

基于液晶/聚合物光栅的高转化效率有机半导体激光器

刘丽娟 孔晓波 刘永刚 宣丽

Enhancement of conversion efficiency for an organic semiconductor laser based on a holographic polymer dispersed liquid crystal

Liu Li-Juan Kong Xiao-Bo Liu Yong-Gang Xuan Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 244204 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.244204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

透射衍射光栅内全反射级次

Total internal reflection orders in transmission grating

物理学报.2016, 65(5): 054202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054202>

软X射线全息平焦场光栅的条纹弯曲现象及其对光谱分辨率的影响

Effect of curve groove on the spectral resolution for soft X-ray holographic flat-field gratings

物理学报.2014, 63(23): 234203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.234203>

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

Low threshold distributed feedback laser based on scaffolding morphologic and holographic polymer dispersed liquid crystal gratings

物理学报.2014, 63(19): 194202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194202>

HfO<sub>2</sub> 顶层多层介质膜脉宽压缩光栅的离子束刻蚀

Ion beam etching for multilayer dielectric pulse compressor gratings with top layers of HfO<sub>2</sub>

物理学报.2013, 62(23): 234202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234202>

基于相干粒子数囚禁的电磁诱导光栅研究

Electromagnetically induced grating based on the coherent population trapping

物理学报.2013, 62(22): 224205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224205>

# 基于液晶/聚合物光栅的高转化效率 有机半导体激光器\*

刘丽娟<sup>1)†</sup> 孔晓波<sup>1)</sup> 刘永刚<sup>2)</sup> 宣丽<sup>2)</sup>

1)(曲阜师范大学物理工程学院, 曲阜 273165)

2)(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, 长春 130033)

(2017年4月12日收到; 2017年8月26日收到修改稿)

采用有机半导体发光材料聚[2-甲氧基-5-(2-乙基己氧基)-1, 4-苯乙炔]作为增益介质, 低官能度光敏单体制备的液晶/聚合物光栅作为外部反馈谐振腔, 制备出参数可独立控制的分离式结构的有机半导体激光器. 液晶/聚合物光栅中液晶分子的取向影响光栅折射率调制量, 从而影响光栅的反馈能力, 最终影响激光器出射激光的性能. 通过研究发现决定液晶分子取向的主要有两种与光栅周期有关的作用力, 利用这一原理制备不同周期的光栅, 光栅周期小于450 nm时, 相分离出的液晶分子取向由光栅矢量方向变为光栅沟槽方向, 此时光栅的折射率调制量增加, 光反馈能力增强. 采用周期为395 nm的液晶/聚合物光栅制备二级布拉格散射的有机半导体激光器, 相较于大周期光栅(593 nm)制备的激光器, 激光阈值由0.70  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 降低至0.18  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ , 转化效率由2.5%提高到6.4%, 且出射激光垂直于基板表面发射, 有利于后续的处理及应用.

**关键词:** 有机半导体激光器, 液晶/聚合物光栅, 折射率调制量, 转化效率

**PACS:** 42.40.Eq, 42.55.Mv, 42.60.Lh

**DOI:** 10.7498/aps.66.244204

## 1 引言

自1992年, Moses首次抽运共轭聚合物溶液观察到激光出射现象<sup>[1]</sup>, 有机半导体(organic semiconductor)发光材料由于其具有成本低、宽吸收谱和发射谱、高增益等优点被广泛应用于激光器中<sup>[2-4]</sup>. 有机半导体激光器(organic semiconductor lasers, OSLs)可应用于光谱仪的光源、化学传感器以及光学开关等领域<sup>[5,6]</sup>. 但是, OSLs还存在着一些问题, 其中最突出的是高阈值和低转化效率. 高阈值使得OSLs只能采用体积较大、价格昂贵的脉冲激光器作为抽运源, 而低转化效率会造成抽运光的极大浪费. 分布反馈式(distributed feedback, DFB) OSLs因具有出射激光线宽窄、阈值低、波长选择灵敏度高优点成为研究的重点.

