发光学报
CHINESE JOURNAL OF LUMINESCENCE
中文核心期刊
主管：中国科学院
主办：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
中国物理学会发光分会
主编：申德振

不同微腔结构有机电致发光器件的电致发光光谱模拟

张春玉，徐海楠，宋悦

引用本文:
张春玉, 徐海楠, 宋悦. 不同微腔结构有机电致发光器件的电致发光光谱模拟[J]. 发光学报, 2020, 41(8): 984–990.
ZHANG Chun-yu, XU Hai-nan, SONG Yue. Spectral Simulation of Electroluminescence Performance of Organic Electroluminescent Devices with Different Microcavity Structures[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(8): 984–990.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/fgxb20204108.0984

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微腔有机电致发光器件角度依赖性的模拟与实验验证

Simulation and Experimental Verification for The Angle Dependence of The Microcavity Organic Light Emitting Device

发光学报. 2015, 36(4): 454–458 https://doi.org/10.3788/fgxb20153604.0454

红色磷光微腔有机电致发光器件的发光性能

Luminescence Properties of Red Phosphorescent Microcavity Organic Light-emitting Devices

发光学报. 2014(12): 1464–1468 https://doi.org/10.3788/fgxb20143512.1464

利用微腔调节铕配合物实现多色电致发光

The Multicolor Electroluminescence Based on Europium-complex Microcavity

发光学报. 2013, 34(4): 484–487 https://doi.org/10.3788/fgxb20133404.0484

不同发光染料的顶发射有机电致发光器件的研制

Top-emitting Organic Light-emitting Devices with Different Luminescent Dyes

发光学报. 2016, 37(4): 446–451 https://doi.org/10.3788/fgxb20163704.0446

基于Ag/Ge/Ag阳极的蓝光顶发射有机电致发光器件

Blue Top-emitting Organic Light-emitting Devices Based on Ag/Ge/Ag Anode

发光学报. 2015, 36(11): 1294–1299 https://doi.org/10.3788/fgxb20153611.1294

文章编号：1000-7032(2020)08-0984-07

不同微腔结构有机电致发光器件的电致发光光谱模拟

张春玉[1*]，徐海楠[1]，宋　悦[2]
(1. 吉林建筑大学 材料科学与工程学院，吉林 长春　130118；
2. 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)

摘要： 采用传输矩阵法对有机电致发光器件(OLED)、微腔有机电致发光器件(MOLED)和耦合微腔有机电致发光器件(CMC)的电致发光光谱(EL)进行了模拟计算。OLED、MOLED 和 CMC 的结构分别为 glass/ITO(134 nm)/NPB(74 nm)/Alq_3(62 nm)/Al、glass/DBR/ITO(134 nm)/NPB(74 nm)/Alq_3(62 nm)/Al 和 glass/DBR_1/filler/DBR_2/ITO(134 nm)/NPB(74 nm)/Alq_3(62 nm)/Al。通过模拟计算发现：OLED 光谱呈宽带发射，主峰峰值位于 561 nm，肩峰峰值位于 495 nm；MOLED 光谱呈单峰窄带发射，峰值位于 534 nm；CMC 光谱呈双峰窄带发射，峰值分别位于 520 nm 和 556 nm。MOLED 光谱的色纯度最高；OLED 与 MOLED 的光谱积分面积基本相同；CMC 的光谱积分面积是 OLED 或 MOLED 的 1.1 倍，发光效率最高。结果表明，采用双耦合微腔结构可有效提高 OLED 的发光效率，改善发光的色纯度。

关　键　词： 有机电致发光器件；微腔；耦合微腔；光谱模拟
中图分类号： TN383$^+$.1　　**文献标识码：** A　　**DOI：** 10.37188/fgxb20204108.0984

Spectral Simulation of Electroluminescence Performance of Organic Electroluminescent Devices with Different Microcavity Structures

ZHANG Chun-yu[1*], XU Hai-nan[1], SONG Yue[2]
(1. *School of Materials Science and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun* 130118, *China*;
2. *State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding Author, E-mail: zhangccy68@163.com*

