

文章编号: 0253-2239(2006)04-0585-6

有机材料激子发光的温度特性

钟高余 林 剑 王美良 夏亿劫 尹 琨 黄 维

(复旦大学先进材料研究院, 上海 200433)

摘要: 基于实验和理论模拟研究了 12~320 K 温度范围内八羟基喹啉铝[tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum, Alq]和一种高效红光染料甲基-2-叔丁基-6-(1,1,7,7-四甲基久咯呢定基-9-烯基)-4H-1-吡喃[4-(dicyanomethylene)-2-t-butyl-6(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4H-pyran, DCJTB]的光致发光(photoluminescence, PL)随温度的变化,提出三种不同电荷分离程度的激子参与的 Alq 的稳态光致发光过程,通过拟合参量得到了三种激子的能量差值和辐射复合几率之比,观察并解释了 DCJTB 发光光谱从 200 K 以下到室温的升温过程中发生的蓝移。认为变温光致发光有可能用于评估材料的发光和导电性能,比较并讨论了有机和无机发光材料激子发光的温度特性,认为低温下小分子发光材料倾向于分子态,随温度升高逐渐向半导体态转变,Alq 在 150~190K 之间开始发生这种转变,而 DCJTB 则从 300~320 K 开始。

关键词: 发光学; 有机半导体; 变温光致发光; 激子

中图分类号: O482.31 文献标识码: A

Temperature-Dependent Luminescence Originating from the Recombination of Excitons in Organic Light-Emitting Materials

Zhong Gaoyu Lin Jian Wang Meiliang Xia Yijie Yin Kun Huang Wei

(Institute of Advanced Materials, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract: Based on experimental measurement and theoretical simulation, the temperature dependence of the photoluminescence (PL) of amorphous thin films of tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq) and 4-(dicyanomethylene)-2-t-butyl-6(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4H-pyran (DCJTB) has been studied. It is proposed that three types of excitons with different charge separations are involved in the steady state PL process, which, with increasing energy, are accordingly called intra-molecule localized, intra-molecule delocalized, and inter-molecule delocalized, while the corresponding radiative decay rates are relatively low, high, and negligible, respectively. The blue shift of the DCJTB PL spectra with increasing temperature has been observed and explained. It is suggested that the temperature-dependent PL could be possibly used to evaluate the radiative and conductive characteristics of organic emitters and to distinguish whether a given material would be of molecular or semiconductor properties.

Key words: luminescence; organic semiconductor; temperature-dependent photoluminescence; exciton

1 引 言

目前,有机发光器件(organic light-emitting device, OLED)极具应用前景而被广泛研究。八羟基喹啉铝(Alq)就是一种有机小分子发光材料的典型代表。一般认为,Alq 等有机小分子发光器件的发光来自于富兰克尔(Frenkel)激子的复合(富兰克尔激子即局域在单个分子上的电子-空穴对)^[1]。在有机小分子发光材料中,激子的发光随温度变化而变化。温度从几 K 升高到室温过程中,有一个发光

增强过程,有的材料还有增强后再减弱的过程^[2~8],这与无机半导体激子发光的温度特性刚好相反,无机半导体激子的发光从几 K 升高到室温的过程中通常一直在减弱^[9,10]。对上述有机无定形薄膜与无机半导体之间激子发光的不同温度特性,目前还没有很清楚的解释,对有机薄膜的发光随温度的变化也存在一些争议^[2,3]。

