http://pmse.scu.edu.cn

基于无机-有机大分子异质结的半透明有机光伏

严 雪，李鸿祥，胡颖玥，严岑琪，王嘉宇，程 沛
（四川大学 高分子科学与工程学院 高分子材料工程国家重点实验室，四川 成都 610065）

摘要：以宽带隙p型无机半导体给体硫氰化亚铜（CuSCN）与大分子受体Y6制备了双层异质结活性层结构的半透明有机太阳能电池。由于CuSCN与Y6制备得到的器件性能较低，以表面处理和添加剂的形式在活性层中引入1,8-二碘辛烷（DIO），能提高CuSCN空穴导电性及改善Y6的形貌，进而提升半透明有机太阳能电池的性能，从而基于引入DIO的活性层体系制备的半透明有机太阳能电池获得了最高的短路电流密度（7.48 mA/cm^2）和最高的能量转换效率（3.37%），远高于原始未处理器件（5.40 mA/cm^2，2.62%）。

关键词：有机太阳能电池；半透明；无机；大分子异质结
中图分类号：TM914.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）10-0144-09

化石能源引发的污染及能源危机，正给全球经济和环境带来严重影响。因此，当下急需改善能源结构，并积极开拓新型清洁能源。太阳能作为一种清洁且可再生的能源，分布极为广泛，且使用时对环境无污染，取之不尽用之不竭。有机太阳能电池能将太阳能转化成电能，具有吸收可调、高灵活性、低重量、高通量制造及半透明等特性，为解决能源危机与环境污染问题提供了全新路径[1, 2]。近年来，有机太阳能电池得到飞速发展，目前能量转换效率（PCE）已突破20%[3]。半透明有机太阳能电池由于其在众多领域的应用前景而被广泛关注[4]。其在保证高能量转换效率的同时需要有一定的平均可见光透过率（AVT），但二者往往难以兼得。

通过活性层工程来实现二者平衡是一种常用的手段，如降低活性层体系中的强可见光吸收聚合物给体含量，降低活性层膜厚或引入第三组分等方式，能够得到具有高性能的半透明有机太阳能电池[5, 6]。然而，上述方法无法从根本上化解高透过率与高效率之间的矛盾。理想的半透明活性层材料需同时具备弱可见光吸收、合适的能级排列和高载流子迁移率。对于有机受体材料而言，窄带隙受体材料近年来取得突破性进展，一系列高性能近红外吸收受体材料被设计合成[7, 8]。而有机给体材料存在吸收与性能难以协调的问题，宽带隙无机半导体提供了更佳的解决方案。无机半导体的带隙由其本身的原子性质和键合方式决定[9]，当无机半导体呈现为规整排列时，其迁移率高。由此，无机半导体可同时实现高迁移率与高透明性。

本文以大分子近红外吸收受体Y6和宽带隙p型无机半导体给体硫氰化亚铜（CuSCN）制备了双层异质结结构的半透明有机太阳能电池。受体Y6具有高电子迁移率，且吸光产生的光生激子束缚能低，有利于激子解离。以表面处理和添加剂的形式在CuSCN与Y6组成的活性层中引入1,8-二碘辛烷（DIO）可提升器件性能。通过空间电荷限制电流法（SCLC）测试验证了CuSCN空穴迁移率的提高。原子力显微镜（AFM）和掠入射广角X射线散射（GIWAXS）分析说明，在Y6中引入DIO添加剂，能

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0189
收稿日期：2024-04-15
基金项目：高分子材料工程国家重点实验室自主课题(sklpme2022-3-02, sklpme2023-2-11)；四川省科技计划项目(2023YFH0085, 2023YFH0086, 2023YFH0087, 2023NSFSC0990)
通讯联系人：王嘉宇，主要从事有机太阳能电池研究，E-mail: wangjiayu@scu.edu.cn；
程沛，主要从事有机太阳能电池研究，E-mail: chengpei@scu.edu.cn

提高Y6结晶性，增加分子聚集，提升分子排列有序性。基于在活性层中引入DIO制备的半透明有机太阳能电池的最高能量转换效率为3.37%，短路电流密度为7.48 mA/cm^2，平均可见光透过率为31.3%，高于原始未处理器件（5.40 mA/cm^2，2.62%，30.9%）。

1　实验部分

1.1　试剂与仪器

氧化铟锡（ITO）玻璃：透过率≥86%，华南湘城科技有限公司；Y6和PDINN：朔纶有机光电科技（北京）有限公司；硫氰化亚铜（CuSCN）粉末：纯度为99%，美国Strem Chemicals公司；二乙基硫醚（DES）：纯度为99%，成都市科隆化学品有限公司；氯仿（CF）：纯度为99.9%，成都市科隆化学品有限公司；氯苯（CB）：纯度为99.9%，北京百灵威科技有限公司；1,8-二碘辛烷（DIO）：纯度≥95%，日本TCI公司；金（Au）和银（Ag）：纯度为99.99%，中诺新材（北京）科技有限公司。

紫外臭氧清洗机（UVO）：L2002A2型，英国Ossila公司；恒温热台：HP88857198型，美国Thermo Fisher公司；金属蒸镀机：HCCX3000型，沈阳奇汇真空技术有限公司；太阳光模拟器：SS-X50型，光焱科技公司；台阶仪：DektakXT，德国Bruker科学仪器公司。

