

• 科学论坛 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0155

有机光电材料应用中的关键科学问题和技术瓶颈*

陈红征^{1**} 黄飞² 段炼³ 周印华⁴ 马於光²
李永舫⁵ 朱春雷⁶ 马劲⁶ 丁玉琴^{6**}

1. 浙江大学 高分子科学与工程学系 硅及先进半导体材料全国重点实验室, 杭州 310058
2. 华南理工大学 材料科学与工程学院 发光材料与器件全国重点实验室, 广州 510640
3. 清华大学 化学系 有机光电子与分子工程教育部重点实验室, 北京 100084
4. 华中科技大学 武汉光电国家研究中心, 武汉 430074
5. 中国科学院化学研究所 有机固体重点实验室 北京分子科学国家研究中心, 北京 100080
6. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部, 北京 100085

[摘要] 有机高分子光电材料一直是国家战略性关键电子材料的重点支持方向,也是我国有望实现国际领跑的研究和应用领域。本文基于国家自然科学基金委员会第388期“双清论坛”,针对有机光电材料在应用中面临的能带结构与器件性能的矛盾、载流子输运与复合机制调控难题、材料降解与器件失效等关键科学问题和技术瓶颈,分别从有机太阳能电池、有机电致发光、有机光电探测三个方向,总结凝练了限制有机高分子光电材料与器件实际应用的关键基础科学问题,并从材料设计新策略、材料与器件结构协同优化、器件失效物理机制以及研究新范式、发展政策等角度,提出了跨越基础研究到产业应用鸿沟的可行性发展建议,展望了有机高分子光电材料的未来发展趋势,为新一代能源技术和新型显示技术等战略性新兴产业的发展提供重要理论和技术支撑。

[关键词] 有机高分子光电材料;光伏发电;发光显示;光电探测

有机高分子光电材料是高分子材料学科的重要方向之一,是交叉融合高分子科学、能源科学、信息科学和材料工程等领域的研究前沿,更是应用新材料、孕育新技术的发源地^[1]。由于有机高分子光电材料及其光电器件具有分子结构可调、器件轻薄、可湿法加工以及可以制备成柔性和半透明器件等优势,在新型半导体产业领域显示出巨大的应用潜力^[2-6]。因此,有机高分子光电材料一直是国家战略性关键电子材料重点支持的研究方向,也是我国有望实现国际领跑的研究和应用领域。

有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)及发光器件作为第一代的有机高分子光电技术

已经成功实现产业化^[1],据Omdia数据,2022年全球OLED产品市场规模超过450亿美元,在中小尺寸新型显示领域如智能手机与手表、笔记本电脑、车载显示等占据了绝大多数的市场份额,并快速向平面白光照明等应用领域渗透。OLED的成功应用,充分验证了有机高分子光电材料的技术路径可行性和商业逻辑合理性^[2,3]。在此基础上,更多的基于有机高分子材料的光电技术有望快速实现从科学研究向产业应用的过渡。例如,有机太阳电池(Organic Photovoltaic, OPV)已经突破20%的光电转换效率(Power Conversion Efficiency, PCE)^[7-18],可实现光伏组件的轻薄柔性、半透明和弱光发电,在穿戴设备、智慧物联、建筑光伏、车载光伏等应用领域潜力巨

收稿日期:2025-11-05; 修回日期:2025-12-24

* 本文根据国家自然科学基金委员会第388期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: hzchen@zju.edu.cn; dingyq@nsfc.gov.cn

引用格式: 陈红征, 黄飞, 段炼, 等. 有机光电材料应用中的关键科学问题和技术瓶颈. 中国科学基金, 2026, 40(2): 335-351.

Chen HZ, Huang F, Duan L, et al. Key scientific issues and technological bottlenecks in the applications of organic optoelectronic materials. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2026, 40(2): 335-351. (in Chinese)

大;有机光电探测器(Organic Photodetector, OPD)的特征探测率不断提升,在新型显示、柔性电子皮肤、生物医学成像等新兴领域颇具应用潜力,有望取代CMOS实现超薄柔性和全屏幕的屏下指纹识别,成为新一代显示用图像传感技术。特别是硅带隙以下红外波段($>1\ 100\text{ nm}$)响应的有机光探测器的研究,正受到越来越多的关注,器件性能也不断提升,一旦能达到替代基于III-V族半导体近/短波红外探测器的要求,将开辟一个全新的应用领域^[19-22]。

20世纪80年代,美国柯达公司报道有机电致发光和有机太阳能电池之后,我国在该领域的科学研究受到了国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)、科学技术部、中国科学院和教育部等部门高度重视和大力支持,集聚了一大批高水平科研团队。研究方向涵盖了新型材料研制、高性能器件制备和光电转化及输运机理等方面。相关研究成果已经从早期的“跟跑”,到近年来在高性能光电材料和器件创制等方面逐渐达到“并跑”,个别研究方向实现了“领跑”。例如,我国从激子能量利用角度提出了新一代有机电致发光机理,发展了具有自主知识产权的第三代有机电致发光材料,有望摆脱依赖进口的局面^[23,24];我国多个团队创造性地设计研发了窄带隙小分子有机电子受体材料和与之匹配的新型聚合物给体,大幅提升了有机太阳能电池的PCE,推动有机光伏研究向实际应用发展^[7-18];窄带隙有机光电探测材料的不断研制及其探测性能的不提高,使有机光电探测器逐步逼近应用需求,在图像传感等领域展现出巨大的应用潜力^[19-22,25,26]。

尽管我国有机高分子光电材料的科学研究成果显著,但在相关领域的产业化方面与国外相比仍然存在差距。在有机电致发光方面,OLED材料一直被欧美日韩厂商垄断,在国内OLED面板产线中具有自主知识产权的OLED材料占有率不到10%;在有机太阳能电池方面,虽然国内的材料基础研究引领了全球光电转换效率的提升,但产业化应用仍面临巨大挑战,进展缓慢^[27-31]。因此,分析有机高分子光电材料迈向实际应用面临的关键科学问题和技术瓶颈,探讨以产业需求为导向开展相关科学技术的研究迫在眉睫。亟需国家在有机高分子光电材料发展趋势与方向上进行探讨并布局,引导国内相关领域科学研究的方向,对相关领域的关键瓶颈问题进行攻关。为增强我国在未来能源和光电信息产业的核心竞争力和产业升级基础,助力国家“双碳”和“绿色发展”重大战略目标,自然科学基金委组织召开了主题为“有机光电材料应用中的关键科学问题和技术瓶颈”的双清论坛,聚焦有机光电材料的研究,涉及材料、

化学、凝聚态物理、有机电子学、有机半导体、光电探测、能源、信息、传感等多个科学领域。与会专家围绕有机太阳能电池材料与器件、有机电致发光材料与器件、有机光电探测材料与器件三个议题开展研讨,积极探索学科交叉,总结凝练了有机高分子光电材料和器件应用受限的关键基础科学问题,提出了跨越基础研究到产业应用鸿沟的可行性发展建议,探讨了有机高分子光电材料的发展趋势,对新一代能源技术和新型显示技术等战略性新兴产业的发展提供重要理论和技术支撑。

