高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

酰亚胺稠合萘并[2,3-*b*:6,7-*b*′]二呋喃衍生物的合成与性质

杨子涵[1#]，董　浩[1#]，刘忠伟[1]，李艳如[1]，李　洁[2]，费竹平[1]
（1. 智能传感功能材料全国重点实验室，有机集成电路教育部重点实验室&
天津市分子光电科学重点实验室，天津大学分子+研究院，天津 300072；
2. 天津大学理学院&分子聚集态科学研究院化学系，天津 300072）

摘要　稠合呋喃及其衍生物具有高刚性、良好的共面性及扩展的π-共轭结构，已被用于发展有机光电功能材料. 然而，与稠合噻吩及其衍生物相比，稠合呋喃及其衍生物的结构种类仍然有限，制约了其进一步发展. 基于此，本文将酰亚胺基团与萘并[2,3-*b*:6,7-*b*′]二呋喃(NDF)单元稠合，合成了DFPI-C*n*系列分子，研究了分子的理化性质及其在有机场效应晶体管器件中的性能. 结果表明，所有分子均表现出良好的热稳定性，且随着烷基侧链增长，其结晶温度与熔融温度逐渐降低. 分子骨架呈轻微扭曲，最高占据分子轨道与最低未占据分子轨道的电子云均匀分布于整个共轭骨架中. 酰亚胺N位烷基链对分子在溶液中的吸收与发射光谱无明显影响，但对固体薄膜中的吸收光谱具有显著调控作用. 3个分子均呈现红光发射. 单晶结构解析表明，DFPI-C5C5分子采取一维堆积方式：相邻两个分子以头对尾方式形成二聚体，二聚体之间再以一定旋转角进行堆叠. 采用物理气相传输法制备的DFPI-C5C5纳米线晶体具有单晶特性及平整的表面形貌. 基于该纳米线晶体构建的有机场效应晶体管器件展现p型电荷传输特性，空穴迁移率达3.7×10^{-3} $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$. 本研究为发展新型稠合呋喃类有机半导体材料提供了新思路.

关键词　稠合呋喃；共轭分子；酰亚胺
中图分类号　O626.1；O649.5　　**文献标志码**　A　　doi：10.7503/cjcu20260170

Synthesis and Properties of Imide-fused Naphtho[2,3-*b*:6,7-*b*′]difuran Derivatives

YANG Zihan[1#], DONG Hao[1#], LIU Zhongwei[1], LI Yanru[1], LI Jie[2], FEI Zhuping[1*]
(*1. State Key Laboratory of Advanced Materials for Intelligent Sensing, Key Laboratory of Organic Integrated Circuit, Ministry of Education & Tianjin Key Laboratory of Molecular Optoelectronic Sciences, Institute of Molecular Plus, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*;
2. Department of Chemistry, School of Science & Institute of Molecular Aggregation Science, Tianjin University, Tianjin 300072, *China*)

Abstract　Fused furans and their derivatives have been used to develop organic optoelectronic functional materials due to their high rigidity, good coplanarity, and extended π-conjugated structure. However, compared with fused thiophenes and their derivatives, the structural diversity of fused furans and their derivatives remains limited, which restricts their further development. To address this issue, we fused imide groups with naphtha[2,3-*b*:6,7-*b*′]difuran (NDF) units to synthesize a series of DFPI-C*n* molecules, and systematically investigated their physicochemical

收稿日期：2026-04-30. 网络首发日期：2026-06-02.
联系人简介：费竹平，男，博士，教授，主要从事有机光电功能材料合成及应用方面的研究. E-mail：zfei@tju.edu.cn
基金项目：天津市自然科学基金(批准号：23JCYBJC01790)资助.
Supported by the Natural Science Foundation of Tianjin, China(No.23JCYBJC01790).
共同第一作者.

properties as well as their performance in organic field-effect transistor devices. All the molecules exhibit good thermal stability, and their crystallization and melting temperatures gradually decrease with increasing alkyl side chain length. The molecular skeleton is slightly twisted, and the electron cloud distributions of the highest occupied molecular orbital and the lowest unoccupied molecular orbital are uniformly delocalized over the entire conjugated framework. The *N*-alkyl chains of the imide groups have no obvious effect on the absorption and emission spectra of the molecules in solution, but significantly modulate their absorption spectra in solid films. All three molecules show red emission. Single-crystal structure analysis reveals that DFPI-C5C5 molecules adopt a one-dimensional packing mode: two adjacent molecules form a dimer in a head-to-tail manner, and the dimers further stack with a certain rotation angle. The DFPI-C5C5 nanowire crystals prepared by physical vapor transport exhibit single-crystal characteristics and a flat surface morphology. Organic field-effect transistor devices based on these nanowire crystals show p-type charge transport properties with a hole mobility of up to 3.7×10^{-3} $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$. This work provides a new approach for the development of novel fused furan-based organic semiconductor materials.