1.2　实验方法

制备有机太阳能电池器件时，首先清洗ITO玻璃基底。将ITO玻璃依次用含洗涤剂的去离子水溶液、去离子水、丙酮和异丙醇各超声2次洗净后，在100 ℃烘箱中烘干10 min待用。使用时先采用UVO对ITO玻璃进行20 min表面处理，再将其移入严格控制水氧含量的手套箱中进行后续旋涂成膜工艺。

将CuSCN的DES溶液（浓度为35 mg/mL）以6000 r/min的转速旋涂至ITO玻璃上，在105 ℃的恒温热台上退火10 min，得到厚度60 nm的CuSCN薄膜。(1) CuSCN/Y6器件活性层制备方法：在CuSCN薄膜上以2000 r/min的转速旋涂Y6的氯仿溶液（浓度为15 mg/mL），无需退火，得到60 nm的Y6薄膜。(2) CuSCN/DIO/Y6器件活性层制备方法：在CuSCN薄膜表面以2000 r/min的转速旋涂DIO体积比为0.7%的氯苯溶液，再放置于105 ℃的恒温热台上退火5 min，完成CuSCN表面处理。再在表面处理后的CuSCN薄膜上以2000 r/min的转速旋涂Y6的氯仿溶液（浓度为15 mg/mL），无需退火，得到60 nm的Y6薄膜。(3) CuSCN/Y6(DIO)器件活性层制备方法：在CuSCN薄膜上以2000 r/min的转速旋涂Y6的氯仿溶液（浓度为15 mg/mL，加入体积比为0.5%的DIO），在105 ℃的恒温热台上退火3 min，得到55 nm的Y6(DIO)薄膜。

得到活性层后，使用1 mg/mL的PDINN甲醇溶液在活性层表面旋涂成膜得到阴极界面层。最后，将上述器件置于蒸镀机中，进行顶部电极蒸镀。对于不透明有机太阳能电池，在较高真空度下（约为10^{-5} Pa）蒸镀100 nm Ag作为电极。而对于半透明有机太阳能电池，先蒸镀2 nm Au，再蒸镀10 nm Ag，得到超薄透明电极。器件面积为0.039 cm^2。

1.3　测试与表征

1.3.1　*电流密度-电压测试*：太阳光模拟器提供AM 1.5G光源，使用源表测试电流密度-电压（*J-V*）特性曲线，测试电压范围为−0.5～1.2 V。

1.3.2　*外量子效率测试*：采用QE-R型量子效率系统（光焱有限公司）表征有机太阳能电池的外量子效率谱（EQE）图。

1.3.3　*紫外可见光谱分析*：采用紫外-可见分光光度计（UV-2600i，日本岛津仪器股份有限公司）表征活性层薄膜的紫外吸收与透过光谱。样品基底为玻璃，制备工艺与器件制备工艺一致。

1.3.4　*空间电荷限制电流法测试*：采用源表（B2901A型，美国Keysight公司）测试器件在暗态下的*J-V*特性曲线，进而计算得到载流子迁移率。

1.3.5　*X射线光电子能谱分析*：采用X射线光电子能谱（XPS，AXIS Supra型，英国Kratos公司）进行分析，所有X射线光电子能谱均使用C 1s（284.6 eV）校准。

1.3.6　*原子力显微镜表征*：采用原子力显微镜（Smart SPM型，美国AIST-NT公司），测试模式为轻敲模式，扫描范围为4 μm×4 μm。

1.3.7　*掠入射广角X射线散射分析*：使用北京同步辐射装置BSRF-1W1A散射光束线站测试，光源的单色度0.154 nm，使用瑞士Dectris公司的Eiger 2M的二维图像板探测器记录数据，固体样品的基底为

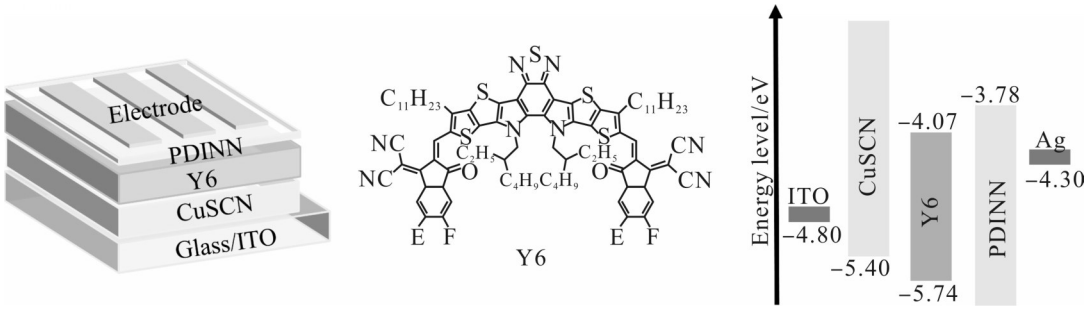


Fig. 1 (a) Device structure diagram of organic photovoltaics; (b) chemical structure of Y6; (c) energy level diagram

