

文章编号:1007-2780(2017)11-0853-08

## 基于液晶/聚合物光栅选频的高效率 有机半导体激光器

刘明欢<sup>1,2</sup>, 李大禹<sup>1\*</sup>, 姚丽双<sup>1</sup>, 刘永刚<sup>1</sup>, 彭增辉<sup>1</sup>, 曹召良<sup>1</sup>, 宣 丽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**报道了一种基于液晶/聚合物光栅选频的高效率有机半导体激光器的制备方法。首先在一片玻璃基板上旋涂有机半导体荧光薄膜 MEH-PPV 作为增益介质, 然后在其上通过光场中的定域光聚合制备液晶/聚合物光栅, 形成分布式反馈 (DFB) 有机半导体激光器。激光出射阈值  $0.32 \mu\text{J}/\text{pulse}$ , 斜率转化效率高达 7.8%, 呈现良好的 s 偏振特性。采集了激光束的光斑, 轮廓清晰, 呈现扇形结构。通过改变光栅周期, 实现了 53.4 nm 激光出射范围。本工作为新型有机激光器的制备提供了有益的指导和借鉴意义。

**关键词:**有机半导体激光器; 液晶/聚合物光栅; 分布反馈

**中图分类号:** O753; TP217 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173211.0853

## High efficiency organic semiconductor laser using a liquid crystal/polymer grating as an oscillation cavity

LIU Ming-huan<sup>1,2</sup>, LI Da-yu<sup>1\*</sup>, YAO Li-shuang<sup>1</sup>, LIU Yong-gang<sup>1</sup>,  
PENG Zeng-hui<sup>1</sup>, CAO Zhao-liang<sup>1</sup>, XUAN Li<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** We reported a fabrication technique of a high efficiency organic semiconductor laser device, which used a liquid crystal/polymer grating as an oscillation cavity. To fabricate a distributed feedback (DFB) organic semiconductor laser, the active medium poly[*m*-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylene-vinylene] (MEH-PPV) film was spin-coated on a piece of clean glass plate, and then a liquid crystal/polymer grating was fabricated on the MEH-PPV film via localized photo polymerization under an optical interference field. The lasing threshold was  $0.32 \mu\text{J}/\text{pulse}$ , and the conversion efficiency was as high as 7.8%. The lasing beams showed good character in s-polarization. The lasing beam pattern was collected by a digital camera, which showed a fan-shaped geometry. The 53.4 nm lasing range was obtained by varying the grating period. The high efficiency organic semiconductor

收稿日期: 2017-07-05; 修订日期: 2017-08-12.

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61377032, No.61378075)

Supported by National Nature Science Foundation of China (No.61377032, No.61378075)

\* 通信联系人, E-mail: lidayu@ciomp.ac.cn

laser in this work provides guidance for fabricating a novel organic laser device.

**Key words:** organic semiconductor laser; liquid crystal/polymer grating; distributed feedback

## 1 引言

有机半导体激光器(Organic Semiconductor Lasers)使用有机半导体薄膜作为增益介质,使用微腔(Microcavity)<sup>[1]</sup>、分布布拉格反射(Distributed Bragg Reflector, DBR)<sup>[2]</sup>、分布反馈(Distributed Feedback, DFB)<sup>[3]</sup>等腔体结构选频。有机半导体激光器的激射波长可覆盖整个可见光谱,具有体积小、制备简单、成本低廉、易于集成等优点,尤其是有望实现电注入泵浦等突出特点,在高分辨率光谱学<sup>[4]</sup>、光通信<sup>[5]</sup>以及生化传感<sup>[6]</sup>领域有着光明的应用前景。近年来,受到国内外广泛关注<sup>[7-8]</sup>。

分布反馈结构由于具有优良的光谱选频以及低阈值运转等优点而被广泛应用于有机激光器的谐振腔<sup>[3]</sup>。相比于繁琐而又昂贵的纳米压印(Nanoimprint)<sup>[3]</sup>和制模(Molding)<sup>[9]</sup>过程,液晶/聚合物光栅<sup>[10]</sup>提供了一种更加简单、低廉的制备分布反馈结构的方法。将含有液晶<sup>[11-14]</sup>和光敏单体等成分的混合液体的样品盒置于多光束全息<sup>[15-16]</sup>干涉场下曝光,在相长干涉区,光敏单体发生光聚合被消耗,相消干涉区的光敏单体在浓度梯度的驱动下游离到相长干涉区继续光聚合;与此同时,液晶被排挤到相消干涉区,最后形成液晶层/聚合物层交替排列的一维光栅,即有机激光器的分布反馈结构。

