基于 Alq₃ 的有机电致发光器件温度特性的研究

锁 钊 于军胜* 黎威志 姜双玲 邓 静 蒋亚东*

(电子科技大学光电信息学院, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

* 联系人, E-mail: jsyu@uestc.edu.cn, jiangyd@uestc.edu.cn

摘要 以真空热蒸镀的方法制备了基于八羟基喹啉铝(Alq₃)为发光层的单层和双层有机电致发光器件, 测试了器件在不同温度条件下其电致发光特性的变化, 研究了器件性能的温度特性, 详细分析了温度对器件电流传导机制的影响. 结果表明, 器件的电流-电压特性与陷阱电荷限制电流理论的预测很好地符合. 此外, 由于有机层内载流子迁移率和浓度都随着温度的增加而增加, 导致 Alq₃ 器件的电流随温度单调上升. 不同温度下 Alq₃ 器件的电流传导机制没有改变, 但是电流-电压关系式中的幂指数 m 随温度无规则变化. 由于温度上升会引起 Alq₃ 发光性能衰减, 所以器件的发光亮度随温度略有上升, 而发光效率随温度单调下降. 电致发光光谱随温度上升出现微小的蓝移, 其单色性的降低是来源于有机半导体材料本身的能级特征.

关键词 有机电致发光器件 温度 载流子迁移率 电流传导机制 Alq₃

自从 1987 年 Tang 和 Vanslyke 第一次报道了以芳香二胺 TPD 为空穴传输材料和以 8-羟基喹啉铝(Alq₃)为发光层兼电子传输层的双层有机电致发光器件以来 [1,2], 有关 OLEDs 的研究引起人们越来越大的兴趣, 各国研究人员不断地致力于诸如多色彩大面积显示及器件工作稳定性等方面的性能改进与结构优化 [3~6]. OLEDs 因其自身无可比拟的优点逐渐成为平板信息显示领域的主流. 经过几十年的发展, 人们对 OLEDs 的研究从理论和实际应用上都取得了显著成就, 提出了许多物理模型来解释各种实验现象 [7~10]. 然而, 由于有机半导体材料及结构的复杂性, 这些理论模型都有各自的局限性. 寻求一种完全符合有机器件内部物理机制的理论仍是各国研究人员面临的一个艰巨任务.

影响 OLEDs 器件性能的因素有很多, 包括电场、温度、电极材料等. 由于有机层体内载流子的迁移率和浓度都是温度的函数, 温度的改变会引起这些参数的相应变化, 从而引起不同温度下器件的电学机制或发光机理发生改变. 因此, 温度对 OLEDs 器件光电性能的影响是研究中一个值得考虑的重要内容. 此前在该方面已有不少研究 [11~13], 例如, Wantz 等人 [11] 利用激发态的热激发静态分布模型研究了 OLEDs 的电致发光谱与温度的关系. 此外, 温度变化还会对器件制备中材料本身的物理化学性能产生影响, 从

而间接影响到器件的发光性能.

本文的主要工作在于研究了温度对器件光电特性的影响. 我们基于性能优良的传统绿光发射材料 Alq₃ 为发光层, 通过连续的热蒸镀法制备了单层和双层的 OLEDs 器件, 系统研究了温度变化对器件的电流机制、发光亮度、发光效率和光谱特性的影响, 并从理论上对这些影响产生的原因进行了分析解释.

1 实验

1.1 器件制备

制备了下面三种结构的器件:

A, Mg:Ag/Alq₃ (70 nm)/Mg:Ag (单电子载流子器件);

B, ITO/Alq₃ (100 nm)/Mg:Ag (ITO 单层器件);

C, ITO/NPB (40 nm)/Alq₃ (90 nm)/Mg:Ag (NPB/Alq₃ 双层器件).

