中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

电泵浦有机发光二极管衬底侧向辐射研究

赵变丽 王晶 李文文 张静 孙宁 王登科 江楠

Lateral radiation of the substrate of electrically pumped organic light-emitting diodes

ZHAO Bian-li, WANG Jing, LI Wen-wen, ZHANG Jing, SUN Ning, WANG Deng-ke, JIANG Nan

引用本文:
赵变丽, 王晶, 李文文, 张静, 孙宁, 王登科, 江楠. 电泵浦有机发光二极管衬底侧向辐射研究[J]. 中国光学, 2024, 17(4): 750-756. doi: 10.37188/CO.2023-0190
ZHAO Bian-li, WANG Jing, LI Wen-wen, ZHANG Jing, SUN Ning, WANG Deng-ke, JIANG Nan. Lateral radiation of the substrate of electrically pumped organic light-emitting diodes[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 750-756. doi: 10.37188/CO.2023-0190

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023-0190

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

量子点发光二极管稳定性提高策略

Strategies for improving the stability of quantum dots light-emitting diodes

中国光学（中英文）. 2021, 14(1): 117 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0184

一种散热型发光二极管阵列结构光源设计方法

A thermal dissipation design method for LED array structure illumination

中国光学（中英文）. 2021, 14(3): 670 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0211

蓝光二极管抽运Pr：YLF腔内倍频连续深紫外激光器

Continuous deep ultraviolet laser by intracavity frequency doubling of blue laser diode pumped Pr：YLF

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1395 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0077

电致发光的完全悬空超薄硅衬底氮化镓基蓝光LED器件的制备与表征

Fabrication and characterization of an LED based on a GaN-on-silicon platform with an ultra-thin freestanding membrane in the blue range

中国光学（中英文）. 2021, 14(1): 153 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0148

有机自组装低维圆偏振发光材料的研究进展

Research progress on organic self-assembling low-dimensional circularly polarized luminescent materials

中国光学（中英文）. 2021, 14(1): 66 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0192

半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展

Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 895 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0143

文章编号 2097-1842(2024)04-0750-07

电泵浦有机发光二极管衬底侧向辐射研究

赵变丽,王 晶,李文文,张 静,孙 宁,王登科,江 楠*
（云南大学 物理系 云南省高校光电子器件工程重点实验室,云南 昆明 650504）

摘要:有机发光二极管衬底侧向辐射光谱与正向辐射光谱相比,存在明显的窄化现象。研究影响器件侧向辐射光谱窄化的因素,进一步减小辐射光谱的线宽,可为电泵浦有机发光二极管激光辐射研究打下基础。本文研究了随有机发光二极管空穴传输层 NPB 厚度的变化,器件衬底侧向辐射光谱的半高宽、峰位以及偏振特性的变化情况。比较了有机发光二极管衬底边缘两侧蒸镀银膜与未蒸镀银膜时的衬底侧向辐射光谱。研究发现蒸镀银膜时有机发光二极管的衬底侧向辐射光谱半高宽变窄,并且当空穴传输层 NPB 的厚度为 130 nm 时,器件衬底侧向辐射光谱半高宽低至 14 nm。说明器件衬底两侧存在银膜作为反射镜的情况下,衬底中侧向传播的光将受到光学谐振腔的作用。本文的研究结果为有机发光二极管辐射光谱的窄化和辐射光放大提供了一种新思路。

关 键 词:有机发光二极管;侧向辐射光谱;光谱半高宽;泄漏波导模式;偏振特性
中图分类号:O436 **文献标志码:**A **doi:**10.37188/CO.2023-0190

Lateral radiation of the substrate of electrically pumped organic light-emitting diodes

ZHAO Bian-li, WANG Jing, LI Wen-wen, ZHANG Jing, SUN Ning, WANG Deng-ke, JIANG Nan*
(*Department of Physics*, *Key Laboratory of Yunnan Provincial Higher Education Institute for Optoeletronics Device Engineering*, *Yunnan University*, *Kunming* 650504, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *jiangnan@ynu.edu.cn*

