

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-09

基于 Al/Ag 电极的倒置顶发射 QLED

王宇龙¹, 高 岩², 赵基臣¹, 张志远¹, 申怀彬^{2*}, 彭俊彪^{1*}

(1. 发光材料与器件全国重点实验室, 华南理工大学高分子光电材料及器件研究所, 广州 510641;

2. 河南大学特种功能材料重点实验室, 开封 475004)

摘要: 顶发射量子点发光二极管 (Quantum dot light-emitting diode, QLED) 具有更高的像素开口率, 在显示技术中具有重要的应用价值。本文首先设计了 Al/Ag 半透明阳极, 制备的倒置顶发射器件最大外量子效率 ($E_{QE_{max}}$) 和最大电流效率 (CE_{max}) 分别达到 25.0% 和 54.1 cd/A, 相较于纯 Ag 阳极器件分别提升 22.5% 和 27.2%。研究表明, Al/Ag 增强了空穴注入能力, 有利于电荷注入平衡。然后, 研究了顶发射微腔效应对器件发光性能的影响, 发现电极厚度和器件腔长对器件性能具有调控作用, 当 Ag 和 ZnMgO 分别为 27 nm 和 65 nm 时, 器件性能达到最佳。最后, 探究了微腔对激子复合的影响, 发现 Purcell 效应能够加速激子辐射复合。

关 键 词: 顶发射 QLED; Al/Ag 半透明电极; 倒置发光器件

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10.37188/CJL.20260034

CSTR: 32170.14.CJL.20260034

Inverted top-emitting QLED based on Al/Ag electrodes

WANG Yulong¹, GAO Yan², ZHAO Jichen¹, ZHANG Zhiyuan¹, SHEN Huaibin^{2*}, PENG Junbiao^{1*}

(1. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices, Guangzhou 510641, China;

2. Key Laboratory for Special Functional Materials of Ministry of Education, Kaifeng 474004, China)

* Corresponding Authors, E-mail: psjbpeng@scut.edu.cn, shenhuaibin@henu.edu.cn

Abstract: Top-emitting quantum dot light-emitting diode (QLED) have a higher pixel aperture ratio and significant application value in display technology. In this paper, an Al/Ag semi-transparent anode was first designed, and the inverted top-emitting device fabricated achieved a maximum external quantum efficiency ($E_{QE_{max}}$) of 25.0% and a maximum current efficiency (CE_{max}) of 54.1 cd/A, which were 22.5% and 27.2% higher than those of the pure Ag anode device, respectively. The research shows that Al/Ag enhances the hole injection ability and is conducive to charge injection balance. Then, the influence of the top-emitting microcavity effect on the device's luminescence performance was studied, and it was found that the electrode thickness and device cavity length have a regulatory effect on the device performance. When Ag and ZnMgO are 27 nm and 65 nm, respectively, the device performance is optimal. Finally, the influence of the microcavity on exciton recombination was explored, and it was found that the Purcell effect can accelerate exciton radiative recombination.

Keywords: Top-emitting QLED; Al/Ag semi-transparent electrodes; Inverted light-emitting device

1 引 言

量子点 (Quantum dots, QDs) 由于光谱可调、

色纯度和光致发光效率高等优点, 在显示领域受到了广泛关注^[1-4]。经过多年研究, 红光、绿光、蓝光量子点发光二极管 (Quantum dot light-emitting

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2022B0303010001)

Supported by Guangdong Provincial Key Areas Research and Development Program

diode, QLED)的最大外量子效率($EQE_{\max}$)均已超过 20%: 红色 30.0%^[5], 绿色 28.7%^[6], 蓝色 24.7%^[7], 因此 QLED 被认为是具有潜力的下一代显示技术之一。

顶发射(Top emitting, TE)结构相较于底发射(Bottom emitting, BE)结构具有显著优势。BE 结构中, 光从玻璃衬底射出, 由于玻璃衬底($n = 1.5$)与空气($n = 1.0$)间存在较大折射率失配, 一部分光在玻璃/空气界面发生全反射, 结果被困在玻璃衬底中, 即所谓的衬底模式损耗, 这限制了器件效率的提升。此外, BE 器件与 TFT 驱动电路集成后, 不透明的 TFT 驱动电路会遮挡一部分发光面积, 导致像素开口率降低。因此, BE 结构在显示器中并不是首选。与 BE 结构不同, TE 结构器件中的光可以直接从顶部半透明电极射出, 完全消除了衬底模式损耗和像素开口率低的问题。同时, TE 器件内部存在强烈的微腔效应, 光在反射电极与半透明电极构成的微腔内经过多次反射形成相长干涉, 从而增强发光, 有望实现更高的器件效率。近年来, TE-QLED 的研究已经取得显著进展^[8-17], $EQE_{\max}$ 已提升至 44.5%^[18]。然而, 此类高性能 TE 器件的报道主要集中在正置结构, 倒置结构的器件效率常常不到最高正置结构的一半^[10-13]。在显示器集成方面, 倒置结构器件易于 N 型 TFT 集成, 在降低驱动电压、提升器件稳定性及工艺兼容性方面具备显著优势^[19-20]。因此, 深入开展对倒置 TE-QLED 器件的研究, 具有重要应用价值。