我们将以上各器件分别标识为 A, B, C 以便于叙述. 对器件 A, 选用表面平整的玻璃基片做基底, 依次使用洗涤剂溶液、去离子水、乙醇、丙酮超声清洗各 20 min, 然后用大量去离子水冲洗干净, 最后用干燥氮气吹干, 然后置于 OLED-V 型多功能有机成膜设备依次进行金属电极和有机层 Alq₃ 的真空蒸镀. 其中作为阳极的 Mg:Ag(10:1) 合金的厚度约 30 nm, 呈半透明态以观察器件可能出现的发光. 对于器件 B 和

2007-07-21 收稿, 2007-09-16 接受

国家杰出青年科学基金(批准号: 60425101)、教育部新世纪优秀人才计划(批准号: NCET-06-0812)和电子科技大学中青年学术带头人计划(批准号: 060206)资助项目

C, 选用方阻为 $\sim 10 \Omega/\square$ 的ITO玻璃作为阳极, 用与器件A的基片相同的洗涤步骤清洗后, 在 30 Pa的气压下进行氧等离子体溅射清洗约 10 min. 一般来说, 经过氧等离子体处理过后的基片的空穴注入能力可以得到改善^[14~16], 未经处理的ITO的功函数为 4.4~4.7 eV, 处理过的基片则可以提高到 4.7~5.0 eV(本研究中为 4.8 eV)^[17]. 预处理结束待冷却至室温后移入镀膜室, 再依次连续蒸镀各有机层和金属阴极. 蒸镀有机薄膜NPB, Alq₃与电极Mg:Ag的真空气度分别为 $<4 \times 10^{-6}$ 和 $<3 \times 10^{-5}$ Torr (1 Torr=133.3 Pa), 蒸发速率分别控制为 0.1~0.2 nm/s和 ~ 1 nm/s, 由置于基片架附近的石英晶体振荡器监测.

1.2 器件表征

在大气和室温环境下, 采用 Keithley 4200SCS 半导体测试系统以及 ST-86LA 屏幕亮度计测试电流密度-电压及亮度-电压特性, EL 光谱用 OPT-2000 光谱光度计测试. 不同温度下器件特性的测试则在具备湿热转换功能的高低温试验箱 ESL-02KA 中进行, 温度测试范围为 293~393 K. 各器件的有效面积为 $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$.

2 结果与讨论

2.1 器件的电流-电压关系测试

图1为器件A~C在不同温度条件下的电流-电压(I - V)特性曲线(误差精度在 10^{-9} 以内). 各器件在阳极和阴极分别加上正负电压以使其正常工作.

从图1可以看出, 温度对于各器件电流有显著影响. 所有的 I - V 曲线符合典型的二极管特性, 随着温度升高, 相同电压下器件电流单调增加. 对于器件A, 在整个测试过程中始终没有观察到器件发光, 因此相同电压下器件电流随温度的增加是来自电子载流

子的贡献, 这也证明该器件的确为单电子载流子器件. 该器件的阳极结构只是将注入少量空穴的 ITO 电极改变为抽取电子的 MgAg 电极, 不会影响到整个器件的电流特性, 其电流是由陷阱电荷限制电流(TCLC)或空间电荷限制电流(SCLC)决定的体限制电流. 我们知道, 半导体中的电流密度由下式决定:

$$J = qn\mu\left|\vec{E}\right| + qD\nabla\Delta n, \quad (1)$$

其中 q 为电子电荷, n 为载流子浓度, μ 为载流子迁移率, $\vec{E}$ 为电场强度, D 是扩散系数, Δn 为浓度改变量. 从(1)式可以看到, 电流密度正比于载流子迁移率. 同时, 由于载流子迁移率与温度相关, 且二者之间有如下式所示的负指数关系^[12], 所以电流随温度的上升而增大.

$$\mu(T) = \mu_0 \exp\left(-\frac{\Delta}{k_0 T}\right), \quad (2)$$

其中 μ_0 为指前因子, Δ 为载流子热激活能, 都是只与材料相关的参数, k_0 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度. 从(2)式可以看出, 在较高温度时载流子迁移率具有较大值, 导致器件电流的相对偏大.

对于器件B, 电流随温度的增加既有多数载流子电子的贡献, 也应该有少数载流子空穴的贡献, 且不同温度下各器件电流的差异明显比单电子载流子器件A中的差异小很多, 这表明空穴载流子随温度增加对器件电流增加的贡献要比电子大. 空穴的这种贡献一方面是因为其迁移率随温度增加而增加, 另一方面是在单层 Alq₃ 器件中, 空穴电流是属于电极注入限制的, 根据 Richardson-Schottky 热电子发射模型, 由电极注入限制的热电子发射电流表达式所示:

图1 器件A~C在不同温度下的电流-电压关系

(a) 器件A; (b) 器件B; (c) 器件C

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{k_0 T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

式中 A^* 为有效 Richardson 常数, ϕ_b 为电子注入势垒, V 为外加偏置电压. 可见, 空穴电流随温度的增加迅速增加. 但由于它只占器件电流的小部分, 因此器件电流随温度的增幅要比单电子载流子器件小很多.