Abstract: There is a significant narrowing of the lateral radiation spectrum of the substrate of organic light-emitting diodes as compared to the forward radiation spectrum. Studying the factors that affect the lateral radiation spectrum narrowing of the device and further reducing the spectral linewidth can provide a foundation for the study of the electrically pumped organic light-emitting diode laser radiation. We study the full width at half maximum, peak wavelength, and polarization characteristics of lateral radiation spectrum in organic light-emitting diode substrate, with the thickness changes of hole transport layer NPB. The lateral radiation spectra of organic light-emitting diode with Ag film evaporated on both sides of the substrate edge are compared with those of organic light-emitting diode without Ag film. The full width at half maximum of the lateral radiation spectrum with Ag film is narrower. When the NPB thickness is 130 nm, the full width at half maximum of the lateral radiation spectrum in the device substrate reaches its narrowest, which is 14 nm. This

收稿日期:2023-10-26; **修订日期:**2023-11-17
基金项目:国家自然科学基金(No. 61805211)
Supported by National Natural Science Foundation (No. 61805211)

shows that the optical resonator will affect the light propagating laterally in an organic light-emitting diode substrate when mirrors are provided on both edge sides of the substrate. The results indicate new approaches to narrowing the radiation spectrum and amplifying the light of organic light-emitting diodes.

Key words: organic light-emitting diode; lateral emission spectrum; full width at half maximum; leaky waveguide mode; polarization characteristic

1　引　言

近二十年来, 有机半导体激光器(Organic Semiconductor Lasers, OSLs)因为具有低成本、高发光量子产率、制备工艺灵活和光谱可谐调性等优势引起了人们的极大兴趣。1992 年, 以共轭聚合物作为增益介质的光泵浦固态有机半导体激光器被成功制备[1-3]。此后, 各类有机材料被广泛应用于不同共振结构的光泵浦激光器, 均取得了显著进展[4-7]。但到目前为止, 电泵浦有机半导体激光器的实现仍是一个难题。由于电泵浦方式下, 有机半导体激光器中存在两个额外的损耗机制, 即金属电极和载流子(极化子)吸收引起的损耗[8-11]。这使得电泵浦有机半导体激光器的阈值远高于光泵浦激光器。要实现电泵浦有机半导体激光器的激光辐射, 有机半导体中的电流密度阈值要达到 1~10^2 A/cm^2, 但是有机电致发光半导体的工作电流密度通常在十几到一百个 mA/cm^2 的量级, 二者相差三个数量级以上。要想将其电流密度提高三个数量级以上, 就必须大大提高有机半导体材料的载流子迁移率。研发新的材料[12-13]、设计新的器件结构[14-17]、采用更好的工作机制以最小化光损耗并降低激光辐射阈值。

非对称平面波导的侧向辐射被认为是降低自发辐射光放大(Amplified Spontaneous Emission, ASE)阈值的一种很有前景的机制[18-20]。Pauchard M[21] 基于发光场效应晶体管结构(The Light Emitting Field-Effect Transistor, LEFET), 报道了对 ASE 两种模式的研究结果。其中, 有一种“非常规”波导模式, 该模式对应的光在聚合物/栅极-绝缘体界面处以掠射角泄漏至衬底, 并从衬底侧向辐射。研究发现, 这种“非常规”泄漏波导模式的光学增益阈值相比于“常规”波导模式有明显下降, 即由 30 kW/cm^2 降低至 10 kW/cm^2。这表明非对称平面波导中的泄漏波导模式具有低阈值自发辐射放大能力。

然而, 上述非对称平面波导中的泄漏波导模式是在发光介质之外传播的, 其净增益是负值, 不满足激光产生的必要条件。为了解决这个问题, 本文采用有机发光二极管(Organic Light Emitting Diodes, OLEDs)作为非对称平面波导。与 Pauchardet 的工作相比, OLED 器件可采用不同材料的组合来实现对光学和电学性能的优化设计, 这有利于放宽器件制备的条件[22]。此外, OLED 器件可以在空间上将波导模式限制在激发区附近, 与吸收电极隔离, 因此侧向辐射可以更强。为进一步增强侧向辐射, 本文在 OLED 器件玻璃衬底两侧蒸镀银薄膜作为反射镜, 构成光学谐振腔。通过优化有机层的厚度, 使进入衬底的泄漏波导模式沿衬底平面方向传播时, 能被两侧的反射镜多次反射, 并返回发光层介质中, 从而实现放大。这种器件结构设计可以作为实现电泵浦有机半导体激光器的一种方法。另外, 由于有机发光二极管侧向辐射光的高方向性和偏振特性[23], 可以在光纤和其他光电元件中找到有效光耦合的潜在应用价值。

