

全真空蒸发法制备 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ 全无机类钙钛矿光电探测器

王宇睿, 陈禹行, 林伟, 姚芷瑶, 王炳权, 姚博*

微机电系统浙江省工程研究中心, 绍兴文理学院数理信息学院, 浙江 绍兴

收稿日期: 2025年4月18日; 录用日期: 2025年5月17日; 发布日期: 2025年5月27日

摘要

光电晶体管是一种三端光电探测器, 由于栅极的放大作用, 通常比光电二极管具有更高的光电流增益。本文采用全真空蒸发法制备了酞菁铜(CuPc)和 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ (CBI)异质结的广谱光电晶体管。由于CuPc和CBI的紫外-可见互补吸收, 该器件在三种不同类型的可见光照明下均表现出优异的性能。实验结果表明, 该有机/钙钛矿异质结活性层结构具有相容性好、工艺简单等特点。同时, 利用钙钛矿材料优越的光吸收特性和异质结界面强激子解离效率, CuPc/CBI-OPT具有比CuPc基准器件更高的光响应性、光敏性、比检出率和更低的工作电压。稳定性测试表明, CuPc/CBI-PT在没有任何封装的情况下在空气中储存360 h后, 在660 nm光照下仍能获得0.73 A/W的光响应性。这表明有机/钙钛矿异质结PT可能是制备高性能光电探测器的良好选择。

关键词

$\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$, 平面异质结, 宽光谱, 稳定性

Preparation of $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ All-Inorganic Perovskite-Like Photodetectors via Full Vacuum Evaporation Technique

Yurui Wang, Yuxing Chen, Wei Lin, Zhiyao Yao, Binqun Wang, Bo Yao*

Zhejiang Engineering Research Center of MEMS, School of Mathematics and Information Science, Shaoxing University, Shaoxing Zhejiang

Received: Apr. 18th, 2025; accepted: May 17th, 2025; published: May 27th, 2025

Abstract

A phototransistor is a three-terminal photodetector that typically exhibits higher photocurrent gain

*通讯作者。

文章引用: 王宇睿, 陈禹行, 林伟, 姚芷瑶, 王炳权, 姚博. 全真空蒸发法制备 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ 全无机类钙钛矿光电探测器[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 501-509. DOI: 10.12677/jsta.2025.133050

compared to a photodiode, attributed to the amplification effect of the gate. In this study, we have successfully fabricated a broad-spectrum phototransistor featuring a copper phthalocyanine (CuPc) and cesium trithioindate ($\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$, CBI) heterojunction via a full vacuum evaporation process. Benefiting from the complementary UV-visible absorption properties of CuPc and CBI, the device demonstrates superior performance under various visible light illumination conditions. Experimental findings indicate that the organic/perovskite-like heterojunction active layer structure possesses excellent compatibility and a straightforward fabrication process. Leveraging the exceptional light absorption capabilities of perovskite-like materials and the efficient exciton dissociation at heterojunction interfaces, the CuPc/CBI phototransistor (CuPc/CBI-PT) achieves enhanced photoresponsivity, sensitivity, specific detection rate, and reduced operating voltage compared to reference CuPc devices. Stability assessments reveal that the CuPc/CBI-PT maintains a photoresponsivity of 0.73 A/W at 660 nm after 360 hours of air exposure without encapsulation. These results suggest that organic/perovskite-like heterojunction phototransistors may serve as a promising candidate for high-performance photodetectors.

Keywords

$\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$, Planar Heterojunction, Phototransistor, Broad Spectral, Stability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光电探测器依据其探测波长的不同,可分为紫外、可见光和红外探测器,他们在民生和军事等众多领域应用非常广泛。在图像传感器中,最重要的部分就是高灵敏度的光电探测器件,其性能决定了图像传感器的成像素质。常见的光电探测器主要有光电二极管(Photodiode)、光电三极管和光敏场效应晶体管(phototransistors, PT)等。在这些光电探测器件中,光敏场效应晶体管利用其跨导放大光电流,兼具有光信号开关和光信号放大的作用,具有高的增益和良好的信噪比,应用前景广阔。

光敏场效应晶体管具有和薄膜场效应晶体管类似的结构,由栅极(Gate)、源极(Source)、漏极(Drain)三个电极以及栅极绝缘层(绝缘栅, Insulated Gate),功能层(Organic active layer)等组成。不同之处在于其功能层选用光敏有机材料制备成膜,因此器件不但具有传统的场效应特性,在光照条件下由于光诱导效应的存在,沟道电流相比于无光照条件下会有明显的放大。从第一个光敏晶体管报道[1]以来,光敏晶体管经过 20 多年的研究,一系列具有高性能的无机化合物[2]、有机小分子[3]、聚合物[4]、量子点[5]、钙钛矿[6]光敏材料相继被合成。还有各种采用平面异质结[7]、体异质结[8]、混合异质结[9]和垂直结构[4]的光敏晶体管被报道,光敏晶体管的性能得到很大提升。

