

文章编号: 1001-3806(2004)01-0068-06

有机白光 LED

杨爱玲, 王 晶, 郑荣儿, 孟继武

(中国海洋大学 光学光电子实验室, 青岛 266071)

摘要: 有机白光 LED 主要有电致发光与光致发光两类。电致发光的主要机理有: 量子阱发光、激基复合物发光和能量转移。人们对有机电致发光白光 LED 研究较多, 不久将有产品问世; 而对光致发光研究较少。与电致发光相比, 光致发光造价更小, 其荧光量子效率或许比电致发光更高。有机白光 LED 制备工艺简单、成本低功耗小, 具有巨大的应用价值及潜在的市场。对发光显示技术, 有机白光 LED 代表了一条“便宜”经济的路径。综述了有机白光 LED 的机理及发展现状。

关键词: 有机白光 LED; 电致发光; 光致发光; 多量子阱; 激基复合物; 能量转移

中图分类号: TN312+.8; O644.18 **文献标识码:** A

Organic white light emitting devices

YANG Ai-ling, WANG Jing, ZHENG Rong-er, MENG Ji-wu

(Opto-Electronics Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266071, China)

Abstract: Organic white light emitting devices (OWLEDs) have tremendous application merits and potential markets. There are mostly two kinds of OWLEDs, one based on electroluminescence (EL), the other on photoluminescence (PL). The main principles of EL are multiple quantum well, exciplex and energy transfer. The organic EL devices have been more investigated and there are products in near future. But for organic PL devices, there are less study. The cost of PL OWLEDs is lower than that of EL OWLEDs, and its fluorescence efficiency may be higher. Therefore OWLEDs stand for a cheap route for luminescent technique. A summary of OWLEDs mechanisms and development are put forward.

Key words: organic white light emitting device (OWLED); electroluminescence (EL); photoluminescence (PL); multiple quantum well; exciplex; energy transfer

引 言

发光二极管(LED)由于全固体、寿命长、光效高、响应速度快、颜色丰富、低功耗、体积小、结构结实灵活、无污染等特点,因而在众多领域有广泛的应用前景^[1~6]。LED可用于交通灯、汽车灯、警示灯、飞机通道、进出口照明、装饰信号、视频显示、全色显示、普通室内照明等。SWOBODA预言当白光LED的成本为1\$/1000lm时,它们将成为最主要的照明技术^[1]。MILLS预言白光LED甚至会出现硅工业版本的“摩尔定律”,即每18个月LED的亮度增加1倍^[2],世界上如果所有的白炽灯与荧光灯均被

LED代替,相当于节约38个核电站的发电量^[2]。目前白光LED已引起科技界、产业界甚至政府界的重视,他们把LED作为未来节约能源的一项战略。LED已成为半导体领域新崛起的研究热点和经济生长点。因此各国政府均给予大力扶持。

结构结实、低功耗使现在交通灯与大面积信号显示有较大市场,其它应用有潜在市场但还处于技术进步阶段,由于价格因素限定于特定的市场。现有LED的缺点是^[1]:分立的LED形成了出售商品的大部分成本;广泛使用的5mm封装管对许多照明应用来说不适用;无高输出LED源。以下4个主要技术领域限制了LED的性能^[1]:基底材料;动态层的外延生长;蓝光及紫外荧光物质及转换材料;LED的封装。尽管目前LED存在缺陷,但其发展速度是飞快的。随着技术进步及成本降低,白光LED的大市场将向我们走来。

在过去的几年中,高亮度的LED市场从美国、日本主导到台湾。台湾现已成为AlInGaP芯片的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10074012);青岛市科技局资助项目(02-2-KJ-YJ-26)

作者简介:杨爱玲(1970-),女,硕士,主要从事非线性光学方面的研究工作。

E-mail:ailing@mail.ouqd.edu.cn

收稿日期:2003-05-06;收到修改稿日期:2003-07-10

最主要的生产者。世界高亮度 LED 灯制造中心已移到台湾,国内在白光 LED 的研制方面也取得可喜进步。值得注意的是,我国在有机白光 LED 方面的研究工作居于世界先进水平。如 XIE 等人首次提出了采用量子阱结构制备有机白光电致发光器件的模型^[7]。

