

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

利用紫外光可聚合液晶單體製備偏極化電激發光元件(3/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2216-E-009-001-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學應用化學研究所

計畫主持人：許千樹

報告類型：完整報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 8 月 23 日

行政院國家科學委員會專題研究計劃結案報告

利用紫外光可聚合液晶單體製備偏極化電激發光元件

Polarized Electroluminescence Based on the UV-curable Liquid
Crystal Monomers

計畫編號：NSC 92-2216-E-009-015

全程執行期間：民國 91 年 08 月 01 日起至民國 94 年 07 月 31 日

計畫主持人：許千樹 教授

執行單位：國立交通大學應用化學研究所

中華民國 94 年 8 月 8 日

中英文摘要

本研究主要目的是要製備偏極化的電激發光元件，並應用在液晶顯示器(LCD)背光板上。第一年合成出紫外光可聚合之三苯基雙乙炔(bistolane)液晶單體，第二年合成出紫外光可聚合之三苯基雙-4-甲基乙炔(4-methylbisstilbene)液晶單體，第三年合成出聚芴高分子(polyfluorenes)，並利用表面配向方法，將這些液晶發光材料於液晶相下排列，形成規則排列之聚合物，並將此聚合物製備成單層或多層偏極化電激發光元件，最後評估這些元件之發光效率及其偏極化特性。

關鍵詞：液晶材料；偏極化電激發光

The goal of this proposal is aimed to study the fabrication of polarized electroluminescence (EL) devices which have potential application in the LCD backlight. In the first year, a series of UV-curable bistolane liquid crystal monomers were synthesized and characterized. In the second year, a series of UV-curable 4-methylbisstilbene liquid crystal monomers were synthesized and characterized. In the third year, a series of polyfluorene liquid crystal polymers were synthesized and characterized. The light emitting materials were oriented by a surface alignment method and cured by UV radiation to form the oriented LC crosslinked networks. The oriented LC networks were fabricated to form the single or multi-layers polarized EL devices. The PL and EL efficiencies as well as dichroic ratios of the polarized EL devices were also evaluated.

Keywords : liquid crystal, polarized electroluminescence

一、緒論

自從 Dyreklev 等人在 1995 年首先提出共軛高分子的 EL 元件可發出偏極化光(polarized light)的觀念以後，將 PLED 應用在 LCD 背光源的想法開始被提出。由於傳統的液晶顯示器背光源至少需先經過一片偏光板，將背光源轉變成線性偏極光，再穿過顯示器各層結構，而傳統的偏光板將吸收掉背光源直交二方向中一個方向的線性偏極光，以得到線性偏極光源，因此背光源在能源上的利用效率不高。而偏極化有機電激發光材料則可提供一個高效率的 LCD 背光源，因此，偏極化電激發光的概念極具商業上的潛力。一般液晶顯示器所需要的偏極化背光源其偏極化的比例要大於 30-40 以上才合乎實用，若是以偏極化背光源再搭配一片偏光板，則背光源的偏極化比例只要在 10 以上就有實用價值。

二、計畫之第一年部份

1.液晶單體與聚合物之合成：

本實驗室在過去幾年內合成過許多三苯基雙乙炔液晶分子，建立良好的合成技巧，因此第一年部分主要在三苯基雙乙炔液晶單體二端接上可聚合之丙醯酸酯基團(M1-M5)，其主要合成方法如 Scheme 1 所示。

聚合物之合成是將液晶單體先加入 1% 重量百分比之平坦劑，與 1% 重量百分比 benzophenone 作為紫外光聚合起始劑。混合物再以 5 mg/mL 濃度溶解於 THF 溶劑中，旋轉塗佈於已配向好之導電玻璃(ITO glass)上，其轉速控制如下：第一階段為 600 rpm 維持 10 秒鐘，第二階段為 1200 rpm 維持 30 秒鐘，之後於液晶相溫度下進行迴火一小時，再降溫至室溫(25)迴火一小時，得到具方向性排列的發光層薄膜。迴火完成之後的液晶薄膜再經紫外光照光聚合交聯。

2.熱性質：

我們用微差掃描卡計(DSC)及偏光顯微鏡(POM)來辨別其液晶相種類與相變化溫度範圍，所有液晶單體的相變化溫度皆列於 Table 1，其中 M1-M4 是屬於向列型(Nematic)的液晶相 (Fig. 1)，M5 則不具有液晶相，推測是結構對稱所造成。

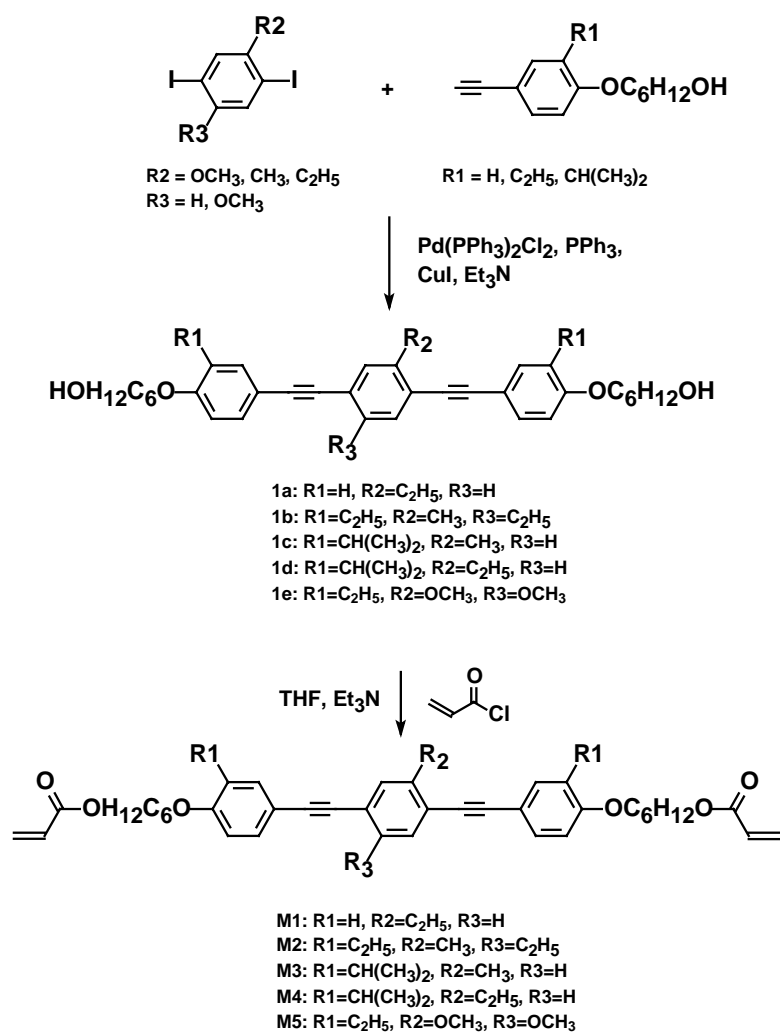
3.偏極化光學性質：

我們利用表面配向方法，將這些單體於液晶相下排列，經紫外光聚合後，形成規則排列之網狀聚合物，並將此網狀聚合物製備成異方向(anisotropic)的薄膜，量測平行與垂直方向的強度，並計算極化值 (polarized ratio=平行強度/垂直強度)，所得結果列於 Table 2，其中 M1-M4 的 PL 在 425-429nm，是屬於藍光材料。另外 UV 吸收光譜的

