

引用本文: 秦灏, 李光辉, 陈永胜. 有机光电探测器响应度的非线性调控与性能优化研究 [J]. 离子交换与吸附, 2026, 42(3): 206-215.

Citation: QIN Hao, LI Guang-hui, CHEN Yong-sheng. Study on Nonlinear Responsivity Modulation and Performance Optimization of Organic Photodetectors [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2026, 42(3): 206-215.

文章编号: 1001-5493(2026)03-0206-10

DOI: 10.16026/j.cnki.ica.2025070054

有机光电探测器响应度的非线性调控与性能优化研究*

秦灏, 李光辉**, 陈永胜

(南开大学化学学院, 高分子化学研究所, 功能高分子材料教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 随着光谱信息在环境监测、生物医学诊断和智能终端等领域的应用日益广泛, 微型化、高性能光谱仪的研发成为研究热点。计算光谱重构型光谱仪为突破传统光谱仪在体积与精度上的限制提供了有效途径, 而具有高响应度及可调非线性响应特性的光电探测器正是实现该技术的核心器件。文章构建了一种基于聚(3-己基噻吩)(P3HT)和[6,6]-苯基-C₇₁-丁酸甲酯(PC₇₁BM)本体异质结的有机光电探测器(OPD)。通过系统调控活性层厚度、器件结构、给受体比例及电子传输层组成, 显著提升了器件的响应度与非线性响应能力。在自驱动模式及偏压调控下, 所设计的器件表现出良好的非线性响应特性, 峰值响应度高达1.2 A/W, 归一化响应度曲线在多偏压条件下呈现明显的不重合趋势。研究结果为单器件级别的光谱重构提供了坚实的器件基础, 彰显了有机光电器件在微型化、智能化光谱系统中的巨大应用潜力。

关键词: 有机光电探测器, 偏压调控, 非线性调控

中图分类号: TN36 **文献标志码:** A

1 前言

光谱仪作为光学分析的重要工具, 在环境监测^[1-3]、生物医学诊断^[4-6]、目标识别与光谱成像等领域发挥着不可替代的作用^[7]。通过精确探测与解析入射光的波长和强度信息, 可实现对检测目标“光谱指纹”的有效识别^[8]。随着微电子技术的飞速发展和人工智能时代的到来, 智能消费电子、可穿戴设备、无人系统及自动化检测设备等对光谱仪的微型化、智能化发展提出了更高要求^[9,10]。然而, 传统光谱仪主要依赖光栅、干涉仪等复杂的光学元件实现光谱分离, 并利用光电探测器及阵列完成分光后光强的检测。尽管此类光谱仪具有较高的精度与分辨率, 但存在体积庞大、结构复杂等缺点, 严重制约

了其在上述新兴领域的广泛应用^[11-13]。同时, 传统光谱仪通常配备长光路、机械可动部件及外部校准元件(如余弦校正器、积分球), 导致系统体积难以压缩, 不仅增加了设备成本和系统复杂度, 还严重制约其在便携性集成电子系统中的应用^[11,13]。

近年来, 随着人工智能和信息处理技术的发展, 计算重构光谱作为一种新兴手段被提出, 并受到广泛关注^[9]。该方法并非依赖传统的波长分离元件, 而是通过设计具有特定响应特性的探测系统并结合数学算法, 从少量输出信号中反推出入射光谱, 有效突破了传统光谱仪在结构尺寸与检测精度上的限制, 为光谱仪的微型化提供了可行路径^[14]。在实际设计中, 计算光谱系统的关键在于构建一组对波长具有显著区

* 收稿日期: 2025-07-09

基金项目: 国家重点研发项目(项目号 2022YFB4200400)。

作者简介: 秦灏(2000—), 硕士研究生。

**通信作者: 李光辉, E-mail: ghli1127@nankai.edu.cn。

分能力的响应函数^[15]。理想状态下，各函数之间需具有一定的非线性差异，以提高算法的重构精度。这也对器件的响应调控能力提出了新的要求，其中如何构建稳定且可调节的响应函数库，成为系统设计的核心难题。

目前，实现器件非线性响应主要包括两大路径：(1) 构建具有不同波长响应的光电探测器阵列结构，如基于纳米线、钙钛矿或有机光电材料制备的探测器阵列^[15-17]；(2) 基于单个器件实现响应特性的动态调控，例如通过调节偏压、栅压或光谱调配等方式，使同一器件在不同操作条件下输出不同的响应曲线，进而获得响应度矩阵^[14, 18, 19]。从器件集成度和性能潜力角度来看，基于单个探测器单元实现光谱重构的策略具有显著优势：一方面，该策略可大幅简化器件结构、缩减尺寸，获得结构更紧凑、集成度更高的器件；另一方面，便于构建高分辨率二维阵列，可应用于光谱成像等复杂场景，为未知光谱的成像分析提供可能。

有机光电探测器 (OPD) 凭借优异的柔性加工性能、可溶液处理特性、光谱响应可调和柔性电子系统的高度兼容性，已成为最具发展前景的新型光电探测器件^[20-22]。其中，基于本体异质结 (BHJ) 结构的二极管型 OPD，通常由电子给体 (D) 材料和受体 (A) 材料共混制备，具有响应速度快、灵敏度高、结构简单及易于大面积低成本制备等优势。近年来，在非富勒烯受体 (NFA) 材料尤其是近红外 NFA 材料快速发展的推动下，OPD 在光谱探测范围、响应度、比探测率、线性动态范围等关键性能指标上已与部分无机探测器比肩，甚至实现超越，展现出巨大的商业化应用潜力^[23-25]。更为关键的是，OPD 的响应度高度可调，通过优化器件结构、改变给受体材料类型与配比、引入功能界面层等方式，均可在不同程度上调控器件的光谱响应。这种材料可设计性和器件调控能力，为实现器件层面的非线性响应奠定了坚实基础^[26]。

