

文章编号: 0253-2239(2010)07-1895-09

蓝色荧光小分子电致发光材料

肖立新 胡二元 孔 胜 仵博远 张明晓 陈志坚 曲 波 龚旗煌*

(北京大学物理学院人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 有机电致发光器件(OLED)虽然已于 1997 年开始商品化,但是目前就全色显示来说,蓝色发光材料研究相对比较薄弱,故开发高效且色纯度高的深蓝光材料已成为本领域的一个亟待解决的课题。蓝色磷光材料在色纯度以及稳定性方面离实用化还有一定距离,但是蓝色荧光方面已经有较多十分接近目标的工作发表。在这些材料之中,蒽以及螺芴的衍生物在材料的热稳定性及色纯度方面表现出了强大的优势,而含氮化合物的特殊电子结构,可以有效地提高材料的荧光量子效率。根据分子结构,把蓝色荧光材料分为芳香烃类、含氮原子类和含其他杂原子类材料等。分析了各种蓝色荧光材料的研究现状,并对 OLED 蓝色荧光材料的发展趋势进行了评述和展望。

关键词 光学材料; 电致发光; 荧光材料; 有机小分子

中图分类号 O621.22 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.1895

Small Organic Molecules for Blue Electroluminescence

Xiao Lixin Hu Shuangyuan Kong Sheng Qi Boyuan Zhang Mingxiao

Chen Zhijian Qu Bo Gong Qihuang

(State Key Laboratory for Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Although organic light-emitting device (OLED) has been commercialized since 1997, blue light-emitting material is still a challenge for full color display. It is crucial to develop blue emitting material with high efficiency and color purity. The thermal stability and its color purity of blue electrophosphorescent materials are still far from commercialization, but a lot of achievements on excellent blue electrofluorescent materials have been made. Anthracene derivatives and spirobifluorene compounds show high performance in thermal stability and color purity, while nitrogen-containing compounds are competitive in efficiency because of their special electronic structure. Based on its structure, the blue electrofluorescent materials can be classified into aromatic hydrocarbons, nitrogen-containing compounds, and other organic compounds containing other hetero-atoms. The developments of blue electrofluorescent materials are reviewed at present, and the prospect on blue electrofluorescent materials is also discussed.

Key words optical materials; electroluminescence; fluorescence material; small organic molecule

1 引 言

通常有机材料被认为是绝缘体,但是随着科学的进步,科学家们不但发明了可以导电的有机材料,还发现了某些有机半导体材料通电可以发光。1963年, Pope^[1]以数百伏的偏压施加于蒽的晶体上,首次

观察到发光现象。但是,直到 1987 年邓青云等^[2]制作了高性能的双层薄膜器件后, OLED 技术才引起人们的极大关注。1990 年 Friend 等^[3]报道了共轭聚合物的电致发光现象,开创了高分子领域发光材料的先河。1998 年 Förrest 等^[4]报道了电致磷光材料,突破

收稿日期: 2010-04-21; 收到修改稿日期: 2010-05-26

基金项目: 国家 973 计划(2007CB307000, 2009CB930504)和国家自然科学基金(60677002, 10674011, 10934001, 60907015, 10821062)资助课题。

作者简介: 肖立新(1966—),男,博士,副教授,主要从事有机电子学等方面的研究。E-mail: xiao66@pku.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: qhgong@pku.edu.cn

了有机电致荧光材料内量子效率低于 25% 的限制。OLED 被认为是下一代超薄平面显示器的新星。由于其具有快速响应和面发光和柔性可弯曲^[5]等特点,必将成为液晶显示器、等离子体显示器等强有力的竞争对手,特别是 1997 年日本先锋公司率先实现了 OLED 的实用化。如今绝大部分的国际知名电子公司,比如三星、爱普森、柯达、索尼、三洋、东芝等,甚至连液晶的先驱者——夏普公司也投入到了这场如火如荼的技术竞赛中。2005 年韩国三星公司制作出了世界上最大的单片 40 inch (1 inch = 2.54 cm) OLED,2007 年日本索尼公司推出 11 inch 的 OLED 电视机商品,更加让大家感觉到了有机电致发光平面显示器时代的迫近。目前,有机物/高分子平板显示器件领域的研究早已不限于学术界,几乎所有国际有名的电子大公司及化学公司都投入巨大的人力与资金进入这一研究领域,呈现研究、开发与产业化齐头并进的局面。

虽然 OLED 的产品已经有少量商品化,特别是小型的手机显示屏已经可以见到 OLED 的新姿。但是其材料的色纯度、稳定性、器件的制造成本以及驱动电路等还存在一定的问题^[6]。在 OLED 材料研究中,蓝光材料的研究相对比较薄弱。但是蓝色是三原色之一,全色显示中不可或缺,通过色转换法还可以从蓝光获得绿光和红光。由于蓝色发光材料一般具有较宽的能隙,很难同时满足蓝光对效率和色纯度的要求^[7]。虽然蓝色磷光材料在色纯度以及稳定性方面离实用化还有一定距离^[8],但是蓝色荧光方面已经有较多十分接近目标的工作发表。(美国)国家电视标准委员会(NTSC)的标准蓝光的色度坐标为(0.14,0.08)。从已经报道的文献来看,三环芳香烃化合物以其高的热稳定性和高的色纯度已经成为本领域研究的热点^[8~16],而含氮化合物的特殊电子结构,有效地提高了材料的荧光量子效率,使其在器件效率方面独领风骚,但是分子内较大的偶

极矩又让材料的色纯度难以提高^[20~31]。为了能够综合这两类材料的优点,获得性能更加优良的蓝光材料,人们已经开始试着将这两种结构结合起来,以构建新型高效深蓝材料。尽管高分子蓝光已经取得很多很好的成绩,由于篇幅问题,本文只介绍有机小分子方面的成果。通过综述蓝色荧光小分子材料,详细评述各种材料的特性,期望对蓝色荧光材料的发展提供有益的指导。下面根据分子结构把蓝光材料分类,分别叙述芳香烃类、含氮原子类和含其他杂原子类的蓝光材料。