1 有机光电材料应用中的关键科学问题和技术瓶颈

有机光电材料与器件面临三大核心挑战。其一为能带结构与器件性能的矛盾,为实现近红外至短波红外响应需减小光学带隙($E_g < 1.3\text{ eV}$),但会导致激子结合能增大、LUMO能级抬高,不利于激子解离且增加开路电压损失,同时窄带隙材料乌尔巴赫能量高,能量无序性强,加剧非辐射复合,降低载流子扩散长度与外量子效率。其二是载流子输运与复合机制调控难题,载流子迁移率依赖分子堆积有序性,有序性差则迁移能力受限,给体与受体迁移率失衡还会引发空间电荷效应;且窄带隙体系中陷阱辅助复合显著,载流子易被捕获并成为复合中心,制约外量子效率,抑制陷阱态密度、提高材料介电常数及优化界面能级排列是关键。其三是材料降解与器件失效问题,材料在光、氧、水、热等作用下会发生主链断裂、电极反应、活性层形貌破坏等,且失效机制缺乏系统研究,同时活性层共混形貌难在印刷工艺复现,界面层稳定性差,在柔性基底上易失效。

1.1 有机光伏材料

自1986年Tang^[27]提出小分子双层异质结结构(真空法)、1995年Heeger等^[28]提出聚合物—富勒烯本体异质结结构(溶液法)以来,有机光伏经过三十余年的发展,器件效率PCE已经突破20%(图1A)。同时,有机光伏在形貌调控、大面积器件、稳定性、半透明器件等方面取得长足进步。要实现有机光伏技术规模化应用,相关研究在以下方面仍存在瓶颈问题。

1.1.1 有机光伏活性层材料

过去十年有机光伏PCE的显著提升,主要得益于有机光活性层材料的创新发展,尤其是非富勒烯电子受体(ITIC^[29]、Y6^[30]、L8-BO^[33]等)和聚合物电子给体的发展(PM6^[34]、D18^[35]等)(PM6和Y6化学结构式如图1B所示)。相较于富勒烯体系的光活性层,这些非富勒烯光活性层材料吸收光谱与太阳光光谱更匹配,活性层材料的带隙(E_g , Y6: 1.5 eV左右)与Shockley-Queisser效率极

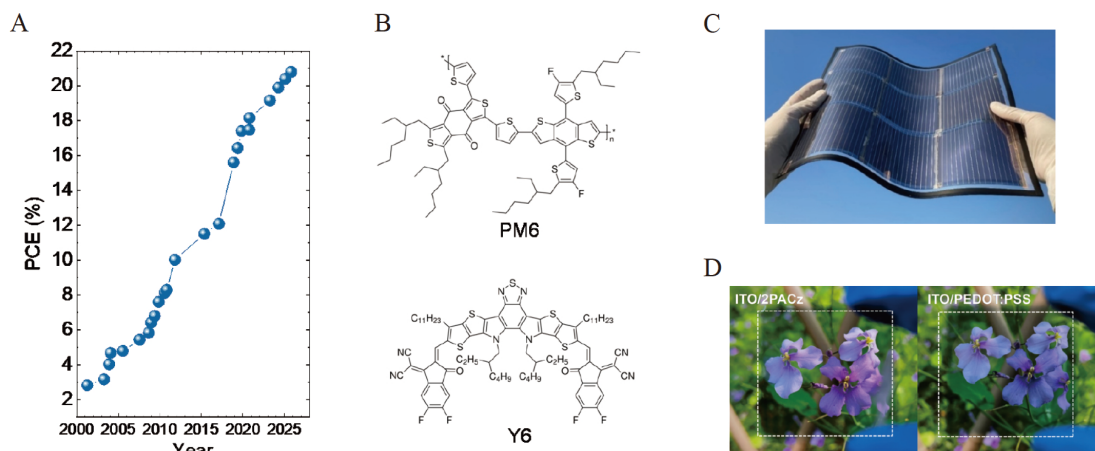


图1 A. 有机光伏效率历年进展图;B. 典型的聚合物给体PM6和有机电子受体Y6的化学结构式;C. 柔性大面积有机光伏模组照片^[32];D. 半透明光伏器件^[16]

Fig.1 A. Historical Progress Chart of Power Conversion Efficiency for Organic Solar Cells;B. Chemical Structures of the Typical Polymer Donor PM6 and the Organic Electron Acceptor Y6;C. Photo of a Flexible Large-area Organic Photovoltaic Module^[32];D. Transparent Photovoltaic Devices^[16]

限(效率超过31%)计算的优化带隙(E_g 在1~1.56 eV范围内)相接近,电压损失也更低。结合光活性层薄膜中电子给体和受体的纳米聚集形态的优化,平衡电荷分离、传输与收集,进一步提高了转换效率,目前已突破20%^[7-18]。

然而,当前高效率器件中所用的光活性层材料体系与2019年报道的Y6分子相比,分子结构并无根本性变化,有机光伏器件效率的提升进入瓶颈期。对比目前报道的最高效率有机光伏器件($V_{OC}=0.918\text{ V}$, $J_{SC}=27.64\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $FF=81.9\%$, $PCE=20.8\%$)与铅卤钙钛矿光伏器件($V_{OC}=1.193\text{ V}$, $J_{SC}=26.5\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $FF=84.5\%$, $PCE=26.7\%$)可见:两者的 J_{SC} 和 FF 相近,但 V_{OC} 相差较大,这正是两类器件PCE差距的主要来源。值得注意的是,两种电池的禁带宽度 E_g 较为接近,约为1.5 eV,因此,有机光伏器件较大的能量损失(即 $E_g\cdot q^{-1}-V_{OC}$)是制约其效率进一步提升的关键因素。要实现有机光伏效率的突破,跨越25%,接近甚至超越钙钛矿光伏的效率,须大幅降低能量损失,降低非辐射复合(如双分子复合、陷阱辅助复合),降低活性层材料体系的无序度(降低带隙以下态密度,降低乌尔巴赫能)。这就需要提高分子的刚性、结晶性,降低聚合物的相对分子质量分布,提升电荷的离域性以降低激子束缚能,提高分子的荧光量子效率,降低非辐射复合,这些成为有机光伏活性层分子设计面临的重要难点与挑战。

1.1.2 光活性层薄膜相形貌调控

与其他光伏器件形成异质结的方式不同,有机光伏器件是将电子给体和受体以大致等比例质量共混,通过溶液涂布形成本体异质结。在共混薄膜中,电子给体与受体有充分的接触界面,以利于激子分离;并且,电子给

体与受体各自形成连续通道供空穴和电子传输,并分别被电子传输层和空穴传输层收集。因此,电子给体与受体的分相尺寸、相结构、堆积形态将直接影响电荷的传输,进而影响器件的效率。前期研究表明,电子给体与受体形成双纤维结构有利于提升电荷传输与收集、抑制电荷复合,进而提升器件的填充因子和转换效率。而本体异质结形貌受到加工溶剂、基底温度、添加剂、薄膜干燥速度等因素的直接影响。

目前,光活性层薄膜干燥过程中的形貌演化过程仍不清晰,缺乏研究光活性层相分离动力学的有效原位表征技术手段,活性层非平衡形态和成膜机理尚不清楚;有效调节光活性层纳米形貌的可选方法仍然有限,仅局限于加工溶剂、基底温度、添加剂等,缺乏适用于大面积本体异质结形貌调控的加工方法,难以将小面积高效加工方法有效转移至大面积薄膜加工过程,这些活性层薄膜形貌研究与可控制备的瓶颈问题,限制了本体异质结光伏转换效率的最大化。

1.1.3 有机光伏模组的稳定性

光伏器件的工作条件严苛,主要体现在以下几个方面:(1)太阳辐照光谱涵盖高能量的紫外波段(200~400 nm);器件温度高,辐照下可超过60℃;(2)全天候条件,包括暴雨、高湿等;(3)有机光伏由多层薄膜组成,各层薄膜内部以及各层薄膜之间的界面在这些严苛条件下发生的结构变化会导致器件性能的衰减。例如,活性层薄膜中电子给体和受体形成的纳米形貌在受热条件下发生变化^[36],水、氧、紫外光复合条件下易导致有机材料的光氧化^[37,38],空穴传输层吸水后电子传输能力急剧下降^[39],紫外光照诱导传输层与光活性层之间的化

