

磁场对有机电致发光的影响^{*}

王 振 何正红 谭兴文 陶敏龙 李国庆 熊祖洪[†]

(西南大学物理科学与技术学院 重庆 400715)

(2006 年 9 月 27 日收到 2006 年 10 月 13 日收到修改稿)

制备了常规有机发光二极管 ITO/NPD/Alq₃/LiF/Al, 测量了该器件发光的磁场效应. 发现尽管在 1 T 范围内的磁场对发光层 Alq₃ 的光致发光没有影响, 但磁场作用下器件的电致发光 (MEL) 却呈现出明显的磁效应, 且 MEL 与器件的偏压有很强的依赖关系. 在小偏压时, 随着磁场的增加 MEL 是单调递增, 且在大小约为 40 kA/m 的磁场下达到饱和, 之后即使使磁场增大到约 1 T 的情况下也没有变化, 但当偏压变大时, MEL 则呈现先增加, 在 40 kA/m 处达到峰值后却又减弱, 而且偏压越大该 MEL 的减弱则越明显. 对所观察到的实验结果进行了定形解释, 即三线态激子相互淬灭产生单线态激子和三线态激子与器件中的非平衡载流子相互作用是此效应的物理机理.

关键词: 有机发光, 磁场效应, 激子淬灭

PACC: 7865T, 7430G, 7135

1. 引 言

有机半导体因其在平板显示、薄膜三极管和太阳能电池的重要应用正受到科学界和企业界的广泛关注^[1-9]. 最近, 电子自旋在有机半导体的相干传输和有机发光的磁场效应开始成为又一个热点研究方向^[10-17]. 有机电致发光是从器件负电极注入的电子与从正电极注入的空穴的辐射复合形成发射态的结果. 这些元激发的物理本质及其弛豫机理对于有机光电子学和有机磁电子学的理论和实际应用都具有非常重要的意义, 在阐明这些基本问题(如发射态的形成机理以及载流子的自旋相干传输等)方面磁场将是一种非常有用的手段^[17-19]. Odaka 等人报道了磁场对有机二极管 ITO/4,4'-bis[*N*(1-naphthyl)-*N*-phenyl-amino]biphenyl(α -NPD)/LiF(0, 0.2, 0.5 nm)/tris-(8-hydroxyquinolino)aluminum (Alq₃)/LiF/Al 发光 (EL) 的影响, 发现室温下不管 NPD 与 Alq₃ 之间的 LiF 厚度是这三个值中的任何一个, 在施加 40 kA/m 的磁场下, 该器件 EL 的变化率 $\Delta EL/EL$ 有 3% 至 8% 的增加且在该场下就达到饱和, 磁场即使增加到 5 T 该值都没有变化(即刚开始单调递增很快就饱和),

且该饱和特性与器件的偏压没有关系^[16]; 另外, 从厚度为 0.5 nm 的 LiF 器件中得到了最大为 8% 的发光变化. Kalinowski 等人采用 ITO/*N,N'*-diphenyl-*N,N'*-bis(3-methylphenyl)(1,1'-biphenyl)-4,4' diamine (TPD):bisphenol-A-polycarbonate (PC)/Alq₃/Ca/Ag 器件结构也得到了类似的结果, 只是饱和场变大到 400 kA/m^[11]. Davis 等人从器件 ITO/*N,N'*-Di(naphthalene-1-yl)-*N,N'* diphenyl-benzidine (NPB)/Alq₃/Li/Al 中同样也得到了类似的结果, 不过他们还发现当器件的 ITO 正电极被贵金属 Au 或铁磁材料 Co 以及 Li/Al 负电极被顺磁材料钇 (Y) 或铁磁材料钆 (Gd) 代替后, 器件发光的磁场效应 (MEL) 在饱和之后随着磁场的进一步增加却又衰减, 在 2 T 的磁场下从器件 Co/NPB/Alq₃/Gd 中得到了 $\Delta EL/EL$ 最高可达 20% 的衰减^[13]. 本文制备了有机发光研究中最常采用的器件 ITO/ α -NPD/Alq₃/LiF/Al, 却发现即使不采用 Au, Co 和 Y, Gd 等这些材料, 器件发光的磁场效应 (MEL) 与器件上所加偏压有明显的依赖关系, 即在小偏压下器件的 MEL 是单调递增且在 40 kA/m 处就很快达到饱和; 在偏压变大后, 该 MEL 则呈现先增加达到峰值后又减小的特性, 且偏压越大 MEL 饱和后的衰减就越明显. 在三线态激子相互淬灭产

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10504027)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”(批准号:NCET-05-0772)、霍英东教育基金会(批准号:101006)、人事部留学人员科技活动项目和重庆市自然科学基金(批准号:CSTC 2005BB3049)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: zhixiong@swu.edu.cn.

