

LiF 修饰阴极的双层有机电致发光器件 发光效率

李宏建* 朱儒晖 闫玲玲 张海燕

(中南大学物理科学与技术学院, 长沙 410083)

摘要 考虑 LiF 绝缘缓冲层对电子注入势垒的影响, 给出了 LiF/金属复合电极注入势垒的表达式; 基于载流子的注入和复合过程, 建立了双层有机电致发光器件发光效率的理论模型; 讨论了器件效率随电压、注入势垒、内界面势垒、有机层厚度的变化关系. 结果表明: (i) 当 $\delta_e/\delta_h < 2$ 时, 金属/有机物(M/O)界面属于欧姆接触, 当 $\delta_e/\delta_h = 2$ 时, M/O 界面成为接触限制, 当 $\delta_e/\delta_h = 2(\Phi_h \approx 0.2 \text{ eV}, \Phi_e \approx 0.3 \text{ eV})$ 时, M/O 界面存在从欧姆接触向接触限制的转变; (ii) η_{EL} 随 δ'_e/δ'_h 的增大而减小, 但 $\delta'_e/\delta'_h > 2.5 (H'_h \approx 0.2 \text{ eV}, H'_e > 0.4 \text{ eV})$, η_{EL} 的变化趋势变得平缓, 这时载流子注入对器件的 η_{EL} 起支配作用; (iii) 逐渐增加 L_h/L 比值, 较低电压下 η_R 呈下降趋势, 较高电压下 η_R 则呈上升趋势. 当电压超过启动电压后, 对于给定的 L_h/L , 随电压的增大, η_{EL} 是先增加后降低, 且随着 L_h/L 的增加, η_{EL} 的这种变化趋势更加明显. 这些都与报道的理论及实验结果相符.

关键词 电致发光效率 注入势垒 内界面势垒 LiF 修饰

由于有机电致发光器件(OLEDs, organic light emitting devices)有着广泛的市场应用前景, OLEDs的研究引起了研究者的广泛关注. 研究发现高效、均衡的载流子注入与复合对OLEDs发光效率起着至关重要的作用^[1-4]. 近年来, 研究者通过在金属/有机物之间引入绝缘缓冲层^[5-8], 极大地改善载流子注入, 提高OLEDs的效率. 由于有机层在最高占有分子轨道(HOMO)与最低未占有分子轨道(LUMO)上的能量存在很大的差异, 因此, 对于载流子的输运, 有机物/有机物界面(内界面, O/O, organic/organic)上存在很高的能垒, 于是把一个双层OLED分成了阴极区(电子输运层, ETL)和阳极区(空穴输运层, HTL). 当在双层OLED两侧加上电压后, HTL有利于空穴传输并可阻挡从对面电极传输过来的电子进入HTL, ETL有利于电子传输并可阻挡从对面电极传输过来的空穴进入ETL, 阻挡作用的强弱取决于空穴和电子隧穿内界面(O/O)所受

收稿日期: 2005-12-20; 接受日期: 2006-07-07

湖南省杰出青年科学基金(批准号: 03JJY1008)、中国博士后科学基金(批准号: 2004035083)和中南大学科学基金(批准号: 0601059)资助项目

* E-mail: lihj398@yahoo.com.cn

的界面势垒 H'_h 和 H'_e , 并在内界面上积累了一定的空间电荷, 导致在 OLEDs 内场强的重新分布.

近年来, 很多研究者从理论和实验两方面对 OLEDs 的效率问题进行了大量有意义地探讨^[9-13], 然而, 完整的理论体系尚未建立. 本文基于 LiF 绝缘缓冲层对注入势垒的影响, 给出了 LiF/金属复合电极注入势垒的计算表达式; 根据载流子的注入与复合, 建立了双层 OLEDs 电致发光效率的理论模型; 讨论了电压、界面势垒和有机层厚度对双层 OLEDs 发光效率的影响.

