

功能层厚度对叠层有机电致发光器件出光性能影响的数值研究*

路飞平^{1)†} 李建丰²⁾ 孙硕³⁾

1) (天水师范学院物理信息与科学学院, 天水 741000)

2) (兰州交通大学, 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 兰州 730070)

3) (中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(2013年7月20日收到; 2013年9月12日收到修改稿)

功能层厚度是影响有机电致发光器件出光效率的主要因素之一, 故获得不同功能层厚度对器件出光特性的影响规律是制备高性能器件的重要基础. 本文基于薄膜光学原理、电偶极子辐射理论及 Fabry-Pérot 微腔原理, 建立了结构为 glass/ITO/N, N0-bis(naphthalen-1-yl)-N, N0-bis(phenyl)-benzidine(NPB)/tris(8-hydroxyquinoline) aluminum(Alq₃)/molybdenum trioxide(MoO₃)/NPB/Alq₃/Al 的叠层有机电致发光器件的光学模型, 系统地研究了各个功能层厚度对叠层有机电致发光器件出光强度的影响, 得到了功能层厚度对器件出光强度影响的规律. 该模型的建立与所获得的结果可对深入了解叠层有机电致发光器件的工作机理以及制备高性能的器件提供一定的帮助.

关键词: 叠层有机发光器件, 出光特性, 厚度, 数值研究

PACS: 72.80.Le, 78.60.Fi, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.62.247201

1 引言

有机电致发光器件 (organic light emitting diodes, OLEDs) 因其在固态照明和平板显示技术应用中有独特的优势, 一直是有机电子学研究领域的研究热点^[1-7]. 由于有机电致发光器件的发光亮度和器件的电流密度大小成正比, 为了获得高的发光亮度, 需增加器件的电流密度, 而器件的工作寿命又与器件的电流密度大小成反比, 这使得器件的高亮度和长寿命之间存在矛盾. 如何使 OLEDs 具有高亮度和长寿命, 关系到 OLEDs 能否产业化, 而叠层有机电致发光器件就是解决这个矛盾的主要方法之一. 所谓叠层有机电致发光器件 (叠层 OLEDs), 是采用具有电荷产生能力的连接层将两个或者两个以上的发光单元串联起来组成的一种有机发光器件结构^[8-15]. 相对于传统 OLEDs,

叠层 OLEDs 在同一电流密度下, 其发光效率、发光亮度及寿命都得到极大的提高, 为 OLEDs 进一步市场化提供了保证, 是目前有机光电子学研究的一个热点. 在之前的工作中, 我们仅用 10 nm 厚的三氧化钼 (MoO₃) 作为连接层, 制备了叠层 OLEDs, 与标准器件相比, 实现了器件的电流效率和发光亮度的倍增, 并且功率效率也有一定的提高^[16]. 国内外研究人员在叠层 OLEDs 实验方面做了大量的研究工作, 并取得了可喜的成果, 但是关于叠层 OLEDs 出光特性的理论研究较少, 尤其是功能层厚度对叠层有机电致发光器件的出光特性的研究尚未见报道. 本文基于薄膜光学原理、电偶极子辐射理论及 Fabry-Pérot (F-B) 微腔原理, 建立了结构为 glass/ITO/N, N0-bis(naphthalen-1-yl)-N, N0-bis(phenyl)-benzidine(NPB)/tris(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃)/ molybdenum trioxide (MoO₃)/ NPB/Alq₃/ LiF/Al 的叠层有机电致发光器件的

* 国家自然科学基金 (批准号: 61264002, 61166003)、兰州交通大学青年科学基金 (批准号: 2011025) 和金川公司 - 兰州交通大学预研基金 (批准号: JCY2013001) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lufp_sysu@163.com

光学模型, 系统研究了各个功能层厚度对叠层有机电致发光器件出光强度的影响, 得到了不同的功能层厚度对叠层有机电致发光器件出光特性影响的规律. 所获得的结果对深入了解叠层有机电致发光器件的工作机理及制备高效叠层有机电致发光器件可提供一定的帮助.

2 数值模型

一个典型的 OLEDs 为在两个电极之间插入具有不同功能的有机与无机薄膜组成的三明治结构, 其中出光面为透明或半透明的电极 (如 ITO), 另一面为不透明的反射电极 (如 Al), 故 OLEDs 可看作是一个 F-B 微腔^[17]. 而基于小分子有机材料的有机电致发光器件的光的产生可看作是处于发光层中的电偶极子的自发辐射过程^[18]. 在小分子 OLEDs 中, 根据电偶极子极矩的去向划分, 电偶极子可等效为两种: 一种与功能层平面垂直, 另一种与功能层平面平行. 于是自发辐射可以看作是由电偶极矩方向垂直和平行于薄膜平面的电偶极子产生的. Lukose^[18] 提出, 对于垂直和平行的电偶极子来说, 沿 k 方向发射的 p 偏正光和 s 偏正光, 其归一化功率密度 (单位立体角内的光能量) 可以表示为

$$\eta_v^{(p)}(\theta_i) = \frac{3}{8\pi} \sin^2 \theta_i, \quad (1)$$

$$\eta_v^{(s)}(\theta_i) = 0, \quad (2)$$

$$\eta_h^{(p)}(\theta_i) = \frac{3}{16\pi} \cos^2 \theta_i, \quad (3)$$

$$\eta_h^{(s)}(\theta_i) = \frac{3}{16\pi}, \quad (4)$$

这里, 下标 v 和 h 分别表示垂直与平行, θ_i 为在功能层 i 中光发射方向与功能层法线方向的夹角. (1)—(4) 式表明, 电偶极矩垂直于薄膜平面的电偶极子, 只发射 p 偏正光, 平行于薄膜平面的电偶极子, 可发射 s 与 p 偏振光. 当光从发光层产生后, 将在各个功能层薄膜中传输, 最后发射到空气中.