酞菁铜是一种常见的有机小分子共轭光敏层材料,具有较高的空穴迁移率和对可见光高的吸收系数,良好的稳定性,有很多关于酞菁铜光敏晶体管的报道。钙钛矿材料近年来在光电领域的研究非常热门。钙钛矿不仅有着高吸收系数,高载流子迁移率,较长的发光寿命还有着较长的扩散长度,已被运用到了太阳能电池,发光二极管,传感器以及激光等领域。其中全无机卤化物钙钛矿由于采用无机成分替代有机-无机钙钛矿中的有机官能团,具有更好的稳定性。 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ (CBI)是一种全无机卤化物类钙钛矿,它采用 Cs^{3+} 替代有机基团,并用 Bi^{2+} 替代 Pb^{2+} 对环境更加友好。本文结合上述两种功能分子材料的优势,提出基于酞菁铜/CBI 平面异质结的光探测器结构,并采用全真空蒸发法制备所有功能层。与单层酞菁铜参考器件和近期文献报道的可见光探测器性能进行了比较。结果表明,将这种有机/钙钛矿异质结应用于光敏晶体管型光探测器的制备中可以获得很好的性能,是一种不错的方案。

2. 实验

在这项工作中,所有的器件结构均采用如图1所示的底栅顶接触结构。采用n(100)重掺杂硅片($0.03\ \Omega\cdot\text{cm}$)作为衬底,热氧化法生长500 nm SiO_2 作为栅氧化层。碘化铯(CsI , 纯度 > 98%)购买于西安宝莱特光电科技有限公司、碘化铋(BiI_3)购买于梯希爱(上海)化成工业发展有限公司,酞菁铜(纯度 > 98%)购买于梯希爱(上海)化成工业发展有限公司。硅片经过丙酮、乙醇和去离子水反复超洗之后,氮气吹干,并放入等离子清洗机进行15分钟处理,然后立即送去手套箱中。所有有源层均采用真空蒸发法制备,真空度为 $5 \times 10^4\ \text{Pa}$ 。其中酞菁铜50 nm。35 nm的CBI采用双源共蒸发制备。 CsI 和 BiI_3 蒸发,由石英晶振监测,通过调节蒸发功率将两种材料的蒸发速率控制在1:1.1。最后,采用沟道长宽为 $4800\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$ 的叉指状掩模版蒸镀50 nm金作为源漏电极,器件结构如图1。

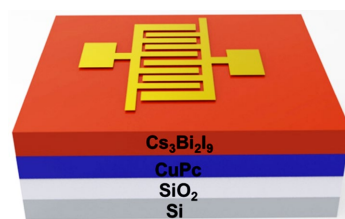


Figure 1. Schematic diagram of device structure
图1. 器件结构示意图

采用 Detax XT 表面轮廓仪测量薄膜厚度,使用帕纳科 Empyrean X 射线衍射仪(X-Ray Diffraction, XRD)在室温下获得样品的 XRD 图样,使用岛津 UV3600 Plus 紫外可见近红外分光光度计测量样品对光的吸收。使用波长为450 nm、660 nm 激光器作为可见光光源,搭配不同透光度的减光片实现不同入射功率并且使用 B1500A 半导体器件测试仪和 Lakeshore TTPX 真空低温探针台测试器件的电学特性。

3. 结果与讨论

如图2(a)所示,衬底为 Si/SiO_2 蒸发得到35 nm的 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ 薄膜 XRD 测试结果可以看出 16.6° 、 22.5° 、 25.1° 和 46.2° 处的衍射峰分别匹配到(004)、(105)、(006)和(209)晶面,与文献报道 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ 的特征峰一[10],其中2q位于 25.1° 的衍射峰最为尖锐,表明样品在(006)晶面择优取向生长程度最高,呈高晶化。图2(b)、图2(c)分别为 Si/SiO_2 衬底和 $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{CuPc}$ 上沉积CBI的表面SEM。显然,CuPc上沉积CBI的晶体尺寸明显小于 SiO_2 衬底的,但也更加的均匀致密。图2(c)样品的SEM照片进一步表明,采用双源共蒸发法在CuPc表面制备的 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ 薄膜均匀有序,连续性较好,有利于载流子的输运。

