

文章编号: 1000-7032(2024)03-0468-08

微腔效应影响有机发光器件调制带宽特性研究

李 斌, 刘士浩*, 张乐天, 谢文法*

(吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 吉林 长春 130012)

摘要: 可见光通信(VLC)技术巧妙地融合了通信和照明或显示功能,为通信提供了高效便捷的方案。有机电致发光器件(OLED)作为最接近自然阳光的人造光源,在可见光通信系统的发射端展现出巨大的应用潜力。然而,受制于有机发光染料激子辐射复合速率较慢的限制,OLED在高频信号激励时响应速度较慢。为了克服这一限制,我们提出利用微腔结构,旨在通过微腔效应增强有机发光分子的自发辐射速率,从而改善器件的频率响应。研究表明,特定腔长的光学微腔引发的 Purcell 效应能够提升特定波长的光子态密度,从而加速其自发辐射速率。这种增强效应成功地将调制带宽从 4 kHz 提高到 7 kHz,拓展了近 75% 的响应频率范围。

关键词: 有机电致发光器件; 微腔结构; 自发辐射速率; 可见光通信; 调制带宽

中图分类号: TN383.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230331

Microcavity Effect on Modulation Bandwidth Characteristics in Organic Light-emitting Diodes

LI Bin, LIU Shihao*, ZHANG Letian, XIE Wenfa*

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Jilin University Region, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding Authors, E-mail: liushihao@jlu.edu.cn; xiewf@jlu.edu.cn

Abstract: Visible light communication (VLC) technology ingeniously integrates communication and illumination or display, providing an efficient and convenient solution for communication. Organic light-emitting diodes (OLEDs), serving as an artificial light source closest to natural sunlight, exhibit tremendous application potential at the transmitter end of VLC systems. However, constrained by the slow radiative recombination rate of organic luminescent dyes, OLEDs always demonstrate a sluggish response speed under high-frequency signal excitation. To overcome this limitation, we propose the utilization of a microcavity structure with the aim of enhancing the spontaneous emission rate of organic emitters through the microcavity effect, thereby improving the device's frequency response. Research results indicate that the Purcell effect induced by an optical microcavity with a specific cavity length can elevate the photon density at the emitter position, accelerating its spontaneous emission rate. This enhancement successfully increases the modulation bandwidth from 4 kHz to 7 kHz, expanding the response frequency range by nearly 75%.

Key words: organic light-emitting device; microcavity; spontaneous emission rate; visible light communication; modulation bandwidth

1 引言

可见光通信(Visible light communication, VLC)

是一种利用百 THz 量级的可见光传输信息的技术。相较于传统依赖 GHz 量级电波频率的射频通信,它不占用其频谱资源,可以简便地实现空间

收稿日期: 2023-12-25; 修订日期: 2024-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(62174067, 62175085, 62374071); 吉林省科技厅自然科学基金(20230101061JC)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62174067, 62175085, 62374071); Science and Technology Development Planning of Jilin Province(20230101061JC)

复用,为用户提供独享的高带宽通信链路。通过光源发射调制深度较浅但通信速率较快的可见光信号,利用人眼和电子设备对光强微弱变化的不同敏感度,可以在保持原有照明和显示功能不受影响的前提下,实现高效的无线通信功能^[1-5]。作为高效节能的半导体固态发光光源,发光二极管(Light-emitting diode, LED)已广泛应用于通用照明产品,并成为液晶显示器的主流背光源技术^[6]。早在2000年,研究人员就提出并证明了其在VLC中的可行性^[7]。经过二十年的发展,LED基VLC技术已取得了显著进展。复旦大学迟楠教授课题组采用离散多音频调制技术,以LED光源为基础,成功实现了总速率达到15.17 Gbps的非实时可见光通信^[8]。