生单线态激子和三线态激子与器件中的非平衡载流子相互作用的机理上对该结果进行了定性讨论. 显然, 此实验结果丰富了最近文献 [11, 13, 16, 17] 中报道的相关研究内容.

2. 实验与测量

兼具电子传输与发光的 Alq_3 和充当空穴传输的 $\alpha\text{-NPD}$ 的分子结构如图 1(a) 和 (b) 所示. 器件的结构示于图 1(c), 即为 $\text{ITO}/\alpha\text{-NPD}/\text{Alq}_3/\text{LiF}/\text{Al}$, 其中 ITO 充当器件的正电极, Al 为负电极, 约 1 nm 厚的 LiF 用于增强器件的电子注入效率^[20, 21]. ITO 玻璃衬底是从商业公司购买, ITO 薄膜厚度为 100 nm. 厚度都为 80 nm 的 $\alpha\text{-NPD}$ 和 Alq_3 薄膜, 1 nm 厚的 LiF 和 50 nm 厚的 Al 电极都是在高真空 ($\sim 10^{-5}$ Pa) 条件下

采用热阻蒸发法得到的. 这些薄膜厚度采用 INFICON 公司的膜厚监测仪 (XTM/2) 进行原位测量, 并用 VEECO 公司的表面轮廓仪 (Dektak 6M) 进行校正. 有机二极管的发光面积为 $2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$. 器件的 MEL 测量是在磁场最大为 1 T (Lakeshore :EM 647) 的闭循环冷却系统 (Janis :CCS-350S) 中进行, 所加磁场的大小由霍尔探头测量, 器件的偏压由 Keithley236 电源提供, 器件 EL 的强度则由硅光电探测器 (UDT PIN 10 DP) 和 Keithley2000 万用表来测量, 如图 1(d) 所示. 由电磁铁、霍尔探头、Keithley236 电源、硅光电探测器和 Keithley2000 万用表组成的整个测量系统由一台 PC 机通过自己编写的一套 Labview 软件来驱动. 通过对比实验确认了磁场对该硅光电探测器本身几乎没有任何影响.