Keywords Fused furan; Conjugated molecule; Imide

有机共轭分子兼具结构性能可调、可溶液法加工、本征柔性、生物相容性优异及潜在成本低等优势，在有机光电领域展现出广阔的应用前景[1~6]. 目前，已有多种芳香结构单元被用于构筑有机共轭分子. 其中，苯环与噻吩均具有平面共轭骨架、良好的化学稳定性以及易于功能化修饰等优点，是当前构建有机共轭分子最为常见的两种芳香结构单元[7,8]. 呋喃是结构最简单的芳香单元之一，其化学结构与噻吩高度相似. 相较于噻吩，呋喃的芳香性较弱，将其引入有机小分子或共轭聚合物后，所得分子表现出更显著的醌式结构特征，从而形成更为离域的π电子体系. 同时，呋喃类分子间的π-π相互作用较弱，因而具有较高的溶解度. 此外，呋喃具有可生物降解性，有利于提升材料的环境友好性. 鉴于上述特点，呋喃及其衍生物已被广泛用于构筑有机共轭小分子及共轭聚合物. 其中，将呋喃环与苯、萘或蒽等芳香环稠合获得的稠合呋喃及其衍生物具有高刚性、良好的共面性以及扩展的π-共轭结构，已被应用于有机场效应晶体管(OFET)[9~15]、离子检测[16]、有机太阳能电池[17]、光开关[18]、发光二极管[19]、量子点太阳能电池[20]、近红外二区发光[21]及双光子吸收[22]等领域. 目前，基于呋喃的半导体与器件得到了快速发展并取得了显著进展[23]. 然而，相比于稠合噻吩及其衍生物，稠合呋喃及其衍生物的结构种类仍然较少. 因此，发展新结构稠合呋喃衍生物并研究其理化性质具有重要意义.

酰亚胺是一类强吸电子基团，在有机共轭分子中引入此类基团，一方面能够有效调控材料的能级水平；另一方面，通过在酰亚胺基团的氮原子上连接不同的取代基，还可调节分子的溶液可加工性及其自组装行为[24~27]. 过去几十年里，研究人员将酰亚胺基团与稠合噻吩单元结合，开发了多种有机共轭分子，并将其应用于有机光电器件中[28~31]. 然而，迄今鲜见将酰亚胺基团与稠合呋喃单元结合的研究报道. 基于此，本文将萘并[2,3-*b*:6,7-*b*′]二呋喃(NDF)与酰亚胺基团进行稠合，构筑了 DTPI-C*n* 和 DTPI-C*n*-TIPS 系列分子，研究了呋喃环α位取代基团以及酰亚胺基团氮位不同支化位置与链长对分子理化性质的影响.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

环已烷(分析纯)，百灵威科技有限公司；甲氧基(环辛二烯)合铱二聚体(纯度99%)、三环己基膦四氟硼酸盐(纯度99%)、三(二亚苄基丙酮)二钯-氯仿加合物(纯度98%)、四丁基氟化铵(1 mol/L)、联硼酸频那醇酯(分析纯)，上海泰坦科技有限公司；碳酸铯(纯度99%)，天津希恩思生化科技有限公司；液溴(分析纯)，天津大茂化学试剂厂；四氢呋喃(分析纯)，天津康科德科技有限公司；三异丙基氯硅烷(分析纯)，安耐吉化学技术(上海)有限公司.

JNM-ECZ400R(400 MHz)和JNM-ECZ600R (600 MHz)型液体核磁共振波谱仪($^1H/^{13}C$ NMR)，日本 Rigaku 公司；TG 209F3 型热重分析仪(TGA)和 DSC214 Polyma 型差示扫描量热仪(DSC)，德国耐驰公

司；Shimadzu UV2600型紫外-可见近红外光谱仪(UV-Vis-NIR)，日本岛津公司；FLS1000型稳态荧光光谱仪，英国爱丁堡公司；CHI760E型电化学工作站(CV)，上海辰华公司(以0.1 mol/L四丁基六氟磷酸铵二氯甲烷溶液为电解液，室温下测试，扫描速率50 mV/s，分别用玻碳电极、铂丝、饱和甘汞电极作为工作电极、对电极和参比电极)；Rigaku Saturn 70 CCD型单晶X射线衍射仪和MiniFlex600型薄膜X射线衍射仪(XRD)，日本理学公司；Aglient B1500A型半导体参数分析仪(OFET器件测试)，美国安捷伦科技公司；Bruker Dimension Icon型原子力显微镜(AFM)，德国布鲁克公司；Nikon LV-UEPI-N型偏光显微镜(POM)，日本尼康公司.

1.2 合成与表征

目标化合物的合成步骤详见本文支持信息. 化合物的结构表征结果见本文支持信息.

2 结果与讨论

2.1 目标分子的合成

DTPI-C*n* 和DTPI-C*n*-TIPS系列分子的合成路线如图1和图S1(见本文支持信息)所示. NDF与2Br-NMA参考文献[32~35]方法合成. 为防止NDF分子中呋喃环的α位在后续合成步骤中发生副反应，采用大位阻的三异丙基硅基(TIPS)对其进行保护，以83%的产率得到中间体NDF-TIPS. 随后，在铱催化下，NDF-TIPS发生C—H硼化反应，以29%的产率得到关键中间体NDF-Bpin. 将NDF-Bpin与一系列具有不同烷基链长度的二溴萘酰亚胺(2Br-NMI-C*n*)在钯催化下进行Suzuki-Miyaura交叉偶联和直接C—H芳基化串联环化反应[35,36]，得到DFPI-C*n*-TIPS系列目标分子，产率为23%~32%. 最后，利用四丁基氟化铵脱除TIPS保护基团，以26%~47%的产率获得DFPI-C*n*系列分子.

