

波导基底对有机材料放大自发发射性能的调控研究

王 斌^{1,2}, 张文添^{1,2}, 王铁男^{1*}, 于 浩^{1,2}, 张克玲^{1,2}, 姚鑫鑫^{1,2},
郭晓阳¹, 吕 莹^{1*}, 刘星元¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术全国重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 有机放大自发发射(ASE)的偏振调控是高性能有机光电器件面临的关键问题。本文以 Sb_2O_3 为波导基底, Alq:C545T为增益介质, 研究了波导结构对ASE偏振特性的调控机制。实验表明, 常规波导及Slot波导结构中ASE均呈现TE偏振主导。值得注意的是, 尽管Slot波导设计可将TM模式光场局域于增益层内, 但实验并未观测到TM偏振输出。结合COMSOL仿真与实验结果的定量分析发现, 基于各向同性假设的净增益计算与实验观测相悖。分析认为, 该矛盾可归因于掺杂分子C545T在薄膜中的面内水平取向, 该取向增强了TE偏振的有效受激发射截面。进一步研究表明, 单层波导中增益层厚度为60 nm时, 可实现光吸收与波导损耗的最佳平衡, 获得最低ASE阈值。研究表明单纯局域TM光场不足以逆转模式竞争优势, 为低阈值有机波导激光器的设计提供有益的参考。

关键词: 放大自发发射; 光场约束; 偏振特性; 有机增益介质; Slot波导

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260131

CSTR: 32170.14.CJL.20260131

Investigation of Waveguide Substrate Modulation on the Amplification of Spontaneous Emission in Organic Materials

WANG Bin^{1,2}, ZHANG Wentian^{1,2}, WANG Tienan^{1*}, YU Hao^{1,2}, ZHANG Keling^{1,2},
YAO Xinxin^{1,2}, GUO Xiaoyang¹, LV Ying^{1*}, LIU Xingyuan¹

(1. State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, 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)

* Corresponding Authors, E-mail: wangtienan@ciomp.ac.cn; lvying@ciomp.ac.cn

Abstract: Polarization control of organic amplified spontaneous emission (ASE) is a critical issue for high-performance organic optoelectronic devices. In this study, Sb_2O_3 was employed as the waveguide substrate and Alq:C545T as the gain medium to investigate the modulation mechanism of waveguide structures on ASE polarization characteristics. Experimental results show that ASE in both conventional and slot waveguide structures exhibits TE-dominant polarization. Notably, although the slot waveguide design effectively confines the TM optical field within the gain layer, no TM-polarized ASE output was observed experimentally. Quantitative analysis combining COMSOL simulations and experimental data reveals that the net gain predicted under the isotropic approximation contradicts the experimental observations. This discrepancy is attributed primarily to the in-plane horizontal orientation of the dopant molecule C545T in the thin film, which enhances the effective stimulated emission cross-section for TE polarization. Further investigation demonstrates that a gain layer thickness of 60 nm in a single-layer waveguide achieves the optimal balance between optical absorption and waveguide loss, yielding the lowest ASE threshold. This study clarifies that

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(62475256)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62475256)

merely confining the TM optical field is insufficient to reverse the inherent mode competition advantage, providing useful guidance for the design of low-threshold organic waveguide lasers.

Keywords: Amplified Spontaneous Emission (ASE); Optical Field Confinement; Polarization Characteristics; Organic Gain Medium; Slot Waveguide

1 引 言

有机发光材料是一类包含共轭结构的有机小分子和聚合物半导体材料,因其具有制备工艺简便、成本低廉、可溶液加工、发光性能可通过分子设计调控等独特优势,在信息和柔性光电子器件领域展现出广阔的应用前景^[1-4]。基于有机增益介质的波导结构是实现片上光源与有机激光器的关键平台。在光泵浦条件下,有机波导能够产生放大自发发射(ASE),这是一种本质属于受激发射的光放大现象,表现为光谱线宽的急剧窄化和输出强度的超线性增长,是实现激光振荡的前奏^[5-8]。有机 ASE 本身作为高亮度、低相干光源,在光谱学、传感、片上光互连等领域具有重要应用前景。

偏振是决定 ASE 应用场景的关键参数之一。在表面等离子激元器件中, TM 偏振光能有效激发表面等离子极化激元(SPP)共振,而 TE 偏振光则无法激发^[9-10]。在液晶激光、生物成像等领域,偏振态调控也非常重要^[11-12]。然而,大多数有机固态激光器呈现 TE 模式主导的偏振特性,实现 TM 偏振输出通常需要特殊谐振腔几何结构^[8]。实现有机波导 ASE 的偏振调控,尤其是获得 TM 偏振输出,具有重要的应用价值。近年来,有机波导 ASE/激光的偏振调控研究取得了显著进展。材料方面,基于微螺旋结构的手性有机材料实现了圆偏振激光^[13];共轭聚合物薄膜波导中,因为聚合物主链倾向于在平面内排列,观察到的 ASE 具有高度的 TE 偏振性能^[14]。结构设计方面,液晶包层波导实现了高效率的电光可调的偏振转换^[15];利用螺旋光栅作为反馈元件实现了方位角偏振的有机半导体涡旋激光^[16];分布式反馈光栅通过协同优化分子取向与光栅参数,获得高偏振纯度激光输出^[17-18]。尽管上述研究在偏振调控方面取得了重要进展,但多依赖于复杂的谐振腔结构或特定的各向异性材料。对于常规各向同性有机增益介质,如何通过波导结构设计来有效调控 ASE 的偏振态,特别是实现 TM 模式主导的输出,其内在的模式竞争机制仍有待深入阐明。