学反应,都会导致光活性层材料的降解。

研究人员发现聚合物给体的苯并[1,2-b:4,5-b']二噻吩(Benzodithiophene, BDT)骨架在光照下会发生扭曲,进而导致器件光衰减,效率下降^[40]。聚合物给体PTQ10不含BDT骨架,表现出更好的稳定性。在界面稳定性方面,研究人员通过在ZnO电子传输层上沉积无机SiO_xN_y钝化层,利用形成的Zn-O-Si键稳定界面,将有机光伏器件的T80寿命延长到24 700 h^[38]。

稳定性提升需从内部本征稳定性和外部高性能封装两方面着手。内部本征稳定性方面,需发展光照稳定性优异的活性层材料、聚集态形貌以及电荷传输界面,目前兼备高光照稳定性和高效转换效率的活性层及界面层材料的设计与制备仍具有挑战性。外部封装方面,需发展具有高水、氧、紫外光阻隔性能的柔性封装材料和方法,阻断水、氧、紫外光、发热(长波红外)等外部因素诱导薄膜及界面衰减的因素;引入封装膜将增加器件的厚度、增加更多的异质界面,这将大幅降低器件的机械柔韧性,如何平衡封装性能与机械柔韧性是柔性光伏稳定性研究的重要挑战。

1.1.4 柔性大面积有机光伏模组

AM 1.5 G标准光谱辐照功率密度为100 mW · cm⁻²,实验室制备的器件面积一般约为10 mm²,器件的输出功率仅为2 mW(按20%效率计算),要实现200 W的功率输出,有机光伏模组的面积要达1 m²。因此,大面积器件的制备是有机光伏技术迈向应用的必经途径。

近期基于新兴的非富勒烯光活性层,大面积有机光伏模组的效率不断提升。2024年,研究人员通过对光活性层薄膜涂布技术的优化,以铟锡氧化物(Indium Tin Oxide, ITO)玻璃为基板,制备了面积204 cm²、认证效率14.5%的有机光伏模组^[41]。近期,研究人员又开发出膜厚不敏感的活性层材料体系,获得了面积15.03 cm²、效率达18.04%的刚性有机光伏模组^[8]。为了实现有机光伏的机械柔性和轻量化优势,研究人员采用平整性高、导电性能优异的嵌入聚合物衬底的银纳米线柔性透明电极,制备了面积41 cm²、效率14.04%的柔性有机光伏模组^[32],9片柔性模组连接后如图1C所示,电压达103.5 V。

然而,柔性大面积有机光伏模组效率(14%左右)与刚性小面积电池效率(超过20%)差距较大,这是由于有机半导体激子束缚能大且激子扩散长度短,有机光活性薄膜厚度被限制在100~300 nm范围内,而器件效率对活性层厚度又极为敏感,活性层薄膜在面积放大过程中,膜厚的均一性会发生变化,还易于出现针孔等缺陷,导致漏电、短路等现象的发生,进而降低了大面积模组的效率。

因此,要实现高效柔性大面积有机光伏模组的制

备,须解决大面积薄膜的均匀性问题。厚膜光活性层有利于降低漏电、短路发生概率,但当活性层材料厚度超过500 nm时,器件电荷复合严重,导致填充因子和转换效率迅速下降,如何提高厚膜活性层的光电转换效率是当前研究瓶颈问题。并且,由于材料昂贵,大面积有机光伏器件的研究呈现门槛高、数量少的特征,也制约了研究的进程。活性层材料低成本、高产率的合成以及材料批次的高重复性是大面积有机光伏模组制备的重要前提。此外,目前大面积薄膜的溶液涂布与干燥过程机制仍不清晰,导致大面积薄膜均匀性可控性缺乏理论指导,光活性层薄膜大面积溶液涂布过程中的干燥动力学以及控制技术仍是大面积有机光伏模组制备面临的重要挑战。

1.1.5 半透明有机光伏材料与器件

开发可以透过可见光并吸收非可见光发电的太阳能电池玻璃可以实现与建筑、车辆等应用场景的融合,极大地拓宽光伏技术的应用场景。而选择性地吸收红外光,同时透过可见光是半透明光伏器件的核心,也是有机半导体材料不同于无机半导体的重要特征,从而使其在(半)透明光伏应用方面展现出了绝对的优势。因此,探索有机光伏器件在光伏玻璃方面的应用意义重大。理论上,半透明有机光伏可以在100%可见光平均透过率(Average Visible Transmittance, AVT)的前提下具有20%的效率(PCE),对应的光利用率(Light Use Efficiency, LUE=AVT×PCE)为20%。而实际上,目前最高的光利用率仅为6%左右。因此,当前对于半透明有机光伏器件的研究远没有达到理想状态。这主要是由于有机光伏材料体系的选择性光吸收特性(定义为选择性光吸收度)依然较差,同时半透明有机光伏光电转换过程中的能量损失,尤其是开路电压损失依然较高。此外,器件中反射造成的损失和非光活性层造成的寄生吸收损失是造成有机半透明光伏器件在可见光透过和光电转换效率之间不平衡的重要因素。同时,半透明有机光伏器件的发展需要结合具体的应用场景进行调制,根据不同的透光需求实现最高效率输出。

总之,高性能有机半透明光伏器件的发展依赖从分子到器件结构整体的优化。例如,在光活性层分子结构设计方面,需要重点考虑其在可见光的透过和近红外光的吸收,为此研究人员发展了一系列窄带隙分子结构,有效提高了半透明光伏器件光利用率。在界面结构方面,利用自组装分子界面层2PACz替代空穴传输材料PEDOT:PSS,在降低寄生吸收的同时提升了载流子动力学性能,协同提高光利用效率(图1D),LUE达到5.34%^[16]。在光学结构设计方面,研究人员发明了法布

里佩罗光学谐振腔、光学微区谐振腔、半透明叠层等器件结构,提高对可见光的透过和非可见光的吸收。为了给半透明有机光伏器件材料筛选和器件结构设计提供更加精准的指导,提出了光选择性吸收度物理参数,可以定量表征有机光伏材料的可见光透过与非可见光吸收光学特性。

尽管如此,有机半透明光伏器件的效率和光利用率仍然不尽人意。如何设计同时具有高选择性光吸收度和高光电转换效率的新型有机半透明光活性层材料,如何通过理论计算辅助方法建立高性能有机半透明光伏器件给受体匹配原则,是目前面临的关键科学难题。同时,如何设计新型界面层、透明电极等材料以降低器件的寄生吸收损失,如何设计新型器件结构,通过光学结构设计抑制器件的反射损失等等,也是有机半透明光伏器件需要解决的关键技术问题。

1.2 有机电致发光材料

OLED发展迅速,已经成为新一代主流的显示技术(图2A、2B)。我国科技界与产业界齐心协力,共同推动我国OLED产业发展,目前我国OLED面板产能全球第一。有机电致发光材料是OLED技术的核心物质基础,更新迭代周期短,竞争激烈。尽管目前OLED核心发光材料市场仍由美国UDC、德国默克、日本出光兴产等国际企业主导,但随着新一代发光材料与器件技术的快速

