

文章编号: 1000-7032(2024)08-1211-08

基于准二维钙钛矿的窄线宽红光电致发光器件性能研究

张云杰^{1,2}, 李晓丹³, 郭晓阳^{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 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国市政工程东北设计研究总院有限公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 金属卤化物钙钛矿发光二极管(PeLEDs)具有宽色域和高色纯度,在照明和显示方面有着广阔的应用前景。英国伦敦大学研究团队发表于 *Scientific Reports* 的一项开创性研究发现,每天只需暴露在红光下 3 min,就能显著缓解视力下降。而钙钛矿的光谱可调性及较高的色纯度都为护眼红光 PeLEDs 的实现提供了保障。与以往的界面工程、配体工程等不同,本文从结构优化的角度来提升准二维钙钛矿红光 PeLEDs 的外量子效率(EQE),即结合微腔结构实现线宽更窄的红光电致发光器件。结果表明,将分布式布拉格反射镜(DBR)与 PeLEDs 相结合,设计并制备的基于微腔结构的高性能 PeLEDs 在窄化 PeLED 的电致发光(EL)半高全宽的基础上实现了 EQE 成倍增长,最大 EQE 能达到 11.26%。相较于同条件下制备的参比器件,具有微腔结构的 PeLED 器件 EL 线宽窄化到参比器件的 1/3,仅为 11 nm。

关键词: 准二维钙钛矿; 分布式布拉格反射镜; 红光; 电致发光; 半高全宽

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240120

Performance of Narrow-linewidth Red Emitted Electroluminescent Devices Based on Quasi-two-dimensional Perovskite

ZHANG Yunjie^{1,2}, LI Xiaodan³, GUO Xiaoyang^{1*}, LIU Xingyuan¹

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, 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;

3. China Northeast Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Changchun 130021, China)

* Corresponding Author, E-mail: guoxy@ciomp.ac.cn

Abstract: Metal halide perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) have wide color gamut and high color purity, with broad application prospects in lighting and displays. A groundbreaking study by a research team at the University of London published in *Scientific Reports* found that exposure to red light for just 3 minutes a day could significantly alleviate vision decline. The tunability of perovskite's spectrum and its high color purity provide assurance for the realization of eye-protective red-emitted PeLEDs. Unlike previous interface engineering or ligand engineering methods, this paper proposes a new approach to enhance the external quantum efficiency (EQE) of quasi-two-dimensional perovskite red PeLEDs by combining them with microcavity structures to achieve narrower linewidths in electroluminescent devices. The results show that by integrating distributed Bragg reflectors (DBRs) with PeLEDs, narrow linewidth high-performance PeLEDs based on microcavity structures were designed and fabricated, achieving a doubling of EQE on top of narrowing the electroluminescence (EL) full width at half maximum for microcavity PeLEDs, with a maximum EQE reaching 11.26%. Compared to reference devices prepared under the same conditions, PeLED devices with microcavity structures narrowed their EL linewidth to one-third that of reference devices, only 11 nm.

收稿日期: 2024-04-29; 修订日期: 2024-05-14

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20220201091GX, 20230101366JC); 长春市科技发展计划项目(23SH06); 国家自然科学基金(62175235)

Supported by Jilin Province Science and Technology Research Project (20220201091GX, 20230101366JC); Changchun Science and Technology Research Project(23SH06); National Natural Science Foundation of China(62175235)

Key words: quasi-two-dimensional perovskite; distributed Bragg mirror; red emitted; electroluminescence; half-height full width

1 引 言

金属卤化物钙钛矿因其高色纯度、发光波长可调、优异的电荷传输特性等优异的光电性能和低成本的溶液加工方法在半导体材料领域引起研究热潮,在高效率、高柔性、低成本的新一代光电器件领域展现出独特的应用潜力^[1-3]。除了太阳能电池领域,钙钛矿的应用还广泛涉及到发光二极管(LED)、光电催化、光电探测器等。

钙钛矿发光二极管(PeLEDs)是一种新型的显示技术,它使用钙钛矿材料作为发光层。PeLEDs具有荧光量子效率高、色域广、易于加工等优点,在下一代照明和显示器方面具有巨大的应用潜力^[4-6]。此外,PeLEDs还可以通过溶液加工方法实现大面积制备,这为其在显示领域的广泛应用提供了便利。自从2014年第一个在室温下运行的PeLED被报道以来^[7],通过对钙钛矿材料和发光器件结构不断优化,使得PeLEDs的性能得到了迅速提高。红光PeLEDs技术目前正处于快速发展的关键阶段,其在显示和照明领域的应用前景备受关注。英国伦敦大学研究团队发现,每天只需暴露在红光下3 min,就能显著缓解视力下降。而钙钛矿的光谱可调性及较高的色纯度都将为护眼红光PeLEDs的实现提供保障。