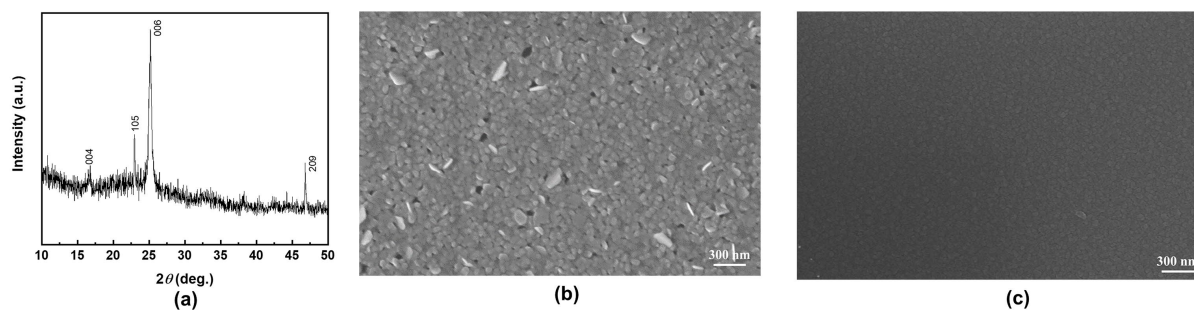


Figure 2. (a) XRD for the evaporation preparation of CBI, (b) SEM for evaporating CBI films, (c) SEM of heterojunction thin films

图2. (a) 蒸发制备CBI的XRD图, (b) 蒸发CBI薄膜的SEM图, (c) 异质结薄膜的SEM图

图3 插图为 CBI 薄膜的 $(\alpha hv)^{1/2}$ 关系。带隙是根据间接带隙的 tac 关系确定的, 以绘制 $h\nu$ vs. $(\alpha hv)^{1/2}$, 并将线性部分外推到 x 轴, 如公式(1)所示。

$$(\alpha hv)^{1/2} = A(h\nu - h_g) \quad (1)$$

其中 α 为吸收系数, $h\nu$ 为光子能量, E_g 为光学带隙, A 为拟合参数。Cs₃Bi₂I₉ 薄膜的带隙为 2.06 eV, 与 前人的报道一致[11]。2 eV 左右的带隙具有合理的吸收系数, 适合于串联太阳能电池和紫外 - 可见光电探测器。

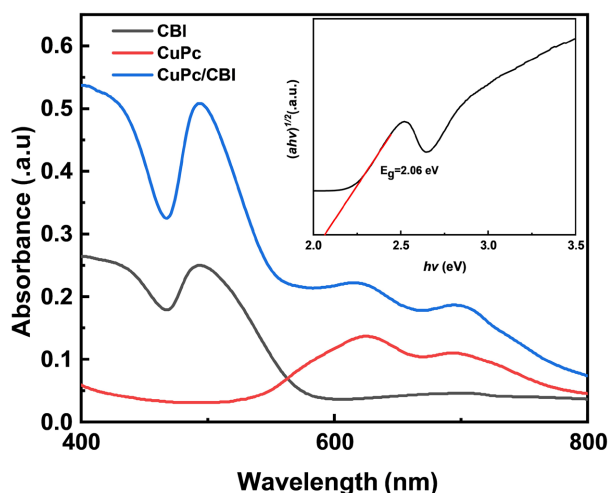


Figure 3. The $h\nu$ vs. $(\alpha hv)^{1/2}$ relationship of CBI and the ultraviolet-visible absorption spectra of its films

图3. CBI 的 $h\nu$ vs. $(\alpha hv)^{1/2}$ 关系及其薄膜的紫外 - 可见吸收光谱

从图3 可见, CuPc 和 CBI 两种材料的光吸收在紫外 - 可见波段是互补的, 这样更有利于制备宽光谱的光探测器。其光吸收波段覆盖了 400 nm~780 nm 整个可见光波段。

图4(a)和图4(b)是两种器件在黑暗下的输出特性, 与 CuPc 单层参考器件相比, 增加 CBI 的异质结器件在相同栅压漏压下的饱和输出电流变小。暗电流被明显抑制, 根据光灵敏度的定义(公式 1), 这对于提高 OPT 的光灵敏度是有益的。异质结器件的场效应迁移率为 $3.83 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 仅为参考器件的 60% ($6.43 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$)。

