

# 一维边发射有机半导体光子晶体激光器设计

李长伟<sup>1\*\*</sup>, 陈笑<sup>1\*</sup>, 蔡园园<sup>2</sup>, 王晓青<sup>1</sup>, 冯帅<sup>1</sup>, 王义全<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中央民族大学理学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>北京交通大学理学院, 北京 100044

**摘要** 基于有机共轭聚合物聚[2-甲氧基-5-(2-乙基己氧基)-1,4-苯乙炔](MEH-PPV)的脊形波导,利用光子晶体特殊的光调制特性,模拟设计了一维边发射有机光子晶体激光器。利用光子晶体的带隙结构和带边效应构建了由光子晶体全反镜和透反镜形成的谐振腔,在谐振腔内的脊形波导上引入一维缺陷型光子晶体,利用光子晶体缺陷模特性抑制了多纵模竞争,并在此基础上分析了复合结构所导致的边界模效应,得出此类非金属微腔激光器腔长设计的经验公式。模拟结果表明该一维边发射有机光子晶体激光器可实现中心波长为 588 nm、半峰全宽为 0.131 nm 的单纵模激光输出。

**关键词** 激光器; 光子晶体激光器; 边发射激光器; 时域有限差分法; 有机半导体

中图分类号 TN383+.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0914001

## Design of One-Dimensional Edge-Emitting Organic Semiconductor Photonic Crystal Lasers

Li Changwei<sup>1\*\*</sup>, Chen Xiao<sup>1\*</sup>, Cai Yuanyuan<sup>2</sup>, Wang Xiaoqing<sup>1</sup>, Feng Shuai<sup>1</sup>, Wang Yiquan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup> College of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** A one-dimensional (1D) edge-emitting photonic crystal laser is designed based on the ridge waveguide of organic conjugated polymer poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy) phenylenevinylene-1,4-diyl] (MEH-PPV) and the special optical modulation characteristics of photonic crystals. The band gap structure and the band edge effect of photonic crystal are employed to construct the resonator formed by photonic crystal total mirror and partial transmission mirror. 1D photonic crystal defect component is introduced on the ridged waveguide in the resonator and suppresses effectively the mode competition based on the property of photonic crystal defect-mode. The boundary-mode effect caused by composite structure is analyzed, and empirical formula for the cavity length of this kind of non-metallic microcavity laser is obtained. The simulating result shows that a single longitudinal mode laser output with the central wavelength of 588 nm and the full width at half maximum of 0.131 nm is achieved in 1D edge-emitting organic photonic crystal laser.

**Key words** lasers; photonic crystal lasers; edge-emitting lasers; finite different time domain method; organic semiconductor

**OCIS codes** 140.3410; 230.3670; 230.5298

## 1 引 言

作为现代科学技术的重要工具,激光器已经广泛应用于信息、工业、医疗、国防等诸多领域。目前,各类无机半导体激光器的研发与应用均取得了突飞猛进的发展,技术也趋于成熟。纵观这类激光器的研制过程,高质量的无机半导体材料一直是制约高

性能激光器应用的关键所在,表现为:一方面材料成本高,制作条件苛刻,成品率较低,且制备过程和后期处理会产生一定的环境影响;另一方面,在光显示与光通信领域,由于材料制作和加工工艺等问题,无机半导体激光器不易于全光平板集成。与之相比,有机半导体激光器展现出了巨大优势,可作为增益介质的有机半导体材料来源广泛,并具有发射光谱

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-02; 录用日期: 2018-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61675238,61775244)

\* E-mail: xchen4399@126.com; \*\* E-mail: changweilidz@163.com

宽、吸收与发射截面积大、易于成膜加工、出射窗口制备简单、便于集成等优点。因此近年来有机半导体发光器件及有机半导体激光器越来越受到国内外研究者的关注<sup>[1-9]</sup>。

自 1996 年 Tessler 等<sup>[10]</sup>首次报道了基于有机共轭聚合物材料的垂直微腔激光器以来,各国在有机半导体材料及各类谐振腔结构设计方面进行了大量的研究,取得了一定的成果。几类典型的有机半导体激光器构型包括平面法布里-珀罗(FP)激光器、分布反馈式(DBF)激光器<sup>[11]</sup>、分布式布拉格反射(DBR)激光器和 DBR-DFB 激光器<sup>[12]</sup>。FP 腔激光器两侧的反射镜构成谐振腔,中间增益介质在抽运源激励下使得腔内光波发生受激辐射放大,但传统 FP 腔和面发射 FP 腔由于器件大小及激射窗口方向等原因均不适合全光平板集成;DBR 激光器在增益介质两侧,利用周期性光栅结构构建有效谐振腔,光栅周期一般为激射波长的四分之一,可形成反射率高达 99% 的反射镜,当然该激光器增益区普遍偏小;DFB 激光器和 DBR 激光器的结构简单,且谐振腔损耗有明显的波长依赖性,由此决定了它们在单色性和稳定性方面优于一般的 FP 腔激光器。DBR-DFB 激光器中的谐振腔由“空气-材料”构成的反射面和周期性光栅组成,为实现较好的工作性能,要求“空气-材料”界面形成的反射镜横切面非常平滑。对于 DFB 激光器,整个增益介质区均采用周期性光栅,利用布拉格反射效应增强正反馈,但这类激光器的研究以面发射居多。