8-羟基喹啉铝(Alq)是一种经典的有机发光材料,具有良好的成膜性能和优异的光热稳定性,作为主体材料在有机光电子领域得到广泛应用^[1]。5,5'-双(4-甲氧基苯基)-2,2'-联噻吩(C545T)属于香豆素类有机激光染料,Alq:C545T 复合薄膜具有出色的激光性能^[19]。本文以高折射率、可见光区透明的 Sb₂O₃ 为波导层,Alq:C545T 为增益介质,主要开展以下两方面研究。一方面,利用 Sb₂O₃ 的高折射率特性,探究了增益层厚度远低于常规波导模式截止条件时的 ASE 性能。结果表明,在单层波导中,厚度仅为 30 - 60 nm 的 Alq:C545T 薄膜能借助 Sb₂O₃ 层消逝场的耦合实现低阈值 ASE 输出。其中,60 nm 厚度样品的阈值低至 5.7 μJ/cm²,该结果不同于“增益层需达到截止厚度才能有效支持 ASE”的传统经验。另一方面,为探索 TM 偏振输出,设计了 Glass/Sb₂O₃/Alq:C545T/Sb₂O₃ 的 Slot 波导结构。实验发现,尽管该结构成功将 TM 模式光场局域于增益层内且其光场限制因子高于 TE 模式,但 ASE 仍表现为 TE 偏振主导(偏振度 0.77)。结合仿真与实验分析,该现象可归因于 C545T 分子的面内水平取向(跃迁偶极矩平行于基底)^[20],使 TE 偏振获得更高的有效增益。上述结果表明,在有机波导中,单纯依靠光场局域化设计不足以逆转模式竞争优势,ASE 的偏振特性由增益介质的分子取向与波导模式选择性共同决定。本研究为理解有机波导 ASE 的偏振物理机制以及设计超薄增益层器件提供了直接的实验依据。

2 实 验

2.1 实验材料

实验所用材料具体如下: Alq(纯度 ≥99%)、C545T(纯度 ≥98%),均购自阿拉丁试剂有限公司;三氧化二锑(Sb₂O₃,纯度 ≥99.9%),购自中诺新材(北京)科技有限公司;无水乙醇、丙酮(纯度 ≥99.5%),购自国药集团化学试剂有限公司,用于玻璃基底的清洗处理。所有材料均未经过进一步提纯,直接用于实验。

2.2 样品制备

样品制备在千级超净实验室内进行,具体步骤如下:首先对玻璃基底进行清洗处理,将玻璃基底依次放入丙酮、无水乙醇、去离子水中,分别超声清洗 15 min,去除表面油污、灰尘等杂质;清洗完成后,放入真空干燥箱中,80℃干燥 30 min,去除表面残留水分。 Sb_2O_3 波导层采用电子束热蒸发方法制备,电子束镀膜机的腔体真空度控制在 3×10^{-3} Pa 左右,沉积速率 0.2 nm/s。随后在 Sb_2O_3 波导层上,采用传统电阻热蒸发方法制备 Alq:C545T 增益层,将 Alq 与 C545T 分别放入石英坩埚中加热,真空度控制在 2×10^{-4} Pa,调节两者的蒸发速率比达到 30:1 后进行双源共蒸,其中 Alq 的蒸镀速率为 0.15 nm/s。对于 Slot 波导结构,还需要在 Alq:C545T 增益层表面,继续采用电子束热蒸发工艺制备顶层的 Sb_2O_3 ,工艺条件不变。所有样品制备完成后,放入真空干燥箱中保存,用于后续各项性能测试。

本研究制备了以下五类样品:

- 常规波导样品(参比): Glass/Alq:C545T (110 nm)

- Sample A (Slot 波导): Glass/ Sb_2O_3 (85 nm)/Alq:C545T(50 nm)/ Sb_2O_3 (85 nm)

- Sample B (单层波导): Glass/ Sb_2O_3 (85 nm)/Alq:C545T(60 nm)

- Sample C (单层波导): Glass/ Sb_2O_3 (85 nm)/Alq:C545T(45 nm)

- Sample D (单层波导): Glass/ Sb_2O_3 (85 nm)/Alq:C545T(30 nm)

2.3 实验仪器及测试方法

样品的光致发光(PL)与吸收光谱分别由 Hitachi F-7000 型荧光光谱仪和 Shimadzu UV-3101PC 型紫外-可见分光光度计测量。薄膜折射率采用椭偏仪 J. A. Woollam M-2000 测量。荧光寿命、荧光量子效率利用 Edinburgh FLS 920 稳态瞬态荧光光谱仪测试。薄膜的表面形貌使用 Shimadzu SPM 9700 原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)进行测量。光泵浦 ASE 的激发光源是波长 355 nm 的 CryLas GmbH Nd^{3+} :YAG 脉冲激光器,重复频率为 50 Hz,脉冲宽度为 1 ns。使用 Coherent 的 EMUSBJ-10SI-HE 激光能量计测量脉冲激光能量。泵浦光通过焦距为 10 cm 的柱面镜汇聚成约 $4\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 的线条状光斑,通过中

性密度滤光片调节泵浦光能量。样品的发光通过 Avantes ULS2048L 光纤光谱仪收集。偏振特性测试通过位于样品端面与光纤探头之间的线偏振片来测量。偏振度 $P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 。

3 结果与讨论

3.1 Alq:C545T 薄膜的 ASE 性能

主体材料 Alq 与掺杂材料 C545T 的分子结构如图 1(a)所示。为构建有效的波导结构以实现 ASE,首先制备了常规波导样品 Glass/Alq:C545T。经计算,常规波导样品的 TE 模式截止厚度约为 100 nm, TM 模式的截止厚度约为 140 nm。为确保波导模式的有效支持,将常规波导样品的 Alq:C545T 厚度设定为 110 nm,略高于 TE 模式截止厚度但低于 TM 模式截止厚度,这意味着在常规波导样品中 TE 模式将优先被支持。图 1(b)所示为常规波导样品的吸收和 PL 光谱。吸收光谱中,397 nm 的吸收主峰来自于主体材料 Alq 分子的 $n-\pi^*$ 跃迁。PL 光谱峰值位于 522 nm,半高全宽(FWHM)约 100 nm,与 Alq 分子的 PL 光谱基本相同。由于 C545T 掺杂浓度较低(Alq:C545T 蒸发速率比 30:1),吸收和荧光光谱主要呈现主体材料 Alq 的光谱特征。经测试,纯 Alq 薄膜的荧光量子效率(PLQY)约为 20%,而 Alq:C545T 掺杂薄膜的荧光量子效率提升至 69%,表明 C545T 的掺杂使得大部分激子通过辐射跃迁的方式释放光子,非

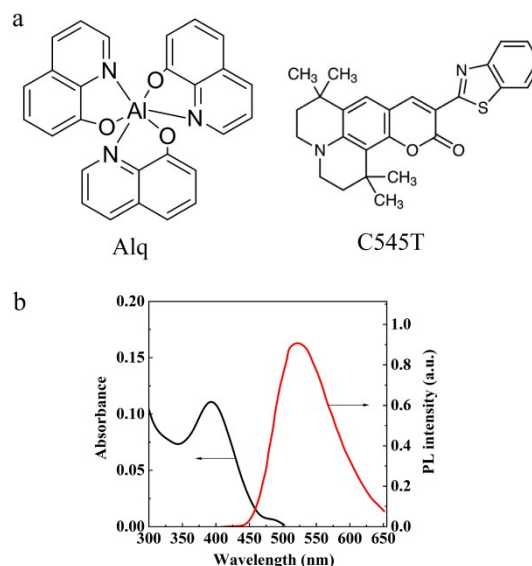


图 1 (a) Alq 与 C545T 的分子结构; (b) Alq:C545T 薄膜的吸收光谱与光致发光光谱

Fig. 1 (a) Molecular structures of Alq and C545T; (b) Absorption and PL spectra of the Alq:C545T film.