本研究以聚 (3-己基噻吩) (P3HT) 与 [6,6]-苯基-C₇₀-丁酸甲酯 (PC₇₁BM) 为有机活性材料，制备了结构稳定、性能可调的 OPD，并围绕器件结构、电子给体与受体材料配比、界面层等关键要素展开了系统研究，成功在不同偏压条件下实现了器件响应度的非线性调控。进一步通

过施加不同外加偏压，在单个器件上完成响应度的动态调节，从而使器件在不同波长下呈现出非线性响应特性。该研究为构建基于单器件的有机光谱重构芯片提供了有力的器件支持，展示了以器件物理调控实现光谱仪微型化与智能化的新路径。结合有机电子器件的柔性可集成优势，本研究为光谱仪的微型化、阵列化及智能系统集成提供了新的技术方案。

2 实验部分

2.1 实验材料

主要材料：聚合物给体 P3HT (纯度 98%) 购自 Solarmer Material (北京) 股份有限公司；受体 PC₇₁BM (纯度 99%) 购自 Libra Technology 有限公司；氯苯 (分析纯)、氯仿 (分析纯)、2-甲氧基乙醇 (分析纯)、乙醇胺 (分析纯)、氯苯 (分析纯)、DIO (分析纯)、Zn (CH₃COO)₂ (纯度 99.5%) 均购自 Sigma-Aldrich 公司；PFN-Br (纯度 99%) 和 PEIE (纯度 99%) 购自 eFlexPV 有限公司。本研究所用其他试剂和化学品均采购自商业供应商，无须进一步纯化即可直接使用；氧化铟锡 (ITO)/玻璃透明电极购自辽宁优选新能源科技有限公司。

2.2 实验仪器

主要仪器见表 1。

表1 仪器清单。
Table 1 Instrument list.

实验仪器	型号及厂家
EQE 测量系统	QE-R 太阳能电池光谱响应测量系统 (光焱科技有限公司)
光学轮廓仪	PSM-1000 (三丰公司)
紫外线臭氧净化器	UVO Cleaner Model No.42-220 (杰利特公司)

2.3 器件制备

器件结构分为两种：正向器件结构为玻璃基底/ITO/空穴传输层 (HTL)/活性层/电子传输层 (ETL)/银电极；反向器件结构为玻璃基底/ITO/ETL/活性层/HTL/银电极。首先，采用导电玻璃清洗剂、去离子水、丙酮、异丙醇依次对涂覆 ITO 的玻璃基底进行浸泡，并超声处理 15 min，

彻底清洗玻璃基板；其次，用氮气吹干ITO/玻璃基底表面的溶剂，再对其进行15 min紫外臭氧处理，以改善基底表面润湿性，处理完成后进行界面层的制备。

HTL与ETL的制备工艺如下：PEDOT:PSS HTL，采用旋涂方式在ITO/玻璃基底上涂覆PEDOT与PSS体积比为1:1的水溶液，旋涂转速为4300 r/min，时间为30 s，随后置于160 °C热台上退火20 min；ZnO ETL，在ITO基板上旋涂醋酸锌溶液(40 mg/mL，溶于2-甲氧基乙醇，添加质量分数为0.5%的乙醇胺)，旋涂转速为3000 r/min，时间为30 s，随后置于200 °C热台上退火50 min；PFB-Br ETL，在基板上旋涂PFN-Br溶液(0.5 mg/mL，溶于甲醇)，旋涂转速为5000 r/min，时间为30 s；PEIE ETL，在基板上旋涂PEIE溶液(体积比为1%，溶于2-甲氧基乙醇)，旋涂转速为5000 r/min，时间为60 s，随后置于110 °C热台上退火10 min。界面层旋涂完成后，将基板转移至氮气氛围的手套箱内，进行活性层的制备。

给体受体比例调控流程如下：在具有ZnO/PFN-Br ETL的ITO/玻璃基底上，以1000 r/min的转速旋涂P3HT浓度为40 mg/mL、P3HT与PC₇₁BM质量比为100:1的二氯苯溶液，随后将基板置于150 °C热台上退火10 min；非PM型器件直接在基板上旋涂P3HT:PC₇₁BM二氯苯溶液，再置于150 °C热台上退火10 min。活性层制备完成后，继续开展上界面层的制备。

正向器件在活性层上旋涂PDINO溶液(1 mg/mL，溶于甲醇)，得到PDINO ETL；反向器件通过真空气相沉积设备蒸镀3 nm厚的MoO_x层作为HTL。最后，所有器件均通过真空气相沉积设备蒸镀100 nm银作为电极，电极面积为4 mm²。

3 表征和测试

器件响应度测试：选用配备标准硅光电二极管的QE-R系统，在300~800 nm波长范围内测试器件的光响应度。首先，采用标准硅电池对测试系统的氙灯光源进行校准，通过单色仪将氙灯发出的白光转换为单色光，调节单色仪改变输出波长，记录标准硅电池在不同波长下的光电流，结合已知的标准硅电池响应度曲线，

完成测试系统的光谱校正。校准完成后进入测量阶段，通过QE-R系统对器件施加偏压，同时利用氙灯和单色仪生成特定波长的单色光照射器件表面，测量其在不同波长下的光电流响应。器件的响应度 R 可由式(1)计算：

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{in}} \quad (1)$$

式中： I_{ph} 为器件在特定波长下产生的光电流； P_{in} 为入射光功率。

4 结果与讨论

为探究OPD响应度的非线性调控规律，本研究从活性层厚度、器件结构、给体与受体配比、界面层4个核心维度，对器件性能进行系统优化，所用器件结构如图1(a)~(b)所示。活性层选用P3HT与PC₇₁BM构成的混合体系，其分子结构及归一化吸收光谱如图1(c)~(f)所示。