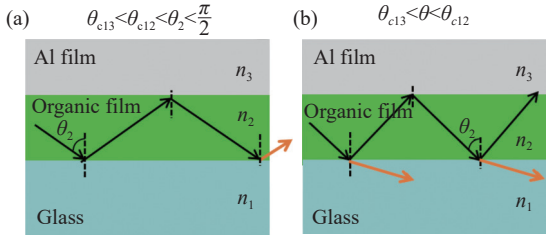
2　理论基础

2.1　OLED 中的泄漏波导模式

众所周知, 电致发光 OLED 器件中的光传输模式主要有 4 种: 表面辐射模式、波导模式、衬底模式、表面等离子体模式[24-26]。根据射线光学理论, 由于空气/玻璃衬底/ITO/有机材料界面两侧的折射率不匹配, 器件内部大约有 80% 的光能量在波导模式与衬底模式中损耗。有机发光二极管衬底侧向辐射的光模式包含衬底模式和泄漏波导模式。

OLED 中泄漏波导模式产生的物理机制如下: 由于有机层的折射率($n_{organic}$~1.7), ITO 的折射率(n_{ITO}~1.9)均比玻璃衬底的折射率(n_{Glass}~1.45)

和阴极铝薄膜的折射率(n_{Al}~1.4)高。因此铝/有机层/玻璃衬底三者形成了一个非对称平面波导结构[18]。如图 1(彩图见期刊电子版)所示，图中 Al 阴极(n_3)与玻璃衬底(n_1)为包覆层，有机薄膜与 ITO 视为核心层(n_2)，其中 $n_1<n_2>n_3$。在非对称波导薄膜中，光在界面上的入射角大于全反射临界角时，薄膜中传播的光属于波导模式[27]；当传输光在界面的入射角稍低于有机层/玻璃界面的全反射临界角时，便会泄漏进衬底，从而形成泄漏波导模式，该模式的光会从 OLED 衬底的侧向辐射。



(a) 波导模式 (a) Guided mode　　(b) 泄露波导模式 (b) Leaky mode

图 1　不对称平板波导中的模式

Fig. 1　Modes in asymmetric slab waveguide

2.2　泄漏波导模式的截止波长

本文中窄化的侧向辐射光谱可由非对称平面波导的截止波长以及波导谐振腔的假设来解释[28-29]。其中截止波长是指在波导系统中不再满足全内反射而导致波导模式中断的光波波长。波导核心层的截止波长计算如下，根据非对称平板波导理论[22]，在波导中传播的光，波长应该满足相位匹配条件。

$$\frac{4\pi d n_2 \cos\theta_2}{\lambda}+\phi_{21}+\phi_{23}=2m\pi \quad , \qquad (1)$$

式中，d 是核心层的厚度，λ 为发光材料辐射光波长，ϕ_{21} 和 ϕ_{23} 分别为 2/1 和 2/3 界面的相移，m = 0、1、2、…为模式数。这个条件意味着平面波的相位应满足相干干涉。界面处的折射率和相移取决于偏振方向，平面波导中的 TE 和 TM 模式的相移如式(2)、式(3)所示，式中 i 为 1 或 3：

$$\phi_{2i}^{TE}=-2\arctan\frac{(n_2^2\sin^2\theta_2-n_i^2)^{1/2}}{n_2\cos\theta_2} \quad , \qquad (2)$$

$$\phi_{2i}^{TM}=-2\arctan\frac{n_2(n_2^2\sin^2\theta_2-n_i^2)^{1/2}}{n_i\cos\theta_2} \quad , \qquad (3)$$

当光波长非常接近截止波长时，入射角 θ_2 对应临界角 θ_c，即

$$\theta_2=\theta_c=\arcsin(n_1/n_2) \quad . \qquad (4)$$

由上述公式便可获得 TE 与 TM 模式的截止波长：

$$\lambda_c^{TE}=\frac{2\pi d(n_2^2-n_1^2)^{1/2}}{\arctan\left(\frac{n_1^2-n_3^2}{n_2^2-n_1^2}\right)^{1/2}+m\pi} \quad , \qquad (5)$$

$$\lambda_c^{TM}=\frac{2\pi d(n_2^2-n_1^2)^{1/2}}{\arctan\left[\frac{n_2^2}{n_3^2}\left(\frac{n_1^2-n_3^2}{n_2^2-n_1^2}\right)^{1/2}\right]+m\pi} \quad . \qquad (6)$$