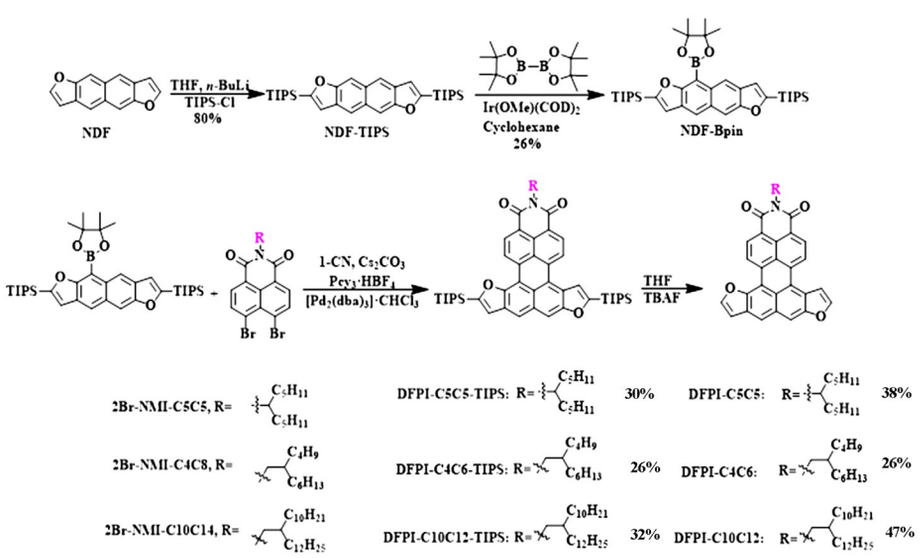


Fig. 1 Synthetic route of DFPI-C5C5, DFPI-C4C8 and DFPI-C10C14

2.2 热学性质

通过热重分析(TGA)和差示扫描量热法(DSC)对DFPI-C*n*系列分子的热学性能进行了表征. 由图2可见，所有分子均表现出良好的热稳定性，失重5%时的热分解温度均高于320 ℃. DSC曲线表明，烷基链的支化位置及长度对分子的熔融温度和结晶温度具有显著影响. 其中，支化位点位于1号碳的DFPI-C5C5分子，在加热和冷却过程中展现出最高的熔融温度(229 ℃)和结晶温度(187 ℃). 当支化位点移至2号碳且链长增加时，DFPI-C4C8的熔融温度和结晶温度分别降至219和161 ℃. 随着柔性烷基链进一步增长至C10C14，DFPI-C10C14的熔融温度持续降低；除184 ℃处的熔融峰外，其DSC曲线在约96 ℃处还出现另1个熔融峰，该峰对应的相转变尚不明确，推测可能与分子存在多种堆积方式有关. 总体而言，烷基链的支化位置和长度通过影响分子堆积方式，进而调控其结晶行为.