发展,这一格局正在被重塑。例如,清华大学研发的磷光辅助热活化敏化荧光技术,通过引入磷光材料作为“能量传递助手”,构建多通道激子传递路径,有效加速激子辐射过程,从而显著抑制效率滚降并提升器件稳定性^[42]。该技术已与维信诺等企业合作实现产业化,标志着中国在OLED核心材料领域实现了从技术跟跑到自主定义的跨越。根据《新型显示产业技术发展白皮书(2025)》,基于自主开发的窄光谱绿光染料,维信诺推出的磷光辅助热活化敏化荧光绿光器件在关键性能上实现对国际先进水平的全面超越:功耗降低12%以上,寿命提升15%~20%,色纯度可覆盖DCI-P3色域99.5%以上,部分版本甚至支持更广的Adobe RGB或BT.2020标准。目前,相关技术已成功应用于国产高端智能手机屏幕,并进入量产阶段。目前,根据OLED显示技术发展趋势,有机电致发光在广色域OLED材料、蓝光与近红外OLED材料、印刷OLED材料与墨水以及新型有机发光器件与功能集成等方面存在诸多挑战。

1.2.1 广色域OLED材料与器件

在显示技术领域,色域是衡量设备色彩还原能力的核心指标,决定了显示设备能够呈现的颜色范围。随着显示技术的迭代,色域标准持续演进,从标清电视(Standard Definition, SD)采用的BT.601、高清电视(High Definition, HD)采用的BT.709,到当前在手机屏幕和专

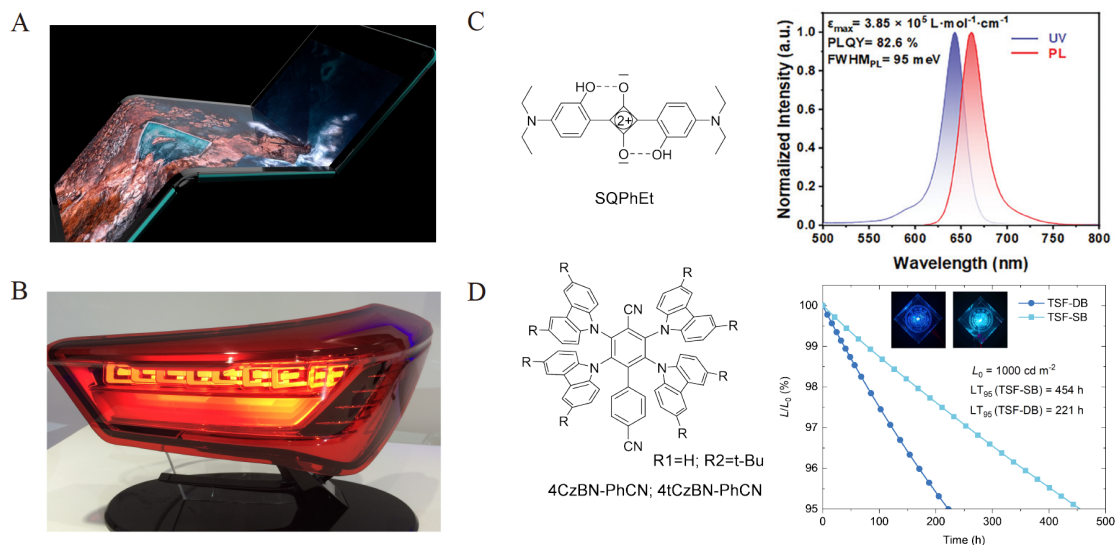


图2 A. 柔性可折叠显示屏(图片来自维信诺科技公司网站, <https://www.visionox.com/cn/technology-product/multi-form.html>); B. 柔性车灯照明器件模型(图片来自翌光科技公司网站, <https://www.yeolight.com/index/article/page/id/46.html>); C. 孤子发光材料SQPhEt的分子式及其吸收发射光谱^[43]; D. 基于电子离域策略的TADF敏化剂4CzBN-PhCN和4tCzBN-PhCN分子式及其对应的TSF-DB和TSF-SB器件寿命^[23]

Fig.2 A. Flexible and Foldable Display Screen (Image from Visionox Technology Website, <https://www.visionox.com/cn/technology-product/multi-form.html>); B. Flexible Car Taillight Illumination Device Model (Image from Yeolight Technology Website, <https://www.yeolight.com/index/article/page/id/46.html>); C. Molecular Structure of the Soliton Luminescent Material SQPhEt and Its Absorption-emission Spectra^[43]; D. Molecular Structures of TADF Sensitizers 4CzBN-PhCN and 4tCzBN-PhCN Based on the Electron Delocalization Strategy, and the Corresponding TSF-DB and TSF-SB Device Lifetimes^[23]

业影视制作中广泛应用的DCI-P3,色彩覆盖能力不断提升。面向超高清显示的未来,国际电信联盟(International Telecommunication Union,ITU)于2012年发布了BT.2020(Rec.2020)色域标准。该标准对红、绿、蓝三基色的色度坐标提出了极高要求,分别为红色(0.708, 0.292)、绿色(0.170, 0.797)和蓝色(0.131, 0.046)。BT.2020的色域覆盖范围达到人眼可见自然色彩的约75.8%,远高于BT.709(约35.9%)和DCI-P3(约53.6%),被视为针对超高清电视和下一代显示设备的广色域基准。实现BT.2020的关键在于红、绿、蓝三色像素的发光色纯度。色纯度主要取决于发光材料的光谱特性:峰值波长决定主色调,半高宽越窄则颜色越纯净、饱和度越高,而光谱肩峰强度会影响色彩的准确性。从理论计算上看,要实现BT.2020所要求的极高色纯度,其对应的理想单色光峰值波长大约在红色630 nm、绿色532 nm和蓝色467 nm附近。目前,OLED技术向超高清光色域显示迈进的需求迫切,成为各国在新型显示技术领域竞争的焦点之一。现有的有机电致发光材料的发光峰宽,需要通过微腔、滤光片来实现器件光谱窄化,这样不仅降低了器件效率,而且难以满足国际电信联盟提出的广色域显示标准BT.2020^[2,3]。因此,实现有机发光材料本征光谱窄化是OLED材料与器件研究的重要科学前沿问题和未来发展趋势。目前由日本关西大学的Hatakeyama教授提出的多重共振染料是实现窄光谱的有效途径,开发了高性能蓝光染料,实现了商业化应用,但针对红绿等长波长染料缺乏有效调控策略^[2]。近五年来,我国高校和企业在全光色广色域OLED材料与器件方面开展了系统研究,取得了具有重要国际影响的创新性成果与技术^[42-46]。例如,清华大学开发了一系列接近BT.2020标准的绿光、红光和蓝光多重共振染料,提出了热活化延迟荧光(Thermally Activated Delayed Fluorescence, TADF)敏化荧光策略构筑器件,实现了兼具高效率、长寿命、窄光谱的多色OLED,并成功实现了绿色窄光谱染料商业化应用^[1,47-49]。深圳大学、苏州大学、吉林大学基于硼氮稠合骨架分别研发了高性能的蓝光、绿光、红光多重共振染料,实现了高效率、窄光谱的多色OLED^[44-46]。华南理工大学提出了孤子发光体系新概念,获得了兼具高摩尔消光系数、高发光效率和窄光谱的深红光染料(图2C)^[43]。香港大学开发了系列铜配合物TADF材料,并与清华大学合作,将其作为敏化剂用于热活化延迟荧光敏化荧光OLED,构筑了兼具高效率、长寿命和窄光谱的红光器件^[50]。