3　实验结果与分析

3.1　实验方法

本文中，OLED 器件、Ag 膜以及 Al 膜的制备均采用中国科学院沈阳科学仪器股份有限公司高真空三腔室薄膜沉积系统，OLED 器件的结构为：Glass/ITO (100 nm)/MoO_3 (1 nm)/NPB (X nm)/Alq_3 (100 nm)/LiF (1 nm)/Al (100 nm)，如图 2(彩图见期刊电子版) 所示。采用透明导电薄膜氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)(厚 100 nm)作为器件的阳极，并在 ITO 上蒸镀 1 nm 厚的 MoO_3 薄膜作为空穴注入层。100 nm 厚的 Al 膜搭配氟化锂(LiF)作为器件的阴极。8-羟基喹啉铝(Tis(8-quinolinolato)aluminum, Alq_3)以及 NPB(N,N'-bis(naphthy)-N,N'-DIPHENYL-1,1'-biphenyi4,4'-diamine)分别作为发光层与空穴传输层。使用荧光光谱仪(HORIBA Fluorolog)对不同厚度 Ag 膜以及 Al 膜的反射率进行了表征，如图 3(彩图见期刊电子版) 所示，100 nm Ag 膜在波长 540 nm 附近的反射率最大，~96%，因此，选择在 OLED 衬底两侧沉积 100 nm 的 Ag 膜作为谐振腔的反射镜，在衬底两侧形成谐振腔。Ag 膜的具体制备方法如下：选择 OLED 衬底侧面平整的基片，然后用 600~10000 目的砂纸对衬底侧面进行打磨，以减小 Ag 膜沉积表面的粗糙度，打磨过程中不间断地用超纯水进行冲洗，完成打磨之后对基片进行清洗、制备 Ag 膜。

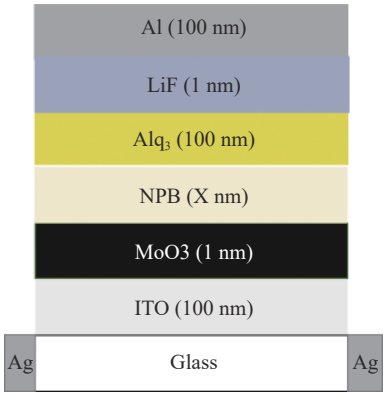


图 2　OLED 器件结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of OLED device configuration

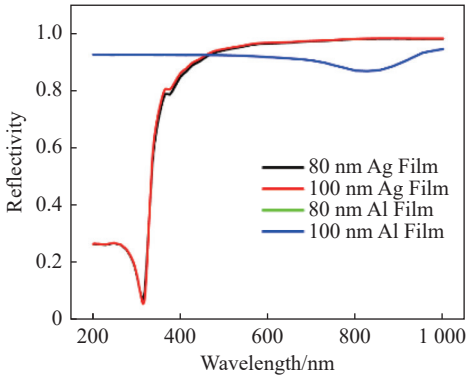


图 3　不同厚度 Ag、Al 膜反射率随波长变化情况

Fig. 3　Reflectances of Ag and Al films with different thicknesses varying with wavelength

图 4 是 OLED 衬底侧向辐射光谱采集及表征示意图, 具体采集过程如下: 使用 KEITHLEY 2400 数字电源设置的恒定输出电压驱动 OLED 器件发光, 将海洋光学 USB4000 光谱仪的光纤探头正对器件衬底侧向收集光谱。侧向辐射光的偏振特性通过放置在样品和光纤末端之间的偏振片来表征。