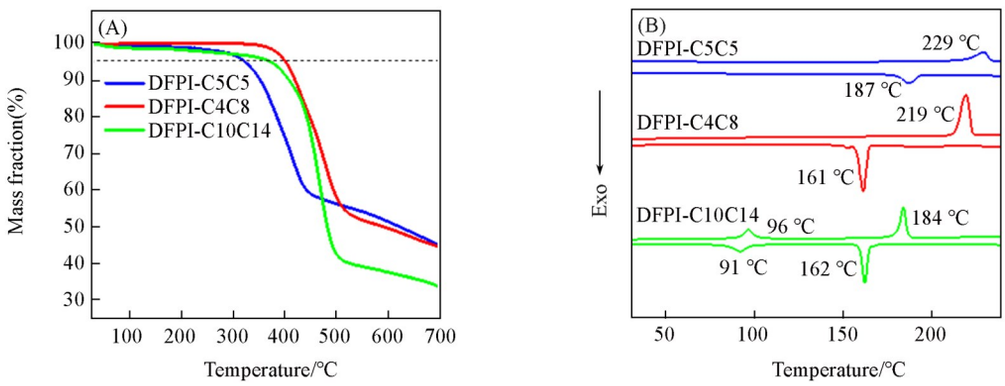


Fig. 2　TGA(A) and DSC curves(B) of DFPI-C5C5, DFPI-C4C8 and DFPI-C10C14

2.3　密度泛函理论计算

为探究 DFPI-C*n* 系列分子的骨架结构和电子云分布，进行了密度泛函理论(DFT)(Gaussian, B3LYP/6-31G**)计算，为简化计算过程以甲基代替分子中长烷基侧链，结果如图 3 所示. DFPI-C*n* 分子中萘并[2,3-b:6,7-b′]二呋喃与萘酰亚胺平面之间夹角为 13.21°，π 骨架展现出轻微扭曲. 分子的最高占有轨道(HOMO)和最低未占有轨道(LUMO)电子云都均匀分布于整个分子骨架，这一特征与其类似物 PMI 一致[37]，表明给电子基团呋喃环稠合引入对骨架电子云分布无显著影响. 随后，在优化几何构型的基础上，采用氯仿溶剂模型进行了时间依赖性密度泛函理论(TD-DFT)计算. 图 S2(见本文支持信息)示出了 DFPI-CH_3 分子通过 TD-DFT 模拟得到的紫外吸收光谱及电子能级. 结果表明，该分子在 560 nm 附近的吸收峰主要由 $S_0 \rightarrow S_1$ 跃迁主导，推测其源于 $\pi \rightarrow \pi$ 跃迁；而 200~400 nm 范围内的吸收则由其它能级跃迁主导，可能源于 $n \rightarrow \pi$ 跃迁. 为验证以上推断，进一步采用自然跃迁轨道(NTO)方法分析了分子价层电 203.165 子的激发类型，结果示于图 S3(见本文支持信息). DFPI-CH_3 分子的 HONTO 与 LUNTO 均离域于整个共轭骨架，在 $S_0 \rightarrow S_1$ 跃迁过程中，HONTO→LUNTO 跃迁的贡献值为 100%，能够良好地表示 S_0-S_1 跃迁过程.

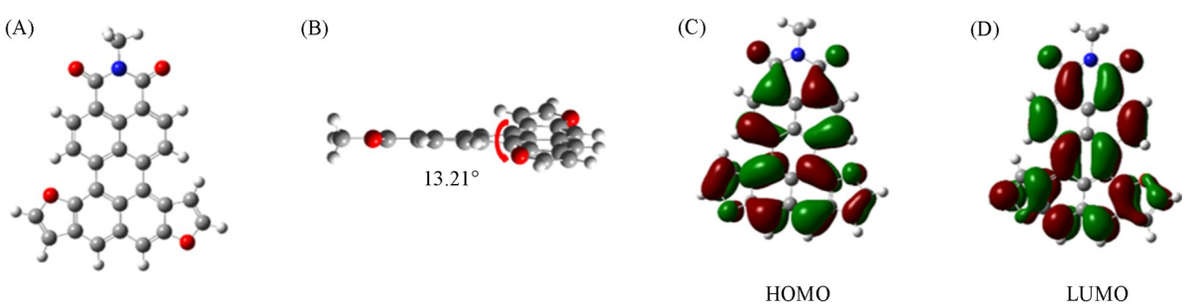


Fig. 3　Top view(A) and side view(B) of the optimal configuration of DFPI-CH_3 calculated by DFT, HOMO (C) and LUMO(D) distribution

2.4　光物理性质和电化学能级

测试了 DFPI-C*n* 系列分子的紫外-可见吸收光谱和荧光发射光谱. 同时，为了考察 TIPS 取代基对其光物理性质的影响，测定了 DFPI-C*n*-TIPS 系列分子的相应光谱作为对比. 图 4(A)为 DFPI-C*n*-TIPS 系列分子在氯仿溶液中的吸收光谱，相关数据列于表 1. 可见，3 个分子的吸收谱带基本一致，在 500~650 nm 范围内呈现出 1 个吸收峰(564 nm)，该峰可归属于 $\pi \rightarrow \pi$ 跃迁；而 600 nm 处出现的肩峰可能源于 $\pi \rightarrow \pi$ 电子跃迁过程中振动分布的变化[38~40]. 同样，DFPI-C*n* 同系物溶液的吸收光谱图基本一致[图 4(B)]，且与理论模拟计算结果吻合良好. 与 DFPI-C*n*-TIPS 相比，DFPI-C*n* 的吸收峰发生蓝移，这是由于无 TIPS 保护基后分子的共轭长度减小所致. 以上结果表明，N 位烷基链对分子在溶液中的吸收光谱无明显影响.

