

文章编号: 1000-7032(2026)06-1029-14

有机/量子点红外上转换器件研究进展及其应用

梁维龙, 孙新宇, 代 甲, 王 莉, 罗林保, 张 祥*

(合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 有机/量子点红外上转换器件由红外光电探测单元与可见发光单元电学耦合构成, 可将不可见的红外信号直接转换为可见光输出, 从而满足红外可视化成像等应用需求。相较于传统无机外延探测器阵列结合读出电路的方案, 该上转换器件可避免像素级互联与复杂读出电路及算法, 具有工艺流程简化、成本可控等优势。有机/量子点材料良好的工艺兼容性与带隙可调性等特点, 为构建低成本、大面积红外上转换器件提供了重要基础。本文系统综述了有机/量子点红外上转换器件的研究进展, 以器件制备工艺为主线, 围绕真空热蒸发工艺、溶液法工艺及其混合工艺, 归纳总结了近年来在材料体系、器件结构与应用示范等方面的代表性进展, 并对器件效率提升、探测波段拓展等关键问题的未来发展方向进行了展望。

关键词: 有机/量子点; 红外上转换器件; 发光二极管

中图分类号: TN214; O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260045

CSTR: 32170.14.CJL.20260045

Research Progress and Applications of Organic/Quantum Dot Infrared Upconversion Devices

LIANG Weilong, SUN Xinyu, DAI Jia, WANG Li, LUO Linbao, ZHANG Xiang*

(School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhangx@hfut.edu.cn

Abstract: Organic/quantum dot infrared up-conversion devices electrically couple an infrared photodetecting unit with a visible light-emitting unit, enabling direct translation of invisible infrared information into visible emission for real-time visualization and imaging. Compared with conventional infrared imaging technologies that rely on epitaxial detector arrays integrated with readout circuits, up-conversion devices avoid pixel-level hybrid interconnection as well as the associated readout electronics and algorithmic processing, offering a simplified system architecture and a more cost-effective manufacturing route. Owing to their excellent process compatibility and readily tunable band-gaps, organic semiconductors and colloidal quantum dots provide a versatile materials platform for constructing low-cost, large-area infrared up-conversion devices. This review summarizes recent advances in organic/quantum dot infrared up-conversion devices from a fabrication perspective. Focusing on vacuum thermal evaporation, solution processing, and hybrid integration strategies, we highlight representative progress in materials development, device architecture engineering, and application demonstrations. Finally, we discuss future directions and remaining challenges toward higher upconversion efficiency and broader spectral extension.

Keywords: organic/quantum dot; infrared up-conversion device; light-emitting diode

1 引 言

红外光是当前光电探测与应用研究中尤为重

要且价值突出的谱段,其在生物组织中具有较强的穿透能力及较低的散射损耗,并且诸多材料与化学键的特征吸收位于红外波段,使得红外探测

收稿日期: 2026-02-07; 修订日期: 2026-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(62305097); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2024HGTCB0233)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62305097); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(JZ2024HGTCB0233)

技术在生物医学成像、夜视监测、材料与食品检测、智能感知及可穿戴电子等领域展现出巨大的应用潜力^[1-2]。目前,主流红外探测系统多采用 In-GaAs、HgCdTe 等无机外延半导体材料构建红外探测器阵列,并配合读出电路实现信号采集与图像重建^[3-4]。然而,该方案高度依赖昂贵的外延生长工艺及复杂的信号处理电路,同时像素化探测阵列与读出电路之间需要精密的倒装互联工艺,导致成本居高不下,并带来一定的可靠性隐患,甚至部分器件仍需在低温条件下运行,制约了其在大规模、低成本场景中的推广应用^[5]。因此,发展兼具低成本、可大面积制造与高分辨成像能力的新型红外探测与成像技术具有重要的研究意义与应用价值。

红外上转换器件作为一种新兴的红外探测与成像方案,近年来逐渐受到广泛关注。通过将红外光电探测单元与可见光发光单元在器件层面进行电学耦合,实现红外光信号向可见光信号的直接转换,从而得以将不可见的红外信息以可

见光形式直观呈现^[6-7]。与传统方案相比,上转换器件无需复杂的读出电路与信号处理算法,并且可根据需要结合成熟的 CCD 或 CMOS 技术进行检测与显示,显著简化了系统结构并降低了成本,如图 1(a)所示。早期的无机上转换器件通常基于 InGaAs、HgCdTe 等材料,采用高质量的外延生长工艺制备^[8],具有较高的稳定性能,但其高昂的生产成本以及对外延生长环境的严格要求,限制了其在大规模应用中的普及,且还易出现晶格不匹配和横向扩散带来的成像分辨率较低等问题。而有机/量子点材料展现出了良好的工艺兼容性与带隙可调性等特点,基于此构建的低成本、高性能红外上转换器件逐渐成为研究热点。同时,由于有机/量子点器件中载流子主要沿电场传播,同时由于器件中载流子主要沿电场方向传输,使得上转换器件具有天然的无像素成像特性,避免了探测器阵列,在理论上可突破像素尺寸限制,实现高分辨率和大面积红外成像。

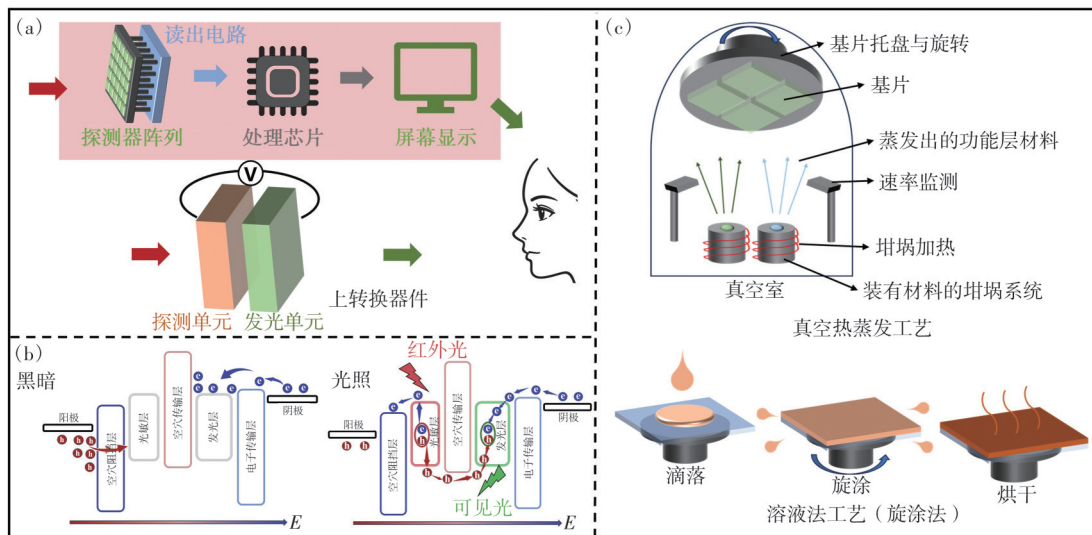


图 1 (a)传统方案和上转换成像方案示意图;(b)上转换器件工作机理图;(c)真空热蒸发工艺和溶液法工艺示意图

Fig.1 (a)Schematic diagram of traditional schemes and up-conversion imaging schemes. (b)Working mechanism diagram of up-conversion devices. (c)Schematic diagram of vacuum thermal evaporation process and solution method process

近年来,随着有机半导体、胶体量子点等新型光电材料的发展,基于真空热蒸发工艺和溶液法工艺等技术路线,红外上转换器件在 η_{p-p} 、探测范围以及应用场景等方面取得了显著进展^[9-12]。其中,真空热蒸发工艺具有薄膜均匀性好、界面可控性强、重复性高等优势,而溶液法工艺在制备流程简化、成本控制以及大面积器件制备方面表现突出,为红外上转换器件的应用提供了重要支撑。