在过去的几年中,多个研究团队在红光PeLEDs的研发方面取得了令人瞩目的成果。2021年,Yang所在研究团队成功地采用苯乙基铵和1-萘甲基铵阳离子共掺杂策略,制备出外量子效率(EQE)高达12.41%且亮度为1 452.6 cd/m²的红光PeLED。该器件的发射峰位于635 nm^[8],该工作为红光显示技术的发展注入了新的活力。同年,Li所在研究团队也取得了重要突破,他们利用 β -CsPbI₃ NCs薄膜成功开发出红光发射的PeLED,获得17.8%的高EQE和出色的工作稳定性^[9]。这一成果为红光PeLEDs在照明和显示领域的应用提供了坚实的基础。进入2022年,Song研究团队进一步推动了红光PeLEDs的发展,他们成功研制出光谱稳定的纯红色PeLED,其EQE高达17.8%,亮度更是达到了9 000 cd/m²^[10],进一步证明了红光PeLEDs在显示技术领域的巨大潜力。2023年,Wu所在研究团队巧妙地运用硫代草酸

乙酯作为反溶剂中的添加剂,成功制备出亮度为6 836 cd/m²且EQE高达20.73%的红光PeLED^[11]。这些研究成果表明红光PeLEDs的性能逐步提升,在未来的商业化应用中有着广阔前景。

目前报道的高效红光PeLEDs都是基于表面工程、配体工程等方法实现的,然而我们发现,在早期对有机电致发光器件的研究中,利用微腔结构可以有效地调节发光峰位以及发光强度等电致发光性能^[12-16]。因此,为了进一步提升PeLEDs的性能,达到窄线宽护眼红光的性能需求,本文引入顶发射微腔结构来实现红光PeLEDs的光谱窄化和性能提升。基于微腔电致发光设计思想,本文所用微腔结构采用高反射率的分布式布拉格反射镜(DBR)作为底部反射镜,半透明金属膜作为光输出的顶部反射镜。在理论模拟的基础上,我们制备了红光发射的微腔PeLED,有效地提升了EQE,并最大程度地窄化了电致发光(EL)光谱。

2 实 验

2.1 底部高反射镜制备

底部DBR的制备过程需要采用高真空镀膜技术。目前,电子束真空镀膜机是一种常用的镀膜设备,它可以在玻璃衬底上制备出高质量的光学薄膜。在制备底部DBR时,主要采用四分之一波长的TiO₂和SiO₂周期结构。这种结构可以使得光线在反射时发生相长干涉效应,从而提高反射率。

为了确保底部DBR具有优异的光学性能,需要严格控制制备过程中的各种参数。首先,原材料TiO₂和SiO₂的纯度要达到4N级别,以确保制备出的薄膜具有高度的均匀性和稳定性。其次,在镀膜过程中,需要控制衬底温度为220 °C,初始真空度为 2×10^{-3} Pa,并充氧至 2.2×10^{-2} Pa。这些参数的精确控制可以确保薄膜的质量和性能。

在制备过程中,需要先后沉积15对TiO₂/SiO₂薄膜,对各层厚度进行精确设计以达到99%以上的高反射率。此外,为了保证电注入性能,还需要在DBR周期结构上沉积氧化铟锡(ITO)电极。TiO₂、SiO₂和ITO每层厚度分别为70 nm、113 nm和60 nm。底部反射镜的Bragg波长 λ_B 约为658 nm,最大反射率 R 约为99%,ITO的方块电阻约为90 Ω/sq 。

2.2 钙钛矿薄膜制备

实验材料 PbI_2 购自关东化学公司, CsI 、聚(3,4-乙撑二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)和碘化苯乙胺(PEAI)购自西安宝莱特光电有限公司,2-溴乙胺氢溴酸盐(BEABr)购自阿拉丁生化科技股份有限公司。量取 CsI (0.052 g)、 PbI_2 (0.092 g)、PEAI(0.02 g)和BEABr(0.004 1 g),在1 mL的二甲基亚砜(DMSO)中混合。将PEDOT:PSS(Baytron PVP Al 4083)用作空穴传输层,旋涂在经过UV臭氧处理的ITO上,在140℃下退火10 min;然后将基板转移到手套箱中沉积钙钛矿,以4 500 r/min的速度旋涂60 s,并在70℃退火10 min。