Abstract: In this paper, we discuss the influence of different microcavity structures of the organic light-emitting devices (OLEDs) in order to improve the luminescence performance. We use the transfer matrix method to simulate and calculate the electroluminescence spectrum (EL) of the OLED, the microcavity organic light-emitting devices (MOLED) and the coupling microcavity organic light-emitting devices (CMC). And then we compare their EL characteristics. The structures of OLED, MOLED and CMC are glass/ITO(134 nm)/NPB(74 nm)/Alq_3(62 nm)/Al, glass/DBR/ITO(134 nm)/NPB(74 nm)/Alq_3(62 nm)/Al, and glass/DBR_1/filler/DBR_2/ITO(134 nm)/NPB(74 nm)/Alq_3(62 nm)/Al, respectively. The simulation results show that, the EL spectrum shape of the OLED has a broad spectrum band with the main peak at 561 nm and the shoulder peak at 495 nm, the MOLED has a narrow EL spectrum with single peak at 534 nm, the CMC has a twin narrow EL spectrum with the peaks at 520 nm and 556 nm respectively. The MOLED has the purest color. The integrated area of the OLED and the MOLED are basically the same. The CMC has the largest

收稿日期： 2020-04-22；**修订日期：** 2020-06-22
基金项目： 国家自然科学基金(61674148,61904179)；吉林省大学生创新创业训练计划(201810191110)资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China(61674148,61904179); Innovation and Entrepreneurship Project for College Students in Jilin Province(201810191110)

integrated area, which is 1.1 times of the former two devices. The simulation results show that CMC structure can be used to improve the luminescence efficiency and the color purity of the OLED.

Key words: organic light emitting device; microcavity; coupled optical microcavity; spectrum simulation

1　引　　言

有机电致发光器件(OLED)也称为有机发光二极管,是在有机半导体薄膜的电致发光特性基础上发展起来的新型固态平板显示及照明器件。虽然 OLED 有轻薄、驱动电压低、响应速度快等很多优点,但也存在着一些问题,比如大部分的有机发光材料由于较宽的发光谱带而难以获得好的色纯度,器件的发光效率也有待进一步提高等,这些问题可以通过设计新器件结构或者采用新材料等方法来解决[1-4]。

光学微腔是指尺寸至少有一维与光波长相同量级的光学微型谐振腔。它是一种可以改变器件发光特性的光学结构,原理是腔内激子激发后辐射的可见光受到腔体的调制,腔体环境对光子有限域作用,光学微腔可以将光子长时间局域在很小的空间内,极大地增强光和物质的相互作用[5-7],可以用来调制和改善 OLED 的发光性能。

由于不同介质分界面上产生的电磁波可以向腔外扩散很远,因此一个光学微腔的腔体是不能把所有的光子都局限在里面的[8]。多个微腔相互接近,这种电磁波就会相互作用使每个腔中的光子分布互相影响,致使光能分布受到调制而获得新的现象,这就是耦合光学微腔(Coupled optical microcavity,CMC)。按微腔耦合方式不同,可分为平面耦合腔和垂直耦合腔,本文研究平面耦合微腔。平面耦合微腔中有两个或多个独立的微腔互相耦合,若两个微腔耦合通常一个是无源腔,一个是有源腔。耦合微腔的发光层发出的光在两个腔的光场耦合下引起了腔模式分裂,显示为两个波峰的窄化光谱,能有效地调制材料的发光性能[9]。有研究表明耦合微腔与单个微腔相比有不同的发射特性,可以用作开发新型器件[10-11],用在高选择波长滤波器、双稳态器件、多范围光电转换等方面。

2013 年,研究人员研究了两个耦合的波导型光子晶体微腔[12],证实了两个光子晶体波导微腔的强耦合,为研究受限在特定空间中的原子与光场作用和互相耦合埋下伏笔。2015 年,有学者[13]研究出自发光对称破缺现象的光子晶体微腔,这也是耦合微腔的一大技术突破。2017 年,北大肖云峰等[8]提出混沌辅助的光子动量快速转换的新原理,实现了超高品质因子光学微腔和纳米尺度波导之间高效、超宽谱的光耦合,突破了微纳光学器件近场耦合需要相位匹配的限制,提出混沌辅助的动量转换机制,深入研究动量转换过程,并在实验上验证其在微腔宽带光子学应用中的巨大优势。