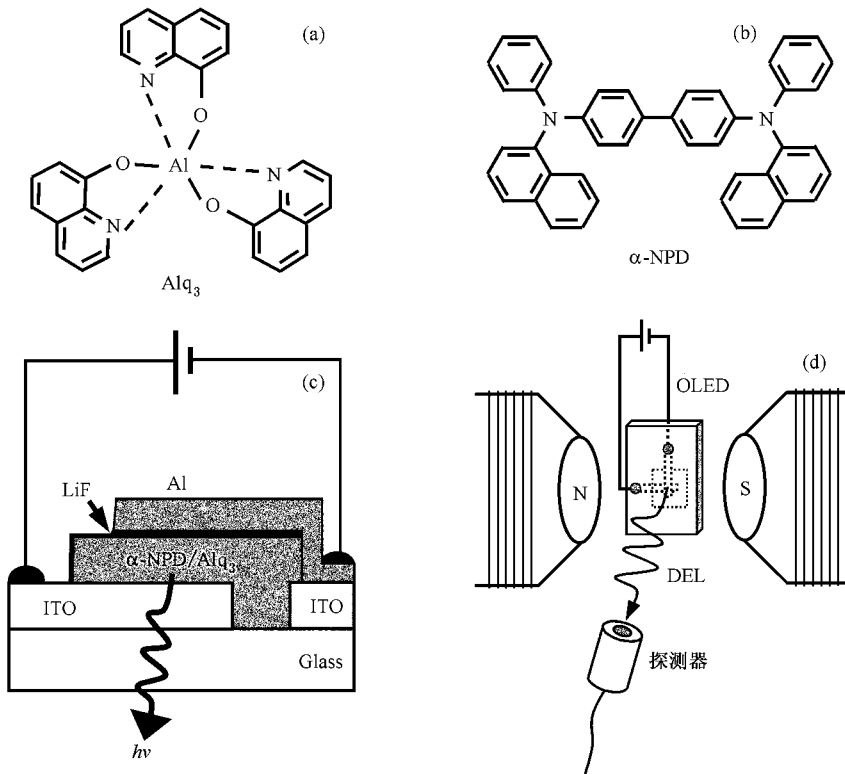


图 1 (a) Alq_3 结构 (b) $\alpha\text{-NPD}$ 结构 (c) 器件结构 (d) 测量系统

3. 实验结果

3.1. 器件的电流-亮度-电压 (I - B - V) 曲线

图 2 的斜点画线表示室温下器件的亮度-电流 (B - I) 特性, 器件的电流-电压 (I - V) 和亮度-电压 (B -

V) 特性分别示于图 2 的右下角和左上角. 很显然, 这些曲线与文献 [20] 报道的采用类似器件结构的结果一样, 呈现的是典型的二极管特性: 即小于一定电压时流过器件的电流很小, 器件不开启, 只有在偏压高于某一阈值时电流呈指数增加才驱动器件发光. 在低温下如 150 K, 器件的 I - B - V 曲线的形状与室温的一样, 也是典型的二极管特性. 但由于该发光二极管

是半导体器件,在低温下器件的电阻相对于室温将增加,因此在相同偏压下注入的载流子数目降低,从而发光减弱;因此,为了得到在室温下的某一个亮度,低温下施加在器件上的电压相对于室温的偏压则要高一些.实验中我们发现一定的低温条件可以使器件变得更加稳定,因此,本文的主要实验结果——偏压对器件发光的磁场效应的影响是在 150 K 的低温下测量的.

3.2. 几种偏压下的器件电致发光的磁场效应

图 3 和图 4 是器件电致发光的磁场效应.图 3 中从上到下依次是在 19 V、21 V、23 V、24 V、25 V 和 27 V 的偏压下测量得到的 MEL.图 4 中的曲线分别表示器件 MEL 的低场和高场部分随偏压的变化关系,其中低场部分 EL 的变化率定义式为 $\Delta EL/EL|_L = [EL(40 \text{ kA/m}) - EL(0 \text{ kA/m})]/EL(0 \text{ kA/m}) \times 100\%$;高场部分 EL 的变化率的定义式为 $\Delta EL/EL|_H = [EL(680 \text{ kA/m}) - EL(40 \text{ kA/m})]/EL(40 \text{ kA/m}) \times 100\%$.比较图 3 中不同偏压下的结果可知:尽管器件还不是

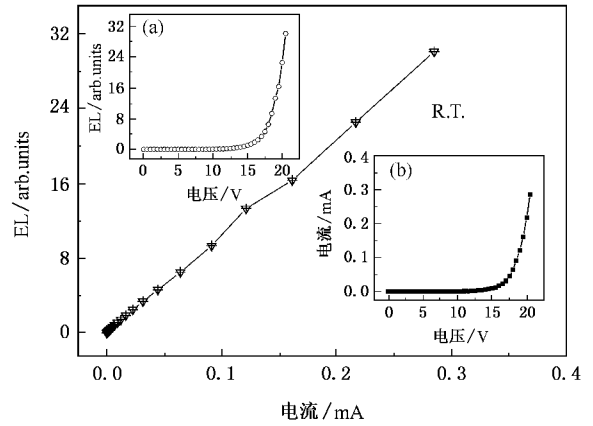


图 2 室温下器件的 I - B - V 特性曲线 (a)器件的亮度-电压 (B - V)特性 (b)器件的电流-电压 (I - V)特性.斜点画线:器件的亮度-电流 (B - I)特性

(680 kA/m)- $EL(40 \text{ kA/m})]/EL(40 \text{ kA/m}) \times 100\%$.比较图 3 中不同偏压下的结果可知:尽管器件还不是

