

文章编号:1007-2780(2019)07-0627-07

主、侧链修饰对异靛蓝基共轭聚合物结构及电学性能的影响

田丰收,邱龙臻*,陈俊辉,张国兵

(特种显示技术国家工程实验室,现代显示技术省部共建国家重点实验室培育基地,
合肥工业大学光电技术研究院,安徽合肥 230009)

摘要:研究了基于异靛蓝及其衍生物的给-受体共轭聚合物主、侧链修饰对电学性能的影响。采用掠入射 X 射线衍射、原子力显微镜和 4200 半导体参数测试仪对聚合物结构与形貌以及电学性能进行了表征。实验结果表明,烷基侧链的加入会增大空间位阻,使得分子堆积从较为有序的 edge-on 结构变得混乱无序,导致结晶性和电学性能的下降。平均空穴迁移率从 $0.05 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 下降至 $2.11 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。但当主链用苯并二呋喃二酮(BIBDF)这一强吸电子的长共轭单元替代异靛蓝单元之后,由于主链平面性的提高,引起分子堆积变好,结晶性和电学性能显著提高,并不影响溶液加工性且该聚合物显示出良好的双极型传输特性。空气中电子与空穴平均迁移率可以达到 $0.29 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.49 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

关键词:异靛蓝及其衍生物;主、侧链修饰;聚合物结构;电学性能

中图分类号:TB34 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193407.0627

Effects of modification of main and side chains on the structure and electrical properties of isoindigo-based conjugated polymers

TIAN Feng-shou, QIU Long-zhen*, CHEN Jun-hui, ZHANG Guo-bing

(National Engineering Laboratory of Special Display Technology,
National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of
Opto-electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The effects of main and side chain modification of donor-acceptor conjugated polymers based on isoindigo and its derivatives on electrical properties were studied. The structure, morphology and electrical properties of the polymers were characterized by glancing angle X-ray diffraction, atomic force microscopy and Keithley 4200-SCS. The experimental results show that the addition of alkyl side chains can increase the steric hindrance and change the molecular stacking from the ordered edge-on structure to disordered, resulting in the decrease of crystallinity and electrical properties. The average hole mobility decreased from $0.05 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ to $2.11 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. However, when the long conjugated unit of benzofuradiadione (BIBDF) is used to replace the isoindigo unit in the main chain, the molecular stacking, crystallinity and electrical properties of the main chain are improved

收稿日期:2019-03-01;修订日期:2019-04-04.

基金项目:国家自然科学基金(No. 51573036, No.51703047)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 51573036, No.51703047)

* 通信联系人, E-mail: lzqiu@ hfut.edu.cn

significantly due to the improvement of the planarity of the main chain, which don't affect the solution processability, and the polymer shows good bipolar transmission characteristics. The average mobility of electron and hole can reach to $0.29 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ and $0.49 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Key words: isoindigo and its derivatives; modification of main and side chains; polymer structure; electrical properties

1 引言

共轭聚合物半导体材料以其良好的溶解性和柔性被广泛地用于有机场效应晶体管 OFET 有源层中^[1-3]。供体-受体(D-A)共轭聚合物是一类由给体单元与受体单元交替共聚形成半导体聚合物材料,其主要优势在于可以通过分子设计调节能级结构、分子共平面性和排列堆积方式,有效提高载流子迁移率^[4-6],因此 D-A 共轭聚合物成为当今研究最广泛的有机半导体材料之一。但是不同的分子结构以及主侧链的变化会导致不同的分子堆积方式,从而导致载流子迁移率产生较大的变化^[7-10]。为此,我们需要对 D-A 共轭聚合物分子结构与电学性能之间的关系有更深入的认识,才能够设计出具有高迁移率的 D-A 共轭聚合物。关于改变 D-A 共轭聚合物主链结构对其性能影响的研究已经有很多了,然而,单方面对主链结构进行修饰改性常常不能同时满足加工性能和电学性能的需求,并且目前研究主、侧链共同作用对其电学性能的影响的工作依然很少^[11-12]。