有机发光物质种类繁多,因而在全色显示、大屏幕视频显示方面比无机发光材料有优势,另外有机白光 LED 制备工艺简单、成本低功耗小,可制备在 Si 基衬底和柔性衬底上等,因而日益为人们所重视。目前尽管寿命问题尚未解决,但已有很大进展,最好的结果已超过 $2 \times 10^5 \text{h}$ ^[5],美、日、英等国的许多公司已投巨资开发,不久将有产品问世。有机发光器件引起了各国科研工作者的极大重视而成为当今发光显示领域的研究热点,具有巨大的应用价值及潜在的市场。

鉴于有机白光 LED 的快速发展,对显示技术而言,有机白光 LED 代表一条“便宜”经济的路径,下面将综述几种白光 LED 的机理。

1 有机电致发光白光 LED

有机白光 LED 的机理主要有两种^[8]:基于电致发光和光致发光。对于电致发光,人们已研究较多。而已封装好的光致发光有机白光 LED 还未见报道。

有机电致发光白光 LED 主要有以下几种结构:单层结构^[9],其中不同荧光染料分散或掺杂其中,不同荧光物质发不同颜色的光;多层结构^[10,11],每一层发不同颜色的光,两种或多种色光混合成白光;量子阱结构^[5~12];激基复合物电致发光^[12~18];多层结构层间能量转移^[19~21];应用微腔层作为选择透镜诱导红、绿、蓝光^[22];基于金属螯合物单发射器。基于多量子阱结构、激基复合物及层间能量转移发光独具优势。

1.1 量子阱结构

90 年代初,人们把量子阱结构引入到有机发光器件的制作与研究中,以期提高有机电致发光器件的效率,改善器件的发光特性。XIE 等人首次提出采用量子阱结构制备有机白光电致发光器件的模型^[7],即不同的阱是由不同发光颜色的材料生长而成,由于势垒层的限制,载流子或激子被限制在不同的阱中,通过调节各种颜色的比例实现白光发射。

XIE 等人制备了有机多量子阱白光 LED^[7]。器件结构为 ITO/TPD (50nm)/BePP₂ (5nm)/TPD (4nm)/BePP₂ Rubrene (5nm)/TPD (4nm)/Alq₃

(10nm)/Al。50nm TPD 为空穴传输层,4nm TPD 为势垒层,BePP₂ 及 BePP₂Rubrene 为量子阱,置于 TPD 阻挡层之间。BePP₂ 为发蓝光荧光染料,Rubrene 为发橙光荧光染料。BePP₂ 与 Rubrene 的比例为 100(1~3)。Alq₃ 为电子传输层且发绿光。有机多量子阱 LED 的物理机制不同于多层 LED。注入载流子分布在不同的阱中形成激子,激子被势垒限制在阱中,激子在自己所在的阱中衰变发出不同颜色的光。从 BePP₂,BePP₂Rubrene 量子阱及传输层发出的光混合而成白光。在 BePP₂Rubrene 量子阱中,橙光发射来自于 BePP₂ 与 Rubrene 间的能量转移。基质将能量转移给 Rubrene 而发光,或由于载流子俘获而发光。在有机多量子阱 LED 中,势垒起重要的作用,它直接影响载流子的分布。TPD 势垒变厚,器件发绿橙色光,这意味着电荷载流子(主要为电子)在不同阱中分布不等。由于电子隧穿 TPD 势垒的几率低,TPD 必须足够薄(如 4nm)使载流子可以隧穿以致均匀地分布于不同的阱中。