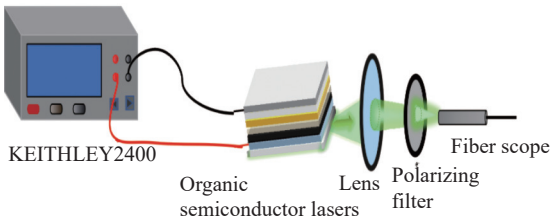
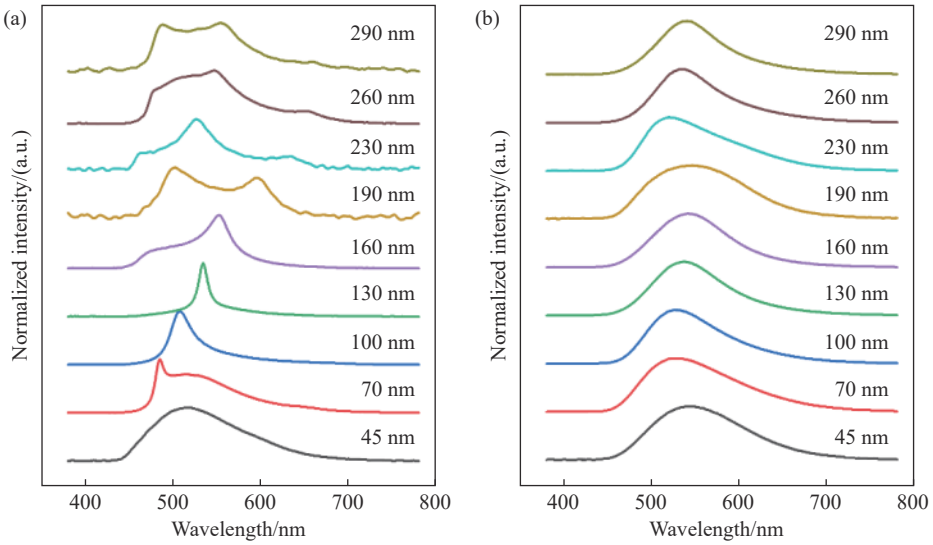


图 4　电致发光光谱采集系统结构图

Fig. 4　Structural diagram of the electroluminescence spectrum collection system

3.2　结果与讨论

图 5(a)、5(b)(彩图见期刊电子版) 分别为 OLED 衬底有 Ag 膜侧向辐射光谱与正向辐射光谱随空穴传输层 NPB 厚度变化的情况。



(a) OLED 衬底侧向辐射光谱
(a) Lateral radiation spectra

(b) OLED 正向辐射光谱
(b) Forward radiation spectra

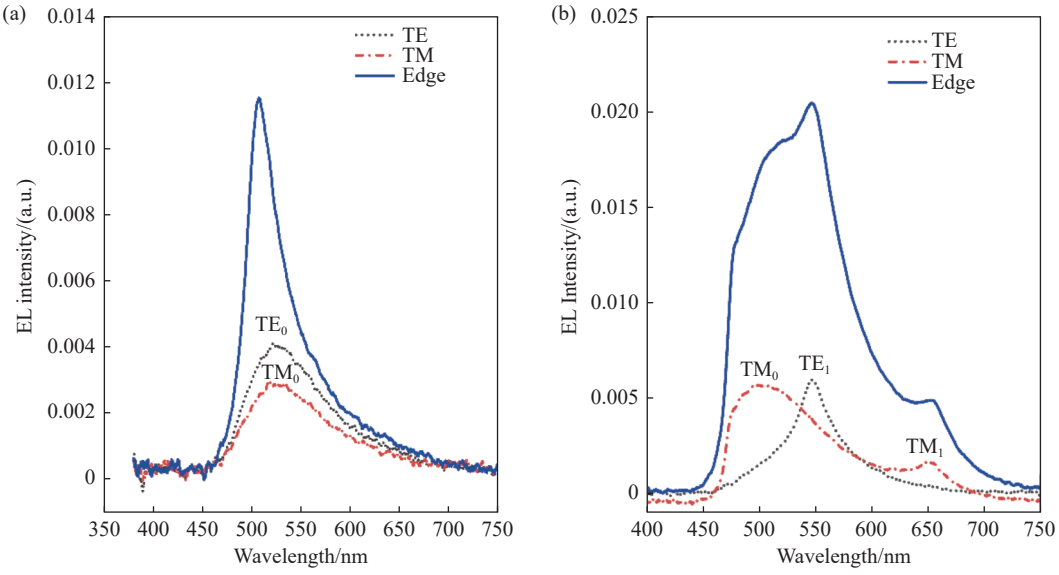
图 5　NPB 厚度在 45~300 nm 范围内的辐射光谱

Fig. 5　Radiation spectra when NPB thickness is in the range of 45~300 nm

由图 5 可知, 正向辐射光谱的谱峰位于 530 nm 附近, 半高宽(Full width at half maximum, FWHM) 较宽。对于衬底侧向辐射光谱, 在 NPB 厚度介于 45 nm≤T_{NPB}≤130 nm 范围内时侧向辐射光谱