在光的出射过程中, 一定立体角内的光能量从一种介质传播到另一种介质中时, 立体角会发生变化. 如图 1 所示, 当光从发光层出射到外部空间中时, 立体角由 Ω_{active} 变为 Ω_{out} , 由 Snells 定律得, 两立体角存在如下关系^[19]:

$$\frac{d\Omega_{\text{active}}}{d\Omega_0} = \frac{n_{\text{out}}^2 \cos \theta_0}{n_{\text{active}}^2 \cos \theta_{\text{active}}}, \quad (5)$$

式中下标 active 和 out 分别表示发光层和外部空间, n_{active} 和 n_{out} 分别表示发光层和外部空间的折射率.

于是, 传输到外部空间的光能量和发光层产生的光能量之间存在以下关系^[20]:

$$\begin{aligned} & p_{h,v}^{(s,p)}(\theta_{\text{out}}, \lambda) \cdot d\Omega_{\text{out}} \\ &= \eta_{h,v}^{(s,p)}(\theta_{\text{active}}) \cdot C_{h,v}^{(s,p)}(\theta_{\text{active}}, \lambda) \\ & \quad \times A_{\text{active}}^{(s,p)}(\theta_{\text{active}}, \lambda) \cdot d\Omega_{\text{active}}, \end{aligned} \quad (6)$$

这里 $p_{h,v}^{(s,p)}(\theta_{\text{out}}, \lambda)$ 表示外部空间中单位立体角中的光能量, $C_{h,v}^{(s,p)}(\theta_{\text{active}}, \lambda)$ 为出光耦合因子, 可表示为

$$\begin{aligned} & C_h^{(s)}(\theta_{\text{active}}, \lambda) \\ &= \left| 1 + r_2^{(s)} \exp(i \cdot 4 \cdot n_{\text{active}} \right. \\ & \quad \left. \times \pi \cdot \cos \theta_{\text{active}} \cdot z_0 / \lambda) \right|^2, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & C_v^{(p)}(\theta_{\text{active}}, \lambda) \\ &= \left| 1 - r_2^{(p)} \exp(i \cdot 4 \cdot n_{\text{active}} \right. \\ & \quad \left. \times \pi \cdot \cos \theta_{\text{active}} \cdot z_0 / \lambda) \right|^2, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & C_h^{(p)}(\theta_{\text{active}}, \lambda) \\ &= \left| 1 + r_2^{(p)} \exp(i \cdot 4 \cdot n_{\text{active}} \right. \\ & \quad \left. \times \pi \cdot \cos \theta_{\text{active}} z_0 / \lambda) \right|^2, \end{aligned} \quad (9)$$

这里 z_0 表示电偶极子与 Alq₃/Al 界面之间的距离, r_2 表示光在 Alq₃/Al 界面的反射系数, 可用传输矩阵法求得^[21]. 其中对顶发光单元, r_2 为 r_{t2} , z_0 为 z_{t0} , 对底发光单元, r_2 为 r_{b2} , z_0 为 z_{b0} , 定义如图 2 所示.

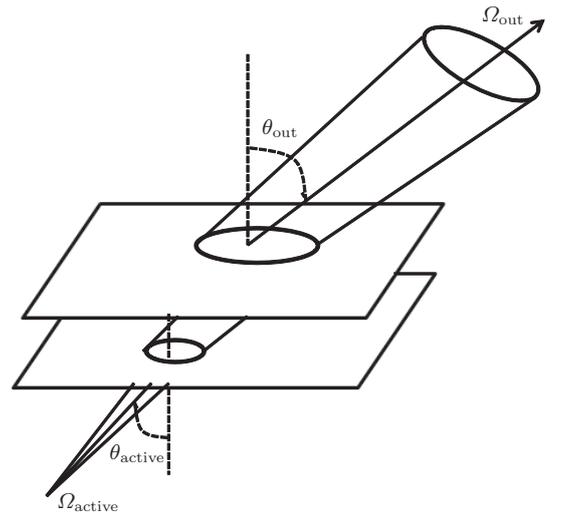


图 1 光在传播过程中立体角的变化

$A_{\text{active}}^{(s,p)}(\theta_{\text{active}}, \lambda)$ 项为艾里函数 (Airy functions), 用来描述 F-P 微腔中光场的增强与抑制, 表示为

$$A_{\text{active}}^{(s,p)}(\theta_{\text{active}}, \lambda)$$

$$= \left(1 - \left|r_1^{(s,p)}\right|^2\right) \left|1 - r_1^{(s,p)} r_2^{(s,p)}\right|^{-2} \times \exp(i \cdot 4 \cdot n_{\text{active}} \cdot \pi \cdot \cos \theta_{\text{active}} \cdot d / \lambda) \quad (10)$$