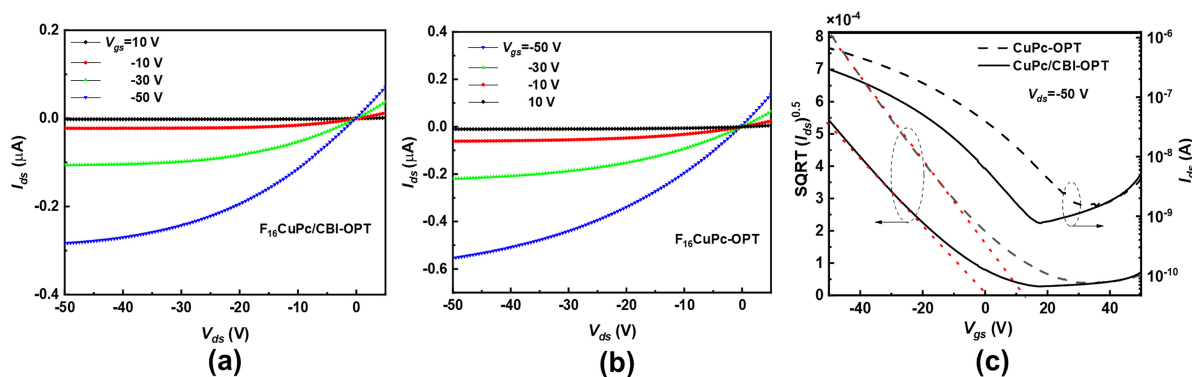


Figure 4. (a) Output characteristics of heterojunction devices, (b) Output characteristics of single-layer CuPc reference devices, (c) Transfer characteristics of heterojunction and single-layer devices

图4. (a) 异质结器件的输出特性, (b) 单层 CuPc 参考器件的输出特性, (c) 异质结和单层器件转移特性

$$I_{ds} = \frac{W}{L} \mu C_i (V_{gs} - V_{th}) V_{ds} \quad (2)$$

图 4(c)是两种器件在黑暗条件下的转移特性。显然，异质结器件拥有更低的暗电流。CuPc 单层器件是耗尽型 MOS，0 栅压下器件沟道已经形成，阈值电压为 11.98 V。而异质结器件的阈值电压向负栅压方向移动，3 V 偏压下即可将器件关断。这也为器件获得高的光灵敏度提供低操作电压条件。

如图 5 所示，能带示意图展示了器件中载流子(空穴)从源极注入到 CBI，需要克服约 0.5 eV 空穴势垒。另外，CBI 的价带顶和 CUPC 的 HOMO 能级间具有 0.4 eV 的能级差。如图 1 所示，器件施加负栅压时，CuPc 薄膜内靠近 SiO₂ 的一侧吸引空穴形成沟道。无论是光电载流子还是从源极注入的载流子，理论上均要穿过 CBI 到 CuPc 沟道层或是从 CuPc 穿过 CBI 再由漏极抽出。因此，1) 上述空穴传输过程中遇到的两个势垒会影响器件负栅压下的输出电流。导致，相同偏压下，异质结器件具有比 CuPc 参考器件更低的饱和暗电流(如图 4 所示)，这有助于提高器件的光/暗电流比。2) 由于光诱导势垒降低效应，光照后，源极/CBI 界面和 CBI/CUPC 界面的势垒会有所降低，这将更有助于光生载流子在异质结器件中的输运。3) CBI/CUPC 异质结不仅拓宽了器件的光敏波段；4) 同时异质结界面形成的电场也有助于激子的解离，提高器件的光电转换效率。我们推测，以上 4 种原因，是 CBI/CUPC 异质结器件获得较好性能可能的原因。

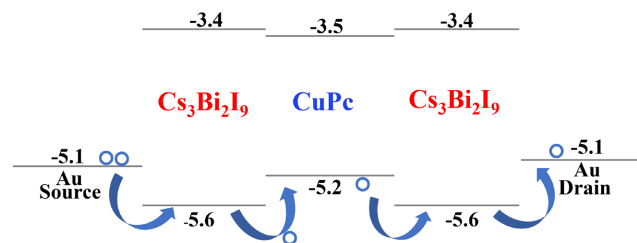


Figure 5. Energy band schematic diagram
图 5. 能带示意图

图 6 是两种器件在不同光源照射下的光输出特性。对于底栅顶接触结构的光敏场效应管(图 1)，光作为光敏晶体管除栅、源、漏极以外的第四个“电极”，可以起到和栅极类似的调控器件输出电流的作用[4][12]。如图 5 所示， $V_{gs} = -50$ V 时，异质结器件无论是 450 nm 或是 660 nm 不同功率光照下都拥有比参考器件更显著的光敏特性。而相同条件下，异质结器件在 450 nm 的光输出电流要大于 660 nm，这是因为 CuPc/CBI 异质结薄膜在 450 nm 光照下有更高的吸收系数(如图 3(b)所示)。而由于酞菁铜薄膜在 450 nm 的吸收要低于 660 nm，所以 CuPc 单层器件对 660 nm 的光照具有略好的光响应。