尽管如此,广色域OLED材料与器件仍然面临着诸多挑战:(1)在材料方面,目前报道的大多数广色域发光

材料的色纯度还难以完全满足BT.2020的色域标准。有机材料光谱窄化的机制及其半峰宽极限仍然是广色域发光材料的关键科学问题。而且,现有的广色域发光材料绝大多数是基于硼氮多重共振骨架衍生而来,受日韩企业前期的国际专利制约。打破现有材料体系的专利壁垒,发展具有自主知识产权的广色域发光材料是实现其产业化应用的关键技术瓶颈。(2)在器件方面,广色域OLED器件普遍采用基于敏化机制的新型荧光技术,包括热活化延迟荧光敏化荧光和磷光敏化荧光。尽管这些技术在器件效率和光谱窄化方面有一定突破,但是仍然存在器件稳定性不足和高亮度下效率滚降严重等问题,构筑满足BT.2020发光的高亮度、高稳定性器件是实现广色域OLED应用的关键技术瓶颈。

1.2.2 蓝光与近红外OLED材料

目前,商用化的蓝光OLED普遍采用三线态—三线态湮灭上转换的主体材料搭配窄谱带的多重共振蓝光染料。与商用绿光和红光OLED材料相比,商用蓝光OLED材料的激子能量高,存在稳定性差、效率低等问题,严重制约了OLED技术的应用场景拓展。高效率、长寿命蓝光OLED是当前各国新型显示技术竞争的科技制高点。近年来,韩国三星与美国UDC(Universal Display Corporation)致力于突破蓝色磷光稳定性,取得了较大进展,对我国OLED产品竞争力与产业安全带来严峻挑战。日本九州大学Adachi教授发展了系列热活化延迟荧光(Thermally Activated Delayed Fluorescence, TADF)蓝光染料,在效率和寿命上取得显著进展^[51,52]。面对OLED国际发展局势,我国科研团队另辟蹊径,在新一代蓝光OLED材料与器件方面取得了重大进展^[23,24,53,54]。例如,清华大学揭示了蓝光染料稳定性的关键,需提升蓝光材料的键解离能与三线态能级的差值^[55]。华南理工大学开发了热激子的蓝光材料,在非掺杂的蓝光器件中实现了效率和稳定性的突破^[56]。清华大学提出了热活化敏化荧光(Thermally Activated Sensitized Fluorescence, TSF)技术,并提出氘代策略以及电子离域策略提升敏化剂稳定性(图2D),构筑的深蓝TSF器件稳定性超过韩国三星的蓝光磷光器件^[57,23]。尽管如此,目前发展的新型蓝光OLED材料体系在色纯度和器件稳定性方面与商用化蓝光OLED材料(顶发光器件寿命LT95>800 h@1 000 cd·m⁻²,色坐标CIEy<0.05)相比仍有很大差距,国内外均尚未实现高效率蓝光材料与器件的量产应用。蓝光OLED材料的稳定性问题仍然是当前OLED领域面临的关键技术挑战。在材料方面,蓝光分子老化机制一直是蓝光OLED材料领域的关键科学问题。在器件方面,探究新型发光机制与技术,发展高

效率和长寿命的蓝光器件,是器件应用的关键难题。

除了可见光OLED,近红外OLED的研究近年来也发展迅速^[58-61],在生物识别、健康监测、传感器等领域展现出广阔的应用前景。例如,吉林大学研发了一系列基于双线态发光机制的自由基发光材料,通过抑制振动与激发态耦合,实现了高效的近红外发光,构筑了高性能的近红外OLED^[62]。苏州大学联合台湾清华大学开发了系列铂配合物,通过优化分子堆积和氙代化策略,降低重组能,抑制非辐射跃迁,获得了发射接近1 000 nm的高性能器件^[54]。华南理工大学选用高跃迁振子强度和高发光效率的给体—受体—给体型稠环电子受体作为发光材料,构筑了超高辐射亮度的近红外OLED^[63]。尽管如此,目前近红外OLED材料的发光效率仍然偏低、器件性能差,严重限制了其产业化应用。如何有效克服能隙定律,仍是当前近红外OLED材料与器件研究面临的共性关键科学问题。

1.2.3 印刷OLED显示材料与技术

印刷显示作为未来显示的关键技术被列为九大未来产业之一,其中印刷OLED显示技术具有低成本、可大面积加工等优势,成为未来显示技术的重要发展方向之一^[64,65]。我国科研院所、高校和企业印刷OLED显示材料与技术方面开展了大量工作,在显示材料、电子墨水与打印工艺、器件结构与阵列等方面获得了具有国际影响力和自主知识产权的创新性研究成果和关键技术^[66-71]。例如,中国科学院长春应用化学研究所研制的星型结构高分子空穴传输材料成功地通过了旋涂器件和打印器件的稳定性评价,蓝光、绿光和红光器件的效率和寿命指标全面达到了实用化水平,被华星光电纳入供应链体系^[72]。华南理工大学在可溶性热活化延迟荧光材料与喷墨打印工艺方面取得重要突破,实现了外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)超过28%的绿光器件^[73]。中国科学院化学研究所在高迁移率聚合物传输材料与墨水配方优化方面也取得了显著进展,推动了印刷OLED显示技术从实验室走向中试阶段^[74]。然而,印刷OLED显示技术仍面临着多方面的挑战:(1)材料方面,目前印刷OLED材料的器件效率和稳定性与蒸镀器件相比仍有一定差距。尤其是蓝光材料,其印刷器件的寿命(LT95)通常不足200 h,而蒸镀器件可达1 000 h以上。(2)效率方面,溶液法制备的蓝光器件EQE普遍低于20%,而真空蒸镀器件可达30%以上。如何发展高效、高稳定性的发光材料(尤其是蓝光材料)与电荷传输/注入材料,是实现印刷OLED产业化的核心难题。(3)工艺方面,目前印刷薄膜的均匀性和可控性还有待提高。喷墨打印中常见的“咖啡环”效应、

像素边缘覆盖率不足等问题导致膜厚偏差超过±5%,远高于蒸镀工艺的±1%要求。此外,墨水溶剂选择、干燥动力学控制、基板润湿性调控等工艺环节的成熟度与稳定性仍需提升。高精度、高均匀性、高重复性的印刷工艺的实现,是制约印刷OLED量产的关键技术瓶颈。

1.2.4 新型有机发光器件与功能集成

有机电泵浦激光(Organic Electrically Pumped Laser, OEPL)^[75,76]和有机发光晶体管(Organic Light-Emitting Transistor, OLET)^[77]作为新型有机发光器件,在信息显示、通信和医疗诊断等领域具有广泛的应用前景。这些器件不仅具备小型化、多功能等优点,还展示了宽波长范围可调谐性,有助于光电器件的高效集成与互联,近年来取得了快速发展^[78-83]。例如,中国科学院长春光机研究所通过调控有机半导体材料的自发发射和受激发射特性,克服了器件光学损耗大的难题,从而在低阈值电流密度($1.8 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)下实现了电泵浦有机半导体激光器^[71]。中国科学院化学研究所和天津大学研究团队发展了具有水平驱动场效应晶体管和垂直发光二极管叠层结构的OLET器件结构,实现了超窄的红、绿、蓝色电致发光,色域覆盖达到了BT.2020标准的97%,同时具有高的电流效率与栅压稳定性^[84]。尽管如此,目前该领域尚面临多重挑战:(1)有机材料需同时具备大的光学增益和高载流子迁移率,但这两者对有机材料来说往往是相互矛盾的要求。例如,高迁移率材料通常具有强 π - π 堆积和高度有序结构,但这会加剧激子猝灭,导致发光效率下降。目前性能最好的OLET材料其迁移率与荧光效率的乘积仍低于 $10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}\%$ 。(2)非辐射的三线态激子诱发的光学损耗、电极损耗、有机材料低热导率和低稳定性等问题也亟待解决。在OEPL中,三线态—三线态吸收(Triplet-Triplet Absorption, TTA)和极化子吸收会导致光学损耗增加,使得阈值电流密度偏高(通常大于 $10 \text{ kA} \cdot \text{cm}^{-2}$);而OLET中沟道区域的激子—极化子猝灭效应也导致效率显著降低。(3)器件结构与制备工艺的发展也受到高迁移率发光材料体系匮乏和器件工艺复杂等方面的限制。例如,OEPL需精确制备分布式反馈光栅结构,线宽偏差需控制在±5 nm以内;而OLET的垂直集成结构对电极界面、绝缘层质量和图案化工艺提出了非常高的要求。