目前, DFB OSLs的制备主要采用电子束蚀刻、纳米压印、反应离子蚀刻等方式<sup>[7-9]</sup>. 电子束蚀刻和反应离子蚀刻工艺复杂, 纳米压印虽然工艺简单, 但是制备出的激光器阈值非常高<sup>[10-12]</sup>. 并且常见的DFB OSLs结构中, 有机半导体层既是增益介质层也是折射率调制层<sup>[2,13]</sup>, 这使得激光器的耦合机制十分复杂, 不利于研究激光器各个参数对出射激光的影响.

我们采用有机半导体层作为激光器的增益介质层, 液晶/聚合物(holographic polymer dispersed liquid crystal, HPDLC)光栅作为外部反馈层, 这样的一种分离式结构可以对激光器的参数进行独立控制. HPDLC光栅具有制备简单、成本低、散射损失小等优点, 可作为激光器优良的谐振腔. 将包含光敏单体和液晶的预聚物置于干涉光场中, 光敏单体在干涉条纹亮区聚合, 形成的聚合物把液晶分

\* 国家自然科学基金(批准号: 61378075, 61377032)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: llj2007weihai@163.com

子挤压到暗区, 由于存在浓度梯度, 暗区的单体移动到亮区继续聚合, 最终形成聚合物层和液晶层交替排列的周期结构, 即 HPDLC 光栅<sup>[14-16]</sup>.

在 HPDLC 光栅中, 相分离出的液晶分子沿着光栅矢量方向排列, 反馈光的折射率调制量取决于聚合物层的折射率  $n_p$  与液晶分子折射率  $n_o$  的差值, 由于两者折射率值相近, 所以光反馈不强<sup>[17]</sup>. 本文采用低官能度光敏单体制备的 HPDLC 光栅作为 DFB OSL 的外部反馈层, 聚 [2-甲氧基-5-(2-乙基己氧基)-1, 4-苯乙炔] (MEH-PPV) 作为增益介质, 通过研究影响液晶分子取向的因素, 发现当光栅周期在 375—425 nm 之间时, 相分离出的液晶分子沿着光栅沟槽方向排列, 此时光栅的折射率调制量增大, 光反馈得到增强. 采用周期为 395 nm 的 HPDLC 光栅制备激光器, 出射激光的性能得到极大的提升, 相比采用周期为 593 nm 的光栅制备的激光器, 转化效率从 2.5% 提高到 6.3%, 阈值从 0.70  $\mu\text{J}/\text{pulse}$  降低至 0.18  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ .

## 2 实验

### 2.1 样品的制备及实时衍射效率的测量

由于 MEH-PPV 薄膜具有很好的发光性能, 并且可以通过旋涂或者喷墨印刷等简单方式制备<sup>[18]</sup>, 因此实验采用 MEH-PPV (由吉林 OLED 材料公司提供) 作为激光器的增益介质. OSL 的制备流程如图 1 所示, 将少量溶有 MEH-PPV 的二甲苯均匀混合溶液 ( $6 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) 滴于干净的玻璃基板上 (步骤 1), 旋涂 (2000 r/min, 30 s) 形成均匀薄膜, 并用纯氮气对其吹干处理一分钟, 由台阶仪测量 MEH-PPV 薄膜厚度约为 80 nm (步骤 2). 将涂有 MEH-PPV 薄膜的玻璃基板与另一片干净的玻璃基板制备成液晶盒, 盒厚由隔垫物控制为 6  $\mu\text{m}$ , 然后在暗室中将预聚物注入其中 (步骤 3). 预聚物体系主要包含光敏单体邻苯二甲酸二甘醇二丙烯酸酯 (PDDA, 由 Aldrich 公司提供)、相列相液晶 TEB30A ( $n_o = 1.522$ ,  $\Delta n = 0.170$ , 由石家庄永生华清液晶有限公司提供)、交联剂 N-乙烯基吡咯烷酮 (NVP, 由 Aldrich 公司提供)、共引发剂 N-苯基甘氨酸 (NPG, 由 Aldrich 公司提供)、光引发剂 Rose Bengal (RB, 由 Aldrich 公司提供), 含量分别为 60 wt.%, 28 wt.%, 10 wt.%, 1.5 wt.%, 0.5 wt.%. 最后将样品置于两束连续激光 (532 nm) 形成的干