在 QLED 器件中, 电子传输层(ZnO 或 Zn-MgO)具有较高的电子迁移率和适宜的能级结构, 能够保障电子的高效注入。然而, 空穴传输层的空穴迁移率普遍较低, 且 QDs 的价带顶较深, 空穴注入势垒更高。迁移率的严重失配和电子/空穴注入势垒的不对称, 导致器载流子注入不平衡, 进而引发俄歇复合^[21-22]与电荷泄漏^[23-25]问题。电荷注入不平衡问题在倒置结构的 TE-QLED 中更加突出。首先, 在材料层面, 倒置 TE-QLED 的阳极采用高透明度、高功函数的 ITO(功函数: 4.8 eV)电极较为合适, 但溅射 ITO 会破坏下层的 QDs 发光层, 所以更多人仍选择金属电极(例如 Ag, 功函数: 4.26 eV), 这直接增加了空穴注入势垒。其次, 在工艺层面, 为实现顶部出光, Ag 电极必须减薄至约 20 nm, 生长薄 Ag 过程中的“环岛”现象会导致薄膜不连续^[26], 严重降低其导电性。因此, 实

现高效的空穴注入, 是构筑高性能倒置 TE-QLED 的关键。

为此, 本文设计了 Al/Ag 复合电极作为半透明阳极以增强空穴注入能力, 并通过调节微腔效应优化器件性能, 最终制得高效率倒置 TE-QLED 器件, 器件 $EQE_{\max}$ 与 $CE_{\max}$ 分别达到了 25.0% 和 54.1 cd/A。

2 实 验

2.1 原料与试剂

乙醇、乙酸乙酯和 2-甲氧基乙醇购买于 Alfa。氯苯、二水合乙酸锌、四水合乙酸镁、四甲基氢氧化铵(TMAH)、二甲基亚砜(DMSO)和聚乙氧基乙烯亚胺(PEIE)购买于 Aladdin 公司。TCTA、 MoO_3 和 PEDOT:PSS 购买于西安宝莱特。红光量子点(red quantum dots, RQDs)自行合成, 核壳结构为 CdSe/CdZnSe/ZnSe/ZnSeS/ZnS, 表面配体为油酸, 分散在正辛烷中, 浓度为 20 mg/mL。TFB 购买于 American Dye Source。Glass/ITO(10 nm)/Ag(150 nm)/ITO(10 nm)基板购买于广州新视界光电科技有限公司。

2.2 样品制备

2.2.1 PEIE 旋涂液制备

将 10 mL 的玻璃瓶置于称量台并去皮, 使用注射器滴入一滴 PEIE, 记录质量后加入 2-甲氧基乙醇, 浓度达到 0.5 wt% 后停止, 然后搅拌 24 h 后备用。

2.2.2 TFB 旋涂液制备

在 3 mL 的玻璃瓶中放入 16 mg 的 TFB, 然后加入 2 mL 氯苯并搅拌 2 h, 使用前用 0.45 μm 有机尼龙滤头过滤。

2.2.3 ZnMgO 量子点合成

将二水合乙酸锌(0.2798 g)与四水合乙酸镁(0.048 g)溶于 15 mL 的 DMSO 中, 将 TMAH(0.453 g)溶于 5 mL 乙醇中, 分别搅拌 5 min。溶解后, 将 TMAH 的乙醇溶液以 16.5 mL/h 的速度缓慢注入 DMSO 的混合溶液中, 60℃ 下搅拌 150 min。将反应完成的溶液分装在四根离心管当中, 每根加 15 mL 乙酸乙酯, 以 5000 rpm 速率离心 3 min, 倒掉上清液, 使用 3 mL 乙醇溶解管内沉淀, 用 0.45 μm 水相 PTFE 滤头过滤后备用。

2.3 器件制备

发光器件制备方法: 在 Glass/ITO/Ag/ITO 基板上旋涂 ZnMgO 溶液, 100℃ 下退火 30 min, 形成

ETL。在 ETL 上旋涂 QDs 溶液, 50°C 下退火 30 min, 形成 EML。在 EML 上旋涂引入 5 nm 的 PEIE, 形成界面修饰层以降低空穴注入势垒^[27]。蒸镀沉积 TCTA (40 nm) 和 MoO₃ (8 nm) 分别作为 HTL 和 HIL。蒸镀 Ag 或 Al/Ag 作为半透明阳极。底发射器使用 Glass/ITO 基板制备, 蒸镀 100 nm Al 作为阳极, 其余功能层与顶发射器件保持一致。器件结构如下:

顶发射结构: Glass/ITO (10 nm)/Ag (150 nm)/ITO (10 nm)/ZnMgO (x nm)/QDs (30 nm)/PEIE (5 nm)/TCTA (40 nm)/MoO₃ (8 nm)/Ag (y nm) 或 Al (2 nm)/Ag (y nm)

底发射结构: Glass/ITO (135 nm)/ZnMgO (35 nm)/QDs (30 nm)/PEIE (5 nm)/TCTA (40 nm)/MoO₃ (8 nm)/Al (100 nm)

ZnMgO 厚度为 x nm 的顶发射器件记作 TE-ZnMgO x , Ag 厚度为 y nm 的顶发射器件记作 TE-Ag y 或 TE-Al2Ag y , 底发射器件记作 BE。

3 结果与讨论

3.1 Al/Ag 复合阳极对器件性能的影响

TE 器件中, 顶部与底部电极之间构成光学谐振腔, 光子在腔内经历往复反射后, 通过干涉加强

的方式实现耦合输出(补充材料图 3), 其中满足谐振波长的光会获得显著增强, 从而引起 EL 光谱半峰宽的窄化。与 TE 器件不同, BE 器件由于底部 ITO 电极具备优异的透光性, 无法形成有效的微腔结构, EL 光谱半峰宽并不会出现明显窄化。据此, 可通过 FWHM 的窄化现象判断器件内部是否存在微腔效应。