近年来,光子晶体激光器已经成为光子晶体应用的重要方向之一,光子晶体的光子禁带和局域特性为制备性能优良的发光光源奠定了物理基础,推动了未来多彩高清显示的发展。光子晶体的优势主要有:光子晶体微腔的 Purcell 效应可有效抑制增益介质的自发辐射速率,有望实现无阈值激光器;光子晶体能带效应可调制半导体激光器光束质量<sup>[13]</sup>;光子晶体带边的低群速度和高态密度有利于提高光增益<sup>[14]</sup>;非对称的光子晶体结构可控制出射光束偏振态;光子晶体耦合特性有利于大功率激光器及通信器件的制备<sup>[15-16]</sup>等。1999 年,美国加州理工大学首次报道了基于 InGaAsP 量子阱结构的光抽运二维光子晶体点缺陷微腔激光器<sup>[17]</sup>。2001 年,韩国先进工业技术研究院巧妙地设计出了电抽运光子晶体微腔激光器,利用缺陷微腔下方的亚微米级半导体通道成功解决了电注入问题<sup>[18]</sup>,加快了器件研究实用化进程。2001 年,日本 Noda 等<sup>[19]</sup>首次将多量子阱

有源层和带有光子晶体结构的晶片键合在一起,通过带边和晶格对称性,实现了带边光子晶体激光器的发射与偏振控制。2006 年,中国科学院半导体所郑婉华课题组<sup>[20]</sup>利用光子晶体缺陷波导的带边慢光效应实现了光与增益介质的强烈相互作用,获得结构更加简单的光子晶体激光器。

鉴于有机半导体材料优良的发光特性及光子晶体特殊的光调制作用,本文研究了一维(1D)边发射有机半导体光子晶体激光器,从理论上实现了长增益区低阈值的单纵模边发射激光输出。

## 2 一维边发射有机光子晶体激光器的结构设计及仿真

### 2.1 有机共轭聚合物增益介质

一维边发射有机半导体光子晶体激光器是利用四能级体系的有机共轭聚合物作为增益发光介质,借助光子晶体优良的光调制特性,使激发光在材料薄膜周期结构中增益放大,最终实现受激辐射输出。

有机共轭聚合物是重要的发光材料。与无机半导体材料相比,各向同性有机材料的结构加工可借助于微纳刻蚀技术和后处理工艺,可大幅降低边发射激光器出射窗口的制备难度,解决了无机半导体激光器必须借助于材料解理面构建谐振腔的问题。本研究选用有机共轭聚合物聚[2-甲氧基-5-(2-乙己氧基)-1,4-苯乙炔](MEH-PPV)作为激光增益介质<sup>[21]</sup>。MEH-PPV 具有发光光谱宽、受激发射截面较大、理化性能良好及斯托克斯频移导致的自吸收小等优点。图 1 中实线为实验测得的 MEH-PPV 的荧光谱,光谱范围为介于红绿波段的 500~700 nm,峰值为 588 nm。在利用旋涂法形成的 MEH-PPV 聚合物薄膜上可较容易制备出一维激光器的微纳结构。

### 2.2 边发射激光器的结构设计

图 2 为所设计的一维边发射有机半导体光子晶体激光器的结构示意图。图中“玻璃-(MEH-PPV)-空气”的非对称脊形波导将有机半导体发光有效地限制在波导层中传输。对特定波长具备全反和透反功能的一维光子晶体结构形成了激光器谐振腔。有机半导体脊形波导一方面限制了光束的传输方向,另一方面也是激光增益介质,因此克服了前述 DBR 激光器增益区偏小、难以提高激光输出功率的不足。在此基础上,为获取单色性更好的激射输出,本研究在谐振腔中引入光子晶体选模单元,利用光子晶体的缺陷模特性调控单纵模输出。