基于此,本文围绕高性能有机/量子点红外上转换器件展开综述,以器件制备工艺为主线,从真空热蒸发工艺、溶液法工艺及两者结合的制备技术出发,系统梳理近年来红外上转换器件在材料体系、器件结构设计及性能优化与应用方面的代表性研究进展,并对当前红外上转换器件面临的主要问题与未来发展方向进行总结与展望,以期对相关领域的研究与应用提供参考。

2 上转换器件的原理、性能参数与工艺

上转换器件(Up-conversion devices, UCD)如图1(b)所示,由探测单元(Photodetector, PD)和发光单元(Light-emitting diode, LED)电学耦合构成。在无红外光照射时,由于较高的势垒阻碍了空穴注入,因此发光单元中难以发出可见光。而当有红外光照射时,探测单元中产生的光生空穴在电场作用下被传输到发光单元中,与注入的电子形成激子,辐射复合发出可见光,从而实现了红外光到可见光的转换。

为描述上转换器件的性能,通常主要采用以下几个关键性能参数。(1)吸收和发射谱:吸收谱是描述UCD探测单元对不同波长光吸收能力的特性曲线,发射谱是UCD发光单元所发射的可见光的波长和强度分布特性曲线。(2)开关比:包含亮度开关比($L_{\text{light}}/L_{\text{dark}}$)和电流开关比($I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$),分别是指UCD在红外光照射和暗态条件下发射光的亮度比值和电流比值,更高的开关比意味着UCD能够显著抑制暗电流,并在红外光照射下发射光强度能够获得显著增强,表明器件具有优异的开关特性。(3)光子-光子上转换效率(Photon-to-photon upconversion efficiency, $\eta_{\text{p-p}}$):指发射的可见光光子数占入射的红外光光子数的比值,是衡量UCD性能最核心的指标之一,具体计算公式如下:

$$\eta_{\text{p-p}} = \frac{\int \frac{I(\lambda_{\text{vis}})\lambda_{\text{vis}}}{R(\lambda_{\text{vis}})hc} d\lambda_{\text{vis}}}{\frac{P_{\text{IR}}\lambda_{\text{IR}}}{hc}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, $I(\lambda_{\text{vis}})$ 和 $R(\lambda_{\text{vis}})$ 分别为光电探测器的光电流和光响应度,分别用于收集发射单元发射的光子; P_{IR} 、 λ_{vis} 、 λ_{IR} 、 h 、 c 分别为入射红外光功率、发射可见光的波长、入射近红外光的波长、普朗克常数、光速。(4)成像分辨率:尽管UCD是无像素的,其分辨率仍可通过等效像素尺寸来衡量,通常使用每英寸像素数(Pixel per inch, ppi)作为标尺,ppi值越高,表示单位长度内的像素数量越多,图像细节越清晰。

为制备有机/量子点UCD,目前主要有三类工艺:真空热蒸发工艺、溶液法+真空热蒸发法混合工艺以及全溶液法工艺,三种制备工艺各具优势。表1从制备成本、薄膜质量等维度比较了各个工

艺的优劣与适用场景, $\eta_{\text{p-p}}$ 等性能指标由于易受到材料体系、器件结构、测试波长及光强等因素的影响,因此表1中未对不同工艺体系下 $\eta_{\text{p-p}}$ 等器件性能进行对比。

表1 三种制备工艺的优缺点对比

Tab. 1 Comparison of the advantages and disadvantages of three fabrication processes

| | 真空热蒸发 工艺 | 混合 工艺 | 全溶液法 工艺 |
|-------|-------------|----------|------------|
| 制备成本 | 较高 | 中等 | 低成本 |
| 薄膜质量 | 均匀性好 | 质量适中 | 均匀性差 |
| 探测波段 | 较窄(近红外) | 宽(短波,中波) | 宽(短波,中波) |
| 大面积制备 | 较差 | 较好 | 优势明显 |
| 产业化前景 | 精细化,高性能 | 中高性能 | 低成本,大规模 |

(1)真空热蒸发工艺采用高真空热蒸发技术制备UCD,如图1(c)所示,其核心优势在于对薄膜均匀性、膜厚、掺杂浓度等能够实现精细化调控。该类工艺主要基于酞菁类、萘菁类等小分子材料,探测范围主要集中在1 000 nm以内的近红外区域,结构稳定、可控性强,是深入研究器件物理机制和验证新结构、高性能方案的重要手段。

(2)溶液法+真空热蒸发法混合工艺有望突破热蒸发工艺小分子材料的探测波长限制,通过在探测单元中引入共轭聚合物、非富勒烯小分子等材料并利用溶液法(如旋涂)制备,能够显著拓展UCD的波段响应范围,甚至进入短波红外(Shortwave infrared, SWIR)波段,同时保持发光单元的高效发光性能,在大面积和产业化领域具有前景。

(3)全溶液法工艺是完全采用旋涂法等技术制备UCD,不仅能够避免高真空设备,进一步降低成本,而且能够丰富材料体系选择,如红外敏感染料、低带隙聚合物、钙钛矿和量子点等,尤其是在向SWIR及中波红外(Midwave infrared, MWIR)拓展探测波长方面表现出极大潜力,同时在产业化和大规模制备方面展现出极大前景。本文将以前述器件制备工艺为主线,系统综述近年来UCD在材料体系、器件结构与应用方面的代表性研究进展。

3 上转换器件的研究进展

3.1 基于真空热蒸发工艺的UCD

2007年,Gong等首次提出了一种基于光敏掺杂的全有机蒸镀红外上转换器件^[13],通过在OLED的空穴传输层中掺杂红外敏感材料实现红外上转

换(图2(a)所示),这种器件能显著提升光电流和发光强度,但存在暗电流较大的问题。为解决这一问题,So于2011年提出了一种新结构,将SnPc:C60的体异质结(Bulk heterojunction, BHJ)与磷光OLED串联^[14],形成有机近红外上转换器件。在该结构中,BHJ层阻挡空穴传输,有效抑制暗电流的产生,使UCD在无近红外照明时处于关闭状态。而在近红外光的照射下,BHJ层产生的空穴被注入到发光层(Emitting layer, EML)与电子复合,产生可见光,从而实现上转换, η_{p-p} 达到了2.7%。随着研究的深入,2014年,So将基于SnPc:C60 BHJ

的透明上转换器件集成到商用数码单反相机中,实现了近红外和可见光的多光谱成像^[15]。随后,如图2(b)、(c)所示,Liu在2015年利用ClAlPc:C70 BHJ作为红外增敏剂^[16],制备了一种效率高达6%的有机近红外上转换器件,并在后面的工作中优化了发光单元的掺杂比例^[17]。2021年,Liu团队报道了一种单一光活性材料ClAlPc构成的有机上转换器件^[18], η_{p-p} 高达25.52%,起始偏置电压仅为1.7 V。此外,该团队通过在上转换器件中使用透明电极(图2(d)),展示了高达1588 ppi分辨率的高质量红外视觉图像。