Saha^[3]认为,Alq 电致发光的温度特性源于低温下浅陷阱中的电子随温度升高将逐渐脱陷并与可

作者简介: 钟高余(1971~),男,博士,复旦大学讲师,主要从事有机发光方面的科研和开发工作。

E-mail: gyzhong@yahoo.com, gyzhong@fudan.edu.cn

收稿日期: 2005-05-09; 收到修改稿日期: 2005-06-29

运动的空穴复合,导致发光增强;同时,在更高温度下深陷阱中的空穴随温度升高而活化,与可移动的电子复合,发光继续增强,这一解释无法理解更高温度下发光减弱这一现象。Curry^[2]研究了 Alq 发光随样品温度和光致发光的激发波长而改变的特点,提出分子中包括三线态激子在内的三种能态激子参与了发光,发光强度取决于各能态上的随温度的变化的激子数和该能态激子的复合速率。但是从 Alq 的三线态发光光谱来看^[11~13],其三线态发光峰在 700 nm,而通常的 Alq 薄膜稳态光致发光谱中几乎观察不到 700 nm 的发光峰,可见三线态发光对 Alq 的稳态光致发光几乎没有贡献。虽然富兰克尔激子对有机材料的发光至关重要,但是它对激子的温度特性的影响还没有被详细地描述,而电荷转移 (Charge transfer, CT) 激子(一种更加离域、位于相邻分子并束缚在一起的电子-空穴对)在光致发光过程中的作用几乎没有被考虑^[14],特别是没有考虑到电荷转移激子的形成受温度影响,从而导致发光也受到温度影响。

本文测量了 Alq 和 DCJTb 在 12~320 K 范围内变化温度的光致发光光谱。根据激子发光的机理推导了一个表达式,并以此拟合了实验数据,根据拟合参量解释了有机材料激子发光的温度特性,以及有机、无机发光材料激子发光温度特性的异同。

2 实 验

采用抛光硅片作为样品的基底,分别经过丙酮、酒精、去离子水各 10 min 的超声清洗等预处理过程。用有机蒸发沉积法在基底上生长了一层有机小分子薄膜,整个薄膜生长过程在真空度优于 2×10^{-5} Pa 的真空腔体中完成。实验共有两种样品,一为厚度 90 nm 的 Alq 薄膜;二为厚度 100 nm 的 DCJTb 薄膜。薄膜长好后透过石英视窗进行原位光致发光谱测试。然后立即置于控温腔体中(LakeShore 321 Autotuning Temperature Controller and Cooling System of APD Cryogenics Inc.)进行光致发光谱测试,腔体保持约 10^{-2} Pa 的真空度。变温光致发光的入射激发光为波长 441.6 nm 的 He-Cd 激光束,保证激光功率不至于破坏样品发光性能,并在 10~80 mW 的范围内可调。样品温度在 12~320 K 变化。光致发光谱测试系统为 PC1000 spectrometer of Ocean Optic Inc。在维持入射激光功率恒定,光路不变的情况下,调节样品温度,在不同温度下测量得到有机薄膜的光致发光谱。

3 结果与讨论

图 1 为 Alq 薄膜光致发光光谱积分强度随温度的变化。方块数据点为实验测得的数据。

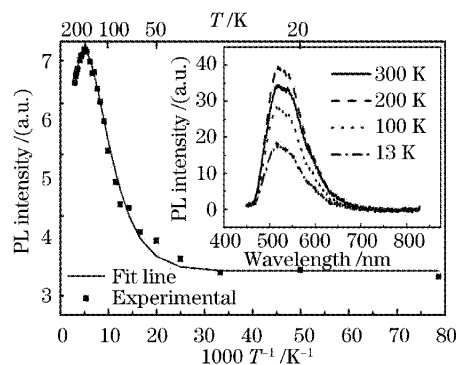


图 1 Alq 薄膜光致发光光谱积分强度随温度倒数的变化。方块点为实验数据

Fig. 1 Integrated PL intensity vs temperature reciprocal of Alq thin films. Inset shows the PL spectra at different temperatures

根据发光强度随温度变化的趋势,大致可以分为三个温度区间,从 12K 到约 50 K,发光强度几乎不变,从约 50 K 到约 190 K,随温度升高发光增强超过 2 倍,从约 190 K 到 320 K 随温度升高发光减弱约 10%。这与文献^[3]中电致发光随温度变化的趋势部分地相似。插图为几种温度下(13 K, 100 K, 200 K, 300 K) Alq 薄膜的光致发光光谱,可以看出,这些不同温度下 Alq 薄膜的光致发光谱形状变化很小。主图中的实线为根据我们的模型所拟合的结果。