2 芳香烃类蓝光材料

根据芳香烃的结构,按照稠环的大小,把芳香烃蓝光材料分为单环、三环、及多环类。下面分别综述它们的性质与特点。

2.1 单环芳香烃类蓝光材料

一般来说,单环芳香烃由于容易结晶,发生分子内聚集而导致薄膜状态下荧光效率降低,且玻璃化转变温度较低,热稳定性差,因此需要导入一些改善其热稳定性的基团如萘等,或者互连成较大的共轭体系而得到热稳定性好的蓝光材料。

单环类蓝光材料中最重要的是二苯乙烯基芳香烃类蓝光材料,化合物 4,4'-二(2,2-二苯乙烯基)-1,1'-联苯(DPVBi)^[9]具有良好的成膜性,同时也是一个良好的蓝色发光和主体材料。掺杂 BCzVB 后,其流明效率(E_L)提高了两倍,达到 1.5 lm/W,外量子效率(E_{QE})也达到 2.4%。

为了提高分子的热稳定性,有效地避免分子聚集,Duan 等^[10]合成了三聚二苯乙烯基苯 HSTP,其玻璃化转变温度达到 118 °C,薄膜状态下的荧光淬灭相比于单体二苯乙烯基苯有了很大的改善。优化结构以后的器件电流效率达到 4.88 cd/A^[11]。单环芳香烃类蓝光材料的发光性能总结在表 1 中,其结构式如图 1 所示。

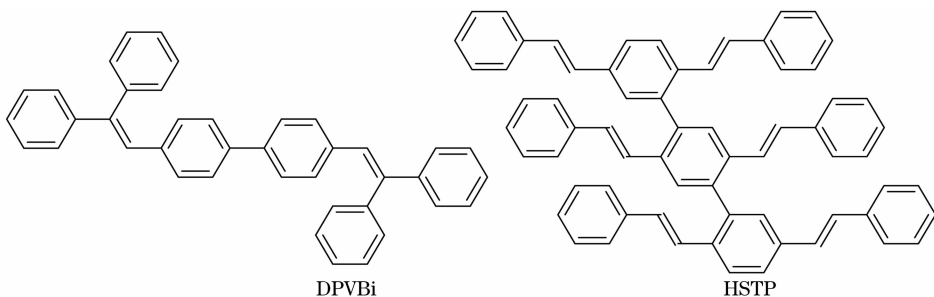


图 1 单环芳香烃类蓝光材料的结构式

Fig. 1 Structures of single cyclic aromatic blue emitters

表 1 单环芳香烃类蓝光材料的物理性质和发光性能

Table 1 Physical property and luminescent performances of single cyclic aromatic blue emitters

Material	$T_g/^\circ\text{C}$	Emission wavelength /nm	$E_L/(\text{lm}/\text{W})$	$E_{QE}/\%$	CIE
DPVBi ^[9]			1.5	2.4	
HSTP ^[6,7]	118	460			(0.16, 0.13)

2.2 三环芳香烃类蓝光材料

三环芳香烃类蓝光材料的分子结构中包含一个三环稠环结构,其中最常见的是蒽类和芴类(包括螺芴)蓝光材料。

2.2.1 蒽类蓝光材料

没有取代的蒽因为容易结晶而难以制成性能优良的器件。在蒽上连入大的取代基后,可以有效防止分子间的聚集,扭曲共平面结构降低分子的共轭度,从而得到高效的深蓝光材料。从文献报道的蒽类蓝光材料来看,基本都具有很高的玻璃化转变温度,发光色度较纯。减低其结晶性是蒽类蓝光材料的主要课题。

TPVAn^[12]的分子结构为蒽两端接有位阻很大的四苯乙烯基,这是一个典型的有效改善二苯乙烯

基化合物的热稳定性的例子。这样既可以有效阻止分子间的聚集,又可使化合物具有高的热稳定性,其玻璃化转变温度为 155 $^\circ\text{C}$ 。器件最大外量子效率为 5.3%, CIE 色度坐标为(0.14, 0.11)。

Kwon 等^[14]充分利用螺芴本身的扭曲结构和大取代基效应,将螺芴与蒽连接成一个大的共轭化合物 TBSA。该化合物的热稳定性很高,玻璃化转变温度高达 207 $^\circ\text{C}$ 。分子的扭曲结构有效地降低了分子的共轭性,使发光波长蓝移,但也降低了材料的效率。以 TBSA 为发光层的 OLED 器件色坐标为(0.15, 0.11), 流明效率为 1.22 lm/W。蒽类蓝光材料蓝光材料的发光性能总结在表 2 中,其结构式如图 2 所示。