这种器件发出的白光偏橙色,这是由于 Rubrene 的荧光效率比 Alq₃ 及 BePP₂ 高。在另一文献^[8]中,作者通过增加 BePP₂ 的阱数来调节 CIE 坐标。当有 3 个 BePP₂ 量子阱时,前向偏压 7V~13V 时,CIE 坐标从(0.42,0.38)变到(0.34,0.34)。当前向偏压为 12V 时,器件的亮度为 611cd/m²,发光效率为 0.34lm/W。

为了减少垒阱界面互扩散作用的影响,刘式塘^[9]提出了有机掺杂量子阱的概念,即垒层与阱的母体材料是相同的,只是在生长阱层的过程中同时掺入少量发光剂。由于掺杂剂的浓度梯度只有百分之零点几,因此界面互扩散影响很小。优化设计得到结构为 ITO/NPB (50nm)/Alq₃Rubrene (3nm)/Alq (3nm)/Alq₃ Rubrene (3nm)/Alq (40nm) Al/LiF 的 LED,以热稳定性更好的 NPB 代替 TPD。该器件在 9V 下的亮度达到 4200cd/m²,最大亮度达到 48000cd/m²,发光效率达到 4.59lm/W,这是世界上目前有机量子阱结构电致发光器件的最佳结果。

多量子阱白光电致发光器件的主要优点体现在以下几个方面^[7~11]:(1)色度调节方便,通过改变不同发光染料的阱数比可以调节色坐标;(2)量子阱结构对载流子的限制效应有助于提高器件的发光效率;(3)工艺简单;利用多源有机分子汽相沉积系统容易制备有多种材料组成的有机多量子阱白光电致发光器件;(4)相对普通的有机多层白光器件而言,在量子阱结构中载流子是靠隧穿分布在各个阱中

的,无需考虑能带匹配效应,可对材料的选择提供更大的自由度,发不同颜色光的量子阱的位置可以互换。

1.2 激基复合物

激基复合物(exciplex)是在一个分子的激发态与另一个不同分子的基态之间形成^[12~17]。施主分子具有最低的电子亲和力,施主分子激发紧跟着电子转移到另一个分子——受主。结果复合物电子空穴对能够经由光子发射而衰变见图1^[12]。激基复

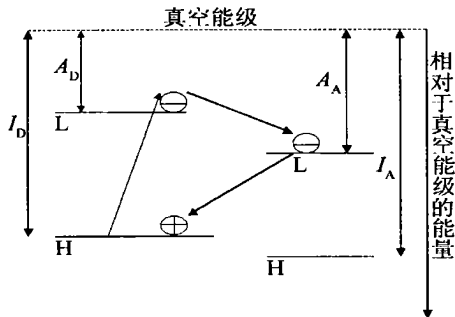


图1 激基复合物的形成机制与衰减, A_D, I_D 与 A_A, I_A 分别是施主与受主分子电子亲和势及电离势能

L—最低未被占据分子轨道 H—最高被占据分子轨道

合物发光与单个分子相比有相当大的红移,但这种红移不是由于新的化学物质形成而产生的。若混合物各组分的最低未被占据轨道有明显的空间交叠则有利于激基复合物的形成。对发蓝光的有机共轭分子,其最低的未被占据的分子轨道(LUMO)是离域的 π 轨道,有明显的空间交叠,因而易于形成激基复合物。其白光或近似白光发射或许是一个普遍的现象。调节混合物组份可进行色度调谐。激基复合物的发光或许代表了一种简单便宜且普遍的获得有机白光LED的方法。

MAZZEO^[13]等用旋涂法制备了基于激基复合物的白光LED。其结构为ITO(100nm)/PEDOT:PSS(50nm)/TPD/STO/Ca(15nm)/Al(100nm)。PEDOT:PSS为空穴注入层,TPD/STO为发光层,两者的摩尔比为9:1。器件电致发光谱见图2^[12],420nm处的峰是TPD及STO发光所致,570nm处的宽峰与TPD及STO发光有很大不同,光谱展宽且红移,但没有新的物质形成。这是由于TPD及STO形成激基复合物发光所致。这与TPD:STO膜的光致发光谱一致,见图3^[13],表明电泵浦及光泵浦两种衰减机制的相对效率是相同的。器件的开关电压是8V,亮度为150cd/m²。虽然结果离商业要求很远,但这一结果表明实际器件具有可行性,在优化接触及传输层方面有许多工作要做。