由图 7 可以看出，CuPc/CBI-OPT 的明暗电流比明显高于 CuPc-OPT。此外，通过比较两种器件在不同栅极电压下的光敏性，我们可以看到 CuPc/CBI-PT 在 450 nm 光照下的 P_{max} 达到 1277% @ $V_{gs} = 13.5$ V，而 CuPc-OPT 的 P_{max} 达到 461% @ 28.0 V。在 532 nm 光照下，CuPc/CBI-PT 的 P_{max} 达到 1077% @ $V_{gs} = 17.5$ V，而 CuPc-OPT 的 P_{max} 达到 300% @ 28.0 V。在 660 nm 光照下，CuPc/CBI-PT 的 P_{max} 达到 910% @ $V_{gs} = 13.5$ V，而 CuPc-OPT 的 P_{max} 达到 277% @ 24.5 V。显然，CuPc/CBI-PT 达到 P_{max} 时的工作电压也明显小于 CuPc-OPT。这表明 CuPc/CBI-OPT 能够在较低的偏置电压下工作。显然，与单层 CuPc-OPT 相比，CuPc/CBI-PT 的光电性能有了很大的提高。我们推测其原因除了由插入的 CBI 在源/漏金电极和 CuPc 之间引入的界面势垒抑制器件的暗电流外，还有光致势垒降低效应。照射后，源漏/CBI 界面和 CBI/CuPc 界面的势垒高度会降低，这将更有利于光生载流子在异质结器件中的输运，从而改善光电流，进一步提高器件的光敏性。

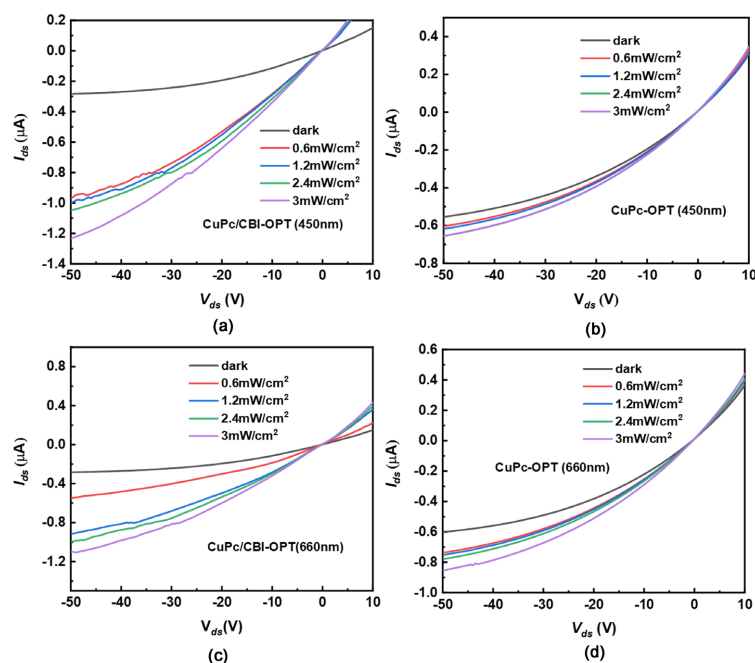


Figure 6. (a) Optical output characteristics of 450 nm heterojunction devices, (b) Optical output characteristics of 450 nm monolayer devices, (c) Optical output characteristics of 660 nm heterojunction devices, (d) Optical output characteristics of 660 nm monolayer devices

图 6. (a) 450 nm 异质结器件光输出特性, (b) 450 nm 单层器件光输出特性, (c) 660 nm 异质结器件光输出特性, (d) 660 nm 单层器件光输出特性