在早期的研究工作中,烷基侧链的引入主要是用于增加聚合物在有机溶剂中的溶解性,但是烷基侧链的长度、种类、位置以及支化位点对分子平面性和分子间相互作用会产生重要的影响从而影响薄膜形态和迁移率^[13-14]。例如,鲍哲楠等人报道将异靛蓝基(IID) D-A 共轭聚合物的烷基侧链用硅氧烷侧链替换,发现烷基侧链种类会对聚合物的堆积产生很大的影响,并且新合成的聚合物 PII2T-Si 其平均空穴迁移率达到 $2 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[11]。裴坚等人发现烷基侧链支化位点的外移使得 IID 基聚合物键有更好的 π - π 堆积,主链结构更加平整有序,并且在支化位置为 3 的时候具有最高的空穴迁移率,达到 $3.62 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[12]。

苯并二呋喃二酮(BIBDF)是一种全新的异靛蓝衍生物^[15],两个二氢吡啶-2-酮单元中间用苯唑呋喃-二酮基连接形成的含异靛蓝的大稠环结构,

具有比 IID 更好的平面性和较低的能级,将其作为受体单元的 D-A 聚合能够展现出 n 型或双极型半导体的特性,其电子迁移率可以达到 $5.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,但是溶解性与结晶性都比较差^[16]。近几年来,基于 IID 及其衍生物的 D-A 共轭聚合物材料发展迅速,异靛蓝基共轭聚合物的深入研究使其在有机薄膜晶体管中具有广阔的应用前景^[17-18]。

本文研究了一系列基于 IID 及其衍生物作为受体单元的 D-A 共轭聚合物的结构特性和电学特性,采用 UV、GIXRD 和 AFM 对聚合物的结构和形貌进行了研究,并将 3 种聚合物制备 OFET 器件进行了电学性能测试。研究了主、侧链结构变化对共轭聚合物结构电学性能的影响,通过适当长度和支化位点的侧链改善聚合物溶解性的基础上,通过主链长共轭 BIBDF 单元的加入改善分子平面性从而缩短 π - π 堆积距离提高聚合物薄膜的结晶性,从而达到提高载流子迁移率的目的。

2 实验

2.1 OFET 器件制备

OTFT 器件为底栅顶接触型(图 1),使用高掺杂硅作为栅极,其上有 300 nm 厚的 SiO_2 作为绝缘层。基底采用浓硫酸和双氧水(体积比 7 : 3)混合溶液加热 150 °C 清洗 90 min,再用去离子水清洗后氮气吹干,放在热台上 100 °C 烘干。将含氟化合物 Cytop(1 : 20)溶液旋涂至绝缘层作为修饰层,180 °C 固化 15 min。所有聚合物都按照 5 mg/mL 的浓度溶于氯仿当中,4 000 r/min 的转速旋涂至 Cytop 处理过的硅片上。然后在手套箱中 180 °C 退火处理 0.5 h。将金以热蒸发的方式沉积在薄膜表面作为源/漏电极,沟道长度(L)和宽度(W)分别为 100 μm 和 1 000 μm 。

2.2 实验材料及仪器

文中所用材料结构如图 1 所示,采用 Stille 偶联反应合成^[17-19]。氯仿购于 Sigma-Aldrich 公司,

Cytop 购于 ASAHI GLASS co. Ltd.公司。紫外-可见-近红外吸收光谱采用安捷伦 CARY 5000 分光光度计,溶液状态下溶剂为氯仿,室温测定。循环伏安采用三电极电化学工作站测试,型号为 CHI660D。表明形貌采用原子力显微镜进行表征(NanoScope, Veeco Instruments Inc.);二维(2D)GIXD 在韩国浦项加速器实验室(PAL)进行测试;OFET 采用 Keithley 4200-SCS 进行测试。