最近十年,研究人员对平面微腔结构器件进行了进一步研究[14-15]。研究表明,合理地设计微腔的结构类型可以控制发光模式和器件的发光特性,而微腔器件的模拟计算是这类研究不可或缺的关键环节。本文作者及研究团队在微腔模拟设计研究方面做了大量工作,有很好的研究基础和经验。本文工作是根据平面微腔谐振原理,运用传输矩阵方法建立微腔结构模型,并对计算公式进行合理修正。首先模拟计算出最佳的腔内有机层厚度组合的 MOLED 器件,进而模拟计算不同结构微腔器件的反射谱和电致发光光谱(EL),并对 EL 进行比较分析。

2　平面微腔原理及相关模拟计算公式

平面光学微腔是由间距在光波长量级的两个平行平面反射镜构成的 Fabry-Perot(F-P)谐振腔。

图 1 是内含辐射源的 F-P 腔结构示意图。E_0 表示自由空间电场强度,E_2 表示耦合输出波的电场强度,M_1 是反射率为 R_1 的背部反射镜,一般来讲,是金属反射镜。$\sqrt{R_1}\,e^{j\varphi 1}$ 是 M_1 的综合反射系数;M_2 是反射率、透射率和吸收率分别为 R_2、T_2、A_2 的出射镜,它是半反射镜,可以由薄的金属膜制成或者由分布式布拉格反射镜(DBR)制成,$\sqrt{R_2}\,e^{j\varphi 2}$ 是 M_2 的综合反射系数。L_1 是源(即激子)到镜 M_1 的距离;L_2 是源到 M_2 的距离。L 是整个腔内的光学长度,$L = L_1 + L_2$。发射光谱随波长 λ 分布的与自由空间发射相比的发射增强系数 $|G_{cav}(\lambda)|$(在器件法线方向上)由下式得到[16]:

$$G_{\mathrm{cav}}(\lambda)=\frac{|E_2|^2}{|E_0|^2}\times\frac{\tau_{\mathrm{cav}}}{\tau_0}=\left[1-\frac{4\sqrt{R_1}\sin^2\left(\frac{\varphi_1-2\boldsymbol{k}L_1}{2}\right)}{(1+\sqrt{R_1})^2}\right]\times$$

$$\left[\frac{T_2(1+\sqrt{R_1})^2}{(1-\sqrt{R_1R_2})^2+4\sqrt{R_1R_2}\sin^2\left(\frac{\varphi_1+\varphi_2-2\boldsymbol{k}L}{2}\right)}\right]\frac{\tau_{\mathrm{cav}}}{\tau_0},\tag{1}$$

其中,φ_2 和 φ_1 分别为两反射镜的反射相移;$\boldsymbol{k}$ 是有机层的波矢量,与波长的关系为 $\boldsymbol{k}=\frac{2\pi}{\lambda}$;$\tau_{\mathrm{cav}}$ 和 τ_0 分别是腔中和自由空间中的分子激发态寿命。为简化分析,我们假定$\frac{\tau_{\mathrm{cav}}}{\tau_0}=1$。

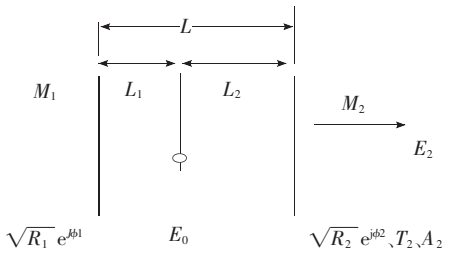

图1 Fabry-Perot 腔结构示意图

Fig. 1 Fabry-Perot cavity structure

理论上垂直表面的有机微腔器件的发射光谱可以通过下面的方程计算近似而得:

$$I_{\mathrm{cav}}(\lambda)=G_{\mathrm{cav}}(\lambda)\times I_n(\lambda),\tag{2}$$

其中 $I_n(\lambda)$ 为发光材料在自由空间的发射光谱分布。在下面的模拟计算中我们所用的是要设计的器件中发光材料实际测得的光致发光谱(PL)。PL 与发射增强系数 $|G_{\mathrm{cav}}(\lambda)|$ 相乘即得到微腔器件的有机电致发光谱(EL),得到 EL 发光峰位置、峰值强度及光谱的半峰全宽等参数。