分别采用 Ag(27 nm) 和 Al(2 nm)/Ag(27 nm) 作为半透明阳极, 制备了 TE-Ag27 和 TE-Al2Ag27 顶发射器件。图 1(a) 发光光谱显示, TE-Ag27 和 TE-Al2Ag27 的 EL 光谱半峰宽分别为 15.9 nm 和 14.7 nm, 相较于 BE 器件 (18.6 nm), 分别窄化了 2.7 nm 和 3.9 nm。因此, TE-Ag27 和 TE-Al2Ag27 中均存在较强的微腔效应。图 1(b) 的 J-V-L 特性显示, BE、TE-Ag27 和 TE-Al2Ag27 的启亮电压分别为 2.6 V、3.2 V 和 3.0 V, 两种 TE 器件启亮电压均高于 BE 器件, 并且相同驱动电压下 BE 具有更高的电流密度, 这表明 TE 器件的电荷注入更加困难。TE-Al2Ag27 的启亮电压较 TE-Ag27 降低了 0.2 V, 且具有更高的电流密度, 这表明 2 nm Al 的引入能够改善器件电荷注入。图 1(c) 和 (d) 是器件 EQE-J 和 CE-J 曲线。BE、TE-Ag27 和 TE-Al2Ag27 的 CE_{max} 分别为 32.1 cd/A、42.5 cd/A 和

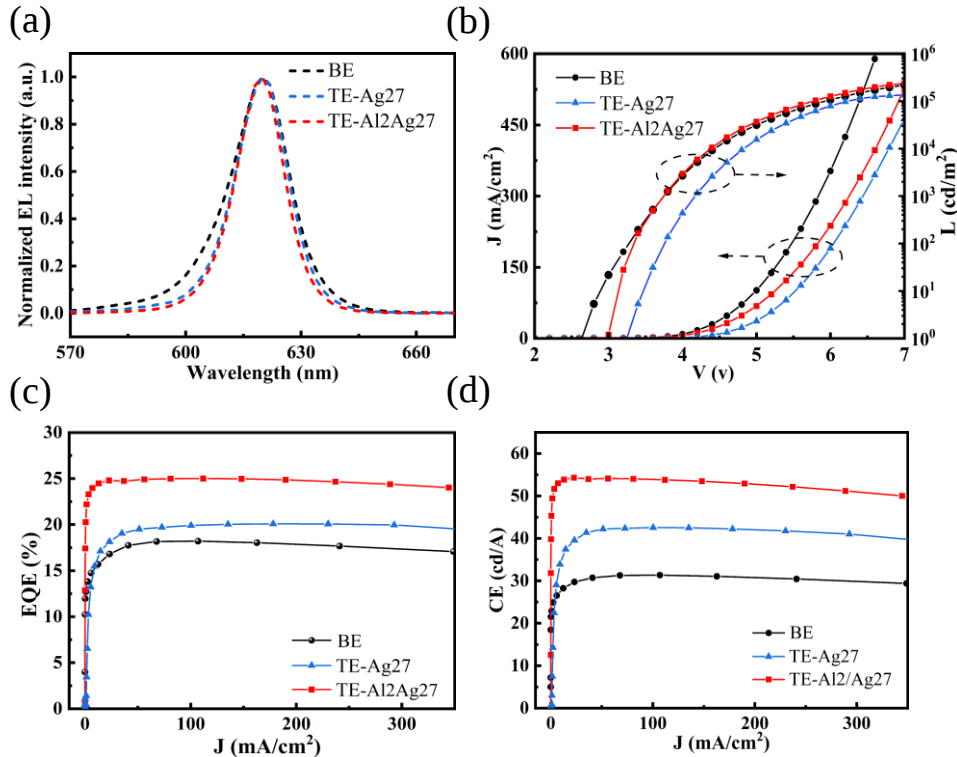


图 1 不同结构器件性能。(a) EL 光谱; (b) J-V-L 曲线; (c) EQE-J 曲线; (d) CE-J 曲线

Figure 1 Performance of different structural devices. (a) EL spectrum; (b) J-V-L curve; (c) EQE-J curve; (d) CE-J curve

54.1 cd/A, $E_{QE_{max}}$ 分别为 18.2%、20.4% 和 25.0%。相较于 BE 器件,TE-Ag27 和 TE-Al2Ag27 的效率均有显著提升,其中 CE_{max} 分别提高了

32.4% 和 68.5%, $E_{QE_{max}}$ 分别提升了 12.1% 和 37.4%。BE、TE-Ag27 和 TE-Al2Ag27 的器件性能对比汇总于表 1。

表 1 不同结构器件的性能汇总

Table 1 Summary of Performance of Different Structural Devices

Device	V_m (V)	FWHM(nm)	CE_{max} (cd/A)	$E_{QE_{max}}$ (%)	L_{max} (cd/m ²)	EL peak (nm) at 5V
BE	2.6	18.6	32.1	18.2	219148	620
TE-Ag27	3.2	15.9	42.5	20.4	135225	619
TE-Al2Ag27	3.0	14.7	54.1	25.0	236499	619