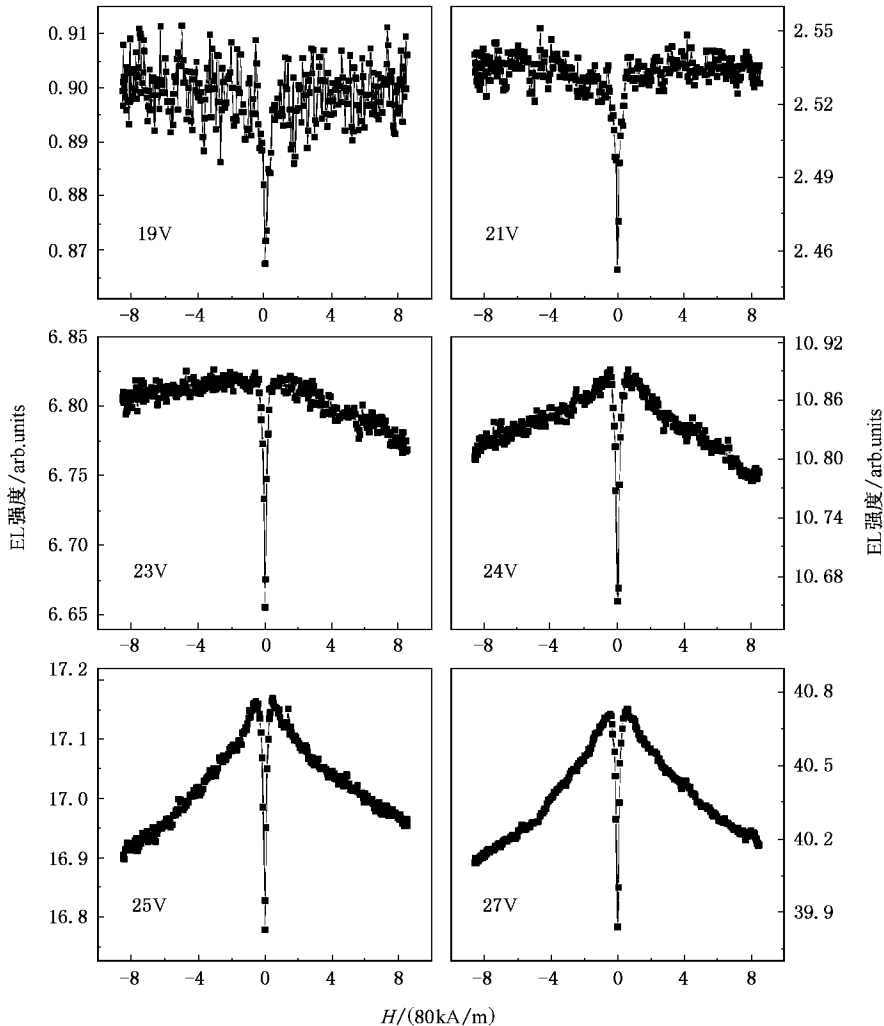


图 3 器件 EL 的磁场效应(6 种偏压下的 MEL)

非常稳定,表现在磁场从 $+640 \text{ kA/m} \rightarrow 0 \text{ kA/m} \rightarrow -640 \text{ kA/m}$ 这样半个循环后,器件的亮度还有较小的漂移(即微小的降低),但是从图 3 这六个偏压的结果可以明确得出器件电致发光的磁场效应表现为刚开始随着磁场的增加发光变强,且很快在磁场大小约为 40 kA/m 的地方达到一个峰值;然后随着磁场的进一步的增加,在低偏压下(从 19 V 至 21 V)发光达到饱和(即随磁场的增加几乎没有变化),在高偏压下(从 23 V 至 27 V)发光反而又变弱,而且偏压越大,发光减弱就越明显.图 4 的曲线清晰地显示出低场部分和高场部分的 MEL 随着偏压的变化关系:即低场的 $\Delta EL/EL|_L$ 随着磁场的增加而减小,在 19 V 到 28 V 范围内从 3.75% 减小到 2.2% ;而高场的 $\Delta EL/EL|_H$ 则从饱和状态(即 0%)减小到 1.5% ;而且从 19 V 到 21 V ,器件发光的变化率 $\Delta EL/EL|_H$ 几乎没有变化,而从 21 V 升高到 28 V 却从 -0.22% 减弱到 -1.50% .需要指出的是,器件在所有偏压下的磁阻都表现为负磁阻特性,即某一偏压下,器件的电流随着磁场的增加而增加,即其电阻则是随着磁场的增加而减弱,这与文献 [11, 13, 17] 报道的结果是一致的.