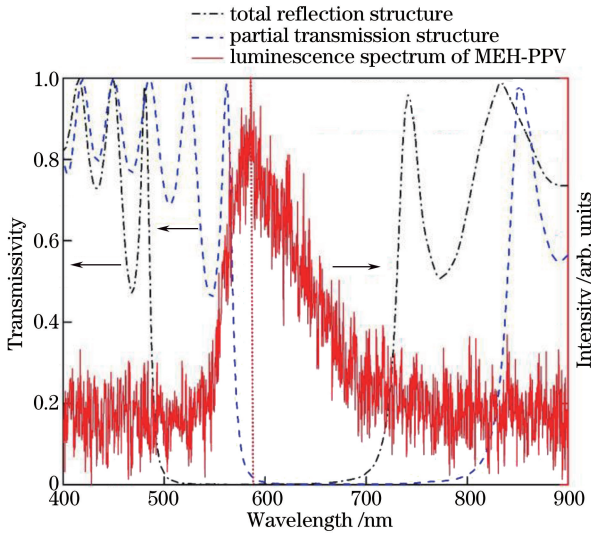


图1 激光增益介质 MEH-PPV 的发光谱以及光子晶体激光器中全反结构、透反结构的透射谱

Fig. 1 Luminescence spectrum of laser gain medium MEH-PPV and transmission spectra of total reflection structure and partial transmission structure in photonic crystal laser

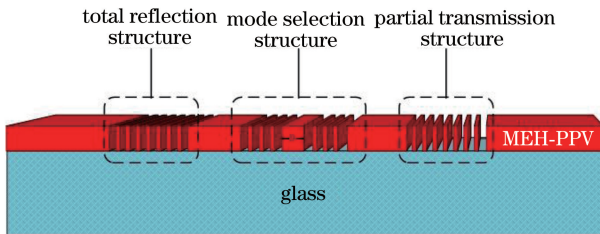


图2 一维边发射有机半导体光子晶体激光器结构示意图

Fig. 2 Schematic of 1D edge-emitting organic semiconductor photonic crystal laser

### 2.2.1 激光器中谐振腔的构建

根据 Dowling<sup>[22]</sup> 的理论,本研究利用光子晶体带隙特性设计了谐振腔一端的全反镜。MEH-PPV 材料的折射率取 1.77<sup>[23]</sup>。在考虑器件尺寸有限的情况下,设置一维光子晶体光栅周期  $A_1 = 230 \text{ nm}$ , 占空比  $d_1 = 0.639$ , 周期数  $N = 8$ 。图 1 虚线为基于时域有限差分法的二维光子晶体带隙特性。模拟结果表明该光子晶体结构对波长为 588 nm 的光具有反射率  $R = 99.99\%$  的优良反射特性,因此可将其作为激光器一端的全反镜。同时,利用光子晶体带边效应构建谐振腔另一端的透反镜。当一维光子晶体周期  $A_2 = 262 \text{ nm}$ 、占空比  $d_2 = 0.561$ 、周期数  $N = 8$  时,该结构对波长为 588 nm 的光的反射率为 98%,适合作为小增益系数有机发光材料的输出透反镜,如图 1 所示。激光增益介质 MEH-PPV 的荧光发射谱,以及由光子晶体全反镜和透反镜构建的优良谐振腔,有助于中心波长 588 nm 附近的光束在腔

内形成激射。

### 2.2.2 激光器中选模单元的设计

增加谐振腔长度必将导致符合起振条件的纵模个数增多,造成激光多模输出,恶化输出激光的时间相干性。为解决多纵模问题,利用光子晶体微腔的选模特性,在谐振腔内的脊形波导上设计支持单一共振模式的一维缺陷型光子晶体,如图 2 所示,以期获得复合结构下单纵模输出。

在该谐振腔内部引入一个完整光子晶体单元,该光子晶体将会有效调控腔中光子态密度。当谐振腔所支持的谐振模式完全落入所引入的光子晶体带隙中时,该结构将不能实现任何光的谐振。但如果在该光子晶体中引入缺陷微腔,该缺陷将支持某个确定的缺陷模,通过调整缺陷的结构参数,可使得光子晶体缺陷所支持的缺陷模与谐振腔的某个谐振波长相匹配,从而实现在复合结构中单一模式的谐振输出。

为不失一般性,系统研究了腔中缺陷型光子晶体的结构参数对输出光的影响。相比于一维光子晶体的周期、占空比等参数,光子晶体的缺陷长度对复合结构的谐振输出的影响较大,为此接下来主要研究缺陷长度对所设计的光子晶体激光器性能的影响。

在谐振腔中引入一维光子晶体结构,其周期设为 230 nm,其中 MEH-PPV 的厚度为  $d = 83 \text{ nm}$ ,通过调控中心处一个 MEH-PPV 层的厚度来引入缺陷微腔。当中心缺陷厚度变化时,在光子晶体带隙中缺陷模对应的波长发生变化。有趣的是,当中心缺陷层厚度  $D$  为完美光子晶体 MEH-PPV 厚度的偶数倍[即  $D = 2md$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ )]时,缺陷光子晶体均支持波长 588 nm 的缺陷模<sup>[24]</sup>。为研究 588 nm 缺陷模的局域特性,模拟了  $m = 1, 2, \dots, 6$  条件下该局域模的品质因子  $Q$ ,结果如图 3 所示。品质因子  $Q$  随着  $m$  的增大而呈线性增加的趋势。品质因子越高,越有利于选模;但当  $m \geq 4$  时,在 MEH-PPV 荧光谱 500~700 nm 范围内,除波长 588 nm 的缺陷模之外,光子带隙内又出现了其他缺陷模,如图 3(a)中虚线框所示。为确保激光单模输出及提高激光器的输出效率,选取  $m = 3$ 。