微腔器件从腔的一个侧面(半反射镜)发出光子的总数可以通过对其发射光谱的所有波长进行积分 $\int I_{\mathrm{cav}}(\lambda)\mathrm{d}\lambda$ 得到。

微腔内激子发光在谐振模式(波长)处因相长干涉而得到加强。谐振模式满足的条件是:光在腔内往返一周的相位改变是 2π 的整数倍或光程是波长的整数倍,即微腔的谐振模式满足 F-P 方程:

$$(\varphi_1+\varphi_2)-\frac{4\pi}{\lambda}\sum_i n_i d_i\cos\left[\arcsin\left(\frac{\sin\theta}{n_i}\right)\right]=2m\pi,\tag{3}$$

其中,λ 是谐振波长;n_i 和 d_i 为腔内各层薄膜的折射率和厚度,总和为 L,是整个腔内的光学长度;θ 是外部探测角;m 是模式级数,取整数。

3 模拟计算过程、结果与讨论

基于前文中平面微腔原理及相关计算公式(1)~(3),采用传输矩阵法进行微腔有机电致发光器件的数值模拟计算。设计 MOLED,金属铝电极和 DBR 作为 F-P 腔的两个反射镜,它们之间形成微型谐振腔,光从玻璃基板即 DBR 一侧发出。发光层为 Alq_3,空穴传输层 NPB,铟锡氧化物 ITO 做阳极,DBR 由光学厚度为 $\lambda/4$ 的高低折射率材料五氧化二钽(Ta_2O_5)和二氧化硅(SiO_2)组成,周期为 2.5。其中 Ta_2O_5 的折射率为 2.1,SiO_2 的折射率为 1.46。

图2 是发光材料 Alq_3 实际测得的 PL,用作相应模拟计算参数。如图 2 所示,PL 的峰值位于 555 nm 处,半峰全宽为 96 nm。

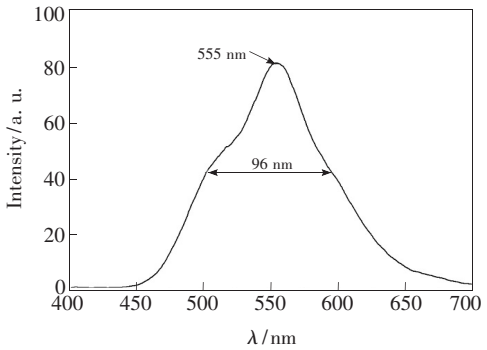

图2 Alq_3 实际测得的光致发光光谱(PL)

Fig. 2 Measured Alq_3 photoluminescence spectrum(PL)

首先我们设计中心波长 $\lambda=540$ nm,MOLED 器件结构为:Glass/DBR/ITO(134 nm)/NPB(Y nm)/Alq_3(X nm)/Al。设定总的微腔长度 L 不变,调整 Alq_3 的厚度(厚度分别为 42,52,62,72,82 nm),NPB 的厚度随之做相应变化,也就是始终保持总腔长 L 不变,只变动激子位置 L_1,找出具有最佳发光效率的 L_1 时 Alq_3 的厚度值组合。

图3 是用前面的计算公式模拟计算出的 MOLED(Alq_3 厚度分别为 42,52,62,72,82 nm)的 EL,由图可知,5 个器件的峰值均为 534 nm,半

峰全宽均为 10 nm，这是因为微腔总的光学长度 L 不变。但是积分面积和峰值强度不同，Alq_3 厚度为 62 nm 时最大，发光效率最佳，下面我们探究其原因。

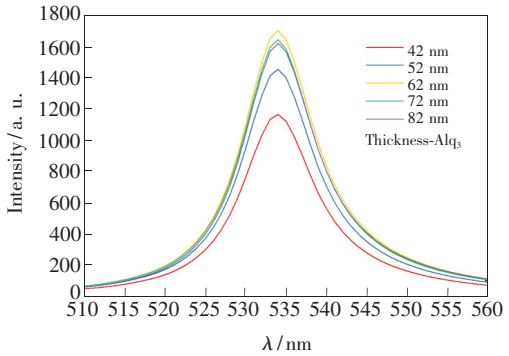

图 3　模拟 MOLED（Alq_3 厚度分别为 42～82 nm）的 EL

Fig. 3　Simulated EL of MOLED（Alq_3 thickness 42 – 82 nm）

图 4 是模拟计算的 $\lambda = 534$ nm、Alq_3 的厚度依次分别为 62，72，52，82，42 nm 时 MOLED 器件的微腔内电场强度分布图。由图 4 可知，腔中位置不同，电场强度不同，发光激子位于图中 2 层和 3 层的界面处，即图中红色箭头处，此处对应的电场强度分别为 14.8，14.1，14，12.2，12。