2.3 微腔PeLED的制备

微腔PeLED如图1所示。在器件制备过程中,需设计透明导电层ITO的电极形状,并通过稀盐酸溶液和锌粉的化学反应去除多余的ITO。底部DBR/ITO衬底使用前依次使用丙酮、乙醇、水进行超声清洗,每一步的超声洗涤时间为20 min。然后,将清洗干净的DBR/ITO衬底紫外臭氧处理30 min,进一步去除ITO表面的有机污染物和残留物,提高电极的导电性能。随后,准备空穴传输材料PEDOT:PSS溶液。在使用前,我们通过0.22 μm 过滤器对溶液进行过滤处理,以去除其中的杂质和颗粒物。然后,我们将过滤后的PEDOT:PSS溶液以2500 r/min的转速静态旋涂在ITO表面,旋涂时间为40 s。旋涂后将样品放置在140℃退火台上进行退火处理,以去除残余水分,退火时间为10 min。

待PEDOT:PSS薄膜冷却至室温后,我们将样品转移至氮气手套箱内进行钙钛矿(PVK)薄膜的制备。在手套箱内将PVK溶液以4 500 r/min的旋涂速率旋涂在PEDOT:PSS薄膜上,旋涂时间为60 s。随后,将样品在70℃下进行退火处理,退火时间为10 min。退火处理有助于促进PVK的结晶和排列,提高薄膜的质量。

最后,将样品移至热蒸发沉积设备中,在高真空条件下(4×10^{-4} Pa)依次蒸镀40 nm 1,3,5-三(1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)苯(TPBi),50 nm 4,7-二苯基-1,10-菲罗啉(Bphen),1 nm Cs_2CO_3 和30 nm Ag,从而完成器件的制备。同时,我们也采用不含DBR结构的PeLED做为参比样品。其中,参比样品的Ag电极厚度为100 nm,从底部玻璃衬底侧出光。微腔PeLED器件结构如图1所示。

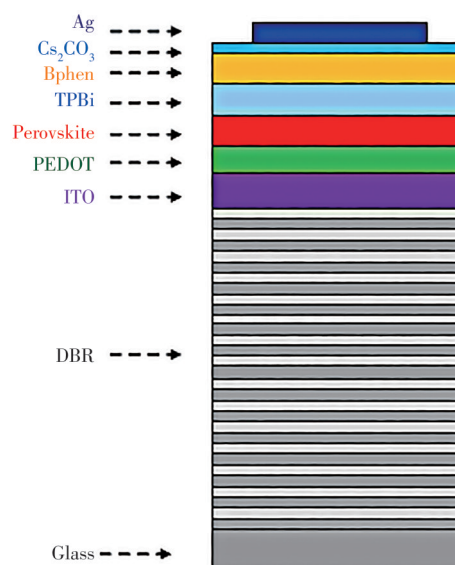


图1 微腔结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of microcavity structure

2.4 性能表征

本实验中,扫描电子显微镜(SEM, Hitachi-S4800)用于钙钛矿发光层的表面形态测量。使用Bruker D8 Advance X射线衍射仪测量钙钛矿薄膜的X射线衍射(XRD)光谱。采用FLS920稳态/瞬态荧光光谱仪进行平均荧光寿命(τ_{avg})和荧光量子产率(PLQY)测试。器件的电流效率-电压曲线和亮度-电压曲线使用Keithley2611数字源表和Konica Minolta LS-110亮度计测量。EL光谱由AvaSpec-ULS2048L光纤光谱仪采集。

3 结果与讨论

3.1 薄膜表面形貌

掺有PEAI的准二维钙钛矿薄膜在SEM下的形貌如图2(a)~(b)所示,由表面形貌图可以看出,我们制备的薄膜样品与传统准二维钙钛矿薄膜形貌十分接近,没有明显晶粒,PEA一方面作为有机大分子形成阻隔层,一方面也参与缺陷钝化。从截面图也可以看出薄膜表面较为平整,没有明显缺陷,钙钛矿薄膜厚度大概在50 nm左右。

图3为钙钛矿薄膜的XRD图,可观察到在 28.30° 处存在一个主衍射峰,在 14.26° 存在一个较弱的衍射峰,分别对应于[220]和[110]晶面;从几何结构来看,这两个晶面互相平行,[220]晶面间距更小,并且说明了钙钛矿薄膜内部的生长方向为水平方向^[17]。