作为另一种半导体固态发光光源,有机电致发光器件(Organic light-emitting diode, OLED)是一种朗伯型面光源,具备自发光、薄型轻便、广视角等独特优势,已经成为移动智能设备的主流显示技术^[9-10]。此外,OLED在色彩还原方面表现卓越,接近自然光,可与点光源LED形成互补,为家居生活和日常工作提供更自然、健康的照明体验。鉴于OLED在照明和显示领域的广泛应用价值,研究人员也广泛关注其在可见光通信领域的潜力^[11-12]。然而,与无机半导体相比,基于有机半导体的OLED的响应速度范围有限,严重制约了OLED基VLC系统的调制带宽。OLED的电致发光主要涉及载流子的注入、载流子的传输及激子辐射复合三个过程。在外加电场的作用下,电子和空穴分别从阴极和阳极注入有机层。随后,它们分别通过电子传输层和空穴传输层传输,最终进入发光层。在发光层内,电子和空穴复合形成激子,而激子在退激化过程中以辐射发光的形式释放出能量。这些物理过程致使OLED的响应速度主要受制于三个方面:充电时间、渡越时间及激子辐射复合时间。首先,作为多层薄膜结构器件,OLED可被视为平板电容器。它需要一定的充电时间,以确保在电极与有机界面储存足够多的电荷,形成强电场,从而保证载流子有效注入和传输^[13]。其次,由于有机半导体的电子迁移率相对有限,载流子在注入后到达激子复合区域之间的渡越时间难以被忽略。最后,高效率的OLED激子辐射复合速率通常在百纳秒或微秒量级,这也限制了OLED的响应速度。为了克服充

电时间和渡越时间的限制,英国圣安德鲁斯大学Samuel等通过深入研究其限制因素,提出了降低器件发光面积和引入p-i-n结构的方法,显著提升了OLED的响应速度,有效拓展了其调制带宽^[14]。该研究成果为解决充电时间和渡越时间的限制提供了实用而可行的方案。然而,目前仍然缺乏通过结构优化调控OLED激子辐射速率,并研究其对OLED响应速度及调制带宽影响的相关研究报道。

考虑到光学微腔结构对激子辐射速率的重要影响^[15],本文提出采用微腔结构,旨在通过微腔效应增强有机发光分子的自发辐射速率,从而改善器件的频率响应。在主流的OLED材料中,荧光材料响应速度最快,可达纳秒级,但其激子利用率仅能达到25%。此外,热激活延迟荧光(TADF)材料虽然能够实现100%的激子利用率,但其依赖于反系间窜越过程,而这个过程无法通过光学微腔的光-物质耦合作用来加速^[16-17]。相对而言,磷光材料不仅能够实现百分之百的激子利用率,而且其辐射跃迁受到光学微腔的影响,为其性能优化提供了可能^[18-22]。本文中,我们基于磷光材料制备了具有不同微腔结构的OLED,并深入探究了微腔效应对磷光材料激子辐射速率、器件响应速度以及调制带宽的影响。通过对OLED进行高频信号激励,我们验证了微腔OLED在实现更高调制带宽、更高发光效率以及更低效率滚降方面的潜力。

2 实 验

2.1 样品制备

使用透明玻璃或预先沉积ITO的透明玻璃作为器件的衬底。衬底在使用前通过Decon 90清洗剂清洗,然后经过三次去离子水超声清洗处理,每次处理5 min。清洗完成后,通过氮气枪将衬底吹干,随后置于烘箱中调节至120℃加热10 min以除去残留水分。经过烘干后,将衬底放入多源有机分子气相沉积系统中,直至真空度低于 6×10^{-4} Pa,开始进行器件制备。在有机分子气相沉积系统中,按照以下顺序进行层次沉积:半透明金属阳极、空穴传输层、发光层、电子传输层、电子注入层和金属阴极。

2.2 样品表征

OLED的电流密度-电压-亮度及光谱特性在室温和大气环境下通过日本大塚电子的OLED光

电性能测试系统进行了测试,该系统基于全光谱阵列光谱仪 MCPD-9800。器件电容特性由同惠 TH2829C 精密 LCR 仪器在室温条件下测量,测试频率为 1 kHz,交流电压振幅保持在 0.1 V。器件瞬态电致发光特性在室温下由 HOLITA 荧光光谱分析仪系统收集。瞬态光致发光特性由 IHR320 瞬态荧光光谱仪(HORIBA,日本)在激发光源为 365 nm 的情况下进行测试所得。在频率特性测试中,我们使用 DG5102 函数信号发生器为器件提供 3.5 V 直流电压偏置和高低压为 6~0 V 的正弦波信号的直交流耦合驱动电压。接收光信号部分,我们采用华胜半导体生产的高精度可见光硅 PIN 光电探测器,该探测器具有 400~1 100 nm 的宽光谱响应。光信号经探测后转化为电信号,并由 DS4504 示波器进行采集。我们以施加 9.5 V 直流电压激励时的响应值作为基准,对施加不同频率的测量结果与基准的比值进行 $20\log_{10}$ 处理,将其转化为分贝(dB)值。