1.3 有机光电探测器

有机光电探测器(Organic Photodetectors, OPDs; 器件结构如图3A所示)领域的研究正处于从实验室创新迈向商业化应用的关键阶段。其发展高度依赖于材料、器件与稳定性三个层面的协同突破。当前,材料设计的核心在于开发兼具窄带隙、高迁移率与优异稳定性的新材

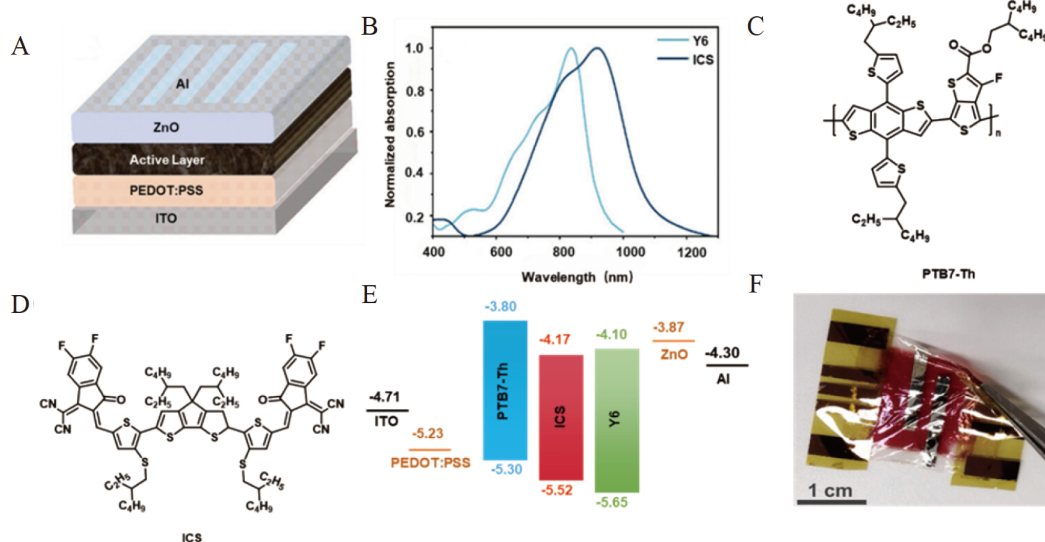


图3 A. OPD器件结构示意图; B. OPD受体Y6及ICS的吸收光谱图; C. 给体分子PTB7-Th的结构示意图; D. 受体分子ICS结构示意图; E. PTB7-Th, ICS, Y6的能级分布^[85]; F. 柔性OPD器件照片^[86]

Fig.3 A. Schematic Diagram of the OPD Device Structure; B. Absorption Spectra of OPD Acceptors Y6 and ICS; C. Chemical Structure of Donor Molecule PTB7-Th; D. Chemical Structure of Acceptor Molecule ICS; E. Energy Level Alignment of PTB7-Th, ICS, and Y6^[85]; F. Photograph of the Flexible OPD Device^[86]

料体系;器件优化则重点围绕抑制暗电流、提升响应速度与增强环境稳定性展开研究。尽管OPDs在生物传感、成像和光通信等领域展现出巨大应用潜力,但其性能与稳定性仍需提升,以适应实际应用。未来研究需要着力攻克材料本征特性、器件物理与工作环境稳定性等一系列科学与技术挑战,以推动该技术的产业化进程。

1.3.1 高吸光系数窄带隙OPD材料

发展高灵敏OPD的核心在于获得具有高吸光系数与合适能带结构的光敏材料。近年来,以给体—受体型有机半导体为代表的光敏体系在可见光至近/短波红外波段表现出优异的光响应特性(如图3B所示)。其中,超窄带隙有机高分子给体材料(如图3C所示)与有机受体材料(如图3D所示),通过分子平面化设计、 π - π 堆积增强与氢键辅助作用,实现了 10^5 cm^{-1} 以上的高吸光系数。国际上,帝国理工大学发展了吸收可达1300 nm的系列有机高分子光敏材料体系^[87]。国内,华南理工大学、中国科学院化学研究所、长春应用化学研究所、阳明交通大学等报道了多种有机受体和共轭聚合物给体体系,制备的OPD器件在900~1100 nm和1100~1400 nm波段分别实现了超过60%和20%的EQE^[88,89]。此外,通过能级精细调控和分子取代策略,研究者实现了能带梯度调控和光谱可调响应,为多波段探测和成像应用奠定了基础。

然而,高吸光系数的窄带隙有机光电探测材料仍面临显著挑战。首先,窄带隙材料通常伴随更高的本征载流子浓度和较低的能级势垒,易引起OPD器件暗电流上

升;其次,相比宽带隙材料,窄带隙材料由于具有更加明显的激子—振动耦合,更多的能量将被转化为热能耗散掉;再者,高吸光系数材料的载流子迁移率和激子解离效率有限,厚膜器件中易发生非辐射复合损失;此外,窄带隙体系在热稳定性与形貌稳定性方面有待提升,制约了长期稳定性。其关键科学问题在于如何降低窄带隙材料中的激子—振动耦合并减少其带来的影响,以及如何通过分子的精确设计对抗热力学熵增与缺陷活化。未来应从分子设计层面探索兼具强吸收、低陷阱态密度、强结晶及高迁移率的新型光敏材料,如新型 π 共轭稠环结构、受限聚集结构、大位阻刚性结构及二维共轭结构等;同时结合印刷工艺与能级工程,构筑高吸收、低漏电流的有机光敏材料体系,支撑OPD在弱光和红外场景下实现高效探测。

1.3.2 低噪声可见—短波红外宽光谱OPD器件

低噪声、宽光谱响应的器件结构是OPD面向应用的关键优势。器件噪声主要来源于暗电流、界面陷阱及 $1/f$ 噪声,而其比探测率(D^*)直接决定了弱光探测能力^[90]。国际上,三星等公司通过在OPD器件中引入多势垒结构与界面钝化层,在维持高响应度的同时实现了 $10^{-9} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 量级的暗电流水平。我国的研究团队也在界面工程与器件结构优化方面取得了系列突破。德累斯顿工业大学团队通过光学腔实现可调谐、窄带有机光探测器,实现了从可见光到近红外光谱的连续光响应和与商业无机光电探测器相当的暗电流和探测率^[91];国内华南理工大学团队基于“激子解离窄化”机制,在激子耗散

层和激子解离层之间引入空穴选择层,实现红外光谱选择性响应,并进一步通过掺杂补偿策略,有效降低红外有机探测器暗电流密度至 $10^{-10} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,实现了高灵敏器件的制备^[92]。