極化值介於 11.7-14.0，PL 放射光譜極化值介於 10.8-11.5，Fig. 2 為 M1 的偏極化 UV 吸收、偏極化 PL 放射光譜。

4. 偏極化元件性質：

我們將液晶單體製備成雙層的偏極化電激發光元件，元件結構為 (ITO / rubbed-PEDOT / polymer / Al)。先在 ITO 玻璃上塗佈一層 PEDOT，並摩擦過，來當配向層。再將溶液以旋轉塗佈的方式塗佈於 PEDOT 上，其轉速控制為 1500 rpm 維持 30 秒鐘，之後於 100 之真空烘箱中烘烤 1 小時，再用紫外光聚合做成配向的高分子薄膜，最後再鍍上鋁電極，封裝，做成偏極化的發光元件。測量元件性質，EL=430 nm，極化值約 7.0 (Fig. 3)，驅動電壓為 7V，最大亮度為 2.5 cd/m² (Fig. 4)。



Scheme 1.

Table 1. Phase transition temperatures and corresponding enthalpy changes of monomers **M1 - M10**

Monomer	Phase transition temperatures()and corresponding enthalpies (KJ/mol)				
	Cr	S _A	Heating		I
			N		
M1	-	-	57.2 (36.2)		93.3 (0.8)
M2	-	-	62.4 (17.6)		84.6 (2.1)
M3	-	-	29.9 (16.8)		74.5 (1.32)
M4	-	-	53.0 (34.4)		71.9 (1.2)
M5	-	-	-	-	100.3 (28.3)
M6	-	-	-	-	62.3 (17.3)
M7	68.5 (14.1)		-	-	86.8 (8.8)
M8	-	-	-	-	78 (24.2)
M9	[81.4 (12.7)]	-	-	111.5 (42.4)
M10	-	-	-	-	85 (28.6)

Cr : crystalline, S_A : smectic A, N : nematic, I : isotropic

[] : monotropic transition.

Table 2. The UV-visible absorption, PL emission and polarized ratio of monomers in thin film state.

Monomer	UVmax-visible absorption(nm)	PLmax emission(nm)	Polarized ratio		
			UV-vis	PL	EL
			(UV _{//} /UV _⊥)	(PL _{//} /PL _⊥)	(EL _{//} /EL _⊥)
M1	343	428	11.7	10.8	7.0
M2	344	427	12.0	11.1	6.9
M3	343	429	13.3	11.5	6.8
M4	340	425	14.0	11.1	6.2
M7	362	455	4.6	3.5	-
M9	447	544	4.2	3.4	-

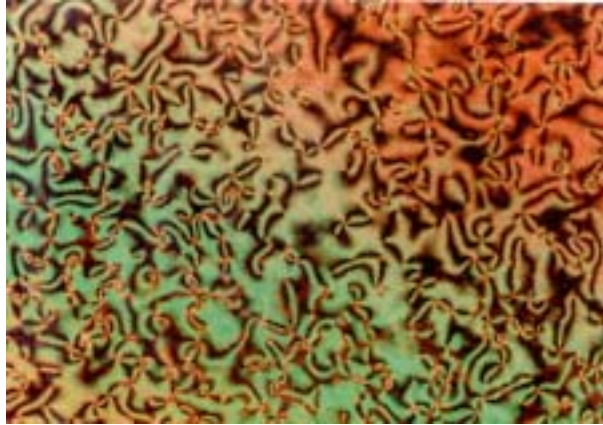


Fig. 1. Photomicrographs of the N phase schlieren texture of **M1** at 75

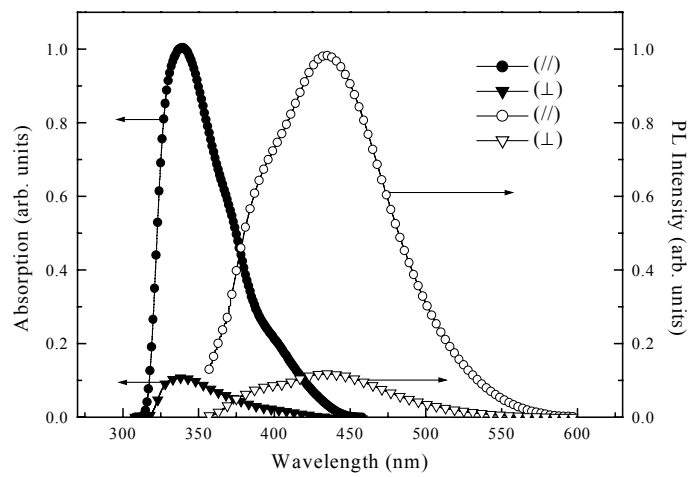


Fig. 2. Polarized optical spectra of LC network of **M1** on rubbed PEDOT film.

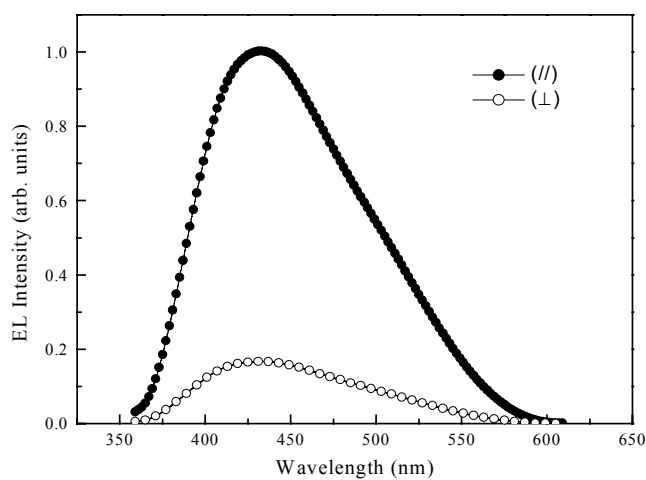


Fig. 3. Polarized EL spectra of an ITO/rubbed PEDOT/LC network of **M1/Al** device.

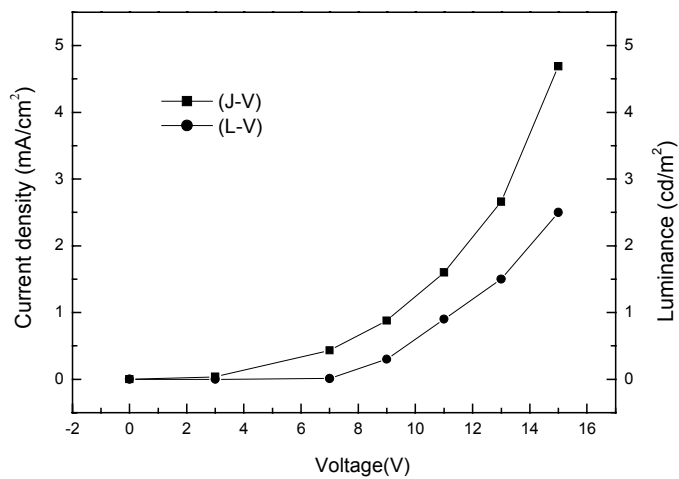


Fig. 4. The J-V () and L-V () curves of ITO/rubbed PEDOT/**M1**/ Al/ device.