1 理论模型

电致发光效率, η_{EL} 是衡量 OLEDs 的重要参数. 如果同时考虑载流子的注入过程和复合过程, 则器件 η_{EL} 可表示为

$$\eta_{EL} = \eta_{inj}\eta_R, \quad (1)$$

其中 η_{inj} 是器件中载流子的注入效率, η_R 是器件中载流子的复合效率.

注入效率, η_{inj} 是 OLEDs 的一个品质因子, 定义为

$$\eta_{inj} = \frac{J_{ho}}{J_{scl}} \times \frac{J_{eo}}{J_{ohmic}}, \quad (2)$$

式中 J_{ho} 和 J_{eo} 分别是空穴和电子的隧穿电流密度, J_{scl} 对应于空穴的空间电荷限制电流密度, J_{ohmic} 对应于欧姆接触的电子电流密度.

隧穿电流密度表示为

$$J_{ho} = \chi_{oh} F_h^2 \exp\left(-\frac{\delta_h}{F_h}\right), \quad (3a)$$

$$J_{eo} = \chi_{oe} F_e^2 \exp\left(-\frac{\delta_e}{F_e}\right), \quad (3b)$$

$$\delta_h = \frac{4\sqrt{2m^*}}{3} \frac{\Phi_h^{\frac{3}{2}}}{\hbar e},$$

式中 F_h 和 F_e 为阳极区和阴极区的场强, e 是基本电荷, m^* 是载流子的有效质量, \hbar 是普朗克常数, χ_{oh} 和 χ_{oe} 分别为空穴和电子的注入系数 Φ_h 是阳极处势垒高度.

由于 LiF 层的存在, 阴极处电子的注入势垒为 δ_e , 可大致认为由两部分构成: 阴极区(如 Alq)的小三角形势垒 Δ_{Alq} 与 LiF 层的梯形势垒 Δ_{LiF} , 如图 1.

$$\delta_e = \Delta_{Alq} + \Delta_{LiF}, \quad (4)$$

式中

$$\Delta_{Alq} = \frac{1}{2} A (\Phi_{Alq} - F_d L_d)^2,$$

$$\Delta_{LiF} = \frac{1}{2} B (2\Phi_{LiF} - F_d L_d) L_d,$$

A 和 B 分别为调节参数, Φ_{LiF} 和 Φ_{Alq} 分别表示在 LiF/Al 与 Alq/LiF 界面的初始势垒, F_d 为 LiF 层中的电场, L_d 为 LiF 层的厚度.

对于无陷阱材料, J_{scl} 由 Mott-Gurney 定律给出:

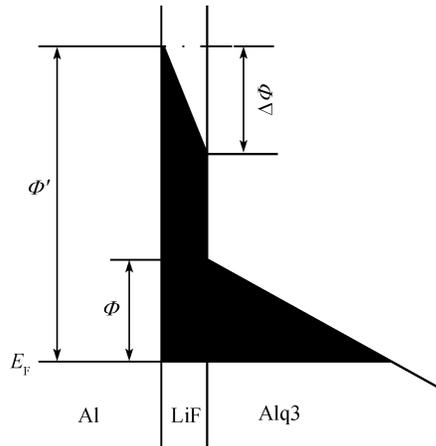


图 1 LiF 缓冲层插入 Al/Alq 之间的势垒模型

$$\phi = \phi_{\text{LiF}}, \quad \phi' = \phi_{\text{Alq}} - F_d L_d, \quad \Delta\phi = F_d L_d$$

$$J_{\text{scl}} = \frac{9}{8} \epsilon_0 \epsilon_r \mu_p \frac{V_h^2}{L_h^3}, \quad (5)$$

式中 ϵ_r 是材料的介电常数, μ_p 是空穴的迁移率, V_h 是阳极区的电压, L_h 是阳极区的厚度. J_{ohmic} 可以表示为

$$J_{\text{ohmic}} = en\mu_n F_e, \quad (6)$$

式中 n 是电子密度, μ_n 是电子迁移率. 假设载流子迁移率满足关系

$$\mu_n = \mu_{0n} \exp\left(\sqrt{\frac{F_e}{F_0}}\right), \quad \mu_p = \mu_{0p} \exp\left(\sqrt{\frac{F_h}{F_1}}\right),$$

式中 μ_{0n} , μ_{0p} 和 F_0 和 F_1 是材料的参数.