此外,品质因子  $Q$  也受光子晶体周期数  $N$  的影响。在确定  $m = 3$  的前提下,图 4(b)的模拟结果表明当  $N = 6, 8, 10, 12$  时,对应的品质因子  $Q$  分别为 92, 292, 804, 1754,即  $Q$  值随着选模结构周期数  $N$  的增大而增大。不过也可以注意到,随着  $N$  的增

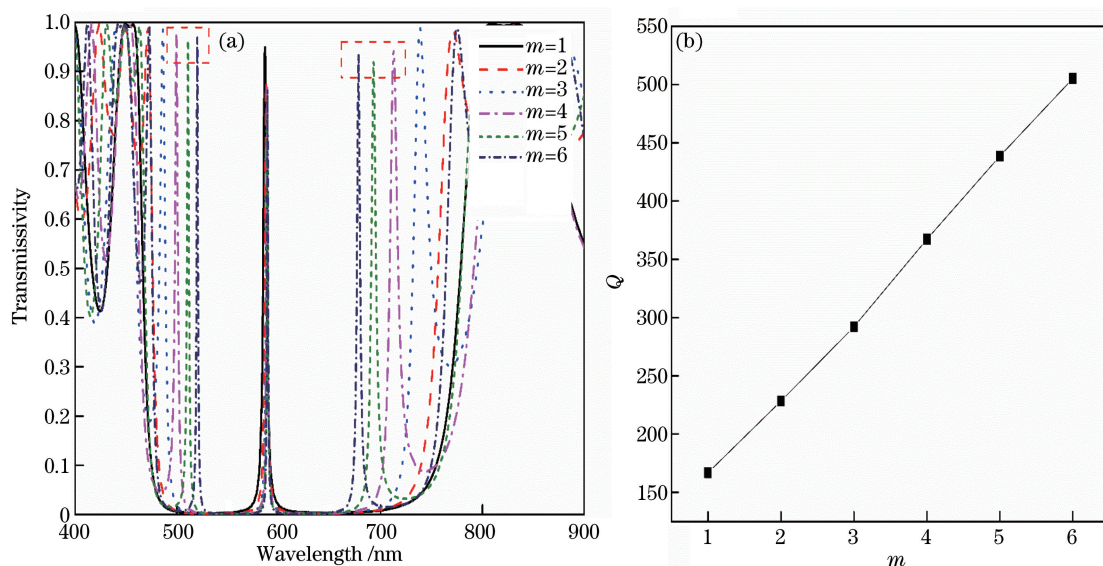


图 3 (a)一维光子晶体选模结构的透射谱; (b)缺陷模的品质因子  $Q$  与光子晶体缺陷层厚度  $D$  的关系  
 Fig. 3 (a) Transmission spectrum of 1D photonic crystal mode-selection component; (b) relationship between the quality factor  $Q$  of defect modes and the defect layer thickness  $D$  of photonic crystal