三、計畫之第二年部份

1.液晶單體與聚合物之合成：

本年度主要合成出含 -甲基取代之三苯基雙乙烯液晶單體與側鏈高分子液晶材料，其中小分子液晶單體的合成方法為利用鈀(Pd)作為催化劑進行 Heck coupling 反應，並在末端接上可聚合之丙醯酸酯基團，合成方法如 Scheme 2 所示。而高分子液晶材料則是用 Suzuki coupling 來合成液晶單體，並用自由基聚合來形成高分子，其合成方法如 Scheme 3、4 所示。

2.熱性質：

我們用微差掃描卡計(DSC)及偏光顯微鏡(POM)來辨別其液晶相種類與相變化溫度範圍，所有小分子液晶單體的相變化溫度皆列於 Table 1，其中 M7、M9 具有層列型 S_A (Smectic)液晶相(Fig. 5)，M6、M8、M10 則不具有液晶相，推測是結構末端甲氧基太大所造成。

側鏈高分子液晶材料的相變化溫度皆列於 Table 3，高分子 P1、P2 皆具有向列型(Nematic)的液晶相(Fig. 6)。

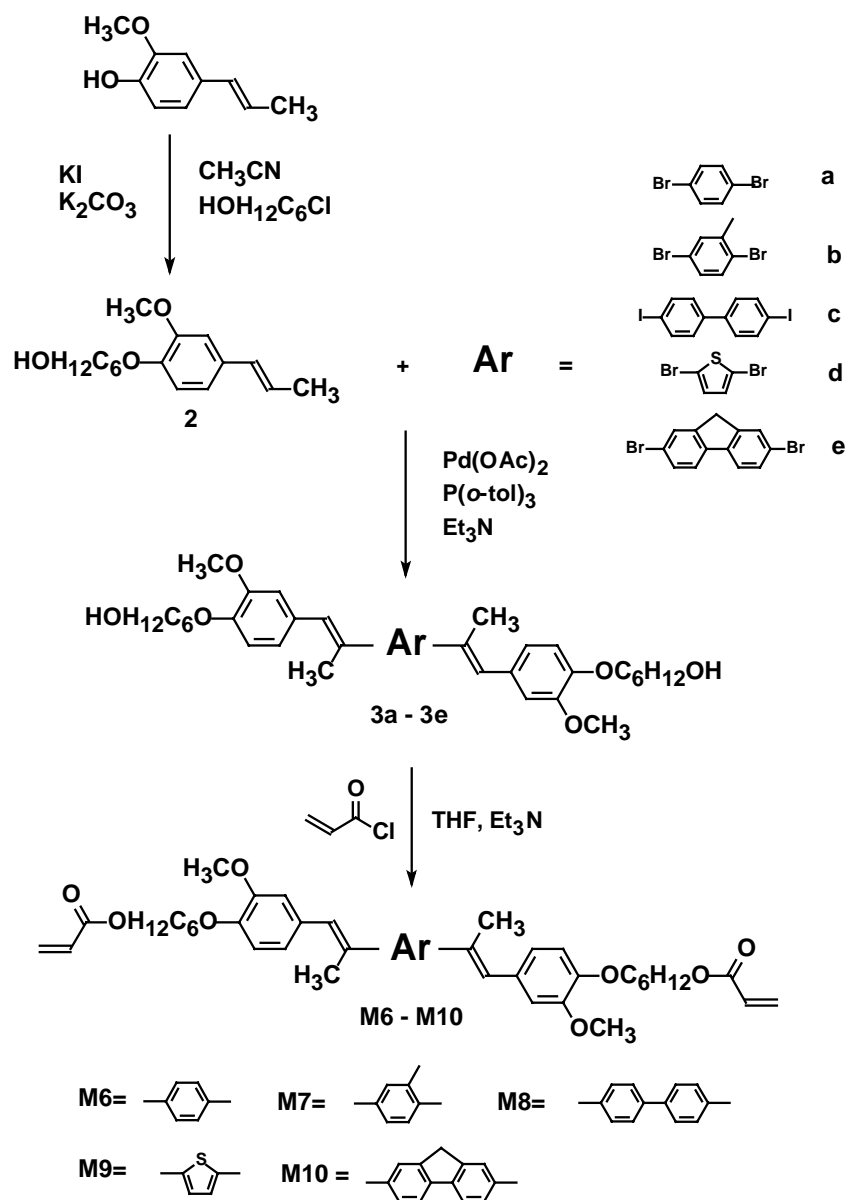
3.偏極化光學性質：

我們利用表面配向方法，將這些液晶材料於液晶相下排列，製備成異方向(anisotropic)的薄膜，量測平行與垂直方向的強度來計算極化值，小分子液晶材料(M7、M9)資料列於 Table 2，側鏈高分子(P1-P2)