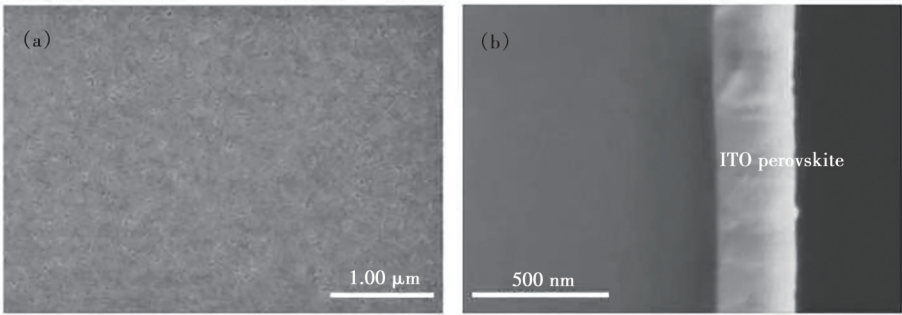


图 2 (a)钙钛矿薄膜SEM表面形貌;(b)钙钛矿薄膜截面形貌

Fig.2 (a)SEM surface morphology of perovskite film. (b)Cross-section morphology of perovskite film

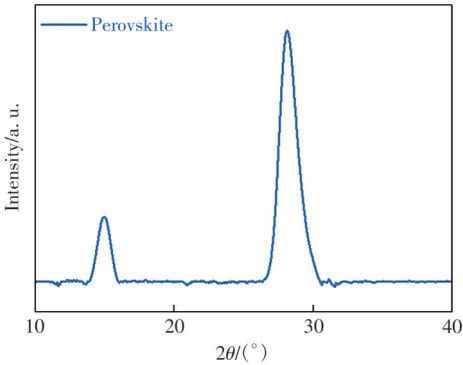


图 3 基础钙钛矿薄膜的XRD图谱

Fig.3 XRD image of basic perovskite thin film

3.2 薄膜发光性质

在探讨发光材料的性能时,辐射复合速率(k_r)和非辐射复合速率(k_{nr})是两个至关重要的参数,它们分别描述了材料在受到激发后,电子和空穴通过辐射和非辐射方式回到低能级状态的过

程。 k_r 指的是材料中的电子和空穴在辐射出光子的情况下,回到低能级状态的速率。这一过程中,材料的能量会以光子的形式释放出去,产生我们所观察到的发光现象。而 k_{nr} 则描述了电子和空穴在没有辐射出光子的情况下,通过其他方式(如热、声子等)回到低能级状态的速率。在实验研究中,可以发现薄膜的 k_{nr} 与PLQY(公式中表示为 η_{PLQY})、 τ_{avg} 之间存在明显的负相关关系。公式如下:

$$\tau_{\text{avg}} = \frac{1}{k_r + k_{nr}}, \tag{1}$$

$$\eta_{\text{PLQY}} = \frac{k_r}{k_r + k_{nr}}, \tag{2}$$

$$k_{nr} = \frac{1 - \eta_{\text{PLQY}}}{\tau_{\text{avg}}}, \tag{3}$$

经过测试,得到钙钛矿薄膜 PLQY 为 5.88%, τ_{avg} 为 12.57 ns,如图 4 所示,再通过计算得出 $k_{nr}=7.49\times10^7\text{ s}^{-1}$, $k_r=4.7\times10^6\text{ s}^{-1}$ 。

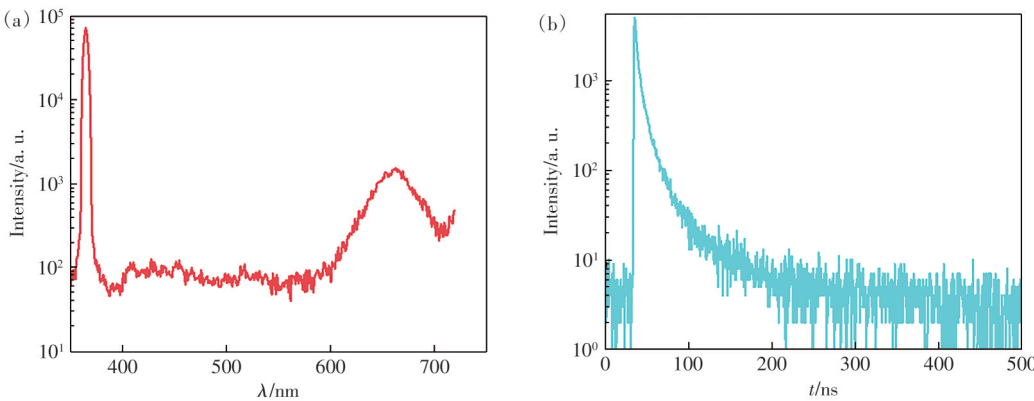


图 4 (a)钙钛矿薄膜的荧光量子产率;(b)钙钛矿薄膜的荧光寿命

Fig.4 (a)Fluorescence quantum yield of perovskite films. (b)Fluorescence lifetime of perovskite films