式中, r_1 表示光在 NPB/Alq₃ 界面的反射系数, 其中对顶发光单元, r_1 为 r_{t1} , 对底发光单元, r_1 为 r_{b1} , 如图 2 所示. 总的辐射光能量由垂直于薄膜和平行于薄膜的电偶极子共同贡献, 在发光层介质均匀且各向同性的情况下, 辐射光能量可表示为 [17,18,22]

$$P_{\text{total}} = \frac{2}{3} p_h + \frac{1}{3} p_v \quad (11)$$

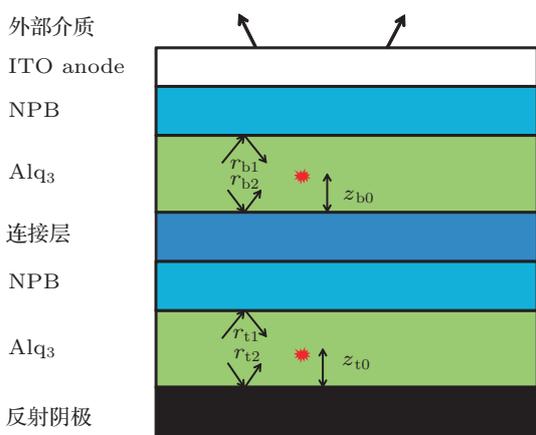


图 2 叠层有机发光器件结构的二维图

由 OLEDs 的发光光谱可知, 其光谱分布在一定的宽度内, 这说明受激分子处于不同的能量状态之下, 在退激时可发射出不同能量的光子. 根据不同波长下光的强度不同, 可知处于不同激发态下的激子浓度不同. 由于发光材料的光致激发谱与 OLEDs 的电致激发谱相似, 所以可以用光致激发谱来描述处于不同激发态的激子浓度大小.

在 OLEDs 中, 光的发射归因于 Frenkel 激子的辐射复合 [23], 对一个双层结构的 OLEDs 器件来说, 电子和空穴首先在有机/有机界面处相遇形成激子, 之后向发光层中扩散, 所以发光层中激子的浓度 n 是一个与发光层中的具体位置相关的函数 $n(x)$. 要精确确定激子浓度的分布函数, 可借助电学模拟来确定, 只要能确定激子的分布函数, 就可以准确模拟器件的光学特性. 邓青云等 [24] 研究发现, 对于双层结构的 OLEDs, 其激子的分布函数近似为指数分布 $n(x) \propto e^{-x/d}$, 且分布长度约为 20 nm. 在这里采用邓青云提出的激子分布函数模型来模拟器件的光学特性, 所以在远场中的光功率可表示为

$$p^{(s,p)}(\theta_{\text{out}}, \lambda)$$

$$= \frac{\int_0^{L_D} P^{(s,p)}(\theta_{\text{out}}, \lambda, x) \cdot s(\lambda) \cdot \exp(-x/L_D) dx}{\int_0^{L_D} \exp(-x/L_D) dx} \quad (12)$$

式中 $s(\lambda)$ 是发光层的光致激发谱, x 是发光层中的电偶极子的位置和激子形成界面处的距离. 考虑到人眼对光的灵敏度, 亮度的角分布可表示为

$$L_v^{(s,p)}(\theta_{\text{out}}) = C_0 \int F(\lambda) P^{(s,p)}(\theta_{\text{out}}, \lambda) d\lambda \quad (13)$$

这里, L_v 分表示亮度, $F(x)$ 是光响应函数, C_0 是一个常数, 其值为 683 lm/W, 而整个空间中的光功率则可表示为

$$W = 2\pi \int_0^{\pi/2} L_v \sin \theta d\theta \quad (14)$$

3 结果与讨论

本模型研究中, 研究有机功能层厚度对叠层有机发光器件出光强度的影响时, 叠层器件的结构为: glass/ITO(80 nm)/EL/MoO₃(10 nm)/EL/LiF(2 nm)/Al(100 nm), 这里 EL 表示 NPB(x nm)/Alq₃(y nm). 在模拟中, Alq₃ 光学常数取自文献 [25], NPB 的光学常数取自文献 [26], ITO 的光学常数取自文献 [27], Al 的光学常数取自文献 [28], Alq₃ 的光致发光谱利用荧光分光光度计 (fluorescence spectrophotometer, Hitachi F-4500) 测量所得, 如图 3 所示. 取玻璃衬底的折射率为 1.5, MoO₃ 的折射率为 2.0, LiF 的折射率为 1.4. 定义靠近 ITO 阳极的发光单元为底发光单元, 另一发光单元为顶发光单元. 模拟中, 假定顶、底两个发光单元中光的产生是平衡的, 即两单元中激子分布特征相同.