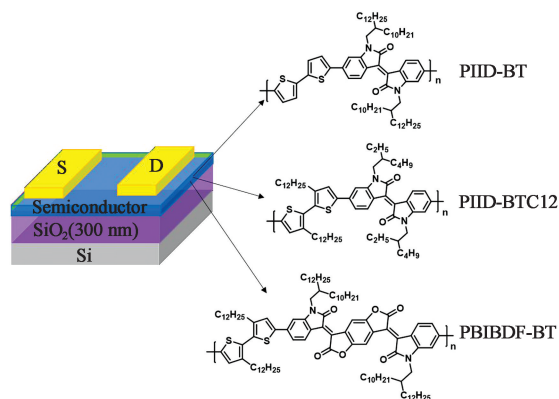


图 1 器件结构及聚合物化学结构

Fig.1 Used OFET device structure and the chemical structures of three conjugated polymers

3 结果与讨论

3.1 聚合物光电特性表征

首先对 3 种聚合物的光电特性进行表征,结果如表 1 所示。使用紫外分光光度计对薄膜进行了紫外-可见(UV-Vis)吸收光谱测试,结果如图 2(a)所示。PIID-BT 显示出两个可区分的吸收带。第一个吸收峰大约在 410 nm,与 $\pi-\pi^*$ 跃迁有关,第二个从 500 nm 到 800 nm 的吸收峰是由分子内电荷转移引起的,这是供体-受体共轭聚合物的典型特征。PIID-BT 聚合物在薄膜状态下的最大吸收峰为 703 nm。当两个十二烷基侧链引入到

双噻吩单元上形成 PIID-BTC12 时,最大吸收峰蓝移到 590 nm,703 nm 吸收完全消失,这意味着附加的烷基侧链会带来较大的空间位阻,增加了给体噻吩的扭转角,降低了 π 电子离域程度,从而破坏主链的共轭,减弱链间相互作用。对于 PBIBDF-BT,在异靛蓝的中心核心引入内酯基不仅使其吸电子能力更强,而且延长了其共轭长度。 $\pi-\pi$ 堆积效应与 D-A 相互作用共存,使 PBIBDF-BT 的吸收光谱呈现明显的红移,最大吸收峰在 840 nm。聚合物的光学能带隙根据公式 $E_g^{\text{opt}} = 1240/\lambda$ 计算得到,分别为 1.47, 1.68, 1.14 eV。LUMO 和 HOMO 能级通过循环伏安法测得,如图 2(b)所示。聚合物 PIID-BT、PIID-BTC12 和 PBIBDF-BT 的氧化起始电位($E_{\text{onset}}^{\text{ox}}$)分别为 0.79, 0.85, 0.86 eV。HOMO 能级由以下公式 $E_{\text{HOMO}} = -(E_{\text{onset}}^{\text{ox}} + 4.75)$ 计算得出,分别为: -5.54, -5.60, -5.61 eV。另一方面,还原起始电位($E_{\text{onset}}^{\text{red}}$)分别为 -1.09, -1.26, -0.83 eV。LUMO 能级由公式 $E_{\text{LUMO}} = -(E_{\text{onset}}^{\text{red}} + 4.75)$ 计算得出,分别为: -3.66, -3.49, -3.92 eV。聚合物薄膜的能带隙分别为 1.88, 2.11, 1.69 eV。由于 PIID-BTC12 的主链共轭结构较差减弱了分子间相互作用,导致带隙较宽,而 PBIBDF-BT 由于主链中 BIBDF 具有强吸电子能力和大的共轭长度,LUMO 能级显著降低,使其带隙变为 3 种聚合物中最窄。

3.2 聚合物电学性能表征

图 3 是 3 种聚合物有机薄膜场效应晶体管的转移特性曲线和输出曲线。迁移率由饱和区迁移率计算公式 $\mu = (2L/WC_i) I_{\text{DS}} / (V_{\text{GS}} - V_{\text{T}})^2$ 计算得出,其中 W 为沟道宽度; L 为沟道长度; μ 为电荷载流子迁移率; C_i 为绝缘层单位面积的电容。聚合物 PIID-BT 和 PIID-BTC12 在空气氛围下测试,由图 3(a)、(b)、(c)、(d)可以看出这两种聚合

表 1 3 种共轭聚合物光电性能表征及分子量

Tab.1 Photoelectric properties and molecular weight of three conjugated polymers.