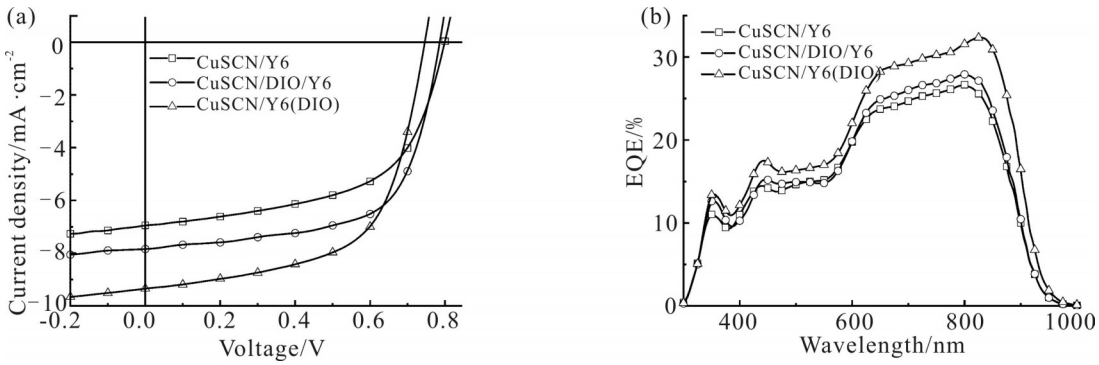


Fig. 2 (a) *J-V* curves and (b) external quantum efficiency (EQE) spectra of CuSCN/Y6, CuSCN/DIO/Y6 and CuSCN/Y6 (DIO) organic photovoltaics

硅片。

1.3.8 稳态荧光发射光谱(PL):使用光谱荧光仪系统(Fluorolog-3型,日本Horiba Scientific公司)进行分析。所有样品置于石英基底上。

2 结果与讨论

2.1 基于CuSCN与Y6制备的半透明有机太阳能电池的基本性能

研究中采用的器件结构如Fig.1(a)所示,采用正向结构,以ITO为阳极,CuSCN为阳极修饰层和电子给体层,大分子Y6为电子受体层(Y6结构式如Fig.1(b)所示)组成双层异质结活性层,PDINN为阴极修饰层,在其上蒸镀顶部电极。器件中各层对应的能级排列如Fig.1(c)所示[10],Y6为近红外吸收窄带隙受体,与CuSCN能级相匹配。

基于CuSCN与Y6制备了CuSCN/Y6,CuSCN/DIO/Y6与CuSCN/Y6(DIO)3种双层异质结结构的不透明有机太阳能电池。Fig.2为上述3种不透明有机太阳能电池的*J-V*特性曲线和EQE谱图,Tab.1总结了器件关键参数,包括开路电压(U_{OC})、短路电流密度(J_{SC})、填充因子(FF)和能量转换效率(PCE)以及由外量子效率谱图得到的积分电流值(J_{Cal})。CuSCN/Y6不透明有机太阳能电池的性能较差,其短路电流密度仅为6.95 mA/cm^2,能量转换效率为3.17%。表面处理被广泛应用于提高CuSCN薄膜的导电性与载流子迁移率,进而提升器件性能。采用DIO体积比为0.7%的氯苯溶液对CuSCN进行表面处理。器件开路电压经DIO表面处理后降低,而短路电流密度和填充因子明显增加,其中短路电流密度从6.95 mA/cm^{2}增加到7.85 mA/cm^2,填充因子从56.9%增加到63.8%。采用DIO表面处理的CuSCN/DIO/Y6不透明有机太阳能电池器件能量转换效率显著提升至3.94%。

将DIO作为添加剂,以0.5%的体积比加入Y6的氯仿溶液中进一步提升CuSCN/Y6双层器件性能。DIO添加剂的加入,使器件的开路电压由0.799 V降低至0.746 V,但短路电流密度实现了显著提升,由6.95 mA/cm^{2}增长至9.34 mA/cm^2,增长了34.4%。在EQE谱图中可以看出,其EQE值在全波长范围内明显增加,与其*J-V*特性曲线得到的

Tab. 1 Photovoltaic parameters of organic photovoltaics

Devices	U_{OC}/V	J_{SC}/(mA·cm^{-2})	J_{Cal}/(mA·cm^{-2})	FF/%	PCE/%
CuSCN/Y6	0.799 (0.793 ± 0.009)	6.95 (7.04 ± 0.10)	6.81	56.9 (55.0 ± 2.0)	3.17 (3.07 ± 0.10)
CuSCN/DIO/Y6	0.785 (0.782 ± 0.011)	7.85 (7.88 ± 0.17)	7.07	63.8 (62.6 ± 2.4)	3.94 (3.86 ± 0.12)
CuSCN/Y6(DIO)	0.746 (0.748 ± 0.003)	9.34 (9.37 ± 0.02)	8.24	60.5 (59.8 ± 0.6)	4.22 (4.18 ± 0.02)

average value of 5 independent devices in parentheses; power conversion efficiency (PCE) of a solar cell is the product of open-circuit voltage (U_{OC}), short-circuit current density (J_{SC}), and fill factor (FF) divided by input power; integrated current densities (J_{Cal}) were calculated from the EQE curves