4.1 活性层厚度调控

在OPD中，活性层厚度在调控器件性能方面起着关键作用，不仅直接决定入射光的吸收效率，还影响光生载流子的生成、迁移、复合与收集过程，进而影响器件的光电性能^[27]。通过调节有机活性材料的浓度与旋涂时间，可精准调控活性层厚度。本研究首先以PEDOT:PSS为HTL、PDINO为ETL，构建正向结构OPD。活性层材料选用P3HT:PC₇₁BM(质量比1:1)，P3HT浓度为20 mg/mL，溶剂为二氯苯，旋涂转速为1000 r/min，时间为120 s。结果显示，该器件在外加偏压作用下，响应度随偏压升高而增强(图2(a))；归一化后的响应度光谱表明(图2(b))，尽管器件存在一定程度的非线性响应，但响应度变化幅度较小且绝对值较低，难以满足高精度光谱重构对高非线性响应与高响应度的要求。

提高活性层厚度可同步增强光吸收效率与陷阱辅助增益效应，进而提升器件响应度及非线性响应特性。本研究通过调控活性层旋涂时间和提高活性层浓度，进一步提升活性层厚度。实验表明，缩短旋涂时间至30 s(浓度保持20 mg/mL)，可有效增加薄膜厚度。在自驱动模式下，所得器件的响应度达到0.095 A/W，与基准薄膜器件相当；当偏压升至-5 V时，响应度提升至0.26 A/W，

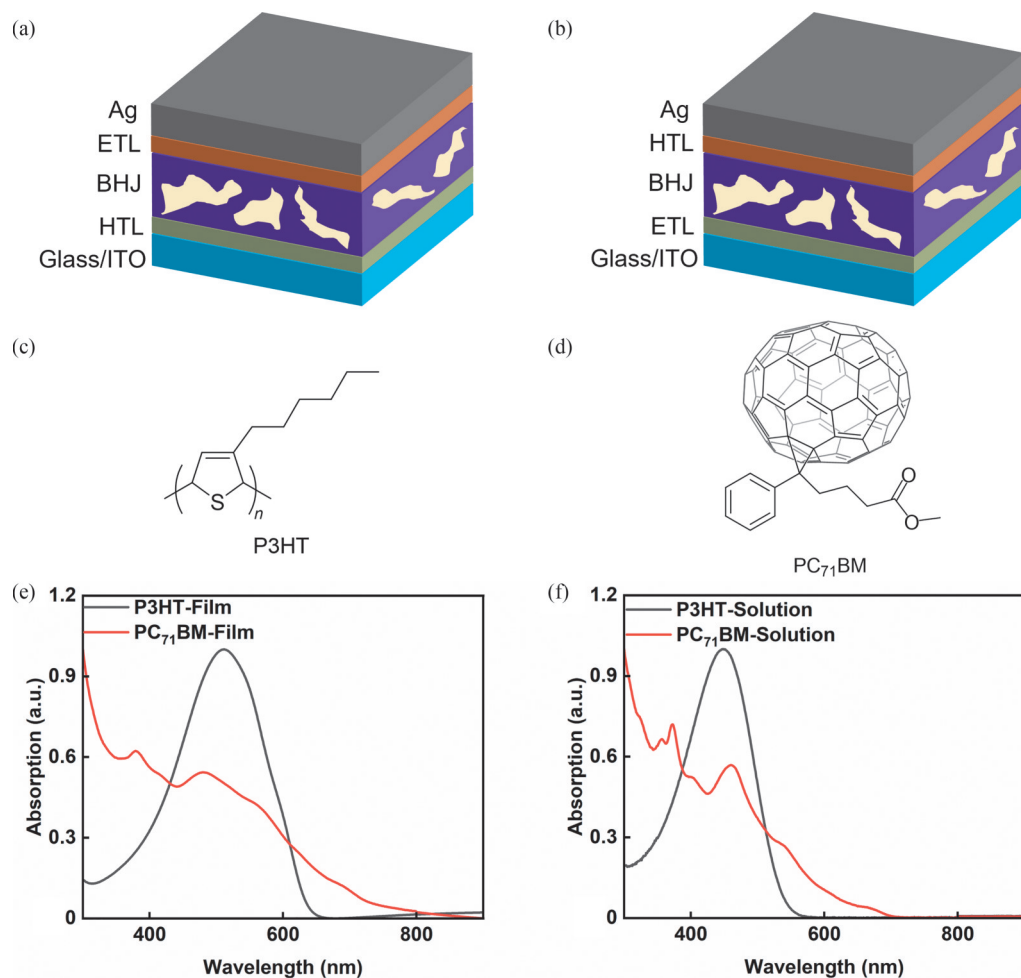


图1 正常器件 (a) 和反向器件 (b) 的结构示意; P3HT (c) 和 PC₇₁BM (d) 的化学结构; P3HT 和 PC₇₁BM 的标准化薄膜吸收曲线 (e) 与溶液吸收曲线 (f)。

Figure 1 Schematic structure of normal device (a) and inverted device (b) chemical structure of P3HT (c) and PC₇₁BM (d); Normalized film absorption profiles (e) and solution absorption profiles (f) of P3HT and PC₇₁BM.

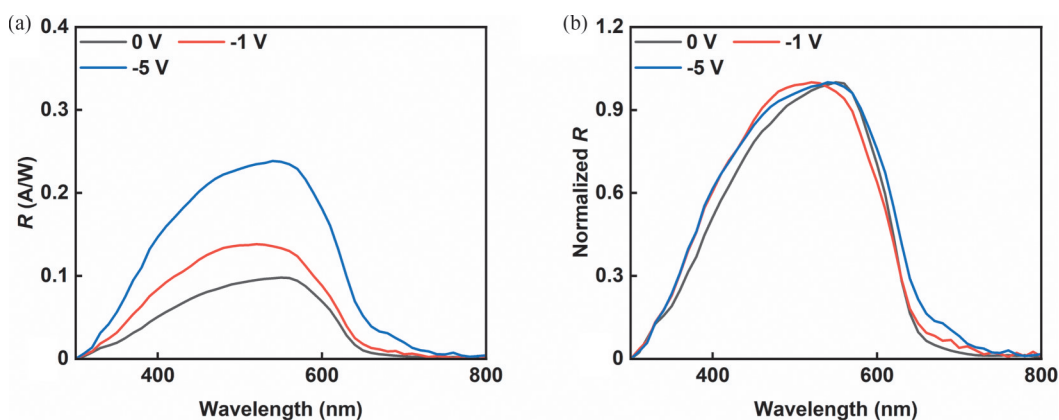


图2 采用 P3HT 浓度为 20 mg/mL、P3HT 与 PC₇₁BM 质量比为 1 : 1 的混合溶液以 1000 r/min 转速进行 120 s 涂覆操作所制备正常器件的响应度 (a) 和归一化响应度 (b)。