3 结果与讨论

3.1 器件结构

为深入研究微腔结构对绿光磷光 OLED 性能的影响,我们设计并制备了两种不同结构的有机发光器件,分别为常规器件 COLED 和微腔器件 MOLED,如图 1 所示。COLED 采用 ITO 透明阳极,而 MOLED 采用半透明银(Ag)阳极,可利用微腔效应实现对光学性能的精细调控。在 MOLED 中,我们采用 20 nm 半透明 Ag 薄膜和 100 nm 高反射镁银合金(Mg: 10%Ag)薄膜组合构建光学微腔,这有助于调整特定波长的光子态密度,进而调

控激子的自发辐射速率。MOLED 的具体结构为:玻璃/Ag(20 nm)/MoO₃(3 nm)/4,4'-环己基二[N,N-二(4-甲基苯基)苯胺](TAPC,30 nm)/4,4',4'-三(咔唑-9-基)三苯胺(TCTA,5 nm)/3,3'-二(9H-咔唑-9-基)-1,1'-联咔唑(CBP):10%三(2-苯基吡啶)合铱,三[2-苯基吡啶-C2,N]铱(Ⅲ)[Ir(ppy)₃,30 nm]/4,7-二苯基-1,10-菲啰啉(Bphen,x nm)/LiF(0.5 nm)/Mg:10%Ag(100 nm)。通过调整 Bphen 的厚度,我们可以微调操纵微腔器件内的多光束干涉及广角干涉过程,从而精确控制谐振峰位置。我们设计了三种不同 Bphen 厚度的 MOLED,分别为 MOLED-40、MOLED-50 及 MOLED-60,以全面探究微腔效应对器件性能的影响。由于 COLED 中微腔效应相对较弱,我们选择在该器件中仅采用 40 nm 厚度的 Bphen 作为对照。

3.2 器件电致发光性能

我们对比分析了四组 OLED 器件的电致发光性能。图 2(a)、(b)分别为器件的电流密度-电压-亮度特性曲线和外量子效率(External quantum efficiency, EQE)-亮度特性曲线。以 6 V 为例,微腔器件 MOLED-40、MOLED-50、MOLED-60 及常规器件 COLED 的电流密度分别为 16.5, 7.4, 9.5, 7.4 mA/cm², 它们的亮度则分别为 8 638, 4 622, 5 614, 2 548 cd/m²。可以看出,与其他器件相比,微腔器件 MOLED-40 在同一电压下的电流密度和亮度最大。相较于常规器件 COLED, MOLED-40 采用金属材料作为阳极,具有良好的导电性,有助于降低器件的接触电阻。与其他两个微腔器件相比, MOLED-40 的电子传输层较薄,这两个因素共同使其实现了最大电流密度和亮度。然而, Bphen 较薄的情况使得 MOLED-40 更容易失效,例如在高电压下, MOLED-40 的亮度低于 MOLED-60。

然而,在效率方面, MOLED-60 表现出最佳的 EQE, 可达 17.6%; 另外两个微腔器件 MOLED-40 和 MOLED-50, 分别达到 14.8% 和 16.1%。相比之下,常规器件 COLED 的最高 EQE 仅为 12.0%。此外,从器件归一化电致发光光谱(见图 2(c))中可以观察到,随着腔长的增加,微腔器件电致发光光谱的峰值波长发生红移。这主要归结于器件光谱受到器件内微腔效应的影响。根据法布里-珀罗方程, OLED 内的共振波长可以通过以下公式得到:

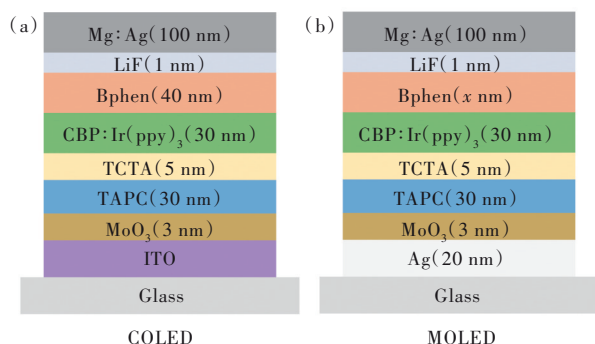


图 1 绿光磷光 OLED 器件结构示意图:(a)常规器件 COLED, (b)微腔器件 MOLED

Fig.1 Schematic diagrams of green phosphorescent OLED device structures: (a)conventional device, COLED; (b)microcavity device, MOLED