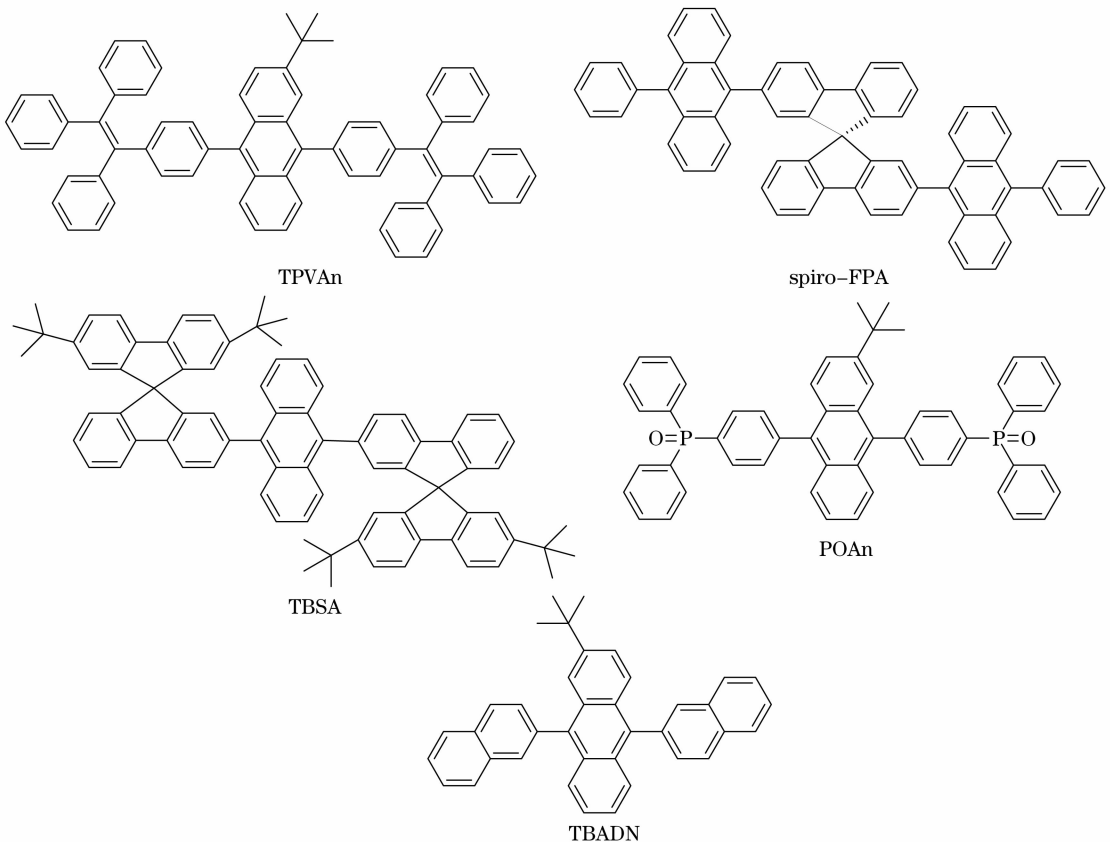


图 2 蒽类蓝光材料的结构式

Fig. 2 Structures of anthracene derivatives

表 2 蒽类蓝光材料的物理性质和发光性能

Table 2 Physical property and luminescent performances of anthracene derivatives

Material	$T_g/^\circ\text{C}$	Emission wavelength /nm	$E_L/(\text{lm}/\text{W})$	$E_{QE}/\%$	CIE
TPVAn ^[12]	155	454	2.1	5.3	(0.14, 0.11)
Spiro-FPA ^[13]	223		2.1	2.0	(0.13, 0.21)
TBSA ^[14]	207	456	1.2		(0.15, 0.11)
POAn ^[15]	146	444	1.9	4.3	(0.15, 0.07)
TBADN ^[16]		452			(0.14, 0.10)

2.2.2 芴类蓝光材料

芴的电致发光性能十分优越,但是由于芴的C-9位容易被氧化形成芴酮而导致色纯度的下降。在芴的C-9位进行烷基化取代后,既可以改善其溶解性,还可以提高其稳定性^[17]。螺芴比芴要稳定,因其扭曲的非共平面结构,分子内共轭程度变小,引起发光波长蓝移,有效提高了器件的色纯度。同时扭曲的结构也可以有效避免分子内聚集,提高发光效率。而螺芴的刚性结构也极大地提高了分子的热稳定性。

BSF^[19]的分子由两个螺芴环连接构成,热稳定

性很好,玻璃化转变温度为 174 $^\circ\text{C}$ 。化合物在高浓度时几乎没有荧光淬灭,溶液中的荧光效率为 0.70,薄膜状态下为 0.66。基于 BSF 的器件,启亮电压很低,仅为 2.5 V,器件发光波长在 400 nm 以下。

Wu 等^[21]设计了一种含咪唑结构的螺芴衍生物分子 TBPSF,其分子内扭曲结构可以有效避免分子聚集引起的荧光淬灭,薄膜的荧光量子效率高达 80%,荧光发射波长为 430 nm。化合物的热稳定性也非常高,玻璃化转变温度为 195 $^\circ\text{C}$ 。芴类蓝光材料的发光性能总结在表 3 中,其结构式如图 3 所示。

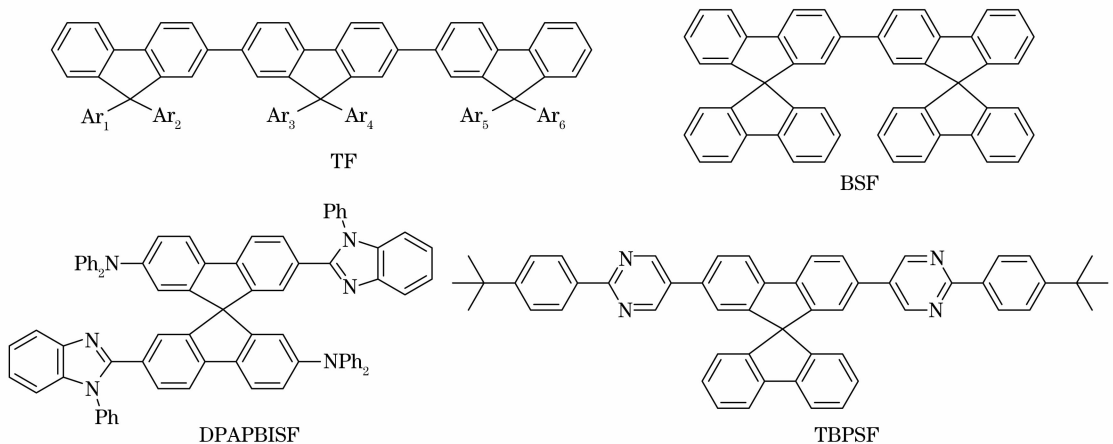


图 3 芴类蓝光材料的结构式

Fig. 3 Structures of fluorene derivatives

表 3 芴类蓝光材料的物理性质和发光性能

Table 3 Physical property and luminescent performances of fluorene derivatives

Material	$T_g/^\circ\text{C}$	Emission wavelength /nm	$E_L/(\text{lm}/\text{W})$	$E_{QE}/\%$	CIE
TF ^[18]	189~231			2.5~3.0	
BSF ^[19]	174	374, 392		3.6	
DPAPBISF ^[20]	165		0.14	0.5	(0.15, 0.14)
TBPSF ^[21]	195			2.3	

2.3 多环芳香烃类蓝光材料

多环芳香烃蓝光材料是指分子内存在 4 个以上并在一起的共轭环。主要有三苯基苯、芘(pyrene)和苝(perylene)等。多环芳香烃类蓝光材料分子内具有较大的共轭区域,荧光量子效率较高,但是大的共轭体系也会引起化合物的发光峰红移,导致器件的色纯度不够蓝。

作为蓝光材料的花其荧光量子效率高达 0.94,但是它的共平面结构导致分子间的聚集非常严重。在花环上连上四个大的叔丁基取代后,TBPe 分子的共平面性有所降低,溶液状态下的荧光效率相比于花有所降低(0.85),但是有效地避免了薄膜状态下分子间聚集引起的荧光淬灭。在其发光器件中随着 TBPe 掺杂浓度的增加,电流效率几乎没有