为研究 TE 器件效率提升的原因,采用 COM-SOL 软件仿真得到器件各类光损耗模式占比,如图 2 所示。损耗模式包括空气模式(Air)、衬底模式(Sub)、波导模式(WG)、表面等离激元模式(SPP)和吸收模式(Abs)。仿真结果表明,相较于 BE 器件,TE 器件的衬底模式损耗为零,且 Air 和 WG 模式占比显著增加,说明衬底模式中的光转化为了空气和波导模式,TE-Ag27 和 TE-Al2Ag27 的空气模式成分占比分别提高了 33.9% 和 38.1%,外耦合出光效率得到了提升,这是 TE 器件性能提升的主要原因。

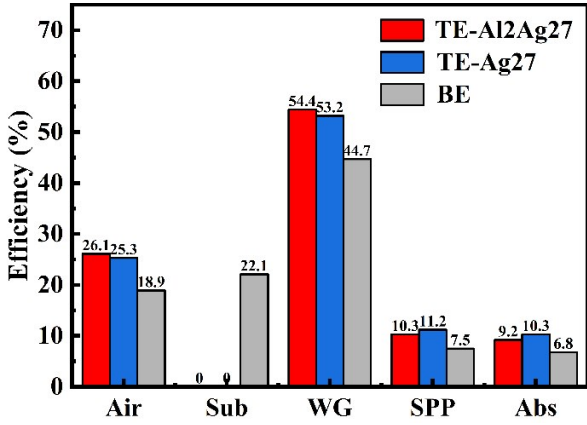


图 2 各种光耦合损耗占比

Figure 2 Proportion of various optical coupling losses

相较于 TE-Ag27, TE-Al2Ag27 的 CE_{max} 和 $E_{QE_{max}}$ 分别提升了 27.3% 和 22.5%。为研究 TE-Al2Ag27 性能进一步提升的原因,分别制备了基于 Ag(27 nm)和 Al(2 nm)/Ag(27 nm)阳极的单空穴器件 HOD-Ag27 和 HOD-Al2Ag27。图 3 是 HOD 器件的 J-V 曲线,在相同驱动电压下,HOD-Al2Ag27 的电流密度更大,并且随驱动电压的增大,两者电流密度差距越大。6 V 时,HOD-Al2Ag27 的电流密度相较于 HOD-Ag27 提升了近四倍。

对电极薄膜进行 UPS 测试,以研究 2 nm 厚度 Al 层插入对电极功函数的影响,如图 4 所示。结

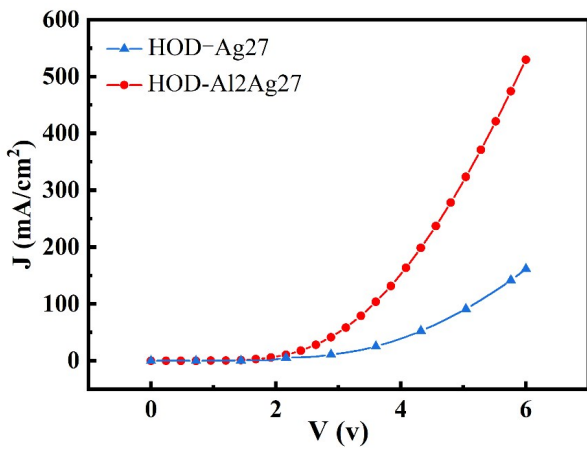


图 3 HOD-Ag27 和 HOD-Al2Ag27 的 J-V 曲线

Figure 3 J-V curves of HOD-Ag27 and HOD-Al2Ag27

果表明,Al(27 nm)/MoO₃(8 nm)和 Al(27 nm)/Ag(2 nm)/MoO₃(8 nm)的功函数分别为 7.6 eV 和 7.9 eV,插入 2 nm 厚度 Al 层后,功函数增加了 0.3 eV。此外,对电极薄膜进行了 SEM 表面形貌测试,如图 5 所示。Ag 厚度为 7 nm 时,薄膜呈明显岛状分布,厚度增加至 27 nm 时,Ag 层能够实现基板的全覆盖,但颗粒状明显,表面较为粗糙,插入 2 nm 的 Al 层后,Ag 电极不再呈岛状分布,且表面形貌变得更加平整。上述结果表明,2 nm 超薄 Al 层增大了电极功函数并促进 Ag 膜均匀生长,显著增强了空穴注入能力,这是 TE-Al2Ag27 器件性能优于 TE-Ag27 的原因。

3.2 微腔效应对器件性能的影响

顶部电极厚度会显著影响反射率与透射率,进而决定参与微腔效应的光子数量,影响微腔效应的强弱。因此,通过调节电极厚度可以调控微腔效应,进而优化器件性能。为研究电极厚度变化时,微腔效应对器件性能的调控规律,制备了 Ag 厚度分别为 22 nm、27nm 和 32nm 的复合电极 TE-QLED。不同电极厚度的器件分别简记为 TE-Al2Ag22、TE-Al2Ag27、TE-Al2Ag32。