染料掺杂的液晶/聚合物光栅分布反馈激光器具有制备简单、成本低廉等特点<sup>[17-19]</sup>,然而存在激光能量转化效率低的问题,斜率效率只在1%的水平。由于染料分子间的再吸收易产生浓度猝灭,掺杂比重通常不高于2%,极大限制了激射效率<sup>[20]</sup>。有机半导体薄膜<sup>[21-22]</sup>,即使在固态薄膜状态也不存在浓度猝灭,可以保持高荧光量子效率;另外,有机半导体材料通常可以被四氢呋喃、氯苯等常用有机溶剂溶解,通过旋涂方法就可以获得高质量的薄膜,非常适合作为增益介质<sup>[7-8]</sup>。

在先前工作中,我们报道了染料掺杂的液晶/聚合物光栅分布反馈激光器的制备研究<sup>[17-19]</sup>。

将染料分子 DCM 均匀掺杂在预聚物中,双光束曝光下,DCM 与液晶分子一起相分离出来,形成发光中心。激光泵浦时,在分布反馈作用下,形成激光出射。染料掺杂的液晶/聚合物光栅分布反馈激光器具有制备简单,成本低廉等特点。然而,其斜率转化效率低下,并且,出射激光光束没有明确的轮廓。为解决上述问题,本论文采用有机半导体薄膜 MEH-PPV 作为增益介质,并在增益薄膜上面通过双光束干涉制备液晶/聚合物光栅作为分布反馈结构,制备新型结构的有机半导体激光器。本工作使用四氢呋喃溶解 MEH-PPV,通过旋涂方法将 MEH-PPV 旋涂在洁净玻璃基板,并对 MEH-PPV 的吸收和荧光光谱作出表征,给出了 MEH-PPV 分子发光相应的能级示意图。激光泵浦下,采集了有机半导体激光器的光谱以及激光光束光斑,测量了斜率转化效率,出射光束的偏振特性。本工作为新型有机激光器的制备提供了有益的指导和借鉴意义。

## 2 基本原理

### 2.1 增益薄膜的光谱与电子能级结构

增益材料的吸收和发射光谱,反应了材料的基本电子能级结构。

将旋涂在洁净玻璃板上的 MEH-PPV 增益薄膜置于 UV-3101(SHIMADZU)紫外-可见-近红外分光光度计中测量其吸收光谱,然后再置于 F-7000FL(HITACHI)荧光分光光度计中测量其荧光发射谱。测量结果如图 1(a)所示。MEH-PPV 的吸收和发射荧光光谱均为可见光区的连续宽光谱,这是有机发光材料的典型特征。重要的是 MEH-PPV 的吸收和发射光谱几乎不重叠,使其发射光不易发生二次自吸收而降低发射效率。从吸收光谱看出,吸收峰值位于 504 nm,对于 532 nm 的泵浦光相对峰值的吸收效率为 90%。实际上厚度为 80 nm 的薄膜,可以吸收 70%的泵浦光。因此,当使用 532 nm 激光泵浦时可以较好地实现粒子数反转<sup>[23]</sup>。MEH-PPV 薄膜发射的荧光峰值和肩峰分别位于 595 nm 和 633 nm,二者均与吸收谱完全分离,可以考虑为

生成激光的波长,但是否能有产生较高的激光能量转化效率还需要考察 MEH-PPV 薄膜的电子能级结构。

MEH-PPV 薄膜的电子能级结构如图 1(b) 所示,其荧光发射谱产生于电子从单重激发态  $S_1$  向单重基态  $S_0$  的辐射跃迁;由于原子振动,基态  $S_0$  和激发态  $S_1$  都分解为多个振动能级,分别对应  $S_{00}$ 、 $S_{01}$ 、 $S_{02}$ 、 $S_{03}$ 、……和  $S_{10}$ 、 $S_{11}$ 、 $S_{12}$ 、 $S_{13}$ 、……。当使用 532 nm 激光泵浦时基态  $S_0$  能级上的大量电子吸收了泵浦能量激发到  $S_1$  的某个振动能级上,如图 1(b) 中的绿色箭头所示,然后又弛豫到寿命较长的  $S_{10}$  亚稳态,在  $S_{10}$  亚稳态上产生受激电子积累,呈现相对基态  $S_0$  的电子粒子数反转,从而产生如图 1(b) 中的两个红色箭头所示的受激辐射,分别对应  $S_{10} \rightarrow S_{00}$  跃迁和  $S_{10} \rightarrow S_{01}$  跃迁;对于  $S_{10} \rightarrow S_{00}$  跃迁,辐射的激光波长为 595 nm,为直接到达最低基态的三能级跃迁体系;而对于  $S_{10} \rightarrow S_{01}$  跃迁,辐射的激光波长为 633 nm,没有直接到达最低基态,而是到达基态的第一振动能级  $S_{01}$ , $S_{01}$  是寿命很短的能级,粒子会进一步以无辐射跃迁方式迅速跃迁到基态  $S_{00}$ ,为四能级跃迁体