下降^[22]。

Tang^[23]等合成了一种芴基取代的芘衍生物 FSP, 芴的 C-9 位置接入位阻较大的芳基后, 有效地避免了分子间的聚集, 在溶液和固态都呈现深蓝光发射。化合物还利用了芘的大共轭体系, 良好的载流子迁移率和空穴注入能力。三层器件结构最大亮

度达 19885 cd/m², CIE 色度坐标为(0.17, 0.17)。

芳香化合物 BTP^[24]的荧光发光峰位于 450 nm, 为深蓝光发射, 其 OLED 器件展现了良好的性能, 最大亮度高达 26100 cd/m², 外量子效率高达 4.2%。多环芳香烃类蓝光材料的发光性能总结在表 4 中, 其结构式如图 4 所示。

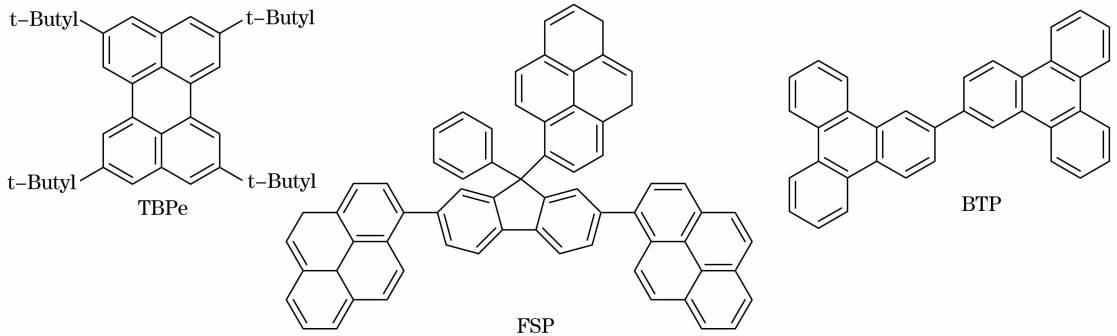


图 4 多环芳香烃类蓝光材料的结构式

Fig. 4 Structures of multi-cyclic aromatic blue emitters

表 4 多环芳香烃类蓝光材料的物理性质及发光性能

Table 4 Physical property and luminescent performances of multi-cyclic aromatic hydrocarbon blue emitters

Material	$T_g/^\circ\text{C}$	Emission wavelength /nm	$E_L/(\text{lm/W})$	$E_{QE}/\%$	CIE
TBPe ^[22]		460			
FSP ^[23]	217	454	1.2		(0.17, 0.19)
BTP ^[24]		458	2.5	4.2	(0.14, 0.11)

3 含氮原子的蓝光材料

3.1 芳胺类蓝光材料

芳胺基团具有很强的给电子能力, 容易在分子内形成电子推拉结构, 从而使材料的荧光量子效率增强, 同时, 分子还具有较好的电子和空穴传输能力, 因此芳胺类蓝光材料也是人们研究的热点。但是芳胺类材料的分子偶极矩较大, 会导致发光峰红移, 降低材料的色纯度。

二苯乙烯基上接入二苯胺结构会产生近平面的几何结构, 减少分子的扭曲, 引起吸收和荧光光谱红移, 为了解决这个问题, Li 等^[28]在中间的芳基上引入氟原子以调节发光颜色。以 TFVBi 为发光层做成器件, 电流效率可达 5.91 cd/A, CIE 色度坐标为

(0.14, 0.14), 外量子效率达 4.87%。

Wei 等^[26]设计了一类新的蓝光材料, 由二苯乙烯基的两个苯环与芴的 C-9 位置连接起来形成一个 7 元环。这个结构可以避免分子间的 $\pi-\pi$ 堆积而引起的发光淬灭或红移。器件最大外量子效率达到了惊人的 7.87%。

Lee 等^[29]研究发现, 非对称结构的芳胺取代的二苯乙烯基衍生物共轭长度变短, 发光波长蓝移, 于是合成了一系列二苯乙烯基衍生物, 其中以 BD 为掺杂发光层的器件, 发射波长为 438 nm, 外量子效率达 5.1%。芳胺类蓝光材料的发光性能总结在表 5 中, 其结构式如图 5 所示。

表 5 芳胺类蓝光材料的物理性质和发光性能

Table 5 Physical property and luminescent performances of aromatic amines

Material	$T_g/^\circ\text{C}$	Emission wavelength /nm	$E_L/(\text{lm/W})$	$E_{QE}/\%$	CIE
MeCl ^[25]	56	458	1.1	2.7	
XTPS ^[25]	120	462	2.9	4.1	
DASF ^[26]	123	466	8.2	7.9	(0.15, 0.25)
TPPAT ^[27]	100	451		1.6	(0.16, 0.20)
TFVBi ^[28]		456	3.0	4.9	(0.14, 0.14)
BD ^[29]		438	2.5	5.1	(0.14, 0.13)