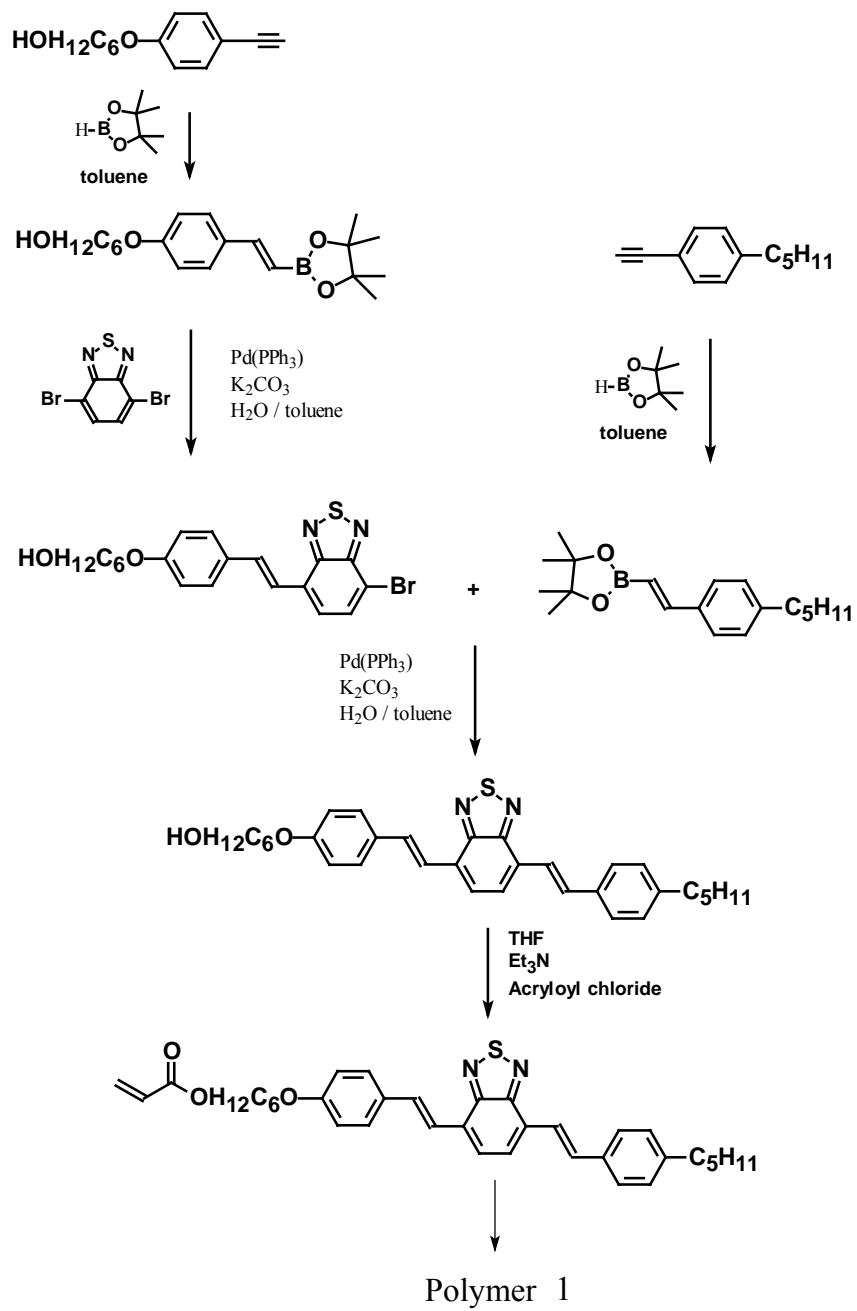
資料列於 Table 4。了解液晶單體所發出光的顏色，並將液晶材料做成具有異方性的薄膜，並計算極化值，UV 吸收光譜的極化值介於 4.2-8.8，PL 放射光譜的極化值介於 3.4-8.6，M7、M9 因不具向列型 (Nematic) 的液晶相，使所得的極化值較低。另外 M7 的 PL 在 455 nm，是屬於藍光材料；M9 的 PL 在 544 nm，是屬於黃綠光材料；P1 的 PL 在 583 nm (Fig. 7)，是屬於黃光材料；P2 的 PL 在 603 nm，是屬於橘光材料。

4. 偏極化元件性質：

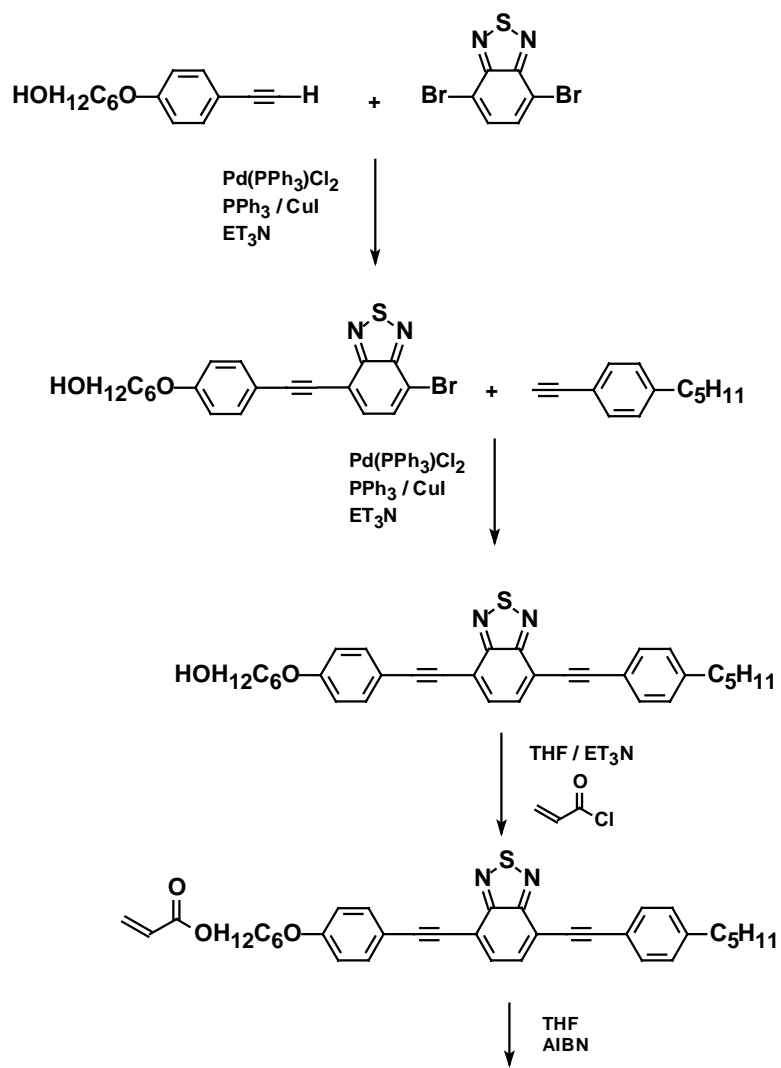
我們取極化值較高的側鏈高分子液晶材料來製備成偏極化電激發光元件，元件結構為 ITO / rubbed-PEDOT / polymer / Ca / Al。所得的偏極化元件性質列於 Table 5，其中 P2 的元件性質較佳，EL=604 nm (Fig. 8)，驅動電壓為 6V，極化值約 6.5，最大亮度為 235 cd/m² (Fig. 9)。



Scheme 2.



Scheme 3.



Polymer 2

Scheme 4.

Table 3. Polymerization results and phase transition temperatures of polymers.

Polymers	Yield (%)	M_n	M_w	M_w / M_n	Phase transition temperatures ()
P1	76	8600	15600	1.81	G 92 N 170 I
					I 156 N 65 G
P2	80	9600	18400	1.92	G 79 N 126 I
					I 124 N 59 G

G : glassy state, N : nematic phase, I : isotropic

Table 4. The polarized UV-visible absorption, polarized PL emission and polarized ratio of polymers.

Polymer	Polarized UV-visible Absorption (nm)	Polarized PL Emission (nm)	Polarized ratio	
			UV-vis ($UV_{//}/UV_{\perp}$)	PL ($PL_{//}/PL_{\perp}$)
P1	492	583	8.5	8.3
P2	517	603	8.8	8.6

Table 5. Device properties of polarized device using **P1** and **P2** as active layer.

Polymer	EL _{max} (nm) at V _{turn on}	V _{turn on} (V)	Luminance (Max)(cd/m ²)	Polarized ratio (EL _∥ /EL _⊥)
P1	580	5	85	4.0
P2	604	6	235	6.5

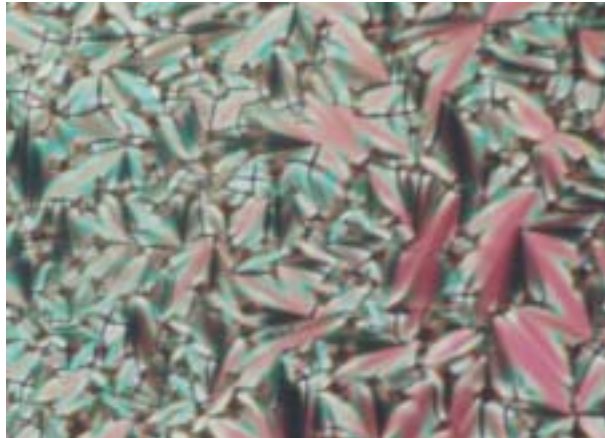


Fig. 5. Photomicrographs of the S_A phase focal-conic texture of **M7** at 75 .