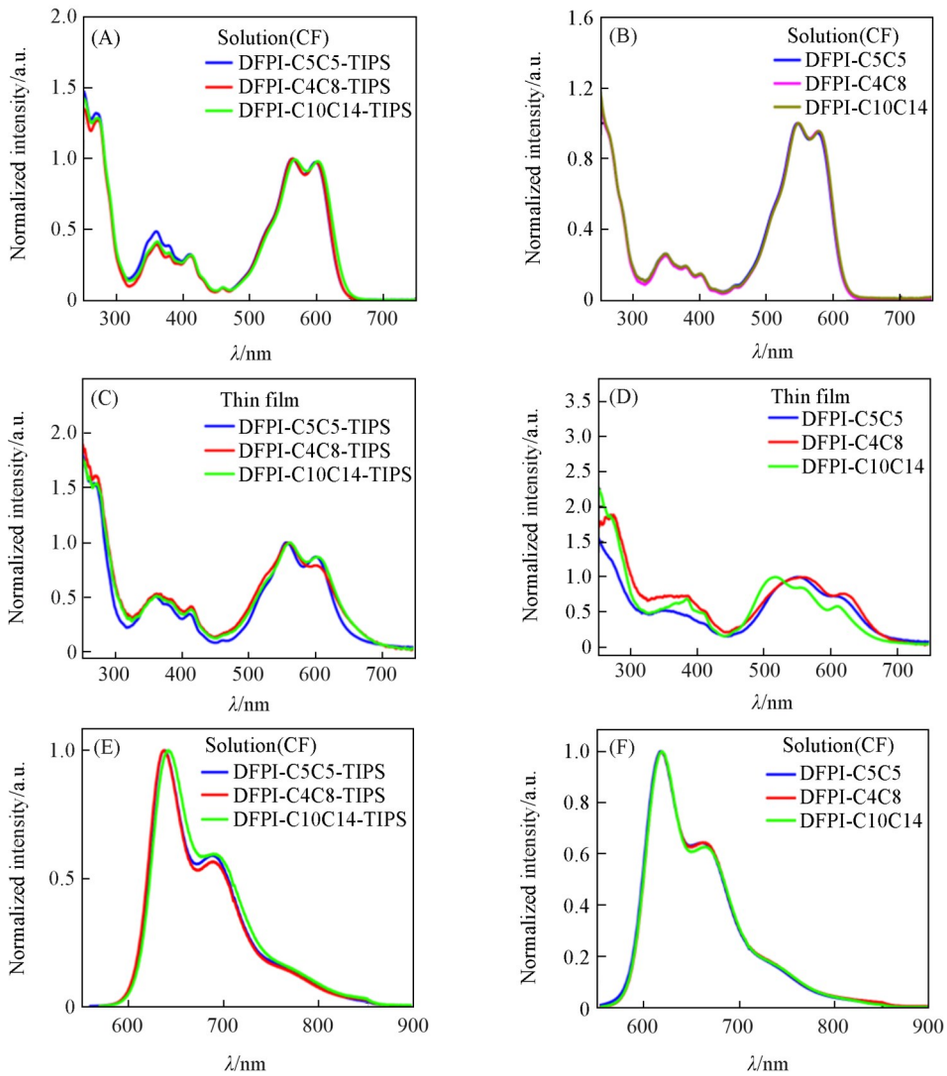


Fig. 4 Absorption spectra of DFPI-C*n*-TIPS and DFPI-C*n* in chloroform(A, B) and in thin films(C, D) and emission spectra(E, F) in chloroform

Table 1 Photophysical properties of DFPI-C*n*-TIPS and DFPI-C*n*

Compound	$\lambda_{abs,\ max}$/nm (sol.)	$\lambda_{abs,\ max}$/nm (film)	$\lambda_{PL\ max}$/nm (sol.)
DFPI-C5C5-TIPS	521, 564, 600	522, 556, 600	638, 690
DFPI-C4C8-TIPS	521, 564, 600	522, 559, 602	638, 690
DFPI-C10C14-TIPS	521, 564, 600	522, 560, 603	640, 690
DFPI-C5C5	505, 544, 576	551, 611	618, 665
DFPI-C4C8	505, 544, 576	556, 620	618, 665
DFPI-C10C14	505, 544, 576	515, 556, 610	619, 665

对于含有TIPS保护基的DFPI-C*n*-TIPS系列分子，其在薄膜中的吸收峰值与溶液中基本相同，这可能是由于TIPS基团空间位阻较大，削弱了薄膜态下分子间的相互作用所致．然而，从溶液到薄膜，长波段2个吸收峰的强度比值发生了变化，表明π-π*电子跃迁的振动分布有所改变．而对于DFPI-C*n*系列分子，其薄膜态吸收光谱相比于溶液态发生红移，表明薄膜中分子间相互作用增强．此外，不同DFPI-C*n*同系物在薄膜中的吸收光谱存在显著差异，说明N位烷基链对固态薄膜中的分子间相互作用及分子堆积具有重要影响．

进一步探究了DFPI-C*n*-TIPS，DFPI-C*n*及DTPI-C*n* 3组同系物在氯仿溶液中的荧光发射特性，其发射光谱如图4(E)和(F)所示．其中，DFPI-C*n*-TIPS与DTPI-C*n*分子均呈现出基本一致的红光发射，最大发射峰分别位于638和618 nm附近．相比之下，DFPI-C*n*系列分子的荧光发射峰发生蓝移，与其吸收光谱的变化趋势一致．为探究DFPI-C*n*系列分子的前线轨道能级，利用循环伏安法对该类分子的电化学性能开展了测试，所得电化学曲线如图5所示．DFPI-C*n*系列分子具有基本一致的前线轨道能级，其LUMO能级与HOMO能级分别为−3.49与−5.25 eV．

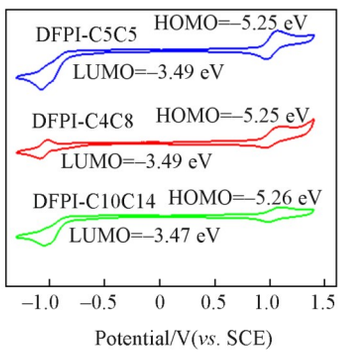


Fig. 5　Cyclic voltammetry curves of DFPI-C*n* in dichloromethane solution(0.1 mol/L Bu_4NPF_6 as electrolyte)

2.5　单晶结构分析

为研究DFPI-C*n*分子的堆积方式，实验中尝试培养单晶并进行结构解析，但仅获得DFPI-C5C5的高质量单晶．化合物DFPI-C5C5的晶体结构数据见本文支持信息表S1，该晶体属于三斜晶系，空间群为*P*-1．由图6(A)可见，分子中萘并二噻吩与酰亚胺基团之间存在轻微扭曲，与理论计算结果相似．图6(B)示出了DFPI-C5C5的单晶胞，分子以一维层状π堆积方式形成二聚体：M1与M2，M3与M4分别构成Dimer1和Dimer2，二者交替堆积[图6(C)]．二聚体内的2个分子以反平行方式堆积[图6(D)]．沿垂直于分子共轭骨架方向观察，分子间具有约3个苯环面积的π-π重叠区域，不同二聚体间具有一定的旋转角(本文支持信息图S4)．此外，DFPI-C5C5分子间存在多种弱相互作用，如2个分子间存在π-π作用和C—H···π相互作用，分子与侧边邻近分子存在多重C—H···O相互作用等(见本文支持信息图S5)，这些弱相互作用稳定了分子的构型与堆积方式，也预示分子的一维电荷传输特性．