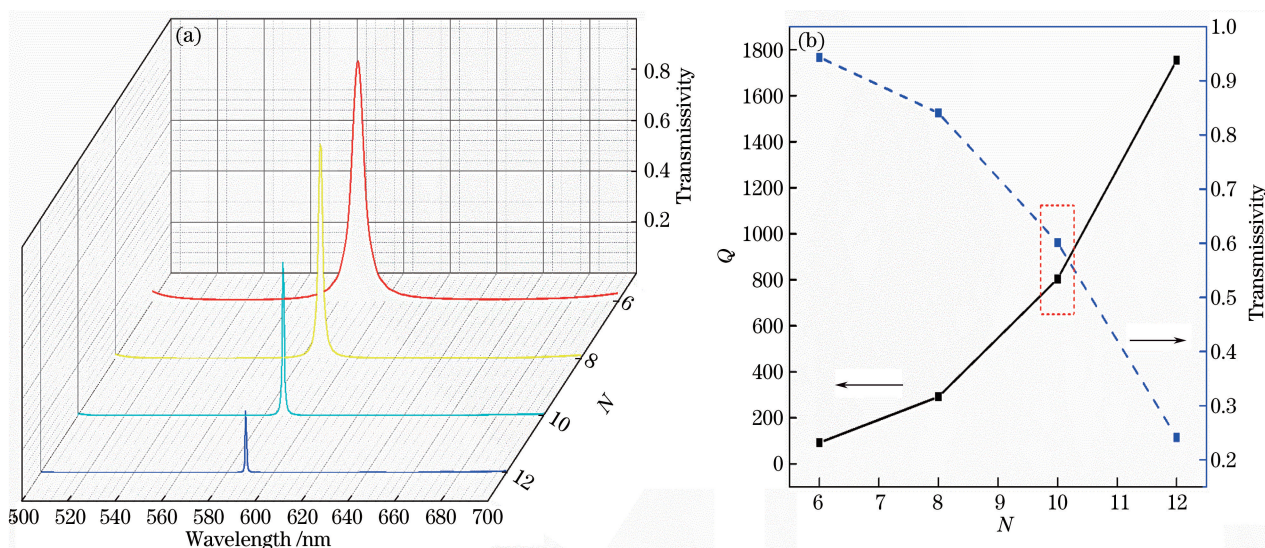


图 4 (a)一维缺陷型光子晶体选模结构的透射谱; (b)缺陷模的品质因子和透射率随光子晶体周期数  $N$  的变化关系  
 Fig. 4 (a) Transmission spectra of 1D defect type photonic crystal mode-selection component; (b) relationship between quality factor  $Q$  and transmissivity of defect modes with the structure period  $N$  of photonic crystal

大,缺陷模对应的透射率却在减小,如图 4(b)所示。为确保纵模易于起振及输出光的相干性,取谐振腔内光子晶体的周期数  $N=10$ 。

综合上述优化后的结构参数,图 5 给出了结合全反结构、透反结构及选模结构在内的一维边发射有机半导体激光器的共振模式。在该结构中,为使选模结构所支持的 588 nm 波长的局域模与全反/透反结构所构建的谐振腔的谐振波长相一致,确保 588 nm 光束在整个结构中增益放大,本研究分析了选模结构与全反结构和透反结构之间的波导间隔

$l_1, l_2$  对模式的影响。通过对谐振腔内的时间信号作傅里叶变换,模拟结果表明当  $l_1=l_2=3.695 \mu\text{m}$  时,谐振腔中仅有中心波长为 588 nm、半峰全宽  $\Delta\lambda$  为 0.131 nm 的模式谐振输出,同时三个结构带隙无重叠性,有效抑制了因三部分结合造成的周期性破坏而产生的边界模效应,且这种波导间隔有效抑制了多纵模竞争。此外,由图 5 可见,缺陷模的能量主要集中在选模结构单元中,其他光能弥漫在整个激光器谐振腔中,这说明 588 nm 的光束在谐振腔中振荡,并逐步放大实现激射。

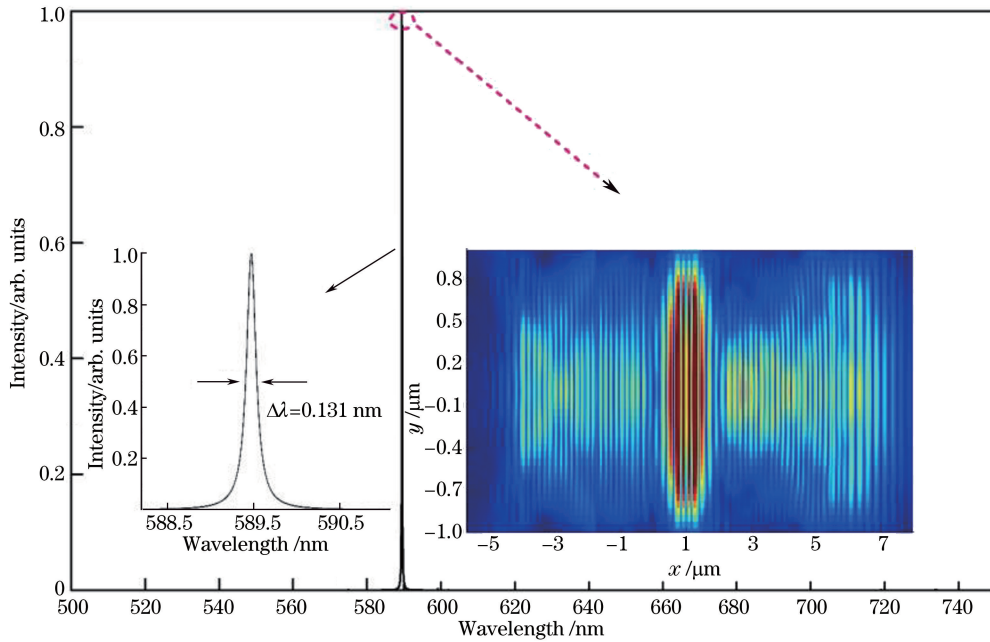


图 5 一维边发射有机半导体光子晶体激光器的谐振模式。左插图和谐振模式局部放大图,右插图对应的模场分布图  
 Fig. 5 Resonance mode of 1D edge-emitting organic semiconductor photonic crystal laser. The left inset shows the partial enlargement of the resonance mode; the right inset is the corresponding mode field pattern