为单模模式，并且随着 NPB 厚度的增加，光谱逐渐变窄，相较于表面发射光谱出现谱峰红移的迹象。通过式(5)、(6)可知，随着 NPB 厚度 d 的增大，TM 模式光波波长发生红移的距离比 TE 模式的更长，由此可知此时的单模是 TM 模式[25]。当 T_{NPB}≥130 nm 时，有腔 OLED 器件的侧向辐射光谱由单模模式转变为多模模式，并且在 500~600 nm 波段范围内红移的谱峰由窄变宽，直至坍缩。而在 450~550 nm 的波段范围内出现两个新的宽峰，并且随着 NPB 厚度的增加也逐渐红移，此时的模式全为 TE 模式。

图 6 展示了 NPB 厚度分别为 80 nm 与 260 nm 时由光纤直接接收的侧向辐射光谱以及在光纤与器件间放置偏振片后采集到的 TE 模式与 TM 模式光谱。根据马吕斯定理可知，在光路中放入厚度为 260 nm 的 NPB 薄膜时，侧向辐射光谱变为多模模式，如图 6(b)所示。499 nm 波长处对应 TM_0 模式，649 nm 波长处对应 TM_1 模式，546 nm 波长处对应 TE_1 模式，该模式光谱窄化明显，其半峰宽仅有 15 nm。这种因器件有机层的厚度变化使得衬底侧向辐射光谱的 TE 模式与 TM 模式的峰值波长产生变化的现象，证实了衬底侧向辐射光谱是泄漏波导模式[18]。由于 NPB 薄膜厚度的增加，使得三平面不对称波导结构的波导芯厚度增加，从而导致波导结构中传输光的光程改变，按照相位匹配条件，侧向辐射光谱的偏振状态会发生变化。



(a) NPB 厚度为 80 nm
(a) NPB thickness is 80 nm

(b) NPB 厚度为 260 nm
(b) NPB thickness is 260 nm

图 6　OLED 衬底侧向辐射光谱的偏振特性

Fig. 6　Polarization characteristics of lateral radiation spectrum of the OLED substrate

与此同时，我们也对 OLED 的衬底侧向蒸镀银膜是否会使器件的侧向辐射光谱进一步收紧变窄进行了研究。图 7(彩图见期刊电子版) 为有腔 OLED 与无腔 OLED 侧向辐射光谱随空穴传输层 NPB 厚度改变而变化的情况。由图中光谱数据可发现 NPB 厚度在 45 nm≤T_{NPB}≤130 nm 范围内时，有腔器件的侧向辐射光谱相对无腔器件而言，其半高宽均变窄了 10 nm 左右。尤其是当 T_{NPB} = 130 nm，光谱峰值位于 534.23 nm 处时，半高宽窄至 14 nm。其原因可能是泄漏波导模式的光受到衬底两侧法布里-珀罗谐振腔的作用，产生干涉效应所致。

从图 7 中还可以看出，NPB 厚度分别为 45 nm、70 nm、100 nm 的有腔 OLED 器件与无腔 OLED 器件的侧向辐射光谱相比，出现了明显的峰肩被抑制的现象，这也是器件衬底两侧 Ag 膜形成谐振腔所导致的。