3.3 微腔模式的模拟

我们采用矩阵传输法对微腔结构进行了设计模拟。器件基于高反射底部 DBR 电极以及顶部低反射金属电极构成微腔,两个电极之间是腔内的各功能层和发光层。具体结构为 Glass/DBR/

ITO/PEDOT:PSS(35 nm)/Perovskite(50 nm)/TPBi(40 nm)/Bphen(50 nm)/Cs₂CO₃(1 nm)/Ag(30 nm)。PeLEDs 选用的基础钙钛矿材料为 CsPbI₃,荧光光谱峰值波长为 660 nm。

图 5(a)是通过矩阵传输法对微腔 PL 光谱进行

模拟的一个结果,图中黑色曲线为实测 PL 光谱,红色曲线是引入微腔后,先模拟出其光子态密度,再将光子态密度与 PL 光谱相结合的模拟结果,可以看出微腔的引入对于 PL 光谱起到一个明显窄化作用。

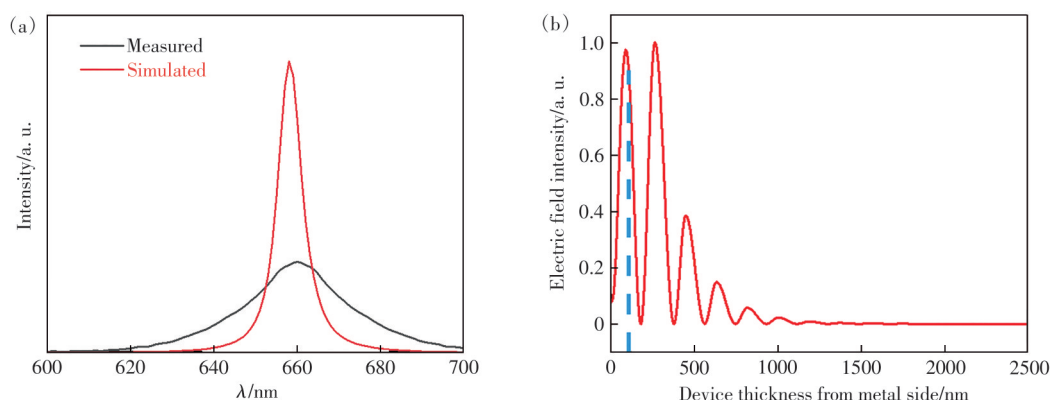


图 5 (a)微腔 PL 光谱模拟;(b)驻波电场模拟

Fig.5 (a)Microcavity PL spectral simulation. (b)Standing wave electric field simulation

图 6 为模拟的微腔 PeLEDs 与实际测试的 DBR 和实际测试的微腔器件的反射光谱。从图中可以观察到,所设计的底部 DBR 的中心反射波长约为 660 nm,与钙钛矿发光层的荧光峰接近。红色曲线为经实验最终优化的 PeLEDs 的反射光谱。可以看出,实验测得的反射峰以及半高全宽 (FWHM) 与模拟结果 (蓝色曲线) 基本吻合。

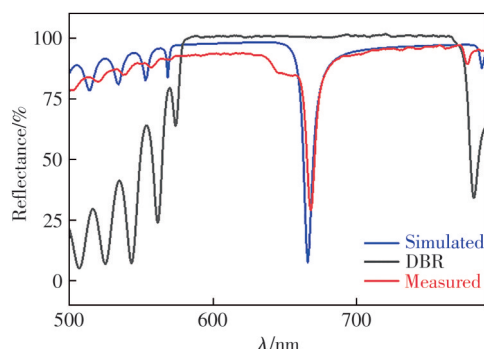


图 6 模拟的 PeLEDs (蓝)、实测的 DBR (黑)、实测的 PeLEDs (红) 反射光谱

Fig.6 Simulated PeLEDs (blue), measured DBR (black), and measured PeLEDs (red) reflection spectra