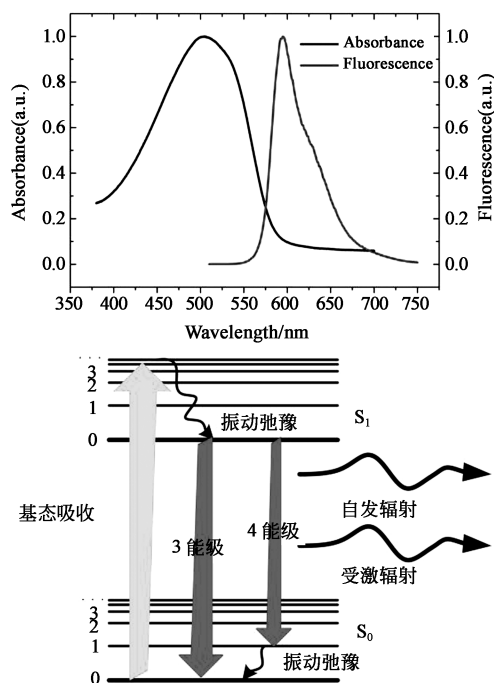


图 1 (a) MEH-PPV 薄膜的吸收和发射光谱;(b) MEH-PPV 的电子辐射跃迁能级示意图

Fig.1 (a) Absorbance and fluorescence spectra of an MEH-PPV film and (b) schematic diagram of electron energy levels for MEH-PPV

系<sup>[7-8]</sup>;由于  $S_{01}$  几乎为无电子能级,即粒子数远少于  $S_{00}$  能级,因此  $S_{10} \rightarrow S_{01}$  的跃迁几率要高于  $S_{10} \rightarrow S_{00}$  的跃迁几率。这就是增益介质需工作在四能级体系的原因<sup>[23]</sup>。为此要设计 MEH-PPV 增益薄膜的激光波长在 633 nm 附近,以使净增益最大<sup>[24]</sup>。

## 2.2 激光器结构

基于液晶/聚合物光栅选频的激光器结构如图 2 所示。上下基板为 1 mm 厚的玻璃基板,下基板上附着有数十纳米厚的 MEH-PPV 增益薄膜,薄膜之上是 9  $\mu\text{m}$  厚的液晶/聚合物光栅。

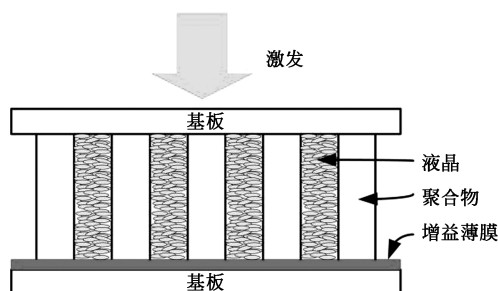


图 2 激光器结构示意图

Fig.2 Schematic illustration of the laser device

使用 532 nm 激光从上至下垂直照射激光器进行光泵浦时,MEH-PPV 薄膜中的基态电子跃迁至激发态高能级,通过无方向选择的混乱辐射进入光栅,选频、增益,沿某一特定方向出射激光。

由于 MEH-PPV 薄膜的折射率为 1.9 (@630 nm)<sup>[25]</sup>,液晶分子混乱取向时光栅的折射率是 1.536 (@589.0 nm),玻璃基板的折射率是 1.520 (@589.0 nm),因此光栅/MEH-PPV 薄膜/玻璃基板构成了平面波导结构,MEH-PPV 薄膜是波导的芯层,光栅和玻璃基板是波导的包层<sup>[26]</sup>。当 MEH-PPV 薄膜辐射光子时,部分光子限制在 MEH-PPV 波导芯层内振荡传播,另一部分光子则穿透到光栅层。对于分布反馈结构,能够使光子受到布拉格反射振荡<sup>[27]</sup>提供的筛选,成为 MEH-PPV 薄膜中四能级辐射机制的种子激光,种子激光波长  $\lambda_{\text{las}}$  由下式描述<sup>[24]</sup>:

$$\lambda_{\text{las}} = \frac{2n_{\text{eff}}\Lambda}{m}, \quad (1)$$

其中: $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率, $\Lambda$  为光栅周期, $m$  为光栅的衍射级次。根据式(1),可以通过改变光栅的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ 、光栅周期  $\Lambda$  和衍射级次  $m$ ,获得不同波长的激光。