Fig. 6. Polarizing optical micrograph of polymer **P1**: nematic droplet texture obtained at 150

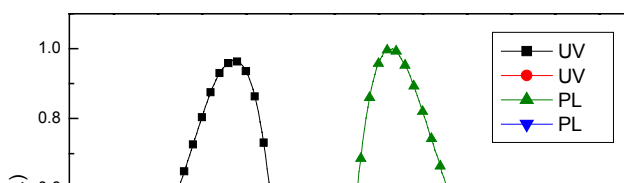


Fig. 7. Polarized UV-vis absorption spectra and polarized PL emission spectra of **P1**

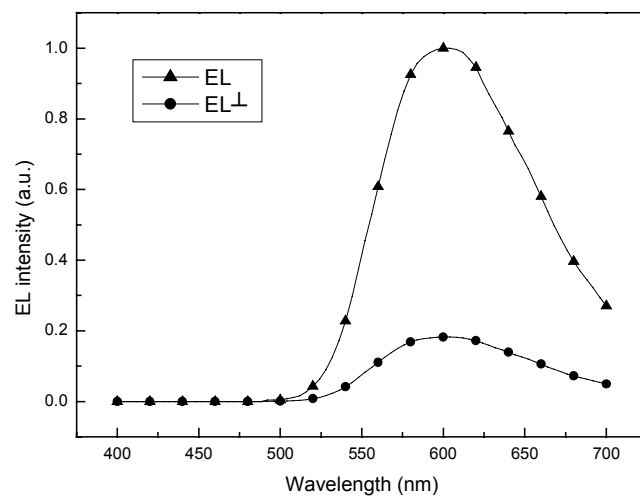


Fig. 8. Polarized EL spectra of **P2** in the ITO / aligned PEDOT / **P2** / Ca / Al device.

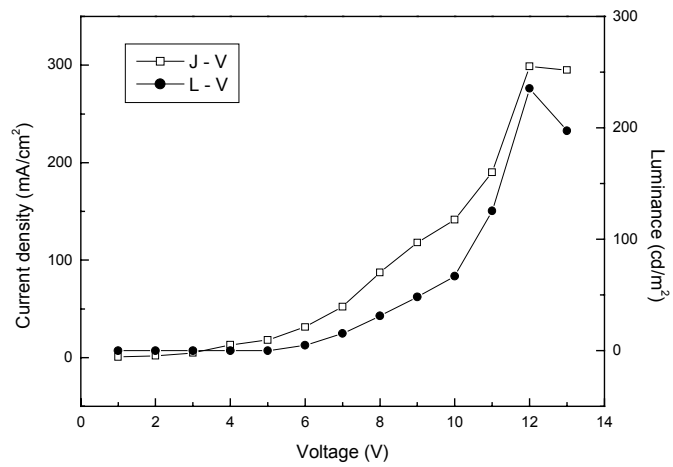


Fig. 9. J-V() and L-V(') curves of **P2** in the ITO / aligned PEDOT / **P2** / Ca / Al device.

四、計畫之第三年部份

1. 液晶單體與聚合物之合成：

本年度主要是合成出藍光、綠光、紅光之液晶發光材料，並利用摻混(blending)的方法製備偏極化白光電激發光元件，所設計之液晶材料結構如 Scheme 5 所示，用 Suzuki coupling 來進行聚合得到高分子，三個高分子液晶材料皆為聚芴高分子(polyfluorene)的衍生物，其中 P3 為藍光材料; P4 為綠光材料; P5 為紅光材料。

2. 熱性質：

我們用微差掃描卡計(DSC)及偏光顯微鏡(POM)來辨別其液晶相種類與相變化溫度範圍，所有高分子液晶材料的相變化溫度皆列於 Table 6，皆具有向列型(Nematic)的液晶相(Fig. 10)。

3. 偏極化光學性質：

發光高分子材料(P3-P5)偏極化光學性質列於 Table 7，其中 P3 的 PL 在 449 nm，P4 的 PL 在 553 nm，是屬於綠光材料，P5 的 PL 在 651 nm，是屬於紅光材料。UV 吸收光譜的極化值介於 6.3-6.6，PL 放射光譜的極化值介於 5.7-5.9(Fig. 11)。

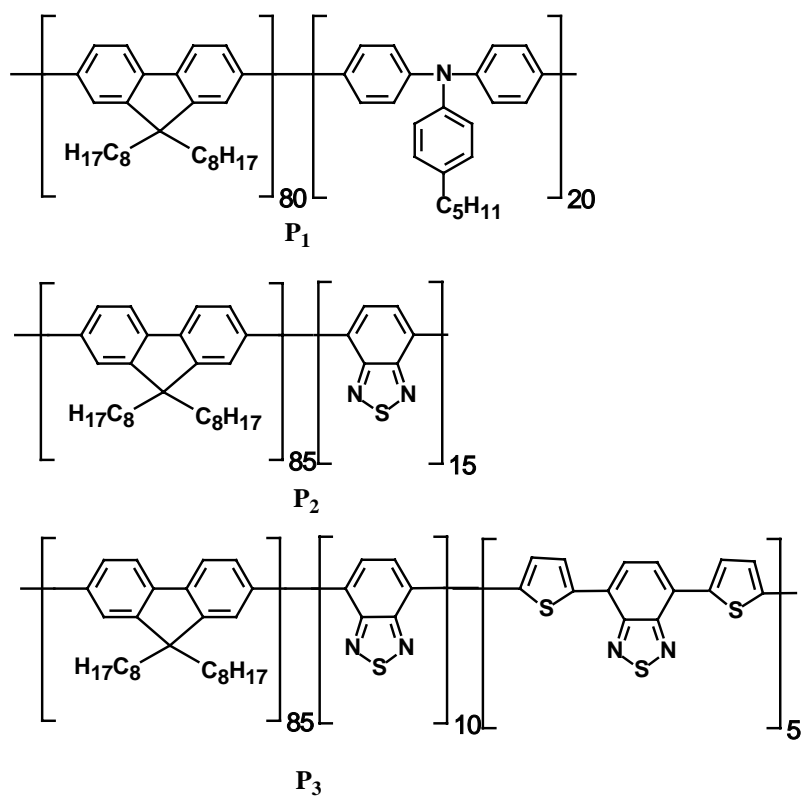
4. 偏極化元件性質：

我們利用高分子液晶材料來製備成偏極化電激發光元件，元件結構為 ITO / rubbed-PEDOT / polymer / Ca / Al。所得的偏極化元件性質列於 Table 8，以 P1 的元件性質為例，EL=456 nm (Fig. 12)，驅動電