对于器件 C, 电流变化趋势与单层器件 B 十分类似, 即随温度升高, 相同电压下器件电流增大, 而增加的幅度不如单电子载流子器件.

为了考察温度对器件电流机制的影响, 我们在对数坐标下对器件电流-电压关系进行了数值线性拟合, 结果如图 2 所示.

从图 2 中可以明显看出, 不同温度下器件 A 和 B 的电流-电压关系由两部分组成: 低电压下的小斜率曲线和高电压区的大斜率曲线(斜率的变化范围为 5~6). 根据 Scaling 定律, 考虑到陷阱能级对载流子的捕获和载流子浓度以及电场强度的空间不均匀性, 可以将有机半导体中的 I - V 特性表示成如下的形式:

$$I \propto \frac{V^{m+1}}{d^{2m+1}}, \quad (4)$$

其中 V 为外加电压, d 为有机层的厚度, m 为与陷阱分布相关的常数. (4) 式是区分器件电流为接触限制还是空间电荷限制的一个标准 [18]. 由此我们可以得出, 陷阱电荷限制电流(TCLC)理论准确地预测了这些器件中的电流传导机制: 低电压区电流线性变化的欧姆传导和高电压区电流随电压指数非线性变化的 TCLC 传导. 欧姆传导电流取决于低压下热生自由载流子超过了注入电荷的贡献, 而 TCLC 电流则是由陷阱的态密度和能量分布所决定 [19-21].

对于器件 A, 从图 2(a)中还可以看到, 当电压较

低时, 器件电流反而随温度上升而下降, 其原因可能在于高的温度加强了有机材料的晶格振动, 加大了对载流子的散射作用, 导致器件电流有所降低. 但随着电压的升高, 注入载流子的急剧增加补偿了晶格散射对电流的减小, 所以当电压进入 TCLC 区域后, 这种散射作用便可以忽略掉. 此外还可以看到, 温度越高, 器件从欧姆电导区进入到 TCLC 区的转变电压越小. 本征载流子浓度与温度的关系满足如下关系:

$$n_0 = N_{\text{LUMO}} \exp\left(-\frac{E_{\text{LUMO}} - E_{\text{Fn}}}{k_0 T}\right), \quad (5)$$

其中 N_{LUMO} 为 LUMO 带有效状态密度, E_{LUMO} 为 LUMO 能级, E_{Fn} 为准费米能级. 如果假设 N_{LUMO} 不随温度变化, 则载流子浓度随温度按 $\exp(-1/T)$ 形式增长. 根据欧姆传导和 TCLC 传导的电流密度表达式

$$J = q\mu_n n_0 V / d, \quad (6)$$

$$J_{\text{TCLC}} = N_{\text{LUMO}} \mu_n \left(\frac{\varepsilon m}{N_t q(m+1)} \right)^m \left(\frac{2m+1}{m+1} \right)^{m+1} \frac{V^{m+1}}{d^{2m+1}}, \quad (7)$$

我们可以得到从欧姆到 TCLC 的转变电压 $V_{\Omega\text{-TCLC}}$ 为

$$V_{\Omega\text{-TCLC}} = \left(\frac{n_0}{N_{\text{LUMO}}} \right)^{1/m} \frac{(qN_t d^2 / m\varepsilon)(m+1)^{(2+1/m)}}{(2m+1)^{(1+1/m)}} \approx \left(\frac{n_0}{N_{\text{LUMO}}} \right)^{1/m} \left(\frac{qN_t d^2}{\varepsilon} \right), \quad (8)$$

式中 $m = T_t / T$, T_t 为呈指数分布陷阱的特征温度, ε 为介电常数, N_t 为总的陷阱密度. (8) 式的右边部分在 m 值较大时成立. 将(5)式代入(8)式, 可以得到(9)式:

$$V_{\Omega\text{-TCLC}} \approx \exp\left(-\frac{(E_{\text{LUMO}} - E_{\text{Fn}})}{k_0 T_t}\right) \left(\frac{qN_t d^2}{\varepsilon} \right). \quad (9)$$