辐射复合过程被有效抑制。这一显著的效率提升归因于从 Alq 到 C545T 的有效 Förster 能量转移。

常规波导样品的 ASE 性能表征如图 2 所示。由图 2(a) 可知, 在 355 nm UV 脉冲激光泵浦下, 常规波导样品的 PL 光谱是峰值位于 553 nm 窄带光谱, 并且随着泵浦能量密度的增加, 谱线 FWHM 持续窄化。图 2(b) 显示, 当泵浦能量密度超过阈值后, 输出强度迅速增加, 通过输出强度曲线与 FWHM 曲线的交点确定 ASE 阈值 (P_{th}) 约为 2.39 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。图 2(c) 和 2(d) 分别采用变条长方法 (variable stripe length, VSL) 和激发光斑位移方法 (Shifted Excitation Spot, SES) 测量了常规波导样品的增益和损耗系数。VSL 方法测得净增益系数 (g_{net}) 约为 4.72 cm^{-1} , SES 方法测得波导损耗约为 8.66 cm^{-1} 。需要指出的是, 该净增益系数是在略高于阈值的泵浦条件下测得的, 此时材料增益与损耗接近平衡。损耗系数 (8.66 cm^{-1}) 包含了散射损耗和残余吸收, 而净增益为材料增益乘以光场

限制因子再减去损耗后的剩余值。图 2(e) 为常规波导样品的荧光衰减曲线, 通过单指数拟合可得荧光寿命约为 3.8 ns。受激发射截面是表征激光增益介质受激发射能力的物理量, 主要与自发发射的跃迁速率与光谱分布有关, 其公式如下:

$$\sigma_{em}(\lambda) = \frac{\lambda^4 E_F(\lambda)}{8\pi n^2 c \tau_F} \quad (1)$$

其中, $\sigma_{em}(\lambda)$ 是波长 λ 处的受激发射截面, $E_F(\lambda)$ 是基于 PLQY 数值进行归一化的荧光光谱, n 是介质的折射率, c 是真空中光速, τ_F 是材料的荧光寿命。结合荧光量子效率 69%, 可计算得到发射跃迁速率 kr 为 $1.82 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, 估算得到 Alq:C545T 掺杂薄膜在 550 nm 的受激发射截面约为 $5.5 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 。图 2(f) 的偏振性能测试显示, 常规波导样品具有明显的 TE 偏振发射特性, 偏振度约为 0.74。这一结果与理论预期一致: 在折射率对比度较高的波导结构中, TE 模式通常具有更高的光场限制因子 (η) 和更低的损耗, 因此在模式竞争中占据优势。

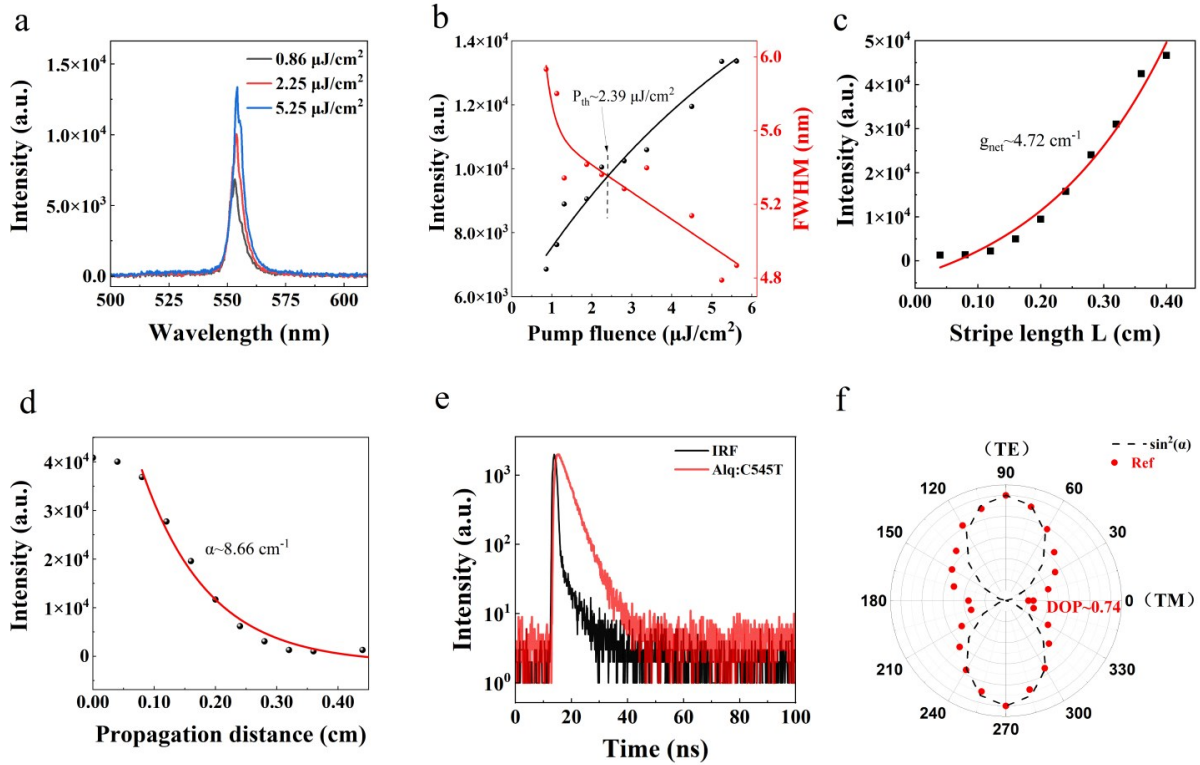


图 2 常规波导样品 (Glass/Alq:C545T) 的 ASE 性能表征: (a) 不同泵浦能量密度下的发射光谱; (b) 发射强度和 FWHM 随泵浦能量密度的变化; (c) 输出光强度随泵浦光条长的变化 (VSL 方法); (d) 输出光强度随未泵浦传输距离的变化 (SES 方法); (e) 荧光寿命衰减曲线; (f) 偏振特性

Fig. 2 ASE characteristics of the normal waveguide sample (Glass/Alq:C545T): (a) Emission spectra at different pump fluence; (b) Output intensity and FWHM under different pump fluence; (c) Output intensity versus pumped stripe length (VSL method); (d) Output intensity as a function of unpropagated propagation distance (SES method); (e) Fluorescence decay curve; (f) Polarization characteristics.