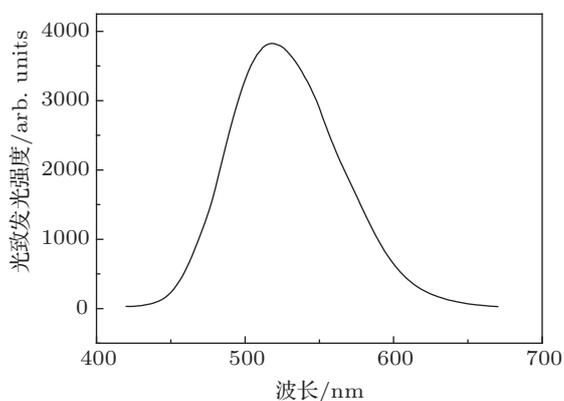


图 3 Alq₃ 的光致发光谱

3.1 Alq₃ 厚度变化时器件的出光特性

图 4 为不同 NPB 厚度下叠层有机发光器件出光强度随 Alq₃ 厚度变化的特征. 从图中可知, 对于 NPB 厚度为 40 和 50 nm 的器件, Alq₃ 的厚度从 40 nm 开始逐渐增加时, 器件的出光强度首先逐渐减弱, 当 Alq₃ 厚度增加超过一定厚度时, 出光强度又开始增强, 且 NPB 厚度为 50 nm 的器件出光强度首先增强; 对于 NPB 厚度为 60 和 70 nm 的器件, Alq₃ 的厚度从 40 nm 开始, 器件的出光强度逐渐增强, 当 Alq₃ 厚度增加到一定程度时, 出光强度又开始减弱, 并且 NPB 厚度为 70 nm 的器件出光强度首先减弱; NPB 厚度为 70 nm 的器件出光强度相比其他器件要强. 从图中还可以看到, 当所用器件的出光强度在 Alq₃ 厚度超过 100 nm 后都逐渐减弱, 之后在 Alq₃ 厚度约为 140 nm 时, NPB 厚度为 70 nm 的器件出光强度首先增强, 此时该器件对应的 Alq₃ 厚度约为 80 nm, 之后依次为 60, 50 和 40 nm 的器件开始增强, 这次的增强与 Alq₃ 厚度小于 100 nm 时的增强不同之处在于, 增强曲线不平滑, 这可以从图 5 中找到解释.

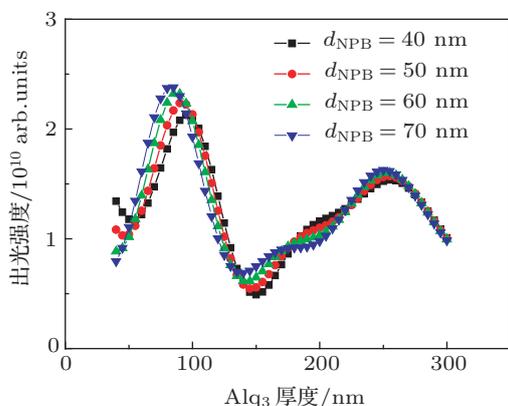


图 4 不同 NPB 薄膜厚度下 Alq₃ 厚度对叠层器件出光强度的影响

图 5 为 NPB 厚度为 70 nm 时叠层有机发光器件的底发光单元、顶发光单元以及整个叠层器件的发光强度随 Alq₃ 厚度的变化. 从图中可以看出, 对于底发光单元而言, Alq₃ 的厚度从 40 nm 增加到 80 nm 左右时, 出光逐渐增强, 之后随着 Alq₃ 的厚度的继续增大, 出光开始逐渐减弱, 直至 Alq₃ 的厚度为 125 nm. 继续增加 Alq₃ 的厚度, 底发光单元出光又开始增强, 当 Alq₃ 的厚度超过 170 nm 时又开始减弱, 如此周期性变化. 可以发现, 这个增强与减弱出现的周期是相同的, 即每 90 nm 为一个周期.

也可看到, 随着 Alq₃ 的厚度的增加, 在每个周期内出光最强的厚度上, 器件的出光强度是逐渐减弱的, 这是因为随着厚度的增加, 光通过的路径也增加, 导致对光的吸收也增强的缘故. 从图 5 可以看出, 对于顶发光单元来说, 随着 Alq₃ 厚度的增加, 其出光强度也周期性地变化, 与底发光单元不同之处在于其出光强度变化的周期长, 约为底发光单元的二倍, 为 180 nm. 值得注意的是, 由于顶、底两个发光单元出光强度随 Alq₃ 厚度变化的周期不同, 在某一厚度区域, 可能出现对一个发光单元来说出光是最强的, 而对另一个发光单元来说出光是比较弱的. 如在 Alq₃ 厚度为 170 nm 左右时, 底发光单元出光最强, 顶发光单元出光最弱, 这也就是为什么在图 4 中当叠层器件的出光强度第二次增加时曲线不平滑的缘故. 由此说明, 对一个叠层有机发光器件来说, 选取一个最佳的 Alq₃ 厚度, 不能仅仅依靠某个发光单元出光的特性来决定, 而必须综合考虑两个发光单元出光的特性.

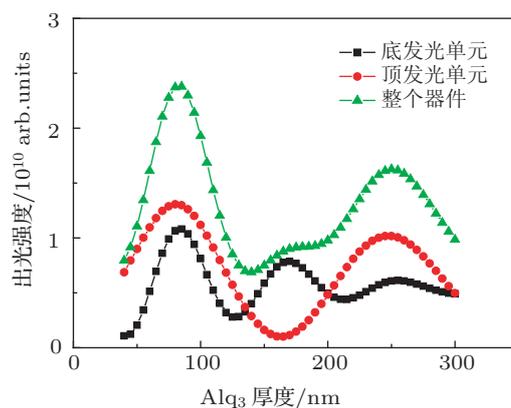


图 5 Alq₃ 厚度对叠层器件中的底、顶发光单元以及整个器件的出光强度的影响

3.2 NPB 厚度变化时器件的出光特性

图 6 为不同 Alq₃ 厚度下叠层有机发光器件出光强度随 NPB 厚度变化的特性. 与图 4 的情况类似, 从 NPB 厚度为 40 nm 起, 随着 NPB 厚度的逐渐增加, Alq₃ 厚度为 50 和 60 nm 的器件的出光强度首先减弱, 然后逐渐增强, 而 Alq₃ 厚度为 70 和 80 nm 的器件的出光强度一开始就增强. 当 NPB 厚度增加到一定程度后, 器件的出光强度将开始减弱, 之后逐渐增强. 第二次增强的特征不同于图 5 中的情形, 这次的曲线比较平滑, 这也是由顶、底两个发光单元出光的特性共同决定的, 这可以从图 7 中得到解释. 从图 6 也可以看到, 第一次出现出光最强