涉场中曝光 10 min (步骤 4), 制备光路如图 2 所示, 干涉光每束光光强为  $3.7 \text{ mW}/\text{cm}^2$ . 由于制备光强较弱, 相分离出的液晶以均匀层状存在, 这种聚合支撑形貌的光栅散射损失低于 6%<sup>[19]</sup>, 可作为优良的谐振腔. 由光栅周期公式  $\Lambda = \frac{\lambda_{532}}{2 \sin(\theta/2)}$  可知, 改变两束相干光夹角  $\theta$ , 可以得到不同周期的光栅, 实验中制备光栅的周期范围从 300 nm 到 650 nm.

为了实时监测光栅的衍射效率, 在制备光栅的过程中, 将 633 nm 的激光以光栅的布拉格角入射, 如图 2 所示, 光栅的一级衍射光经偏振分束棱镜后分为 p 偏振光和 s 光偏振光, 分别由探测器 1 和探测器 2 接收.

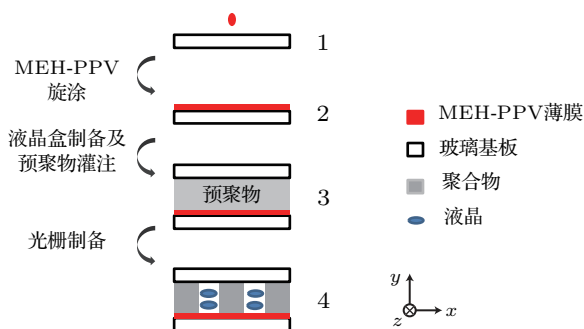


图 1 (网刊彩色) 有机半导体 HPDLC 光栅激光器的制备流程  
Fig. 1. (color online) Fabrication process of OSL based on HPDLC grating.

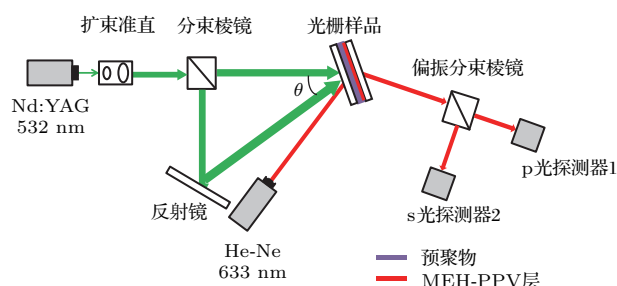


图 2 (网刊彩色) 光栅制备及衍射效率测试图  
Fig. 2. (color online) Optical setup for fabrication and characterization of the HPDLC grating layer.

### 2.2 激光抽运及测试

Nd:YAG 倍频脉冲激光器 (532 nm, 8 ns, 1 Hz) 为抽运源, 分束棱镜将抽运光分为能量相同的两束, 其中一束抽运光的能量由能量计直接探测, 另一束由柱面镜聚焦为沿光栅矢量方向的细条纹 ( $5 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ ) 抽运样品. 样品出射的激光能量由高灵敏度的 LabMax-TOP 能量计测量, 出射激光波长、半高全宽等信息由光谱仪 (分辨率为 0.3 nm) 测量.

### 3 结果与分析

#### 3.1 HPDLC光栅的实时衍射效率

设光栅矢量方向为  $x$  方向, 垂直光栅表面方向为  $y$  方向, 如图 1 所示, 光栅 p 光和 s 光的衍射效率公式可以表示为 [13]

$$\eta_p = \sin^2 \frac{\pi d(\varepsilon_{1x} \cos^2 \theta_B - \varepsilon_{1y} \sin^2 \theta_B)}{2n_{ave}\lambda_0 \cos \theta_B}, \quad (1a)$$

$$\eta_s = \sin^2 \frac{\pi d \varepsilon_{1z}}{2n_{ave}\lambda_0 \cos \theta_B}, \quad (1b)$$

式中,  $n_{ave}$  为光栅的平均折射率,  $\lambda_0$  为探测光波长,  $d$  为光栅厚度,  $\varepsilon_{1i}(i = x, y, z)$  为光栅相对介电系数调制张量对角线上的量,  $\theta_B$  为布拉格角 (小于  $15^\circ$ ).