	$\lambda_{\text{max}}/\text{nm}$	$\lambda_{\text{onset}}/\text{nm}$					
polymer	film	film	HOMO/eV	LOMO/eV	$\Delta E_g^{\text{cv}}/\text{eV}$	$M_n/M_w/(\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1})$	PDI
PIID-BT	703	845	-5.54	-3.66	1.88	37/120	3.35
PIID-BTC12	590	737	-5.60	-3.49	2.11	35/94	2.67
PBIBDF	840	1084	-5.71	-3.92	1.69	42/79	1.89

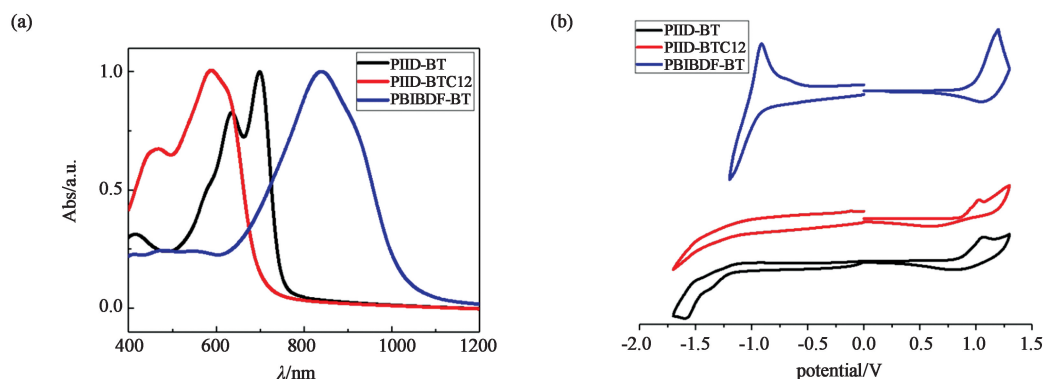


图 2 PIID-BT, PIID-BTC12 和 PBIBDF-BT 薄膜的紫外-可见吸收光谱(a)和 3 种聚合物的循环伏安曲线(b)。
Fig.2 Normalized UV-Vis absorption spectra of PIID-BT, PIID-BTC12 and PBIBDF-BT thin films (a) and cyclic voltammograms of three polymers (b).

物显示出典型的 P 型传输特性, 180 °C 退火处理之后 PIID-BT 的最大空穴迁移率可以达到 $0.06 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均空穴迁移率为 $0.05 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。聚合物 PIID-BTC12 的最大空穴迁移率为 $2.39 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均空穴迁移率为 $2.11 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对于 PBIBDF-BT, 通过测试发现其显示出明显的双极传输特性, 图 3(e)、(f)、(g)、(h) 为 PBIBDF-BT 薄膜场效应晶体管的转移特性曲线和输出特性曲线。经过计算, 其最大空穴迁移率为 $0.33 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均空穴迁移率为 $0.29 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最大电

子迁移率为 $0.55 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均电子迁移率为 $0.49 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对比 PIID-BT 与 PIID-BTC12 的迁移率, 我们发现 PIID-BTC12 的迁移率远低于 PIID-BT, 烷基侧链的加入引起迁移率的大幅下降, 其主要原因是烷基侧链的加入产生了较大的空间位阻, 影响了主链结构的 π - π 堆积。而对于 PBIBDF-BT, 虽然也加入了 C12 的烷基侧链, 但是由于 BIBDF 结构具有强吸电子能力和长共轭结构使聚合物的长程有序度提高, 分子堆积更加紧密, 所以烷基侧链对其电荷传输的影响较小。