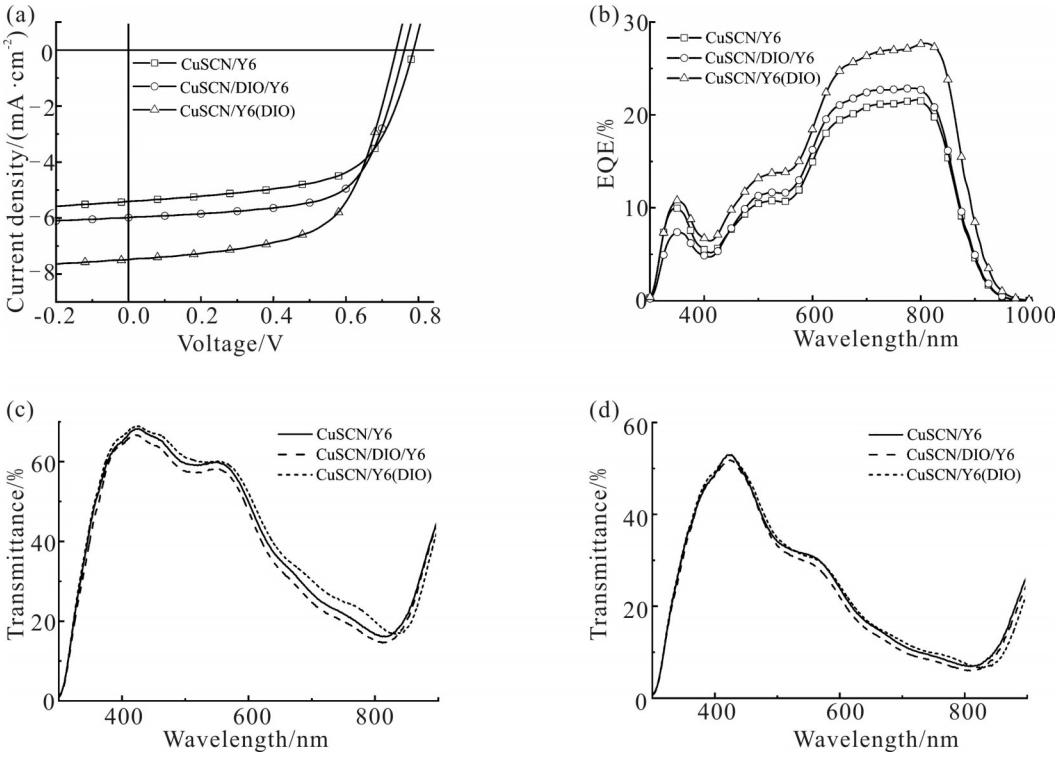


Fig. 3 (a) *J-V* curves, (b) EQE spectra, (c) active layer transmittance spectra and (d) device transmittance spectra of CuSCN/Y6, CuSCN/DIO/Y6 and CuSCN/Y6(DIO) semitransparent organic photovoltaics

短路电流密度一致。

将顶部电极由100 nm不透明Ag电极更换为2 nm Au与10 nm Ag组合成的超薄电极,分别制备了CuSCN/Y6,CuSCN/DIO/Y6与CuSCN/Y6(DIO)双层异质结结构的半透明有机太阳能电池。Fig.3为上述3种器件结构的半透明有机太阳能电池的*J-V*特性曲线,EQE谱图及透过谱图,所得性能参数如Tab.2所示。在活性层中引入DIO对半透明有机太阳能电池性能的提升与不透明有机太阳能电池相似,主要表现为短路电流密度的明显提升。CuSCN/Y6,CuSCN/DIO/Y6和CuSCN/Y6(DIO)半透明有机太阳能电池对应的能量转换效率分别为2.62%,2.95%和3.37%。通过台阶仪测试得到CuSCN/Y6和CuSCN/DIO/Y6中光吸收层(Y6层)的膜厚均为60 nm,CuSCN/Y6(DIO)中光吸收层(Y6(DIO)层)为55 nm。由紫外-可见分光光度计测定CuSCN/Y6,CuSCN/DIO/Y6,CuSCN/Y6(DIO)活性层的透过谱图,计算得到平均可见光透过率分别为53.1%,51.1%和

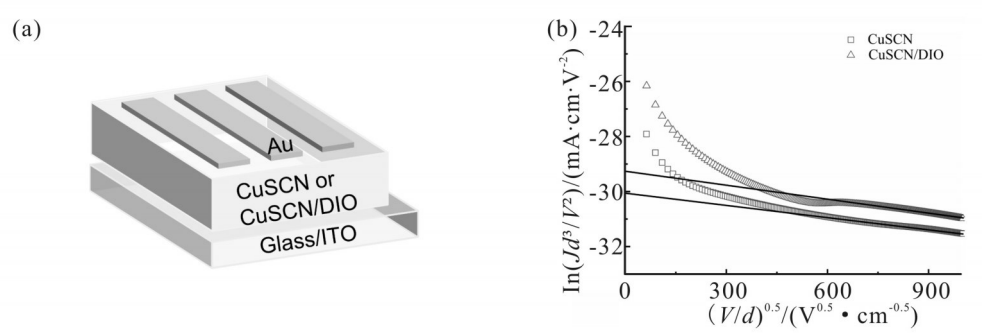


Fig. 4 (a) Device structure for SCLC measurement; (b) *J-V* characteristics of the CuSCN-based hole-only devices in dark

Tab. 2 Photovoltaic parameters of semitransparent organic photovoltaics.