的器件中, Alq₃ 厚度为 80 nm 时器件的出光最强, 此时对应的 NPB 厚度为 70 nm 左右.

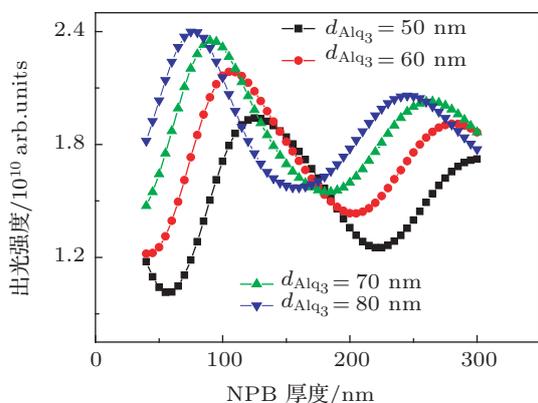


图 6 不同 Alq₃ 厚度下 NPB 厚度对叠层器件出光强度的影响

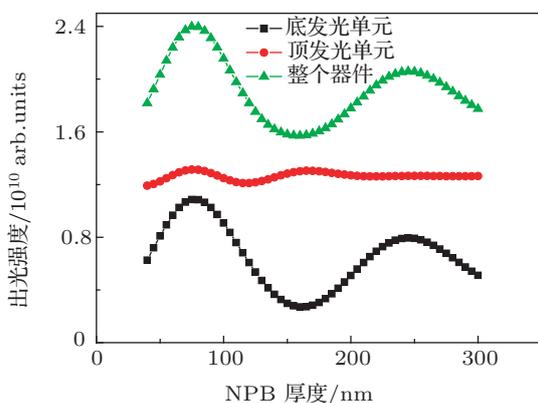


图 7 NPB 厚度对叠层器件及其底发光单元、顶发光单元出光强度的影响

图 7 为 Alq₃ 厚度为 80 nm 时, 叠层器件的底发光单元、顶发光单元以及整个叠层器件的出光强度随 NPB 厚度的变化. 随着 NPB 厚度的增加, 器件的出光强度呈现周期性的变化, NPB 厚度较小时所对应的最强出光强度要大于 NPB 厚度较大时对应的最强出光强度, 这也是由于光的吸收强度增强的缘故. 从图 7 可以看到, 顶、底两个发光单元出光强度变化的周期大小不同, 对底发光单元来说, 其厚度周期约为 180 nm, 而对顶发光单元来说, 其厚度周期约为 90 nm, 约为底发光单元的 1/2, 这与变化 Alq₃ 厚度时的情况恰好相反. 这种特性也会导致在某一 NPB 厚度下, 对一个发光单元而言出光较强, 而对另一个发光单元而言出光较弱. 从图 7 中也可以看出, NPB 厚度对底发光单元出光强度的影响较大, 而对顶发光单元出光强度的影响较小, 这也就是为什么对叠层器件来说, 出光强度随 NPB 厚度变化的曲线比较平滑, 与底发光单元相似的

原因.

3.3 Al 阴极厚度变化时器件的出光特性

图 8 为 NPB, Alq₃ 以及 ITO 厚度分别为 70, 80 和 80 nm 时, Al 阴极厚度对叠层有机发光器件及其顶、底两个发光单元的出光特性的影响. 从图中可以看到, 随着 Al 阴极厚度的增加, 器件的出光强度逐渐增强, 当 Al 阴极厚度超过 40 nm 时, 器件的出光强度达到最强且恒定. 这是因为, 当 Al 阴极厚度比较小时, 其为半透明的薄膜, 反射率比较小, 器件产生的一部分光能量可以通过 Al 阴极透射出去, 当逐渐增加 Al 阴极厚度时, 其反射率增强, 从 Al 阴极透射出去的光能量将减少, 从 ITO 阳极的出光将增强, 当 Al 阴极厚度增加超过 40 nm 时, 其转变为不透明的薄膜, 反射率也达到最大, 此时器件的出光达到最强.