图 2 器件 A~C 的 I - V 曲线的线性拟合结果

(a) 器件 A; (b) 器件 B; (c) 器件 C

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2007-52-21-2569>

从以上的理论分析可以看到, 转变电压 $V_{\Omega\text{-TCLC}}$ 似乎与绝对温度 T 无关. 不过, 费米能级随温度变化会发生移动, 因此可以推测温度对该转变电压会产生间接影响. 通过数学计算, 可以知道转变电压与温度成正比关系. 然而实验结果却表明在实际器件中并非如此. 这种实验结果与理论推测的偏移是由许多复杂因素引起的. 我们推测, 由于温度升高会引起器件中载流子浓度的增加, 从而提高了载流子的陷阱填充能力, 使得电流更容易达到 TCLC 机制所需要的条件. 要弄清与这些实验结果相关的器件微观物理机制, 还需要做进一步的努力和探索.

同时, 从图 2(a)中可以看到, TCLC 的 I - V 关系中的指数 m 随温度上升而减小. 根据(7)式, 可知幂指数与温度存在倒数关系. 图 3 为根据拟合结果做出的 m - $1/T$ 关系曲线. 从图中可以看出, m 与 $1/T$ 具有较好的线性比例关系, 从而很好地验证了器件中 TCLC 电流的存在. 根据图 3 的曲线斜率可以求出 Alq_3 中的陷阱分布特征温度 T_i 1980 K, 与文献报道的结果比较接近 [19].

图3 根据拟合结果得到的 m - $1/T$ 关系

对于器件 B, 拟合结果表明温度没有影响到单层 Alq_3 器件的电流机制. 不过器件在 TCLC 区域时, 电流与电压的幂指数关系在不同温度下不像单电子器件 A 那样与温度呈单调变化关系, 而是无规律变化, 这来源于陷阱分布的复杂性.

对于器件 C (为清晰起见, 选择了 293, 343 和 373 K 三个数据), 随着温度的上升, I - V 关系的线性拟合从 293 K 时的两段——(近)欧姆电导和 TCLC 电导区,

变化为较高温度时的三段——(近)欧姆电导区, TCLC 电导区以及 TCLC-SCLC 过渡区(拟合直线斜率从 323~373 K 分别为 1.54, 1.62, 1.66, 1.70, 1.59, 1.62; 5.21, 5.61, 5.94, 6.19, 6.20, 6.56; 3.45, 3.39, 3.22, 3.07, 3.20, 3.12). 较高温度下 TCLC-SCLC 过渡区的出现可能是由于器件 C 的结构中引入了空穴传输层 NPB, 更有利于载流子的传输, 使得温度越高, 有机层中的载流子浓度越大, 越容易达到陷阱填满限制(TFL)的条件. 同时, 器件 C 的 m 值单调增加, 与器件 A 截然相反, 也与器件 B 的随机分布不同, 这同样是由有机层内陷阱分布的复杂性决定的. 因此对决定陷阱分布的机制需要做更详尽的研究.

2.2 器件的亮度-电压关系及流明效率

由于测试器件 A 未观察到发光, 因此我们在此仅讨论器件 B 和 C 的发光情况. 图 4 为器件 B 和 C 在不同温度下的亮度-电压(L - V)关系和流明效率曲线.

从图 4 中可见, 随着温度的上升, 相同电压下器件的亮度略有增加, 但增长幅度不大(有时候随温度升高反而降低), 如对于器件 B, 15 V 时器件在 363 K 的亮度为 222 cd/m^2 , 在 293 K 的亮度为 200 cd/m^2 , 增幅只有 10%, 远远低于电流的增长幅度, 综合效应是器件效率的降低. 对于器件 C, 15 V 时器件在 293 K 的亮度为 5032 cd/m^2 , 而在 373 K 器件的亮度为 4947 cd/m^2 , 表明亮度随温度的升高反而降低. 显而易见, 对于单层和双层器件来说, 温度的上升并非使器件亮度和效率保持同步增加. 我们推测这很可能是因为温度上升使得 Alq_3 的发光性能老化更快. 其老化过程如图 5 所示, Alq_3 分子吸附空气中的水会发生如下化学反应, 其产物 8-Hq 中的 q^- 极易被氧化而生成无发光性能的光淬灭剂 [22~24]. 而温度的上升会加速上述反应, 从而加速 Alq_3 的老化 [24]. 而对于双层器件性能的下降, 除了跟发光层的老化有关以外, 另外一个重要原因在于空穴传输层 NPB 相对较低的玻璃化转变温度(T_g 363 K), 随着温度升高, 非晶态 NPB 的均匀性会由于其结晶化而遭到破坏, 导致更易发生相态的变化 [25].