如图 2 所示,在 Alq 等有机发光材料分子中,基态电子处于最高已占有分子轨道(Highest occupied molecule orbit, HOMO,相当于无机半导体中的价带)上,电子被激发以后可能处于最低未占有分子轨道(Lowest unoccupied molecule orbit, LUMO,相当于半导体导带),并且可能与原来配对的空穴束缚在一起,形成局域的激子态。设基态能量为 E_0 ,为了解释图 1 所示 Alq 光致发光的温度依赖性,设 Alq 激子按能量间隔大小分为 3 类,按能量递增顺序依次为 E_1, E_2, E_3 。材料总分子数为 n ,其中处于基态的分子数为 n_0 ,处于 E_1, E_2, E_3 能态的激子数目分别为 n_1, n_2, n_3 。各能态间能量的差值为 $E_{12} = E_2 - E_1, E_{13} = E_3 - E_1$,为了简化推导,可以假设基态分子被激发到高能态的总速率是不随温度变化的、只与激发光源及材料吸收性质有关的常量 K_{up} (这里的激发速率和消激发速率均为相对值,因此可

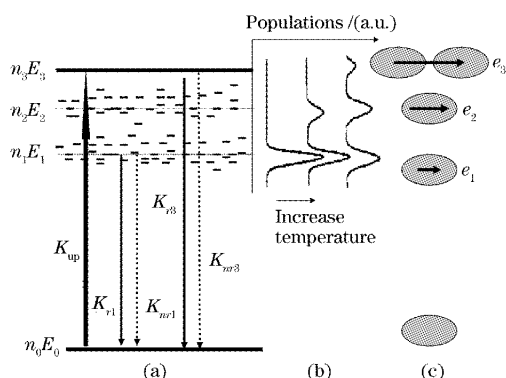


图2 有机发光材料变温光致发光模型示意图。Alq分子中电子的能态(a)不同温度下各激发态上的布居数示意图(b)不同能态下的电子跃迁示意图(c),箭头长度表示跃迁偶极矩大小,箭头方向表示电子的偶极跃迁方向

Fig. 2 Schematic diagram of the model on the PL of organic light-emitting materials with varying temperature. The electronic energy states in Alq molecules (a) the populations in the states at different temperatures (b) the electronic transition at different energy levels (c). The arrow shows the magnitude and direction of the dipole moment transition

以假设 K_{up} 为常量)。 E_1 能态的激子向基态辐射跃迁和非辐射跃迁的速率分别为 K_{r1} 和 K_{nr1} , 余类推。在实验过程中激发光是稳定的, 并且不足以破坏材料的发光性能。材料分子的激发与复合处于准平衡状态。由于材料的分子总数是处于基态和所有激发态的分子数之和, 可以得到

$$n = \sum_{j=0}^3 n_j, \quad (1)$$

根据光的激发和复合平衡可以得到

$$n_0 K_{up} = \sum_{j=1}^3 n_j (K_{rj} + K_{nrj}), \quad (2)$$

不同能量状态的激子服从波尔兹曼 (Boltzmann) 分布^[2], 因此

$$n_j = n_1 \exp(-E_{1j}/K_B T), \quad (j = 2, 3) \quad (3)$$

其中 K_B 为波尔兹曼常量, T 为样品的绝对温度。

光致发光总的强度应为各能态激子发光强度之和:

$$I = \sum_{j=1}^3 n_j K_{rj}, \quad (4)$$

由以上(4)式可以计算得到

$$I = I_0 \frac{1 + A_2 \exp(-E_{12}/K_B T) + A_3 \exp(-E_{13}/K_B T)}{1 + C_2 \exp(-E_{12}/K_B T) + C_3 \exp(-E_{13}/K_B T)}, \quad (5)$$

其中 $I_0 = \frac{nK_{up}K_{r1}}{K_{up} + K_{r1} + K_{nr1}}$, 为与分子数 n 成正比, 与激发速率和最低激发态的退激发速率有关的常量。 $A_j = K_{rj}/K_{r1}$ ($j = 1, 2, 3$), 为 E_j 激子和 E_1 激子的辐射复合几率之比, A_j 越大, 表明单位数目的 E_j 激子与 E_1 激子的发光强度之比越大。 C_j 为一常量, 与激发速率 K_{up} , E_1 、 E_j 激子退激发几率 K_{r1} , K_{nr1} , K_{rj} , K_{nrj} 等有关, 即 $C_j = \frac{K_{up} + K_{rj} + K_{nrj}}{K_{up} + K_{r1} + K_{nr1}}$ ($j = 1, 2, 3$)。 这些均为与材料的吸收和发光性质及入射激发光有关的常数。(5)式可以扩展到具有 i 类激子的情况, 计算可得

$$I = I_0 \frac{\sum_{j=1}^i A_j \exp(-E_{1j}/K_B T)}{\sum_{j=1}^i C_j \exp(-E_{1j}/K_B T)}, \quad (6)$$