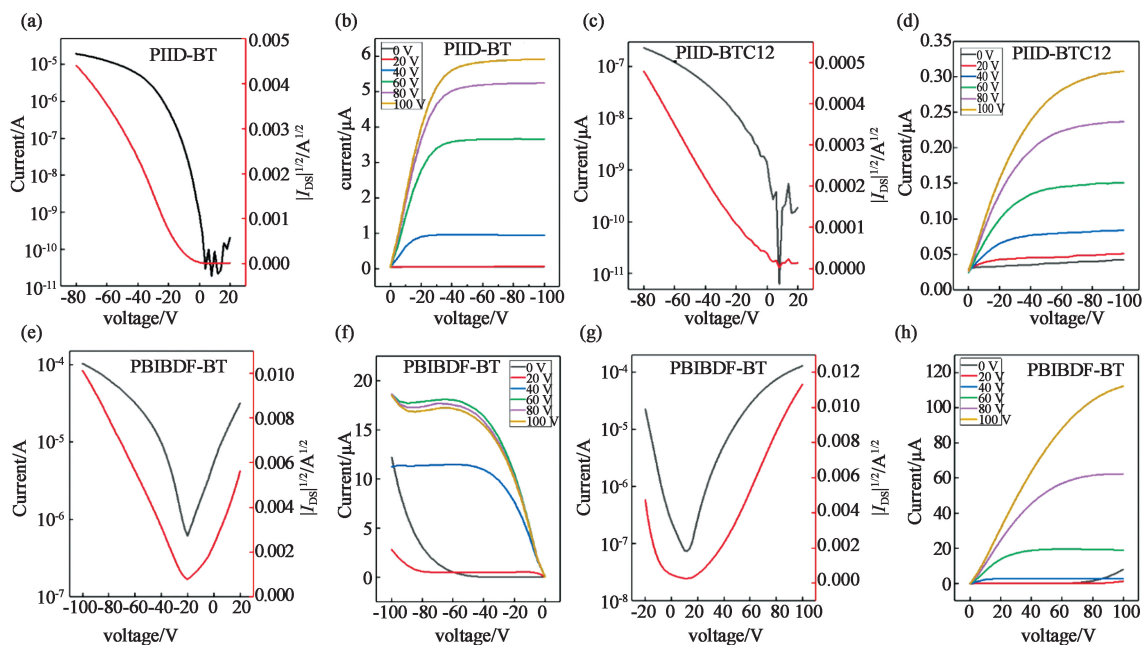


图 3 180 °C 热退火处理后, 聚合物 PIID-BT 的转移特性曲线(a)和输出曲线(b), PIID-BTC12 的转移特性曲线(c)和输出曲线(d), PBIBDF-BT 的转移特性曲线(e), (g) 和输出曲线(f), (h)。

Fig.3 Transfer curve(a) and output curve(b) of PIID-BT, transfer curve (c) and output curve (d) of PIID-BTC12, transfer curves (e), (g) and output curves (f), (h) of PBIBDF-BT OFET devices based on 180 °C-annealed polymer films.