壓為 7V，極化值約 6.4，最大亮度為 430 cd/m^2 (Fig. 13)。

之後用摻混的方法來提升元件性質，將藍光材料 P3 摻混 5%的綠光材料 P4 及 5%紅光材料 P5，其中 P3 當作主體(Host)，P4、P5 當作客體(Guest)，利用其分子鏈間的能量轉移(intrachain energy transfer)，來提升元件性質，摻混後的元件性質列於 Table 8。在摻混後，綠光材料 P4 偏極化亮度由原來的 1039 cd/m^2 提升至 2205 cd/m^2 ，提高至 2 倍，效率提升至 0.60 cd/A ；紅光材料 P5 偏極化亮度由原來的 284 cd/m^2 提升至 1146 cd/m^2 ，提高至 4 倍，效率提升至 0.22 cd/A ，摻混的方法確實達到提升元件性質的效果。

最後利用藍光 P3 做為主體，摻混綠光 P4、紅光 P5 材料，來製備偏極化白光元件，總共有三種不同的比例，分別製作出白光元件 A、B、C，Fig. 14 為偏極化白光元件 A 的 EL 光譜，最大亮度可達 581 cd/m^2 (Fig. 15)，由圖中可看出藍光、綠光、紅光三元色的波峰，且波長涵蓋 400 nm 至 700 nm 之間，確實有構成白光的要件，並且有極化的效果。所有的偏極化白光元件性質皆列於 Table 9，其中元件 C 性質最佳，偏極化白光亮度可達 1895 cd/m^2 、效率為 0.24 cd/A 、極化值為 4.4。白光元件 A 的 CIE 1931(x,y)座標為(0.332,0.363)，非常接近純白光(0.333,0.333)。



Scheme 5

Table 6. Polymerization results and phase transition temperatures of polymers.

Polymers	Yield (%)	Mn	Mw	Mw / Mn	Tg (°C) ^{a)}	Td (°C) ^{b)}	Phase transition temperatures (°C) ^{c)}
P3	68.8	12200	18200	1.49	71.7	373	G 101 N >300 I
P4	63.5	10700	15600	1.45	106.3	410	G 125 N >300 I
P5	61.2	10300	16200	1.57	107.6	415	G 127 N >300 I

a) The temperatures were observed by DSC.

b) The temperatures were observed by TGA.

c) The temperatures were observed by POM; G: glassy state, N: nematic phase, I: isotropic.

Table 7. Polarized UV-vis absorption, polarized PL emission and polarized ratio of polymers.

Polymer	Polarized UVmax Absorption (nm)	Polarized PLmax Emission (nm)	Polarized ratio	
			UV-vis (UV _{//} /UV _⊥)	PL (PL _{//} /PL _⊥)
P3	378	449	6.6	5.9
P4	376(434)	553	6.3	5.7
P5	377(435,520)	651	6.5	5.7

Table 8. Polarized device properties.

Polymer	ELmax (nm)	V _{turn on} (V)	Luminance (Max) (cd/m ²)	Efficiency (Max) (cd/A)	Polarized ratio (EL _∥ /EL _⊥)	CIE 1931 (x,y)
P3	456	7	430	0.08	6.4	(0.186,0.208)
P4	540	6	1039	0.40	6.3	(0.382,0.573)
P5	652	7	284	0.05	5.4	(0.672,0.322)
P3+P4 (5%)	538	7	2205	0.60	5.5	(0.352,0.559)
P3+P5 (5%)	644	7	1146	0.22	5.2	(0.620,0.323)

Table 9. Properties of polarized white emission devices.

Device	P3 : P4 : P5 (mg)	ELmax (nm)	V _{turn on} (V)	Luminance (Max) (cd/m ²)	Polarized ratio (EL _∥ /EL _⊥)	CIE 1931(x,y)
A	100:0.08:0.10	528	6	581	4.0	(0.332,0.363)
B	100:0.06:0.12	525	6	1358	4.6	(0.343,0.361)
C	100:0.04:0.12	534	6	1895	4.4	(0.322,0.368)

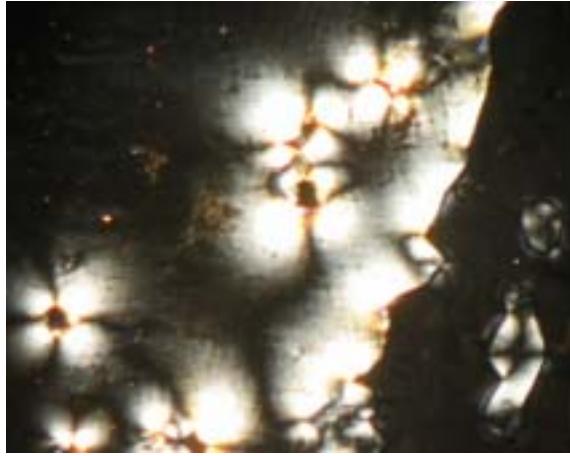


Fig. 10. DSC thermogram of polymer **P3**.

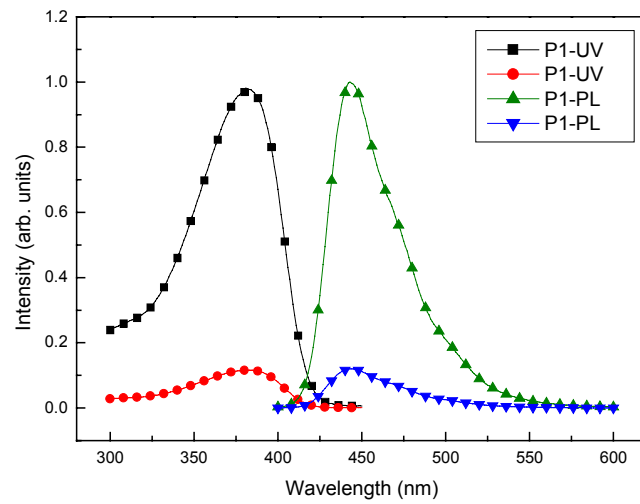


Fig. 11. Polarized UV-vis absorption and polarized PL emission spectra of **P3**.

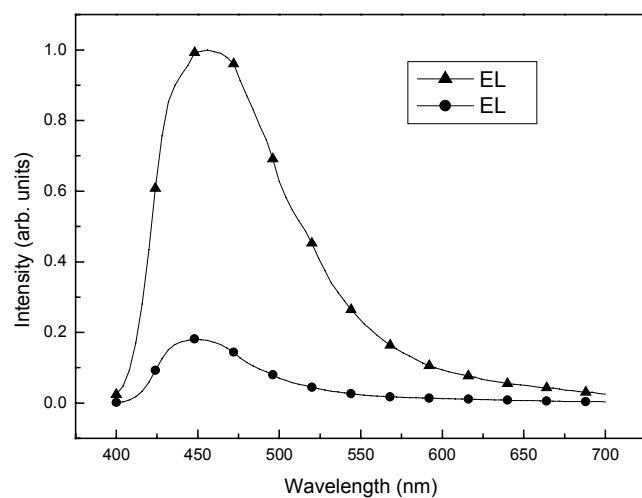


Fig. 12. Polarized EL spectra of **P3** in ITO/aligned PEDOT/**P1**/Ca/Al device.