3.2 Slot波导样品(Sample A)的光学特性

为实现TM偏振ASE,本研究设计了Slot波导结构Sample A。Slot波导的设计理念在于:利用上下两层高折射率 Sb_2O_3 ($n \sim 2.08$)夹持低折射率Alq:C545T增益层($n \sim 1.73$),通过电磁场边界条件将TM模式光场局域在低折射率的增益层中,从而增强TM模式与增益介质的相互作用,以期实现TM偏振ASE输出。传统光学波导遵循全内反射机制,光场主要分布在高折射率层中。而Slot波导的光场局域不同于传统全内反射波导,其物理本质是TM光场在折射率界面上的法向电位移矢量连续^[21-22]。 Sb_2O_3 具有高折射率($n \sim 2.08$),而中间Alq:C545T增益层为低折射率($n \sim 1.73$),为满足边界连续条件,低折射率区域的TM法向电场分量会出现显著增强,从而将光场能量束缚于低折射率区域内。这一独特约束机制不同于传统全反射波导的光场分布规律,使TM光场能够局域在低折射率且较薄的增益层中,这也是本文中增益层厚度低于传统截止厚度仍能实现

ASE的重要原因。

图3(a)插图 of Sample A 的结构示意图。ASE性能测试表明,在低泵浦能量密度下,Sample A 首先出现峰值位于537 nm的发射峰,FWHM约为35 nm,该发射峰相较于Alq的PL峰(522 nm)红移了15 nm,主要源于C545T分子的发光。当泵浦强度增加时,在553 nm处出现新的窄峰,并迅速增强和进一步窄化,表明ASE现象的发生(图3(b))。图3(a)显示Sample A的ASE阈值约为 $2.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,与常规波导样品相比略有升高,阈值后的最小FWHM为5.6 nm。图3(c)为Sample A的光场分布模拟图。右侧图显示Slot波导结构可将TM模式光场有效局域于Alq:C545T增益层内,符合Slot波导的设计预期。左侧图显示增益层中存在较强的TE模式光场分布,尽管TE模式主要分布在上下两层高折射率 Sb_2O_3 层中。偏振性能测试如图3(d)所示,Sample A的ASE仍为TE偏振,偏振度约为0.77,未达到设计预期的TM偏振输出。

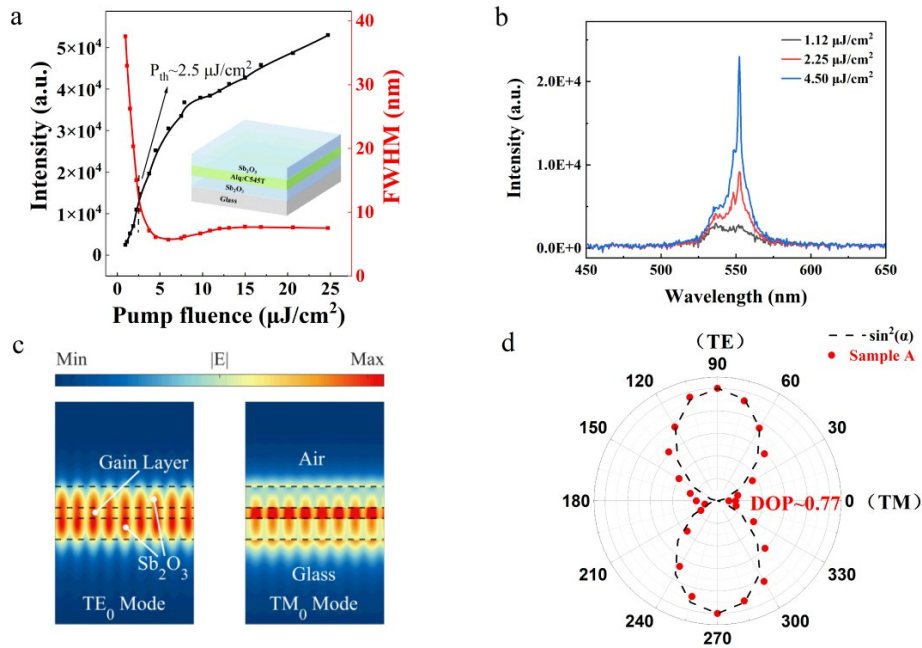


图3 Sample A ($\text{Glass}/\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{Alq:C545T}/\text{Sb}_2\text{O}_3$)的ASE性能。(a)输出光强、FWHM随泵浦能量密度的变化(插图为结构示意图);(b)不同泵浦能量密度下的发射光谱;(c)TE、TM模式光场分布图;(d)偏振特性

Fig. 3 ASE performance of Sample A ($\text{Glass}/\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{Alq:C545T}/\text{Sb}_2\text{O}_3$). (a) Output intensity and FWHM under different pump fluence (Inset: Schematic structure); (b) Emission spectra at different pump fluence; (c) Electric field distribution patterns for TE and TM modes; (d) Polarization characteristics.

通过椭圆仪测量可知,Alq:C545T薄膜在宏观上表现为光学各向同性,与主体材料Alq一致^[20]。为了定量解释这一结果,我们使用COMSOL Multiphysics软件进行了光场模式仿真计算。通过求

解麦克斯韦方程组获得各模式的电场分布,进而积分计算TE和TM模式在增益层内的光场限制因子以及各层的模式传输损耗(α)。计算结果汇总于表1。从表1可见,Slot结构中TM模式在增益

层内的光场限制因子(0.304)确实高于TE模式(0.224),符合理论预期。然而,TE模式具有更低的传输损耗(2.99 cm^{-1}),而TM模式的传输损耗更高(4.31 cm^{-1})。基于Alq:C545T的 σ_{em} 和Sample A的ASE阈值($2.5\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$),可计算出阈值处的材料增益系数 $g \approx 49.1\text{ cm}^{-1}$ 。进而可估计TE和TM模式的净增益系数。在该各向同性假设下,计算得到的TM净增益系数(10.62 cm^{-1})比TE净增益系数(8.01 cm^{-1})高出约 2.6 cm^{-1} 。然而,实验观测到Sample A的ASE为TE偏振主导(偏振度0.77),与上述各向同性模型的计算结果矛盾。