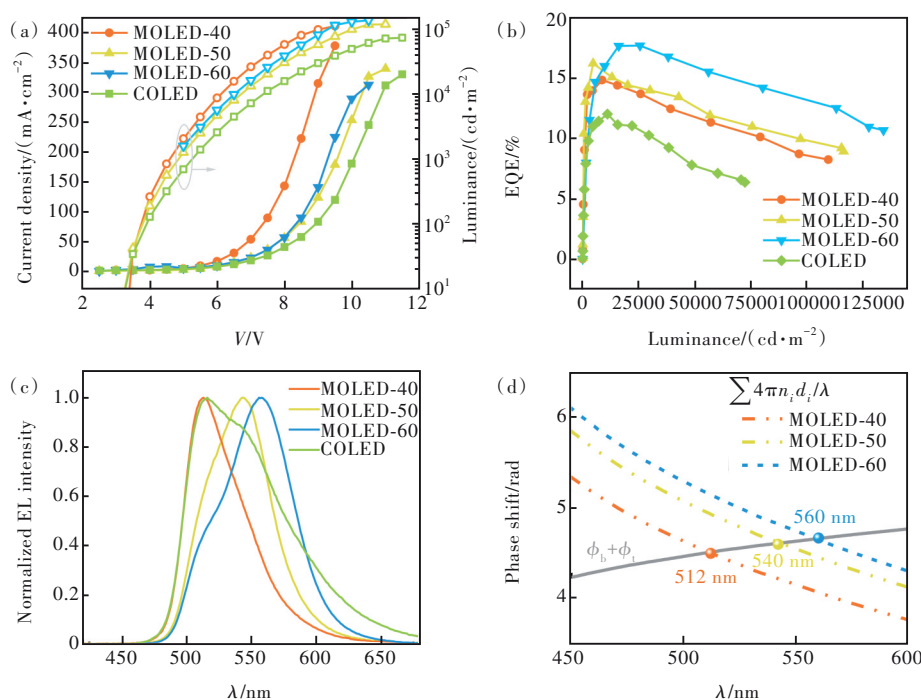


图2 绿光磷光器件的电流密度-电压-亮度(a)、外量子效率-亮度(b)及归一化电致发光光谱(c)特性曲线;(d)光在两侧电极的反射相移之和与穿过有机物的传输相移曲线

Fig.2 Current density-voltage-luminance(a), EQE-luminance(b), and normalized EL spectra(c) for green phosphorescent devices. (d)Phase shift of light at electrodes and in organic function layers

$$\sum_i \frac{4\pi d_i n_i(\lambda)}{\lambda} - \varphi_i(\lambda) - \varphi_b(\lambda) = 2m\pi, \quad (1)$$

其中, λ 表示波长, $\varphi_i(\lambda)$ 和 $\varphi_b(\lambda)$ 分别表示光经过顶电极和底电极反射后产生的相位移动, m 为模数且仅为整数, d_i 为各有机功能层的厚度, n_i 为各有机功能层的折射率。我们计算了光在达到高反射 Mg:Ag 阴极和半透明 Ag 阳极时所发生的反射相移之和, 以及光穿过有机层所产生的传输相移曲线, 结果如图 2(d) 所示。在反射相移曲线与传输相移曲线的交点位置, 法布里-珀罗方程才能成立, 因此交点的波长对应于微腔器件的共振波长。根据图 2(d), 微腔器件 MOLED-40、MOLED-50 和 MOLED-60 的共振波长分别为 512, 540, 560 nm, 与实际结果(图 2(c))相匹配。MOLED-40 的共振波长为 512 nm, 与 Ir(ppy)₃ 的本征发光峰值相符, 因而确认了 MOLED-40 处于最佳谐振腔长。

3.3 器件功率耗散特性

由于器件中空穴传输层的空穴迁移率远大于电子传输层的电子迁移率^[23], 因此 Bphen 厚度的减薄将有助于提高器件的传输特性, 从而提高了器件中的电流密度及载流子平衡性。然而, 根据器件的 EQE 特性曲线, 我们观察到 Bphen 厚度的

减薄并没有引起显著的 EQE 提升。这表明 Bphen 厚度的变化并不是导致 EQE 变化的主要原因。因此, 我们认为四组器件在 EQE 上的差异主要是由于器件光取出特性的变化导致的。为了探究器件光取出特性的变化, 我们对四组器件中偶极子光源 (512 nm) 的功率耗散特性进行了计算。OLED 的发光可以近似看作是无穷多个偶极子组成。根据经典电磁学理论, 结合器件的多层结构, 偶极子的辐射光功率密度 K 可以由以下公式计算^[24]:

$$K_{TMv} = \frac{3}{4} \operatorname{Re} \left[\frac{u^2}{\sqrt{1-u^2}} \frac{(1+a_{TM}^+)(1+a_{TM}^-)}{1-a_{TM}} \right], \quad (2)$$

$$K_{TMh} = \frac{3}{8} \operatorname{Re} \left[\sqrt{1-u^2} \frac{(1-a_{TM}^+)(1-a_{TM}^-)}{1-a_{TM}} \right], \quad (3)$$

$$K_{TEh} = \frac{3}{8} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \frac{(1+a_{TE}^+)(1-a_{TE}^-)}{1-a_{TE}} \right], \quad (4)$$