Figure 2 The response sensitivity (a) and normalized response sensitivity (b) of the normal device prepared by using a 20 mg/mL P3HT solution and a P3HT-to-PC₇₁BM mass ratio of 1 : 1, and conducting a 120 s coating operation at a rotational speed of 1000 r/min.

较基准薄膜器件提升约10%。尤为关键的是,不同偏压下的归一化响应度光谱存在明显的非

重合现象,表明器件非线性响应特性显著提升。实验结果见图3。

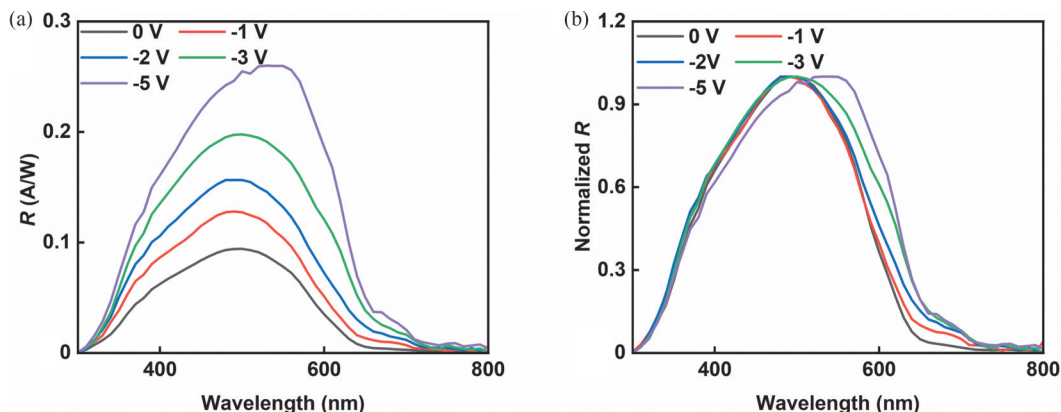


图3 采用P3HT浓度为20 mg/mL、P3HT与PC₇₁BM质量比为1:1的混合溶液以1000 r/min转速进行30 s涂覆操作所制备正常器件的响应度(a)和归一化响应度(b)。

Figure 3 The response sensitivity (a) and normalized response sensitivity (b) of the normal device prepared by using a 20 mg/mL P3HT solution and a P3HT-to-PC₇₁BM mass ratio of 1:1, and conducting a 30 s coating operation at a rotational speed of 1000 r/min.

在保持给体与受体质量比1:1不变的前提下,将活性层溶液总浓度提升至40 mg/mL,同时降低旋涂转速至500 r/min,以进一步增加活性层厚度。在此条件下,器件在自驱动模式下的峰值响应度可达0.24 A/W;当偏压为-4 V时,

峰值响应度进一步提升至0.48 A/W(图4(a));不同偏压下,归一化响应度曲线(图4(b))呈现明显的不重合趋势,进一步验证该器件在外加电场调控下具有优异的非线性响应特性,为光谱重构提供了可行的器件基础。

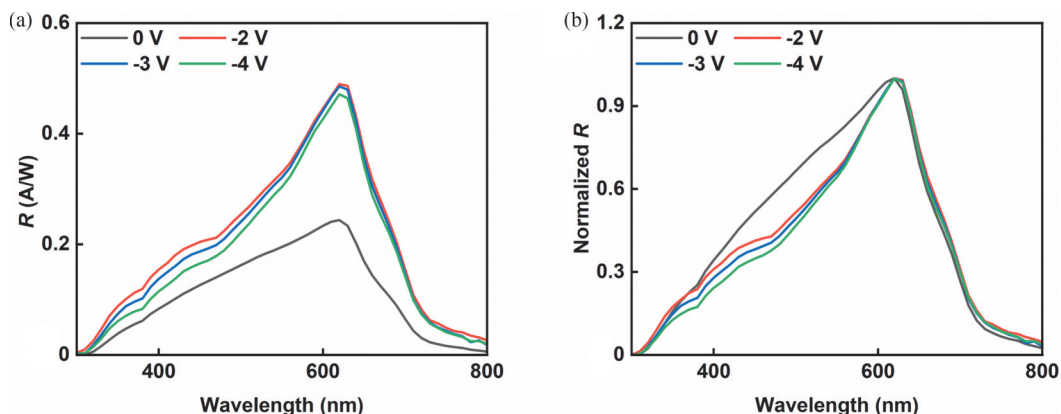


图4 采用P3HT浓度为40 mg/mL、P3HT与PC₇₁BM质量比为1:1的混合溶液以500 r/min转速进行30 s涂覆操作所制备正常器件的响应度(a)和标准化响应度(b)。

Figure 4 The response sensitivity (a) and normalized response sensitivity (b) of the normal device prepared by using a 40 mg/mL P3HT solution and a P3HT-to-PC₇₁BM mass ratio of 1:1, and conducting a 30 s coating operation at a rotational speed of 500 r/min.