(6)式中的字母意义同(5)式。通过分析还可以得到, 各类激子数目之比为

$$n_1 : n_2 : \dots : n_i =$$

$$1 : \exp(-E_{12}/K_B T) : \dots : \exp(-E_{1i}/K_B T), \quad (7)$$

以及各类激子的发光强度之比为

$$I_1 : I_2 : \dots : I_i =$$

$$1 : A_2 \exp\left(-\frac{E_{12}}{K_B T}\right) : \dots : A_i \exp\left(-\frac{E_{1i}}{K_B T}\right). \quad (8)$$

利用(6)式可以对实验数据进行拟合。图1中实线即拟合结果。拟合参量为 $i = 3$, 即(5)式情况, 表明 Alq 薄膜中的激子分为 3 类激子为宜。 $A_2 = K_{r2}/K_{r1} = 9.1$, $C_2 = 1$, 表明 E_2 激子辐射复合几率是 E_1 激子的 9 倍, 更容易发光, 而总的退激发几率相同。 $A_3 = K_{r3}/K_{r1} = 0$, $C_3 = 8.8$, 即 E_3 激子的辐射复合速率与 E_1 激子相比几乎可以被忽略, 而非辐射复合速率激增。 E_2 和 E_3 分别比 E_1 高 21.5 meV 和 56.0 meV。通过(7)式可以得到 Alq 材料发光过程中各类激子占总激子数的百分比随温度的变化; (8)式可以得到各类激子的发光占总发光强度的百分比。分析表明, 不同温度下三种能态电子的布居数分布如图 2(b)所示, 从左致右温度逐渐升高, 在 12~50 K, 基本上只有 E_1 激子参与发光, 因此发光强度几乎不随温度改变; 而在约 50 K 到约 190 K 升温过程中, E_1 激子百分比含量虽然略有减少, 但是

发光几率比 E_1 激子高 9 倍的 E_2 激子含量明显增加,因此发光随温度升高明显增强;在约 190 K 到约 320 K 升温过程中,由于 E_3 激子明显增加,且绝大部分发生非辐射复合,而光吸收产生激子的总数是有限的,从而使激子的发光减少 10%。总之,Alq 中三种激子在不同温度下的含量和对发光的影响不同,导致了 Alq 薄膜的稳态光致发光强度随温度从低到高表现出先变化很小,再显著增强,然后再减弱的过程。

虽然以上分析是对 Alq 进行的,但是由于推导过程并没有引入基于 Alq 的特殊条件,因此可以期望其它基于激子发光的半导体材料也遵循(6)式。例如,当 $i=2, A_2=0$ 时,(6)式化为

$$I = I_0 \frac{1}{1 + C_2 \exp(-E_{12}/k_B T)}, \quad (9)$$

这正是无机半导体激子发光随温度变化的表达式^[10]。文献[15]所得到的无机半导体量子阱结构光致发光强度随温度变化的表达式(至少在形式上)也是本文特例之一。值得说明的是,我们的分析不但更加完整而且给出了原文中所没有给出的具体参数的物理意义。

又如,当 $i=2$,且 $E_{12} \gg k_B T$ 时(这在低温下是非常有可能的),(6)式即可化为

$$I = I_0 [1 + A_2 \exp(-E_{12}/k_B T)], \quad (10)$$

上式可以解释文献[3,16]所示有机晶体光致发光强度及光谱中发光峰位随温度变化的趋势。

利用(6)式分析了 DCJTb 的光致发光随温度变化的情况,如图 3 所示。

数据点为实验结果,实验细节与 Alq 一致,实

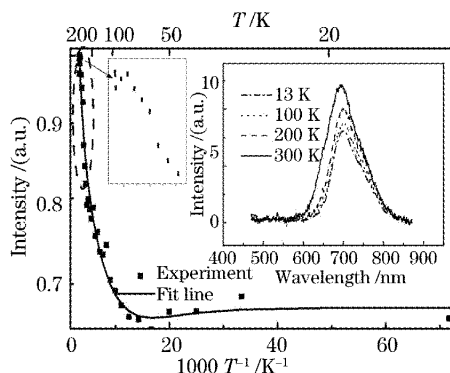


图 3 DCJTb 的光致发光积分强度随温度的变化,右插图
为不同温度下的光谱,高温端一段实验数据点被放大

Fig. 3 Integrated PL intensity vs temperature reciprocal of DCJTb thin films. Inset shows the PL spectra at different temperatures. The data at the high temperature end are amplified