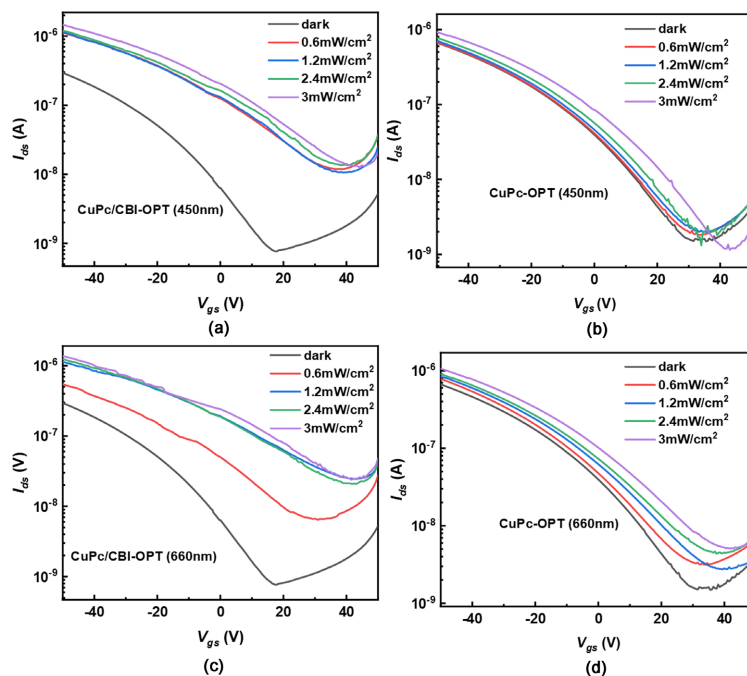


Figure 7. (a) Light transfer characteristics of 450 nm heterojunction devices, (b) Light transfer characteristics of 450 nm monolayer devices, (c) Light transfer characteristics of 660 nm heterojunction devices, (d) Light transfer characteristics of 660 nm monolayer devices

图 7. (a) 450 nm 异质结器件光转移特性, (b) 450 nm 单层器件光转移特性, (c) 660 nm 异质结器件光转移特性, (d) 660 nm 单层器件光转移特性

最后，我们对 CuPc/CBI-PTs 的稳定性进行了 360 小时的监测。如图 8 所示，在 660 nm 光照下，器件的暗电流从最初的 5.6 nA 增加到 6.7 nA，器件在空气中保存 360 h 后(温度 18℃~26℃；湿度为 40%~85%)时，其光响应度响应度 R 仍达到 0.73 A/W (公式 3)，为初始值的 55%，且趋于稳定，表明 CuPc/CBI-PT 具有良好的稳定性。

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{opt}A}$$

(3)

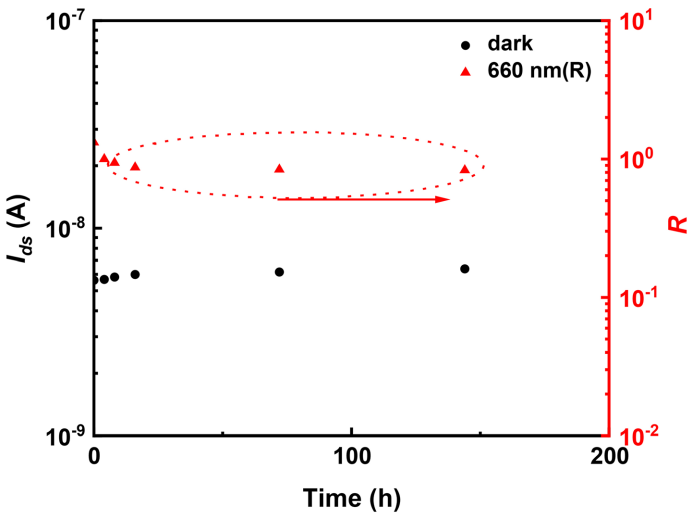


Figure 8. Stability test
图 8. 稳定性测试

最后，从表 1 可以看出，与近年来报道的可见光探测器性能相比，我们认为 CuPc/CBI-PT 的最大 R 和 D^* 已经达到了比较高的水平。

Table 1. Performance parameters of visible PT in recent years
表 1. 近年来可见光 PT 的性能参数