### 3 实 验

#### 3.1 激光器制备

制备光栅的材料是一种混合液体,包含光敏单体 dipentaerythritol hydroxyl pentaacrylate (DPHA, 质量分数 58.8%, Aldrich), 液晶分子 TEB-30A ( $n_o = 1.522$ ,  $n_e = 1.692$ , 质量分数 29.4%, 石家庄永生华清液晶有限公司), 交联剂 N-vinylpyrrolidone (NVP, 质量分数 9.8%, Aldrich), 光引发剂 Rose Bengal (RB, 质量分数 0.5%, Aldrich) 以及共引发剂 N-phenylglycine (NPG, 质量分数 1.5% Aldrich)。为得到均匀混合的液体,上述混合物在密闭环境下搅拌 24 h。

制备增益薄膜的有机半导体材料是固态絮状的 poly [-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylene-vinylene] (MEH-PPV, 吉林奥莱德)。按照质量分数 0.6% 的配比将 MEH-PPV 溶于有机溶剂四氢呋喃中,室温搅拌 24 h 使其充分溶解。

有机半导体激光器的制备过程如图 3 所示。首先通过旋涂方法,将增益介质 MEH-PPV 薄膜旋涂于洁净的玻璃基板表面。为获得良好的激光出射,MEH-PPV 薄膜厚度控制在 80 nm<sup>[28]</sup>;带有 MEH-PPV 薄膜的基板与另一块洁净玻璃基板对叠在一起制备成间隙厚度为 9  $\mu\text{m}$  的样品盒。在暗室,通过毛细作用将制备光栅的混合液体注入样品盒;然后通过光场中光敏单体的定域光聚合形成液晶/聚合物光栅,完成有机半导体激光器的制备。

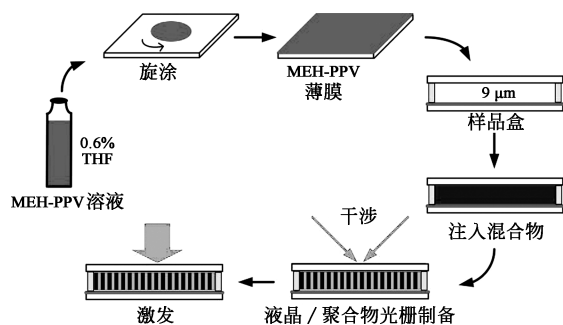


图 3 有机半导体激光器制备过程示意图

Fig.3 Schematic illustration for fabricating an organic semiconductor laser device

选用 532 nm Nd<sup>3+</sup>:YAG (长春新产业) 激光器产生连续绿色激光,这种绿色激光能使样品

盒中的光敏单体快速光聚合。因此将样品置于该激光的双光束干涉光场中曝光 1 min,即可制备出液晶/聚合物光栅。

液晶/聚合物光栅的制备光路如图 4 所示。为形成良好的干涉光场,首先使激光光束通过显微物镜聚焦,在焦平面处使用 25  $\mu\text{m}$  小孔进行空间滤波,滤除杂光后的锥形光束扩束、再经过焦距匹配的透镜准直为平行光束,然后通过分束镜按强度比 1:1 分为互相垂直的两束,最后使两束光按照设置的角度相遇,形成干涉光场。根据物理光学原理,光栅周期  $\Lambda$  由下式描述<sup>[24]</sup>:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{\text{rec}}}{2\sin(\frac{\theta}{2})}, \quad (2)$$

其中: $\lambda_{\text{rec}}$ 为激光波长, $\theta$ 为双光束干涉夹角。实验中可以通过调整双光束夹角  $\theta$  制备不同周期的光栅。

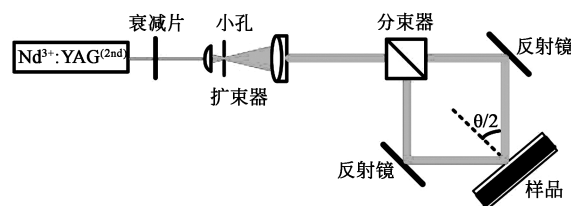


图 4 液晶/聚合物光栅制备光路示意图

Fig.4 Schematic illustration of the optical setup for fabricating a liquid crystal/polymer grating

#### 3.2 液晶/聚合物光栅形貌

利用扫描电子显微镜 (Hitachi, S-4800) 检测所制备的光栅形貌。

首先将样品的上下基板掰开,将带有光栅的基板放置于酒精中浸泡 24 h,溶解出光栅中的液晶,然后晾干。在光栅表面镀上金膜,以使样品具有导电能力,获得清晰的电子显微镜图像。