3.4 微腔 PeLEDs 的电致发光性能

我们做了两种结构的 PeLEDs 器件,分别是无 DBR 衬底和有 DBR 衬底的 PeLEDs。根据对两种不同器件光电特性的研究,我们评估了微腔结构对 PeLEDs 电致发光性能的影响。这些特性包括亮度、电流效率 (CE)、EL 光谱以及 EQE。通过详细分析这些数据,我们能够更全面地理解微腔结构在提升 PeLEDs 性能方面的潜力。

图 5(b) 是对微腔结构驻波电场的模拟曲线,使得钙钛矿发光层处于电场最强的位置,如蓝色竖线所示。由微腔发射速率公式可知,发射速率与电场强度成正比,进一步证明了微腔对发光性能的优化作用。

首先,从亮度-电压曲线图 (图 7(a)) 中可以观察到,未引入 DBR 结构的 PeLED 具有较高的亮度。相比之下,引入 DBR 结构的 PeLED 亮度较弱,这可能是由于底部玻璃衬底侧出光和顶部金属电极侧发光造成的差异。EL 光谱 (图 7(b)) 表明微腔结构具有对光谱的窄化作用。它们的 EL 峰位和半峰宽数据如下:作为参比器件的 PeLED 的 EL 峰位在 660 nm,半峰宽为 33 nm;而有 DBR 结构的微腔 PeLED 的 EL 峰位在 660 nm,半峰宽 11 nm。结果表明,引入含有 DBR 结构的微腔能够有效地窄化 PeLED 的 EL 光谱。从 CE-电压曲线 (图 7(c)) 可以看出,引入 DBR 结构的 PeLED 在性能上表现突出,其最大 CE 达到了 4.21 cd/A。这一数值相较于参比的 PeLED 有明显的提升,证明了 DBR 结构与薄金属 Ag 电极构成的微腔结构对于提升 PeLED 的电致发光性能具有正面作用。最后,通过对 EQE 的分析 (图 7(d)),我们发现具有微腔结构的 PeLED 展现出更高的 EQE,达到 11.26%,较参比器件 (6.57%) 提高了近一倍。这一结果表明,微腔结构可以有效地提高 PeLEDs 的性能。

后续我们测试了微腔器件的工作寿命,并用参比器件进行了对比。我们固定测试的亮度大约 100 cd/m² 时的电流为恒定电流,通过施加这种恒定电流来检测器件亮度的变化规律。参比器件与微腔器件的测试电流密度分别为 26 mA/cm² 和 29 mA/cm²,对应初始亮度分别为 95.18 cd/m² 和

