced Materials*, 2020.DOI:10.1002/adma.202002166.

作者简介:



罗炜程(1995—),男,福建莆田人,硕士研究生,2018年于厦门大学获得学士学位,主要从事胆甾相液晶激光器、液晶光栅器件的研究。E-mail: 541799565@qq.com



陈鹭剑(1980—),男,福建厦门人,博士,教授,2007年于浙江大学获得博士学位,主要从事液晶光子学、微流控技术和有机无机杂化光学材料方面的研究。E-mail: lujianchen@xmu.edu.cn