Alq_3 的厚度为 62 nm 时，1 层与 2 层界面对应的腔内电场强度值最大为 14.8，该结果对应图 3 中 MOLED 的效率最佳 EL。这是因为发光激子正好位于腔内电场强度的最大值波腹位置处，发光得到最大谐振增强，是性能最佳的腔内有机发光层厚度组合。

然后我们再根据以上的模拟计算结果，用 Alq_3 的厚度为 62 nm 这个有机层厚度组合进行下一步的模拟计算。

把 ITO 看作是 OLED 的半反射镜，存在弱微腔效应，根据以上计算公式分别对 OLED、MOLED 和 CMC 进行模拟计算，比较器件在不同微腔结构下各自的发光性能。设计 3 种器件的中心波长（谐振波长）$\lambda = 540$ nm，不同微腔器件的结构具体如下：

OLED：Glass/ITO（134 nm）/NPB（74 nm）/Alq_3（62 nm）/Al；

MOLED：Glass/DBR/ITO（134 nm）/NPB（74 nm）/Alq_3（62 nm）/Al；

CMC：Glass/DBR_1/Filler/DBR_2/ITO（134 nm）/NPB（74 nm）/Alq_3（62 nm）/Al。

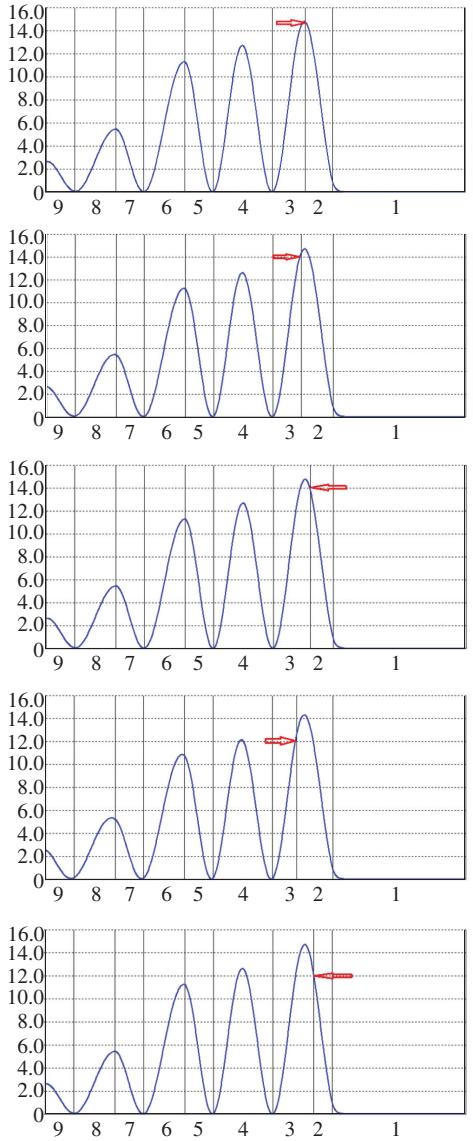

图 4　电场强度分布图（Alq_3 的厚度顺次分别为 62，72，52，82，42 nm）

Fig. 4　Distribution of electric field intensity（the thickness order of Alq_3 is 62，72，52，82，42 nm）

DBR_1、DBR_2 与 MOLED 中的 DBR 相同。填充层 Filler 由 SiO_2 组成，光学厚度 $\lambda/2$。CMC 的 DBR_1 与 DBR_2 耦合在一起，这样器件将存在两个腔体。DBR_1/Filler/DBR_2 组成底部腔，底部腔为无源腔；DBR_2/ITO/NPB/Alq_3/Al 组成顶部腔，顶部腔为有源腔。