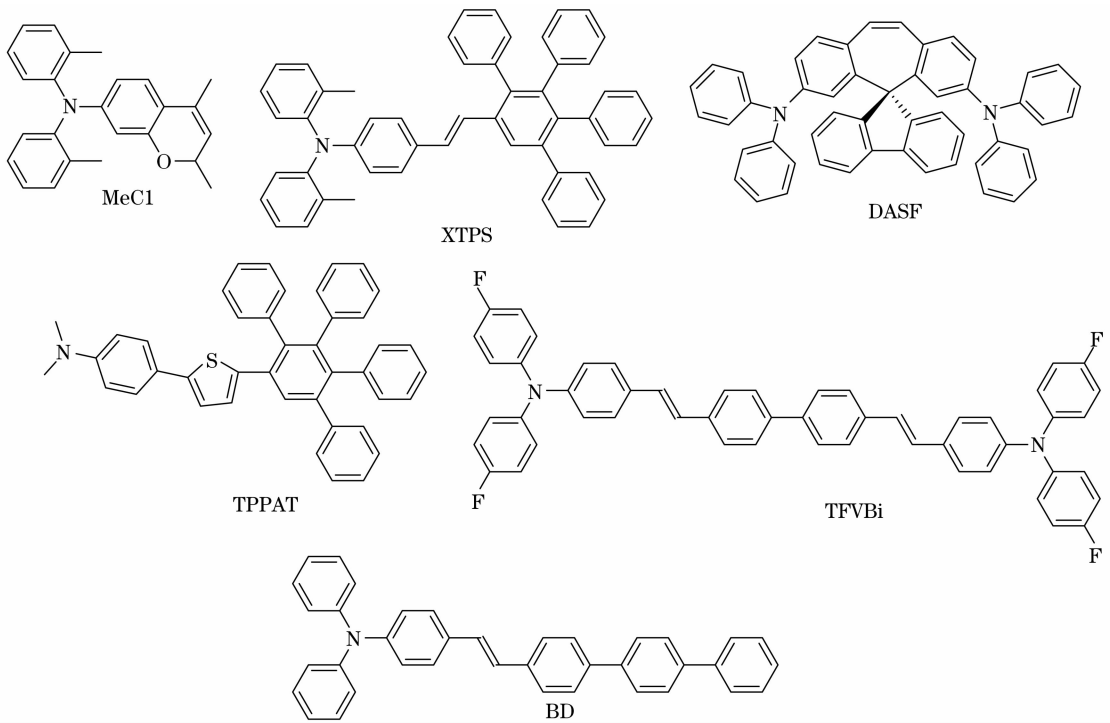


图 5 芳胺类蓝光材料的结构式

Fig. 5 Structures of aromatic amines

3.2 含氮杂环蓝光材料

含氮杂环化合物的氮原子固定在共轭环中,与芳胺类材料相比,结构更为稳定,玻璃化转变温度较高。Li 等^[30]对含氮杂环类化合物进行了理论计算,预见这类化合物具有良好的光电性能。

Shu 等^[32]报道了两个含有螺芴结构的吡唑并喹啉衍生物 spiro-PAQ-Me 和 spiro-PAQ-Ph。分子内稳定的刚性结构使分子具有很高的热稳定性,spiro-PAQ-Ph 的玻璃化转变温度高达 280 °C。以 spiro-PAQ-Ph 掺杂 TPBi 的器件最大亮度超过 20000 cd/m²。

n 型分子 B2PPQ^[34]具有很高的热稳定性,熔点为 349 °C,溶液下荧光量子效率高达 0.92。基于

B2PPQ 的器件外量子效率高达 6.56%,CIE 色度坐标为(0.15,0.16),是一个效率和色纯度都比较突出的蓝光材料。

Kuo 等^[35]报道了一系列芳基取代的吡咯衍生物。这些吡咯衍生物因为空间位阻较大,有效地避免了形成聚集物,提高了荧光量子效率。

Li^[37]等报道了一种新型蓝光材料 TAZ-OF(2)-NPh,在低聚芴的两端引入苯胺基和三氮唑结构,苯胺基具有良好的空穴传输能力,而三氮唑是一个优秀的电子传输和空穴阻挡材料。单层结构器件最大亮度 1128 cd/m²,最大电流效率 0.83 cd/A,CIE 色度坐标为(0.16,0.26)。含氮杂环蓝光材料的发光性能总结在表 6 中,其结构式如图 6 所示。

表 6 含氮杂环蓝光材料的物理性质和发光性能

Table 6 Physical property and luminescent performances of nitrogen-containing heterocyclic blue emitters

Material	$T_g/^\circ\text{C}$	Emission wavelength /nm	$E_L/(\text{lm/W})$	$E_{QE}/\%$	CIE
PAQ-t-Bu ^[31]			1.00	3.0	(0.16,0.09)
spiro-PAQ-Ph ^[32]	280	466	2.02	3.6	(0.14,0.17)
PhQ-CVz ^[33]	75		1.77	2.4	(0.16,0.09)
B2PPQ ^[34]		459	4.30	6.6	(0.15,0.16)
NPANPy ^[35]	108	460			(0.16,0.14)
p-CzOxa ^[36]		470	2.25		(0.14,0.19)
TAZ-OF(2)-NPh ^[37]	127	436			(0.16,0.26)