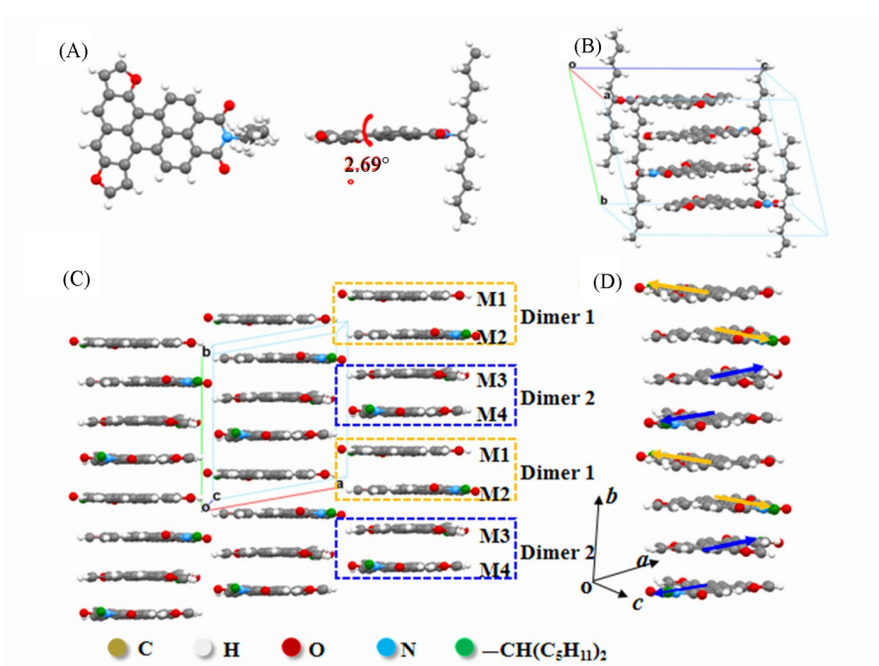


Fig. 6　Top view and side view of DFPI-C5C5(A), unit cell structure(B), molecular layer packing(C), and schematic diagram of alternating packing of molecular dimers(D)

2.6　有机场效应晶体管器件性能

由于DFPI-C5C5能够形成有序单晶结构，实验中尝试制备其微纳晶OFETs器件．首先，通过物理气相传输(PVT)法制备了DTPI-C5C5微纳晶体．图7(A)~(C)分别为微纳晶体在普通光学和偏光显微

镜下的照片. 可见, DFPI-C5C5呈现一维纳米线形貌, 与单晶结构堆积方式相吻合. 偏光显微镜测试结果表明, 当衬底旋转45°时, 纳米线晶体呈现出均匀的明暗变化[图7(B)和(C)], 证实其具有单晶属性. 纳米线晶体的X射线衍射(XRD)谱图呈现尖锐且强度较高的衍射峰[图7(D)], 进一步证实了其具有高结晶性. 原子力显微镜(AFM)测试结果[图7(E)]显示, 纳米线晶体的均方根粗糙度较小, 说明其表面平整度良好. 采用金膜转移至DFPI-C5C5纳米线晶体上作为源漏电极, 制备了底栅顶接触型晶体管器件, 其转移特性曲线如图7(F)所示. 可见, 器件表现出纯p-型电荷传输特性, 这与其较低的HOMO能级相符. 该器件的饱和迁移率为3.7×10^{-3} cm^2·V^{-1}·s^{-1}, 表明DFPI-C5C5具有电荷传输能力. 然而, 单晶结构分析结果显示, 分子呈一维交错π堆积, 可能限制了电荷的有效传输, 因此迁移率较低.