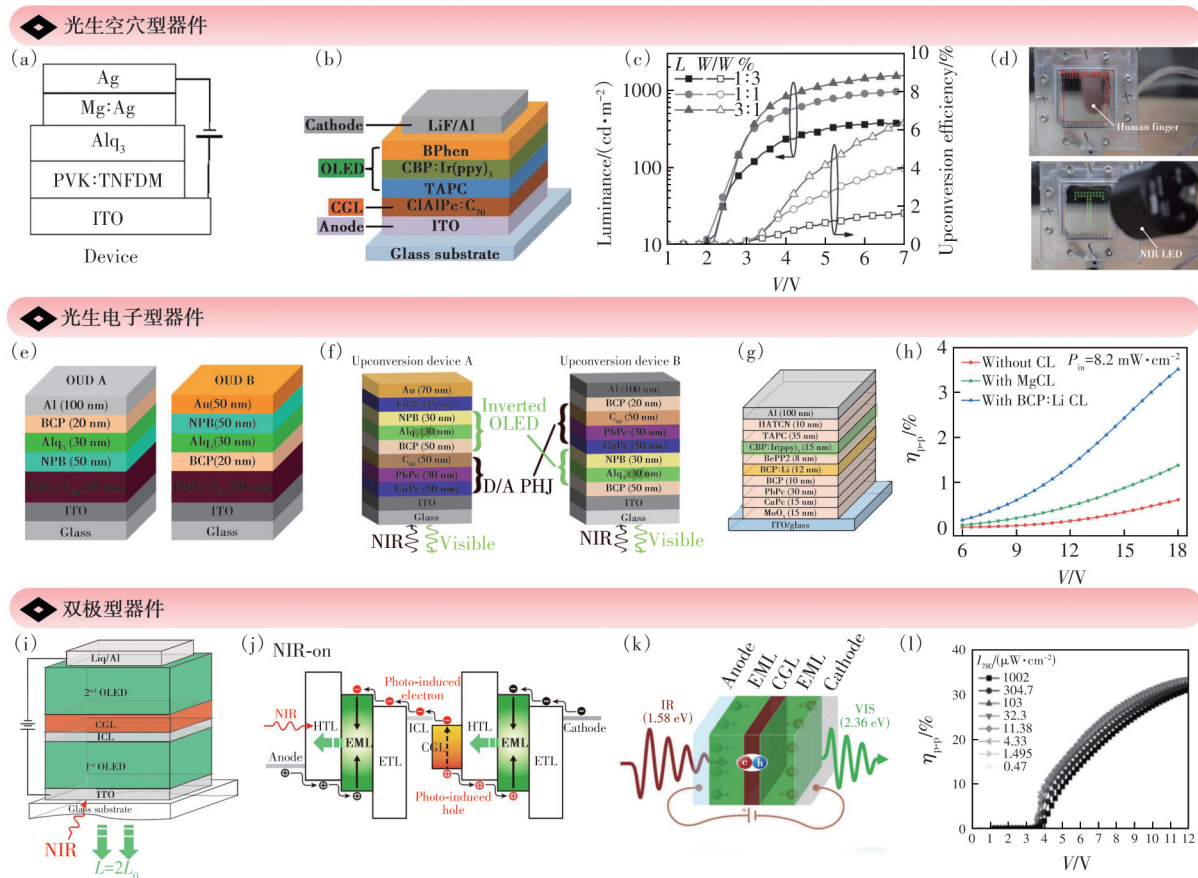


图2 (a)传输层掺杂的UCD^[13];基于ClAlPc:C70 BHJ的(b)器件结构和(c)性能图^[16]; (d)透明器件阵列成像图^[18]; (e)光生空穴型和光生电子型器件结构对比^[19]; (f)PD单元和倒置OLED单元互换位置^[20]; (g)基于电子注入改善的UCD(g)器件结构与(h)效率^[22];基于SnNcCl₂:C60的UCD(i)器件结构及其(j)机理^[24];基于ClAlPc的双极型UCD(k)器件结构及其(l)转换效率^[25]

Fig.2 (a)UCD based on doped hole transport layer^[13]. (b)Device structure and (c)performance graph based on ClAlPc:C70 BHJ^[16]. (d)Transparent device array imaging application^[18]. (e)Comparison of photogenerated hole-type and electron-type device structures^[19]. (f)Position swapping of PD units and inverted OLED units^[20]. (g)Structure diagram and (h)efficiency graph of UCD improved by electron injection^[22]. (i)Structure diagram and (j)its mechanism diagram of UCD based on SnNcCl₂:C60^[24]. (k)Structure diagram and (l)its conversion efficiency graph of ClAlPc-based bipolar UCD^[25]

上述器件结构均是基于光生空穴与注入电子形成激子发出可见光,除了这类光生空穴型器件外,由电荷生成层(Charge generation layer, CGL)

产生的光生电子亦可与注入空穴形成激子用于可见光发射;而由于电子传输本身就存在注入势垒较高的困难,因此,利用蒸镀工艺对于膜

厚、掺杂比例以及器件结构的精准把控,可以更好地对转换器件内部机理进行研究和性能优化。而酞菁类材料是一种重要的有机光电材料,通常为4个吡咯环通过氮原子连接而成的大环化合物,在中心配位一个金属原子(如铜、锌等),形成稳定的大环结构。其高对称性对光电性能至关重要,通过引入不同取代基团可以调整其光电性能,结合热蒸发工艺和酞菁材料的特性,其在UCD中的应用前景十分广阔。Lv等制备了以CuPc/PbPc平面异质结作为近红外敏感层、倒置OLED结构作为发射单元的有机上转换器件,通过巧妙地将平面异质结和倒置OLED在器件中的位置互换(图2(e)所示),对光生空穴和电子型器件进行了系统研究^[19],并且由于电子注入势垒较高,光生电子型器件即使在优化后,也并未取得与光生空穴型器件一致的上转换性能。更进一步,在不改变PbPc:C60 BHJ位置的情况下^[20],以普通OLED和倒置OLED为发光单元(图2(f)),发现引入具有高空穴迁移率的电子阻挡层可以有效地改善器件的性能。在此基础上,他们进一步探索了C60对UCD整体灵敏度的影响^[21]。最近,如图2(g)、(h)所示,Lv通过引入不同的连接层和掺杂金属Mg和Li的电子注入层^[22],有效提高了光生电子的注入效率,从而使基于CuPc/PbPc的UCD上 η_{p-p} 达到3.52%。类似地,Liu团队通过在光生空穴型器件的OLED和OPD界面增加电子注入层Al(1 nm)/LiF(1 nm)大大降低了注入势垒^[23],提高 η_{p-p} 的同时能够将近红外照射皮肤下呈现出600 ppi清晰的可见血管图像。引入电子注入层能有效调控界面能级匹配与载流子输运,降低电子注入势垒,促进光生电子的高效提取与定向传输,提高电流注入平衡性与转换效率。同时,它能抑制反向载流子注入与界面漏电通道,降低暗电流与非辐射复合损失。但增加功能层数会提升器件复杂度,增加制备过程的难度与控制难度。

在上转换器件研究中,无论是光生空穴型器件还是光生电子型器件,均只能利用光生载流子中的一种。因此,为了提高光生载流子的利用率,双极型器件应运而生,通过将CGL置于两个EML之间,从而实现了同时利用光生电子和空穴。图2(i)~(j)为He等于2018年成功开发的基于SnNcCl₂:C60的双极型上转换成像器件^[24],上 η_{p-p} 提升到了5%。此后,Liu团队进一步优化双极型UCD^[25],如

图2(k)~(l)所示,在没有采用光电倍增策略的情况下,他们通过调节单组分ClAlPc的两种类型的载流子,首次实现超过30%的红外光子利用率。

3.2 基于溶液法+真空热蒸发法混合工艺的UCD

上述蒸镀类有机小分子材料在探测更长红外波段方面十分不易,例如SWIR/MWIR波段,因此,仍需针对响应波段的限制进行更多的探索。而溶液法工艺可引入聚合物、量子点等探测材料,能够显著拓展探测波段,因此诸多团队进行了一系列的探索。

在二元共混物方面,2017年,Yasuda等利用ING-T-DPP:PC61BM(图3(a))形成的窄带隙BHJ混合物作为CGL^[26],并将热激活延迟荧光发射体引入上转换器件,构建了绿色、蓝色和红色的单色发光,以及白光上转换发光UCD,首次突破了传统UCD仅能发出单色绿色的限制,具有重要的创新意义。