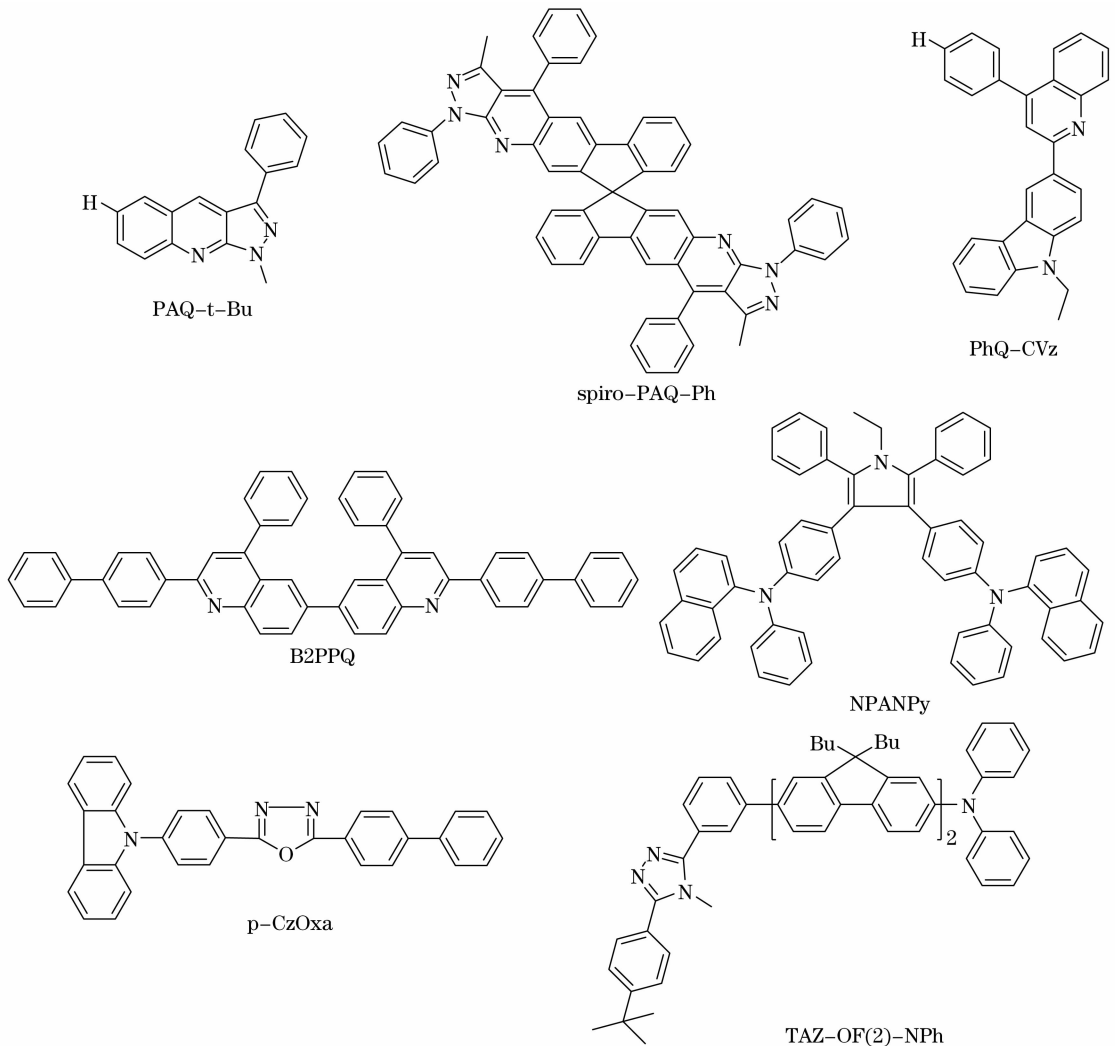


图 6 含氮杂环蓝光材料的结构式

Fig. 6 Structures of nitrogen-containing heterocyclic blue emitters

表 7 含其它杂原子类蓝光材料的物理性质和发光性能

Table 7 Physical property and luminescent performances of other organic compounds containing other hetero-atoms

Material	$T_g / ^\circ\text{C}$	Emission wavelength / nm	$E_L / (\text{lm/W})$	$E_{QE} / \%$	CIE
$\text{Ph}_3\text{SiPh-TPAOXD}^{[39]}$	83	460	1.1	2.4	(0.16, 0.18)
$\text{P36-27SiF90}^{[40]}$	99			1.9	(0.16, 0.08)
$\text{MPS}^{[41]}$		490	14	8.0	
$\text{BMB-2T}^{[43]}$	107	446, 472	1.7	1.1	
$\text{BMB-3T}^{[43]}$	115		1.5	1.1	
$\text{TMB-TB}^{[44]}$	160		0.5	0.8	

4 含其他杂原子的蓝光材料

一般分子中引入杂原子以后,化合物的物理性质和电致发光性质都会随之而发生改变。有较多文献报道了含硅和含硼的有机分子作为蓝光材料,其中有些材料具有十分奇特的发光特性。但是通常其热稳定性有待进一步改善。

Chen 等^[38,39]合成了一系列基于四苯基硅烷的蓝色发光材料 $\text{Ph}_n\text{Si}(\text{Ph-TPAOXD})_{4-n}$, 基于 Ph_3Si

(Ph-TPAOXD)的器件,最大亮度达到 19000 cd/m^2 , 发光波长为 460 nm。

噻咯衍生物具有聚集发光的性质,在聚集状态下,其荧光会显著增强。有机硅化合物 1-甲基-1,2,3,4,5-五苯基噻咯(MPS)^[41]制作的器件达到外量子效率达到 8%,流明效率高达 14 lm/W ,但是发光峰位于 490 nm 处,色纯度不好。