在上述公式中, $\operatorname{Re}[\dots]$ 表示括号内复数的实部。此外,

$$a_{TM, TE}^+ = r_{TM, TE}^+ \exp(2jk_{z, e} z^+), \quad (5)$$

$$a_{TM, TE}^- = r_{TM, TE}^- \exp(2jk_{z, e} z^-), \quad (6)$$

$$a_{TM, TE} = a_{TM, TE}^+ a_{TM, TE}^-, \quad (7)$$

$$K = (1 - \Theta) \cdot K_{TMv} + \Theta \cdot (K_{TMh} + K_{TEh}), \quad (8)$$

其中 u 为归一化面内波矢; $r_{TM,TE}^+$ ($r_{TM,TE}^-$) 代表 TM 和 TE 偏振波从发射层向上(向下)方向传播的反射系数; z^+ (z^-) 为偶极子距发光层上下界面的距离; k_{ze} 为发光层中的波矢量的 z 方向分量; Θ 为水平偶极子比, 对于随机取向分布, $\Theta=2/3$ 。四组器件中偶极子源的光功率耗散特性计算结果如

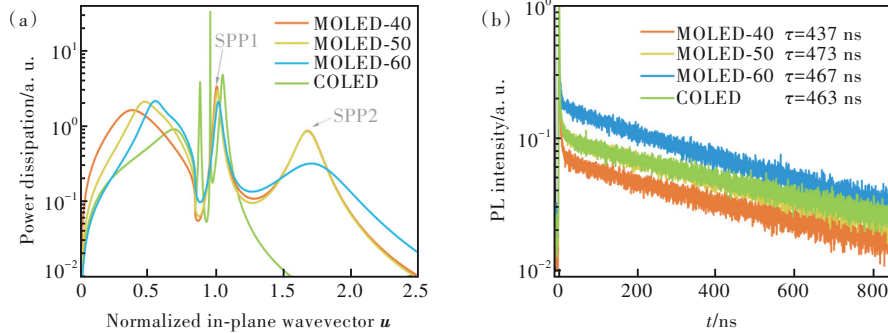


图3 绿光磷光器件中,偶极子光源的功率耗散谱(512 nm)(a)及瞬态光致发光特性曲线(512 nm)(b)

Fig.3 Power dissipation spectra (512 nm) of dipole sources located at the emitting layer (a) and transient PL characteristics (512 nm) (b) of green phosphorescent devices

此外,微腔器件呈现出两个表面等离子体极化(SPP)峰,包括 SPP1 和 SPP2。SPP1 对应于高反射 Mg:Ag 与有机界面处 SPP 和光学微腔的混合模式,而 SPP2 对应于半透明电极与介质两个界面处 SPP 的混合模式。随着 Bphen 厚度的增加, SPP1 和 SPP2 峰强度都发生变化,其中 SPP1 随着厚度逐渐下降,而 SPP2 在 Bphen 厚度达到 60 nm 后明显下降。这些结果表明,与常规器件相比,微腔器件中 SPP 模式得到增强,且随着 Bphen 增加而减弱。因此,相较于 MOLED-40 和 MOLED-50, MOLED-60 表现出更高的效率主要是因为 SPP 模式引起的损耗减少。

在量子体系中,自发辐射一般分为三个通道:与 SPP 耦合的 SPP 通道、远场辐射通道以及损耗导致的非辐射通道。因此,微腔器件中 SPP 模式增强将有助于加快器件中激子的自发辐射速率。为了进一步探究这一现象,我们测量了四组器件对应的光致发光(PL)寿命。PL 寿命可反映激子自发辐射速率的快慢。图 3(b)显示,具有不同腔长的微腔器件 MOLED-40、MOLED-50 和 MOLED-60 的 PL 寿命分别为 437, 473, 467 ns, 而对比的 ITO 器件则为 463 ns。这表明 MOLED-40 微腔相较于其他腔长具有更明显的优势,而 MOLED-50 和 MOLED-60 在 PL 寿命上与 ITO 对比器件区别不大。这表明激子自发辐射速率对腔长敏感,当