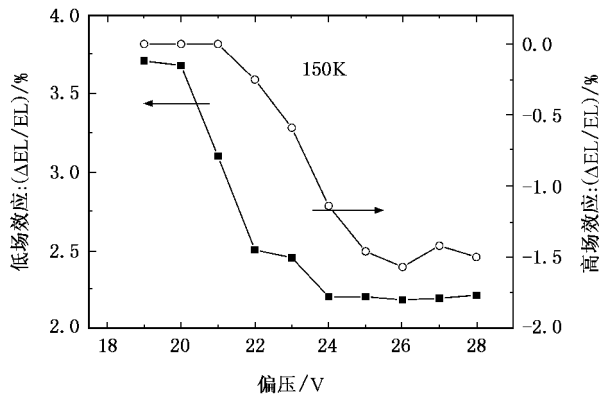


图 4 MEL 的低场和高场部分随偏压的变化

3.3. Alq_3 荧光的磁场效应

为了理解图 3 和图 4 的实验结果,我们也测量了器件发光层 Alq_3 的荧光(photoluminescence, PL)的磁场效应,所得结果示于图 5.该 PL 谱的激发光源是采用半导体激光器的 405 nm 的激光线,所得 PL 则由硅光电探测器(UDT PIN 10 DP)和 Keithley 2000 万用表来测量,且采用滤色片阻止激光线进入该硅光探头;为了尽量避免氧和水汽对测量时样品的影响,样品放在抽成真空的闭循环系统(CCS-350S)的

样品台上进行测量,且温度从室温到 10 K 可变.正如图中所显示的,在 0.3% 的分辨下, Alq_3 的 PL 随磁场没有表现出规律性变化,也就是由光激发产生的受激单线态激子在辐射复合发射光子并弛豫到基态的这一过程并不受外加磁场的影响.这是由于单线态激子的寿命较短于三线态激子的寿命约 $5\text{--}6$ 个量级,在一般情况下,磁场对三线态激子的作用时间远长于单线态激子.这个结果对于发光器件中由电注入的电子和空穴载流子形成的单线态激子和三线态激子也同样适合.

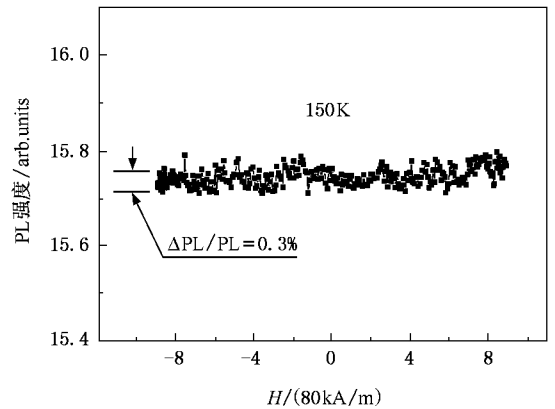


图 5 发光层 Alq_3 的荧光随磁场的变化

4. 讨 论

从器件负电极和正电极分别注入的电子和空穴($e + h$)在电场的作用下达到发光区的界面附近时,当它们的距离靠近到一定程度因库伦相互作用将形成束缚的电子-空穴对($e - h$),这种电子-空穴对可以形成两种激子:一是通过电荷转移态 CT_S (charge transfer exciton:自旋为 0)形成可发射光子($h\nu$)的单线态激子 $S^*(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)$,其电子和空穴的自旋矢量和为零;另外一种则是通过电荷转移态 CT_T (自旋为 1)形成三线态激子 $T[(T_+ : \uparrow\uparrow)(T_0 : \uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow)]$ 和 $(T_- : \downarrow\downarrow)$,它是三度简并的,且根据电偶极矩的选择定则三线态激子的辐射复合是禁戒跃迁的,也就是三线态激子本身的跃迁是不能发射荧光的^[13, 22]如图 6 所示,其中 S_0 表示基态.