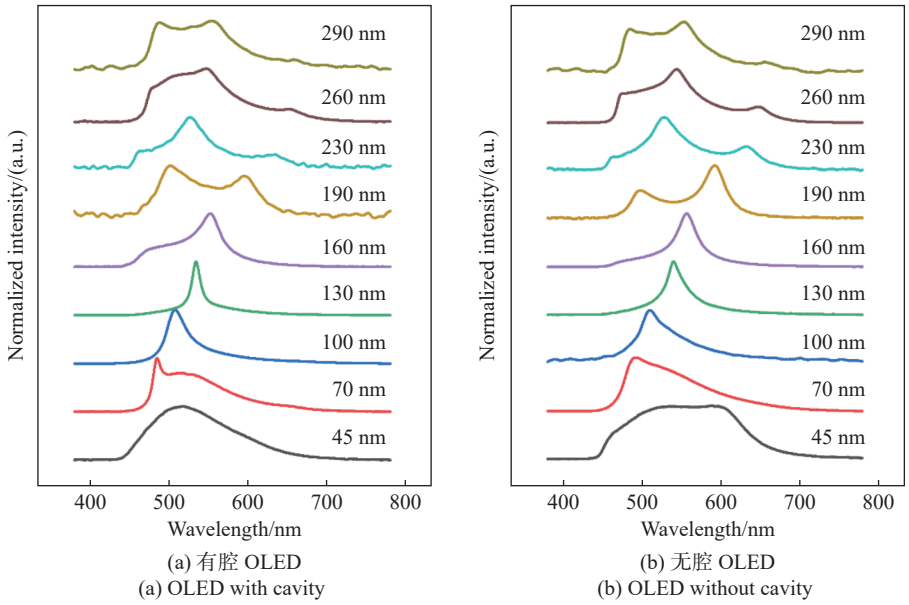


图 7　NPB 厚度在 45~300 nm 范围内 OLED 的侧向发射光谱

Fig. 7　Lateral emission spectra from OLED when the NPB thickness is in the range of 45−300 nm

4　结　论

本文选择了 Alq_3 与 NPB 作为 OLED 的有机发光材料与空穴传输材料,发现从器件表面和侧向采集的光谱存在显著差异, 侧向辐射光谱线宽明显变窄。随着 NPB 厚度的增加, 侧向辐射光谱谱峰发生明显红移, 由单模模式变为多模模式, 并且光谱线宽先变窄后加宽。另一方面, 对比了衬底侧向有无蒸镀 Ag 膜的 OLED 侧向辐射光谱, 发现蒸镀 Ag 膜的器件侧向辐射光谱线宽更窄。总的来说, 蒸镀 Ag 膜的器件能够产生较强的侧向辐射, 辐射光谱峰值波长可调、光谱带宽变窄, 适合用于电泵浦 ASE 和高功率光源应用的物理研究。此外, 这种衬底侧向辐射 OLED, 在与光纤和其他光电元件集成方面也有较大应用潜力。

参考文献:

[1] GRAUPNER W, LEISING G, LANZANI G, *et al*.. Femtosecond relaxation of photoexcitations in a poly(*para*-phenylene)-type ladder polymer[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(5): 847-850.

[2] HIDE F, SCHWARTZ B J, DÍAZ-GARCÍA M A, *et al*.. Laser emission from solutions and films containing semiconducting polymer and titanium dioxide nanocrystals[J]. *Chemical Physics Letters*, 1996, 256(4-5): 424-430.

[3] TESSLER N. Lasers based on semiconducting organic materials[J]. *Advanced Materials*, 1999, 11(5): 363-370.

[4] DÍAZ-GARCÍA M A, HIDE F, SCHWARTZ B J, *et al*.. Plastic lasers: semiconducting polymers as a new class of solid-state laser materials[J]. *Synthetic Metals*, 1997, 84(1-3): 455-462.

[5] ICHIKAWA M, NAKAMURA K, INOUE M, *et al*.. Photopumped laser oscillation and charge-injected luminescence from organic semiconductor single crystals of a thiophene/phenylene co-oligomer[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(22): 221113.

[6] LAWRENCE J R, TURNBULL G A, SAMUEL I D W, *et al*.. Optical amplification in a first-generation dendritic organic semiconductor[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(8): 869-871.

[7] MCGEHEE M D, GUPTA R, VEENSTRA S, *et al*.. Amplified spontaneous emission from photopumped films of a conjugated polymer[J]. *Physical Review B*, 1998, 58(11): 7035-7039.

[8] BECKER H, BURNS S E, FRIEND R H. Effect of metal films on the photoluminescence and electroluminescence of conjugated polymers[J]. *Physical Review B*, 1997, 56(4): 1893-1905.