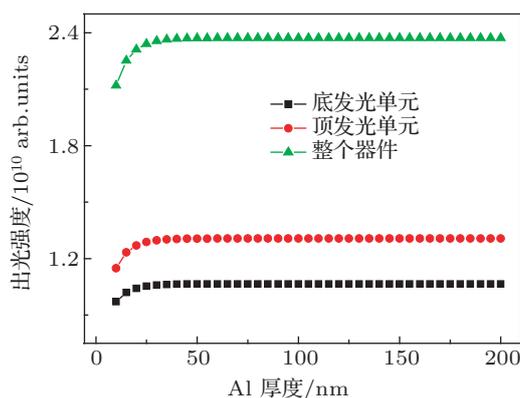


图 8 Al 阴极厚度对叠层器件及其顶底发光单元出光强度的影响

3.4 ITO 阳极厚度变化时器件的出光特性

图 9 为 NPB, Alq₃ 以及 Al 阴极厚度分别为 70, 80 和 100 nm 时, ITO 阳极厚度对叠层有机发光器件及其顶、底两个发光单元的出光特性的影响. 从图中可以看出, ITO 厚度从 10 nm 开始逐渐增加时, 器件的出光强度逐渐增大, 直至 ITO 厚度增加约为 80 nm 时, 器件的出光强度达到最强, 然后随着 ITO 厚度的增加, 出光强度逐渐减弱. 同时可以看到, 当 ITO 厚度在 80—100 nm 之间时, 器件的出光强度维持在一个相对高的水平上, 这说明最优的 ITO 厚度可取该范围内的数值. 且从图 9 可以看出, 顶、底两个发光单元的出光强度随 ITO 厚度的增加而周期性地变化, 且周期相同, 这也是叠层有机发光器件的出光特性与顶、底两个发光单元的出光特性相同的原因.

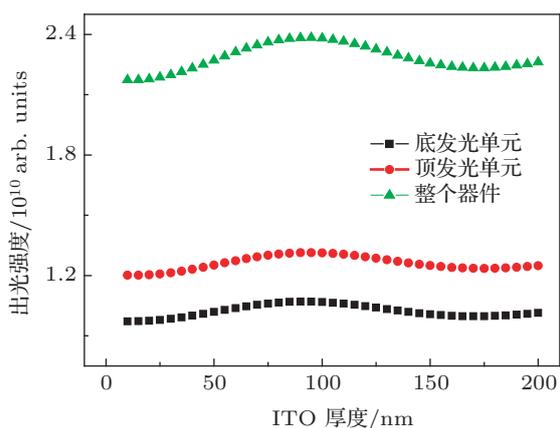


图9 ITO厚度对叠层器件及其顶底发光单元出光强度的影响

3.5 出射角度对器件出光性能的影响

从上面的结果可知, 当器件中 NPB 厚度为 70 nm, Alq₃ 厚度为 80 nm, ITO 阳极厚度在 80 nm, MoO₃ 的厚度为 10 nm, Li 厚度为 2 nm, Al 阴极厚度超过 40 nm 时, 器件的出光强度最强. 图 10 为在此条件下叠层器件的发光强度随出光角度的变化,

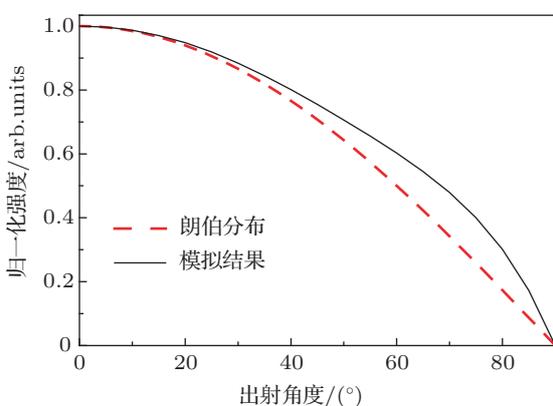


图 10 器件光出射强度的角分布

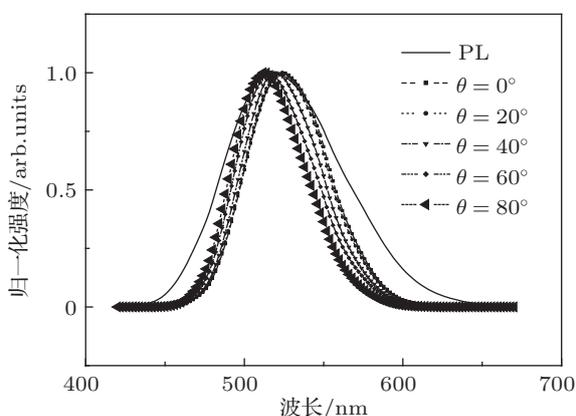


图 11 不同的光出射方向的电致发光谱

可以看出, 此时叠层器件的发光强度的角分布与朗伯分布有点偏离. 图 11 为在不同的出射角度时器件的发光光谱, 可以看到, 与 Alq₃ 的光致发光谱相比, 叠层器件的出光光谱变窄, 这可归结为是微腔作用造成的, 并且随着出射角度的增大, 发光光谱的峰值逐渐蓝移.

3.6 模拟结果与实验结果的比较

为了计算结果的可靠性, 我们采用文中所用方法, 对结构为 glass/ITO(80 nm)/NPB(70 nm)/Alq₃ (x nm)/LiF(0.5 nm)/Al(120 nm) 的器件随 Alq₃ 厚度变化的出光特性做了模拟, 并与实验结果做了比较, 实验数据取自文献 [20]. 如图 12 所示, 模拟结果和实验结果符合得较好, 这说明用本模型对叠层器件出光特性的分析是可靠的.