3.3 聚合物晶体结构与表面形貌

我们通过小角掠射 X 射线衍射仪(GIXRD)和原子力显微镜(AFM)来表征聚合物晶体结构和表面形貌,图4为聚合物 PIID-BT、PIID-BTC12 和 PBIBDF-BT 的 GIXRD 二维衍射图。对于 PIID-BT 和 PBIBDF-BT 薄膜(图4(a)、(b))在平面外 q_z 方向均显示出(h00)的可分辨的衍射峰,PBIBDF-BT 甚至显示出了(500)衍射峰,表明薄膜具有高度有序的层状结构。PIID-BTC12 薄膜(图4(c))在面外 q_z 方向只有(100)和(200)两个衍射峰,表明其相对无序的堆积结构。对于平面内的 q_{xy} 方向,PIID-BT 和 PBIBDF-BT 都显示出(010)衍射峰,表明聚合物链主要采用 edge-on 的堆积方式。根据衍射峰的位置($q_{xy} = 0.164 \text{ nm}^{-1}, 0.177 \text{ nm}^{-1}$)可以计算出聚合物 PIID-BT 和 PBIBDF-BT 的 π - π 堆积距离,分别为 3.82 nm, 3.54 nm。根据(h00)峰的位置可以计算出相应的层间距为 23.35 nm 和 25.95 nm。这些结果表明,强电子缺陷单元 BIBDF 能提高聚合物主链的平面性,使其具有较小的 π - π 堆叠距离。较短的

π - π 堆积距离,使迁移率得到了有效的提高。对于 PIID-BTC12,其二维 GIXRD 图谱中只有(100)和(200)衍射峰,表明 PIID-BTC12 薄膜的晶体结构很差。长而密的侧链增加了空间位阻,导致聚合物主链较差的平面性。聚合物主链平面性的下降反过来影响了分子堆积,导致薄膜状态下结晶度的下降。

通过 AFM 图5可以看出聚合物 PIID-BT 和 PBIBDF-BT 都显示出较好的纳米纤维网络结构,这与 PIID-BT 和 PBIBDF-BT 都有很好的分子堆积有关。其中 PBIBDF-BT 薄膜显示出最明显的纳米纤维网络结构,这与 GIXRD 显示的结果一致,良好的结晶性更有利于迁移率的提高。对于 PIID-BTC12,其表面没有明显的纳米纤维结构,较差的分子堆积导致了 PIID-BTC12 薄膜不能形成良好的结晶结构,从而导致迁移率的降低。由以上结果可以看出单纯的增加烷基侧链会导致聚合物薄膜的分子堆积变差,导致薄膜结晶性的下降从而降低迁移率,但是在增加烷基侧链的同时增长主链的共轭结构反而会提高结晶性,提高迁移率。

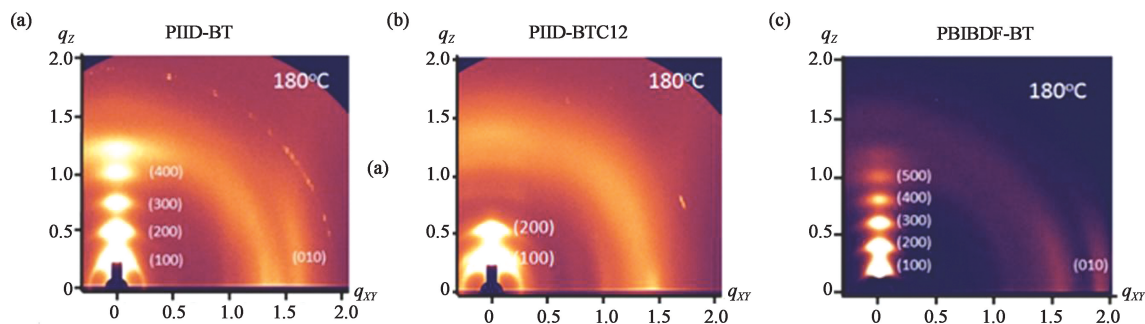


图4 聚合物 PIID-BT(a)、PIID-BTC12(b)和 PBIBDF-BT(c)的二维 GIXRD 衍射图。

Fig.4 Two-dimensional GIXRD diffraction patterns of PIID-BT (a), PIID-BTC12 (b) and PBIBDF-BT (c), respectively.