尽管研究取得进展,宽光谱OPD器件仍存在暗电流密度高、结构复杂等问题。多层界面体系中势垒不匹配与能带错位导致载流子损耗与噪声漂移,从而增大界面陷阱态密度,影响器件噪声。其关键科学问题在于界面能级调控与陷阱态抑制机制的定量理解。未来的研究可聚焦于界面分子钝化、能带匹配调控(如图3E所示)及有机/无机复合势垒设计,结合光学微腔增强与梯度吸收结构,实现低噪声、高增益、宽光谱的OPD器件。进一步揭示噪声来源的物理机制和光电耦合规律,将为突破OPD探测灵敏度极限提供理论与技术基础。

1.3.3 OPD老化机制研究与稳定性提升

研究有机光探测器老化机制并提升其面向高温、高湿环境下使用的长期稳定性是实际应用与产业化的核心问题之一。相比无机探测器,有机材料体系更易受到光照、热应力与环境湿氧的耦合影响,导致性能衰减与失效^[93]。OPD的老化过程通常涉及多种协同机制:有机分子的化学降解(如C-N/C-S键断裂)、受体分子氧化、界面势垒漂移以及离子迁移和陷阱积累等。国际上,法国波尔多大学系统研究了有机光探测器在长时间运行下的稳定性与老化机制,建立了以暗电流漂移和T80寿命为核心的评价模型。该工作通过优化界面势垒和降低陷阱密度,制备了3 000 h长期稳定工作的OPD器件^[94]。明志科技大学通过优化给受体能级匹配与界面相容性,使得在空气中连续工作500 h的器件仍能保持稳定性能。该成果证明了材料—界面协同设计可显著提升OPD的环境与热稳定性,为无封装条件下的高可靠有机探测器提供了可行途径^[95]。

尽管如此,OPD的老化机理仍存在诸多未解问题。首先,材料与界面老化过程的时间与空间尺度差异大,缺乏统一的加速老化模型;其次,厚膜OPD中应力积累与形貌演化加剧了性能退化;此外,现有封装技术难以同时满足柔性化与高阻隔要求。核心科学问题在于建立从分子到器件的多尺度稳定性模型,揭示载流子、陷阱与化学反应之间的耦合关系。未来的研究方向包括:通过第一性原理与机器学习手段预测分子稳定性与老化路径;发展高键能、高电化学稳定性的窄带隙有机光电探测材料;设计自钝化界面与低渗透封装体系,为有机光探测技术的商业化奠定基础。

1.3.4 大面积柔性OPD阵列器件与显示集成

柔性、大面积、有机光电集成阵列是实现下一代智

能感知与显示系统的重要方向。柔性OPD(如图3F所示)阵列结合OLED显示可实现“发光—探测”一体化功能,用于生物识别、交互显示、智能成像等新兴领域^[96]。近年来,我国在柔性OPD阵列与OLED集成方向上取得了系列创新成果。国际上,东京大学将近红外高灵敏OPD与多晶硅TFT读出电路集成在约15 μm 厚的柔性基底上,达到508 ppi分辨率,并可低噪声读取<10 pA的微弱光电流,通过贴合皮肤同时获取指纹与静脉图像,并对脉搏波进行空间映射以辅助选点和生命体征监测^[97]。日本半导体能源实验室报道了在OLED像素结构中并列集成OPD的新型显示架构,实现了显示与光探测的协同同面设计,且无需额外封装或透光窗口。该设计有效抑制了像素间光串扰,并验证了在同一显示面板上实现同步发光与感光的可行性,为下一代“显示—感知”一体化OLED面板奠定了基础。这些研究为新型智能感知显示和人机交互技术奠定了基础。

然而,柔性集成OPD阵列仍面临若干技术瓶颈。首先,溶液涂布和喷墨打印的厚度均匀性与图案边界控制仍有限,导致阵列响应一致性不足;其次,柔性电极在反复应变下易发生断裂与电阻波动;再次,OPD与OLED在电压、发热与封装要求方面存在工艺不兼容问题。关键科学问题在于如何构建光电参数匹配、力学稳定、可批量制造的有机光电一体化体系。未来研究可集中在低温可印刷高迁移率光敏材料、超低渗透柔性封装以及光电共集成化设计架构。通过材料与结构协同优化,有望实现柔性、高分辨率、长寿命的OPD-OLED一体化阵列,推动新型显示与感知系统的技术融合。

2 重点研究方向和科学难题

有机高分子光电材料作为新一代能源与信息技术的核心,在光伏、发光显示及光电探测等领域展现出广阔的应用前景。然而,其从实验室研究走向规模化应用,仍面临一系列共通的科学瓶颈与工艺挑战,主要体现在以下四方面。(1)材料设计与性能的内在矛盾:高电荷迁移率与高发光效率、窄光学带隙与低噪声特性、高结晶有序性与良好溶液加工性之间,往往存在难以兼顾的制约关系。(2)界面与稳定性问题:能级失配、界面化学反应、活性层形貌随时间演变以及水氧渗透等,均会导致器件性能衰减,制约其工作寿命。(3)大面积制备工艺瓶颈:溶液法成膜的均匀性、图形化精度、多层结构集成兼容性问题,限制了高效、稳定器件的大规模制备。(4)器件物理机制尚不明确:激子解离与复合的微观路径、非辐射能量损失渠道、器件退化机理等关键物理过程缺乏清晰的定量描述与统一理论模型。此外,

光电器件的热效应将降低光—电、电—光转换效率及探测率,抑制器件的非辐射复合所导致的热效应对于提升器件的转换效率、探测率及稳定性至关重要;如何利用有机光热器件将热能转换为电能,变废为宝,这也是有机高分子光电材料很有前景的发展方向之一。为突破上述瓶颈,推动新一代有机光电器件发展,需要在以下方向协同发力:加强跨尺度理论与模拟研究,建立“分子结构—聚集态行为—器件性能”的关联模型;发展高通量计算与机器学习辅助的材料智能设计方法;攻克印刷电子、柔性封装、光电集成等核心工艺;并围绕穿戴电子、车载显示、生物传感等具体场景,开展“材料—器件—系统”协同创新。

基于有机光电材料在实际应用中的关键科学问题和技术瓶颈,我们针对光伏、发光和光探测三大方向,凝练了其重点研究方向和主要的科学难题(图4)。以期通过顶层设计和科学规划,积极配置资源和部署研究力量,积极开展团队攻关,推动有机高分子光电材料研究范式向工程化和产业化方向发展,提升我国在有机光电材料领域产学研优势,为实现有机光电材料商业化应用提供材料和技术支撑。

2.1 有机光伏材料与器件

有机光伏器件(Organic Photovoltaic Device, OPV)具有柔性、质轻、半透明等功能优势,具有重要的产业化潜质。随着有机光伏分子设计、形貌调控和器件结构设计的不断进步,有机光伏器件认证效率已经接近21%。OPV材料方面,我国科学家在光活性层材料及界面材料研究方面处于国际领先,材料具有原创性;器件产业端,瑞典Epishine AB公司、法国Dracula Technologies公司等较早进行了OPV产业化尝试,处于初创爬坡阶段。国

内,浙江大学与广州追光科技有限公司共同开发出室内光伏组件、柔性光伏组件、半透明光伏组件等一系列原型产品,完成了物联网传感器供能模块等场景验证。广州追光科技有限公司建成了全球首条650×550 mm² OPV模组量产线,推出了面向室内光发电的iLux系列OPV模组产品,率先实现OPV技术在室内光伏场景的商业化应用。随着产品化技术的进一步成熟,OPV技术将逐渐扩大在建筑墙面、窗户、穿戴等领域的应用。为实现这些目标,仍需解决一系列重要问题。