相较于富勒烯材料,非富勒烯材料具有更好的能级匹配和较高的载流子迁移率,有利于提高光生载流子的传输效率。因此,Tao团队使用非富勒烯共混物PBDB-T-2F:BTP-eC9用作CGL^[27],并引入SAF-2NP作为荧光发射层,避免了依赖重金属配合物磷光材料,实现了高达20.1%(850 nm)的 η_{p-p} 效率。另一项工作中,Liu等采用PTB7-Th:COTIC-4F将波段扩展至940 nm^[28],且该UCD将可探测红外功率密度的下限降至0.75 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,与商用金属氧化物半导体红外检测技术相当。最近,Li团队开发了两种基于DPP-DTT:COi8DFIC和DPP-DTT:Y6的波长选择性有机上转换探测器^[29],在860 nm和890 nm处具有峰值灵敏度,进一步展示了溶液法工艺对于波长的调控优势。

在向更长波长延伸的研究中,三元共混会更加有利于波长的扩展。2021年,Tao团队开发了以PTB7-Th:IEICO-4F:PC71BM为基础的三元共混结构(图3(b))作为CGL^[30],实现了850~1 064 nm红外波段到绿光的有效上转换,效率高达12.92%,开启电压仅1.56 V。进一步地,他们将CGL中的PC71BM替换为COTIC-4F后,上转换波段扩展至1 310 nm^[31],器件效率依旧保持在12%左右,表现出良好的稳定性和波段兼容性。类似地,Jiang等利用基于PTB7-Th:COTIC-4F:BTP-eC9的三元补偿策略(图3(c))^[32],以降低探测器的暗电流并提高其探测性

时具备更易扩展的波段调节潜力。在上转换器件中,钙钛矿材料因其优异光电特性而备受关注。2018年,So团队首次报道了一种以FAPbI₃钙钛矿作为CGL的UCD(图3(e)),该器件在1.9 V极低电压下导通^[39]。钙钛矿不仅能作为探测材料,还具备有效发光的能力,Zhu团队将CsPbBr₃钙钛矿作为UCD的EML^[40],实现了良好的光子转换性能。然而,钙钛矿器件的稳定性易受环境影响^[41],并且波长调节范围有限,为进一步拓展探测波段,可在探测单元中引入量子点材料。

目前,诸多研究团队通过结合量子点探测单元与OLED,取得了重要进展。So团队首先将胶体PbSe量子点近红外吸收层与绿色磷光OLED结合^[42],采用ZnO作为空穴阻挡层(图3(f)),成功制备了探测波长高达1.5 μm的UCD。这一技术不仅拓展了器件的红外灵敏度,还通过将透明UCD集成至数码单反相机,形成了多光谱成像系统,进一步提升了实际应用能力。并且为了提升 η_{p-p} ,So团队在基于晶体管结构的UCD基础上利用光电倍增机制取得了超1000%的光子转换效率^[43]。Yu团队随后结合PbS量子点用作CGL并引入了微腔效应(图3(g))^[44],通过调节CGL厚度优化光腔长度,制备出940 nm处具有15.7% η_{p-p} 的UCD,这一突破标志着微腔效应首次应用于UCD的制备,为器件性能提升提供了新的方案。进一步的研究中,Tang团队通过调节ZnO表面氧空位浓度^[45],成功优化了PbS界面,获得了11.08%的 η_{p-p} 。为扩展更广的波长范围,Tang团队将基于HgTe的UCD与CMOS传感器集成^[46],实现了2500 nm(SWIR)和4500 nm(MWIR)的上转换可视化(图3(h)), η_{p-p} 分别为6.41%和4.06%,为工业领域如夜视、农业科学和工业检测等新兴应用提供了更多可能。

叠层型器件具有极大的潜力进一步提升UCD器件性能。叠层OLED结构通过将多个发光单元串联在一起,可以有效提高整体电-光转换效率。为此,Yang等尝试将单层OLED替换为双叠层OLED结构,最终使得 η_{p-p} 提升到了30%^[47]。类似地,Wang团队利用双叠层OLED(图3(i))同样实现了超过30%的 η_{p-p} ^[48],并且在使用三叠层OLED时实现了相同条件下高达44.7%的 η_{p-p} (图3(j)),极大地提高了光生载流子的利用率和UCD的上转换效率。除了叠层OLED以外,叠层PD同样可以用于UCD中。例如,Wang团队基于PM6:L8-

BO叠层OPD单元(图3(k))制备了高性能的UCD^[49],显著降低了器件的工作电压,有效提升了光电转换效率,实现了降至0.64 V的 V_{on} (图3(l)),并且 η_{p-p} 达到10.64%。

3.3 基于全溶液法工艺的UCD

采用溶液法制备探测单元后,蒸镀OLED单元面临着工艺转换问题。虽然真空热蒸发工艺能够提供高质量的薄膜,但其高昂的真空维护成本和较低的材料利用率不利于其大规模应用。因此,若开发全溶液法工艺,能够有效提高材料的利用率,避免高真空设备,从而显著降低生产成本,目前已成为实现高效上转换器件的一个重要发展方向。

2019年,Hany团队率先提出了一种全溶液法制备的五层有机UCD(图4(a))^[50],有效推动了全溶液法UCD的发展。此外,该团队还引入聚集诱导发光型Jcy七甲基染料^[51],具备近红外窄带吸收特性(图4(b)),能够在980 nm和976 nm下实现高效上转换,同时抑制了可见光自吸收,显著提升了UCD效率。因此,Hany等的工作对于日光环境检测^[52]和不同波段的精确红外可视化具有重要启示作用。最近,如图4(c)、(d)所示,Jiang等利用66-PTB:IEICO-4F为CGL实现了最大响应波长长达1000 nm的全有机溶液法UCD^[53],器件的开启电压低至1.5 V,且器件具有5500 cd/cm²高亮度和10.68%高效 η_{p-p} 。

为进一步推动全溶液法工艺,除了全有机型器件,Liu等首次尝试将钙钛矿量子点(PQDs)引入EML^[54],配合PM6:Y6用作CGL(图4(e))制备出低至1.4 V导通电压、 η_{p-p} 达5.68%的全溶液法UCD,验证了PQDs与有机空穴传输层之间的协同作用(图4(f))。Lei等则采用DPP-DTT:PC71BM为CGL、CdSe/ZnS量子点为EML^[55],并配以NiO_x注入层,进一步提升了器件性能,后续引入DPP-DTT:Y6优化CGL结构并在EML中引入混合量子点^[56],首次通过单层混合量子点在不同偏压下实现了颜色调控的彩色可视化,具体如图4(g)、(h)所示。不同于多层蒸镀的变色OLED^[7],这种基于混合量子点的单层EML可以根据量子点带隙的宽窄实现色彩调整,从而实现在不同偏压下选择性激活,这使得近红外光能够进行彩色可视化检测。最近,他们在电子传输层与阴极之间引入PMMA绝缘层^[57],有效改善了UCD载流子注入平衡。随后,通