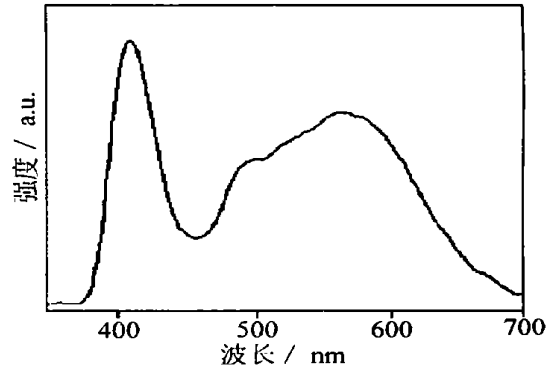


图2 基于TPD/STO装置的电致发光谱

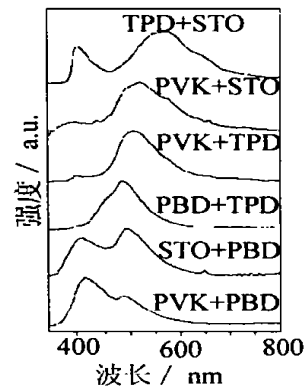


图3 混合物旋涂膜的光致发光谱

冯晶^[15,16]等采用蓝光染料(dppy)BF,利用它与空穴传输材料NPB的固界表面形成的激基复合物发光,并通过调整Alq层的厚度来调节器件的色度,制备了白光电致发光器件。器件的结构为ITO/NPB(50nm)/(dppy)BF(30nm)/Alq/(LiF/Al)。Alq为电子传输层及色度调谐层,其厚度从0变化到30nm。(dppy)BF在455nm处有一个显著的发光峰,482nm处有一个稍弱的肩峰。NPB的发光峰为450nm。器件电致发光覆盖了400nm~700nm的整个可见光区。其光谱在515nm和560nm处出现了两个新的发光峰,这两个峰不同于NPB和(dppy)BF薄膜的发光。它们来自于NPB/(dppy)BF的固界表面形成的激基复合物发光。激基复合物发光红移,且谱宽,它们发光与NPB及(dppy)BF发光共同构成白光。实验中发现当Alq的厚度为15nm时,器件的发光色度最好。该白光器件的结构简单,色度稳定,在整个工作电压范围内(10V~25V),器件的CIE指数由($x=0.29, y=0.33$)变化到($x=0.31, y=0.35$),始终接近白光等能量点($x=0.33, y=0.33$)。

ITANO等^[17]应用发绿光Alq₃为发射层,mr-MTDATA或t-Bu-TBATA为空穴传输层制备了双层有机LED,其结构为ITO/mr-MTDATA(或t-Bu-

TBATA) (600nm) / Alq₃ / Mg / Ag。电致发光谱向长波方向移动,光谱变宽是由于在 Alq₃ 的激发单态与空穴传输层基态之间的相互作用形成激基复合物。通过测量等摩尔 Alq₃ 与 m-MTDATA 或 t-Bu-TBATA 的旋涂膜的光致发光谱及荧光寿命证明了这一结论。Alq₃ 与空穴传输材料混合物荧光寿命比单态 Alq₃ 及空穴传输材料长。

GEBLER 等^[18]应用 PPyVPV 及 PVK 双异质结制备了双层 LED。其结构为 ITO / PVK / PPyVPV / Al。PVK 为空穴传输层,PPyVPV 为发射层。双层膜的光致发光及电致发光谱与单层膜相差甚远。其光致发光及电致发光峰不能归结于 PPyVPV 或 PVK 层。双层器件效率比单层大大增加是由于电荷局限在交界面上及激基复合物的形成。