Shirota 等^[42]在噻吩环两端接入二咪基硼基,得到了 BMB-2T 和 BMB-3T,其玻璃化转变温度稍大于

100 ℃。BMB-2T 的荧光量子效率达到 0.86^[43], 基于 BMB-2T 的器件在 446 nm 和 472 nm 处都有发射峰。

含其它杂原子类蓝光材料的发光性能总结在表 7 中, 其结构式如图 7 所示。

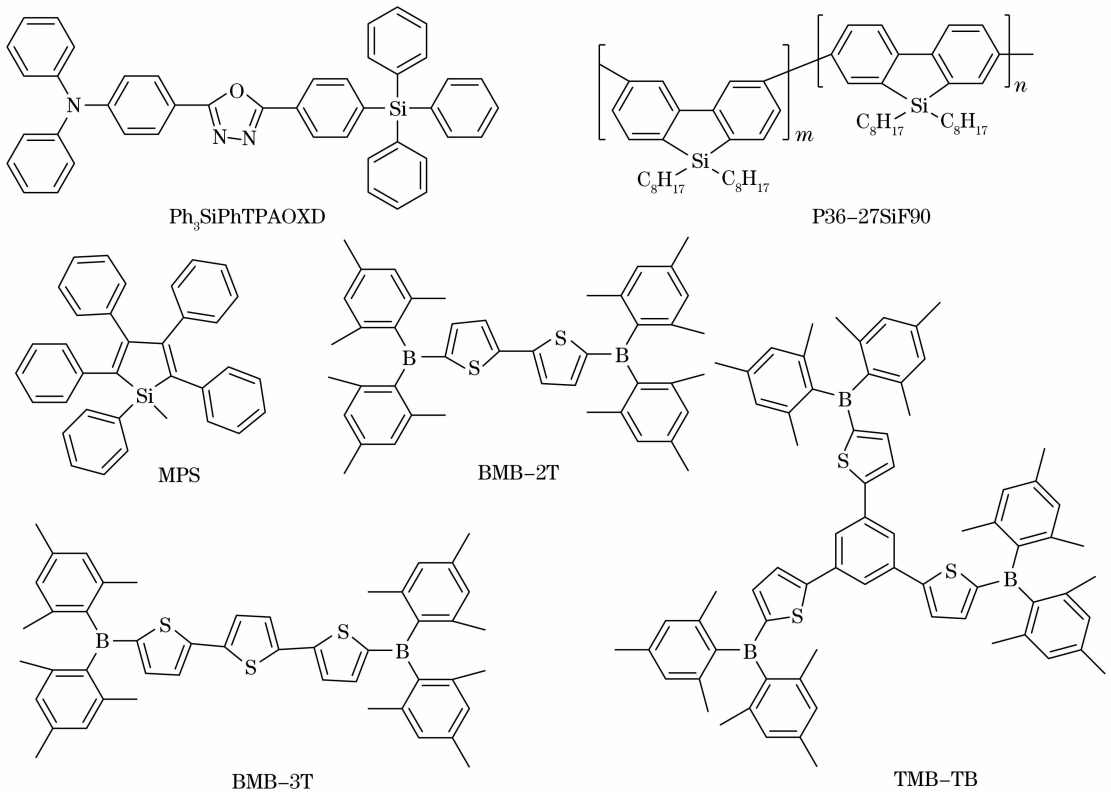


图 7 含其他杂原子类蓝光材料的结构式

Fig. 7 Structures of other organic compounds containing other hetero-atoms

5 总结与展望

总之,人们对蓝光材料已经进行了较深入的研究,通过对分子结构修饰来改变材料的发光性能。在已报道的蓝色荧光材料中,三环芳香烃蒽类和螺芴类材料的性能较为突出。它们的分子内都具有刚性的共轭环,热稳定性较高,同时大的取代基以及螺芴本身的扭曲结构,降低了分子的共平面性,共轭程度减小,发光波长蓝移,从而得到深蓝发射的器件。不过三环芳香烃类蓝光材料在器件效率方面并不是很突出。含氮蓝光材料最重要的一个特点是分子内具有电子推拉结构,有效地提高了材料的荧光量子效率,目前报道的含氮蓝光材料最大外量子效率达到 7.87%。但是含氮蓝光材料稳定性较差,分子内偶极矩较大,导致发光波长红移。到目前为止,蓝光材料在效率和色纯度统一的问题上依然存在着困难。为了得到性能更加优良的蓝光材料,人们开始尝试将含氮基团和具有扭曲刚性结构的三环芳香烃连接在一起,构建新型高效深蓝光材料,这种设计思路同时兼顾了材料的效率和色纯度。随着研究的进