复合效率, η_R 是 OLEDs 的另一个品质因子, 定义为

$$\eta_R = \frac{J_{rc}}{J_c}, \quad (7)$$

式中 J_{rc} 为载流子在内界面两侧总的复合电流, J_c 为器件中的总电流.

设空穴和电子隧穿内界面(阳极区和阴极区的接触面)所受的界面势垒分别为 H'_h 和 H'_e . 由于内界面层很薄, 界面处两种有机分子的相互作用很弱, 电子的传输可认为是一种跳跃过程, 复合发光是载流子隧穿内界面之后在两有机层内激子的复合发光. 在高场下对三角势垒的隧穿是描述注入过程的一种很有用的一阶近似方法. 由 Fowler-Nordheim 方程可知, 隧穿内界面形成的漏电流密度为

$$J'_h = v_0 \Sigma_h \exp(-\delta'_h / F_e), \quad (8a)$$

$$J'_e = v_0 \Sigma_e \exp(-\delta'_e / F_h), \quad (8b)$$

式中 Σ_h 和 Σ_e 分别为内界面处阳极区和阴极区积累的空穴和电子面密度. v_0 为逃逸频率, F_h 和 F_e 为阳极区和阴极区的场强, δ'_h 和 δ'_e 分别为零场下空穴和电子的势垒高度, 由内界面处 H' 决定:

$$\delta' = \frac{4\sqrt{2m^*}}{3\hbar e} H'^{3/2}, \quad (9)$$

器件的复合电流可以认为是阳极区和阴极区复合电流之和

$$J_{rc} = J_{rh} + J_{re}, \quad (10)$$

而根据文献 [14]

$$J_{rh} = S_h \Sigma_h J'_e, \quad J_{re} = S_e \Sigma_e J'_h, \quad (11)$$

式中 S 为电荷载流子的复合截面 [15]

$$S_e = \frac{r}{\mu_e F_e} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon F_e}, \quad S_h = \frac{r}{\mu_h F_h} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon F_h},$$

这里 r 为载流子复合系数.

阴极区或阳极区电场与内界面处积累的载流子面电荷密度由 Poisson 方程给出. 如果

$\varepsilon_e = \varepsilon_h = \varepsilon_0 \varepsilon$, 则

$$F_e - F_h = \frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon} (\Sigma_h - \Sigma_e), \quad (12)$$

加在有机层与缓冲层上的电压之和等于整个器件的电压, 即

$$V = F_e L_e + F_h L_h + F_d L_d, \quad (13)$$

在稳态时, 通过器件的电流为阳极(阴极)接触处的注入电流与从相反电极过来的漏电流之和减去阳极区(阴极区)的复合电流为

$$J_c = J_{h0} + J'_e - J_{rh} = J_{e0} + J'_h - J_{re}. \quad (14)$$

2 结果与讨论

2.1 注入势垒对 EL 效率的影响

计算中, 取 $\delta_h = 6.1 \times 10^{-8}$ V/m ($\Phi_h \approx 0.2$ eV), $\delta'_e = 3\delta_h$, $\delta'_h = \delta_h$, $L_e = 60$ nm, $L_h = 50$ nm, $L_d = 1.0$ nm, 其他参数见表 1.