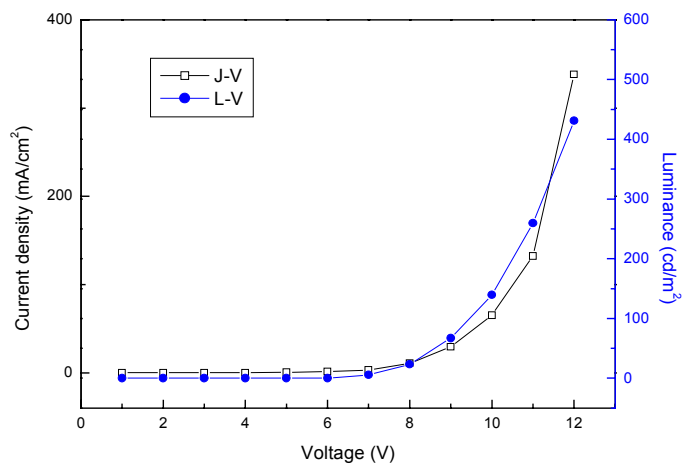


Fig. 13. J-V (□) and L-V (●) curves of **P1** in ITO/aligned PEDOT/**P3**/Ca/Al device.

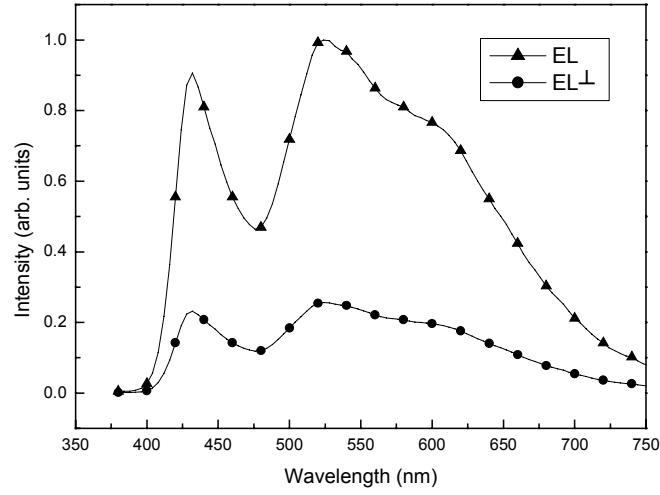


Fig. 14. Polarized EL spectra of device A in ITO/aligned PEDOT/
polymer **P1+P2+P3**/Ca/Al device.

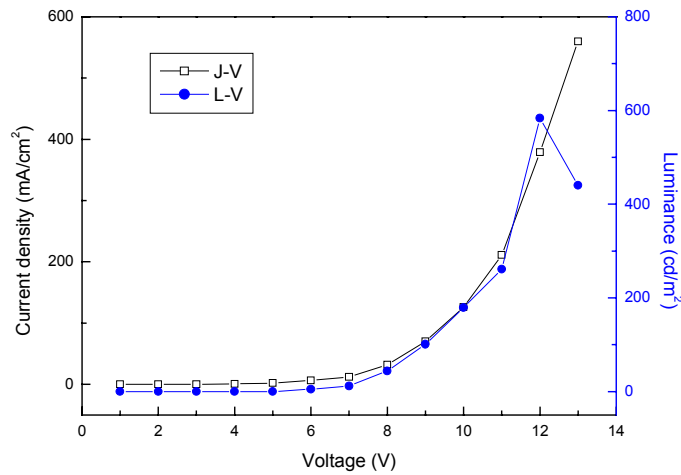


Fig. 15. J-V (\square) and L-V (\bullet) curves of device A in ITO/aligned PEDOT
/polymer **P1+P2 +P3**/Ca/Al device.

五、結論：

於三年計畫過程中，本實驗室合成出各種不同系列的小分子、高分子液晶材料，皆可製作成偏極化電激發光元件，其熱性質或光電性質結果亦已逐年發表於國際期刊中。本實驗室也成功地製備出偏極化的藍光、綠光、紅光電激發光元件，並且用摻混的方法來製備出偏極化白光元件，最大偏極化白光亮度可達 1895 cd/m^2 、效率為 0.24 cd/A 、極化值為 4.4 ，另外白光元件 A 的 CIE 1931(x,y)座標為(0.332, 0.363)，非常接近純白光(0.333,0.333)，非常有潛力應用在液晶顯示器的背光板上。

六、已發表論文

1. S. W. Chang, A. H. Li, C. W. Liao and C. S. Hsu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 2002, 1374.
2. S. W. Chang and C. S. Hsu, *J. Polym. Res.* **9**, 2002, 1.
3. Y. H. Yao, L. R. Kung and C. S. Hsu accepted in *Jpn. J. Appl. Phys.*
4. Y. H. Yao, L. R. Kung and C. S. Hsu submitted in *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*.
5. Y. H. Yao, L. R. Kung and C. S. Hsu submitted in *Liquid Crystal*.

參考文獻：

- 1) R. H. Friend, R. W. Gymer, A. B. Holmes, J. H. Burroughes, R. N. Marks, C. Taliani, D. D. C. Bradley, D. A. Dos Santos, J. L. Brédas, M. Lögdlund and W. R. Salaneck: *Nature* **397** (1999) 121.
- 2) G. Hadziioannou and P. F. van Hutten, eds.: *Semiconducting Polymers Chemistry, Physics and Engineering* (Wiley-VCH, Weinheim, 2000).
- 3) D. T. McQuade, A. E. Pullen and T. M. Swager: *Chem. Rev.* **100** (2000) 2537.
- 4) C. K. Chiang, C. R. Fincher, Jr., Y. W. Park, A. J. Heeger, H. Shirakawa, E. J. Louis, S. C. Gau and A. G. MacDiarmid: *Phys. Rev. Lett.* **39** (1977) 1098.
- 5) T. Virgili, D. G. Lidzey and D. D. C. Bradley: *Adv. Mater.* **12** (2000) 58.
- 6) T. F. Guo, S. S. Chang, Y. Yang, R. C. Kwong and M. E. Thompson: *Org. Electron.* **1** (2000) 15.
- 7) V. Cleave, G. Yahiolglu, P. Le Barny, D. H. Hwang, A. B. Holmes, R. H. Friend and N. Tessler: *Adv. Mater.* **13** (2001) 44.
- 8) Y. Ohmori, M. Uchida, K. Muro and K. Yoshino: *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** (1991) 1941.