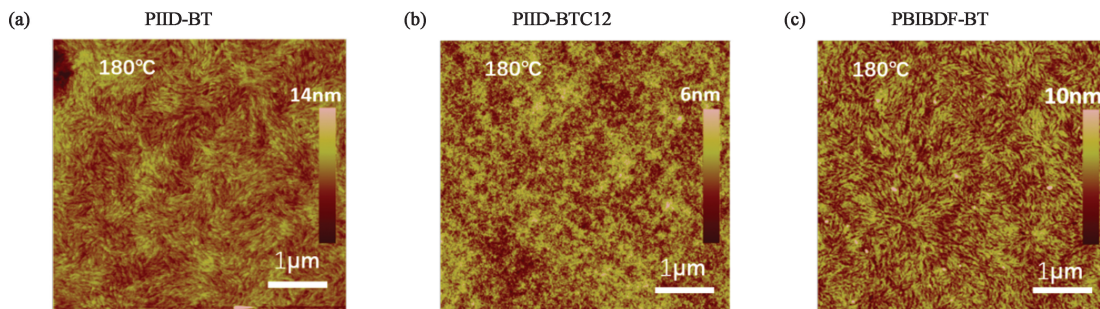


图5 聚合物 PIID-BT(a)、PIID-BTC12(b)和 PBIBDF-BT(c)的 AFM 高度图。

Fig.5 AFM height images of PIID-BT (a), PIID-BTC12 (b) and PBIBDF-BT (c) thin films, respectively.

4 结 论

本文研究了基于异靛蓝及其衍生物的共轭聚合物的结构与性能关系,从主链和侧链结构探究了共轭聚合物化学结构对薄膜聚集态和电荷传输性质的影响。烷基侧链的加入会对异靛蓝基共轭聚合物的分子堆积产生巨大的影响,使聚合物薄膜从高度有序的结构变为无定形的

堆积方式,迁移率也随之明显降低。但是当我们同时改变主、侧链结构,用 BIBDF 这种共轭长度大、吸电子能力强的异靛蓝衍生物单元替换掉异靛蓝单元,发现可以提高聚合物主链平面性,减小 π - π 堆叠距离,提高聚合物薄膜结晶性,分子堆积变为更加有序,并且不影响聚合物的可溶液加工性能,从而使迁移率有较大的提高。这为设计基于异靛蓝的高性能共轭聚合物提供了一种有效的策略。

参 考 文 献:

- [1] 庞博,葛丰,邱龙臻.聚 3-己基噻吩-b-聚十六烷氧基联烯嵌段聚合物的制备及其场效应性能[J].发光学报,2016,37(6):669-675.
PANG B, GE F, QIU L Z. Synthesis and field effect transistor performance of poly(3-hexylthiophene)-b-poly(hexadecyloxyallene) blockpolymer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(6): 669-675. (in Chinese)
- [2] MEIJER E J, DE LEEUW D M, SETAYESH S, *et al.* Erratum: Corrigendum: Solution-processed ambipolar organic field-effect transistors and inverters [J]. *Nature Materials*, 2003, 2(12): 834-834.
- [3] 薛战,田丰收,王庆贺,等.氧敏感性供体-受体共轭聚合物薄膜晶体管[J].发光学报,2018,39(8):1136-1142.
XUE Z, TIAN F S, WANG Q H, *et al.* Oxygen sensing characteristics of donor-acceptor conjugated polymer transistors of organic semiconductor film [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(8): 1136-1142. (in Chinese)
- [4] PARK G E, SHIN J, LEE D H, *et al.* Effect of branched alkyl side chains on the performance of thin-film transistors and photovoltaic cells fabricated with isoindigo-based conjugated polymers [J]. *Journal of Polymer Science Part A-Polymer Chemistry*, 2015, 53(10): 1226-1234.
- [5] SHIN J, PARK G E, LEE D H, *et al.* Bis(thienothiophenyl) diketopyrrolopyrrole-based conjugated polymers with various branched alkyl side chains and their applications in thin-film transistors and polymer solar cells [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(5): 3280-3288.
- [6] WANG B, ZHANG J, TAM H L, *et al.* Impact of alkyl side chains on the photovoltaic and charge mobility properties of naphthodithiophene-benzothiadiazole copolymers [J]. *Polymer Chemistry*, 2014, 5(3): 836-843.
- [7] GRIMSDALE A C, CHAN K L, MARTIN R E, *et al.* Synthesis of light-emitting conjugated polymers for applications in electroluminescent devices [J]. *Chemical Reviews*, 2009, 109(3): 897-1091.
- [8] SONAR P, SINGH S P, LI Y N, *et al.* A low-bandgap diketopyrrolopyrrole-benzothiadiazole-based copolymer for high-mobility ambipolar organic thin-film transistors [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(47): 5409-5413.
- [9] ZHAN X W, FACCHETTI A, BARLOW S, *et al.* Rylene and related diimides for organic electronics [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(2): 268-284.
- [10] ZHAO Y, GUO Y L, LIU Y Q. Recent advances in n-type and ambipolar organic field-effect transistors [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(38): 5372-5391.
- [11] LEI T, DOU J H, PEI J. Influence of alkyl chain branching positions on the hole mobilities of polymer thin-film transistors [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(48): 6457-6461.
- [12] MEI J G, KIM D H, AYZNER A L, *et al.* Siloxane-terminated solubilizing side chains: bringing conjugated polymer backbones closer and boosting hole mobilities in thin-film transistors [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(50): 20130-20133.
- [13] BABELA, JENEKHE S A. Alkyl chain length dependence of the field-effect carrier mobility in regioregular poly(3-alkylthiophene)s [J]. *Synthetic Metals*, 2005, 148(2): 169-173.
- [14] OSAKA I, ZHANG R, SAUVÉ G, *et al.* High-lamellar ordering and amorphous-like π -network in short-chain

- thiazolothiazole-thiophene copolymers lead to high mobilities [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 131(7): 2521-2529.
- [15] LEI T, DOU H J, CAO Y X, *et al.* A BDOPV-based donor-acceptor polymer for high-performance n-type and oxygen-doped ambipolar field-effect transistors [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(45): 6589-6593.
- [16] YAN Z Q, SUN B, LI Y N. Novel stable (3E, 7E)-3, 7-bis(2-oxoindolin-3-ylidene)benzo [1, 2-b; 4, 5-b']difuran-2, 6(3H, 7H)-dione based donor-acceptor polymer semiconductors for n-type organic thin film transistors [J]. *Chemical Communications*, 2013, 49(36): 3790-3792.
- [17] LEI T, DOU H J, MA J Z, *et al.* Chlorination as a useful method to modulate conjugated polymers: balanced and ambient-stable ambipolar high-performance field-effect transistors and inverters based on chlorinated isoindigo polymers [J]. *Chemical Science*, 2013, 4(6): 2447-2452.
- [18] ZHANG G B, LI P, TANG L X, *et al.* A bis(2-oxoindolin-3-ylidene)-benzodifuran-dione containing copolymer for high-mobility ambipolar transistors [J]. *Chemical Communications*, 2014, 50(24): 3180-3183.
- [19] LEI T, CAO Y, FAN Y L, *et al.* High-performance air-stable organic field-effect transistors: isoindigo-based conjugated polymers [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(16): 6099-6101.

作者简介:



田丰收(1992—),男,黑龙江伊春人,硕士研究生,2014年于合肥工业大学大学获得学士学位,主要从事有机半导体材料力学与电学性质研究。E-mail: 18656377565@163.com



邱龙臻(1980—),男,福建宁化人,研究员,博士生导师,2006年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事高分子材料设计合成、高分子薄膜制备和凝聚态结构调控及有机光电子器件等方面的研究。E-mail: lzqiu@ hfut.edu.cn