激基复合物是一种施主激发态与受主基态之间形成的瞬态施主受主复合物。OSUHENI 及 JENEKHL 报道了 PBO 及 tris(p-tolyl)amine 之间激基复合物的形成。他们认为在 LED 中,激基复合物或许很重要。

1.3 能量转移

Förster 能量转移是从施主激发态分子通过近场偶极偶极共振相互作用将能量转移给受主分子,受主分子受激发产生辐射复合而发光。

LEE^[19]等制备了基于分子间不完全级联能量转移的三元混合物有机白光 LED。LED 的结构为 ITO / PVK / CPDHFPV / MEH-PPV / Al。PVK, CPDHFPV 及 MEH-PPV 以 19:1(重量比)混合。

图 4 显示了 PVK, CPDHFPV 及 MEH-PPV 的归一化发射谱及吸收谱^[20]。由图知 PVK 的发射谱

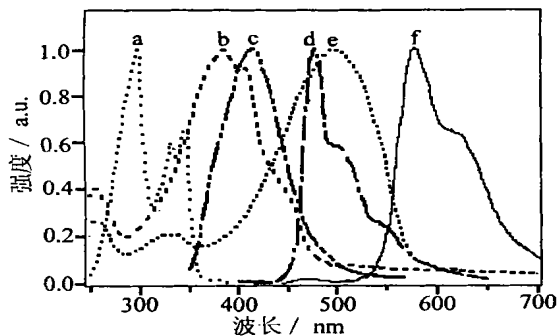


图 4 归一化的 PVK, CPDHFPV 和 MEH-PPV 的光致发光谱与 a—PVK 的吸收谱 b—CPDHFPV 的吸收谱 c—PVK 的光致发光谱 d—CPDHFPV 的吸收谱 e—MEH-PPV 吸收谱 f—MEH-PPV 光致发光谱

CPDHFPV 的吸收谱重叠, CPDHFPV 发射谱与 MEH-PPV 的吸收谱重叠。三元混合系统符合

Förster-type 能量转移的必要条件,施主发射谱与受主吸收谱彼此交叠。当分子间距在 Förster 距离范围内时,能量从 PVK 转移到 CPDHFPV,再从 CPDHFPV 到 MEH-PPV 成为可能。

实验中发现当用 340nm (PVK 的吸收峰) 激发三元混合物时,大部分激发能量转移给 CPDHFPV,部分能量转移给 MEH-PPV。最终同时观测到两种颜色——蓝色及橙红色,从而得到三元混合物经由不完全级联能量转移的光谱展宽的白光。

前向偏压 22V ~ 37V 时,其 CIE 坐标接近 (0.33, 0.33),亮度为 620cd/m² (20mA),外光量子效率为 0.09%。器件对驱动电压不敏感,如图 5 所示^[20]。

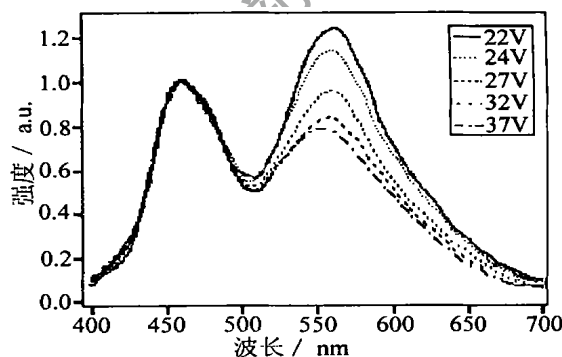


图 5 施加前向偏压时 ITO / (PVK / CPDHFPV / MEH-PPV 以质量比 19:1 混合) / Al 装置的电致发光谱

DESHPANDE^[20]等基于层间级联能量转移制备了有机电致发光器件。器件结构为 ITO / α -NPD (20nm) / α -NPDDCM2 (20nm) / BCP (2-12nm) / Alq₃ (30nm) / Mg:Ag (70nm) / Ag (40nm)。 α -NPD 发蓝光,DCM2 发红光。 α -NPD 为空穴传输层,BCP 为空穴阻挡层。Alq₃ 发绿光且为电子传输层。