ITO 是 OLED 的半反射镜，MOLED 的半反射镜是 DBR，CMC 的半反射镜是 DBR_1/Filler/DBR_2。3 种器件的半反射镜是变量，也就是除了半反射镜不同之外其他结构完全相同。

图 5 是模拟计算的 OLED、MOLED、CMC 3 种

器件半反射镜的反射光谱。由图可知,OLED 的 ITO 半反射镜,在 450 ~ 600 nm 波长范围内反射谱平直,反射率大约为 10% ~ 5%。MOLED 器件的 DBR 反射谱有一个从 525 ~ 565 nm 的截止带宽,是高反射区域,在 $\lambda = 540$ nm 处有最大反射率 74%。CMC 结构中的底部腔镜的反射光谱在 540 nm 有最小反射率 3%,其两侧各有一个分别位于 475 ~ 515 nm 和 585 ~ 615 nm 的反射最大区域,反射率为 90% 左右。半反射镜是唯一变量,最终模拟计算得到的 3 种器件的 EL 必然和其反射率有着重要的对应关系。

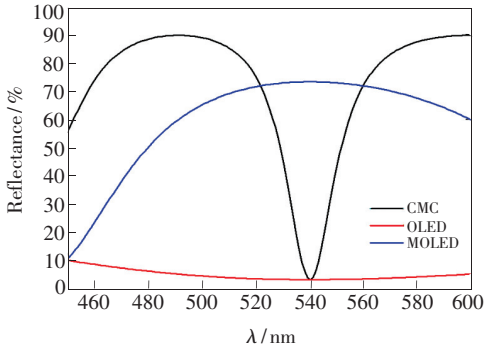

图 5 模拟 OLED、MOLED、CMC 半反射镜的反射光谱。

Fig. 5 Simulated reflectance of semi mirror of OLED, MOLED and CMC.

图 6 为模拟的玻璃衬底一侧 OLED、MOLED、CMC 器件的反射光谱,由图 6 可以看出,OLED 的反射谱是比较平直的曲线,在 500 ~ 580 nm 绿光区域的反射率为 90% 左右。MOLED 在波长 534 nm 处反射最小,最大透射率 60%。CMC 在 540 nm 的两侧分别有 2 个透射峰,位于 516 nm 和 558 nm(反射率最小)。

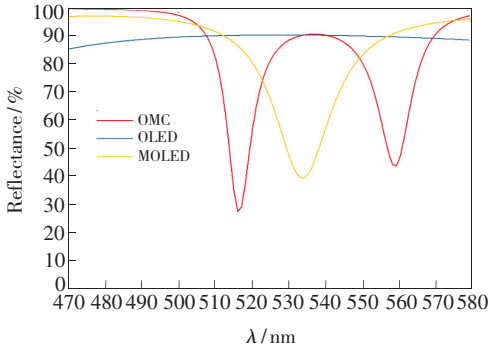

图 6 模拟 OLED、MOLED、CMC 器件的反射光谱。

Fig. 6 Simulated reflectance of OLED, MOLED and CMC.

图 7 是通过模拟计算得到的 OLED 的 EL 光谱,由图 7 可以看出,发光主峰值波长为 561 nm,还有一个肩峰,位于 495 nm,整体看是跨越 450 ~ 650 nm(蓝、绿、红光区域)的宽谱带。

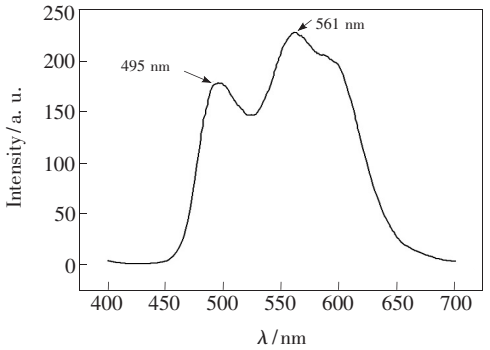

图 7 模拟的 OLED 的 EL 光谱

Fig. 7 Simulated EL spectrum of OLED

图 8 是模拟计算得到的 OLED、MOLED、CMC 3 种器件的 EL 光谱比较。由图 8 可以直观地看出,加入微腔和耦合微腔后光谱出现明显的变化。MOLED 的模拟光谱呈现出具有典型微腔效应的峰值增强光谱窄化形状,峰值位于 534 nm,对应谐振中心波长 540 nm,且发光都集中于绿光区域(520 ~ 550 nm)。CMC 的 EL 出现两个窄化且强度提高的发光峰,峰值分别位于绿光区域的 520 nm 和 556 nm。模拟得到的 MOLED 和 CMC 光谱峰值位置都与其模拟的半反射镜的反射率(图 5 所示)最大区域相对应,即微腔谐振模式增强处。