表 1 计算中参数的取值

$\mu_{on}/\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\mu_{op}/\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\chi_{oe}/\text{A} \cdot \text{V}^{-2}$	$\chi_{oh}/\text{A} \cdot \text{V}^{-2}$	v_0/s^{-1}
10^{-13}	10^{-10}	7.94×10^{-10}	4.704×10^{-10}	10^{10}
$A/\text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	B/m^{-2}	$F_0/\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	$F_1/\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	ε
10^{10}	10^{16}	3.6×10^6	1.7×10^6	3

图 2 给出了注入效率 η_{inj} 随着电压和注入势垒之比 (δ_e/δ_h) 的变化曲线. 由图 2 可知, 当 $\delta_e/\delta_h > 2$ 时, 注入效率 η_{inj} 随 δ_e/δ_h 的增大变化很小, 都接近 0, 只有当电压较大时 (>11 V), η_{inj} 随电压的增大才有一定程度增加, 但 η_{inj} 随 δ_e/δ_h 的增大稍有减小; 当 $\delta_e/\delta_h < 2$, $V > 8$ V (可视为起动电压) 时, η_{inj} 随 δ_e/δ_h 的增大急剧减小, 随着电压的增大而快速增大. 即在 $\delta_e/\delta_h = 2$, $V \approx$

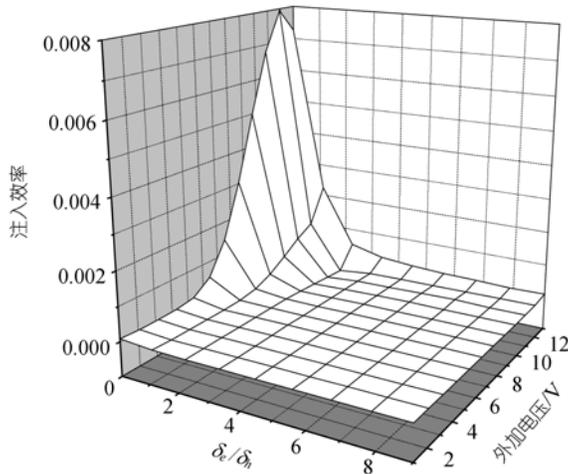


图 2 注入效率随电压和 δ_e/δ_h 的变化曲线

8 V ($\Phi_h \approx 0.2$ eV, $\Phi_e \approx 0.3$ eV)附近 η_{inj} 变化急剧. 这是因为当 M/O 界面势垒较低时, 导电类型是欧姆性质的, 随着能垒的增高, 电流成为接触限制的. 为了确定欧姆接触和接触限制的过渡点, 我们把阳极势垒高度固定在 0.2 eV, 同时变化 δ_e / δ_h 的比值, 即改变阴极势垒高度, 发现在 $\delta_e / \delta_h = 2$ 前后, η_{inj} 计算结果差别较大. 我们认为: 当 $\delta_e / \delta_h < 2$ 时, M/O 界面属于欧姆接触, 电流是空间电荷限制的. 当 $\delta_e / \delta_h > 2$ 时, M/O 界面成为接触限制. 以上结果表明, 对于有效的 OLEDs, M/O 界面势垒要小于 0.3 eV 左右. 这与已报道的结果一致 [16-18].

研究 η_{EL} 随电压和 δ_e / δ_h 变化关系并与图 2 比较后发现, 当取定内界面势垒 ($\delta'_e = 3\delta_h$, $\delta'_h = \delta_h$) 后, η_{EL} 与 η_{inj} 随电压和 δ_e / δ_h 变化曲线很相似, 这表明: 在这种情况下, 注入势垒与电压决定了 η_{EL} 曲线变化的基本趋势.

2.2 内界面势垒对 EL 效率的影响

计算中, 取 $\delta_h = 6.1 \times 10^{-8}$ V/m ($\Phi_h \approx 0.2$ eV), $\delta_e = 1.5\delta_h$, $\delta'_h = \delta_h$, $L_e = 60$ nm, $L_h = 50$ nm, $L_d = 1.0$ nm, 其他参数见表 1.