4.2 器件结构优化

除活性层厚度外,器件结构设计也对OPD的光电性能具有显著影响。正向与反向结构在光场分布、电荷分离与收集效率等方面存在显著差异,会影响器件的响应度与调控能力^[28]。

为进一步提高器件性能,本研究采用ZnO/PFN-Br作为ETL,设计并制备了反向器件结构的OPD。如图5(a)所示,该反向器件在自驱动模式下峰值响应度为0.30 A/W,较正向结构提升约50%。更重要的是,通过归一化不同偏压下

的响应度曲线, 反向结构器件曲线呈现明显的非重合性, 表现出较强的偏压调控能力及非线性响应特性, 如图 5(b) 所示。该结果表明, 反

向器件结构可有效促进电荷选择性提取与偏压响应调制, 为高性能光谱重构芯片提供了更优的器件构型。

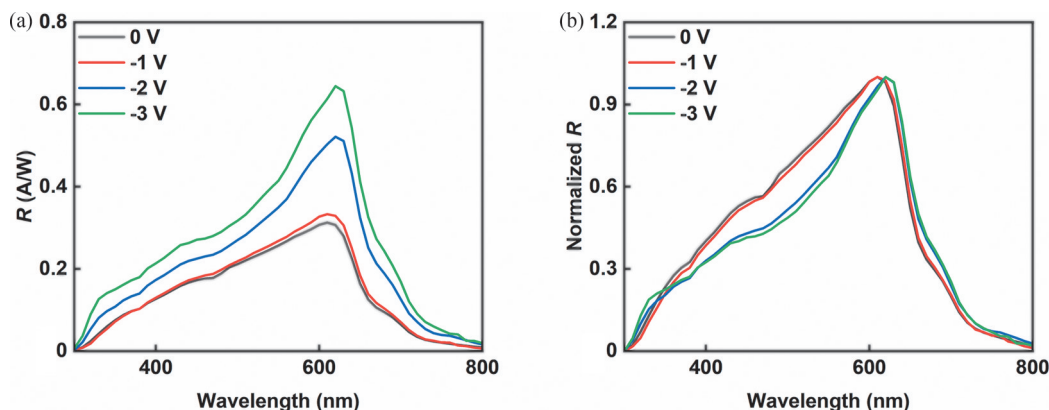


图5 采用P3HT浓度为40 mg/mL、P3HT与PC₇₁BM质量比为1:1的混合溶液,以ZnO/PFN-Br为ETL,在500 r/min转速下进行30 s涂覆操作所制备倒置器件的响应度(a)和归一化响应度(b)。

Figure 5 The responsivity (a) and normalized responsivity (b) of the inverted device prepared by coating with a mixed solution of P3HT concentration of 40 mg/mL and a mass ratio of P3HT to PC₇₁BM of 1:1, using ZnO/PFN-Br as the electron transport layer at a rotational speed of 500 r/min for 30 s.

4.3 给体与受体比例调控

在OPD中,活性层中电子给体与受体材料的质量比对器件的光电性能具有决定性影响。调控给受体材料配比可显著改变载流子生成、迁移路径及陷阱态分布,从而调节器件响应度与非线性特性。为实现响应度的可控,本研究制备了具有光电倍增效应的OPD,通过施加外加偏压调控其响应行为。如图6所示,当活性层中P3HT与PC₇₁BM质量比为100:1时,器件在600 nm波长处表现出较高的响应度,归因于

P3HT在该波段的强吸收特性;随着反向偏压从-3 V增大至-5 V,器件的响应度显著提升,呈现出典型的光电倍增效应。该效应主要源于活性层中电子与空穴载流子迁移率之间的不对称性,引发载流子积累并增强电荷传输效应^[29]。然而,对不同偏压下的响应度曲线进行归一化处理后发现,器件在550~660 nm波段内的光谱响应度高度重合,存在较强的线性相关性,限制了其在基于非线性响应的光谱重构型系统中的应用。由此可见,该配比虽能提升器件响应度,但调

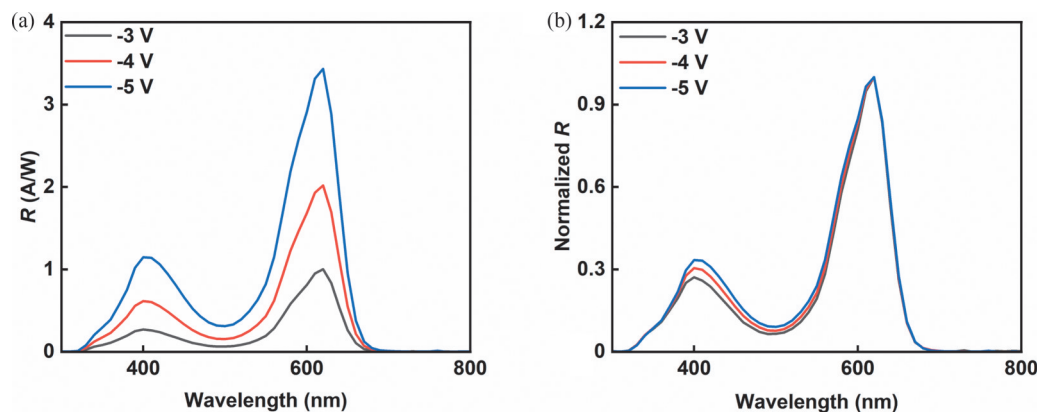


图6 采用P3HT浓度为40 mg/mL、P3HT与PC₇₁BM质量比为100:1的混合溶液,以ZnO/PFN-Br为ETL,在500 r/min转速下进行30 s涂覆操作所制备倒置器件的响应度(a)和归一化响应度(b)。

Figure 6 The responsivity (a) and normalized responsivity (b) of the inverted device prepared by using ZnO/PFN-Br as the electron transport layer in a mixed solution with P3HT concentration of 40 mg/mL and P3HT to PC₇₁BM mass ratio of 100:1 at a speed of 500 r/min for 30 s coating operation.