Devices	U_{OC}/V	J_{SC}/(mA·cm^{-2})	J_{Cal}/(mA·cm^{-2})	FF/%	PCE/%	AVT/%
CuSCN/Y6	0.786 (0.790 ± 0.005)	5.40 (5.19 ± 0.19)	5.10	61.6 (61.0 ± 1.1)	2.62 (2.50 ± 0.10)	30.9
CuSCN/DIO/Y6	0.761 (0.759 ± 0.007)	5.98 (6.02 ± 0.04)	5.42	64.9 (63.7 ± 1.3)	2.95 (2.91 ± 0.04)	29.6
CuSCN/Y6(DIO)	0.739 (0.736 ± 0.004)	7.48 (7.35 ± 0.08)	6.67	61.0 (61.1 ± 0.6)	3.37 (3.31 ± 0.04)	31.3

*average value of 5 independent devices in parentheses; average visible transmittance (AVT) is arithmetic mean value of transmittance in 400~700 nm

54.8%，对应的整个器件的平均可见光透过率分别为30.9%，29.6%和31.3%，其中平均可见光透过率为400~700 nm波长范围内透过率的算数平均值。结果表明，CuSCN/DIO/Y6器件在能量转换效率提升的同时，能维持平均可见光透过率基本不变，而CuSCN/Y6(DIO)器件由于活性层膜厚更薄且吸收红移，平均可见光透过率略有增加，能量转换效率也因DIO作为添加剂引入Y6中大幅度提高。

2.2 DIO表面处理提高CuSCN的电学性能

为了研究DIO表面处理提升器件性能的机理，采用空间电荷限制电流法测定了CuSCN的空穴迁移率[11]。SCLC测试的器件结构为ITO/CuSCN/Au或ITO/CuSCN/DIO/Au(Fig.4(a))，通过Mott-Gurney公式计算得到迁移率

$$J=\frac{9}{8}\cdot\varepsilon_0\cdot\varepsilon_r\cdot\mu\frac{U^2}{L^3}\cdot e\sqrt{\gamma\frac{U}{L}} \quad (1)$$

式中：ε_0——真空介电常数；ε_r——材料的相对介电常数（ε_{CuSCN} = 5.1）；U———施加电压；J——对应电压测得的电流密度；L——薄膜膜厚。将测定得到的暗态*J-V*曲线进行数据处理，所得曲线如Fig.4(b)所示。未处理的CuSCN薄膜的空穴迁移率为1.74×10^{-4} cm^2/(V·s)，DIO表面处理后空穴迁移率值提高至3.86×10^{-4} cm^2/(V·s)。说明DIO表面处理可以提高CuSCN薄膜的空穴迁移率。

之后对CuSCN和CuSCN/DIO表面进行XPS分析，如Fig.5所示。DIO经热退火后，其碘离子容易掉落，在CuSCN/DIO薄膜的XPS全谱图(Fig.5(a))中出现了I 4d峰（位于50 eV），而在CuSCN膜上未发现，说明CuSCN/DIO薄膜上存在碘。I 3d的高分辨谱图如Fig.5(b)所示。虽然I 3d峰的位置与Cu的俄歇峰重合，但CuSCN/DIO中I 3d峰更强，再次证明CuSCN/DIO薄膜中存在碘。同时在CuSCN薄膜中，位于932.4 eV和952.3 eV的Cu 2p峰在DIO表面处理后向更低结合能的方向移动，分别位移至932.3 eV和952.1 eV，可能是Cu$^+$发生配位。由于SCN$^-$表现出类卤素的性质，增加SCN$^-$的比例可提高CuSCN薄膜的电导率和迁移率。研究中发现碘离子可以增加铜空位，从而提高CuSCN的p型性质，表现为电导

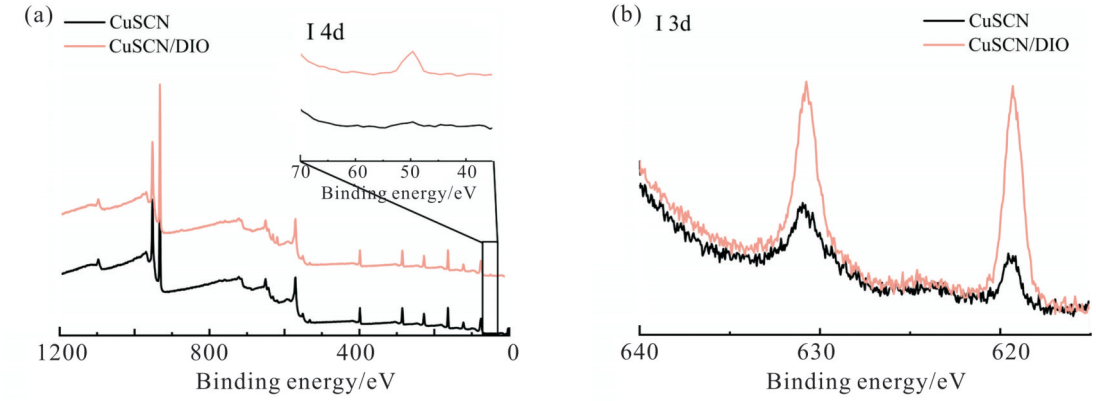


Fig. 5 (a) XPS spectra of CuSCN and CuSCN/DIO films; (b) high-solution XPS spectra of I 3d region of CuSCN and CuSCN/DIO films