### 3 激光器优化与讨论

在上述讨论中,注意到当激光器中选模结构与全反结构和透反结构的波导间隔满足  $l_1 = l_2 = M \frac{\lambda}{2n} + \Delta$  时(其中: $M$  为正整数; $n$  为介质折射率; $\Delta$  为修正因子),在抑制边界模的情况下,均能使确定波长的电磁波在整个结构中谐振,实现单波长输出。

图 6 为不同间距  $l$  的复合结构所支持的谐振模式。模拟结果表明,在满足  $l_1 = l_2 = M \frac{\lambda}{2n} + \Delta$  条件下,当  $\Delta = 41.5 \text{ nm}$  时,随着间距  $l$  的增大,谐振模式  $588 \text{ nm}$  峰位基本保持不变,且谐振模式单一;但当  $l \geq 3.861 \mu\text{m}$  时,开始出现明显的杂峰,如图 6 中插图所示,谐振模右侧出现峰位为  $598.9 \text{ nm}$  的小尖峰。为避免多模干扰,选择最理想条件,确定间距  $l_1 = l_2 = 3.695 \mu\text{m}$ ,对应总腔长  $L = 10.026 \mu\text{m}$ ,谐振模的品质因子  $Q$  高达  $4698.7$ ;反之如果不满足  $l_1 = l_2 = M \frac{\lambda}{2n} + \Delta$  条件时,则很难抑制多纵模,如图 6 红色虚线框所示,可以很明显地看到,当  $l_1 = l_2 = 1.661 \mu\text{m}$ ,即  $l_1 = l_2 = M \frac{\lambda}{2n}$ ,此时会出现两个谐振峰;图 6 红色虚线框中  $l_1 \neq l_2$  (其中: $l_1 =$

$1.703 \mu\text{m}, l_2 = 1.661 \mu\text{m}$ , 即  $l_1 = M \frac{\lambda}{2n} + \Delta, l_2 = M \frac{\lambda}{2n}$ )时,同样也出现了因界面效应导致的双峰谐振,这会恶化激光单模输出。

经验公式中的  $\Delta$  对有机半导体激光器的性能影响较大,这是由激光器材料所决定的。对于金属型谐振腔,电磁场在金属表面存在突变,因此谐振条件表示为  $l = M \frac{\lambda}{2n}$ 。而在所讨论的激光器中,增益介质和谐振腔均是在 MEH-PPV 的脊形波导上构建的,电磁场在有机材料表面上不发生突变,而是会部分渗透到全反层和透反层,因此其实际谐振腔长需要引入修正因子  $\Delta$ 。

在器件制备阶段,聚焦离子束刻蚀技术将不可避免地引入加工误差,因此为提高本设计对实验的参考价值,进一步分析了制备误差对激光器输出特性的影响。图 7 为一维光子晶体空气间隔误差分别为  $5, 10, 15, 20 \text{ nm}$  的条件下对应的激光输出谐振模式。随着加工误差的增大,谐振峰出现蓝移。这是由选模结构和谐振腔共同决定的,当选模结构的缺陷长度由于加工误差而变短时,其允许通过的目标波长将会发生蓝移;同时谐振腔变短时,对应的谐振波长也会发生蓝移。当误差达到  $20 \text{ nm}$  时,在波长  $573 \text{ nm}$  附近出现了三个谐振峰,不过边模的幅度较小,对主谐振模影响不大。