在 α -NPD 中形成激子经由 Förster 能量转移给 Alq₃,又从 Alq₃ 转移到 DCM2,两次通过 BCP 层。这种层间连续能量转移不同于级联能量转移,级联能量转移发生在空间上分开的层中的分子之间。薄的 BCP 层允许激子从 Alq₃ 返回到 DCM2。这种层间连续能量转移使 3 种分子均部分地被激发因而产生白光。阻挡层 BCP 的厚度及 DCM2 在 α -NPD 中的浓度用于调节器件的光谱以获得平衡白光。当 DCM2 以 0.6% 浓度掺杂到 α -NPD 中,BCP 为 4nm 时,器件 CIE 坐标为 (0.33, 0.33)。驱动电压 18.2V 时,其最大亮度 13500cd/m²,在亮度为 100cd/m² 时,其量子效率及发光效率分别为 0.5% 及 0.35lm/W。

VIRGILI^[21]等发现能量从发蓝光的 PFO 转移到发红光的 TPP。PFO 423nm 发射峰与 TPP 418nm 吸

收峰重叠导致了有效的 Förster 能量转移,使发光峰从 441nm 转移到 653nm。用一步诱导如此大的能量转移或许会使全色显示像素处理过程简化,尤其是经过喷墨或其它打印设备,因为一个普通的聚合物可被用于红色或绿色基质及蓝光发射体。TPP 发射光包括两个尖峰(653nm,714nm),但只有 653nm 可被人眼接收。这一特性使人们利用 TPP 获得红色窄带光,这对于 RGB 有机显示的发展非常重要。

CERULLO^[21]等用飞秒荧光上转换及泵浦探测光谱测量了具有不同 TPP 浓度的 PFO/TPP 混合物的能量转移关系,证明了其转移机制为 Förster 能量转移,实测能量转移半径为 4.2nm,与理论计算值 4.8nm 接近。

FINLAYSON^[22]等在有机、非有机双层光学微腔中发现了增强的 Förster 能量转移。

2 有机光致发光白光 LED

有机光致发光白光 LED 同无机白光 LED 的原理类似。主要是利用无机蓝光 LED 为基础光源,将 LED 的部分蓝光用来激发有机荧光薄膜使其发黄绿光或绿光和红光,另一部分蓝光透射出来,有机薄膜的黄绿光或绿光和红光与透射的蓝光组合成白光。有机光致发光白光 LED 制造简单、成本低,其荧光量子效率可能高于无机荧光粉。目前关于单色及多色有机光致发光膜报道不少,但已封装好的有机光致发光 LED 还未见报道。JIN^[23]等制备了发蓝绿光的 PPVD0 和 PPVD1 有机膜,ZHANG^[24]等制备了发绿红光有机膜。这些膜用蓝光 LED 激发,有可能制成有机白光 LED。

LEE^[19]等制备了 PVK/CPDHFPV/MEH-PPV 发光膜,当用 340nm 及 380nm 激发时,其光谱范围几乎覆盖整个可见光,发光机理为分子间能量转移,如图 6 所示^[20]。THOMPSON^[14]等将两种发蓝光有机物混合,把它们按一定比例混合溶解在甲苯或二氯甲烷中,用旋涂法制备出发白光的有机介质膜(如图 3 所示^[13]),其机理为激基复合物发光。用紫外或近紫外 LED 激发这种膜有可能制成有机白光 LED,显然对有机白光 LED 旋涂法制备有机蓝光混合物膜代表了一条简单经济的路径。紫外或近紫外 LED 加红绿蓝荧光物质将是最好的制造白光 LED 的方法,但目前尚未见已封装好的有机白光 LED,其主要原因是性能优良的材料应具备以下基本要素:(1)具有较高的荧光量子效率;(2)较好的热稳定性;(3)良好的化学稳定性;(4)优良的加工和成