图 3 给出了阳极区与阴极区复合电流之比 $[\lg(J_{rh}/J_{re})]$ 随电压和内界面势垒之比 (δ'_e / δ'_h) 的变化曲线. 由图 3 可见, 在低电压时, $\lg(J_{rh}/J_{re})$ 随着电压升高急剧增加, 随 δ'_e / δ'_h 增加而快速减小. 这是因为: 尽管这时 J_{rh} 与 J_{re} 的数值都很小, 但相对于阴极区内的复合电流, 阳极区内的复合电流随着电压的增加而增加得更快. 当电压增加到一定值时, $\lg(J_{rh}/J_{re})$ 随电压增加几乎不变, 但随 δ'_e / δ'_h 的增大而有较大程度减小. 我们认为: 这时内界面对电子的阻挡作用变强, 内界面处漏电流密度 J'_e 减小, 在阳极区的复合电流也就越小, 因此 $\lg(J_{rh}/J_{re})$ 也就越来越小. $\lg(J_{rh}/J_{re})$ 随电压增加变化很小, 表明这时内界面势垒 (δ'_e / δ'_h) 对 $\lg(J_{rh}/J_{re})$ 起着决定作用; 当电

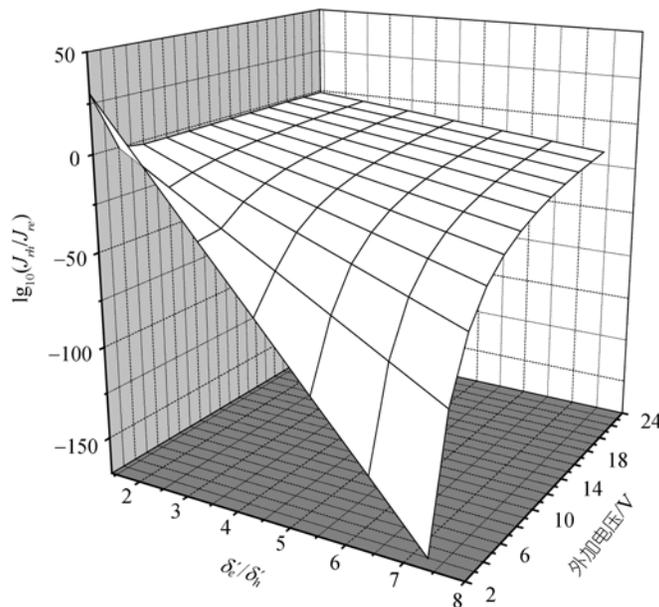


图 3 $\lg(J_{rh}/J_{re})$ 随电压和 δ'_e / δ'_h 的变化曲线

压较低时, $\lg(J_{rh}/J_{re})$ 值为一正数, 这可能反映了器件开启过程中, 存在注入电流较大的不平衡, 造成两个复合区复合效率的较大差别.

图 4 给出了 η_{EL} 随电压和 δ'_e/δ'_h 变化曲线. 由图 4 可见, η_{EL} 随电压的增加先增大后减小; η_{EL} 随 δ'_e/δ'_h 的增大而减小, 但 $\delta'_e/\delta'_h > 2.5$, η_{EL} 的变化趋势变得平缓. 我们认为: 当取定势垒 $\delta_h = 6.1 \times 10^{-8}$ V/m ($\Phi_h \approx 0.2$ eV), $\delta_e = 1.5\delta_h$, $\delta'_h = \delta_h$ 时, 内界面势垒 δ'_e 的增大使漏电流密度 J'_e 减小, 造成阳极区的复合电流减小, 于是 η_R 下降, η_{EL} 必然会随之下降; 但当 $\delta'_e/\delta'_h > 2.5$ (即 H'_e 超过 0.4 eV), 漏电流密度 J'_e 变得很小, J'_e 变化对 η_R 的影响减小, 所以, η_{EL} 随 δ'_e/δ'_h 变化呈现这一平缓趋势, 这时 δ'_e/δ'_h 变化对 η_R 的影响较小, 载流子注入对 η_{EL} 起支配作用.