控灵敏度不足,难以构建具有强非线性响应的器件体系。

4.4 界面层调控

界面层在 OPD 中承担着载流子提取、界面能级匹配、复合抑制等关键作用,其性能直接影响器件内建电场强度与给受体分布,进而决定器件的光电响应特性与非线性调控能力。本研究系统探究了 PEIE、ZnO 和 PFNBr 和 3 种 ETL 材料在反向结构器件中的调控效果。

以 PEIE 为 ETL 制备器件,活性层中给体与受体质量比为 1:1,旋涂转速为 500 r/min,时间为 30 s。如图 7(a) 所示,在自驱动模式下,器件的整体响应度偏低 (<0.05 A/W); 在 -2 V 偏压下,器件的峰值响应度虽提升至 0.35 A/W,但在 -1~-2 V 区间内响应度变化极小,已趋近饱和,限制了偏压对响应的调控深度。对该器件响应度进行归一化处理后发现,响应度虽呈现一定的非线性相关性,但调控范围有限,如图 7(b) 所示。

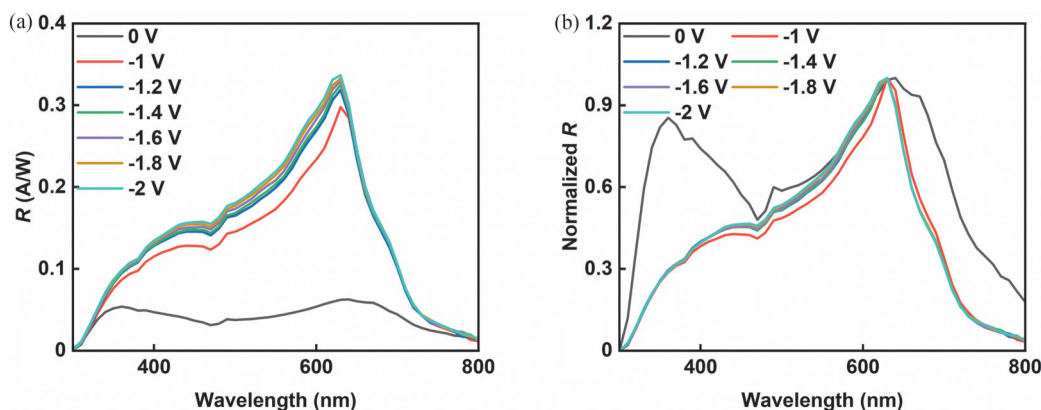


图7 采用 P3HT 浓度为 40 mg/mL、P3HT 与 PC₇₁BM 质量比为 1:1 的混合溶液,以 PEIE 为 ETL,在 500 r/min 转速下进行 30 s 涂覆操作所制备倒置器件的响应度 (a) 和归一化响应度 (b)。

Figure 7 Responsivity (a) and normalized responsivity (b) of the inverted device prepared by using a mixture of P3HT concentration of 40 mg/mL and P3HT to PC₇₁BM mass ratio of 1:1, using PEIE as electron transport layer for 30 s coating operation at 500 r/min speed.

采用溶胶-凝胶法制备 ZnO ETL,可有效提高器件性能。与以 PEIE 为 ETL 的器件相比,该器件的响应度显著提升,自驱动模式下的峰值响应度达到 0.1 A/W。随着偏压升高,器件响应

度呈上升趋势,在 -3 V 偏压下峰值响应度达到 0.4 A/W,且未出现饱和趋势,如图 8(a) 所示;归一化响应度在不同偏压下呈现明显的不重合性,证明器件具有良好的非线性调控能力,如

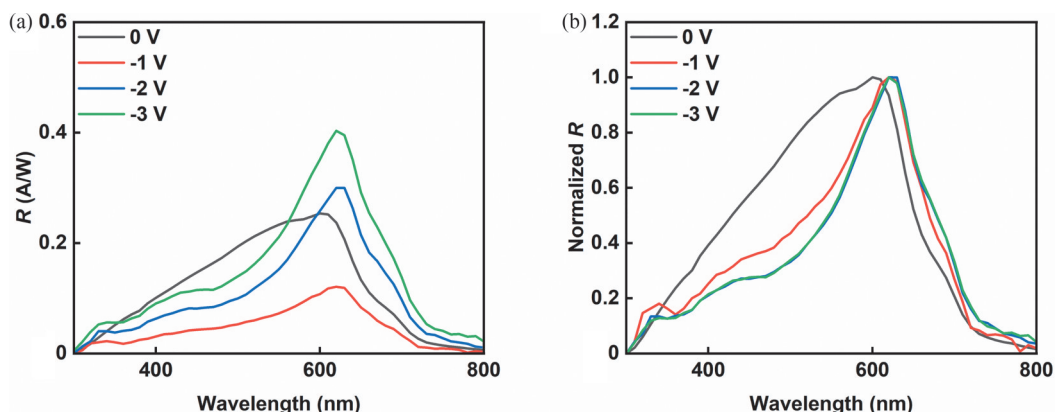


图8 采用 P3HT 浓度为 40 mg/mL、P3HT 与 PC₇₁BM 质量比为 1:1 的混合溶液,以 ZnO 为 ETL,在 500 r/min 转速下进行 30 s 涂覆操作所制备倒置器件的响应度 (a) 和归一化响应度 (b)。

Figure 8 The responsivity (a) and normalized responsivity (b) of the inverted device prepared by using ZnO as the electron transport layer in a mixed solution with P3HT concentration of 40 mg/mL and P3HT to PC₇₁BM mass ratio of 1:1 at a speed of 500 r/min for 30 s.