图 5(a)为液晶/聚合物光栅的衍射图,光栅区域充满整个样品,光栅面积高达 4 cm<sup>2</sup>。使用白光再现,全息液晶/聚合物光栅就可以呈现绚丽的色彩<sup>[29]</sup>。图 5(b)为全息液晶/聚合物光栅的扫描电镜的侧视图,光栅周期 595 nm,光栅厚度 9  $\mu\text{m}$ 。其中,孔隙部分为液晶层,灰色部分为聚合物层。双光束干涉刻录光栅时,光敏单体在相长干涉区,快速光聚合,形成致密的聚合物。聚合物发生膨胀,促进液晶分子的相分离。结果,液晶分子被排挤到相消干涉区。显然,液晶/聚合物光

栅呈现清晰聚合物层和液晶层交替排列的体光栅结构。光栅形成后,液晶层与聚合物层的折射率差为  $0.024 \times 10^{-3}$ 。

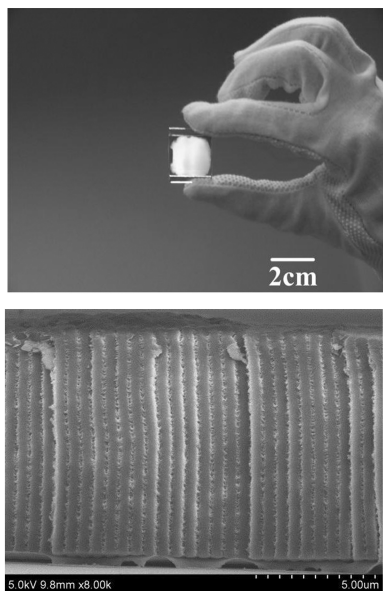


图 5 (a) 液晶/聚合物光栅的白光衍射;(b) 液晶/聚合物光栅截面的扫描电镜图像

Fig.5 (a) Visible light diffraction of a liquid crystal/polymer grating and (b) section view of a liquid crystal/polymer grating imaged by Scanning Electron Microscope (SEM)

### 3.3 激光泵浦

为检验所制备的激光器,搭建了如图 6 所示的激光泵浦光路。使用 532 nm 的脉冲  $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ (长春新产业)激光器对样品进行泵浦,泵浦激光脉冲宽度 10 ns,脉冲重复频率 10 Hz,泵浦光强通过可调谐衰减片进行控制;为检测到达样品上的泵浦光能量,将泵浦光用 1 : 1 分束棱镜分为反射与透射两束,其中反射光束进入光功率计,透射光束则通过焦距为 200 mm 的柱透镜将激发光束整形为 31 mm 的长条形光斑,令长条形光斑的长轴垂直于样品中的光栅界面,以使光栅的谐振效率最大化。

当样品中有激光出射后,将出射激光光束耦合到分辨率为 0.23 nm 的光谱仪(北京赛凡光电)中,以检测出射激光的波长与线宽;再令出射激光通过焦距 3 mm $\times$ 1 mm 的透镜,使其聚焦到高精度的能量探头(Coherent),以测量出射激光能量的斜率转化效率;最后在出射激光与高精度的能量探头之间放置偏振片,通过旋转偏振片,获得出

射激光强度随偏振片偏转角度的变化关系,以检测其偏振特性。

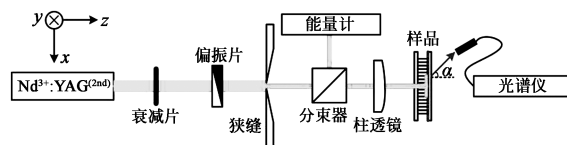


图 6 有机半导体激光器泵浦示意图

Fig.6 Schematic illustration of the excitation of an organic semiconductor laser

## 4 结果与讨论

图 7(a)是有机半导体激光器的激光光谱。为使激光在增益中心出射,实验中通过调整双光束夹角,控制激光周期在 595 nm。激光的中心波长为 633 nm,激光模式的衍射级次为 3 级,有效折射率 1.596。光谱半高全宽(full width at half maximum, FWHM)0.6 nm,激光的  $Q(\lambda/\Delta\lambda)$  值高达 1 055,与(1)式吻合良好。而 MEH-PPV 的荧光光谱宽度为 50 nm。采集自无光栅结构的有