线为(6)式拟合结果,拟合参量为: $i=4, A_2=0.6, A_3=3.2, A_4=38; C_2=C_3=C_4=1, E_{12}=13 \text{ meV}, E_{13}=25 \text{ meV}, E_{14}=121 \text{ meV}$,即对 DCJTb 而言, E_2, E_3, E_4 激子的辐射复合几率分别是 E_1 激子的 0.6、3.2、38 倍;能量比 E_1 激子能量分别高 13 meV、25 meV、121 meV,这 4 种激子的总退激发速率相同。对 DCJTb 来说,在约 80 K 到约 290 K,随着温度的升高,发光速率较大的激子含量增加使其发光强度也明显增加。其中的 E_4 激子比 E_1 激子能量高 121 meV,发光速率是 E_1 激子的 38 倍,因此如图 3 中右插图所示,可以观察到从约 200 K 到室温的发光峰明显蓝移,两发光光谱之差相当于温度引起的发光增加,峰位在 655 nm 左右,其能量与原发光峰位置(约 700 nm)相差 $119 \pm 10 \text{ meV}$,与上述拟合的 E_4 与 E_1 之差 121 meV 符合得很好,这是上述模型的直接证据。图 3 中插入了较高温下实验数据放大图,表明高于室温(约 300 K)以后,DCJTb 发光也象 Alq 一样,随温度升高有发光减弱的趋势,但是由于实验条件及材料稳定性等原因,没有测试更高温的光致发光,根据已有实验数据无法给出更高能态的拟合结果。在其它有机发光材料中,类似的发光强度降低和发光峰位持续蓝移现象也被观察到,但是没有详细的机理解释^[7,17]。在 Alq 的光谱中却没有观察到类似于 DCJTb 的明显蓝移,主要原因是 Alq 中能量高的 E_3 激子几乎不参与发光;而发光强的 E_2 激子与 E_1 激子能量差只有 21.5 meV。

发光材料分子吸收光子后形成激子,即电子跃迁到高能态,并与原来配对的空穴束缚在一起,形成电子-空穴对,实现电荷分离^[18,19]。即使是非极性分子,被激发以后也将具有电极性,且激子能量越高电荷转移特性越强。如图 2(c)所示。箭头长度表示跃迁偶极矩的大小对应于不同能量的电子跃迁。对 Alq 来说,处于 E_1, E_2 和 E_3 能态的激子可分别称为 e_1, e_2 和 e_3 激子。在 12~50 K 的低温下产生的 e_1 激子能态较低,电子-空穴对不但被束缚在同一个分子上,而且还分别被局限在分子内某一个或几个原子上,相距较远,可称 E_1 为分子内局域(intra-molecular localized)的能态,其电子和空穴难以靠近并复合在一起,即复合发光速率小。随温度上升到约 50~190 K,能态较高的 e_2 激子布居数增加,其中电子和空穴虽然还是被束缚在同一分子上,但能量比 e_1 高,离域性更强^[18], E_2 可称为分子内离域(intra-molecular delocalized)的能态,这种离域性

使 e_2 激子中电子与空穴相距更近, 更容易复合发光, 即辐射复合速率大 (K_{r2} 为 K_{r1} 的 9 倍)。当温度继续升高到约 190 K 以上, 则 e_3 激子开始明显增加, e_3 激子比 e_2 激子能量更大, 离域性也更强, 其跃迁偶极矩甚至到达最近邻分子, 电子或空穴可能转移 (亦即电荷转移) 到邻近的分子上, 使原来位于同一个分子上的电子和空穴相互分离, 并由于有机分子间距颇大, 电子和空穴分离后难以回到同一个分子, 使辐射复合几率降低, 并大大增加非辐射退激发的几率, 同时 e_3 的增加也导致材料导电行为发生变化。 e_3 可称为分子间离域 (inter-molecular delocalized) 的能态。由于上述 e_1 和 e_2 局域在单个分子上, 因此 e_1 和 e_2 是富兰克尔激子, 而 e_3 因为可以转移电子到其它分子上, 且能量只比富兰克尔激子的能量略高, 故 e_3 应是电荷转移激子。在约 190 K 以上的升温过程中 e_3 激子的明显增加, 使材料由分子态向半导体态转变^[18], 其导电性能随温度变化的规律也不同于分子态的情况, 这与文献^[20] 观察到的现象一致, 即在 10~150 K 温区和 190~300 K 温区, 如 $I-V$ 特性所示, Alq 薄膜表现出不同的导电规律。