图8(b)所示。

为进一步提高器件的响应度, 增强器件不同偏压下响应度之间的非线性相关性, 本研究以 PNF-Br 为 ETL 制备反向器件。如图9所示, 在自驱动模式下, OPD 的峰值响应度达到 0.3 A/W,

-3 V 偏压下的峰值响应度达到 1.2 A/W, 为本研究中非线性响应能力最优的器件; 不同偏压下归一化曲线差异显著, 展现出优异的非线性响应能力。兼具高响应度与高非线性特性, 使该器件在后续光谱重构系统中具有极大的应用潜力。

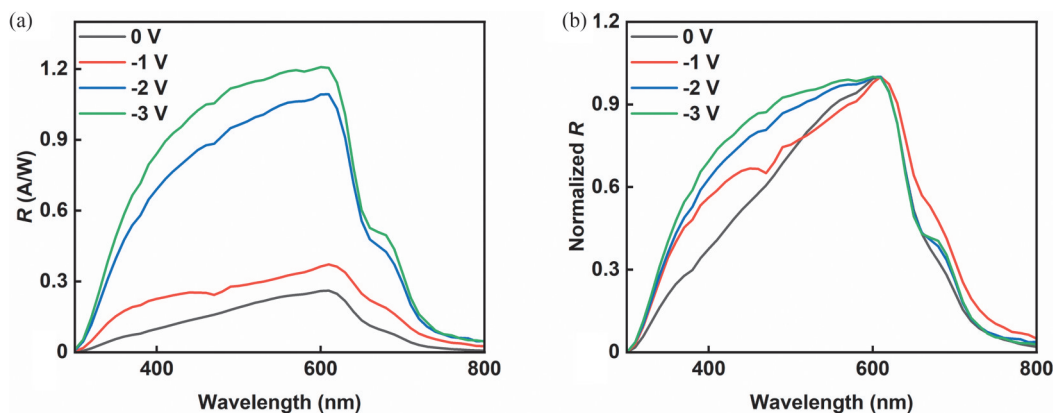


图9 采用 P3HT 浓度为 40 mg/mL、P3HT 与 PC₇₁BM 质量比为 1 : 1 的混合溶液, 以 PNF-Br 为 ETL, 在 500 r/min 转速下进行 30 s 涂覆操作所制备倒置器件的响应度 (a) 和归一化响应度 (b)。

Figure 9 Responsivity (a) and normalized responsivity (b) of the inverted device prepared with P3HT concentration of 40 mg/mL and P3HT to PC₇₁BM mass ratio of 1 : 1, using PNF-Br as electron transport layer for 30 s coating operation at 500 r/min speed.

在利用偏压对响应度进行非线性调控的过程中, 器件响应度的重现性非常重要。为验证器件在不同偏压下的响应度稳定性, 本研究首先将器件偏压从 -1 V 逐步增至 -5 V, 再从 -5 V 逐步降至 -1 V。在偏压循环前后, 对相同偏压下的器件响应度进行测试, 结果如图10所示, 器件响应度曲线重合度极高, 表明其在偏压下具有良好的响应重现性, 可满足后续光谱重构系统的需求。

5 结 论

本研究提出了一种面向计算光谱重构的高性能 OPD 设计策略, 通过调控活性层厚度、优化器件结构、调整给受体配比、引入不同 ETL 材料, 系统实现了 OPD 响应度的非线性调控。在最佳条件下, 器件在 -3 V 偏压下峰值响应度高达 1.2 A/W, 同时在不同偏压下展现出显著的非线性响应特性, 表明该器件可在低功耗、紧凑结构下完成高维光谱信息重构。本研究为基于单一有机探测器单元的微型化光谱系统提供

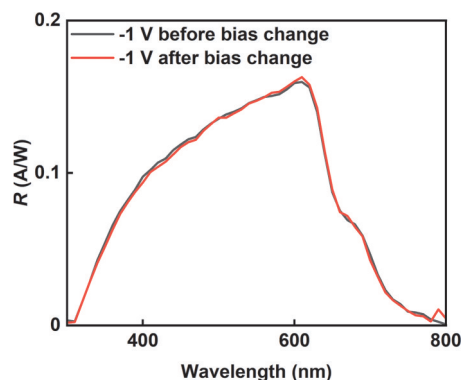


图10 在相同偏压电压下, 采用 P3HT 浓度为 40 mg/mL、P3HT 与 PC₇₁BM 质量比为 1 : 1 的混合溶液, 以 PNF-Br 为 ETL, 在 500 r/min 转速下进行 30 s 涂覆操作所制备器件响应率的可重复性。

Figure 10 Under the same bias voltage, using a mixed solution of P3HT with a concentration of 40 mg/mL and a mass ratio of P3HT to PC₇₁BM of 1 : 1, with PNF-Br as the electron transport layer, and conducting a 30 s coating operation at a rotational speed of 500 r/min, the reproducibility of the response rate of the fabricated device.