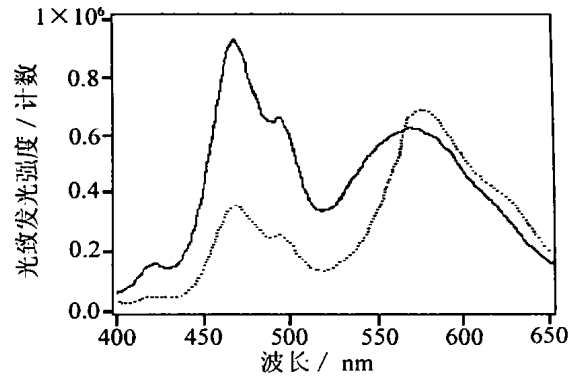


图 6 PVK/CPDHFPV/MEH-PPV 混合物(质量比为 19:1)的光致发光光谱 实线—340nm 激发 虚线—380nm 激发

膜性;(5)有机膜易于 LED 的封装。

中国海洋大学光学光电子省重点实验室目前正在国家自然科学基金资助下开展这方面的研究工作,已取得了一些进展。将蒽酮衍生物超细粉末按 1100000 的重量比,通过浮染法将其分散进线型低压聚乙烯树脂中并制成薄膜。低浓度的蒽酮衍生物在塑脂中呈分子状态成为分立的中心发光,在 510nm 光激发能产生 612nm,658nm 两个发光带。采用 500nm 的绿光激发发光薄膜,其荧光光谱如图 7 所示。

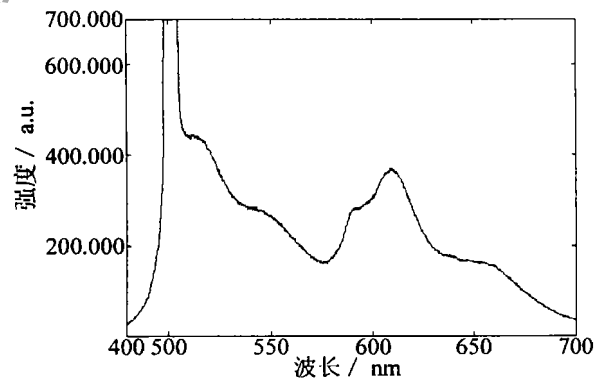


图 7 激发波长为 500nm 时发光膜的荧光光谱

3 总结

多量子阱白光电致发光器件可以提高器件发光效率,无需考虑能带匹配效应,对材料的选择自由度大。发蓝光有机分子间易形成激基复合物,其白光或近似白光发射或许是一个普遍的现象,调节混合物组分可进行色度调谐。激基复合物的发光或许代表了一种简单便宜且普遍的获得有机白光 LED 的方法。以能量转移为机制的有机电致发光白光目前尽管效率不高,但发现能量从发蓝光的 PFO 转移到发红光的 TPP。用一步诱导如此大的能量转移或许会使全色显示像素处理过程简化,这一特性使人们利用 TPP 获得红色窄带光,这对于 RGB 有机显

示的发展非常重要。

光致发光有机白光LED同无机白光LED类似。已封装好的还未见报道,但已报道了一些发光薄膜的发光情况。如能研制出荧光量子效率高、热稳定性化学稳定性好、具有优良的加工和成膜性的发光膜,将这种膜覆盖在蓝光LED的管芯上,采用改性环氧树脂进行封装,能够得到发白光的LED。这方面的工作正在研究之中。

4 展望

有机发光物质种类繁多,在全色显示、大屏幕视频显示方面比无机发光材料有优势,另外有机白光LED制备工艺简单、成本低功耗小,具有巨大的应用价值及潜在的市场。有机发光器件引起了各国科研工作者的极大重视而成为当今发光显示领域的研究热点,在不久的将来,有机白光LED存在的问题将得到解决,将有产品问世,或许有机白光LED与无机白光LED会平分秋色,那时将对人们的生活、生产产生深远的影响。