图 6(a)和(b)是器件的 $CE-J$ 与 $E_{QE}-J$ 曲线。

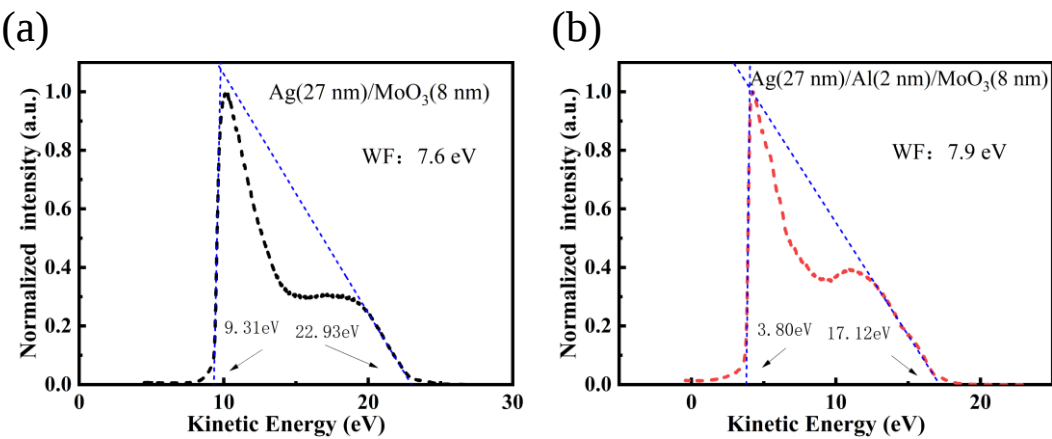


图4 不同电极薄膜的UPS图谱
Figure 4 UPS spectra of different electrode films

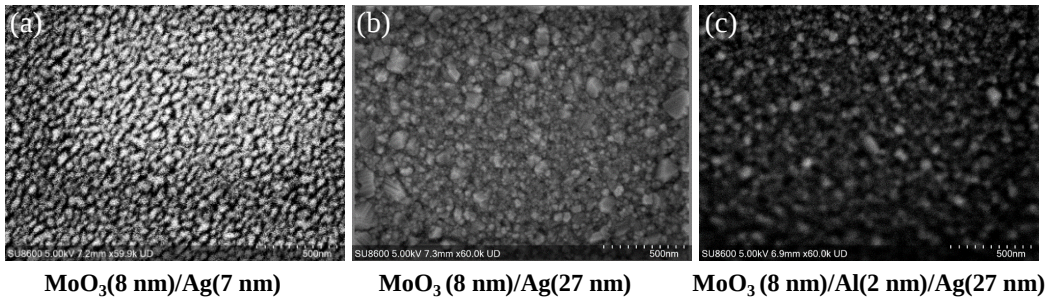


图5 不同电极薄膜的SEM图片
Figure 5 SEM images of different electrode films

EQE 和 CE 随电极厚度的变化趋势不同,具体表现为:当 Ag 厚度为 22 nm 时,EQE_{max}为 18.4%,CE_{max}为 12.1 cd/A;将厚度增加至 27 nm 时,EQE_{max}达到峰值 25.0%,CE_{max}提升至 54.1 cd/A;进一步增加至 32 nm 时,EQE 骤降至 10.8%,但 CE_{max}却进一步升高至 62.4 cd/A。

结合电极透射率(图 6(c))与反射率和器件角度分辨发光强度分布(图 6(d)),可解释 EQE_{max}和 CE_{max}的不同变化趋势。具体而言:TE-Al2Ag22 的电极厚度最小,较高的透射率有利于光子逃逸,但微弱的微腔效应使谐振腔对器件效率的提高有限,限制了 EQE 和 CE 的提升。相反,对于 TE-Al2Ag32 器件,电极厚度最大,过低的透射率成为光子逃逸的主要障碍,大量光子被束缚在腔内,导致 EQE 不升反降。然而,较高的反射率构筑了最

强的微腔效应,显著增强了器件法线方向的发光强度(图 6(d)),因此 CE 达到最高。唯有 TE-Al2Ag27 的电极厚度适中,实现了透射率与反射率之间的最优平衡,既能够借助微腔共振效应增强光输出,同时保证被共振放大的光子具有足够高的逃逸概率,从而实现 EQE 与 CE 综合权衡下的最优。不同电极厚度的器件性能参数汇总于表 2。

器件腔长影响谐振波长,调节器件腔长可以调控微腔效应。考虑到 ZnMgO 电子传输层导电性良好,其厚度变化对电子注入影响较小。因此,制备了 ZnMgO 厚度分别为 55 nm、65 nm 和 75 nm 的 TE-QLED,以研究腔长变化时微腔效应对器件性能的调控规律。不同腔长的器件分别记作 TE-ZnMgO55、TE-ZnMgO65、TE-ZnMgO75。

表 2 不同电极厚度的 TE-QLED 器件性能汇总

Table 2 Summary of performance of TE-QLED devices with different electrode thicknesses

Device	V _{on} (V)	FWHM(nm)	CE _{max} (cd/A)	EQE _{max} (%)	L _{max} (cd/m ²)	EL peakat 5V (nm)
TE-Al2Ag22	3.0	16.7	12.1	18.4	51604	619
TE-Al2Ag27	3.0	14.7	54.1	25.0	236499	619
TE-Al2Ag32	2.8	13.4	62.4	10.8	305258	619