我们分析认为,导致该偏差的可能机制是掺杂分子C545T具有平面构型,即使掺入各向同性的主体材料Alq中仍倾向于面内排列。波导中TE模式具有显著的面内电场分量(电场矢量平行于波导界面、垂直于光传播方向),与面内取向分子的跃迁偶极矩方向高度重合,因此其耦合强度高于TM模式,使得TE模式的有效受激发射截面可能高于TM模式。在ASE单程放大过程中,尽管Slot波导成功地将TM模式局域在增益层中,TE模式仍然以 Sb_2O_3 层作为有效波导核心,实现了较低的损耗传输,并因C545T分子的面内取向而增强了净增益优势,使其最终胜出。这表明有机波导结构中偏振调控的复杂性:单纯依靠TM光场局域化设计不足以逆转模式优势,偏振ASE的最终形成是增益介质的分子取向和波导模式选择特性共同决定的。由于Alq:C545T薄膜中C545T作为掺杂分子浓度很低,掺杂薄膜的光学性能和PL发光性能都呈现主体材料Alq的特征,常规的测试手段都是针对材料宏观性能的表现,因此受研究

实验条件限制,目前无法测量Alq中少量掺杂的C545T分子的具体取向,但是基于其平面型分子构型以及文献的研究报道和领域内常识^[14,20],我们的上述推测是合理的解释之一。

3.3 Sb_2O_3 介质波导结构中不同增益层厚度样品的ASE性能

鉴于Sample A未能实现TM偏振ASE,本节进一步研究了单层 Sb_2O_3 波导结构中增益层厚度对ASE性能的影响,探究模式竞争的物理机制。设计了三种单层波导样品:Sample B ($x=60\text{ nm}$)、Sample C (45 nm)和Sample D (30 nm),结构均为Glass/ Sb_2O_3 (85 nm)/Alq:C545T($x\text{ nm}$),增益层厚度均低于常规波导的截止厚度(TE模式截止厚度约100 nm),因此波导模式主要由 Sb_2O_3 层支持,增益层位于波导模式的消逝场。

图4(a)和4(b)为 Sb_2O_3 薄膜以及 Sb_2O_3 /Alq:C545T薄膜的AFM形貌图。 Sb_2O_3 薄膜的表面粗糙度 $R_q=1.792\text{ nm}$,表明电子束蒸发制备的 Sb_2O_3 层成膜均匀、表面平整,无明显的凸起或缺陷,这有利于降低波导的散射损耗。 Sb_2O_3 /Alq:C545T薄膜的表面粗糙度 $R_q=0.817\text{ nm}$,表面平整度进一步提升,表明Alq:C545T增益层在 Sb_2O_3 层上生长良好,异质结具有良好的界面质量。图4(c)为Sample B的光场分布模拟结果。Sample C, D与B的光场分布是基本一致的。对于所有样品,TM模式主要分布在玻璃衬底中,而TE模式主要集中在高折射率 Sb_2O_3 层中。厚度较薄的增益层位于TE模式的消逝场中。根据模拟,随着增益层厚度从60 nm减小到30 nm,TE模式在增益层中的光场限制因子从0.18逐渐降低到0.0981(见表1)。

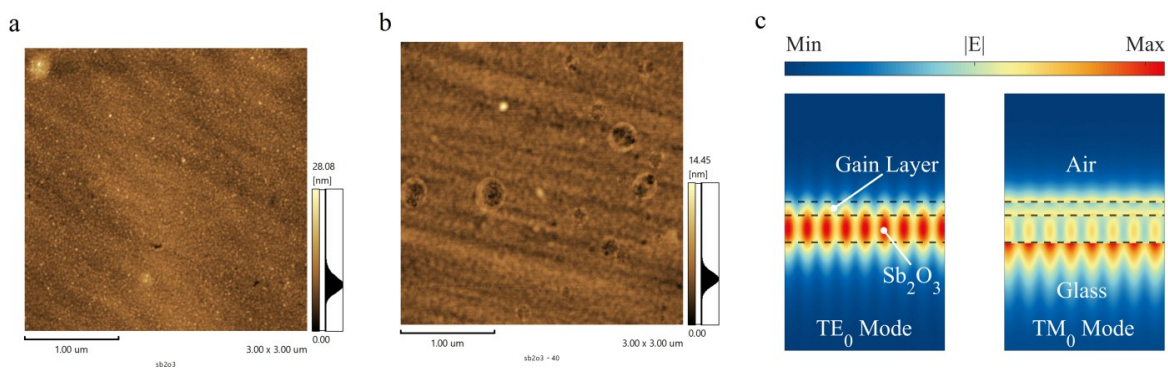


图4 (a) Sb_2O_3 薄膜的AFM形貌图;(b) Sb_2O_3 /Alq:C545T薄膜的AFM形貌图;(c)波导样品Sample B的TE、TM模式光场分布图
Fig. 4 (a) AFM morphology of Sb_2O_3 film; (b) AFM morphology of Sb_2O_3 /Alq:C545T film; (c) Electric field distribution patterns for TE and TM modes in the waveguides Samples

表 1 Sb₂O₃波导样品的 ASE 性能参数比较Tab. 1 Comparison of ASE performance parameters of Sb₂O₃ waveguide samples

| 样品 | 结构 | 增益层厚度 (nm) | P_{th} ($\mu\text{J}/\text{cm}^2$) | FWHM (nm) | $\eta(\text{TE}_0)$ | $\eta(\text{TM}_0)$ | $\alpha(\text{TE}_0)$ (cm^{-1}) | $\alpha(\text{TM}_0)$ (cm^{-1}) |
|----------|--------|------------|--|-----------|---------------------|---------------------|--|--|
| Sample A | Slot波导 | 60 | 2.5 | 5.6 | 0.224 | 0.304 | 2.99 | 4.31 |
| Sample B | 单层波导 | 60 | 5.7 | 9.3 | 0.18 | 0.0924 | 2.55 | 2.21 |
| Sample C | 单层波导 | 45 | 12.8 | 6.6 | 0.142 | 0.0509 | 2.02 | 1.44 |
| Sample D | 单层波导 | 30 | 10.6 | 22.8 | 0.0981 | 0.0213 | 1.41 | 0.75 |