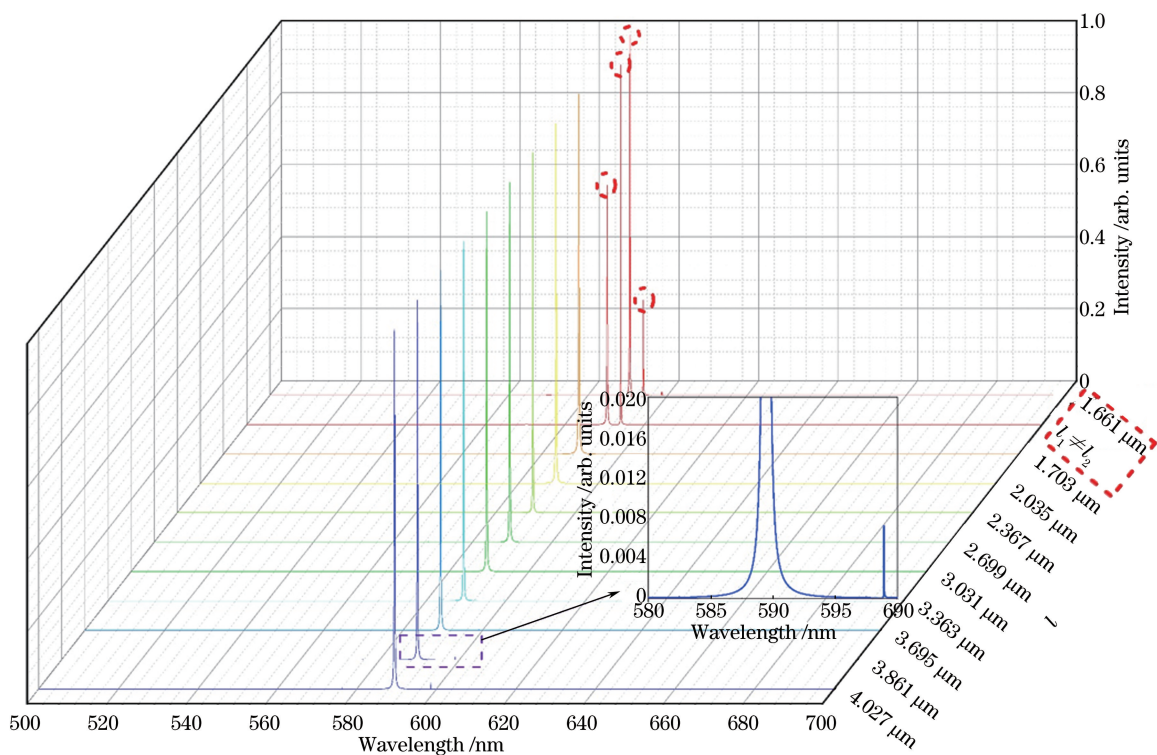


图 6 不同  $l_1, l_2$  对激光谐振模式的影响。插图为  $l_1=l_2=3.861 \mu\text{m}$  时谐振模式局部放大图  
Fig. 6 Dependence of resonant modes on different  $l_1$  and  $l_2$ .

The inset shows the partial enlargement of the resonant mode while  $l_1=l_2=3.861 \mu\text{m}$

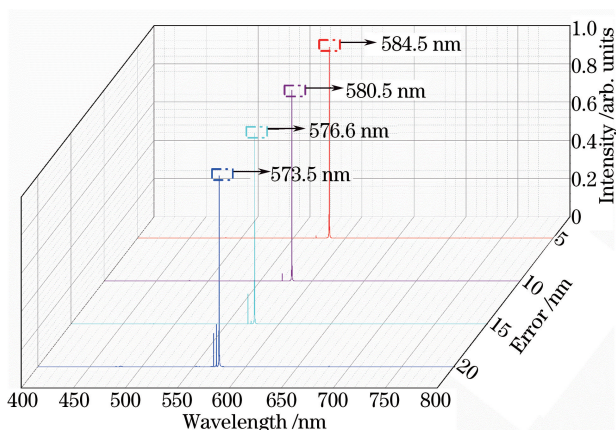


图 7 谐振模式随微纳加工误差的变化  
Fig. 7 Resonance mode changes with micro-nano machining error

基础上,在谐振腔内的有机脊形波导上引入具有选模功能的一维缺陷型光子晶体,利用光子晶体特有的缺陷模特性,消除了由于大腔长所带来的多纵模问题,实现了单纵模谐振,改善了激光输出的时间相干性。最后,在由有机增益介质、光子晶体全反镜和透反镜构建的谐振腔及其选模结构单元内,仿真模拟实现中心波长为 588 nm、半峰全宽为 0.131 nm 的单纵模激光输出,并且还提出了非金属谐振腔谐振条件的经验公式。经过误差分析,该设计可允许的实验微结构加工误差为 20 nm 左右,符合实际加工的要求。这些工作为边发射有机半导体激光器的制备与应用提供了理论基础,同时也为未来面上有源无源全光集成提供了一种方案

## 4 结 论

采用具有优良发光特性的有机共轭聚合物 MEH-PPV 作为激光增益介质,利用光子晶体灵活多样的光调制功能,设计了一维边发射有机半导体光子晶体激光器。利用光子晶体带隙结构和带边特性构建了由光子晶体全反镜和透反镜形成的谐振腔,解决了无机材料谐振腔依赖于解理面的难题,并且长增益区有利于提高激光器的输出功率。在此基

## 参 考 文 献

- [1] Liu L J, Kong X B, Liu Y G, *et al.* Enhancement of conversion efficiency for an organic semiconductor laser based on a holographic polymer dispersed liquid crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66 (24): 244204.  
刘丽娟, 孔晓波, 刘永刚, 等. 基于液晶/聚合物光栅的高转化效率有机半导体激光器[J]. *物理学报*, 2017, 66(24): 244204.