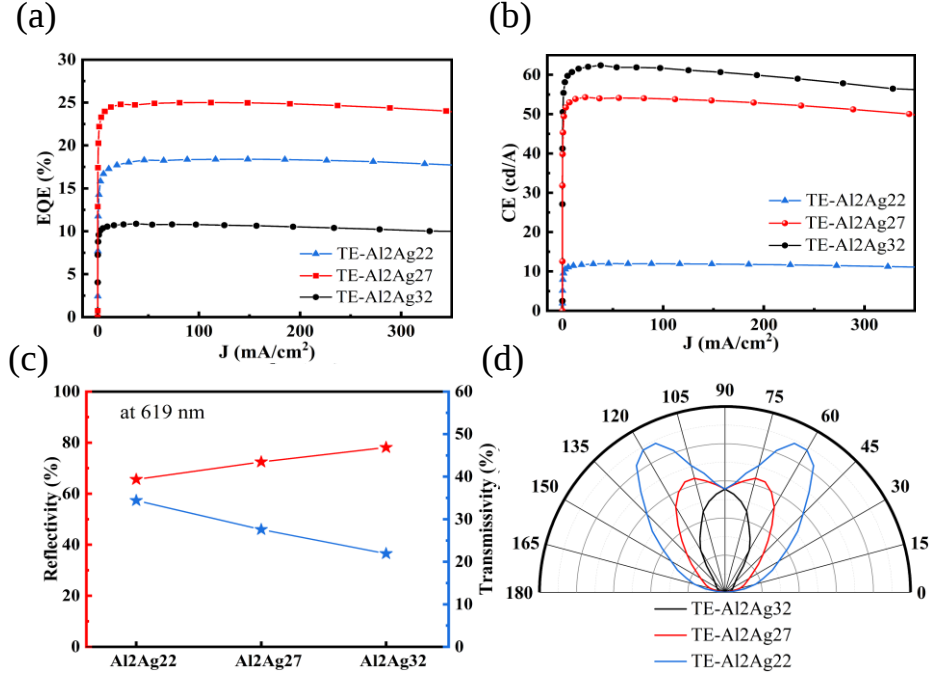


图6 不同电极厚度的TE-QLED器件性能表征。(a)EQE-J曲线;(b)CE-J曲线;(c)电极透射反射率;(d)器件角发射模式
Figure 6 Performance characterization of TE-QLED devices with different electrode thicknesses. (a) EQE-J curve; (b) CE-J curve; (c) electrode transmittance and reflectance; (d) angular emission mode of the device

图7(a)发光光谱表明,TE-ZnMgO55、TE-ZnMgO65和TE-ZnMgO75的EL发光峰分别为617 nm、620 nm、624 nm,随腔长的增加,发光峰位逐

渐红移。这是因为腔长增加会导致谐振波长红移,而器件EL光谱正是谐振波长对QDs本征发射光谱选择的结果。图7(b)是J-V-L曲线,尽管Zn-

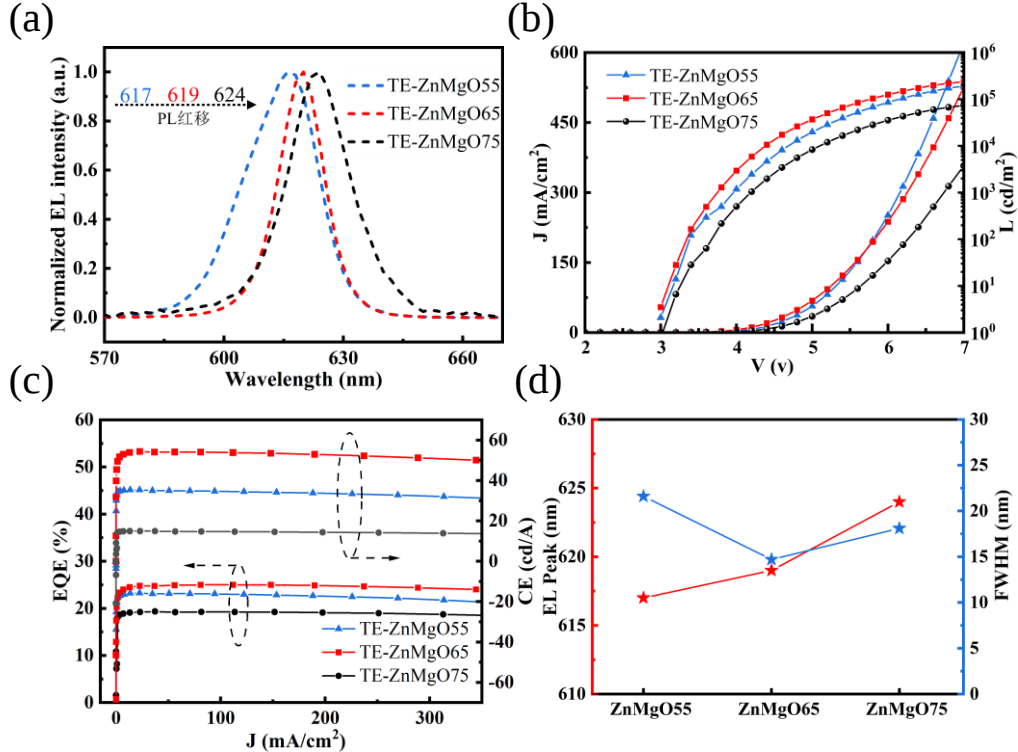


图7 不同腔长的器件性能表征。(a)EL光谱;(b)J-V-L曲线;(c)EQE-J和CE-J曲线;(d)EL峰位和半峰宽
Figure 7 Performance characterization of devices with different cavity lengths. (a) EL spectra; (b) J-V-L curves; (c) EQE-J and CE-J curves; (d) EL peak positions and full width at half maximum.