了关键器件支持, 也为新一代片上集成智能光谱平台的构建奠定了技术基础。

参考文献

- 1 Wu S, Huang C, Yu L, et al. Optical design and evaluation of an advanced scanning Dyson imaging spectrometer for ocean color [J]. *Optics Express*, **2021**, 29(22) : 36616.
- 2 Shi J, Jiao J N, Lu Y C, et al. Determining spectral groups to distinguish oil emulsions from Sargassum over the Gulf of Mexico using an airborne imaging spectrometer [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **2018**, 146: 251-259.
- 3 Pérez-Ramírez D, Smirnov A, Pinker R T, et al. Precipitable water vapor over oceans from the Maritime Aerosol Network: Evaluation of global models and satellite products under clear sky conditions [J]. *Atmospheric Research*, **2019**, 215: 294-304.
- 4 Wolffenbuttel R F, Wolffenbuttel Hosli T M. Medical apps in need of optical microspectrometers [J]. *Microsystem Technologies*, **2016**, 22(7) : 1549-1555.
- 5 Edwards P, Zhang C J, Zhang B G, et al. Smartphone based optical spectrometer for diffusive reflectance spectroscopic measurement of hemoglobin [J]. *Scientific Reports*, **2017**, 7: 12224.
- 6 Bryan M R, Butt J N, Bucukovski J, et al. Biosensing with silicon nitride microring resonators integrated with an on-chip filter bank spectrometer [J]. *ACS Sensors*, **2023**, 8(2): 739-747.
- 7 Zhu Y, Zhang Z, Qin H, et al. Flexible and high-performance solution-processable single-detector organic spectrometer [J]. *Advanced Materials*, **2025**, 37(33): 2502608.
- 8 Michaelis M, Cupellini L, Mensch C, et al. Tidying up the conformational ensemble of a disordered peptide by computational prediction of spectroscopic fingerprints [J]. *Chemical Science*, **2023**, 14(32): 8483-8496.
- 9 Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cai W W, et al. Miniaturization of optical spectrometers [J]. *Science*, **2021**, 371(6528): eabe0722.
- 10 Xue Q, Yang Y, Ma W K, et al. Advances in miniaturized computational spectrometers [J]. *Advanced Science*, **2024**, 11(47): 2404448.
- 11 Ravindran A, Nirmal D, Prajoon P, et al. Optical grating techniques for MEMS-based spectrometer: A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, **2021**, 21(5): 5645-5655.
- 12 Kwa T A, Wolffenbuttel R F. Integrated grating/detector array fabricated in silicon using micromachining techniques [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, **1992**, 31(1/2/3): 259-266.
- 13 Li H, Peng X Q, Guan C L, et al. Progress in the preparation and characterization of convex blazed gratings for hyper-spectral imaging spectrometer: A review [J]. *Micromachines*, **2022**, 13(10): 1689.
- 14 Deng W J, Zheng Z L, Li J Z, et al. Electrically tunable two-dimensional heterojunctions for miniaturized near-infrared spectrometers [J]. *Nature Communications*, **2022**, 13: 4627.
- 15 Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cui H X, et al. Single-nanowire spectrometers [J]. *Science*, **2019**, 365(6457): 1017-1020.
- 16 Huang C M, Chen Y T, Wang X L, et al. Flexible microspectrometers based on printed perovskite pixels with graded bandgaps [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2023**, 15(5): 7129-7136.
- 17 Hao L, Wang Y Z, Li S Q, et al. Self-adaptive miniaturized spectrometer leveraging wavelength-tunable organic photodetectors for high-resolution spectral sensing [J]. *Advanced Functional Materials*, **2025**, 35(49): 11847.
- 18 Cai G Y, Li Y H, Zhang Y, et al. Compact angle-resolved metasurface spectrometer [J]. *Nature Materials*, **2024**, 23(1): 71-78.
- 19 Guo L Q, Sun H X, Wang M, et al. A single-dot perovskite spectrometer [J]. *Advanced Materials*, **2022**, 34(33) : 2200221.
- 20 Yi J C, Zhang G Y, Yu H, et al. Advantages, challenges and molecular design of different material types used in organic solar cells [J]. *Nature Reviews Materials*, **2024**, 9(1): 46-62.
- 21 Zhang K, Wu J J, Sun C L, et al. The rising promise of organic photodetectors in emerging technologies [J]. *Nature Reviews Materials*, **2025**, 10(7): 487-489.
- 22 Chow P C Y, Someya T. Organic photodetectors for next-generation wearable electronics [J]. *Advanced Materials*, **2020**, 32(15): 1902045.
- 23 Yang D Z, Ma D G. Development of organic semiconductor photodetectors: From mechanism to applications [J]. *Advanced Optical Materials*, **2019**, 7: 1800522.

- 24 Ren H, Chen J D, Li Y Q, et al. Recent progress in organic photodetectors and their applications [J]. *Advanced Science*, **2021**, 8: 2002418.
- 25 Zhu Y, Zhang J, Qin H, et al. High-speed and sensitivity near-infrared organic photodetector achieved by halogen substitution strategy for optical wireless communication [J]. *Applied Physics Letters*, **2024**, 124(6): 061104.
- 26 Zhu Y, Qin H, Guo T T, et al. A universal strategy for narrowband organic photodetectors enabling arbitrary narrow spectrum detection [J]. *Science China Materials*, **2024**, 67(3): 852-862.
- 27 Zhang H, Xiao L G, Zhang Y Y, et al. Fine-tuning thickness-dependent molecular aggregation for enhanced performance in semitransparent organic photovoltaics [J]. *Solar RRL*, **2025**, 9(2): 2400745.
- 28 Kobori T, Fukuda T. Effect of optical intensity distribution on device performances of PTB7-Th: PC₇₁BM-based organic photovoltaic cells [J]. *Organic Electronics*, **2017**, 51: 76-85.
- 29 Zhao Z J, Li C L, Shen L, et al. Photomultiplication type organic photodetectors based on electron tunneling injection [J]. *Nanoscale*, **2020**, 12(2): 1091-1099.

Study on Nonlinear Responsivity Modulation and Performance Optimization of Organic Photodetectors

QIN Hao, LI Guang-hui*, CHEN Yong-sheng

(Institute of Polymer Chemistry, College of Chemistry, Key Laboratory of Functional Polymer Materials, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract With the widespread application of spectral information in fields such as environmental monitoring, biomedical diagnostics, and intelligent terminals, the development of miniaturized, high-performance spectrometers has become a research hotspot. Computational spectral reconstruction-based spectrometers provide an effective approach to overcoming the limitations of traditional spectrometers in terms of size and resolution. High-responsivity photodetectors with tunable nonlinear response characteristics are key to enabling this technology. In this study, an organic photodetector (OPD) based on a bulk heterojunction of poly (3-hexylthiophene) (P3HT) and [6, 6]-phenyl-C₇₁-butyric acid methyl ester (PC₇₁BM) was developed. By systematically tuning the active layer thickness, device architecture, donor-to-acceptor ratio, and electron transport layer composition, the responsivity and nonlinear response characteristics of the device were significantly enhanced. the designed device exhibited pronounced nonlinear response behavior under various bias, with a peak responsivity of up to 1.2 A/W. The normalized responsivity curves under different bias voltages showed evident non-overlapping trends. These results provided a solid device-level foundation for spectral reconstruction using a single detector, demonstrating the great potential of organic photodetectors in miniaturized and intelligent spectroscopic systems.

Keywords Organic photodetector, Bias regulation, Nonlinear regulation

* Corresponding author: LI Guang-hui, E-mail: ghli1127@nankai.edu.cn.