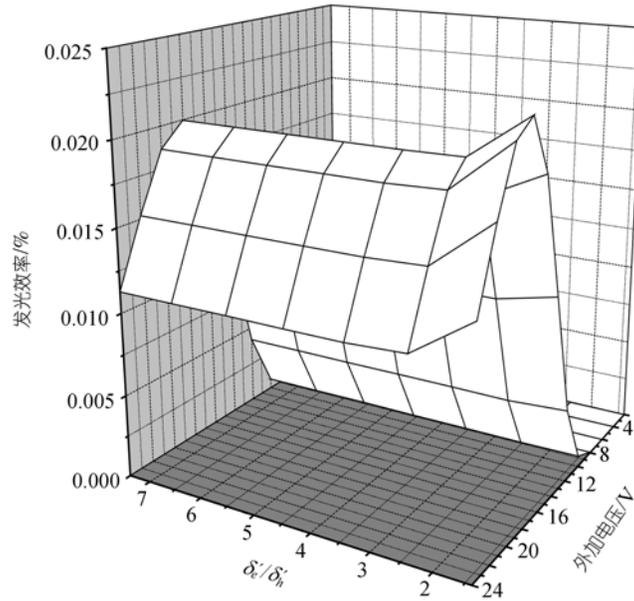


图 4 EL 效率随电压和 δ'_e/δ'_h 的变化曲线

2.3 阳极区厚度变化对 EL 效率的影响

计算中, 取 $\delta_h = 6.1 \times 10^{-8}$ V/m ($\Phi_h \approx 0.2$ eV), $\delta_e = 1.5\delta_h$ (< 0.3 eV), $\delta'_h = 3\delta_h$ ($H'_e > 0.4$ eV), $\delta'_h = \delta_h$, $L = 100$ nm, $L_d = 1.0$ nm, 其他参数见表 1.

图 5 给出了 η_R 随电压和阳极区厚度变化的曲线. 从图 5 可以看出: (i) 当电压较小时 (< 8 V), 随 L_h/L 的增大, η_R 降低; (ii) 当电压超过某一值后 (如 ~ 8 V), η_R 随 L_h/L 的增大呈现上升趋势, 但这一变化不如降低时明显. 这是因为: i) 在较低电压下, 逐渐增加 L_h/L 比值, 即减小阴极区的厚度时, 由于 $\delta'_e = 3\delta_h$, $\delta'_h = \delta_h$, 内截面处电子的势垒较大, 电子难于穿过内截面, 则阳极区复合电流很小. 由于阴极区的厚度减小, 穿过内截面的大量空穴来不及与电子完全复合便通过了阴极区, 阴极区的复合电流减小, 所以 η_R 呈下降趋势; ii) 在较高电压下, 阴极区电场强度增强, 电子的注入更加有效, 阴极区的电子浓度增大, 尽管阳极区厚度的增加, 阴极区

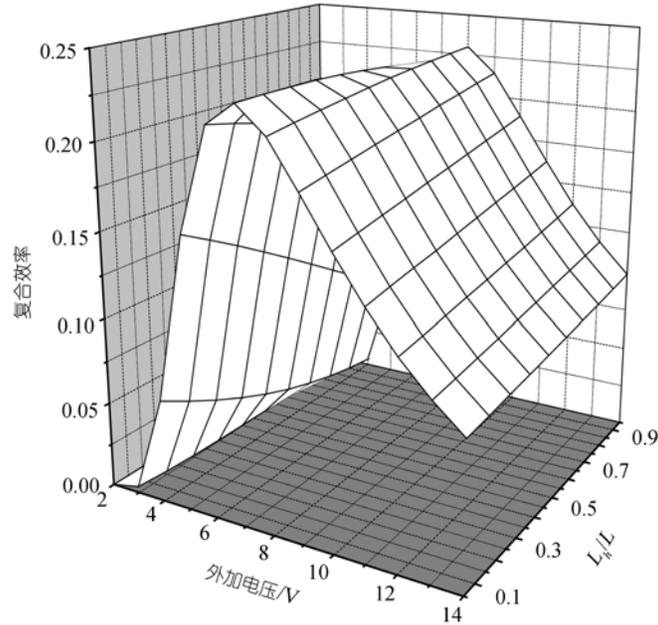
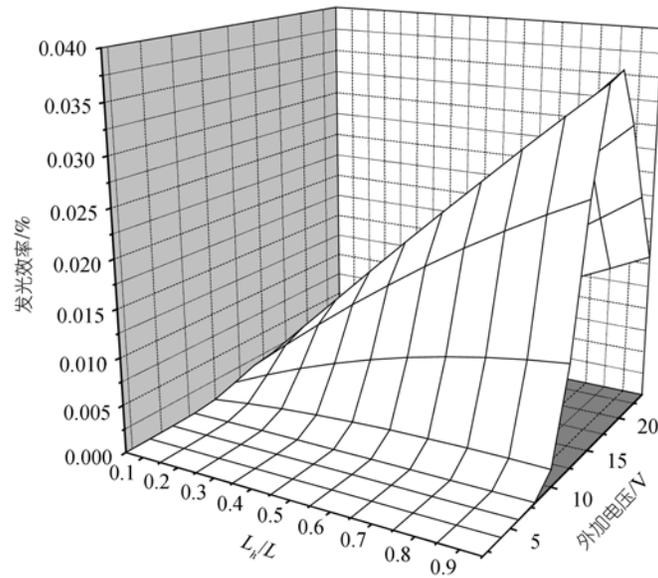