(1a) 和 (1b) 式可以简化为

$$\eta_p = \sin^2 \frac{\pi d \varepsilon_{1x}}{2n_{ave}\lambda_0}, \quad (2a)$$

$$\eta_s = \sin^2 \frac{\pi d \varepsilon_{1z}}{2n_{ave}\lambda_0}. \quad (2b)$$

由 (2a) 和 (2b) 式可知, 光栅 p 光和 s 光衍射效率的大小与液晶分子的取向有关, 当  $\eta_p \gg \eta_s$  时, 绝大多数液晶分子沿着  $x$  轴 (光栅矢量) 方向排列; 当  $\eta_p \ll \eta_s$  时, 绝大多数液晶分子沿着  $z$  轴 (光栅沟槽) 方向排列.

制备了不同周期的 HPDLC 光栅, 光栅制备完成后分别测量其衍射效率, 结果如图 3 所示. 当光栅周期大于 525 nm 时,  $\eta_p/\eta_s > 10$ , 此时液晶分子沿着光栅矢量方向排列, 液晶层与聚合物层折射率相近, 光栅折射率调制量小, 光反馈不强. 当光栅周期在 375—425 nm 之间时,  $\eta_p/\eta_s < 1/10$ , 液晶分子取向发生变化, 沿着光栅沟槽方向排列, 此时液晶层的折射率为  $n_e$ , 与聚合层的折射率差值变大, 光栅反馈能力增强. 当光栅周期为 425—525 nm 时,  $\eta_p$  与  $\eta_s$  相差不大, 液晶分子一部分沿着光栅矢量方向排列, 一部分沿着光栅沟槽方向排列. 同时, 注意到当光栅周期小于 375 nm 时,  $\eta_p$  与  $\eta_s$  都变得很小, 光栅性质减弱, 当光栅周期小于 300 nm 时,  $\eta_p$  与  $\eta_s$  均为 0, 此时不再是真正意义的光栅.

在光栅中, 丝状聚合物的锚定和光栅沟槽的作用力同时影响液晶分子的取向, 丝状聚合物是少量光敏单体在向干涉条纹亮区扩散过程中形成的, 因此它们横在相邻的两个聚合物层之间, 将液晶分子锚定在光栅矢量方向, 其锚定能为 [20]

$$W_1 = AR/(2n), \quad (3)$$

其中,  $n$  为丝状聚合物的浓度,  $A$  为液晶分子和丝状聚合物间的作用能,  $R$  为与光栅周期成正比的聚合物支架半径. 光栅沟槽的作用力使液晶分子沿着光栅沟槽方向排列, 可以表示为 [21]

$$W_2 = \frac{2\pi^3 H^2 K}{\Lambda^3}, \quad (4)$$

其中,  $H$  为光栅槽的高度,  $K$  为液晶的弹性常数,  $\Lambda$  为光栅周期. 从 (3) 和 (4) 式可以看出随着光栅周期的变化, 这两种作用力是一个此消彼长的过程, 这就不难理解不同周期的光栅中液晶分子取向不同的现象. 此外, 采用低光能度的光敏单体制备光栅, 形成的丝状聚合物少, 可进一步减弱丝状聚合物的锚定能.