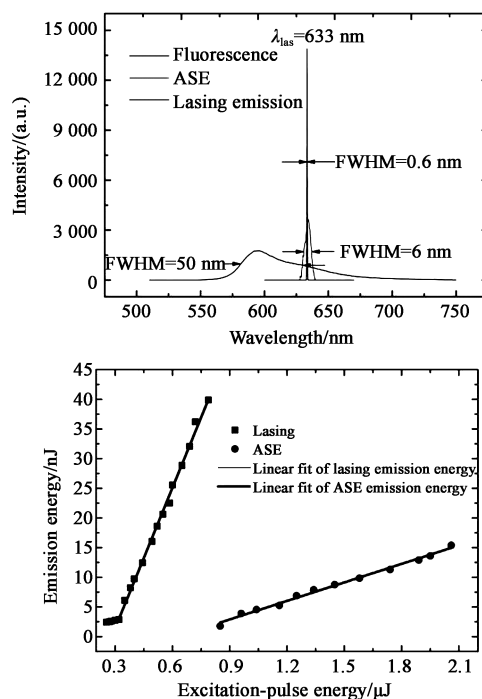


图 7 (a) 有机半导体激光器的激光光谱;(b) 有机半导体激光器辐射能量相对于激发脉冲能量的依赖关系

Fig.7 (a) Lasing spectra and (b) dependence of emission energy to excitation-pulse energy of an organic semiconductor laser

机半导体激光器的放大自发辐射光谱(ASE),光谱宽度为 6 nm。制备时,通过单光束曝光预聚物,形成均匀的聚合物/液晶薄膜,即液晶分子随机均匀分散在聚合物中。光泵浦时,在波导结构的约束下,自发辐射光,沿波导传播。通过 MEH-PPV 荧光光谱,无光栅结构有机半导体激光器自发辐射放大光谱以及液晶/聚合物光栅有机半导体激光器激光光谱比较,显然,液晶/聚合物光栅具有很好的选频能力以及光谱压缩能力。图 7(b)为辐射能量相对于激发脉冲能量的依赖关系。其中,圆点和方点分别是有光栅结构和无光栅结构选频有机半导体激光器辐射脉冲能量实验数据,实线为数据点的线性拟合。对于有光栅结构的有机半导体激光器,激光的阈值为  $0.32 \mu\text{J/pulse}$ ,斜率效率高达 7.8%。而无光栅结构的有机半导体激光器,实验中并未观察到明显的阈值行为,斜率效率为 1%。实验结果表明,具有液晶/聚合物光栅结构的有机半导体激光器,具有优良的光谱选择能力以及明显的阈值行为。

图 8(a)为归一化强度相对于偏振器旋转角

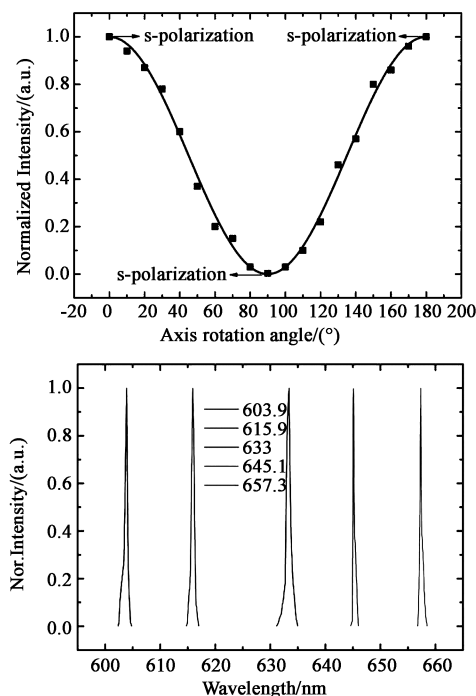


图 8 (a) 归一化激光强度相对于偏振器旋转角度的依赖关系;(b)有机半导体激光器的调谐

Fig.8 (a) Dependence of normalized intensity to polarizer axis rotation angle and (b) tunability of the organic semiconductor laser

度的依赖关系。其中,圆点为实验数据,曲线为余弦拟合曲线。实验数据点与余弦曲线吻合良好,说明激光呈现良好的 s 偏振特性,偏振比  $((I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp}))$  高达 95%。通过添加波片,就可以获得 p 偏振以及圆偏振光。图 8(b)为有机半导体激光器的周期调谐特性。实验中,通过改变光栅周期,获得不同辐射激光波长。光栅周期为 566, 578, 595, 607 和 619 nm 时,激光波长为 603.9, 615.9, 633, 645.1 和 657.3 nm。即通过改变光栅周期,可以获得 53.4 nm 的出射范围,这是无机半导体器件不能比拟的。

图 9 为出射激光束的近场光斑。光斑轮廓清晰,呈现明显的扇形结构。光斑出射角度相对于激光器法线为  $32^{\circ}$  和  $148^{\circ}$ ,说明有机半导体激光器具有良好的定向发射特性。