[9] BURROWS P E, SHEN Z, BULOVIC V, *et al*.. Relationship between electroluminescence and current transport in organic heterojunction light - emitting devices[J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(10): 7991-8006.

[10] NOWY S, KRUMMACHER B C, FRISCHEISEN J, *et al*.. Light extraction and optical loss mechanisms in organic

light-emitting diodes: Influence of the emitter quantum efficiency[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(12): 123109.

[11] LIN J, HU Y SH, LV Y, *et al*.. Light gain amplification in microcavity organic semiconductor laser diodes under electrical pumping[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(24): 1637-1638.

[12] SEO J A, GONG M S, LEE J Y. High external quantum efficiency in yellow and white phosphorescent organic light-emitting diodes using an indoloacridinefluorene type host material[J]. *Organic Electronics*, 2014, 15(8): 1843-1848.

[13] AHMAD V, SOBUS J, BENCHEIKH F, *et al*.. High EQE and high brightness solution-processed TADF light-emitting transistors and OLEDs[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(18): 2000554.

[14] BALDO M A, O'BRIEN D F, YOU Y, *et al*.. Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices[J]. *Nature*, 1998, 395(6698): 151-154.

[15] HU Y SH, BENCHEIKH F, CHÉNAIS S, *et al*.. High performance planar microcavity organic semiconductor lasers based on thermally evaporated top distributed Bragg reflector[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(15): 153301.

[16] MATSUSHIMA T, BENCHEIKH F, KOMINO T, *et al*.. High performance from extraordinarily thick organic light-emitting diodes[J]. *Nature*, 2019, 572(7770): 502-506.

[17] SLOWIK I, FISCHER A, FRÖB H, *et al*.. Novel organic light-emitting diode design for future lasing applications[J]. *Organic Electronics*, 2017, 48: 132-137.

[18] RAN G Z, JIANG D F, KAN Q, *et al*.. Experimental observation of polarized electroluminescence from edge-emission organic light emitting devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(23): 233304.

[19] TIAN Y, GAN ZH Q, ZHOU ZH Q, *et al*.. Spectrally narrowed edge emission from organic light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(14): 143504.

[20] YOKOYAMA D, NAKANOTANI H, SETOGUCHI Y, *et al*.. Spectrally narrow emission at cutoff wavelength from edge of electrically pumped organic light-emitting diodes[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(9L): L826-L829.

[21] PAUCHARD M, VEHSE M, SWENSEN J, *et al*.. Optical amplification of the cutoff mode in planar asymmetric polymer waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(22): 4488-4490.

[22] CHANG J F, HUANG Y S, CHEN P T, *et al*.. Reduced threshold of optically pumped amplified spontaneous emission and narrow line-width electroluminescence at cutoff wavelength from bilayer organic waveguide devices[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14695-14706.

[23] RAN G Z, JIANG D F. Polarized electroluminescence from edge-emission organic light emitting devices[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7943: 794314.

[24] BRÜTTING W, FRISCHEISEN J, SCHMIDT T D, *et al*.. Device efficiency of organic light-emitting diodes: Progress by improved light outcoupling[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2013, 210(1): 44-65.

[25] DEPPE D G, LEI C, LIN C C, *et al*.. Spontaneous emission from planar microstructures[J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41(2): 325-344.

[26] GU G, SHEN Z L, BURROWS P E, *et al*.. Transparent flexible organic light-emitting devices[J]. *Advanced Materials*, 1997, 9(9): 725-728.

[27] SHEN J L, CHANG J Y, LIU H C, *et al*.. Nearly in-plane photoluminescence studies in asymmetric semiconductor microcavities[J]. *Solid State Communications*, 2000, 116(8): 431-435.

[28] BULOVIĆ V, KHALFIN V B, GU G, *et al*.. Weak microcavity effects in organic light-emitting devices[J]. *Physical Review B*, 1998, 58(7): 3730-3740.

[29] LIN CH L, CHANG H C, TIEN K C, *et al*.. Influences of resonant wavelengths on performances of microcavity organic light-emitting devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(7): 071111.

作者简介：

江　楠(1977—)，男，云南建水人，博士，副教授，2021 年于云南大学获得博士学位，主要从事有机半导体器件及激光器研究。E-mail: jiangnan@ynu.edu.cn