图 3(a) 所示。可以清晰地观察到,在常规器件 COLED 中存在两个尖锐的波导峰,而引入微腔后,这两个尖锐波导峰消失,表明微腔器件中波导模式引起的损耗大幅下降,有助于实现更高的光取出效率,从而改善器件效率。这一观察提示了微腔结构对于优化器件光取出特性的潜在影响。

器件处于最佳谐振腔长时(见图 2(d)),自发辐射速率最大。此外,微腔器件中激子自发辐射速率随腔长的变化也可以与图 3(a) 中偶极子光源和光学模式之间的耦合情况相对应。这表明,偶极子光源和光学模式之间的耦合情况也可以反映器件发光过程中激子自发辐射速率的快慢。

3.4 器件效率滚降

为了研究激子自发辐射速率加快对器件性能的影响,我们在固定其他速率参数的情况下,引入测试得到的自发辐射速率参数,使用激子速率方程计算了常规器件 COLED 及微腔器件 MOLED-40 的极化子浓度 n_p 、激子浓度 n_i , 以及极化子-三线态激子猝灭(TPA)和三线态激子-三线态激子湮灭(TTA)行为对器件效率滚降的贡献程度,如图 4 所示。所采用的激子速率方程可参见先前研究^[25-26]。从图 4(a)、(b)可以看出,当电流密度达到 100 mA/cm² 时,常规器件 COLED 的效率下降至最高效率的 65%,而微腔器件 MOLED-40 仍能保持最高效率的 83%。通过观察 TTA 和 TPA 对效率滚降的贡献,可以发现微腔器件中激子自发辐射速率的加快显著降低了由 TPA 引起的损耗,从而改善了器件的效率滚降问题。这表明,加快激子自发辐射速率在一定程度上可以避免极化子对激子的湮灭。

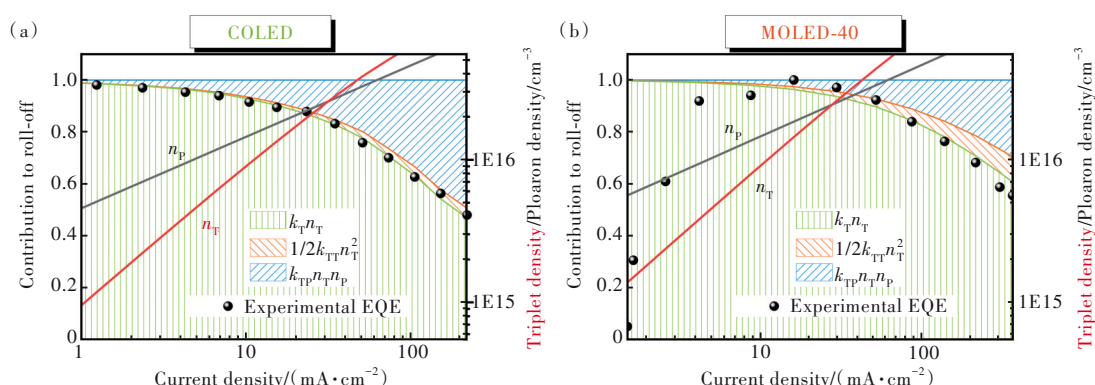


图4 常规器件COLED(a)及微腔器件MOLED-40(b)的EQE-电流密度特性及TTA和TPA对其效率滚降的贡献情况,其中 $1/2k_{\text{TT}}n_{\text{T}}^2$ 和 $k_{\text{TP}}n_{\text{T}}n_{\text{P}}$ 分别表示TTA和TPA的贡献

Fig.4 EQE-current density characteristics of the conventional device COLED(a) and microcavity device MOLED-40(b), along with the contributions of TTA and TPA to their efficiency roll-off. Here, $1/2k_{\text{TT}}n_{\text{T}}^2$ and $k_{\text{TP}}n_{\text{T}}n_{\text{P}}$ represent the contributions of TTA and TPA respectively

3.5 器件调制带宽特性

最后,我们深入研究了激子自发辐射速率对器件频率响应特性的影响,具体结果如图5(a)所示。值得注意的是,微腔器件MOLED-40的调制带宽显著扩展,从常规器件COLED的4 kHz提升至7 kHz,增长了近75%。通过图5(a)插图所示器件的几何电容来看,虽然四组器件的几何电容存在差异,但在数量级上却没有明显差别。这表明充电时间对频率响应的影响并不显著。接着,我们采用了测试瞬态电致发光特性的方法来表征器件的频率响应,相关结果