Samples	λ (nm)	$R_{\max}$ (A/W)	Mobility (cm ² /Vs)	$I_{\text{on/off}}$	EQE (%)	P	D^* (Jones)	Ref./Year
CuPc-OPT	450/ 532/660	0.14/ 0.16/0.18	7.24×10^{-5}	3.81×10^2	0.78/ 0.85/2.14	461%@ $V_{\text{gs}} = 28 \text{ V}$	1.12×10^{10}	This work
			7.61×10^{-5}			300%@ $V_{\text{gs}} = 28 \text{ V}$	1.23×10^{10}	
			7.95×10^{-5}			277%@ $V_{\text{gs}} = 24.5 \text{ V}$	1.49×10^{10}	
Cupc/ CBI-OPT	450/ 532/660	1.96/ 1.64/1.33	9.16×10^{-5}	4.14×10^2	43.91/ 7.43/4.17	1277%@ $V_{\text{gs}} = 13.5 \text{ V}$	6.99×10^{11}	This work
			9.04×10^{-5}			1077%@ $V_{\text{gs}} = 17.5 \text{ V}$	9.66×10^{10}	
			8.90×10^{-5}			910% $V_{\text{gs}} = 13.5 \text{ V}$	4.22×10^{10}	
ZnO/ QDs/TiO ₂	520	0.07	1.04×10^{-1}	5.07×10^6	-	$4.2 \times 10^6 (P_{\max})$	-	2020 [13]
Pb _{0.99} Bi _{0.01} I ₂ / TiO ₂	Visible light	3.55×10^{-3}	-	-	-	-	6.03×10^8	2020 [14]
Cu ₂ BiI ₅	465/ 520/590	46×10^{-6}	-	-	0.0125/ 0.008/0.01	-	-	2021 [15]
		36×10^{-6}						
		48×10^{-6}						

4. 结束语

本文报道了一种基于有机半导体铜酞菁(CuPc)与无机钙钛矿/CBI 异质结复合结构的光电晶体管器件。该器件通过 CuPc 和 CBI 材料的互补吸收光谱特性,成功实现了 450~750 nm 紫外-可见光波段的宽谱响应。与参比器件 CuPc-OPT 相比, CuPc/CBI-OPT 异质结器件的光灵敏度、响应度及比探测率等关键光电性能参数均获得显著提升。基于能带结构分析和器件工作机制研究,我们认为其性能提升主要来源于以下四个机制: 1) 钙钛矿类材料 CBI 的高吸收系数与 CuPc 形成光谱互补,有效拓宽器件探测带宽; 2) CBI 层构建的空穴传输势垒显著抑制暗电流,同时 CuPc 通道层的高载流子迁移率保障了光生载流子的高效传输; 3) 光致势垒降低效应使得光电流传输受势垒影响较小,实现暗电流抑制与光电流维持的协同优化; 4) CuPc/CBI 异质结界面大大提高了激子的解离效率,提高了器件的 *EQE*, 异质结的界面电场有利于激子解离,提高了激子解离效率。最后, CuPc/CBI-OPT 在不包装的情况下在空气中保存 360 h, 其暗电流仅增加 19.6%, 光响应率下降 45%, 仍达到 0.73 A/W。这仍然优于近年来报道的许多可见光探测器[13]-[16], 甚至达到了与目前商用 α -si 探测器[17]相似的水平。这表明该器件具有良好的稳定性, 这与 CBI 的全无机类钙钛矿结构和 CuPc 的良好稳定性密切相关。结果表明, 有机/类钙钛矿异质结充分利用了有机半导体良好的异质结相容性和载流子输运能力以及钙钛矿材料的高光吸收特性, 本研究通过全蒸发工艺构建有机/钙钛矿异质结体系, 创新性地结合了有机半导体的优异界面兼容性、载流子迁移特性与钙钛矿材料的高光吸收特性, 为实现高性能光电探测器提供了一种工艺简便的新型解决方案, 该工作为有机-无机杂化光电探测器设计提供了重要的理论依据和技术参考。