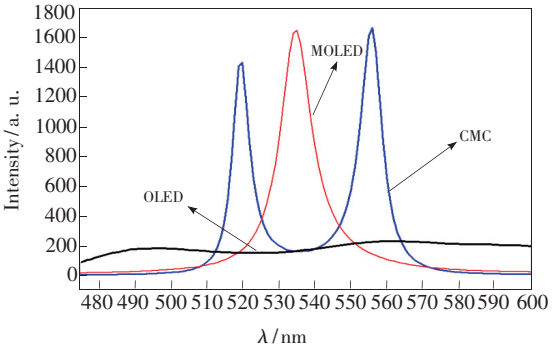

图 8 模拟的 OLED、MOLED、CMC 的 EL 曲线比较。

Fig. 8 Comparison of EL curves of simulated OLED, MOLED and CMC.

对 3 种器件计算得到的 EL 进行具体分析,主要参数如表 1 所示。

MOLED 的 EL 光谱的峰值位于 534 nm,对应设计的微腔谐振波长是 540 nm,同时对应图 6 中 MOLED 的透射峰 534 nm,半峰全宽为 10 nm。微腔内光场的模式密度受到电场的调制,波长在谐

表 1　OLED、MOLED、CMC 模拟 EL 光谱参数比较

Tab. 1　Comparison of simulated EL spectral parameters of OLED, MOLED and CMC

器件	峰值位置/nm	半峰全宽/nm	光谱积分
OLED	495　561		29 065.65
MOLED	534	10	29 031.55
CMC	520　556		31 293.82

振波长处得到增强，而在其他处受到抑制，导致了微腔的电致发光谱线窄化和峰值增强。CMC 的 EL 谱在 540 nm 两侧出现了两个增强的窄带发射峰，波长分别位于 520 nm 和 556 nm，这与图 6 中 CMC 的反射谱的 516 nm 和 558 nm 两个透射峰对应，说明发光在这个波长范围内受到耦合腔的耦合作用。CMC 的积分面积最大，是 OLED 或 MOLED 的 1.1 倍，说明其发光效率最高。

为了比较器件的色纯度，分别计算出已模拟的 EL 光谱的 CIE 色坐标，具体计算结果为 OLED：(0.395，0.503)，MOLED：(0.236，0.715)，CMC：(0.260，0.694)。图 9 为 OLED、MOLED、CMC 的 CIE 色坐标图，由图 9 可以看出 MOLED 的色纯度最佳，最靠近纯绿光区域处，CMC 次之，OLED 的色纯度最差。

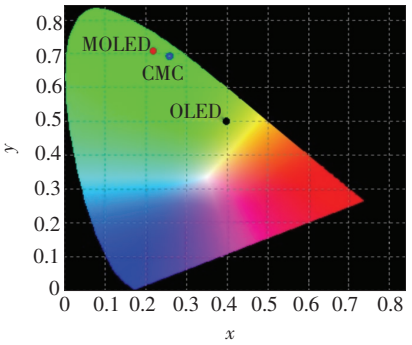

图 9　OLED、MOLED、CMC 的 CIE 色坐标。

Fig. 9　CIE color coordinate of simulated OLED, MOLED and CMC.

4　结　　论

模拟计算得出了 MOLED 激子在腔中的最佳位置，优化了 MOLED 腔内各有机层厚度组成。模拟计算了 OLED、MOLED 和 CMC 3 种微腔结构器件的半反射镜的反射光谱、器件的反射光谱和 EL 光谱。OLED 的 EL 光谱呈宽带发射，MOLED 的 EL 光谱呈窄带发射，CMC 光谱呈双峰窄带发射。CMC 的 EL 光谱产生双峰窄带发射的原因在于光在光场中耦合引起了腔模式的分裂。计算了模拟 EL 的各自色坐标。研究结果表明，微腔的引入能够有效地提高 OLED 器件的色纯度和发光效率。

参　考　文　献：

[1] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(12): 913-915.