2.3 不同温度下 Alq_3 器件的 EL 光谱

图 6 为电致发光光谱-温度特性曲线, 为清晰起见, 图 6(a)中只示出了双层器件三个典型温度下的归一化 EL 光谱. 图 6(b)为单层和双层器件在不同温度下的 EL 谱半高全宽.

图 4 器件 B 和 C 在不同温度下的亮度-电压(L - V)关系和流明效率曲线
(a) 器件 B; (b) 器件 C

图 5 Alq_3 分子与水分子反应形成 8-羟基喹啉和其他副产物

图 6 器件的光谱-温度特性关系

(a) 不同温度下双层 Alq_3 器件的 EL 光谱; (b) 不同温度下单层和双层 Alq_3 器件的 EL 光谱半高宽

从图 6(a)中可以清楚地看到,在该坐标尺度下,不同温度下器件的 EL 光谱基本完全重合。尽管随着温度的升高出现了谱峰的微小蓝移,但几乎所有的谱峰都位于 530~540 nm 的范围内,与 Alq_3 的典型 EL 谱峰值相吻合,表明温度因素对器件电致发光光谱的影响甚小。但这并不意味着温度对器件的 EL 谱没

有影响。在我们的测试温度范围内,蓝移现象并不明显。然而,我们仍然可以推测在光谱的移动和温度之间应该存在某种既定关系。我们正致力于这一方面的研究,文献[26]和[27]对于该问题的研究已取得了令人欣喜的成果。

从图6(b)可以看到,Alq₃器件的EL光谱半高宽在测试温度范围内是随机分布的,这与我们常温下的测试结果完全一致。因此,温度对Alq₃器件色纯度的影响在通常的工作温度下用肉眼是难以察觉到的,这与文献[26]的结果是一致的。此外,Alq₃的光谱半高宽约为100~120 nm,具有一定的分布范围而非一确定值,这是由有机半导体材料本身的性质所决定的。由于有机半导体只有离散分布的HOMO和LUMO能态,而没有像无机半导体那样具有完整能带结构,这就决定了其带隙宽度相对分散,而不是像无机半导体具有单一能隙值。

3 结论

制备了以Alq₃为发光层的单层和双层有机电致发光器件,测试了器件在不同温度下的电致发光特性。研究结果表明,由于有机层内载流子迁移率和浓度都是温度的增函数,Alq₃器件的电流也随温度单调上升。温度对Alq₃器件的电流机制基本没有影响,但Alq₃层内陷阱分布的复杂性导致幂指数 m 随温度无规变化。器件的发光亮度随温度增幅不大,而发光效率则随温度单调下降,这可能源自高温下Alq₃发光性能的老化。温度与Alq₃器件的EL光谱之间基本上没有直接的依赖关系。