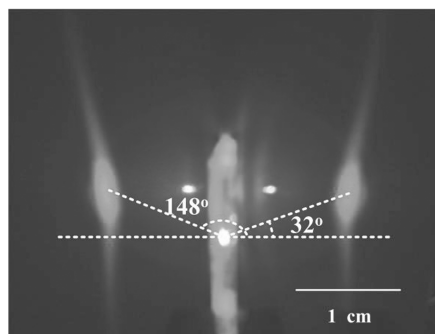


图 9 有机半导体激光器光斑

Fig.9 Emission pattern of the organic semiconductor laser

以上结果说明:由于有机半导体材料 MEH-PPV 薄膜可以吸收 70% 的泵浦光,而对于染料分子 DCM 掺杂的液晶/聚合物光栅结构,  $9 \mu\text{m}$  厚的样品仅可以吸收 20% 的光能<sup>[17-19]</sup>, MEH-PPV 对泵浦光的利用效率更高。因此,有机半导体薄膜 MEH-PPV 的引入,使激光转化效率大幅度提高,从 1.2% 提升至 7.8%。

## 5 结 论

本工作引入有机半导体薄膜作为增益介质,利用聚合物中发光中心间的空间位阻克服了染料发光中心的浓度猝灭效应,使泵浦光的吸收效率大幅提升。通过光敏单体在干涉光场中的定域光聚合,简单、快捷地制备出液晶/聚合物光栅选频

的有机半导体激光器。激光出射阈值  $0.32 \mu\text{J}/\text{pulse}$ , 能量转化的斜率效率高达  $7.8\%$ , 激光出射光斑轮廓清晰, 呈现扇形结构,  $s$  偏振度达到

$95\%$ 。通过改变光栅周期, 实现了  $53.4^\circ$  那么激光出射范围。本工作为有机激光器的制备提供了有益的指导和借鉴意义。

## 参 考 文 献:

- [1] TESSLER N, DENTON G J, FRIEND R H. Lasing from conjugated-polymer microcavities [J]. *Nature*, 1996, 382(6593): 695-697.
- [2] VASDEKIS A E, TSIMINIS G, RIBIERRE J C, *et al.* Diode pumped distributed Bragg reflector lasers based on a dye-to-polymer energy transfer blend [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(20): 9211-9216.
- [3] WANG Y, TSIMINIS G, KANIBOLOTSKY A L, *et al.* Nanoimprinted polymer lasers with threshold below  $100 \text{ W}/\text{cm}^2$  using mixed-order distributed feedback resonators [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(12): 14362-14367.
- [4] WOGGON T, KLINKHAMMER S, LEMMER U. Compact spectroscopy system based on tunable organic semiconductor lasers [J]. *Applied Physics B*, 2010, 99(1/2): 47-51.
- [5] CLARK J, LANZANI G. Organic photonics for communications [J]. *Nat. Photonics*, 2010, 4(7): 438-446.
- [6] WANG Y, MORAWSKA P O, KANIBOLOTSKY A L, *et al.* LED pumped polymer laser sensor for explosives [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2013, 7(6): L71-L76.
- [7] KUEHNE A J C, GATHER M C. Organic lasers: recent developments on materials, device geometries, and fabrication techniques [J]. *Chem. Rev.*, 2016, 116(21): 12823-12864.
- [8] SAMUEL I D W, TURNBULL G A. Organic semiconductor lasers [J]. *Chem. Rev.*, 2007, 107(4): 1272-1295.
- [9] HERMANN S, SHALLCROSS R C, MEERHOLZ K. Simple fabrication of an organic laser by microcontact molding of a distributed feedback grating [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(34): 6019-6024.
- [10] BUNNING T J, NATARAJAN L V, TONDI GLIA V P, *et al.* Holographic polymer-dispersed liquid crystals (HPDLCs) [J]. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 2000, 30: 83-115.
- [11] 许忠保, 王双迎, 刘文超, 等. 基于液晶空间光调制器的多焦涅尔透镜 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 156-161.
- XU Z B, WANG S Y, LIU W C, *et al.* Multifocal Fresnel lens based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 156-161. (in Chinese)
- [12] 冯奇斌, 尹慧娟, 李亚妮, 等. 用于机载液晶显示的四基色发光二极管背光源 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2459-2465.
- FENG Q B, YIN H J, LI Y N, *et al.* 4-primary-color-based LED backlight for aircraft cockpit LCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2459-2465. (in Chinese)
- [13] 齐敏璐, 王新全, 于翠荣, 等. 静态显微光谱成像系统的研制 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1240-1245.
- QI M J, WANG X Q, YU C R, *et al.* Development of static microscopic spectral imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1240-1245. (in Chinese)
- [14] 刘桢, 沈冬, 王骁乾, 等. 蓝相液晶材料与光子学器件研究进展 [J]. 液晶与显示, 2017, 32(5): 325-338.
- LIU Z, SHEN D, WANG X Q, *et al.* Progresses on the researches of blue phase liquid crystal materials and photonic devices [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017, 32(5): 325-338. (in Chinese)
- [15] 姜岩秀, 巴音贺希格, 赵旭龙, 等. 自由电子激光器用极紫外波段平面变栅距光栅 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2117-2124.
- JIANG Y X, BAYAN H, ZHAO X L, *et al.* Plane holographic varied-line-space grating for DCLS in EUV region [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2117-2124. (in Chinese)
- [16] 吴娜, 谭鑫, 于海利, 等. 宽波段全息-离子束刻蚀光栅的设计及工艺 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1978-1983.
- WU N, TAN X, YU H L, *et al.* Design and fabrication of broadband holographic ion beam etching gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1987-1983. (in Chinese)
- [17] 邓舒鹏, 李文萃, 黄文彬, 等. 基于透射式液晶/聚合物光栅的分布反馈式激光器的研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(5): 517-522.
- DENG S P, LI W C, HUANG W B, *et al.* Distributed-feedback lasing from dye-doped holographic polymer dis-