如图5(b)所示。结果显示,在引入微腔结构后,器件的上升时间明显加快。微腔器件MOLED-40能够更快地达到稳定状态,为其接受更高频段的交流信号激励提供了有利条件。同时,我们观察到,随着腔长的增加,微腔器件的响应速度呈现出减缓的趋势。这与之前测得的瞬态光致发光特性中的现象(见图3(b))一致。总体而言,频率响应特性主要受激子自发辐射速率的影响,且这一特性对腔长具有敏感性。当器件处于最佳谐振腔长时,其对器件频率响应的改善最为显著。

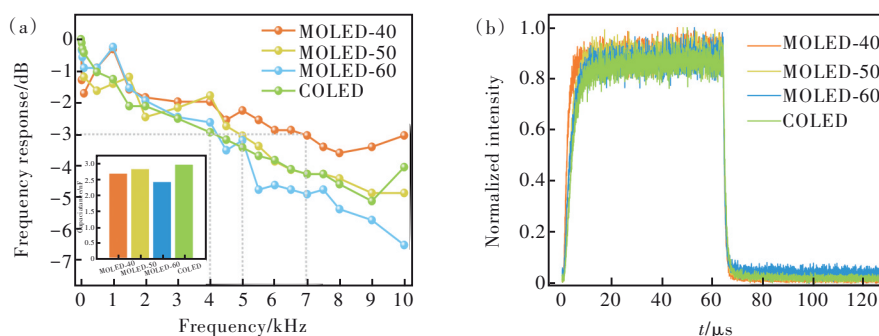


图5 (a)微腔器件与常规器件的频率响应特性,插图展示了它们的几何电容差异;(b)微腔器件与常规器件的瞬态电致发光特性

Fig.5 (a) Frequency response characteristics of micro-cavity devices compared to conventional devices, with illustrations depicting their geometric capacitance differences. (b) Transient electroluminescent characteristics of micro-cavity devices versus conventional devices

4 结 论

本研究利用磷光材料成功制备了一系列微腔结构不同的OLED。通过精确调整微腔长度,我们实现了微腔共振峰的调控,显著提升了发光亮度和外量子效率,并明显增加了激子的自发辐射

速率。深入的研究表明,提高激子自发辐射速率有助于抑制器件效率滚降。通过对OLED进行高频信号激励实验证明,微腔结构赋予了OLED更高调制带宽的潜力。微腔结构可以使调制带宽得到显著扩展,从常规器件的4 kHz提升至7 kHz,

增长近 75%。这不仅验证了微腔结构对 OLED 性能的关键影响,也为其在高频调制性能方面的实际应用提供了支持。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230331>.

参 考 文 献:

- [1] ZVANOVEC S, CHVOJKA P, HAIGH P A, *et al.* Visible light communications towards 5G [J]. *Radioengineering*, 2015, 24(1): 1-9.
- [2] HAIGH P A, GHASSEMLOOY Z, RAJBHANDARI S, *et al.* Visible light communications using organic light emitting diodes [J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2013, 51(8): 148-154.
- [3] ANIKEEVA P O, HALPERT J E, BAWENDI M G, *et al.* Quantum dot light-emitting devices with electroluminescence tunable over the entire visible spectrum [J]. *Nano Lett.*, 2009, 9(7): 2532-2536.
- [4] OYEWOBI S S, DJOUANI K, KURIEN A M. Visible light communications for internet of things: prospects and approaches, challenges, solutions and future directions [J]. *Technologies*, 2022, 10: 28.
- [5] KATZ M, O'BRIEN D. Exploiting novel concepts for visible light communications: from light-based IoT to living surfaces [J]. *Optik*, 2019, 195: 163176.
- [6] 李继军, 聂晓梦, 甄威, 等. 显示技术比较及新进展 [J]. *液晶与显示*, 2018, 33(1): 74-84.
 LI J J, NIE X M, ZHEN W, *et al.* New developments and comparisons in display technology [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2018, 33(1): 74-84. (in Chinese)
- [7] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [C]. *11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No. 00TH8525)*, London, 2000: 1325-1329.
- [8] ZHOU Y J, ZHU X, HU F C, *et al.* Common-anode LED on a Si substrate for beyond 15 Gbit/s underwater visible light communication [J]. *Photon. Res.*, 2019, 7(9): 1019-1029.
- [9] IM Y, BYUN S Y, KIM J H, *et al.* Recent progress in high-efficiency blue-light-emitting materials for organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(13): 1603007.
- [10] YIN Y M, ALI M U, XIE W F, *et al.* Evolution of white organic light-emitting devices: from academic research to lighting and display applications [J]. *Mater. Chem. Front.*, 2019, 3(6): 970-1031.
- [11] 林宏, 周朋超, 王菲菲, 等. 用于光通信的高速响应有机电致发光器件 [J]. *发光学报*, 2013, 34(1): 73-77.
 LIN H, ZHOU P C, WANG F F, *et al.* Fast-response organic light-emitting devices for optical communication [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(1): 73-77. (in Chinese)
- [12] MINOTTO A, HAIGH P A, ŁUKASIEWICZ Ł G, *et al.* Visible light communication with efficient far-red/near-infrared polymer light-emitting diodes [J]. *Light. Sci. Appl.*, 2020, 9: 70
- [13] 潘赛虎, 司长峰, 郭坤平, 等. OLEDs 瞬态延迟时间的模拟及在信号通讯的应用 [J]. *发光学报*, 2017, 38(2): 188-193.
 PAN S H, SI C F, GUO K P, *et al.* Simulation of transient delay time in organic LEDs and application for signal transmission [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(2): 188-193. (in Chinese)
- [14] YOSHIDA K, MANOUSIADIS P P, BIAN R, *et al.* 245 MHz bandwidth organic light-emitting diodes used in a gigabit optical wireless data link [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 1171.
- [15] LIU S H, LIU W B, JI W Y, *et al.* Top-emitting quantum dots light-emitting devices employing microcontact printing with electricfield-independent emission [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 22530.
- [16] WANG H, ZANG C X, SHAN G G, *et al.* Bluish-green thermally activated delayed fluorescence material for blue-hazard free hybrid white organic light-emitting device with high color quality and low efficiency roll-off [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(9): 1801718.
- [17] ZANG C X, LIU S H, XU M X, *et al.* Top-emitting thermally activated delayed fluorescence organic light-emitting devices with weak light-matter coupling [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 116.
- [18] MA Y G, ZHANG H Y, SHEN J C, *et al.* Electroluminescence from triplet metal-ligand charge-transfer excited state of transition metal complexes [J]. *Synth. Met.*, 1998, 94(3): 245-248.

- [19] HOWARTH A J, MAJEWSKI M B, WOLF M O. Photophysical properties and applications of coordination complexes incorporating pyrene [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2015, 282-283: 139-149.
- [20] BALDO M A, LAMANSKY S, BURROWS P E, *et al.* Very high-efficiency green organic light-emitting devices based on electrophosphorescence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(1): 4-6.
- [21] HOHENLEUTNER A, SCHMIDBAUER S, VASOLD R, *et al.* Rapid combinatorial synthesis and chromatography based screening of phosphorescent iridium complexes for solution processing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2012, 22(16): 3406-3413.
- [22] HOFBECK T, YERSIN H. The triplet state of *fac*-Ir(ppy)₃ [J]. *Inorg. Chem.*, 2010, 49(20): 9290-9299.
- [23] YU Z W, FENG H W, ZHANG J X, *et al.* Carrier transport manipulation for efficiency enhancement in blue phosphorescent organic light-emitting devices with a 4,4'-bis(*N*-carbazolyl)-2,2'-biphenyl host [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(30): 9301-9307.
- [24] 唐歌, 刘士浩, 张乐天, 等. 单层热激活延迟荧光有机发光器件及其激子分布特性 [J]. *发光学报*, 2022, 43(4): 576-582.
- TANG G, LIU S H, ZHANG L T, *et al.* Single-layer thermally activated delayed fluorescent organic light-emitting devices and exciton distribution profiles [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(4): 576-582. (in Chinese)
- [25] MURAWSKI C, LEO K, GATHER M C. Efficiency roll-off in organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(47): 6801-6827.
- [26] LIU S H, YU H W, ZHANG Q Y, *et al.* Efficient ITO-free organic light-emitting devices with dual-functional PSS-rich PEDOT:PSS electrode by enhancing carrier balance [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(18): 5426-5432.



李镔(1998-),男,河北邢台人,硕士研究生,2020年于吉林大学获得学士学位,主要从事电致发光器件及其频率特性的研究。
E-mail: lib21@mails.jlu.edu.cn



谢文法(1978-),男,福建三明人,博士,教授,博士生导师,2004年于吉林大学获得博士学位,主要从事有机光电子学方面的研究。
E-mail: xiewf@jlu.edu.cn



刘士浩(1992-),男,山东聊城人,博士,副教授,2018年于吉林大学获得博士学位,主要从事有机发光器件方面的研究。
E-mail: liushihao@jlu.edu.cn