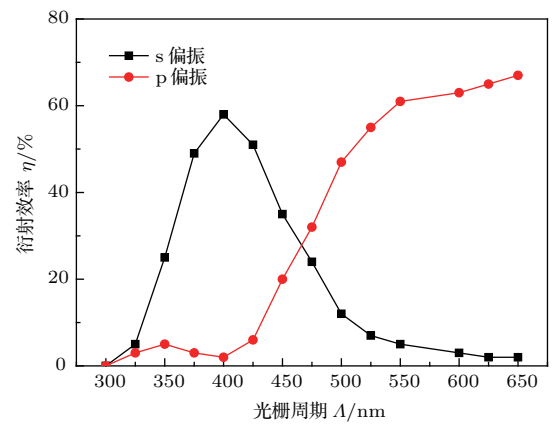


图 3 不同周期光栅的 s 偏振和 p 偏振衍射效率  
Fig. 3. Diffraction efficiencies for s polarization (square) and p polarization (sphere) for gratings with different periods, respectively.

#### 3.2 $\Delta n$ 对激光器性能的影响

光栅反馈有效程度可以用耦合强度系数表示 [22]:

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda_{las}}, \quad (5)$$

其中,  $\lambda_{las}$  为反馈激光的波长,  $\Delta n$  为折射率调制量. 可以看出  $\Delta n$  越大, 光栅耦合强度越大, 越有利于光反馈. 根据 Kogelnik 各向异性耦合波理论 [23], 折射率调制量  $\Delta n$  表示为

$$\Delta n = \frac{\lambda_0 \cos \theta_B \arcsin \sqrt{\eta_s}}{\pi d}. \quad (6)$$

图 4(a) 和图 4(b) 分别为光栅周期为 593 nm (大周期) 和周期为 395 nm (小周期) 的样品的实时衍射效率测量图, 从图 4 可以看出两者衍射效率大不相同: 随着光栅中相分离的进行, 大周期样品的 p 光衍射效率逐步大于 s 光衍射效率, 最终稳定



的p光衍射效率为56.9%, s光衍射效率为1.4%; 而小周期样品不同偏振的实时衍射效率却相反, 小周期样品最终稳定的p光衍射效率为1.7%, s光衍射效率为57.1%. 通过(6)式可以计算出大周期样品的 $\Delta n$ 为0.0036, 小周期样品的 $\Delta n$ 大大提高, 为0.0225.

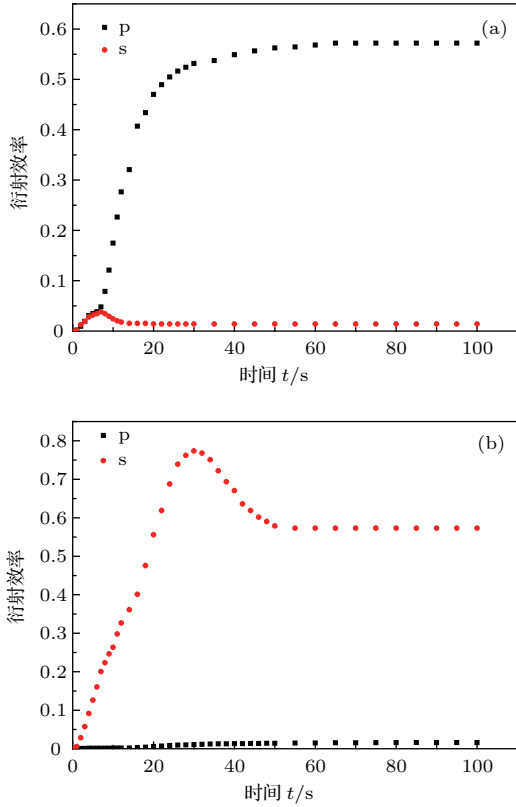


图4 (网刊彩色) 光栅s偏振和p偏振实时衍射效率 (a) 光栅周期为593 nm; (b) 光栅周期为395 nm

Fig. 4. (color online) Real time diffraction efficiencies for p polarization (square) and s polarization (sphere) for: (a) Grating with period of 594 nm; (b) grating with period of 395 nm.