参 考 文 献

- Tang C W, Vanslyke S A. Organic electroluminescent diodes. *Appl Phys Lett*, 1987, 51(12): 913—915[DOI]
- Ziemelis K. Glowing development. *Nature*, 1999, 399: 408—409[DOI]
- 郝金刚, 邓振波. 利用超薄空穴阻挡层获得稳定白光器件. *科学通报*, 2006, 51(17): 2094—2096
- Li J, Sano T, Hirayama Y, et al. Multilayer green polymer light emitting diodes with improved efficiency and lifetime. *J Appl Phys*, 2006, 100(3): 034506[DOI]
- Grozea D, Turak A, Yuan Y, et al. Enhanced thermal stability in organic light-emitting diodes through nanocomposite buffer layers at the anode/organic interface. *J Appl Phys*, 2007, 101(3): 033522[DOI]
- Jiang Y, Wang J, Yu J, et al. High-efficiency white organic light-emitting devices based on phosphorescent iridium complex and NPB emitters. *Jpn J Appl Phys*, 2007, 46(2): 523—525[DOI]
- Parker I D. Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 1994, 75(3): 1656—1666[DOI]
- Burrows P E, Shen Z, Bulovic V, et al. Relationship between electroluminescence and current transport in organic heterojunction light-emitting devices. *J Appl Phys*, 1996, 79(10): 7991—8006[DOI]
- Chang S H, Chang Y C, Yang C H, et al. Numerical simulation of optical and electronic properties for multilayer organic light-emitting diodes and its application in engineering education. In: Streubel K P, Yao H W, Schubert E F, et al, eds. *Proceedings of SPIE Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications X*. Bellingham, USA: SPIE, 2006. 61340R
- Zhang X L, Yang S Y, Lou Z D, et al. Dynamic electrical characteristics of organic light-emitting diodes. *Acta Phys Sin*, 2007, 56(3): 1632—1635
- Wantz G, Hirsch L, Huby N, et al. Temperature-dependent electroluminescence spectra of poly(phenylene-vinylene) derivatives-based polymer light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 2005, 97(3): 034505[DOI]
- Kumar A, Bhatnagar P K, Mathur P C, et al. Temperature and electric-field dependence of hole mobility in light-emitting diodes based on poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylene vinylene]. *J Appl Phys*, 2005, 98(2): 024502[DOI]
- Oliveira F A C, Cury L A, Righi A, et al. Temperature effects on the vibronic spectra of BEH-PPV conjugated polymer films. *J Chem Phys*, 2003, 119(18): 9777—9782[DOI]
- Kim J S, Cacialli F, Cola A, et al. Hall measurements of treated indium tin oxide surfaces. *Synth Met*, 2000, 111: 363—367[DOI]
- Nguyen T P, Rendu P L, Dinh N N, et al. Thermal and chemical treatment of ITO substrates for improvement of OLED performance. *Synth Met*, 2003, 138(1-2): 229—232[DOI]
- Wu C C, Wu C I, Sturm J C, et al. Surface modification of indium tin oxide by plasma treatment: An effective method to improve the efficiency, brightness, and reliability of organic light emitting devices. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(11): 1348—1350[DOI]
- Yu J, Li W, J Y, et al. Bright-yellow organic light-emitting device using novel silole derivative as emitter. *Jpn J Appl Phys*, 2007, 46: L31—L33[DOI]
- 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]
- Burrows P E, Shen Z, Bulovic V, et al. Relationship between electroluminescence and current transport in organic heterojunction light-emitting devices. *J Appl Phys*, 1996, 79(10): 7991—8006[DOI]
- Chiguvarre Z, Parisi J, Dyakonov V. Current limiting mechanism in indium-tin-oxide/poly(3-hexylthiophene)/aluminum thin film devices. *J Appl Phys*, 2003, 94(3): 2440—2448[DOI]
- Brütting W, Berleb S, Mückl A G. Space-charge limited conduction with a field and temperature dependent mobility in Alq light-emitting devices. *Synth Met*, 2001, 122: 99—104[DOI]
- Papadimitrakopoulos F, Zhang X M, Higginson K A. Chemical and morphological stability of aluminum tris(8-hydroxyquinoline)(Alq₃): Effects in light-emitting devices. *IEEE J Sel Top Quant Electron*, 1998, 4(1): 49—57[DOI]
- Papadimitrakopoulos F, Zhang X M, Thomsen D L, et al. A chemical failure mechanism for aluminum(III) 8-hydroxyquinoline light emitting devices. *Chem Mater*, 1996, 8(7): 1363—1365[DOI]
- Joseph S. *Organic Light-Emitting Devices: A Survey*. New York: Springer, 2004. 72—73
- Van Slyke S A, Chen C H, Tang C W. Organic electroluminescent devices with improved stability. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(15): 2160—2162[DOI]
- Wantz G, Hirsch L, Huby N, et al. Temperature-dependent electroluminescence spectra of poly(phenylene-vinylene) derivatives-based polymer light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 2005, 97(3): 034505[DOI]
- Wantz G, Hirsch L, Dautel O J. Temperature-dependent electroluminescence spectra of organic light emitting diodes based on thermally evaporated bis-imido-phenylene vinylene derivative. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(16): 162104[DOI]