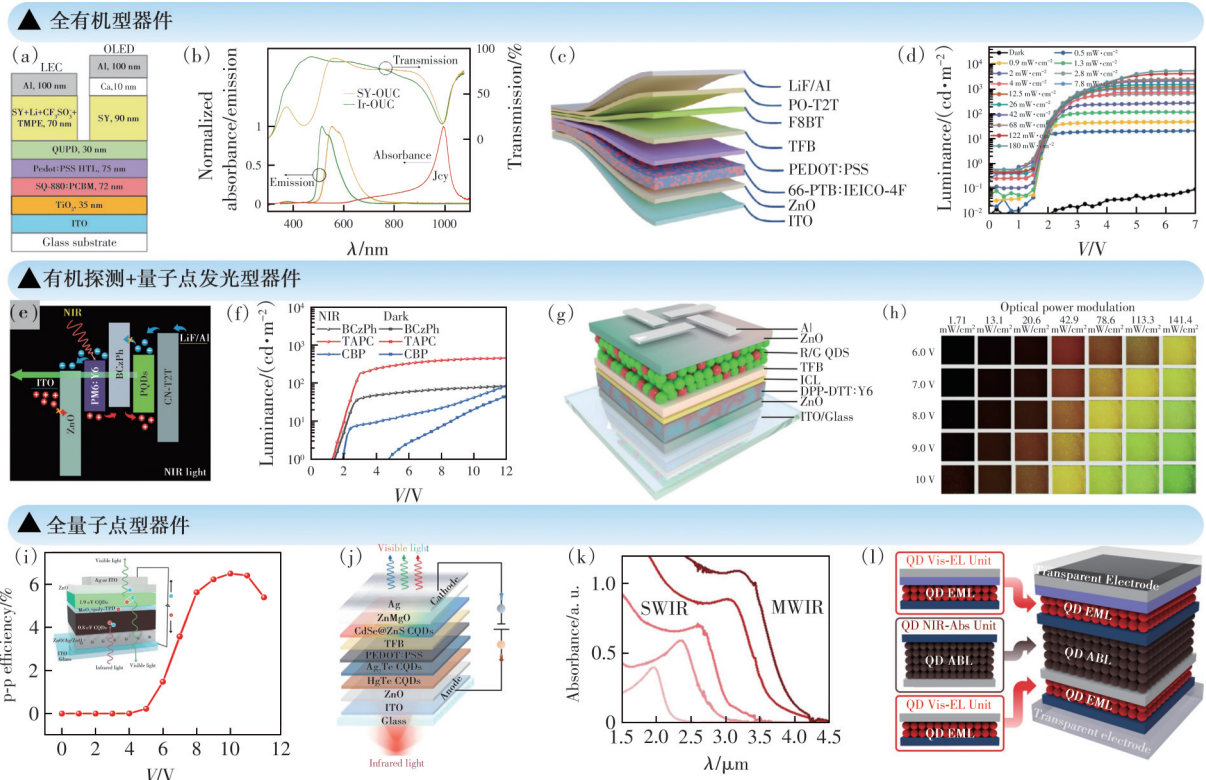


图4 (a)全有机UCD结构图^[50]; (b)Jcy七甲基染料吸收透过光谱^[51]; (c)~(d)基于66-PTB:IEICO-4F的UCD结构和亮度^[53]; (e)~(f)基于PQDs的UCD机理和亮度^[54]; (g)~(h)变色QDs的UCD结构和颜色变化^[56]; (i)量子隧穿效应的器件结构(插图)和转换效率^[61]; 基于HgTe量子点的UCD(j)结构和(k)吸收光谱^[65]; (l)量子点双极结构的UCD^[66]

Fig.4 (a) Structure diagram of fully organic UCD^[50]. (b) Absorption and transmission spectrum of Jcy heptamethyl dye^[51]. (c) UCD structure diagram and (d) luminance graph based on 66-PTB:IEICO-4F^[53]. (e) Mechanism diagram and (f) luminance graph of UCD based on PQDs^[54]. (g) UCD structure diagram and (h) color change of color-changing QDs^[56]. (i) Device structure (inset) and conversion efficiency based on quantum tunneling effect^[61]. (j) Structure diagram and (k) absorption spectrum of UCD based on HgTe quantum dots^[65]. (l) UCD with bipolar structure based on quantum dots^[66]

过使用Y6作为单组分CGL^[58],进一步实现了高性能且具成本效益的UCD。该类集成探测与发光功能的UCD已在心率监测与显示中初步应用^[59],展示出多功能拓展的潜力。

在全量子点型器件方面,Sun团队在2020年提出以PbS量子点为CGL、CdSe为EML的全溶液处理结构,通过载流子能级结构优化与界面调控^[60],将效率提升至6%以上。与此同时,Ning团队引入Ag纳米粒子增强电子隧穿效应^[61],实现了6.5%的 η_{p-p} 以及高探测率(图4(i)),器件还展示了良好的柔性兼容性和毫秒级响应。更进一步,Chen团队利用量子隧穿效应^[62],直接将1 050 nm红外光转化为530 nm可见光。对于量子点上转换器件的更进一步研究,Ng等通过引入ZMO等新型电子传输层以实现光电倍增,将 η_{p-p} 提高到了12%^[63],Wu等则通过调节PbS层厚度优化探测与

发光单元间的匹配以获取最高效的转换效果^[64]。除此之外,由于HgTe量子点在SWIR到LWIR波段具有广泛可调性(图4(k)),为了更好地拓展红外波段和提高灵敏度,Tang等将HgTe量子点引入CGL(图4(j))^[65],通过界面优化,获得了近30%的 η_{p-p} 和低至 $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的检测阈值,其在极端红外响应上的优势为UCD波段延伸提供了重要启发。为了充分利用光生载流子,Kang等也利用全溶液法实现了全量子点的双极型UCD(图4(l))^[66],显著提升了器件的 η_{p-p} 。然而,PbS量子点由于本征带隙较大,难以拓展至真正的长波红外(Long-wave infrared, LWIR)区域;HgTe量子点虽可通过量子限域效应实现长波响应,但其毒性、稳定性及暗电流控制问题严重制约其产业化应用。

三种工艺适用于不同材料体系和器件结构,随着各团队研究的深入,器件性能逐年提升,具体

演化过程如图5所示。真空热蒸发工艺在器件制备领域起步较早,通过精确控制薄膜厚度,性能提升迅速且通常优于其他两种工艺。混合工艺结合了溶液法与蒸镀工艺,能够有效扩展波长范围,且

结合叠层 OLED 的性能得到了显著提高。全溶液法则在降低成本和大面积制备方面具备明显优势,尽管 η_{p-p} 仍受制于层间溶剂侵蚀导致的界面受损等问题,但其未来前景依然十分广阔。

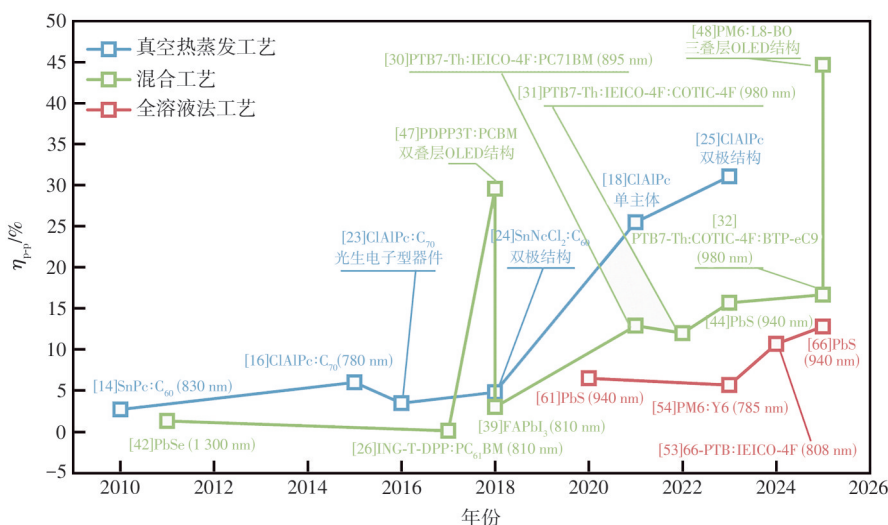


图5 基于不同制备工艺的器件性能演化

Fig.5 Device performance evolution under different fabrication processes

4 上转换器件的应用

基于上转换器件的突出优点,使得便携式、多功能红外探测应用成为现实,各个研究团队对上转换器件在成像、光通信与心率监测等光电集成应用方面进行了诸多尝试。

4.1 红外成像与识别

UCD在红外光到可见光转换成像技术中的应用尤为突出。依托红外激发诱导可见光发射的基本机制,器件可实现对红外图像的直接可视化^[15],避免了传统红外探测系统所需的繁杂电子读取与信号转换过程^[16]。该技术特别适用于低剂量、非侵入式的生物医学成像场景,为了满足这一领域对成像质量和生物兼容性的高要求,UCD需要具有适应生物组织穿透性的探测波长和低暗电流特性,如图6(a)、(b)所示,在血管识别^[23,37]、生物组织成像^[30-31,46,53,61]等方面展现出巨大的应用前景。红外光波长越长,对物质的穿透能力越强,随着探测波长的扩展,UCD还可以如图6(c)、(d)所示通过红外光穿透烟雾或硅进行检测和识别成像^[37,46],同时由于其大面积、可柔性以及可透明化的特点,也可以用于红外信号监测(图6(e))^[28]、夜视^[32]和实时成像^[9]等应用。