### 3.3 激光光谱特性

根据MEH-PPV的出光特性, 我们制备的样品出光大约在630 nm左右, 此处MEH-PPV的增益最强<sup>[24]</sup>. 出射激光波长 $\lambda$ 满足布拉格方程:  $m\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ , 其中,  $m$ 为布拉格级次,  $n_{\text{eff}}$ 为有效折射率,  $\Lambda$ 为光栅周期. 分别抽运大周期和小周期样品, 并测量其出射激光, 此时大周期样品的布拉格级次为3, 而小周期光栅的布拉格级次为2. 在光栅耦合过程中, 由于在光栅矢量方向要满足动量守恒, 因此波矢要满足以下条件<sup>[24]</sup>:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_o = \pm \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} \pm l \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (7)$$

式中 $\theta_o$ 为出射光于玻璃基板法线的夹角. 对于大周期样品, 出射激光满足 $3\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ , 代入(7)式可以得到

$$\sin \theta_o = \left( \pm 1 \pm \frac{2}{3} m' \right) n_{\text{eff}}, \quad (8)$$

由于 $|\sin \theta_o| \leq 1$ ,  $n_{\text{eff}} \approx 1.60$ ,  $m'$ 只可以取1或者2, 因此可以得到

$$\sin \theta_o = \frac{1}{3} n_{\text{eff}} \approx 0.53. \quad (9)$$

从(9)式可以得知, 大周期光栅制备的激光器存在相互对称的四束出射激光, 且每束激光方向与基板法线呈 $32^\circ$ 夹角. 同理对于小周期光栅, 激光垂直于基板表面发出, 且存在前后两束.

图5为出射激光的能量转化图, 对应插图为其光谱图. 光栅大周期样品的阈值为 $0.70 \mu\text{J}/\text{pulse}$ , 转化效率为2.5%, 相应的激光波长为630.0 nm,

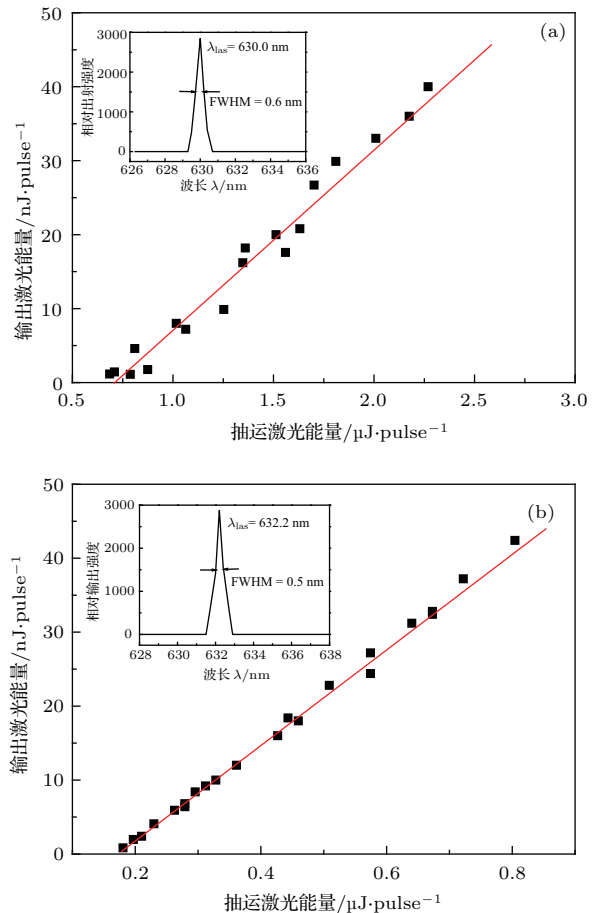


图5 出射激光的能量转化图 (a) 光栅周期为593 nm, 插图为630.0 nm处的光谱图; (b) 光栅周期为395 nm, 插图为632.2 nm处的光谱图

Fig. 5. Lasing output intensity as a function of pump intensity for the DFB laser: (a) Sample with grating period of 593 nm; (b) sample with grating period of 395 nm. The insets show the corresponding lasing.

半高全宽为0.6 nm. 光栅小周期样品的阈值为0.18  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ , 转化效率为6.4%, 相应的激光波长为632.2 nm, 半高全宽为0.5 nm. 采用小周期光栅制备激光器, 出射激光的性能得到了很大的提升, 阈值降低约为原来的1/4, 转化效率提高了接近3倍.