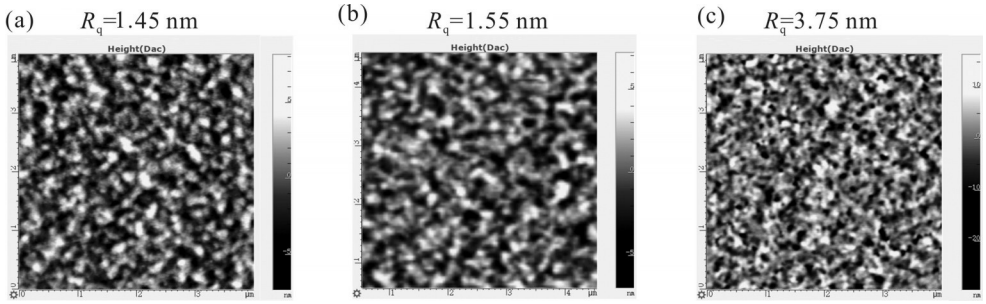


Fig. 6 Atomic force microscope (AFM) topography images of (a) CuSCN/Y6, (b) CuSCN/DIO/Y6 and (c) CuSCN/Y6(DIO) active layer films

率和载流子迁移率的提升[12]。DIO表面处理提升空穴导电性的原因可能在于,DIO掉落的碘离子起到了提高阴离子化学计量比的作用,增加了阴离子比例且减少了缺陷,改善了CuSCN晶体结构。

2.3　活性层形貌分析

通过原子力显微镜研究了不同条件的活性层表面形貌,如Fig.6所示。3种条件制备的活性层薄膜均为平整均一的薄膜。DIO表面处理的活性层薄膜的均方根粗糙度(R_q)与未处理的活性层薄膜的R_q基本相同,分别为1.45 nm和1.55 nm,而CuSCN/Y6(DIO)中含有DIO的Y6薄膜的表面起伏程度增大,R_q为3.75 nm,增长了超过1倍。这可能是由于Y6(DIO)薄膜和Y6薄膜相比,聚集状态发生了改变,使表面粗糙程度增加。

采用GIWAXS进一步研究了加入DIO后Y6分子聚集的状态,如Fig.7所示。Y6与Y6(DIO)薄膜中,Y6分子排列呈现出Face-on的取向,其面外方向(OOP)的(010)峰位于约17 nm^{-1}处,面内方向(IP)的(100)峰位于约2.7 nm^{-1}处。采用(010)峰计算得到π-π堆叠间距($d=2\pi/q$),这一间距的减小说明堆叠更为紧密,有利于电荷传输。在含有DIO的Y6薄膜中,π-π堆叠间距为0.367 nm,相较于不含DIO的Y6薄膜(π-π堆叠间距为0.372 nm)分子堆叠更为紧密,有利于提升电荷传输效率。此外,计算了(010)峰和(100)峰的晶区相干长度(CCL = 2π/半高峰宽),Y6(DIO)薄膜的CCL值分别为3.14 nm和7.57 nm,均大于Y6薄膜的2.73 nm和7.22 nm,这一数据进一步说明Y6(DIO)薄膜中Y6堆积的有序性提高且结晶程度更大。由于Y6的激子束缚能较低(100~250 meV)[13],当有序程度增加,Y6体相内的激子更容易解离为自由电荷,同时,有序程度的增加也有利于在Y6体相内进行电荷传输,从而实现器件性能提升。

2.4　活性层吸收与激子解离

DIO处理对活性层吸收及稳态荧光发射光谱的影响如Fig.8所示。采用DIO表面处理对活性层的最大吸收波长与最大发射波长几乎无影响。但在Y6的氯仿溶液中加入DIO后,Y6(DIO)薄膜的活性层展现出不同的光学特性,其最大吸收波长相较于

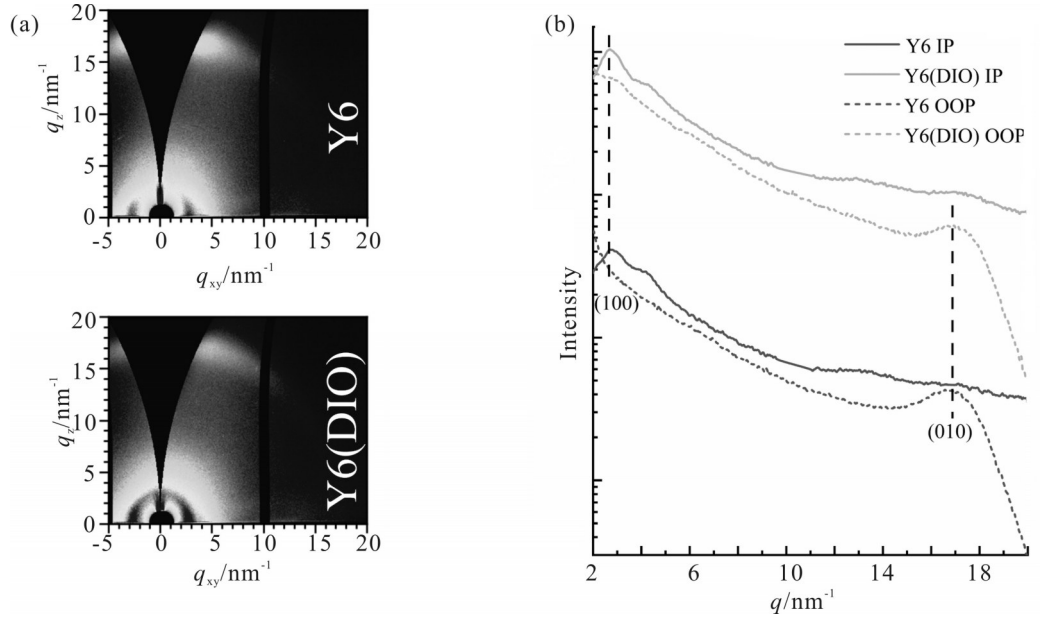


Fig. 7 (a) 2D GIWAXS and (b) 1D GIWAXS profiles of Y6 and Y6(DIO) film on silicon