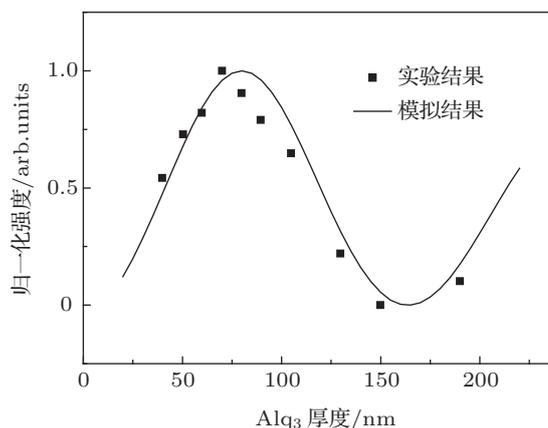


图 12 模拟结果与实验结果的比较

需要说明的是, 本文中激子浓度分布的这种特征与器件中电子和空穴的传输特性有关. 从阳极传输到 NPB/Alq₃ 界面的空穴, 要注入到发光层 Alq₃ 中, 必须克服一个高度为 0.5 eV 的势垒, 从阴极传输到 NPB/Alq₃ 界面的电子要注入到 NPB 中, 必须克服一个高度为 0.8 eV 的势垒 [29], 故 NPB/Alq₃ 界面对传输到此界面处的电子和空穴有一定的阻挡作用, 此外, 由于空穴在 Alq₃ 中的迁移率很弱, 约为 $2.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 相比电子在其中的迁移率 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 小很多 [30,31], 并且 NPB 中的电子迁移率很小, 一般将其看作是直传空穴的材料, 故当载流子传输到 NPB/Alq₃ 界面时, 将在 NPB/Alq₃ 界面聚集, 空穴和电子的复合主要发生在 NPB/Alq₃ 界面, 激子主要在 NPB/Alq₃ 界面生成, 电学模拟也证实了这一点 [32], 这也就是为什么

本文中采用激子分布浓度为指数模型时, 实验结果与模拟结果符合很好的原因. 如果发光层中的空穴迁移率比较大, 与其中的电子迁移率大小接近时, 发光层中电子和空穴的复合将不仅仅局限在空穴传输层/发光层界面, 将向发光层体内扩展, 此时用指数分布模型描述激子浓度的特征将不再准确, 必须借助严格的电学模拟来确定.

4 结论

基于薄膜光学原理、电偶极子辐射理论及 F-B 微腔原理, 建立了结构为 glass/ITO/NPB/Alq₃/MoO₃/NPB/Alq₃/LiF/Al 的叠层有机电致发光器件的光学模型, 系统研究了各功能层厚度对叠层有机电致发光器件出光强度的影响. 结果表明: 当 NPB 厚度不变, Alq₃ 厚度逐渐增加时, 顶、底两个发光单元的出光强度按照衰减的正弦(余弦)函数变化, 且底发光单元出光强度的变化周期是顶发光单元周期的 1/2, 整个器件出光强度变化没有固定的周期; 当 Alq₃ 厚度不变, NPB 厚度逐渐增加

时, 顶、底两个发光单元的出光强度按照衰减的正弦(余弦)函数变化, 且底发光单元出光强度的变化周期是顶发光单元周期的 2 倍, 其中对顶发光单元的出光影响较弱, 整个器件出光强度的周期与底发光单元相似; 当 Al 阴极厚度逐渐增加时, 顶、底及其整个器件的出光强度逐渐增强, 当 Al 阴极厚度超过 40 nm 时, 器件的出光强度达到最强; 当 ITO 阳极厚度逐渐增加时, 顶、底发光单元及其整个器件的出光强度按衰减的正弦(余弦)函数变化, 且周期相同. 得到了 NPB 厚度为 70 nm, Alq₃ 厚度为 80 nm, ITO 阳极厚度在 80—100 nm 之间, Al 阴极厚度超过 40 nm 时, 器件的出光强度最强. 当器件中 NPB 厚度为 70 nm, Alq₃ 厚度为 80 nm, ITO 阳极厚度在 80 nm, MoO₃ 的厚度为 10 nm, Li 厚度为 2 nm, Al 阴极厚度为 40 nm 时, 器件的发光特征与朗伯分布有一定的偏离; 与 Alq₃ 的光致发光谱相比, 不同出射角度的发光光谱变窄, 且随着出射角度的增大, 光谱的峰值蓝移. 该模型所获得的结果对深入了解叠层有机电致发光器件的工作机理、设计最优化的器件结构可提供一定的帮助.