4.2 光通信与视听

除了成像应用以外,UCD在光通信方面同样

展现出了巨大的应用潜力。为保证信号的准确性和清晰度,高转换效率是必需的。低工作电压也使得这些器件在不同环境下的应用更加灵活和可靠。Liu团队基于大面积半透明有机上转换器件实现了具有红外视听功能的护目镜^[25],允许双视听模式操作(图6(f)),通过面罩的红外光由上转换护目镜实现图案可视化,同时音频信号则通过调制光源的强度和频率来实现光通信传输。UCD的低功耗、高分辨率和快速响应性能是关键,这对启发未来新型可穿戴显示设备具有重要意义。不仅如此,由于上转换器件兼具探测和发光的双重功能,因此可在光通信系统中(图6(g))分别用作信号发射器和接收器,实现光通信功能^[29]。

4.3 红外心率监测

由于UCD仍然保留探测单元的功能,因此也可被广泛应用在红外光电生理信号监测中。红外光在人体组织中具有优良的穿透深度,能够穿透表皮直达血管层,当被单独用作探测功能器件使用时,可以实现如图6(h)、(i)所示对心率、脉搏波等生理参数的实时检测^[27,29,40]。该功能对于医疗诊断和持续健康监测具有重要价值,有助于实现全天候长期健康监测。

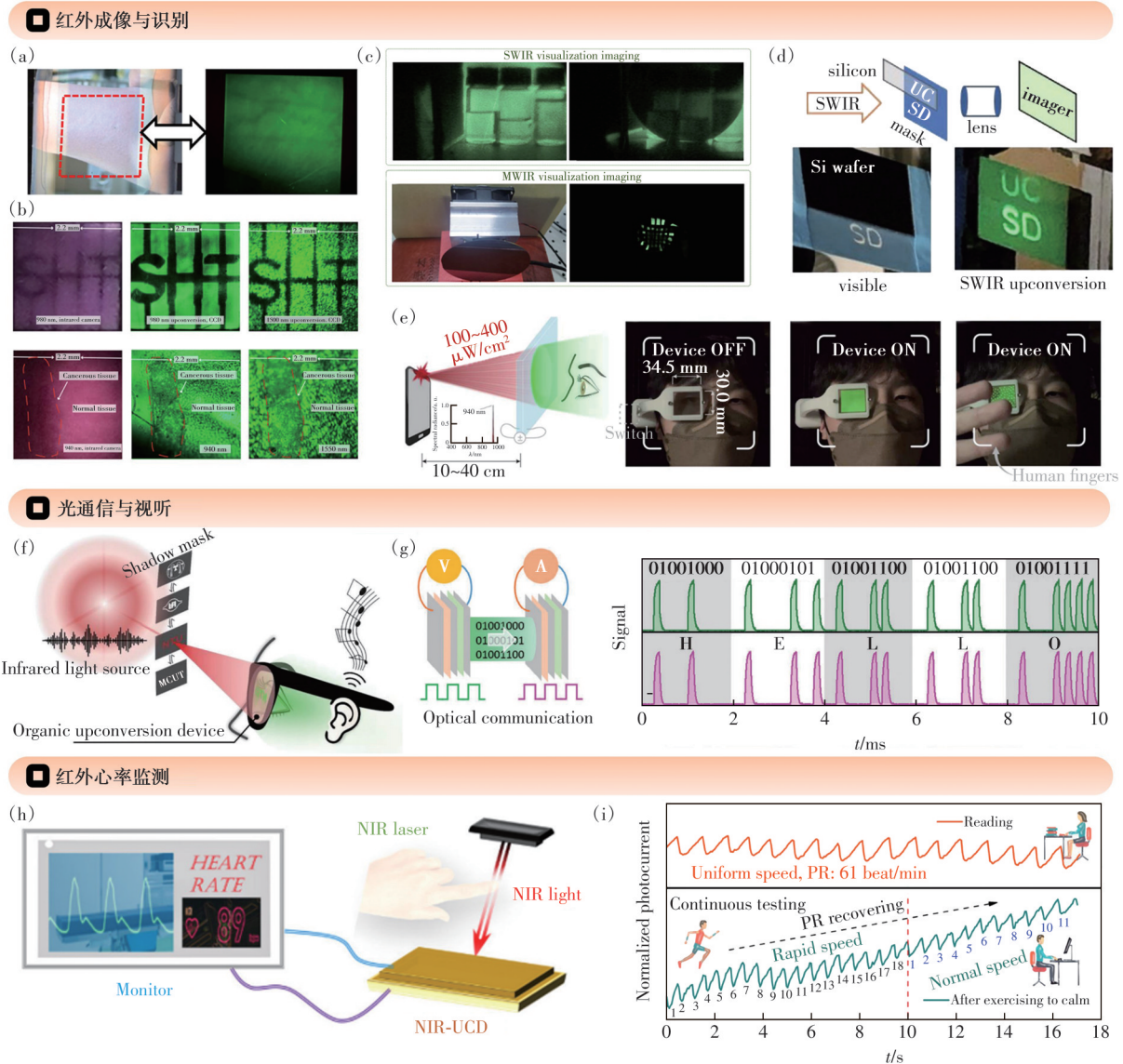


图 6 (a)~(b)血管和生物组织成像应用^[23,61]; (c)~(d)透过式检测^[37,46]; (e)红外信号监测应用^[28]; (f)视听护眼镜应用^[25]; (g)光通信应用^[29]; 心率检测应用(h)示意图和(i)测试结果^[27]

Fig.6 (a) Vascular and (b) biological tissue imaging applications^[23,61]. (c)–(d) Transmission detection^[37,46]. (e) Infrared signal monitoring application^[28]. (f) Audiovisual goggles application^[25]. (g) Optical communication application^[29]. Heart rate detection application with (h) schematic diagram and (i) test results graph^[27]

5 总结与展望

上述三种工艺制备的器件在结构、性能和应用等方面均取得了优异的成果,并在不同的应用场景中发挥着重要作用。真空热蒸镀工艺利用酞菁类小分子实现了较高的薄膜质量和器件性能,器件结构设计自由度高;混合工艺通过结合溶液法制备探测单元的优势,利用有机染料、钙钛矿和量子点实现了更长的波长探测能力;而全溶液法工艺则以其低成本和简便的生产流程在大规模制造上表现出巨大的优势,并且在材料创新与工艺

优化方面不断取得突破。尽管目前UCD在材料体系、器件结构与应用探索等方面取得了诸多进展,但也仍面临着多个挑战。

(1)探测波长的拓展:目前研究主要集中在近红外波段,短波/中波红外器件报道相对有限。首先,带隙减小导致本征载流子浓度增加,进而提高暗电流和噪声电流,降低开关比和转换效率。其次,窄带隙材料通常具有较低的势垒和较强的隧穿概率,易引发界面复合,需要复杂的界面工程来抑制暗电流,增加器件结构复杂度。此外,当前用于短波/中波探测的材料(如Pb基量子点、HgCdTe

和 InAs/InSb)存在环境毒性、稳定性和法规限制问题,且部分材料需要低温操作。因此,探测波长的拓展不仅是能带工程问题,还涉及环境友好性与产业可持续性,只有在效率、稳定性、成本和环境安全之间取得平衡,才能实现红外上转换技术的规模化应用。