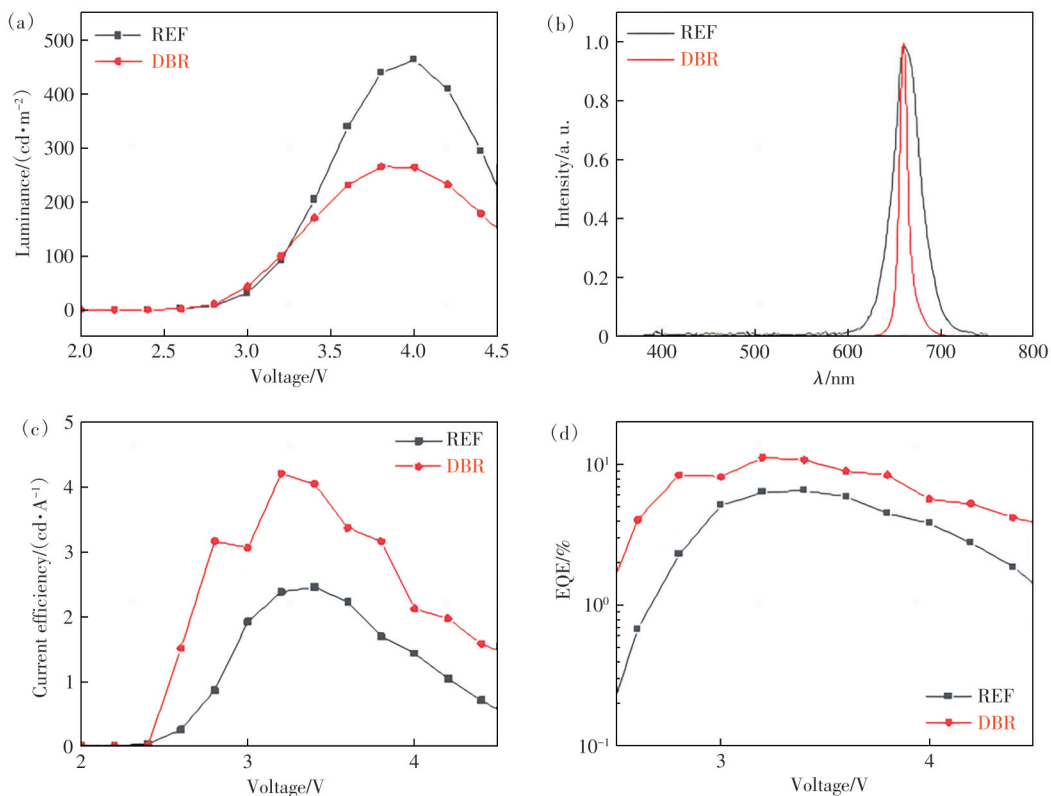


图7 (a)微腔PeLEDs的*L-V*特性;(b)微腔PeLEDs的EL光谱;(c)微腔PeLEDs的CE-*V*特性;(d)微腔PeLEDs的EQE-*V*特性
Fig.7 (a)*L-V* characteristics of microcavity PeLEDs. (b)EL spectra of microcavity PeLEDs. (c)CE-*V* characteristics of microcavity PeLEDs. (d)EQE-*V* characteristics of microcavity PeLEDs

94.62 cd/m^2 。由图8黄色虚线交汇处可看出,参比器件在620 s时亮度下降到初始值的一半,加了DBR的微腔器件在360 s时亮度下降到初始值的一半,但并未很快熄灭,而是在720 s时和参比器件同时达到各自初始亮度的40%。由此可见,微腔并没有对器件整体寿命造成影响,前期亮度下降更快与之更高的施加电流密度有关。

器件的详细电致发光性能参数如表1所示。同时,我们在表2中给出了到目前为止其他课题组所做的高效红光PeLEDs的半峰宽数据,可以看

出我们的结果是当前报道的较窄线宽的PeLED。

表1 不同结构PeLEDs的性能总结

Tab. 1 Performance summary of different structures of perovskite LED

Structures	$L_{\text{max}}/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	$\text{CE}_{\text{max}}/(\text{cd} \cdot \text{A}^{-1})$	$\text{EQE}_{\text{max}}/\%$	FWHM/nm
REF	463	2.46	6.57	33
DBR	265	4.21	11.26	11

表2 其他高性能红光PeLEDs团队半峰宽研究进展

Tab. 2 Research progress on half-peak width of other high-performance red PeLEDs teams

Team	Year	EL/nm	$\text{EQE}_{\text{max}}/\%$	FWHM/nm	Reference
LI Hanming	2021	689	17.8	37	[9]
SONG Yonghui	2022	640	17.8	30	[10]
WU Xiaoming	2023	650	20.73	25	[11]
Our Team	2024	660	11.26	11	/

4 结 论

本文在准二维钙钛矿电致发光器件的基础上,引入了微腔结构,探索了微腔结构对于红光PeLEDs性能的调控作用。通过一系列对比实验,

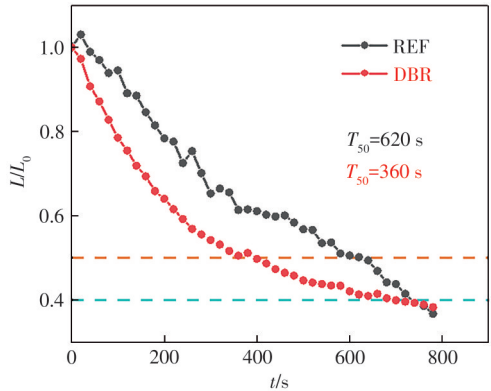


图8 微腔PeLED的工作寿命
Fig.8 Working lifetime of microcavity PeLED

对参比器件和微腔器件的亮度、CE、EL光谱和EQE等光电特性进行了比较研究,发现微腔结构不仅可以有效窄化PeLED的EL光谱,还能有效提高PeLED的EQE。其中EL光谱半峰宽由33 nm窄化到了11 nm,最大EQE从参比器件的6.57%提高至微腔器件的11.26%,表明微腔结构对PeLEDs性能的提升有一定的作用。这些发

现有助于更好地理解微腔结构的工作原理,为进一步优化PeLEDs的性能提供了有价值的参考。

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.20240120>.