但是,在有机半导体中激子可以扩散从而参与双分子反应,即产生激子-激子相互作用.因三线态激子 T 的寿命(约 $10^{-2}\text{--}10^{-3} \text{ s}$)远长于单线态激子 S ($\sim 10^{-9} \text{ s}$),因此,激子-激子相互作用常常发生在三线态激子对之间.文献 [23—26] 报道的三线态激

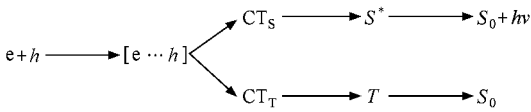


图 6 注入器件的电子和空穴的一种演化过程

子相互淬灭(triplet-triplet annihilation, TTA)产生激发的单线态激子从而增强发光就是一种典型的激子-激子相互作用,该相互作用定性的示意过程如图 7 所示,即距离较远的三线态激子 $T + T$ 当靠近到一定程度后可以形成相互作用的激子对 $[T \dots T]$,该激子对通过淬灭作用可形成激发的单线态激子 S^* ,此单线态激子通过辐射光子 $h\nu$ 跃迁至基态 S_0 ,其中 k_1, k_{-1} 和 k_2 为相应过程的速率常数(rate constant)。

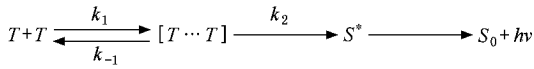


图 7 TTA 的演化过程

具体到本实验的器件,该 TTA 过程可表示为从器件的正电极 ITO 注入的空穴在空穴传输层 NPD 中形成阳离子 $\text{NPD}^{+\cdot}$,该离子基团在电场的作用下到达发光区通过电荷转移过程 $\text{NPD}^{+\cdot} + \text{Alq}_3 \rightarrow \text{NPD} + \text{Alq}_3^{+\cdot}$,从而形成正离子基团 $\text{Alq}_3^{+\cdot}$;与此同时,从负电极 LiF/Al 注入的电子在电场的作用下到达发光区形成负离子基团 $\text{Alq}_3^{-\cdot}$;当这两种基团的距离接近到足够近时,它们常常可发生两种过程:一是经过程 $\text{Alq}_3^{+\cdot} + \text{Alq}_3^{-\cdot} \rightarrow {}^1\text{Alq}_3^* + \text{Alq}_3$ 形成激发的单线态激子 ${}^1\text{Alq}_3^*$,该激子常以发射光子弛豫到基态,从而得到常见的电致发光(prompt electroluminescence, PEL);二是经过程 $\text{Alq}_3^{+\cdot} + \text{Alq}_3^{-\cdot} \rightarrow {}^3\text{Alq}_3^* + \text{Alq}_3$ 形成三线态激子 ${}^3\text{Alq}_3^*$ 。上述的 TTA 过程就是三线态激子对经过程 ${}^3\text{Alq}_3^* + {}^3\text{Alq}_3^* \rightarrow {}^1\text{Alq}_3^* + \text{Alq}_3$ 形成单线态激子 ${}^1\text{Alq}_3^*$,该单线态激子再以发射光子弛豫到基态,从而形成滞后的电致发光(delayed electroluminescence, DEL)。正如图 3 和图 4 所示,DEL 表现为刚开始随着磁场的增加,发光变强,且很快在约 40 kA/m 的地方达到一个峰值,然后随着磁场的进一步