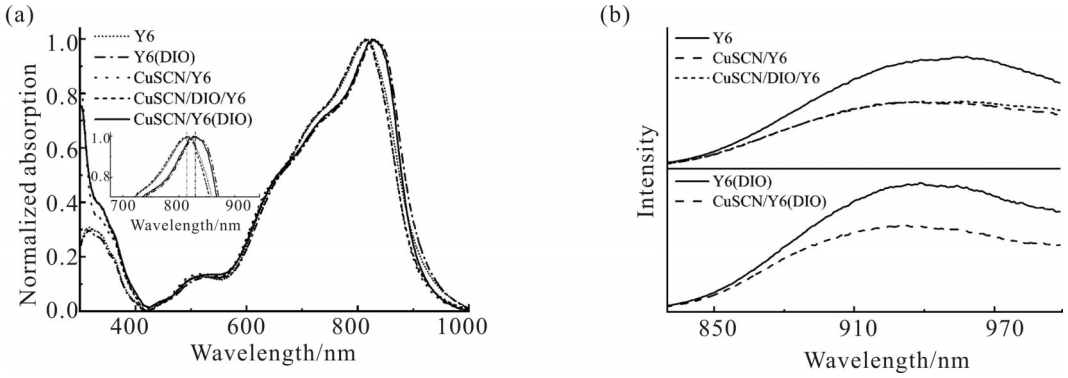


Fig. 8 (a) Absorption spectra of different films on quartz substrates; (b) steady-state PL spectra of Y6, Y6(DIO), CuSCN/Y6, CuSCN/DIO/Y6 and CuSCN/Y6(DIO) films excited at 750 nm

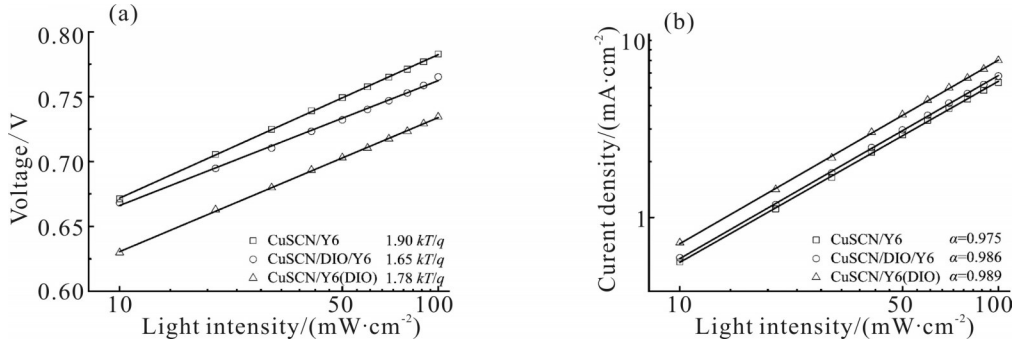


Fig. 9 Light intensity dependence of (a) U_{OC} and (b) J_{SC} of CuSCN/Y6, CuSCN/DIO/Y6 and CuSCN/Y6(DIO) devices

Y6薄膜发生了15 nm的红移,其稳态荧光最大发射波长相较Y6薄膜的荧光最大发射波长发生了20 nm的蓝移。Y6(DIO)薄膜的斯托克斯位移减小。Y6在含DIO的氯仿溶液中成膜时,分子聚集增强,与GIWAXS中得到结果一致。通过最大发射波长处的荧光强度之比计算得到的稳态荧光猝灭率几乎不变,表明DIO对CuSCN表面处理以及在Y6的氯仿溶液中引入DIO添加剂,对CuSCN与Y6之间激子解离无影响。

2.5　器件电荷复合分析

通过U_{OC}和J_{SC}与光强的依赖关系研究了半透明有机太阳能电池中的电荷复合过程。U_{OC}与光照强度(P_{light})遵循$U_{OC}\propto nkT/q \ln P_{light}$的关系[14],Fig.9(a)展示了$U_{OC}$与$\ln P_{light}$之间的曲线关系,通过斜率拟合可揭示器件中电荷复合的机制。当斜率接近1 kT/q时,双分子复合在器件中占主导地位,斜率越趋近于$2kT/q$,则表明肖克利-雷德-霍尔(SRH)复合主导电荷复合过程。制备的3种器件的斜率均接近$2kT/q$,说明SRH复合在电荷复合过程占主导地位。然而含DIO的器件相较于CuSCN/Y6器件展现出更小的斜率值,说明加入DIO有助于抑制SRH复合。J_{SC}与P_{light}之间的关系可用公式$J_{SC}\propto(P_{light})^{\alpha}$来分析,其中$\alpha$越接近1,表明双分子复合越弱[15]。Fig.9(b)对比了CuSCN/Y6,CuSCN/DIO/Y6与CuSCN/Y6(DIO)半透明器件的α值。加入DIO后,无论是DIO对CuSCN表面处理还是在Y6中加入DIO添加剂,α值均更趋近于1。这表明DIO引入CuSCN/Y6中可抑制器件内电荷双分子复合,从而能提升器件的短路电流密度与填充因子,进而优化器件光电性能。