(2)上转换效率的提升:目前UCD的 η_{p-p} 仍有待改善,高性能红外敏感材料不足以及器件物理机制理解不充分是主要原因之一。因此,提升UCD的 η_{p-p} ,不仅需要开发高性能红外敏感材料,亦需要从光生载流子产生与分离、载流子传输与注入以及发光单元中的辐射复合与出射等全过程出发,建立更为系统的机理解与可预测的设计原则,从而实现探测单元光生载流子利用率与发光单元出光效率的协同优化与兼顾。此外,许多有机材料和量子点在长期使用中可能出现性能衰退或环境敏感性问题。如何提高器件的耐用性,特别是在恶劣环境下的稳定性和寿命,是产业化亟待攻克的技术难题。

(3)制备工艺的完善:全溶液法工艺在降低制造成本、实现大面积制备以及拓展应用场景方面

具有极大潜力。然而,目前全溶液法仍面临薄膜均匀性不足、层间溶剂侵蚀导致界面受损与器件性能波动等问题;同时,相关研究多集中于旋涂工艺,难以满足大面积与连续化制造需求。因此,发展喷墨打印、刮涂等更适配大面积制备的涂布/印刷工艺,并在墨水配方、成膜动力学、多层堆叠稳定性与低成本等方面实现协同优化,将是推动UCD产业化的重要方向。

(4)集成与柔性化:上转换器件在生物成像和夜视监测等领域可与现有CMOS和CCD技术集成,以扩展当前主流的图像捕捉技术,与UCD的集成将提升其成像波长、图像质量、响应速度和分辨率。此外,随着柔性电子和可穿戴设备的发展,UCD与这些设备的融合也呈现出新的趋势。例如,在智能手表、健康监测设备和增强现实眼镜等可穿戴设备中,柔性UCD展现出巨大的应用潜力。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260045>

参 考 文 献:

- [1] RAO T Y, HAO Q, MU G, *et al.* Large-scale fabrication of CMOS-compatible silicon-OLED heterojunctions enabled infrared upconverters [J]. *APL Photonics*, 2023, 8(3): 036106.
- [2] JI Y F, HU X, REN M Y, *et al.* Infrared-to-visible upconversion imagers: recent advances and future trends [J]. *IEEE Open J. Immersive Disp.*, 2024, 1: 107-118.
- [3] HU X, XIAO G, LI Y W, *et al.* Infrared-light visualization by organic upconversion devices [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2023, 5(10): 5378-5385.
- [4] 刘映雪,朱福荣. 近红外光的可视化及其应用 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(1): 78-104.
LAU Y S, ZHU F R. Visualization of near-infrared light and applications [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(1): 78-104. (in English)
- [5] RAO T Y, CHEN M L, MU G, *et al.* Infrared-to-visible upconversion devices [J]. *Coatings*, 2022, 12(4): 456.
- [6] LAMPANDE R, DESORMEAUX J P S, PIZANO A, *et al.* Positive-feedback organic light-emitting diodes and upconverters [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(12): 1299-1304.
- [7] FU C C, MU G, WENG K K, *et al.* Advances in organic upconversion devices [J]. *Photonics*, 2024, 11(9): 808.
- [8] BAN D, LUO H, LIU H C, *et al.* Optimized GaAs/AlGaAs light-emitting diodes and high efficiency wafer-fused optical up-conversion devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 96(9): 5243-5248.
- [9] CHEN Y J, ZHENG Y Q, WANG J, *et al.* Ultranarrow-bandgap small-molecule acceptor enables sensitive SWIR detection and dynamic upconversion imaging [J]. *Sci. Adv.*, 2024, 10(23): eadm9631.
- [10] ZHANG C F, FENG Q, XUE R, *et al.* Infrared imaging visualization: organic material-based up-conversion devices [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(37): 19149-19167.
- [11] HANY R, CREMONA M, STRASSEL K. Recent advances with optical upconverters made from all-organic and hybrid materials [J]. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2019, 20(1): 497-510.
- [12] XIAO J, YIN Z Y, TANG Z Y, *et al.* Optical up-conversion devices based on organic and inorganic quantum dot materials

- [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(22): 7833-7844.
- [13] LU J S, ZHENG Y, CHEN Z J, *et al.* Optical upconversion devices based on photosensitizer-doped organic light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(20): 201107.
- [14] KIM D Y, SONG D W, CHOPRA N, *et al.* Organic infrared upconversion device [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(20): 2260-2263.
- [15] KIM D Y, LAI T H, LEE J W, *et al.* Multi-spectral imaging with infrared sensitive organic light emitting diode [J]. *Sci. Rep.*, 2014, 4(1): 5946.
- [16] LIU S W, LEE C C, YUAN C H, *et al.* Transparent organic upconversion devices for near-infrared sensing [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(7): 1217-1222.
- [17] LIU S W, LI Y Z, LIN S Y, *et al.* Inducing the trap-site in an emitting-layer for an organic upconversion device exhibiting high current-gain ratio and low turn-on voltage [J]. *Org. Electron.*, 2016, 30: 275-280.
- [18] SHIH C J, LI Y Z, LI M Z, *et al.* Transparent organic upconversion device targeting high-grade infrared visual image [J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106043.
- [19] LV W L, ZHONG J K, PENG Y Q, *et al.* Organic near-infrared upconversion devices: design principles and operation mechanisms [J]. *Org. Electron.*, 2016, 31: 258-265.
- [20] LV W L, ZHOU J J, ZHOU Z K, *et al.* An investigation of design principles toward near infrared organic upconversion devices [J]. *Opt. Mater.*, 2021, 121: 111487.
- [21] LV W L, LI Q H, DUAN H, *et al.* Effect of fullerene C₆₀ acceptor on the sensitivity of organic near infrared upconversion devices [J]. *Opt. Mater.*, 2025, 167: 117298.
- [22] LV W L, ZHENG H C, LI X, *et al.* Enhancing upconversion efficiency of organic near infrared upconversion devices based on inverted phosphorescent OLEDs as emitters by introducing connecting layer [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2024, 71(3): 2165-2170.
- [23] YUAN C H, LEE C C, LIU C F, *et al.* Cathodic-controlled and near-infrared organic upconverter for local blood vessels mapping [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6(1): 32324.
- [24] HE S J, WANG D K, YANG Z X, *et al.* Integrated tandem device with photoactive layer for near-infrared to visible upconversion imaging [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 112(24): 243301.
- [25] SHIH C J, LIN C Y, CHEN K, *et al.* Semi-transparent, pixel-free upconversion goggles with dual audio-visual communication [J]. *Adv. Sci.*, 2023, 10(31): 2302631.
- [26] TACHIBANA H, AIZAWA N, HIDAKA Y, *et al.* Tunable full-color electroluminescence from all-organic optical upconversion devices by near-infrared sensing [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(2): 223-227.
- [27] HE Z Y, ZHANG H Y, DU X Y, *et al.* A high-performance dual-functional organic upconversion device with detectivity approaching 10¹³ Jones and photon-to-photon efficiency over 20% [J]. *Mater. Horiz.*, 2023, 10(12): 5950-5961.
- [28] SHIH C J, HUANG Y C, WANG T Y, *et al.* Transparent organic upconversion devices displaying high-resolution, single-pixel, low-power infrared images perceived by human vision [J]. *Sci. Adv.*, 2023, 9(17): eadd7526.
- [29] LI N, HU X, LU Y, *et al.* Wavelength-selective near-infrared organic upconversion detectors for miniaturized light detection and visualization [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(51): 2411626.
- [30] DU X Y, HAN J Y, HE Z Y, *et al.* Efficient organic upconversion devices for low energy consumption and high-quality noninvasive imaging [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(42): 2102812.
- [31] ZHANG Y Q, HE Z Y, DU X Y, *et al.* High-performance organic upconversion device with 12% photon to photon conversion efficiency at 980 nm and bio-imaging application in near-infrared region [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(10): 16644-16654.
- [32] DONG S L, LI J, MA T J, *et al.* Ternary compensation enables high-sensitive efficient upconversion device for nir visualization [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(4): 2412678.
- [33] ADERNE R, STRASSEL K, JENATSCH S, *et al.* Near-infrared absorbing cyanine dyes for all-organic optical upconversion devices [J]. *Org. Electron.*, 2019, 74: 96-102.
- [34] STRASSEL K, KAISER A, JENATSCH S, *et al.* Squaraine dye for a visibly transparent all-organic optical upconversion device with sensitivity at 1 000 nm [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(13): 11063-11069.
- [35] YEDDU V, SEO G, CRUCIANI F, *et al.* Low-band-gap polymer-based infrared-to-visible upconversion organic light-emitting