MgO 厚度增加使器件电流密度有所降低,但所有器件的启亮电压未出现较大波动,这归因于 Zn-MgO 材料较高的电子迁移率和适宜的能级结构,能够有效保障电子注入。图 7(c)是 EQE-J 和 CE-J 曲线,TE-ZnMgO55、TE-ZnMgO65 和 TE-ZnMgO75 的 $EQE_{\max}$ 分别为 19.3%、25.0% 和 23.1%, $CE_{\max}$ 分别为 14.9 cd/A、54.1 cd/A 和 35.3 cd/A。Zn-

MgO 厚度为 65 nm 时,FWHM 缩窄至最小 14.7 nm (图 7(d)),表明此时的谐振波长与 QDs 发光峰位匹配,产生了最强的微腔效应,器件效率最高。TE-ZnMgO55 和 TE-ZnMgO75 器件中,谐振波长分别发生蓝移或红移,使谐振波长偏离 QDs 的本征发光峰位,导致微腔效应抑制发光。不同腔长器件的性能参数汇总于表 3。

表 3 不同腔长的 TE-QLED 器件性能汇总

Table 3 Summary of TE-QLED Device Performance with Different Cavity Lengths

Device	V_{on} (V)	FWHM (nm)	$CE_{\max}$ (cd/A)	$EQE_{\max}$ (%)	$L_{\max}$ (cd/m ²)	EL Peak at 5V (nm)
TE-ZnMgO75	3.0	18.1	14.9	19.3	73997	624
TE-ZnMgO65	3.0	14.7	54.1	25.0	236499	619
TE-ZnMgO55	2.8	21.6	35.3	23.1	192990	617

3.3 微腔对激子复合的影响

为研究微腔对激子复合的影响,测试了 ITO/Ag/ITO/ZnMgO/QDs 薄膜和 TE-Al2Ag27 器件的荧光寿命,如图 8 所示。薄膜和器件的平均荧光寿命分别为 5.91 ns 和 4.75 ns,具有微腔结构的器

件荧光寿命更小,表明激子复合速率更快。使用 COMSOL 软件仿真模拟 TE-Al2Ag27 器件中的光场强度分布,QDs 发光层位于光场强度最强处,如图 9 所示。器件荧光寿命下降和光场模拟数据共同表明,QDs 能够与光场强耦合,加速辐射复合速率,抑制非辐射复合成分,提升器件效率,即 Purcell 效应对 TE 器件效率提升具有一定贡献。

4 结 论

综上所述,本文以 Al/Ag 复合阳极构筑了倒置 TE-QLED 器件,空穴注入能力得到增强,通过调节电极厚度和器件腔长能够调控微腔效应和 Purcell 效应,进一步优化器件性能。器件 $EQE_{\max}$ 达到 25.0%, $CE_{\max}$ 达到 54.1 cd/A,相较于纯 Ag 阳极的 TE 器件分别提升 22.5% 和 27.2%。本文给出的结果和方法为设计高效率倒置 TE-QLED 提供可行的指导。

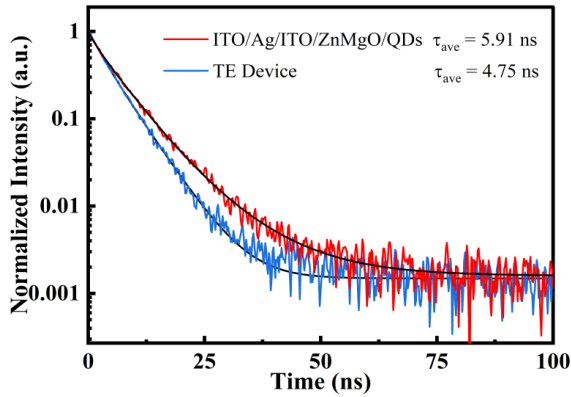


图 8 荧光寿命

Figure 8 Fluorescence lifetime of QDs in different states

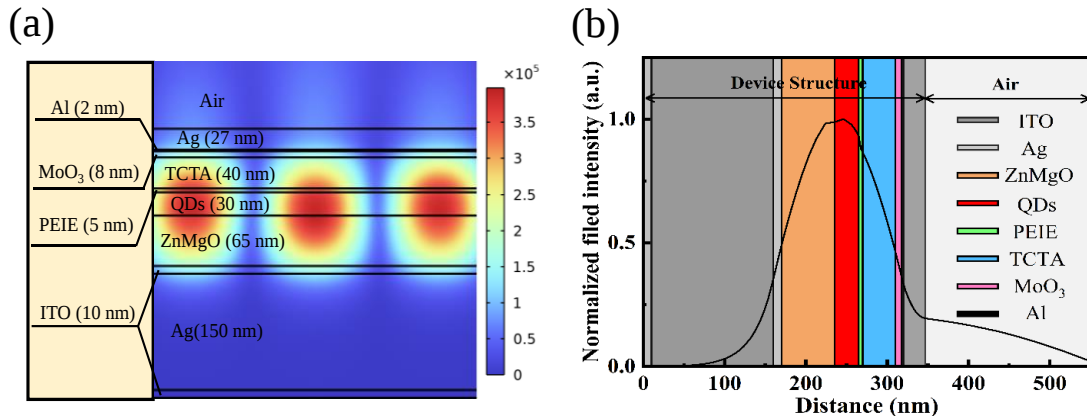


图 9 (a) 光场强度二维分布图; (b) 光场强度一维分布图

Figure 9 (a) Two-dimensional distribution map of light field intensity; (b) One-dimensional distribution map of light field intensity

参 考 文 献:

- [1] Liu Y, Jiang C, Song C, *et al.* Highly efficient all-solution processed inverted quantum dots based light emitting diodes [J]. *ACS nano*, 2018, 12(2): 1564-1570.
- [2] Pu C, Dai X, Shu Y, *et al.* Electrochemically-stable ligands bridge the photoluminescence-electroluminescence gap of quantum dots[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 937.
- [3] Kim T, Kim K H, Kim S, *et al.* Efficient and stable blue quantum dot light-emitting diode[J]. *Nature*, 2020, 586(7829): 385-389.
- [4] Su Q, Zhang H, Chen S. Identification of excess charge carriers in InP-based quantum-dot light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(5).
- [5] Song J, Wang O, Shen H, *et al.* Over 30% external quantum efficiency light-emitting diodes by engineering quantum dot-assisted energy level match for hole transport layer[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(33): 1808377.
- [6] Deng Y, Peng F, Lu Y, *et al.* Solution-processed green and blue quantum-dot light-emitting diodes with eliminated charge leakage[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(7): 505-511.
- [7] Wu Q, Cao F, Yu W, *et al.* Homogeneous ZnSeTeS quantum dots for efficient and stable pure-blue LEDs[J]. *Nature*, 2025: 1-6.
- [8] Shi L, Chen S. Over 32.5% efficient top-emitting quantum-dot LEDs with angular-independent emission[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(26): 30039-30045.
- [9] Yu H, Zhu H, Xu M, *et al.* High-efficiency, large-area, flexible top-emitting quantum-dot light-emitting diode[J]. *Acs Photonics*, 2022, 10(7): 2192-2200.
- [10] Guohong L, Xiang Z, Shuming C. Very Bright and Efficient Microcavity Top-Emitting Quantum Dot Light-Emitting Diodes with Ag Electrodes[J]. 2016.
- [11] Jeon Y, Sim S, Shin D, *et al.* All-Solution-Processed Top-Emitting InP Quantum Dot Light-Emitting Diode with Polyethyleneimine Interfacial Layer[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2024, 10(11): 2400195.
- [12] Lee T, Hahn D, Kim K, *et al.* Highly efficient and bright inverted top-emitting InP quantum dot light-emitting diodes introducing a hole-suppressing interlayer[J]. *Small*, 2019, 15(50): 1905162.
- [13] Lee T, Kim B J, Lee H, *et al.* Bright and stable quantum dot light-emitting diodes[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(4): 2106276.
- [14] Yuan C, Chen Z, Tian F, *et al.* Very stable and efficient tandem quantum-dot light-emitting diodes enabled by IZO-based interconnecting layers[J]. *Nano Letters*, 2024, 24(24): 7541-7547.
- [15] Yang X, Mutlugun E, Dang C, *et al.* Highly flexible, electrically driven, top-emitting, quantum dot light-emitting stickers[J]. *ACS nano*, 2014, 8(8): 8224-8231.
- [16] Li H, Wang J, Chen S. Face-to-face integrated tandem quantum-dot LEDs with high performance and multifunctionality [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 171.
- [17] Li M, Li R, Wu L, *et al.* Ultrabright and stable top-emitting quantum-dot light-emitting diodes with negligible angular color shift[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 5161.
- [18] Li H, Zhou S, Chen S. Highly efficient top-emitting quantum-dot light-emitting diodes with record-breaking external quantum efficiency of over 44.5%[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(8): 2300371.
- [19] Fortunato E, Barquinha P, Martins R. Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances[J]. *Advanced materials*, 2012, 24(22): 2945-2986.
- [20] Xu W, Hu Z, Liu H, *et al.* Flexible all-organic, all-solution processed thin film transistor array with ultrashort channel [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 29055.
- [21] Yu P, Yuan Q, Zhao J, *et al.* Electronic and excitonic processes in quantum dot light-emitting diodes[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2022, 13(13): 2878-2884.
- [22] Park Y S, Bae W K, Pietryga J M, *et al.* Auger recombination of biexcitons and negative and positive trions in individual quantum dots[J]. *ACS nano*, 2014, 8(7): 7288-7296.
- [23] Chung D S, Davidson-Hall T, Cotella G, *et al.* Significant lifetime enhancement in QLEDs by reducing interfacial charge accumulation via fluorine incorporation in the ZnO electron transport layer[J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 212.

- [24] Moon H, Lee C, Lee W, *et al.* Stability of quantum dots, quantum dot films, and quantum dot light-emitting diodes for display applications[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(34): 1804294.
- [25] Chang J H, Park P, Jung H, *et al.* Unraveling the origin of operational instability of quantum dot based light-emitting diodes[J]. *ACS nano*, 2018, 12(10): 10231-10239.
- [26] Zhang C, Ji C, Park Y B, *et al.* Thin-metal-film-based transparent conductors: Material preparation, optical design, and device applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(3): 2001298.
- [27] Kim D, Fu Y, Kim S, *et al.* Polyethylenimine ethoxylated-mediated all-solution-processed high-performance flexible inverted quantum dot-light-emitting device[J]. *ACS nano*, 2017, 11(2): 1982-1990.



彭俊彪(1962-),男,山东宁津人,博士,教授,博士生导师,1993年于中国科学院长春物理研究所获得博士学位,主要从事有机发光材料、器件以及驱动相关的研究。
E-mail: psjbpeng@scut.edu.cn



王宇龙(2001-),男,河南禹州人,硕士研究生,2023年于河南科技大学获得学士学位,主要从事量子点发光二极管的研究。
E-mail: yulong202205@163.com



申怀彬(1981-),男,河南开封人,博士,教授,博士生导师,2011年于吉林大学获得博士学位,主要从事荧光量子点材料的合成、组装、规模化制备以及基于荧光量子点的发光器件和发光薄膜应用方面的研究。
E-mail: shenhuaibin@henu.edu.cn