## 4 结 论

本文采用有机半导体MEH-PPV作为增益介质, 低官能度光敏单体制备的HPDLC光栅作为外部反馈腔制备了DFB OSL. 决定液晶分子取向的主要有两种与光栅周期有关的作用力, 利用这一原理, 采用小周期光栅制备激光器, 光栅中液晶分子沿着光栅沟槽方向排列, 光栅的折射率调制量增加, 从而增强了光反馈, 最终出射的激光阈值降低至0.18  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ , 转化效率提高到6.4%. 这一工作作为提高OSL的出光性能提供了新思路, 推动了OSL的实用化进程.

## 参考文献

- [1] Moses D 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 3215
- [2] Samuel I D W, Turnbull G A 2007 *Chem. Rev.* **107** 1272
- [3] Chenais S, Forget S 2012 *Polym. Int.* **61** 390
- [4] Grivas C, Pollnau M 2012 *Laser Photon. Rev.* **6** 419
- [5] Chen Y, Herrnsdorf J, Guilhabert B, Kanibolotsky A L, Mackintosh A R, Wang Y, Pethrick R A, Gu E, Turnbull G A, Skabara P J, Samuel I D W, Laurand N, Dawson M D 2011 *Org. Electron.* **12** 62
- [6] Heliotis G, Xia R, Bradley D D C, Turnbull G A, Samuel I D W, Andrew P, Barnes W L 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2118
- [7] Heliotis G, Xia R, Bradley D D C, Turnbull G A, Samuel I D W, Andrew P, Barnes W L 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 6959
- [8] Liu L J, Huang W B, Diao Z H, Zhang G Y, Peng Z H, Liu Y G, Xuan L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 194202 (in Chinese) [刘丽娟, 黄文彬, 刁志辉, 张桂洋, 彭增辉, 刘永刚, 宣丽 2014 物理学报 **63** 194202]
- [9] Deng S P, Li W C, Huang W B, Liu Y G, Lu X H, Xuan L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 056102 (in Chinese) [邓舒鹏, 李文萃, 黄文彬, 刘永刚, 鲁兴海, 宣丽 2011 物理学报 **60** 056102]
- [10] Mele E, Camposeo A, Stabile R, Del Carro P, Di Benedetto F, Persano L, Cingolani R, Pisignano D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 131109
- [11] Pisignano D, Persano L, Mele E, Visconti P, Anni M, Gigli G, Cingolani R, Favaretto L, Barbarella G 2005 *Synth. Met.* **153** 237
- [12] Ramirez M G, Boj P G, Navarro-Fuster V, Vragovic I, Villalvilla J M, Alonso I, Trabadelo V, Merino S, Díaz-García M A 2011 *Opt. Express* **19** 22443
- [13] Butler J J, Malcuit M S, Rodriguez M A 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 183
- [14] Huang W B, Deng S P, Liu Y G, Peng Z H, Yao L S, Xuan L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094208 (in Chinese) [黄文彬, 邓舒鹏, 刘永刚, 彭增辉, 姚丽双, 宣丽 2012 物理学报 **61** 094208]
- [15] Deng S P, Huang W B, Liu Y G, Diao Z H, Peng Z H, Yao L S, Xuan L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 126101 (in Chinese) [邓舒鹏, 黄文彬, 刘永刚, 刁志辉, 彭增辉, 姚丽双, 宣丽 2012 物理学报 **61** 126101]
- [16] Diao Z H, Huang W B, Deng S P, Liu Y G, Peng Z H, Yao L S, Xuan L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 034202 (in Chinese) [刁志辉, 黄文彬, 邓舒鹏, 刘永刚, 彭增辉, 姚丽双, 宣丽 2013 物理学报 **62** 034202]
- [17] Hsiao V K S, Lu C, He G S, Pan M, Cartwright A N, Prasad P N 2005 *Opt. Express* **13** 3787
- [18] Turnbull G A, Andrew P, Barnes W L, Samuel I D W 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 313
- [19] Huang W, Liu Y, Diao Z, Yang C, Yao L, Ma J, Xuan L 2012 *Appl. Opt.* **51** 4013
- [20] Vardanyan K K, Qi J, Eakin J N, Sarkar M D, Crawford G P 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 4736
- [21] Kim Y T, Hwang S, Hong J H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 173506
- [22] Kogelnik H, Shank C V 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 2327
- [23] Montemezzani G, Zgonik M 1997 *Phys. Rev. E* **55** 1035
- [24] Turnbull G A, Andrew P, Jory M J, Barnes W L, Samuel I D W 2001 *Phys. Rev. B* **64** 125122