3　结论

以CuSCN为电子给体,大分子Y6为电子受体制备了活性层结构为无机-有机大分子双层异质结结构的有机太阳能电池。探究了DIO改善CuSCN/Y6器件性能的机理。结论如下。

(1)采用含DIO的氯苯溶液对CuSCN进行表面处理,由XPS和SCLC测试得出,DIO受热掉落的碘离子增加了铜空位,从而提高了空穴导电性。DIO表面处理促进了电荷传输,抑制了电荷复合,提高了器件短路电流密度和能量转换效率。

(2)在Y6氯仿溶液中加入体积比为0.5%的DIO,不仅在界面处提高了CuSCN空穴迁移率,而且由AFM和GIWAXS中可以得出Y6的聚集增强与结晶性提高的结论。长程有序性增加促进了Y6内部的电荷传输,实现了更高的短路电流密度。

(3)基于宽带隙p型无机给体与近红外吸收受体制备活性层的策略,为半透明有机太阳能电池的发展拓宽了思路。

参考文献:

[1] Li Y. Molecular design of photovoltaic materials for polymer solar cells: toward suitable electronic energy levels and broad absorption[J]. Accounts of Chemical Research, 2011, 45: 723-733.

[2] Wang J, Xue P, Jiang Y, *et al*. The principles, design and applications of fused-ring electron acceptors[J]. Nature Reviews Chemistry, 2022, 6: 614-634.

[3] Guan S, Li Y, Xu C, *et al*. Self-assembled interlayer enables high-performance organic photovoltaics with power conversion efficiency exceeding 20% [J]. Advanced Materials, 2024, 36: 2400342.

[4] Yu H, Wang J, Zhou Q, *et al*. Semi- transparent organic photovoltaics[J]. Chemical Society Reviews, 2023, 52: 4132-4148.

[5] Guan S, Li Y, Yan K, *et al*. Balancing the selective absorption and photon-to-electron conversion for semitransparent organic photovoltaics with 5.0% light-utilization efficiency[J]. Advanced Materials, 2022, 34: 2205844.

[6] Jing J, Dong S, Zhang K, *et al*. Semitransparent organic solar cells with efficiency surpassing 15% [J]. Advanced Energy Materials, 2022, 12: 2200453.

[7] Cheng H W, Zhao Y, Yang Y. Toward high- performance semitransparent organic photovoltaics with narrow- bandgap donors and non- fullerene acceptors[J]. Advanced Energy Materials, 2021, 12: 2102908.

[8] Yuan J, Zhang Y, Zhou L, *et al*. Single-junction organic solar cell with over 15% efficiency using fused-ring acceptor with electron-deficient core[J]. Joule, 2019, 3: 1140-1151.

[9] Renshaw C K, Forrest S R. Excited state and charge dynamics of hybrid organic/inorganic heterojunctions. I. Theory[J]. Physical Review B, 2014, 90: 045302.

[10] Eisner F, Foot G, Yan J, *et al*. Emissive charge-transfer states at hybrid inorganic/organic heterojunctions enable low non-radiative recombination and high-performance photodetectors[J]. Advanced Materials, 2021, 34: 2104654.

[11] Malliaras G G, Salem J R, Brock P J, *et al*. Electrical characteristics and efficiency of single-layer organic light-emitting diodes[J]. Physical Review B, 1998, 58: 13411-13414.

[12] Worakajit P, Kidkhunthod P, Thanasarnsurapong T, *et al*. Origin of hole-trapping states in solution-processed copper(I) thiocyanate and defect-healing by I2 doping[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33: 2209504.

[13] Price M B, Hume P A, Ilina A, *et al*. Free charge photogeneration in a single component high photovoltaic efficiency organic semiconductor[J]. Nature Communications, 2022, 13: 2827.

[14] Koster L J A, Mihailetchi V D, Ramaker R, *et al*. Light intensity dependence of open-circuit voltage of polymer:fullerene solar cells[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86: 123509.

[15] Koster L J A, Kemerink M, Wienk M M, *et al*. Quantifying bimolecular recombination losses in organic bulk heterojunction solar cells[J]. Advanced Materials, 2011, 23: 1670-1674.

Semitransparent Organic Photovoltaics Based on Inorganic-Organic Macromolecular Heterojunction

Xue Yan, Hongxiang Li, Yingyue Hu, Cenqi Yan, Jiayu Wang, Pei Cheng

(*College of Polymer Science and Engineering, State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

ABSTRACT: Semitransparent organic photovoltaics with a bilayer heterojunction structure was prepared using the wide bandgap p-type inorganic semiconductor donor copper(I) thiocyanate (CuSCN) and macromolecular acceptor material Y6. The device performance of the active layer prepared using CuSCN and Y6 is relatively low. Therefore, 1,8-diiodooctane (DIO) was introduced into the active layer in the form of surface treatment and additives to improve hole mobility of CuSCN, optimize morphology of Y6 and thereby enhance the performance of the semitransparent organic photovoltaics. Finally, the semitransparent organic photovoltaics based on the active layer with DIO exhibit a maximum short-circuit current density of 7.48 mA/cm^2 and power conversion efficiency of 3.37%, significantly higher than the device based on CuSCN/Y6 (5.40 mA/cm^2, 2.62%).

Keywords: organic photovoltaics; semitransparent; inorganic; macromolecular heterojunction