增加,在低偏压下发光达到饱和,在高偏压下发光反而又变弱,而且偏压越大,发光减弱就越明显。这是由于在外加磁场为零时,激子对所感受到的内磁场是由它们的分子环境所决定的。三线态激子对的相互作用形势较复杂,只有能够产生单线态激子的 TTA 作用才能形成 DEL^[27]。当外加磁场变大到与自旋轨道场和超精细作用场相比拟时,TTA 作用就会产生更多的单线态激子 ${}^1\text{Alq}_3^*$,从而随着磁场变大得到增强的 DEL;但当外加磁场进一步变大,激子对所感受的磁场主要由外场决定,则此时 TTA 产生的单线态激子 ${}^1\text{Alq}_3^*$ 将会减少,以至得到随着磁场变大 DEL 却减弱^[7]。偏压越大 DEL 衰减越明显,则是由于此时器件注入的非平衡载流子会增加,这些多余的载流子经过程 $\text{Alq}_3^{-\cdot} + {}^3\text{Alq}_3^* \rightarrow (\text{Alq}_3^{-\cdot})^* + \text{Alq}_3 \rightarrow \text{Alq}_3^{-\cdot} + \text{Alq}_3 + Q(\text{热量})$ 或过程 $\text{Alq}_3^{+\cdot} + {}^3\text{Alq}_3^* \rightarrow (\text{Alq}_3^{+\cdot})^* + \text{Alq}_3 \rightarrow \text{Alq}_3^{+\cdot} + \text{Alq}_3 + Q(\text{热量})$ 将淬灭寿命较长的能够形成单线态激子的三线态激子 (${}^3\text{Alq}_3^*$),从而进一步减弱了 DEL。从图 4 中还可以看出,当偏压进一步增加,DEL 出现趋于稳定。可能的原因是随着偏压的进一步增加,更多的非平衡载流子已不参与上述的能够淬灭形成单线态激子的三线态激子 (${}^3\text{Alq}_3^*$) 过程,此时主要是受限于形成三线态激子 (${}^3\text{Alq}_3^*$) 的数目,即注入器件的少数载流子的数目决定着器件的 EL 和 DEL。

5. 结 论

外加磁场是很好了解有机发光器件中常见元激发演化过程的一种重要手段。发现磁场作用下常规有机二极管 ITO/NPD/Alq₃/LiF/Al 的电致发光 MEL 与器件上所加的偏压有明显的依赖关系:低偏压下, MEL 随着磁场的增加而单调递增且很快就达到饱和;高偏压下, MEL 单调递增很快达到饱和后又衰减,且偏压越大,衰减越明显。三线态激子 (${}^3\text{Alq}_3^*$) 相互淬灭产生单线态激子 (${}^1\text{Alq}_3^*$) 和三线态激子与器件中的非平衡载流子 ($\text{Alq}_3^{-\cdot}$ 或 $\text{Alq}_3^{+\cdot}$) 相互作用可以用来定性解释所观察到的实验结果。

[1] Tang C W, VanSlyke S A 1987 *Phys. Lett.* **51** 913[2] Kozlov V G, Bulovic V, Burrows P E, Forrest S R 1997 *Nature* **389**