参 考 文 献:

- [1] KANG J, WANG L W. High defect tolerance in lead halide perovskite CsPbBr₃ [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2017, 8(2): 489-493.
- [2] KIM H S, LEE C R, IM J H, *et al.* Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9% [J]. *Sci. Rep.*, 2012, 2(1): 591.
- [3] LIANG H Y, YUAN F L, JOHNSTON A, *et al.* High color purity lead-free perovskite light-emitting diodes *via* Sn stabilization [J]. *Adv. Sci.*, 2020, 7(8): 1903213.
- [4] TAN Z K, MOGHADDAM R S, LAI M L, *et al.* Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2014, 9(9): 687-692.
- [5] KANG C H, DURSUN I, LIU G Y, *et al.* High-speed colour-converting photodetector with all-inorganic CsPbBr₃ perovskite nanocrystals for ultraviolet light communication [J]. *Light Sci. Appl.*, 2019, 8(1): 94.
- [6] MIAO Y F, CHENG L, ZOU W, *et al.* Microcavity top-emission perovskite light-emitting diodes [J]. *Light Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 89.
- [7] LING Y C, YUAN Z, TIAN Y, *et al.* Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite nanoplatelets [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(2): 305-311.
- [8] YANG L P, ZHANG Y, MA J M, *et al.* Pure red light-emitting diodes based on quantum confined quasi-two-dimensional perovskites with cospacer cations [J]. *ACS Energy Lett.*, 2021, 6(7): 2386-2394.
- [9] LI H M, LIN H, OUYANG D, *et al.* Efficient and stable red perovskite light-emitting diodes with operational stability > 300 h [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(15): 2008820.
- [10] SONG Y H, GE J, MAO L B, *et al.* Planar defect-free pure red perovskite light-emitting diodes *via* metastable phase crystallization [J]. *Sci. Adv.*, 2022, 8(45): eabq2321.
- [11] RUI H S, WU X M, QIU Y, *et al.* Bifunctional bidentate organic additive toward high brightness pure red quasi-2D perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(52): 2308147.
- [12] 李斌, 刘士浩, 张乐天, 等. 微腔效应影响有机发光器件调制带宽特性研究 [J]. *发光学报*, 2024, 45(3): 468-475.
LI B, LIU S H, ZHANG L T, *et al.* Microcavity effect on modulation bandwidth characteristics in organic light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(3): 468-475. (in Chinese)
- [13] 金玉, 王康, 邹道华, 等. 表面等离子体-微腔激元对顶入射有机薄膜太阳能电池光吸收效率的增强 [J]. *发光学报*, 2017, 38(11): 1532-1538.
JIN Y, WANG K, ZOU D H, *et al.* Plasmon-cavity polaritons enhance the absorption efficiency of top-incident organic thin-film solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(11): 1532-1538. (in Chinese)
- [14] 张春玉, 刘星元, 套格套, 等. 耦合结构有机微腔的光致发光特性 [J]. *发光学报*, 2007, 28(3): 349-353.
ZHANG C Y, LIU X Y, TAO G T, *et al.* Optical properties of organic film in a coupled microcavity [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2007, 28(3): 349-353. (in Chinese)
- [15] 闫玲玲, 李宏建, 张剑华, 等. 微腔有机发光器件中的电致发光光谱 [J]. *发光学报*, 2007, 28(2): 173-178.
YAN L L, LI H J, ZHANG J H, *et al.* Electroluminescence spectra in microcavity organic light-emitting devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2007, 28(2): 173-178. (in Chinese)
- [16] 刘星元, 冯纪蒙, 刘云, 等. 多模发射的单层有机光学微腔 [J]. *发光学报*, 1999, 20(4): 346-350.

- LIU X Y, FENG J M, LIU Y, *et al.* Single-layer organic optical microcavity of multy cavity modes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 1999, 20(4): 346-350. (in Chinese)
- [17] YANG X L, ZHANG X W, DENG J X, *et al.* Efficient green light-emitting diodes based on quasi-two-dimensional composition and phase engineered perovskite with surface passivation [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9(1): 570.



张云杰(1998-),男,湖北襄阳人,硕士研究生,2019年于吉林大学获得学士学位,主要从事光电子学与激光技术的研究。

E-mail: 1271989688@qq.com



郭晓阳(1982-),女,吉林长春人,博士,副研究员,博士生导师,2010年于中国科学院长春应用化学研究所获得博士学位,主要从事新型光电子材料与器件的研究。

E-mail: guoxy@ciomp.ac.cn