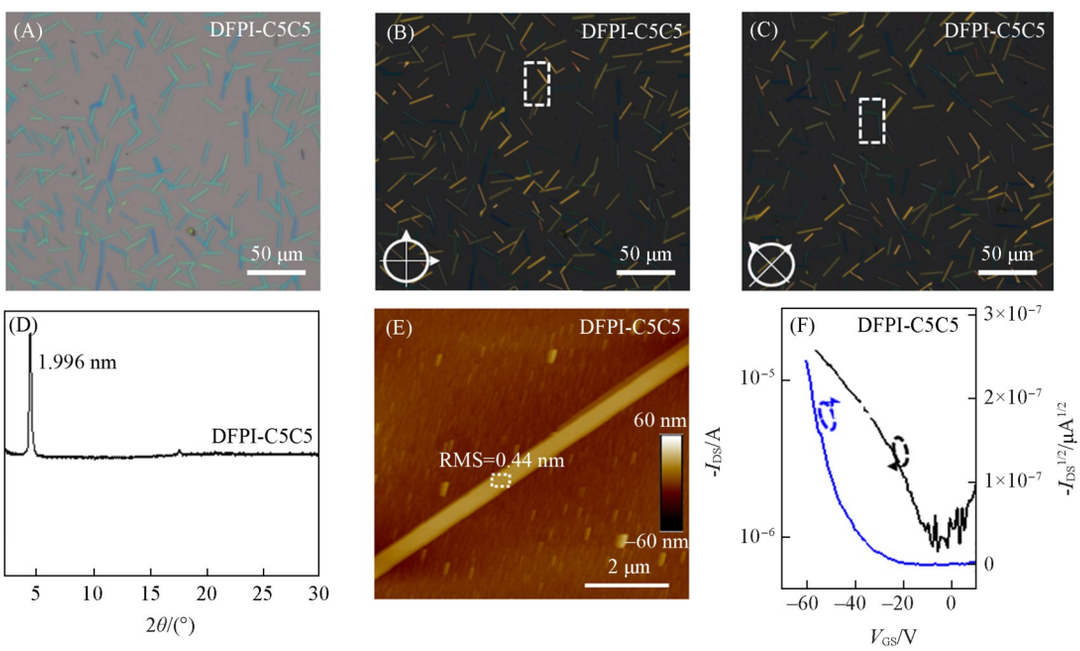


Fig. 7 Optical microscopy(A) and polarized optical microscopy(B, C) images, out-of-plane XRD pattern(D), AFM topography image(E) of DFPI-C5C5 nanocrystals, and transfer curve of DTPI-C5C5 nanocrystal based OFETs(F)

3 结　　论

设计并合成了新型稠合呋喃酰亚胺分子DFPI-C5C5, DFPI-C4C8和DFPI-C10C14, 研究了酰亚胺N位烷基链的支化位置与链长对分子性质的影响. 结果表明, 所有分子均表现出良好的热稳定性, 且随着烷基侧链增长, 3个分子的结晶温度和熔融温度逐步下降. DFT计算表明, 分子骨架呈轻微扭曲, HOMO/LUMO电子云均匀分布于整个共轭骨架. 光物理研究结果显示, N位烷基链对分子在溶液中的吸收与发射光谱无明显影响, 但对固体薄膜中的紫外吸收光谱具有显著调控作用. 相比于DFPI-Cn, 呋喃α位经TIPS保护的DFPI-Cn-TIPS因共轭长度增加, 其吸收峰和发射峰均发生红移. 通过循环伏安实验测得DFPI-Cn的LUMO/HOMO能级约为−3.49/−5.25 eV. 单晶结构解析显示, DFPI-C5C5分子呈现一维堆积方式. 相邻两分子以头对尾方式形成二聚体, 二聚体之间再以一定旋转角堆叠. 通过物理气相传输法制备的DFPI-C5C5纳米线晶体具有单晶特性和平整的表面形貌. 基于该纳米线晶体的有机场效应晶体管器件表现出p型电荷传输特性, 迁移率为3.7×10^{-3} cm^2·V^{-1}·s^{-1}, 表明该类结构在有机场效应晶体管领域具有潜在应用前景. 本文研究结果为发展新型稠合呋喃类有机半导体材料提供了新思路.

支持信息见http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20260170.