- persed liquid crystal transmission grating [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(5): 517-522. (in Chinese)
- [18] 刁志辉, 黄文斌, 邓舒鹏, 等. 基于低散射和高增益全息液晶/聚合物光栅的分布反馈式激光器[J]. *物理学报*, 2013, 62(3): 034202.
- DIAO Z H, HUANG W B, DENG S P, *et al.* Distributed-feedback laser based on low-scattering and high-gain holographic polymer dispersed liquid crystal grating [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62(3): 034202. (in Chinese)
- [19] 刘丽娟, 黄文斌, 刁志辉, 等. 基于聚合物支撑形貌液晶/聚合物光栅的低阈值分布反馈式激光器[J]. *物理学报*, 2014, 63(19): 194202.
- LIU L J, HUANG W B, DIAO Z H, *et al.* Low threshold distributed feedback laser based on scaffolding morphology and holographic polymer dispersed liquid crystal gratings [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2014, 63(19): 194202.
- [20] CORNIL J, BELJONNE D, CALBERT J P, *et al.* Interchain interactions in organic  $\pi$ -conjugated materials: impact on electronic structure, optical response, and charge transport [J]. *Adv. Mater.*, 2001, 13(14): 1053-1067.
- [21] 朱红, 田宇, 唐建新. 基于纳米压印 PET 基底的高效柔性有机电致发光器件[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 733-739.
- ZHU H, TIAN Y, TANG J X. High-efficiency flexible organic light-emitting diodes on nanoimprinted PET substrate [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2016, 31(8): 733-739. (in Chinese)
- [22] 于瑶瑶, 陈星明, 金玉, 等. 利用 CsN<sub>3</sub>n 型掺杂电子传输层改善 OLED 器件性能的研究[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 773-777.
- YU Y Y, CHEN X M, JIN Y, *et al.* Improved properties of organic light-emitting devices by utilizing CsN<sub>3</sub> n-type doped electron transport layer [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2016, 31(8): 773-777. (in Chinese)
- [23] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2009: 14-17.
- ZHOU B K, GAO Y Z, CHEN T R, *et al.* *Principles of Lasers* [M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 14-17. (in Chinese)
- [24] LIU M H, LIU Y G, ZHANG G Y, *et al.* Organic holographic polymer dispersed liquid crystal distributed feedback laser from different diffraction orders [J]. *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2016, 49(46): 465102.
- [25] TAMMER M, MONKMAN A P. Measurement of the anisotropic refractive indices of spin cast thin poly(2-methoxy-5-(2-ethyl-hexyloxy)-p-phenylenevinylene) (MEH-PPV) films [J]. *Adv. Mater.*, 2002, 14(3): 210-212.
- [26] 曹庄琪. 导波光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 12-30.
- CAO Z Q. *Waveguide Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 12-30. (in Chinese)
- [27] KOGELNIK H, SHANK C V. Stimulated emission in a periodic structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 18(4): 152-154.
- [28] HUANG W B, DIAO Z H, LIU Y G, *et al.* Distributed feedback polymer laser with an external feedback structure fabricated by holographic polymerization technique [J]. *Org. Electron.*, 2012, 13(11): 2307-2311.
- [29] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 226-257.
- LV N G. *Fourier Optics* [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 226-257. (in Chinese)
- [30] HUANG W B, LIU Y G, DIAO Z H, *et al.* Theory and characteristics of holographic polymer dispersed liquid crystal transmission grating with scaffolding morphology [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(18): 4013-4020.

**作者简介:** 刘明欢(1990—), 男, 吉林公主岭人, 博士研究生, 主要从事全息液晶/聚合物光栅, 全息偏振光栅以及有机半导体激光器等方面的研究。E-mail: liuminghuan13@mails.ucas.ac.cn

李大禹(1979—), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事液晶自适应光学波前处理、GPU 并行计算等方面的研究。E-mail: lidayu@ciomp.ac.cn