室温下 Alq 中 e_3 这类电荷转移激子的存在, 使 Alq 发光量子效率不够高, 同时电子迁移率较大, 为提高发光量子效率, 且同时具备电致发光所必须的载流子传输性能, C. W. Tang 等^[21] 在 Alq 中掺入量子效率极高的染料, 如 DCMs。DCJTb 也是这样一种可用于掺杂的效率极高的染料。上述分析表明, 通过测量类似 Alq 等有机小分子发光材料的光致发光随温度的变化, 可以大致评估材料的发光和导电性能, 推断材料是分子态的还是半导体态的, 以及发生从分子态向半导体态转变的大致温度。

从以上讨论还可以知道, 材料中的分子被激发以后, 可能形成局域的富兰克尔激子, 这种激子辐射发光的可能性比较高, 但导电性能很差; 也可能形成电荷转移激子, 相对来说电荷转移激子辐射发光的几率很低, 但可以产生载流子参与导电, 总之, 因为被激发的电子和配对空穴要么位于同一分子上, 成为富兰克尔激子, 易于发光; 要么位于不同分子上, 形成电荷转移激子, 易于导电, 不可能同一个激子既能发光又能导电, 因此材料的发光效率 (能量转移) 和导电能力 (电荷转移) 是一对矛盾, 这与文献^[22] 的观点有相似之处。

上述 Alq 激子的能态并不符合无机半导体中人们所熟知的类氢原子的激子模型, 主要是因为有机

材料不象无机晶体, 有机分子体积一般比较大, 结构比较松散, 相互作用力是比较弱的范德瓦耳斯力, 电子的公有化程度远低于无机晶体, 使最近邻分子以外的电子远程相互作用非常弱, 甚至可以忽略。这里 Alq 激子能态差异可能源于 Alq 分子中原子实的振 (转) 动, 即源于电子跃迁和分子内声子的相互作用^[23~25]。

4 结 论

研究了 Alq 和 DCJTb 的光致发光随温度的变化, 提出了解释这一变化的物理模型, 提出并描述了有机小分子无定形薄膜材料中存在的分子内局域和分子间离域的富兰克尔激子和分子间离域的电荷转移激子的物理图像, 解释了 Alq 和 DCJTb 的发光随温度的变化。认为发光材料中激子的发光 (能量转移) 和导电 (电荷转移) 是一对矛盾。通过材料的变温光致发光特性研究, 可以得到材料中参与发光的激子种类和特性, 可以大致评估材料的发光和导电性能, 可以了解材料是分子态的还是半导体态的, 以及二者之间发生转变的温度。

参 考 文 献

- 1 P. E. Burrows, Z. Shen, V. Bulovic *et al.*. Relationship between electroluminescence and current transport in organic heterojunction light-emitting devices[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(10): 7991~8006
- 2 R. J. Curry, W. P. Gillin. Radiative recombination mechanisms in aluminum tris (8-hydroxyquinoline); Evidence for triplet exciton recombination[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(2): 781~785
- 3 S. K. Saha, Y. K. Su, F. S. Juang. Temperature- and field-dependent quantum efficiency in tris-(8-hydroxy) quinoline aluminum light-emitting diodes[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(12): 8175~8178
- 4 Chihaya Adachi, Raymonel C. Kwong, Peter Djurovich *et al.*. Endothermic energy transfer: A mechanism for generating very efficient high-energy phosphorescent emission in organic materials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(13): 2082~2084
- 5 E. J. W. List, C. Creely, G. Leising *et al.*. Excitation energy migration in highly emissive semiconducting polymers[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2000, **325**(1~3): 132~138
- 6 Shizuo Tokito, Hiromitsu Tanaka, Akane Okada *et al.*. High-temperature operation of an electroluminescent device fabricated using a novel triphenylamine derivative[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(7): 878~880
- 7 S. D. Jung, D. H. Hwang, T. Zyung *et al.*. Temperature dependent photoluminescence and electroluminescence properties of polythiophene with hydrogen bonding side chain[J]. *Synthetic Metals*, 1998, **98**: 107~111
- 8 Yan Liu, Guodong Qian, Zhiyu Wang *et al.*. Temperature-dependent luminescent properties of Eu - Tb complexes synthesized in situ in gel glass[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(7): 071907-1~071907-3
- 9 Pankove J I. *Optical Processes in Semiconductors* [M]. New