参 考 文 献

[1] Yang J., Zhao Z. Y., Wang S., Guo Y. L., Liu Y. Q., *Chem*, **2018**, *4*(12), 2748—2785
[2] Kim M., Ryu S. U., Park S. A., Choi K., Kim T., Chung D., Park T., *Adv. Funct. Mater.*, **2020**, *30*(20), 1904545
[3] Holliday S., Li Y. L., Luscombe C. K., *Prog. Polym. Sci.*, **2017**, *70*, 34—51
[4] Wei Q., Ge Z. Y., Voit B., *Macromol. Rapid Commun.*, **2019**, *40*(1), 1800570
[5] Wang W. Y., Niu J. Y., Zhang X. Y., Yang H. Q., Wang W. J., Yang H., Ye X., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2025**, *41*(6), 1421—1446
[6] Majid M., Cheng S. S., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2025**, *41*(6), 1278—1293
[7] Zhang C., Tan W. L., Liu Z. W., He Q., Li Y. R., Ma J. N., Chesman A. S. R., Han Y., McNeill C. R., Heeney M., Fei Z. P., *Macromolecules*, **2022**, *55*(11), 4429—4440
[8] Liu J. Y., Li W. H., Xian K. H., Liu Z. W., Li Y. R., Yao X., Ye L., Zhao Y., Fei Z. P., *Chinese J. Chem.*, **2023**, *41*(19), 2525—2530
[9] Li B., Huang H., *Mater. Today Nano*, **2023**, *21*, 100284
[10] Nakano M., Mori H., Shinamura S., Takimiya K., *Chem. Mater.*, **2012**, *24*(1), 190—198
[11] Shinamura S., Osaka I., Miyazaki E., Nakao A., Yamagishi M., Takeya J., Takimiya K., *J. Am. Chem. Soc.*, **2011**, *133*(13), 5024—5035
[12] Mitsui C., Soeda J., Miwa K., Tsuji H., Takeya J., Nakamura E., *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, *134*(12), 5448—5451
[13] Wang J. F., He Y. W., Guo S. H., Ali M. U., Zhao C. B., Zhu Y. N., Wang T., Wang Y. R., Miao J. S., Wei G. D., Meng H., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2021**, *13*(10), 12250—12258
[14] Hao W. L., Zou S. F., Gao J. H., Zhang H. R., Chen R., Li H. X., Hu W. P., *Org. Electron.*, **2018**, *53*, 57—65
[15] Zeng X. W., Zhang D. W., Zhu Y. N., Chen M., Chen H. B., Kasai S., Meng H., Goto O., *J. Mater. Chem. C*, **2019**, *7*(45), 14275—14283
[16] Ali S., Joshi S., Agarwal J., *J. Mol. Struct.*, **2025**, *1320*, 139562
[17] Faurie A., Gohier F., Frère P., *Dyes Pigments*, **2018**, *154*, 38—43
[18] Gui X. M., Zheng B., Huo L. J., *J. Mater. Chem. C*, **2022**, *10*(42), 15708—15724
[19] Zhang R., Chen G. F., Yang H., Li X. Q. Xiao J. C., *Dyes Pigments*, **2023**, *212*, 111127
[20] Luo M. T., Pei J. X., Zhang B. H., Wang Z. Q., Chen Y, Jia Q. Y, Lei X. P., Wu Z. X., Zhang X. W., Wang D. D., *Dyes Pigments*, **2025**, *235*, 112610
[21] You H. R., Lee D. H., Kim S. K., Park J. Y., Lee E. J., Kim H. J., Ma H. S., Ka S., Yong T., Lee Y. M., Kim Y., Moon B. J., Lee J., Choi J., *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, *36*(18), e14808
[22] Gill N., Posey R., Alfaro B., Garza H., Tran J., Mahmud K. M., Fritz A. C., Oyshi T. A., Nozohouri E., Srivastava I., Bickel U., Tropp J., *Adv. Opt. Mater.*, **2025**, *13*(35), e02433
[23] Wang X. H., Zhang C. J., Zeng J., Mao X. Y., Redshaw C., Niu G. L., Yu X. Q., Feng X., *J. Org. Chem.*, **2022**, *87*(19), 12741—12748
[24] Katuri J., Ma X., Stanton M. M., Sanchez S., *Acc. Chem. Res.*, **2017**, *50*(1), 2—11
[25] Zhang Y. L., Zhang C., Su Y. R., Dong W. J., Li Y. R., Liu Z. W., Yao X., Han Y., Fei Z. P., *Chinese J. Chem.*, **2022**, *40*(16), 1957—1963
[26] Yang Y. Z., Liu Z. T., Zhang G. X., Zhang X. S., Zhang D. Q., *Adv. Mater.*, **2019**, *31*(46), e1903104
[27] Ma J. N., Chen Y. S., Chen J. W., Tang J., Li Y. R., Li R. P., Yu L. Y., Fei Z. P., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2025**, *41*(6), 1645—1652
[28] Guo X. G., Facchetti A., Marks T. J., *Chem. Rev.*, **2014**, *114*(18), 8943—9021
[29] Al Kobaisi M., Bhosale S. V., Latham K., Raynor A. M., Bhosale S. V., *Chem. Rev.*, **2016**, *116*(19), 11685—11796
[30] Yan H., Chen Z. H., Zheng Y., Newman C., Quinn J. R., Dötz F., Kastler M., Facchetti A., *Nature*, **2009**, *457*(7230), 679—686
[31] Chen Z. H., Zheng Y., Yan H., Facchetti A., *J. Am. Chem. Soc.*, **2009**, *131*(1), 8—9
[32] Nakano M., Mori H., Shinamura S., Takimiya K., *Chem. Mater.*, **2012**, *24*(1), 190—198
[33] Shinamura S., Osaka I., Miyazaki E., Nakao A., Yamagishi M., Takeya J., Takimiya K., *J. Am. Chem. Soc.*, **2011** *133*(13), 5024—5035
[34] Zheng B., Qi F., Zhang Y., Zhang M., Gao P. F., Liu F., Li T. C., Wei D. H., Wan M. X., Chen G. M., Huo L. J., Jiang L., *Adv. Energy Mater.*, **2021**, *11*(13), 2003954
[35] Uersfeld D., Stappert S., Li C., Müllen K., *Adv. Synth. Catal.*, **2017**, *359*(23), 4184—4189
[36] Shoyama K., Mahl M., Seifert S., Würthner F., *J. Org. Chem.*, **2018**, *83*(10), 5339—5346
[37] Khatun M. N., Dey A., Meher N., Iyer P. K., *ACS Appl. Electron. Mater.*, **2021**, *3*(8), 3575—3587
[38] Sharma V., Chandra F., Sahoo D., Koner A. L., *Eur. J. Org. Chem.*, **2017**, *2017*(46), 6901—6905
[39] de Echegaray P., Mancheño M. J., Arrechea-Marcos I., Juárez R., López-Espejo G., Navarrete J. T. L., Ramos M. M., Seoane C., Ortiz R. P., Segura J. L., *J. Org. Chem.*, **2016**, *81*(22), 11256—11267
[40] Cremer J., Mena-Osteritz E., Pschierer N. G., Müllen K., Bäuerle P., *Org. Biomol. Chem.*, **2005**, *3*(6), 985—995

(Ed.: L, F, K)