仿真采用的折射率参数为: 玻璃衬底 1.52, Sb₂O₃ 2.08, Alq:C545T 增益层 1.73-i1.23E-4。 $\eta(\text{TE})$ 和 $\eta(\text{TM})$ 分别是 TE 和 TM 模式的光场限制因子。 $\alpha(\text{TE})$ 和 $\alpha(\text{TM})$ 分别是 TE 和 TM 模式的光损耗系数。 COMSOL 仿真仅基于光学常数, 未考虑增益各向异性。

Sample B、C 和 D 的 ASE 性能表征如图 5 所示。三个样品在泵浦能量密度超过阈值后均出现

来自于 C545T 分子的 ASE 发射, 峰值位于 551-553 nm, FWHM 随泵浦能量密度的增加而持续收

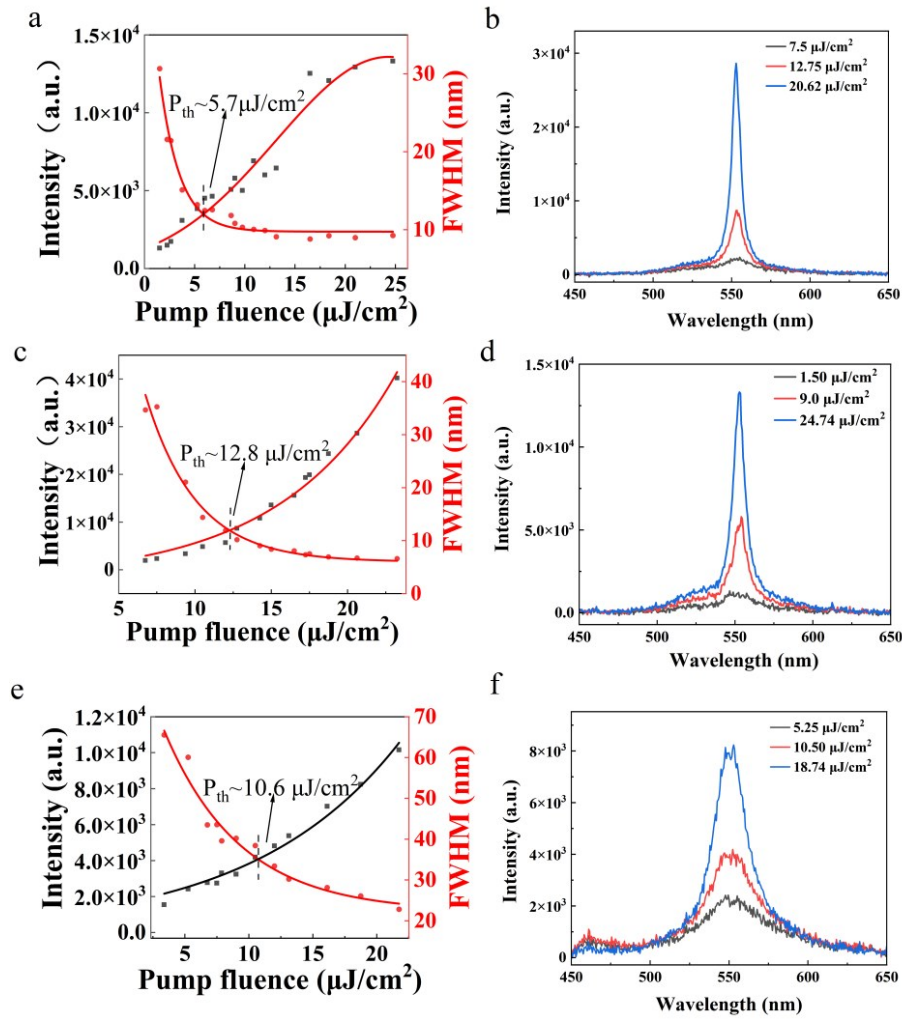


图 5 不同增益层厚度样品的 ASE 性能。(a) Sample B (60 nm) 的输出光强、FWHM 随泵浦能量密度的变化; (b) Sample B 在不同泵浦能量密度下的发射光谱; (c) Sample C (45 nm) 的输出光强、FWHM 随泵浦能量密度的变化; (d) Sample C 在不同泵浦能量密度下的发射光谱; (e) Sample D (30 nm) 的输出光强、FWHM 随泵浦能量密度的变化; (f) Sample D 在不同泵浦能量密度下的发射光谱

Fig. 5 ASE performance of samples with different gain layer thicknesses: (a) Output intensity and FWHM under different pump fluence for Sample B (60 nm); (b) Emission spectra of Sample B at different pump fluence; (c) Output intensity and FWHM under different pump fluence for Sample C (45 nm); (d) Emission spectra of Sample C at different pump fluence; (e) Output intensity and FWHM under different pump fluence for Sample D (30 nm); (f) Emission spectra of Sample D at different pump fluence.

窄。在低泵浦能量密度下, Sample B、C 的初始 FWHM 均保持在 30-40 nm 左右, 显著低于 PL 光谱的 FWHM (~100 nm), 表明低于阈值时已存在部分受激放大。这使得输出光强随泵浦能量密度的增长曲线呈现较为平滑的超线性特征, 无明显阈值拐点。因此, 单纯依靠输出光强曲线的拐点确定阈值存在较大不确定性, 采用 FWHM 与输出光强变化曲线的交叉点来判定 ASE 阈值更为合理。三个器件相比, Sample B (60 nm) 具有最低的 ASE 阈值, 为 $5.7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, 阈值后的最小 FWHM 为 9.3 nm。Sample C (45 nm) 的 ASE 阈值约为 $12.8 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, 阈值后 FWHM 窄化至约 6.6 nm。Sample D (30 nm) 虽然也观察到 ASE 现象, 但初始 FWHM 达到 65 nm (宽于 Sample B 和 C), 阈值约为 $10.6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, 阈值后最小 FWHM 为 22.8 nm, 远宽于其他样品。三种单层波导样品 (Sample B、C、D) 的 ASE 性能参数列于表 1 (为便于对比, 表 1 中也列出了 Slot 波导样品 A 的参数)。值得注意的是, Sample B 的 ASE 阈值低于 Sample C, 但其 FWHM 却大于后者, 这一现象可从光场限制因子与模式筛选机制两方面理解。样品的净增益系数 g_{net} 和 ASE 半宽 ($\Delta\lambda_{\text{ASE}}$) 可用下列公式表示:

(2)

$$\Delta\lambda_{\text{ASE}} \propto \frac{\Delta\lambda_0}{\sqrt{g_{\text{net}} \cdot L}} \quad (3)$$