图 5 复合效率随电压和 L_h/L 的变化曲线

复合宽度的减少, 但隧穿内界面后的空穴能在较短距离内即可完全复合. 这时, 复合宽度对 η_R 的影响比电场对电子的注入的影响要小得多. 因此, η_R 呈现上升趋势. iii) 保持 L_h/L 不变, η_R 随电压的增大先增加, 而达到一定电压时出现极大值, 随后降低. 这是因为: 从非线性激发角度看, 产生一个极化子激子的能量小于产生一个正极化子和一个负极化子能量, 激子都离化成正、负极化子所需能量由外电场供给, 外电场小时, 不足以提供解离能量, 只有极化, 这时解离的概率小. 但当电场增加到某一电场 E_C 时, 外场提供足以使激子解离成正、负极化子的能量, 解离概率大, 致使 η_R 降低较多. 因此, 尽管阳极区厚度变化能对 η_R 产生一定的影响, 但相对于电压来说, L_h/L 比值的改变对 η_R 的影响要小得多. 这和激子被强电场直接解离成正、负极化子的实验事实^[19]及电致发光被强电场碎灭的实验结果一致^[20].

图 6 给出了 η_{EL} 随电压和阳极区厚度变化的曲线. 从图 6 看出: 当电压超过启动电压后, 对于给定的 L_h/L , 随电压的增大, η_{EL} 是先增加后降低, 并且随着 L_h/L 的增加, η_{EL} 的这种变化趋势更加明显. 这是因为: 对于给定的注入势垒与内界面势垒, 在较低电压下, 逐渐增加 L_h/L 比值, η_R 呈现下降趋势. 在较高电压下, η_R 随 L_h/L 增加却呈现上升趋势. 我们认为, 在较高电压下, 随着 L_h/L 的增加, 尽管阳极区厚度的增加, 阴极区复合宽度的减少, 但由于阴极区电场增强, 电子的注入更加有效, 阴极区的电子浓度增大, 空穴隧穿内界面后能在较短距离内即可完全复合. 这时, 阴极区复合宽度对 η_R 减小的影响比电场对电子注入增强的影响要小得多. 所以, 在较高电压下, 由于 η_R 随 L_h/L 增加呈上升趋势及电子的注入也有增强趋势, 说明在这种情况下注入与复合都对 η_{EL} 有较大影响.