基金项目

感谢浙江省基础公益研究计划项目(LGG21F050001)和浙江省“十四五”研究生教学改革项目“以地方产业需求为导向的研究生实践创新能力培养模式探索”的支持。

参考文献

- [1] Narayan, K.S. and Kumar, N. (2001) Light Responsive Polymer Field-Effect Transistor. *Applied Physics Letters*, **79**, 1891-1893. <https://doi.org/10.1063/1.1404131>
- [2] Iqbal, M.A., Fang, X., Abbas, Y., Weng, X., He, T. and Zeng, Y. (2024) Unlocking High-Performance Near-Infrared Photodetection: Polaron-Assisted Organic Integer Charge Transfer Hybrids. *Light: Science & Applications*, **13**, Article No. 318. <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01695-9>
- [3] Zhao, B., Huang, X., Chung, S., Zhang, M., Zhong, Y., Liang, A., *et al.* (2025) Hole-Selective-Molecule Doping Improves the Layer Thickness Tolerance of PEDOT:PSS for Efficient Organic Solar Cells. *eScience*, **5**, Article ID: 100305. <https://doi.org/10.1016/j.esci.2024.100305>
- [4] Perumalveeramalai, C., Zheng, J., Bellam, J.B., Pammi, S., Zhang, X. and Li, C. (2025) Solution-Processed, Ultrasensitive, High Current Density Vertical Phototransistor Using Porous Carbon Nanotube Electrode. *Applied Surface Science*, **680**, Article ID: 161414. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161414>
- [5] Chen, W., Lin, Y., Syu, Z., Wu, Y., Lin, K., Liu, C., *et al.* (2024) Surface Ligand Engineering of Perovskite Quantum Dots for N-Type and Stretchable Photosynaptic Transistor with an Ultralow Energy Consumption. *Chemical Engineering Journal*, **494**, Article ID: 152897. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152897>
- [6] Liao, K., Lian, Y., Yu, M., *et al.* (2025) Hetero-Integrated Perovskite/Si₃N₄ On-Chip Photonic System. *Nature Photonics*, **19**, 358-368.
- [7] Feng, S., Liu, C., Zhu, Q., Su, X., Qian, W., Sun, Y., *et al.* (2021) An Ultrasensitive Molybdenum-Based Double-Heterojunction Phototransistor. *Nature Communications*, **12**, Article No. 4094. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24397-x>
- [8] Yang, B., Wang, Y., Li, L., *et al.* (2021) High Performance Ternary Organic Phototransistors with Photoresponse up to 2600 nm at Room Temperature. *Advanced Functional Materials*, **31**, Article ID: 2103787.
- [9] Yang, C., Xie, Y., Zheng, L., Liu, H., Liu, P., Wang, F., *et al.* (2025) High Performance Phototransistor Based on 0D-

- CsPbBr₃/2D-MoS₂ Heterostructure with Gate Tunable Photo-Response. *Nanomaterials*, **15**, Article No. 307. <https://doi.org/10.3390/nano15040307>
- [10] Li, W., Liu, Y., Gao, Y., Ji, Z., Fu, Y., Zhao, C., *et al.* (2021) Tunneling-Assisted Highly Sensitive and Stable Lead-Free Cs₃Bi₂I₉ Perovskite Photodetectors for Diffuse Reflection Imaging. *Journal of Materials Chemistry C*, **9**, 1008-1013. <https://doi.org/10.1039/d0tc04485g>
- [11] Mariyappan, P., Pandian, M.G.M., Chowdhury, T.H., Babu, S.M. and Subashchandran, S. (2023) Investigations on the Stability of the Ambient Processed Bismuth Based Lead-Free A₃Bi₂I₉ (A = MA; Cs) Perovskite Thin-Films for Optoelectronic Applications. *Materials Science and Engineering: B*, **297**, Article ID: 116706. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116706>
- [12] Chang, J., Lin, Y. and Li, Y. (2024) Study of Vertical Phototransistors Based on Integration of Inorganic Transistors and Organic Photodiodes. *Micromachines*, **15**, Article No. 1397. <https://doi.org/10.3390/mi15111397>
- [13] Kim, B.J., Park, S., Kim, T.Y., Jung, E.Y., Hong, J., Kim, B., *et al.* (2020) Improving the Photoresponsivity and Reducing the Persistent Photocurrent Effect of Visible-Light ZnO/Quantum-Dot Phototransistors via a TiO₂ Layer. *Journal of Materials Chemistry C*, **8**, 16384-16391. <https://doi.org/10.1039/d0tc03353g>
- [14] Sadhasivam, S., Gunasekaran, A., Anbarasan, N., Mukilan, M. and Jeganathan, K. (2020) Topotactic Transition of Pb_{0.99}Bi_{0.01}I₂ into CH₃NH₃Pb_{0.99}Bi_{0.01}I₃ on TiO₂ for High-Performance Visible Light Perovskite Photodetector. *Materials Letters*, **276**, Article ID: 128155. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128155>
- [15] Adappattu Ramachandran, A., Krishnan, B., Avellaneda Avellaneda, D., Isabel Mendivil Palma, M., Amilcar Aguilar Martinez, J. and Shaji, S. (2021) Development of Lead-Free Cu₂BiI₅ Rudorffite Thin Films for Visible Light Photodetector Application. *Applied Surface Science*, **564**, Article ID: 150438. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150438>
- [16] Yu, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., Zhang, H., Song, X., Cao, M., *et al.* (2017) Broadband Phototransistor Based on CH₃NH₃PbI₃ Perovskite and PbSe Quantum Dot Heterojunction. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **8**, 445-451. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.6b02423>
- [17] Gupta, S., Katiyar, A., Bhan, R. and Muralidharan, R. (2013) Design Optimization of Pixel Structure for α -Si Based Uncooled Infrared Detector. *Defence Science Journal*, **63**, 581-588. <https://doi.org/10.14429/dsj.63.5758>