362

- [3] Forrest S R 1997 *Chem. Rev.* **97** 1793
- [4] Friend R H, Gymer R W, Holmes A B, Burroughes J H, Marks R N, Tallani C, Bradley D D C, Dos Santos D A, Bredas J L, Logdlund M, Salaneck W R 1999 *Nature* **397** 121
- [5] Dimitrakopoulos C D, Mascaro D J 2001 *IBM J. Res. & DEV* **45** 11
- [6] Feng W, Cao M, Wei W, Wu H C, Wan M X, Katsumi Yoshino 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1157 (in Chinese) [封 伟、曹 猛、韦 玮、吴洪才、万梅香、吉野胜美 2001 物理学报 **50** 1157]
- [7] Qian L, Teng F, Xu Z, Quan S Y, Liu D A, Wang Y M, Wang Y S, Xu X R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 929 (in Chinese) [钱 磊、滕 枫、徐 征、权善玉、刘德昂、王元敏、王永生、徐叙 2006 物理学报 **55** 929]
- [8] Xie Y Q, Guo J H, Peng J B, Cao Y, Wang Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3424 (in Chinese) [谢玉卿、郭建华、彭俊彪、曹 镛、王 悦 2005 物理学报 **54** 3424]
- [9] Feng W, Yi W H, Xu Y L, Lian Y Q, Wang X G, Katsumi Y S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1272 (in Chinese) [封 伟、易文辉、徐友龙、连彦青、王晓工、吉野胜美 2003 物理学报 **52** 1272]
- [10] Fu R T, Wang X D, Sun X, Kawazoe Y 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1840 (in Chinese) [傅荣堂、王晓东、孙 鑫、川添良幸 1998 物理学报 **47** 1840]
- [11] Kalinowski J, Cocchi M, Virgili D, Marco D P, Fattori V 2003 *Chem. Phys. Lett.* **380** 710
- [12] Xiong Z H, Wu D, Vardney Z Valy, J Shi 2004 *Nature* **427** 821
- [13] Davis A H, Bussmann K 2004 *J. Vac. Sci. Technol. A* **22** 1885
- [14] Ren J F, Fu J Y, Liu D S, Xie S J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3814 (in Chinese) [任俊峰、付吉永、刘德胜、谢士杰 2004 物理学报 **53** 3814]
- [15] Pang Z Y, Chen Y X, Liu T T, Zhang Y P, Xie S J, Yan S S, Han S H 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1566
- [16] Odaka H, Okimoto Y, Yamada T, Okamoto H, Kawasaki M, Tokura Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 123501-1
- [17] Mermer Ö, Veeraraghavan G, Francis T L, Wohlgenannt M 2006 *Solid State Commun.* **134** 631
- [18] Li Y X, Li B Z 2005 *Chin. Phys. Lett.* **14** 1021
- [19] Jiang S, Shen X C 1994 *Acta Phys. Sin.* **3** 925 (Overseas Edition)
- [20] Xiong Z H, Shi H Z, Fan Y L, Zhang S T, Zhan Y Q, He J, Zhong G Y, Xu S H, Liu Y, Wang X J, Wang Z J, Ding X M, Huang W, Hou X Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1222 (in Chinese) [熊祖洪、史华忠、樊永良、张松涛、詹义强、何钧、钟高余、徐少辉、柳 毅、王晓军、王子君、丁训民、黄 维、侯晓远 2003 物理学报 **52** 1222]
- [21] Wei F X, Cao J, Zhang X B, Liu X, Jiang X Y, Zhang Z L, Zhu W Q, Xu S H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2008 (in Chinese) [委福祥、曹 进、张晓波、刘 向、蒋雪茵、张志林、朱文清、许少鸿 2006 物理学报 **55** 2008]
- [22] Kalinowski J, Cocchi M, Virgili D, Fattori V, Marco Di P 2004 *Phys. Rev. B* **70** 205303-1
- [23] Kepler R G, Caris J C, Avakian P, Abramson E 1963 *Phys. Rev. Lett.* **10** 400
- [24] Schwob H P, Williams D F 1973 *J. Chem. Phys.* **58** 1542
- [25] Ganzorig C, Fujihira M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3137
- [26] Belaid R, Barhoumi T, Hachani L, Hassine L, Bouchriha H 2002 *Synth. Met.* **131** 23
- [27] Johnson R C, Merrield R E 1970 *Phys. Rev. B* **1** 896

Magnetic field effects on organic electroluminescence^{*}

Wang Zhen He Zheng-Hong Tan Xing-Wen Tao Min-Long Li Guo-Qing Xiong Zu-Hong[†]

(*School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

(Received 27 September 2006; revised manuscript received 13 October 2006)

Abstract

A conventional organic light emitting diode, which has a structure of ITO/NPD/Alq₃/LiF/Al, was fabricated and the magnetic field effects (MFEs) on its electroluminescence (EL) were measured. We found that the MFEs of the organic EL is strongly dependent on the applied bias on the device while the photoluminescence from the Alq₃ film within the device is independent of the magnetic field. At low bias, the MFEs first rapidly increase with the magnetic field and then saturate at about 40 kA/m, however at high bias the MFEs will decrease after this saturation, and the larger the bias, the stronger the decrease. The mutual annihilation of triplet-triplet pairs producing excited singlet excitons and the interaction between triplet excitons and excess carriers of Alq₃ anion or cation are the physical mechanisms of the phenomena observed in this study.

Keywords : organic electroluminescence, magnetic field effects, exciton annihilation

PACC : 7865T, 7430G, 7135

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10504027), by the Program for New Century Excellent Talents in University of Chinese Ministry of Education (Grant No. NCET-05-0772), by Fok Ying Tung Education Foundation (Grant No. 101006), by the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of the Chinese Ministry of Personnel, and by the Natural Science Foundation of Chongqing (Grant No. CSTC, 2005BB3049).

[†] Corresponding author. E-mail: zhxiang@swu.edu.cn