# Enhancement of conversion efficiency for an organic semiconductor laser based on a holographic polymer dispersed liquid crystal\*

Liu Li-Juan<sup>1)†</sup> Kong Xiao-Bo<sup>1)</sup> Liu Yong-Gang<sup>2)</sup> Xuan Li<sup>2)</sup>

1) (College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

2) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

( Received 12 April 2017; revised manuscript received 26 August 2017 )

## Abstract

In this paper, we report a high-conversion-efficiency organic semiconductor distributed feedback laser. The gain layer of the laser device is made from poly (2-methoxy-5-(20-ethylhexyloxy) p-phenyl-enevinylene) (MEH-PPV), and the holographic polymer dispersed liquid crystal (HPDLC) grating is used as the external light feedback layer. Thus the parameters of the laser device can be modulated independently. The solution of MEH-PPV in xylene ( $6 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) is deposited on the bottom glass substrate by spin-coating (2000 r/min). The MEH-PPV layer thickness is controlled at  $(80\pm 2) \text{ nm}$  by the spin-coating rate and confirmed by the Dektak profilometer. The HPDLC is made by the photo-induced phase separation method. To determine the orientations of LC molecules, the diffraction efficiency of each sample is measured by a He-Ne laser. The diffraction efficiency is defined as the diffracted light intensity in the first order divided by the incident light intensity. If p light diffraction efficiency ( $\eta_p$ ) is much larger (smaller) than s light diffraction efficiency ( $\eta_s$ ), it can be thought of as a symbol of a fairly good alignment of LC along the grating vector (grating grooves). When the period of HPDLC grating is larger than 450 nm,  $\eta_p$  is greater than  $\eta_s$ , and the averaged orientation of liquid crystal molecules is aligned along the grating vector direction, i.e., orthogonal to the holographic plane. For feedback light propagating along the grating vector, the refractive index modulation is dependent on the difference between the polymer refractive index  $n_p$  and the ordinary refractive index  $n_o$  of phase-separated LC. These two values are very close to each other, thus the effective light feedback for lasing output is not high. However, when the period of HPDLC grating is smaller than 450 nm,  $\eta_s$  is greater than  $\eta_p$ , and the orientation of phase-separated LC is altered. The refractive index modulation of feedback light originates from the difference between the polymer refractive index  $n_p$  and the extraordinary refractive index  $n_e$  of phase-separated LC, thus the refractive index modulation can be improved and the HPDLC layer can provide better light feedback. The lasing threshold is  $0.70 \mu\text{J}/\text{pulse}$ , and the conversion efficiency is 2.5% for the sample with a grating period of 593 nm. However, the lasing threshold is lowered to  $0.18 \mu\text{J}/\text{pulse}$ , and the conversion efficiency increases to 6.4% for the sample with a grating period of 395 nm. These results show that the output lasing performance can be improved by using small period grating, since it has bigger refractive index in the grating vector direction (the lasing feedback direction). The laser performance of sample with small grating period is improved in some aspects such as threshold energy, conversion efficiency to some extent compared with those reported previously.

**Keywords:** organic semiconductor laser, holographic polymer dispersed liquid crystal, refractive index difference, conversion efficiency

**PACS:** 42.40.Eq, 42.55.Mv, 42.60.Lh

**DOI:** 10.7498/aps.66.244204

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61378075, 61377032).

† Corresponding author. E-mail: [llj2007weihai@163.com](mailto:llj2007weihai@163.com)