一步进展,相信更加高效色纯度更好的深蓝色荧光材料将会更多。

参 考 文 献

- 1 M. Pope, H. Kallmann, P. Magnante. Electroluminescence in organic crystals[J]. *J. Chem. Phys.*, 1963, **38**(8): 2042~2043
- 2 C. W. Tang, S. A. VanSlyke. Organic electroluminescent diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(12): 913~915
- 3 L. Burn, A. B. Holmes. Light-emitting diodes based on conjugated polymers[J]. *Nature*, 1990, **347**(6293): 539~541
- 4 M. A. Baldo, D. F. O'Brien, Y. You *et al.*. Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices [J]. *Nature*, 1998, **395**(6698): 151~154
- 5 Xiong Zhiyong, Li Hongjian, Wang Junxi *et al.*. Light out-coupling efficiency in flexible organic light-emitting devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2885~2891
- 6 熊志勇,李宏建,王俊西等. 可弯曲式有机电致发光器件的出光率[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2885~2891
- 7 Xin Qi, Li Wenlian, Li Tianle *et al.*. Highly efficient red organic light emitting diodes based on tandem structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 2002~2005
- 8 辛琦,李文连,李天乐等. 基于迭层结构的高效红色有机电致发光器件[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 2002~2005
- 9 Zhang Chunyu, Xiao Liguang, Qin Li *et al.*. Blue color microcavity organic light emitting device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1967~1972
- 10 张春玉,肖力光,秦丽等. 蓝色微腔有机发光器件[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1967~1972
- 11 Sun Xiaochen, Zhu Tuo, Chen Guoqing *et al.*. Spectral characteristics of a new iridium (III) organic complex[J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1420~1423
- 孙晓晨, 朱拓, 陈国庆等. 一种新型金属铱(III)有机配合物的光谱特性研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1420~1423
- 9 C. Hosokawa, H. Higashi, H. Nakamura *et al.*. Highly efficient blue electroluminescence from a distyrylarylene emitting layer with a new dopant[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(26): 3853~3855
- 10 F. He, H. Xu, B. Yang *et al.*. Oligomeric phenylenevinylene with cross dipole arrangement and amorphous morphology: enhanced solid-state luminescence efficiency and electroluminescence performance [J]. *Adv. Mater.*, 2005, **17**(22): 2710~2714
- 11 Y. Duan, Y. Zhao, P. Chen *et al.*. High-performance blue electroluminescence devices based on distyrylbenzene derivatives [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(26): 263503~263505
- 12 P. I. Shin, C. Y. Chuang, C. H. Chien *et al.*. Highly efficient non-doped blue-light-emitting diodes based on an anthracene derivative end-capped with tetraphenylethylene groups[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2007, **17**(16): 3141~3146
- 13 W. J. Shen, R. Dodda, C. C. Wu *et al.*. Spirobifluorene-linked bisanthracene: an efficient blue emitter with pronounced thermal stability[J]. *Chem. Mater.*, 2004, **16**(5): 930~934
- 14 Y. H. Kim, D. C. Shin, S. H. Kim *et al.*. Novel blue emitting material with high color purity[J]. *Adv. Mater.*, 2001, **13**(22): 1690~1693
- 15 C. H. Chien, C. K. Chen, F. M. Hsu *et al.*. Multifunctional deep-blue emitter comprising an anthracene core and terminal triphenylphosphine oxide groups [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, **19**(4): 560~566
- 16 S. L. Tao, Z. R. Hong, Z. K. Peng *et al.*. Anthracene derivative for a non-doped blue-emitting organic electroluminescence device with both excellent color purity and high efficiency[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2004, **397**(1~3): 1~4
- 17 F. Li, Z. Chen, W. Wei *et al.*. Blue-light-emitting organic electroluminescence via exciplex emission based on a fluorene derivative [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, **37**(12): 1613~1616
- 18 K. T. Wong, Y. Y. Chien, R. T. Chen *et al.*. Ter(9,9-diarylfuorene)s: highly efficiency blue emitter with promising electrochemical and thermal stability[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, **124**(39): 11576~11577
- 19 T. C. Chao, Y. T. Lin, C. Y. Yang *et al.*. Highly efficient UV organic light-emitting devices based on bi(9,9-diarylfuorene)s [J]. *Adv. Mater.*, 2005, **17**(8): 992~996
- 20 Y. Liao, C. Lin, K. Wong *et al.*. A novel ambipolar spirobifluorene derivative that behaves as an efficient blue-light emitter in organic light-emitting diodes[J]. *Org. Lett.*, 2007, **9**(22): 4511~4514
- 21 C. C. Wu, Y. T. Lin, H. H. Chiang *et al.*. Highly bright blue organic light-emitting devices using spirobifluorene-cored conjugated compounds[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(4): 577~579
- 22 B. X. Mi, Z. Q. Gao, C. S. Lee *et al.*. Reduction of molecular aggregation and its application to the high performance blue perylene-doped organic electroluminescent device [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(26): 4055~4057
- 23 C. Tang, F. Liu, Y. J. Xia *et al.*. Fluorene-substituted pyrenes-novel pyrene derivatives as emitters in nondoped blue OLEDs[J]. *Org. Electron.*, 2006, **7**(3): 155~162
- 24 H. T. Shih, C. H. Lin, H. H. Shih *et al.*. High-performance blue electroluminescent devices based on a biaryl [J]. *Adv. Mater.*, 2002, **14**(19): 1409~1412
- 25 C. T. Chen, C. L. Chiang, Y. C. Lin *et al.*. Ortho-substituent effect on fluorescence and electroluminescence of arylamino-substituted coumarin and stilbene[J]. *Org. Lett.*, 2003, **5**(8): 1261~1264
- 26 Y. Wei, C. T. Chen. Doubly ortho-linked cis-4, 4'-bis(diarylamino) stilbene/fluorine hybrids as efficient nondoped, sky-blue fluorescent materials for optoelectronic applications[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, **129**(24): 7478~7479
- 27 C. Huang, C. G. Zhen, S. P. Su *et al.*. Solution-processable polyphenylphenyl dendron bearing molecules for highly efficient blue light-emitting diodes[J]. *Org. Lett.*, 2005, **7**(3): 391~394
- 28 H. C. Li, Y. P. Lin, P. T. Chou *et al.*. Color tuning and highly efficient blue emitters of finite diphenylamino-containing oligo(arylenevinylene) derivatives using fluoro substituents[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2007, **17**(4): 520~530
- 29 M. T. Lee, C. H. Liao, C. H. Tsai *et al.*. Highly efficient, deep-blue doped organic light-emitting devices[J]. *Adv. Mater.*, 2005, **17**(20): 2493~2497
- 30 Li Huixue, Xu Hengxia, Li Zhifeng *et al.*. Crystal structure and photoelectric properties of 3-phenyl-6-(4-methylphenyl)-1,2,4-triazolo[4,3-b]-1,2,4-triazine[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 236~243
- 李会学, 胥亨霞, 李志锋等. 3-苯基-6-(4-甲基苯基)-1,2,4-三唑[4,3-b]-1,2,4-三嗪晶体结构及其光电性质[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 236~243
- 31 Y. T. Tao, E. Balasubramaniam, A. Danel *et al.*. Organic light-emitting diodes based on variously substituted pyrazoloquinolines as emitting material [J]. *Chem. Mater.*, 2001, **13**(4): 1207~1212
- 32 C. H. Chen, F. I. Wu, C. F. Shu *et al.*. Spirobifluorene-based pyrazoloquinolines: efficient blue electroluminescent materials [J]. *J. Mater. Chem.*, 2004, **14**(10): 1585~1589
- 33 S. J. Lee, J. S. Park, K. J. Yoon *et al.*. High-efficiency deep-blue light-emitting diodes based on phenylquinoline/carbazole-based compounds[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2008, **18**(24): 3922~3930
- 34 C. J. Tonzola, A. P. Kulkarni, A. P. Gifford *et al.*. Blue light emitting oligoquinolines: Synthesis, properties and high-efficiency blue light emitting diodes[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2007, **17**(6): 863~874
- 35 W. J. Kuo, Y. H. Chen, R. J. Jeng *et al.*. Peripheral aryl-substituted pyrrole fluorophores for glassy blue-light-emitting diodes[J]. *Tetrahedron*, 2007, **63**(30): 7086~7079
- 36 M. Guan, Z. Q. Bian, Y. F. Zhou *et al.*. High-performance blue electroluminescent devices based on 2-(4-biphenyl)-5-(4-carbazole-9-yl) phenyl-1,3,4-oxadiazole[J]. *Chem. Commun.*, 2003, (21): 2708~2709
- 37 Z. H. Li, M. S. Wong, H. Fukutani *et al.*. Synthesis and light-emitting properties of bipolar oligofluorenes containing triarylamino and 1,2,4-triazole moieties[J]. *Org. Lett.*, 2006, **8**(19): 4271~4274
- 38 L. S. Chan, H. C. Yeh, C. T. Chen. Blue light emitting devices based on molecular glass materials of tetraphenylsilane compounds[J]. *Adv. Mater.*, 2001, **13**(21): 1637~1641
- 39 L. S. Chan, R. H. Lee, C. F. Hsieh *et al.*. Optimization of high-performance blue organic light-emitting diodes containing tetraphenylsilane molecular glass materials[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, **124**(22): 6469~6479
- 40 E. G. Wang, C. Li, J. B. Peng *et al.*. High-efficiency blue light emitting polymers based on 3,6-silafluorene and 2,7-silafluorene[J]. *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, 2007, **45**(21): 4941~4949
- 41 H. Y. Chen, W. Y. Lam, J. D. Luo *et al.*. Highly efficient organic light-emitting diodes with a silole-based compound[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(4): 574
- 42 T. Noda, Y. Shirota. 5,5'-bis(dimesitylboryl)-2,2'-bithiophene and 5,5'-bis(dimesitylboryl)-2,2':5',5''-terthiophene as a novel family of electron-transporting amorphous molecular materials [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1998, **120**(37): 9714~9715
- 43 T. Noda, H. Ogawa, Y. Shirota. A blue-emitting organic electroluminescent device using a novel emitting amorphous molecular material, 5,5'-bis(dimesitylboryl)-2,2'-bithiophene [J]. *Adv. Mater.*, 1999, **11**(4): 283~285
- 44 M. Kinoshita, Y. Shirota. 1,3-bis[5-(dimesitylboryl)thiophen-2-yl] benzene and 1,3,5-tri[5-(dimesitylboryl)thiophen-2-yl] benzene as a novel family of electron-transporting hole blockers for organic electroluminescent devices[J]. *Chem. Lett.*, 2001, **30**(7): 614~615