图 6 EL 效率随电压和 L_h/L 的变化曲线

3 结论

通过考虑引入 LiF 绝缘缓冲层对电子注入势垒的影响,建立了双层有机电致发光器件发光效率的理论模型,讨论了电压、注入势垒、内界面势垒、有机层厚度与器件效率的变化关系。计算表明,金属/有机物界面势垒、有机物/有机物界面势垒及阳极区与阴极区厚度的变化对载流子的注入、复合及器件效率都有一定程度的影响。

参 考 文 献

- 1 Kim Y E, Park H, Kim J J. Enhanced quantum efficiency in polymer electroluminescence device by inserting a tunneling barrier formed by langmuir-blodgett films. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(5): 599—601[DOI]
- 2 Khramtchenkov D V, Arkhipov V I, Bäessler H, et al. Charge carrier recombination in organic bilayer electroluminescent diodes. *J Appl Phys*, 1997, 81(10): 6954—6962[DOI]
- 3 Yang S Y, Xu Z, Wang Z J, et al. Electroluminescence in organic single-layer light-emitting diodes at high fields. *Sci China, Ser F-Inf Sci*, 2001, 44(3): 168—175
- 4 Guo T F, Yang F S, Tsai Z J, et al. Organic oxide/Al composite cathode in efficient polymer light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(11): 113501-1—3
- 5 Hung L S, Tang C W, Mason M G. Enhanced electron injection in organic electroluminescence devices using an Al/LiF electrode. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(2): 152—154[DOI]
- 6 Jabbour G E, Kawabe Y, Shaheen S E, et al. Highly efficient and bright organic electroluminescent devices with an aluminum cathode. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(13): 1762—1764[DOI]
- 7 Park S Y, Lee C H, Song W J, et al. Enhanced electron injection in organic light-emitting devices using Al/LiF electrodes. *Current Appl Phys*, 2001, 1(1): 116—120[DOI]
- 8 Zhao J M, Zhan Y Q, Zhang S T, et al. Mechanisms of injection enhancement in organic light-emitting diodes through insulating buffer. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(26): 5377—5379[DOI]
- 9 Kawabe Y, Morrell M M, Jabbour G E, et al. A numerical study of operational characteristics of organic light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 1998, 84(9): 5306—5314[DOI]
- 10 Kalinowski J, Cocchi M, Giro G, et al. Injection-controlled electroluminescence in organic light-emitting diodes based on

- molecularly-doped polymers: II. Double-layer devices. *J Phys D: Appl Phys*, 2001, 34(15): 2282—2295[DOI]
- 11 Wang X J, Zhao J M, Zhou Y C, et al. Enhancement of electron injection in organic light-emitting devices using an Ag/LiF cathode. *J Appl Phys*, 2004, 95(7): 3828—3230[DOI]
 - 12 郑加金, 华玉林, 印寿根, 等. 掺杂型 Zn(BTZ)₂ 白色有机电致发光器件. *科学通报*, 2004, 49(23): 2426—2430
 - 13 Wang H F, Wang L D, Wu Z X, et al. Efficient single-active-layer organic light-emitting diodes with fluoropolymer buffer layers. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(13): 131113-1—3
 - 14 Yang S Y, Wang Z J, Xu Z, et al. Carriers recombination in bilayer organic light-emitting diodes at high electric fields. *Chem Phys*, 2001, 274(2-3): 267—273[DOI]
 - 15 Albrecht U, Bässler H. Efficiency of charge recombination in organic light emitting diodes. *Chem Phys*, 1995, 199(2-3): 207—214[DOI]
 - 16 Davids P S, Campbell I H, Smith D L. Device model for single carrier organic diodes. *J Appl Phys*, 1997, 82(12): 6319—6325[DOI]
 - 17 Yang S Y, Xu Z, Wang Z J, et al. Recombination efficiency in organic single-layer light-emitting diodes at high field. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(16): 2529—2531[DOI]
 - 18 李宏建, 彭景翠, 许雪梅, 等. 有机电致发光器件中载流子的输运和复合发光. *中国物理*, 2002, 51(2): 430—433
 - 19 Granpner W, Cerullo G, Lanzani G, et al. Direct observation of ultrafast field-induced charge generation in ladder-type poly(para-phenylene). *Phys Rev Lett*, 1998, 81(15): 3259—3262[DOI]
 - 20 Kersting R, Lemmer V, Bakker H J, et al. Ultrafast field-induced dissociation of excitons in conjugated polymers. *Phys Rev Lett*, 1994, 73(10): 1440—1443[DOI]