- [1] Reineke S, Lindner F, Schwartz G, Seidler N, Walzer K, Lussem B, Leo K 2009 *Nature* **459** 234
- [2] Chen F P, Xu B, Zhao Z J, Tian W J, Lu P, Im C 2010 *Chin. Phys. B* **19** 037801
- [3] Jiang W L, Meng Z H, Cong L, Wang J, Wang L Z, Han Q, Meng F C, Gao Y H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6642 (in Chinese) [姜文龙, 孟昭晖, 丛林, 汪津, 王立忠, 韩强, 孟凡超, 高永慧 2010 物理学报 **59** 6646]
- [4] Chen S J, Yu J S, Wen W, Jiang Y D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 037202 (in Chinese) [陈苏杰, 于军胜, 文雯, 蒋亚东 2011 物理学报 **60** 037202]
- [5] Wu X M, Shen L Y, Hua Y L, Dong M S, Mu X, Bai J J, Bi W T, Yang X Y, Yin S G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 178502 (in Chinese) [吴晓明, 申利莹, 华玉林, 董木森, 穆雪, 白娟娟, 毕文涛, 杨小艳, 印寿根 2012 物理学报 **61** 178502]
- [6] Chen P, Zhao L, Duan Y, Cheng G, Zhao Y, Liu S Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 097203 (in Chinese) [陈平, 赵理, 段羽, 程刚, 赵毅, 刘式埔 2011 物理学报 **60** 097203]
- [7] Zhang X W, Hu Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 207802 (in Chinese) [张新稳, 胡琦 2012 物理学报 **61** 207802]
- [8] Chiba, T, Pu Y J, Miyazaki R, Nakayama K I, Sasabe H, Kido J 2011 *Org. Electron.* **12** 710
- [9] Liao L S, Slusarek W K, Hatwar T K, Ricks M L, Comfort D L 2008 *Adv. Mater.* **20** 324
- [10] Chen C W, Lu Y J, Wu C C, Wu E H E, Chu C W, Yang Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 241121
- [11] Tsutsui T, Terai M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 440
- [12] Kanno H, Holmes R J, Sun Y, Kena-Cohen S, Forrest S R 2006 *Adv. Mater.* **18** 339
- [13] Chen P, Xue Q, Xie W F, Xie G H, Duan Y, Zhao Y, Liu S Y, Zhang L Y, Li B 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 123307
- [14] Chang C C, Hwang S W, Chen C H, Chen J F 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 6418
- [15] Liao L S, Klubek K P, Tang C W 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 167
- [16] Lu F P, Wang Q, Zhou X 2003 *Chin. Phys. B* **22** 037202
- [17] Wang Z B, Helander M G, Xu X F, Puzzo D P, Qiu J, Greiner M T, Lu Z H 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 053107
- [18] Lukosz W 1979 *J. Opt. Soc. Am.* **69** 1495
- [19] Lukosz W, Kunz R E 1977 *J. Opt. Soc. Am.* **67** 1615
- [20] Peng H J 2005 *Ph. D. Dissertation* (Hongkong: Hongkong University of Science and Technology)
- [21] Lin Y C, Lu W Q 1990 *The Principle of Thin Film Optics* (Beijing: National Defence Industry Press) p34 (in Chinese) [林永昌, 卢维强 1990 光学薄膜原理 (北京: 国防工业出版社) 第 34 页]
- [22] Benisty H, Stanley R, Mayer M 1998 *J. Opt. Soc. Am. A* **15** 1192
- [23] Huang C H, Li F Y 2005 *Introduction to Organic Light-Emitting Materials and Devices* (Shanghai: Fudan University Press) p43 (in Chinese) [黄春辉, 李富友 2005 有机电致发光材料与器件导论 (上海: 复旦大学出版社) 第 43 页]
- [24] Tang C W, van Slyke S A, Chen C H 1989 *J. Appl. Phys.* **65** 3610
- [25] Kumar S, Shukla V K, Tripathi A 2005 *Thin Solid Films* **477** 240
- [26] Zhang L T, Xie W F, Wang J, Zhang H Z, Zhang Y S 2006 *J. Phys. D* **39** 2373
- [27] Synowicki R A 1998 *Thin Solid Films* **313** 394
- [28] Ji W Y 2010 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Jilin university) (in Chinese) [纪文宇 2010 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [29] Bozano L D, Kean B W, Beinhoff M, Carter K R, Rice P M, Scott J C 2005 *Adv. Func. Mates.* **15** 1933
- [30] Ruhstaller B, Carter S A, Barth S, Riel H, Riess W, Scott J C 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 4575
- [31] Martin S J, Verschoor G L B, Webster M A, Walker A B 2002 *Org. Electron.* **3** 129
- [32] Crone B K, Davids P S, Cambell I H, Smith D L 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 1974

Influence of the functional layer thickness on the light output property of tandem organic light emitting diode: a numerical study*

Lu Fei-Ping^{1)†} Li Jian-Feng²⁾ Sun Shuo³⁾

1) (College of Physics and Information Science, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

2) (Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Intelligent Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

3) (National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(Received 20 July 2013; revised manuscript received 12 September 2013)

Abstract

Based on the principle of thin film optics, the theory of electric dipole radiation, and the principle of Fabry-Pérot microcavity, an optical model is built for the tandem organic light emitting diode (OLED) with the structure of Glass /ITO/ N, N0-bis(naphthalen-1-yl)-N, N0-bis (phenyl)-benzidine(NPB)/tris(8-hydroxyquinoli-ne) aluminum (Alq₃)/ molybdenum trioxide (MoO₃)/ NPB/ Alq₃/LiF/Al. The influence of the functional layer thickness on the light output intensity of device is systematically studied, the laws of light output intensity for tandem OLEDs under different thickness values of functional layer are obtained. This model and the results obtained in this paper can present an in-depth understanding of the working mechanism of tandem OLED and help ones fabricate high efficiency OLED.

Keywords: tandem organic light-emitting diodes, light output property, thickness, numerical study

PACS: 72.80.Le, 78.60.Fi, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.62.247201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61264002, 61166003), the Young Scholars Science Foundation of Lanzhou Jiaotong University, China (Grant No. 2011025), and the Jinchuan Company-Lanzhou Jiaotong University Pre-Research Foundation, China (Grant No. JCY2013001).

† Corresponding author. E-mail: lufp_sysu@163.com