- diodes with infrared sensitivity up to 1.1 μm [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(10): 2368-2374.
- [36] STRASSEL K, HU W H, OSBILD S, *et al.* Shortwave infrared-absorbing squaraine dyes for all-organic optical upconversion devices [J]. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2021, 22(1): 194-204.
- [37] LI N, EEDUGURALA N, LEEM D S, *et al.* Organic upconversion imager with dual electronic and optical readouts for shortwave infrared light detection [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(16): 2100565.
- [38] SHIN C H, LI N, SEO B, *et al.* Heterojunction bilayers serving as a charge transporting interlayer reduce the dark current and enhance photomultiplication in organic shortwave infrared photodetectors [J]. *Mater. Horiz.*, 2022, 9(8): 2172-2179.
- [39] YU B H, CHENG Y H, LI M L, *et al.* Sub-band gap turn-on near-infrared-to-visible up-conversion device enabled by an organic-inorganic hybrid perovskite photovoltaic absorber [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(18): 15920-15925.
- [40] LI N, LAN Z J, LAU Y S, *et al.* SWIR photodetection and visualization realized by incorporating an organic SWIR sensitive bulk heterojunction [J]. *Adv. Sci.*, 2020, 7(14): 2000444.
- [41] 曾海波, 董宇辉. 钙钛矿量子点: 机遇与挑战 [J]. *发光学报*, 2020, 41(8): 940-944.
ZENG H B, DONG Y H. Perovskite quantum dots: opportunities and challenges [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(8): 940-944. (in Chinese)
- [42] KIM D Y, CHOUDHURY K R, LEE J W, *et al.* PbSe nanocrystal-based infrared-to-visible up-conversion device [J]. *Nano Lett.*, 2011, 11(5): 2109-2113.
- [43] YU H, KIM D, LEE J, *et al.* High-gain infrared-to-visible upconversion light-emitting phototransistors [J]. *Nat. Photonics*, 2016, 10(2): 129-134.
- [44] KIM J H, LEE J Y, LIM C, *et al.* Highly efficient top-emitting infrared-to-visible up-conversion device enabled by microcavity effect [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(20): 2214530.
- [45] GE Z H, YANG S Y, ZHANG Z H, *et al.* ZnO-based photomultiplication-type infrared photodetectors for ultrasensitive upconverters [J]. *Small*, 2025, 21(11): 2411433.
- [46] MU G, LIN Y Y, FU K R, *et al.* Infrared visualized snakes-inspired artificial vision systems with CMOS sensors-integrated upconverters [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 282.
- [47] YANG D Z, ZHOU X K, MA D G, *et al.* Near infrared to visible light organic up-conversion devices with photon-to-photon conversion efficiency approaching 30% [J]. *Mater. Horiz.*, 2018, 5(5): 874-882.
- [48] HAN X W, HAN J Y, HE M Y, *et al.* Achieving over 30% photon-to-photon efficiency with tandem OLED structures in organic upconversion devices [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(23): 11814-11822.
- [49] HAN X W, HAN C, HE M Y, *et al.* Ultralow turn-on voltage organic upconversion devices for high-resolution imaging based on near-infrared homotandem photodetector [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(9): 2401375.
- [50] STRASSEL K, RAMANANDAN S P, ABDOLHOSSEINZADEH S, *et al.* Solution-processed organic optical upconversion device [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(26): 23428-23435.
- [51] HU W H, VAEL C, DIETHELM M, *et al.* On the response speed of narrowband organic optical upconversion devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(17): 2200695.
- [52] HU W H, ASSUNÇÃO J P F, DOS SANTOS CARVALHO R, *et al.* Photomultiplication enabling efficient shortwave infrared-sensitive organic upconversion devices [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(45): 2407528.
- [53] DONG S L, ZHANG Y, WANG Z H, *et al.* Solution-processed efficient organic upconversion device for direct NIR imaging [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(23): 2400912.
- [54] CHEN L C, CHEN S A, UMA K, *et al.* High-leakage-resistance and low-turn-on-voltage upconversion devices based on perovskite quantum dots [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(1): 2309589.
- [55] HU Y H, CHEN L X, LI H, *et al.* Decoupling the trade-off between the photosignal and photon noise in upconversion devices through a solution-processed nickel oxide interconnecting layer [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(9): 2302021.
- [56] HU Y H, JIANG H H, CHEN L X, *et al.* Colorful visualization detection of near-infrared light enabled by an upconversion device with a color-tunable quantum dot light-emitting unit [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123(21): 213301
- [57] WANG X Y, HU Y H, CHEN L X, *et al.* Performance improvement of an upconversion device through optimized carrier injection balance [J]. *Opt. Lett.*, 2025, 50(4): 1361-1364.

- [58] WANG K, HU Y H, CHEN L X, *et al.* High-performing organic/quantum dot hybrid upconversion device based on a single-component near-infrared-sensitive layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 125(11): 113302.
- [59] LI N, HU X, TANG Y, *et al.* Perovskite/organic tandem device to realize light detection and emission dual function [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 490: 151573.
- [60] TANG H D, SHI K M, ZHANG N, *et al.* Up-conversion device based on quantum dots with high-conversion efficiency over 6% [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 71041-71049.
- [61] ZHOU W J, SHANG Y Q, DE ARQUER F P G, *et al.* Solution-processed upconversion photodetectors based on quantum dots [J]. *Nat. Electron.*, 2020, 3(5): 251-258.
- [62] ZHANG Y Y, LIU C J, LIU X Y, *et al.* Localized surface plasmon-enhanced infrared-to-visible upconversion devices induced by Ag nanoparticles [J]. *Materials*, 2023, 16(5): 1973.
- [63] OH S, YOON S Y, JUNG B K, *et al.* Designing a quantum dot upconversion infrared image sensor *via* a photomultiplication mechanism [J]. *ACS Energy Lett.*, 2024, 9(12): 5914-5923.
- [64] XU Q L, YANG X X, LIU J J, *et al.* Elaborating the interplay between the detecting unit and emitting unit in infrared quantum dot up-conversion photodetectors [J]. *Nanoscale*, 2023, 15(18): 8197-8203.
- [65] MU G, RAO T Y, ZHANG S, *et al.* Ultrasensitive colloidal quantum-dot upconverters for extended short-wave infrared [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(40): 45553-45561.
- [66] KWON T H, KIM H B, KWAK D G, *et al.* Quantum dot-based three-stack tandem near-infrared-to-visible optoelectric upconversion devices [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(33): 21957-21965.



梁维龙(2000-),男,安徽六安人,硕士研究生,2023年于南京理工大学获得学士学位,主要从事有机上转换器件方面的研究。

E-mail: 2023110947@mail.hfut.edu.cn



张祥(1993-),男,安徽天长人,博士,副教授,2021年于吉林大学获得博士学位,主要从事光电探测与发光器件方面的研究。

E-mail: zhangx@hfut.edu.cn