- [2] Yang H S. Fabrications of white organic light-emitting device based on fluorescent sub-monolayer combine with phosphorescent doping layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0323005.  
杨惠山. 荧光亚单层结合磷光掺杂层制备白色有机发光器件[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0323005.
- [3] Cai Y Y, Chen X, Li N, *et al.* Electrical pumping organic quasi-crystal laser and its properties[J], *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0614002.  
蔡园园, 陈笑, 李宁, 等. 电抽运有机准晶光子晶体激光器及其特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0614002.
- [4] Yang G, Chen X, Wang Y, *et al.* Lasing characteristic of organic octagonal quasicrystal slabs with single-defect microcavity at low-index contrast [J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 11457-11464.
- [5] Liu X, Py C, Tao Y, *et al.* Low-threshold amplified spontaneous emission and laser emission in a polyfluorene derivative[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(15): 2727-2729.
- [6] Deng S H, Li W C, Huang W B, *et al.* All-organic two-dimensional photonic crystal laser based on holographic polymer dispersed liquid crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 086103.  
邓舒鹏, 李文萃, 黄文彬, 等. 基于全息聚合物分散液晶的有机二维光子晶体激光器的研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(8): 086103.
- [7] Liang X Y, Chen X, Wang Y Q, *et al.* Light propagation in two-dimensional organic octagonal quasiperiodic photonic crystal slabs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0116002.  
梁馨元, 陈笑, 王义全, 等. 二维八重准晶有机光子晶体平板的光学传播特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0116002.
- [8] Luo D, Li Y, Xu X W, *et al.* Lasing from organic quasicrystal fabricated by seven- and nine-beam interference [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12330-12335.
- [9] Cai Y, Chen X, Li N, *et al.* Electrically pumped photonic crystal laser constructed with organic semiconductors[J]. *Laser Physics*, 2017, 27(3): 035801.
- [10] Tessler N, Denton G J, Friend R H. Lasing from conjugated-polymer microcavities[J]. *Nature*, 1996, 382(6593): 695-697.
- [11] Vasdekis A E, Turnbull G A, Samuel I D W, *et al.* Low threshold edge emitting polymer distributed feedback laser based on a square lattice[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(16): 161102.
- [12] Painter O, Lee R K, Scherer A, *et al.* Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser[J]. *Science*, 1999, 284(5421): 1819-1821.
- [13] Zhou X Y, Zhao S Y, Ma X L, *et al.* Lowvertical divergence angle and high brightness photonic crystal semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201010.  
周旭彦, 赵少宇, 马晓龙, 等. 低垂直发散角高亮度光子晶体半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201010.
- [14] Wang H, Ouyang Z B, Han Y L, *et al.* Threshold of one-dimensional photonic crystal band edge laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(12): 1813-1818.  
王宏, 欧阳征标, 韩艳玲, 等. 一维光子晶体带边激光器的阈值特性分析[J]. *光学学报*, 2006, 26(12): 1813-1818.
- [15] Cai Y Y, Wang Z, Chen X, *et al.* The coupling properties of defect modes in organic octagonal quasicrystals under low index contrast [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0216003.  
蔡园园, 王智, 陈笑, 等. 低折射率对比度下有机八重准周期光子晶体缺陷模的耦合特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0216003.
- [16] Qian C J, Xie X, Yang J N, *et al.* Coupling of two-dimensional slab photonic crystal micro-cavities and waveguides [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030001.  
钱琛江, 谢昕, 杨静南, 等. 二维平板光子晶体微腔与波导的耦合 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030001.
- [17] Tsutsumi N, Ishibashi T. Organic dye lasers with distributed Bragg reflector grating and distributed feedback resonator [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21698-21703.
- [18] Park H G, Kim S H, Kwon S H, *et al.* Electrically driven single-cell photonic crystal laser [J]. *Science*, 2004, 305(5689): 1444-1447.
- [19] Noda S, Yokoyama M, Imada M, *et al.* Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design [J]. *Science*, 2001, 293(5532): 1123-1125.
- [20] Du X Y, Zheng W H, Ren G, *et al.* Slow wave effect of 2-D photonic crystal coupled cavity array [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(1): 571-575.  
杜晓宇, 郑婉华, 任刚, 等. 二维光子晶体耦合腔阵列的慢波效应研究 [J]. *物理学报*, 2008, 57(1): 0571-575.
- [21] Heeger A J. Semiconducting and metallic polymers: the fourth generation of polymeric materials (nobel lecture) [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2001, 40(14): 2591-2611.
- [22] Dowling J P. Mirror on the wall: you' re omnidirectional after all? [J]. *Science*, 1998, 282

(5395): 1841-1842.

[23] Wang X Y, Xu Y M, Zhang C P, *et al.* Calculation of optical parameter of MEH-PPV film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(5): 746-749.

王晓阳, 徐艳梅, 张春平, 等. MEH-PPV 薄膜的光学参数计算[J]. *光子学报*, 2005, 34(5): 746-749.

[24] Liu Q N. A new method of study the defect mode of one-dimensional photonic crystal[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(8): 799-801.

刘启能. 一种研究一维光子晶体缺陷模的新方法——解析法[J]. *激光与红外*, 2008, 38(8): 799-801.