- York; Dover, 1975
- 10 Fang Junxin, Lu Dong. *Solid State Physics* [M]. Shanghai : Shanghai Science and Technology Publishers, 1980. 436 (in Chinese)
方俊鑫, 陆 栋. 固体物理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980. 436
 - 11 M. Colle, C. Garditz. Phosphorescence of aluminum tris (quinoline-8-olate)[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(16): 3160~3162
 - 12 M. Colle, W. Brütting. Thermal, structural and photophysical properties of the organic semiconductor Alq₃ [J]. *Phys. Stat. Sol. (A)*, 2004, **201**(6): 1095~1115
 - 13 Burrows H D, Fernandes M, Seiras de Meloj *et al.*. Characterization of the triplet state of tris(8-hydroxyquinoline) aluminium(III) in benzene solution[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2003, **125**(50): 15310~15311
 - 14 Pope M, Swenberg C E. *Electron Processes in Organic Crystals* [M]. Oxford; Clarendon, 1982. 73
 - 15 Yoshihiro Ishitani, Shigekazu Minagawa, Hiyoshi Hamada *et al.*. Temperature dependence of photoluminescence intensity from AlGaInP/GaInP-quantum well structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(3): 1336~1344
 - 16 A. Bolognesi, C. Botta, L. Cecchinato. Optical properties and electroluminescence of poly(3-alkylmethoxy-thiophene) single- and double-layer structures[J]. *Synthetic Metals*, 2000, **111**~**112**: 187~189
 - 17 A. Kohler, D. Ados Santos, D. Beljonne *et al.*. Charge separation in localized and delocalized electronic states in polymeric semiconductors [J]. *Nature*, 1998, **392** (6679): 903~906
 - 18 Berleb S, Muckl A G, *et al.*. Temperature dependent device characteristics of organic light-emitting devices[J]. *Synth. Met.*, 2000, **111**~**112**: 341~344
 - 19 C. W. Tang, S. A. VanSlykex, C. H. Chen *et al.*. Electroluminescence of doped organic thin films[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**(9): 3610~3616
 - 20 Ignacio Martini, Bin Ma, Tatiane Da Ros *et al.*. Ultrafast competition between energy and charge transfer in a functionalized electron donor/fullerene derivative [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2000, **327**(5~6): 253~262
 - 21 Zhang Xiqing, Mei Zengxia, Duan Ning *et al.*. Exciton optical properties of CdSe/CdZnSe superlattices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 114~117 (in Chinese)
张希清, 梅增霞, 段 宁 等. CdSe/CdZnSe 超晶格的激子光学性质的研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(1): 114~117
 - 22 Ma Guohong, Guo Lijun, Yang Yi *et al.*. Investigations of excited state dynamics of a PPV derivative using ultrafast Kerr spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 916~920 (in Chinese)
马国宝, 郭立俊, 杨 毅 等. PPV 衍生物的激发态动力学特征研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(8): 916~920
 - 23 Xia Haiping, Song Hongwei, Zhang Jianli *et al.*. Preparation of Na₂O · K₂O · SiO₂ · Al₂O₃ glass containing Eu³⁺ ions and its temperature-dependence of fluorescence spectra and structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1488~1492 (in Chinese)
夏海平, 宋宏伟, 章践立 等. 含 Eu³⁺ 离子的 Na₂O · K₂O · SiO₂ · Al₂O₃ 系统玻璃的制备及其变温发射光谱与结构特性[J]. 光学学报, 2002, **22**(12): 1488~1492