参考文献

- [1] MILLS A. Optoelectronics, 2001, 14(3): 38~42.
- [2] MILLS A. Optoelectronics, 2001, 14(1): 32~37.
- [3] HOLT M. Optoelectronics, 2001, 14(3): 44~47.
- [4] PEARTON S J, ABERMATHY C R, OVERBERG M E *et al.* Material Study, 2002, 6: 24~31.
- [5] 刘式墉. 物理, 1998, 28(7): 404~408.
- [6] 姚云峰. 白光发光二极管的技术现状. 方大月刊, 2003, 3(23): 1~4.
- [7] XIE Zh Y, LI Y Q, HUANG J S *et al.* Synthetic Metals, 1999, 106: 71~74.
- [8] XIE Z Y, FENG J, HUANG J S *et al.* Synthetic Metals, 2000, 108: 81~84.
- [9] 刘式墉, 杨开霞, 黄劲松 *et al.* 发光学报, 2002, 23(1): 7~11.
- [10] 刘式墉, 冯晶, 李峰. 发光学报, 2002, 23(5): 425~430.
- [11] LIU Z G, NAZARE H. Synthetic Metals, 2000, 111~112: 47~51.
- [12] DESTRI S, GIOVANELLA U, FAZIO A *et al.* Organic Electronics, 2002, 3: 149~156.
- [13] MAZZEO M, THOMPSON J, BLYTH R I R *et al.* Physics, 2002, E13: 1243~1246.
- [14] THOMPSON J, BLYTH R I R, MAZZEO M *et al.* A P L, 2001, 79(5): 560~562.
- [15] 冯晶, 刘宇, 王悦 *et al.* 发光学报, 2002, 23(1): 25~27.
- [16] FENG J, LI F, GAO W B *et al.* A P L, 2001, 78(25): 3947~3949.
- [17] ITANO K, OGAWA H, SHIROTA Y. A P L, 1998, 72(6): 636~638.
- [18] GEBLER D D, WANG Y Z, BLATCHFORD J W *et al.* A P L, 1997, 70(13): 1644~1646.
- [19] LEE T W, PARK O O, CHO H N *et al.* Synthetic Metals, 2001, 122: 437~441.
- [20] DESHPANDE R S, BULOVIC V, FORREST S R. A P L, 1999, 75(7): 888~890.
- [21] VIRGILI T, LIDZEY D G, BRADLEY D D C. Synthetic Metals, 2000, 111~112: 203~206.
- [22] FINLAYSON C E, GINGER D S, GREENHAM N C *et al.* Chem Phys Lett, 2001, 338: 83~87.
- [23] JIN Y D, CHEN H Z, HEREMANS P L *et al.* Synthetic Metals, 2002, 127: 155~158.
- [24] ZHANG B W, ZHAO W, CAO Y *et al.* Synthetic Metals, 1997, 91: 237~241.

(上接第67页)

平行平面腔的热焦距补偿,可作类似的计算分析。

3 结论

对多棒平行平面腔的动态工作特性作了详细分析,由 g^* 参数和等价腔长 L^* 的解析公式作出了多棒平行平面腔在 g^* 参数图上的动态工作特性曲线。研究了这类光腔的动态工作特性,并提出了用调节镜和棒间距离来补偿热焦距偏离的方法,以三棒平行平面腔为例给出了解析公式。本文中所得结果对高功率多棒腔设计和热焦距不等时的补偿有实

际应用意义。

参考文献

- [1] GIESEN A, HÜGEL H, VOSS A *et al.* Appl Phys, 1994, B58: 365~372.
- [2] KORTZ H P, IFFL ÜNDER R M, WEBER H. Appl Opt, 1981, 20: 4124~4134.
- [3] DRIEDGER K P, IFFL ÜNDER R M, WEBER H. IEEE J Q E, 1988, 24(4): 665~673.
- [4] 李正佳, 夏文建, 朱长虹 *et al.* 激光技术, 1998, 22(5): 284~286.
- [5] 朱广志, 陈培峰, 周卓尤 *et al.* 激光杂志, 2003, 24(2): 29~31.
- [6] 吕百达. 固体激光器件. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 114~117.