其中, ΔN 是单位体积反转的粒子数, α 为损耗系数, η 为光场限制因子, $\Delta\lambda_0$ 是 PL 光谱的 FWHM, L 是增益长度。ASE 的光谱窄化程度取决于不同波长模式之间的净增益差异。Sample B (60 nm) 具有较高的光场限制因子 ($\eta=0.18$) 和更大的泵浦光吸收体积, 因此能够在较低泵浦能量密度下达到阈值。然而, 由于其波导结构在增益谱范围内对波长的选择性较弱, 在较宽的波长范围内均能满足净增益为正的的条件, 导致多个波长成分同时被放大, 从而限制了光谱的进一步窄化。相比之下, Sample C (45 nm) 的增益层厚度较薄, TE 模式在增益层中的限制因子降低 ($\eta=0.142$), 使得波导模式的有效折射率对波长更为敏感 (即色散增强), 从而增强了模式筛选能力。因此, 尽管 Sample C 的阈值较高, 但其 ASE 光谱在阈值后能够窄化至更小的半高全宽 (6.6 nm)。Sample D (30 nm) 的限制因子进一步降低 ($\eta=0.0981$), 且增益体积过小, 导致净增益不足, ASE 性能明显劣化。

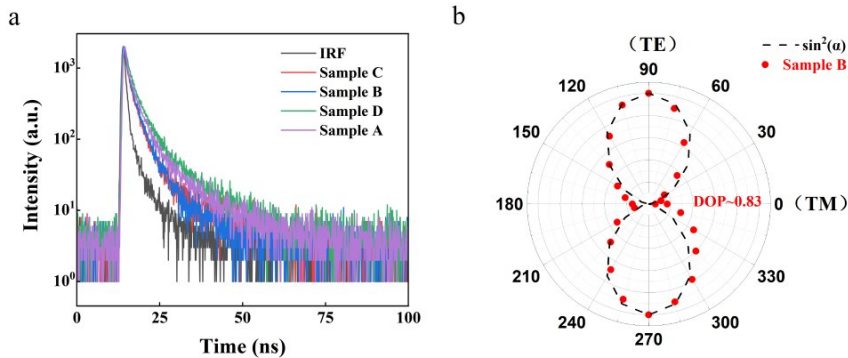


图 6 (a) Sample A/B/C/D 的时间分辨荧光衰减曲线; (b) Sample B/C/D 的偏振性能

Fig. 6 (a) Time-resolved photoluminescence decay curves of Samples A, B, C, and D; (b) Polarization characteristics for Samples B/C/D.

四个 Sb_2O_3 波导样品的时间分辨荧光衰减曲线如图 6(a) 所示。所有曲线均呈现非单指数衰减特征, 表明存在多种激子衰减通道。采用双指数模型进行拟合估算平均荧光寿命: 与常规波导结构的参比样品 (~3.8 ns) 相比, Sample A、B、C、D 的荧光寿命均降低。其中, Sample B 的平均寿命约 1.8 ns, Sample C 约 1.9 ns, Sample D 约 2.5 ns, Sample A 约 2.2 ns。Sample B、C、D 都是单层波导, 随着有机层厚度的降低, 荧光寿命逐渐增加。Sample D

具有最长的荧光寿命, 但 ASE 性能最差 (阈值高、FWHM 宽)。这表明增益层厚度越大, 辐射跃迁速率越高 (荧光寿命越短)。荧光衰减曲线的差异并非源于材料本征激发态的改变, 而是反映了不同波导结构对激子辐射复合过程的调控作用。波导模式可通过 Purcell 效应改变材料的自发发射速率, 从而导致荧光寿命的变化^[23]。不同增益层厚度和波导结构中, 模式的光场分布与限制因子存在差异, 导致了样品间荧光寿命的差异, 但这些差异

与 ASE 阈值之间并未呈现明显的单调关联。例如, Sample A 是 slot 波导结构, 对光场约束作用更强, 但是平均荧光寿命(2.2 ns)长于 Sample B(1.8 ns)。单层波导样品 Sample B、C、D 的 ASE 偏振分布曲线基本相似, 均呈现明显的 TE 特征, 偏振度分别为 0.83, 0.62, 0.56。图 6(b)展示了其中代表性样品 Sample B 的偏振特性。结合光场分布模拟结果, 可明确样品波导结构的优势偏振模式为 TE 偏振。TE 偏振的核心特征是电场矢量平行于波导平面。不同于 slot 波导结构, 三种单层波导结构虽然具有较薄的有机层厚度, 但均可实现 TE 光场的良好约束, TE 模式的光场限制因子均高于 TM 模式。因此, 即使不考虑 Alq:C545T 分子跃迁偶极矩的择优取向, 单层波导样品仍可实现 TE 主导的 ASE。需要指出的是, 在 TE 主导的 ASE 输出中, 仍可观察到 TM 模式的 ASE 现象, 只是其阈值较高, 阈值后的强度增长低于 TE 模式。因此, 只有偏振度接近 1 的样品, 才是纯 TE 偏振的 ASE。

上述结果表明, Sb_2O_3 波导层的高折射率可形成有效的光场约束结构, 从而实现有机增益介质 ASE 性能的有效调控。在 Sample A 的 Slot 波导中, 利用上下两层高折射率 Sb_2O_3 夹持低折射率增益层, 基于 TM 光场法向电位移矢量连续的物理机制, 可将 TM 光场有效局域于增益层内。在单层波导中, TE 模式光场主要局域在 Sb_2O_3 层, 其消逝场覆盖 Alq:C545T 增益层, 实现增益耦合。 Sb_2O_3 波导结构对 TE、TM 两种偏振模式具有不同的约束效果: 在单层波导中, TE 模式的光场限制因子高于 TM 模式, 因此更易被波导结构放大。有机波导中模式的净增益(增益系数 \times 限制因子-损耗)决定了优势模式。在 Slot 波导中, 虽然 TM 模

式被局域在增益层, 但其限制因子(0.304)与 TE 模式在增益层中的限制因子(0.224)相差不大, 而 TE 模式在 Sb_2O_3 层中的传输损耗(2.99 cm^{-1})低于 TM 模式在增益层中的损耗(4.31 cm^{-1})。此外, C545T 分子的面内取向可能进一步增强 TE 模式的净增益。上述因素共同导致 TE 模式在净增益竞争中获胜。Slot 波导虽然成功将 TM 模式局域在增益层中, 但 TE 模式仍然通过 Sb_2O_3 层形成有效传输通道。在后续研究中, 采用更低折射率的有机增益材料以进一步增强 TM 模式的电场局域, 同时选用各向同性增益介质以避免分子取向对 TE 模式的额外增益增强。在此条件下, 通过优化 Slot 波导结构(如进一步减小 Slot 层厚度、提高折射率对比度), 有望实现 TM 偏振输出的 ASE。