- 9) A. W. Grice, D. D. C. Bradley, M. T. Bernius, M. Inbasekaran, W. W. Wu and E. P. Woo: *Appl. Phys. Lett.* **73** (1998) 629.
- 10) M. Gross, D. C. Muller, H. G. Nothofer, U. Scherf, D. Neher, C. Brauchle and K. Meerholz: *Nature* **405** (2000) 661.
- 11) T. Miteva, A. Meisel, W. Knoll, H. G. Nothofer, U. Scherf, D. C. Miller, K. Meerholz, A. Yasuda and D. Neher: *Adv. Mater.* **13** (2001) 565.
- 12) M. Grell, W. Knoll, D. Lupo, A. Meisel, T. Miteva, D. Neher, H. G. Nothofer, U. Scherf and A. Yasuda: *Adv. Mater.* **11** (1999) 671.
- 13) T. Miteva, A. Meisel, M. Grell, H. G. Nothofer, D. Lupo, A. Yasuda, W. Knoll, L. Kloppeburg, U. H. F. Bunz, U. Scherf and D. Neher: *Synth. Met.* **111-112** (2000) 173.
- 14) K. S. Whitehead, M. Grell, D. D. C. Bradley, M. Jandke and P. Strohriegel: *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 2946.
- 15) M. T. Bernius, M. Inbasekaran, J. O'Brien and W. Wu: *Adv. Mater.* **12** (2000) 1737.
- 16) C. D. Müller, A. Falcou, N. Reckefuss, M. Rojahn, V. Wiederhorn, P. Rudati, H. Frohne, O. Nuyken, H. Becker and K. Meerholz: *Nature* **421** (2003) 829.

- 17) C. Ego, D. Marsitzky, S. Becker, J. Zhang, A. C. Grimsdale, K. Müller, J. D. Mackenzie, C. Silva and R. H. Friend: *J. Am. Chem. Soc.* **125** (2003) 437.
- 18) M. S. Liu, X. Jiang, S. Liu, P. Herguth and A. K. Y. Jen: *Macromolecules* **35** (2002) 3532.
- 19) D. M. Johansson, M. Theander, T. Granlund, O. Inganäs and M. R. Andersson: *Macromolecules* **34** (2001) 1981.
- 20) E. Lim, B. J. Jung and H. K. Shim: *Macromolecules* **36** (2003) 4288.
- 21) B. Liu, W. L. Yu, Y. H. Lai and W. Huang: *Macromolecules* **33** (2000) 8945.
- 22) M. Strukelj, R. H. Jordan and A. Dodabalapur: *J. Am. Chem. Soc.* **118** (1996) 1213.
- 23) Z. Shen, P. E. Burrows, V. Bulvic, S. R. Forrest and M. E. Thompson: *Science* **276** (1997) 2009.
- 24) J. Kido, H. Shionoya and K. Nagai: *Appl. Phys. Lett.* **67** (1995) 2281.
- 25) J. Kido, H. Hongawa, K. Okuyama and K. Nagai: *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 815.
- 26) F. Hide, P. Kozodoy, S. P. DenBaars and A. J. Heeger: *Appl. Phys. Lett.* **70** (1997) 2664.

- 27) C. Zhang and A. J. Heeger: Appl. Phys. Lett. **84** (1998) 1579.
- 28) Y. Hamada, T. Sano, H. Fujii and Y. Nishio: Jpn. J. Appl. Phys. **35**
(1996) 1339.
- 29) C. L. Chao and S. A. Chen: Appl. Phys. Lett. **73** (1998) 426.
- 30) Y. Z. Wang, R. G. Sun, F. Meghdadi and G. Leising: Appl. Phys. Lett.
74 (1999) 3613.
- 31) C. W. Tang, S. A. Vanslyke and C. H. Chen: Appl. Phys. Lett. **65**
(1989) 3610.
- 32) J. Shi and C. W. Tang: Appl. Phys. Lett. **70** (1997) 1665.
- 33) B. P. Lyons, K. S. Wong and A. P. Monkman: J. Chem. Phys. **118**
(2003) 4707.
- 34) H. J. Egelhaaf, J. Gierchner and D. Oelkrug: Synth. Met. **127** (2002)
221.
- 35) R. Buckley, M. D. Rahn, J. Hill, J. Cabanillas-Gonzalez, A. M. Fox
and D. D. C. Bradley: Chem. Phys. Lett. **339** (2001) 331.
- 36) A. Dogariu, R. Gupta, A. J. Heeger and H. Wang: Synth. Met. **100**
(1999) 95.
- 37) Y. H. Niu, J. Huang and Y. Cao: Adv. Mater. **15** (2003) 807.
- 38) F. Steuber, J. Staudigel, M. Stössel, J. Simmerer, A. Winnacker, H.

- Spreitzer, F. Weissörtel and J. Salbeck: *Adv. Mater.* **12** (2000) 130.
- 39) C. H. Chuen and Y. T. Tao: *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 4499.
- 40) R. S. Deshpande, V. Bulovic and S. R. Forrest: *Appl. Phys. Lett.* **75** (1999) 888.
- 41) B. W. D'Andrade, J. Brooks, V. Adamovich, M. E. Thompson and S. R. Forrest: *Adv. Mater.* **14** (2002) 1032.
- 42) B. W. D'Andrade, M. E. Thompson and S. R. Forrest: *Adv. Mater.* **14** (2002) 147.
- 43) D. Neher: *Macromol. Rapid Commun.* **22** (2001) 1365.
- 44) U. Scherf and E. J. W. List: *Adv. Mater.* **14** (2002) 477.
- 45) M. Grell and D. D. C. Bradley: *Adv. Mater.* **11** (1999) 895.
- 46) M. Grell, D. D. C. Bradley, E. P. Woo and M. Inbasekaran: *Adv. Mater.* **9** (1997) 798.
- 47) D. Sainova, A. Zen, H. G. Nothofer, U. Asawapirom, U. Scherf, R. Hagen, T. Bieringer, S. Kostromine and D. Neher: *Adv. Funct. Mater.* **12** (2002) 49.
- 48) X. H. Yang, D. Neher, S. Lucht, H. Nothofer, R. Güntner, U. Scherf, R. Hagen and S. Kostromine: *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 2319.
- 49) M. Jandke, D. Hanft, P. Strohriegl, K. Whitehead, M. Grell and D. D.

- C. Bradley: Proc. SPIE **4105** (2001) 338.
- 50) A. Bolognesi, C. Botta, D. Facchinetti, M. Jandke, K. Kreger, P. Strohmriegl, A. Relini, R. Rolandi and S. Blumstengel: Adv. Mater. **13** (2001) 1072.
- 51) K. S. Whitehead, M. Grell, D. D. C. Bradley, M. Inbasekaran and E. P. Woo: Synth. Met. **111-112** (2000) 181.
- 52) A. C. A. Chen, S. W. Culligan, Y. Geng, S. H. Chen, K. P. Klubek, K. M. Vaeth and C. W. Tang: Adv. Mater. **16** (2004) 783.
- 53) M. Ranger, D. Rondeau and M. Leclerc: Macromolecules **30** (1997) 7686.
- 54) H. B. Goodbrand and N. X. Hu: J. Org. Chem. **64** (1999) 670.
- 55) P. Herguth, X. Jiang, M. S. Liu and A. K.Y. Jen: Macromolecules **35** (2002) 6094.
- 56) Q. Hou, Q. Zhou, Y. Zhang, W. Yang, R. Yang and Y. Cao: Macromolecules **37** (2004) 6299.
- 57) A. R. Buckley, M. D. Rahn, J. Hill, J. Cabanillas-Gonzalez, A. M. Fox and D. D. C. Bradley: Chem. Phys. Lett. **339** (2001) 331.
- 58) X. Gong, D. Moses, A. J. Heeger and S. Xiao: J. Phys. Chem. B **108** (2004) 8601.