[2] BALDO M A, THOMPSON M E, FORREST S R. High-efficiency fluorescent organic light-emitting devices using a phosphorescent sensitizer [J]. *Nature*, 2000, 403(6771): 750-753.

[3] 彭雪康，林雯嫣，喻叶，等. 高效叠层有机电致发光器件的研制 [J]. 发光学报, 2019, 40(10): 1281-1287.
PENG X K, LIN W Y, YU Y, *et al.*. Fabrication of highly efficient tandem organic light-emitting device [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(10): 1281-1287. (in Chinese)

[4] 祖洁，陈平，盛任，等. 高效率的蓝色磷光有机电致发光器件 [J]. 发光学报, 2017, 38(4): 487-491.
ZU J, CHEN P, SHENG R, *et al.*. Highly efficient blue organic light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(4): 487-491. (in Chinese)

[5] MAZZEO M, MARIANO F, GENCO A, *et al.*. High efficiency ITO-free flexible white organic light-emitting diodes based on multi-cavity technology [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(11): 2840-2846.

[6] 关云霞，陈丽佳，陈平，等. 空穴注入层对微腔有机发光二极管光电性能的影响 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3): 648-652.
GUAN Y X, CHEN L J, CHEN P, *et al.*. Influence of MnO_3 on photoelectric performance in organic light emitting diodes [J]. *Spectrosc. Spectral Anal.*, 2016, 36(3): 648-652. (in Chinese)

[7] 张春玉，王庆凯，荣华，等. 绿色磷光微腔有机电致发光器件研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0623002-1-6.
ZHANG C Y, WANG Q K, RONG H, *et al.*. Study of green phosphorescent microcavity organic light-emitting devices [J].

Acta Opt. Sinica, 2015,35(6):0623002-1-6. (in Chinese)

[8] JIANG X F,SHAO L B,ZHANG S X,*et al.*. Chaos-assisted broadband momentum transformation in optical microresonators [J]. *Science*, 2017,358(6361):344-347.

[9] 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):349-352.
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):349-352. (in Chinese)

[10] BAYINDIR M,TANRISEVEN S,AYDINLI A,*et al.*. Strong enhancement of spontaneous emission in amorphous-silicon-nitride photonic crystal based coupled-microcavity structures [J]. *Appl. Phys.* A, 2001,73(1):125-127.

[11] STANLEY R P,HOUDRÉ R,OESTERLE U,*et al.*. Coupled semiconductor microcavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 65(16):2093-2095.

[12] BROSSARD F S F,REID B P L,CHAN C C S,*et al.*. Confocal microphotoluminescence mapping of coupled and detuned states in photonic molecules [J]. *Opt. Express*, 2013,21(14):16934-16945.

[13] HAMEL P,HADDADI S,RAINERI F,*et al.*. Spontaneous mirror-symmetry breaking in coupled photonic-crystal nanolasers [J]. *Nat. Photonics*, 2015,9(5):311-315.

[14] BORISKINA S V. Photonic molecules and spectral engineering [M]. CHREMMOS I,SCHWELB O,UZUNOGLU N. *Photonic Microresonator Research and Applications*. Boston,MA:Springer, 2010:393-421.

[15] 张春玉,王庆凯,秦莉,等. 微腔有机电致发光器件角度依赖性的模拟与实验验证 [J]. 发光学报, 2015,36(4):454-458.
ZHANG C Y,WANG Q K,QIN L,*et al.*. Simulation and experimental verification for the angle dependence of the microcavity organic light emitting device [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015,36(4):454-458. (in Chinese)

[16] DODABALAPUR A,ROTHBERG L J,JORDAN R H,*et al.*. Physics and applications of organic microcavity light emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996,80(12):6954-6964.

张春玉(1968 -),女,吉林长春人,博士,教授,2007 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事有机光电子器件及微腔物理方面的研究。
E-mail: zhangccy68@163.com