4 结 论

本文系统研究了 Sb_2O_3 波导基底对 Alq:C545T 有机薄膜 ASE 性能的调控作用。结果表明, 在常规波导与 Slot 波导结构中, ASE 均表现为 TE 偏振主导。定量分析表明, 尽管 Slot 结构可增强 TM 模式的光场局域, 但各向同性模型预测的净增益(TM 高于 TE)与实验观测的 TE 偏振主导相矛盾。这一偏差表明, 除光场限制因子与传输损耗外, 还需考虑 C545T 分子面内取向导致的增益各向异性对模式竞争的影响。这表明, 实现偏振反转需同时提高 TM 净增益并抑制 TE 的额外增益。在单层波导结构中, 60 nm 厚的增益层可实现泵浦光吸收效率与波导传输损耗的最佳平衡, ASE 性能最优。本研究为理解有机波导 ASE 偏振物理及优化低阈值器件结构提供了有益参考。

参 考 文 献:

- [1] ANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(12):913-915.
- [2] 王金江, 王益飞, 邓艳红, 等. 超小荧光分子实现单层白光电致发光二极管 [J]. *发光学报*, 2026, 47(3): 444-452.
WANG J, WANG Y, DENG Y, *et al.* Ultra-small fluorescent molecules achieve single-layer white electroluminescent diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2026, 47(3):444-452. (in Chinese)
- [3] CARRILLO-SENDEJAS J C, MALDONADO J-L. Progress in organic solar cells: materials, challenges, and novel strategies for niche applications [J]. *APL Energy*, 2025, 3(2): 021501.
- [4] PANG A, YIN F, DE J, *et al.* Highly polarized single-crystal organic light-emitting devices with low turn-on voltage and high brightness. *Mater. Horiz.*, 2025, 12(8): 2587-2591.
- [5] ZHANG W, WANG T, ZHANG K, *et al.* Amplified spontaneous emission from organic film based on a Bragg reflection waveguide[J]. *Opt. Express*, 2026, 34(4): 5903-5912.
- [6] RAHANE V P, ROSELI R B, IRELAND A R, *et al.* Highly stable red emissive organic semiconductor materials with low

- amplified spontaneous emission thresholds [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(25): 2400892.
- [7] HELIOTIS G, XIA R, WHITEHEAD K S, *et al.* Investigation of amplified spontaneous emission in oriented films of a liquid crystalline conjugated polymer [J]. *Synth. Met.*, 2003, 139(3): 727 - 730.
- [8] GOZHLYK I, CLAVIER G, MEALLET-RENAULT R, *et al.* An insight into polarization states of solid-state organic lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 2012, 86(4): 043817.
- [9] 何庆叶, 李国辉, 潘登, 等. 表面等离激元金属-绝缘体-半导体波导激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2022, 43(12): 1839-1854.
He Q Y, LI G H, PAN D, *et al.* Research progress of surface plasmon polariton metal-insulator-semiconductor waveguide lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(12): 1839-1854. (in Chinese)
- [10] BERGMAN D J, STOCKMAN M I. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(2): 027402.
- [11] ALI T, ELSTON S J, LIN J D, *et al.* On-demand polarization controllable liquid crystal laser [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2023, 8(3): 2200674.
- [12] HE C, HE H, CHANG J, *et al.* Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10: 194.
- [13] SUN C, LI J, SONG Q, *et al.* Lasing from an organic micro-helix [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2020, 59(27): 11080 - 11086.
- [14] MCGEHEE M D, HEEGER A J. Semiconducting (conjugated) polymers as materials for solid-state lasers [J]. *Adv. Mater.*, 2000, 12(22): 1655-1668.
- [15] 蔚云慧, 毕泽坤, 刁志辉, 等. 基于液晶包层平板光波导的偏振转换器设计 [J]. *液晶与显示*, 2024, 39(6): 725-734.
YU Y H, BI Z K, DIAO Z H, *et al.* Design of polarization converter based on liquid crystal cladding planar optical waveguide [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Appl.*, 2024, 39(6): 725-734. (in Chinese)
- [16] STELLINGA D, PIETRZYK M E, GLACKIN J M E, *et al.* An organic vortex laser [J]. *ACS Nano*, 12(3): 2389-2394.
- [17] CHENG H-C, HUANG Y-H, LIN H-W, *et al.* Continuously tunable organic solid-state DFB laser utilizing molecular re-orientation in molecular glasses [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(10): 2540-2545.
- [18] LIU L, LIU M, WANG Q, *et al.* Low-threshold distributed feedback laser based on holographic polymer dispersed liquid crystals through the oriented organic semiconductor films [J]. *Sci. Rep.*, 2024, 14(1): 17790.
- [19] ZHANG D, MA D. Enhanced amplified spontaneous emission by assistant Förster energy transfer in DCJTB-C545T-Alq3 co-guest-host system [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, 91(3-4): 525-528.
- [20] YOKOYAMA D. Molecular orientation in small-molecule organic light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem.*, 2011, 21(48), 19187-19202.
- [21] MULCAHY J, MCCARTHY J, PETERS F H, *et al.* 60 nm Widely tunable three section slot laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2023, 59(6): 2000706.
- [22] ALMEIDA V R, BARRIOS C A, PANEPUCCI R R, *et al.* Guiding and confining light in void nanostructure [J]. *Nature*, 2004, 431(7014): 1081-1083.
- [23] IVANOV K A, GUBAIDULLIN A R, MOROZOV K M, *et al.* Analysis of the purcell effect in the waveguide mode by s-quantization [J]. *Opt. Spectrosc.*, 2017, 122(5): 835-842.



王斌(1998-),男,甘肃省定西人,电子信息专业硕士研究生在读,主要从事有机激光方面的研究。
E-mail: wangbin232@mails.ucas.ac.cn



王铁男(1992-),男,吉林白城人,博士,2023年于东北师范大学获得博士学位,主要从事有机光电子器件的研究。
E-mail: wangtienan@ciomp.ac.cn



吕莹(1986-),女,吉林省吉林人,博士研究生,副研究员,2013年于吉林大学获得博士

学位, 主要从事智能光学材料、器件及应用研究。

E-mail: lvying@ciomp. ac. cn