2.1.1 突破效率瓶颈的有机光伏材料体系的创制

效率是光伏技术的核心指标,进一步提升有机光伏的效率,仍是有机光伏领域面临的重要科学问题。为了进一步提高有机光伏效率,必须开发具有低激子结合能和低非辐射复合损耗的新型光伏材料。为此,应重点开展以下研究工作:

(1)加强有机光伏材料和器件的基础理论研究,建立并完善有机半导体理论。研究电荷与激子动力学、电子局域态,建立范德华力和 π - π 相互作用的定量模型;发展新的理论和方法,促进从激子到自由载流子的快速转变,以改善非晶态材料的光电性能;了解分子三重态与光电过程之间的耦合机制;完善并发展“刚性”聚合物相分离理论。

(2)加速材料迭代,建立器件性能与分子结构的关系,结合人工智能和机器学习,提高分子结构设计能力,开发精准合成目标分子和聚合物的新方法。

2.1.2 高效柔性大面积有机光伏模组的制备

大面积器件模组化是有机光伏迈向应用的必经环节。现阶段,柔性大面积有机光伏模组效率低于小面积器件的问题十分突出,其核心制约因素主要集中在厚膜

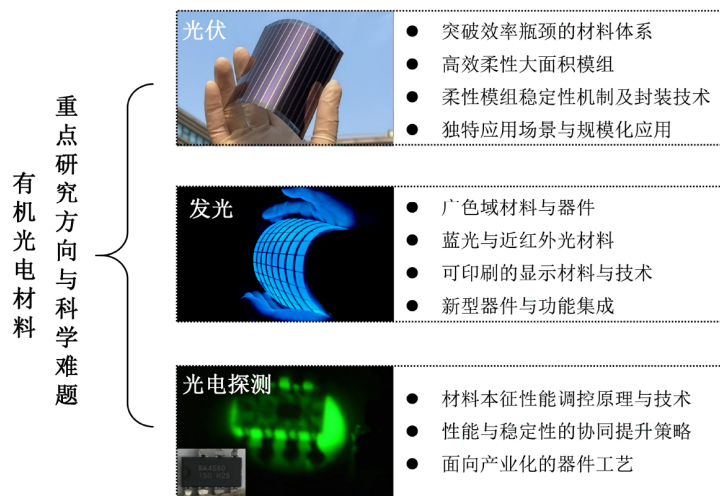


图4 有机光电材料的重点研究方向与科学难题

Fig.4 Key Challenges and Major Research Directions of Organic Optoelectronic Materials and Devices

活性层材料的设计、透明电极的平整性及均匀涂布的工艺。为突破这一困境,实现高效柔性大面积有机光伏模组的制备,需重点推进以下研究工作:

(1)研发适合大面积模组制备的光活性层材料,该类材料需满足以下要求:一是具备低成本规模化合成能力;二是拥有优异的批次重复性,保障模组性能稳定性;三是器件性能对膜厚不敏感,突破厚膜制备中的效率损耗瓶颈。

(2)开发高品质的柔性透明电极材料,实现多性能参数的协同平衡:既要保证出色的表面平整性以降低界面电荷损失,又要兼顾高透光率以提升光吸收效率,同时满足优异电导率与良好机械柔韧性,适配柔性模组的弯折与应用场景需求。

(3)研发可控的薄膜涂布技术,深入解析薄膜大面积干燥过程中的界面演化、相分离机制,建立干燥工艺与薄膜微观结构的关联模型,实现大面积、高均一性光活性层薄膜的精准可控制备,为模组效率提升奠定工艺基础。

2.1.3 柔性有机光伏模组的稳定性机制及封装技术

全光谱、全天候的环境下,能够稳定且优异运行是有机光伏技术迈向规模化应用的前提。针对当前有机光伏器件存在本征稳定性衰减机制尚未清晰问题、高效柔性水氧及紫外光阻隔材料及封装技术亟待突破问题等,应重点开展以下研究工作:

(1)系统探明光活性层材料、聚集态形貌及电荷传输界面在不同光照(波长、强度)和温度环境下的衰减规律,研发稳定的新型结构材料体系。

(2)研究具备高水氧阻隔和优异紫外光屏蔽性能的柔性封装材料及封装工艺,有效阻断水、氧、紫外光及温度(长波红外)等外部因素对薄膜与界面的诱导衰减作用。

(3)统筹平衡封装性能、封装工艺和机械柔韧性的协同关系,确保封装后器件仍保持优异的机械柔韧性,实现封装器件与柔性应用场景的高度兼容。

2.1.4 有机光伏独特应用场景与规模化应用

有机光伏材料质量轻、柔韧性优、可半透明、吸收带隙易于调节,可弥补现有晶体硅光伏技术的不足,在室内光伏、建筑集成、车载光伏、可穿戴电子集成等方面实现独特应用。为此,应重点开展以下工作:

(1)室内光伏应用。有机半导体带隙易于调节至与室内光光谱相匹配,在室内光照下,有机光伏器件避免了紫外光/强光稳定性差、载流子迁移率低的问题,其效率高于晶硅电池和非晶硅电池,结合其柔性易于集成的优点,有机光伏器件有望全面替代室内光伏市场的非晶

硅光伏电池。要实现室内光伏应用,需设计合成宽带隙(1.7~1.8 eV)、低成本、膜厚不敏感的光活性层材料,并降低器件暗电流,以提升室内光照下的PCE。

(2)建筑、车载和可穿戴等方面的集成应用,将为有机光伏技术创造更大的市场空间。对于建筑/车载窗户集成应用,重点研发近红外吸收的光活性层材料、平衡器件的可见光透过率、PCE与器件稳定性;对于可穿戴、曲面以及高功率质量比方面的集成应用,重点关注机械柔韧性/器件质量,开发超薄、超柔、可拉伸有机光伏器件及其模组,实现机械柔韧性、效率与稳定性的平衡。

2.2 有机电致发光材料与器件

2.2.1 广色域OLED材料与器件

随着超高清显示技术迭代的加速,广色域BT.2020标准已成为OLED产业竞争的制高点。现有窄发射OLED材料体系在色纯度与光谱覆盖度等方面存在固有缺陷,导致其光色难以完全满足BT.2020色域的需求。广色域OLED材料与器件的突破需要从理论、材料、器件以及工艺四个维度联合攻关,未来需要重点关注的研究方向包括:

(1)加强理论机制研究,重点研究光谱窄化的本质与极限,探明振动与激发态耦合与解耦合机制,丰富并完善“孤子”发光理论,揭示电子迁移与能量转化规律。

(2)建立广色域发光材料的构效关系,发展合理的理论预测模型,打破现有材料体系的国际专利壁垒,提出光谱窄化的新策略,创制具有自主知识产权的广色域发光材料体系。

(3)实现广色域发光材料的产业化应用,重点研究基于敏化机制的新型荧光技术,借助AI技术等加快材料体系的创制与迭代,加速热活化敏化荧光技术的产业化进程,确立我国在超高清显示OLED技术产业化方面的优势。

2.2.2 蓝光与近红外OLED材料

高稳定性蓝光OLED材料与高效率近红外OLED材料一直是OLED领域的两个研究难点,其后续发展需要从理论机制、材料设计以及器件工程多角度协同突破。未来需要重点关注的方向包括:

(1)在蓝光OLED材料方面,从激子能量、共价键的键能和键解离能等多维度,深入研究蓝光材料稳定性机制,建立合理的理论机制模型:探究迁移率、激子与极化子的相互作用以及能量传递等对材料稳定性的内在影响规律,研究材料的光、电、热稳定性,揭示工况下的材料老化机制。结合热激子、热活化敏化荧光以及磷光等不同的发光机制,创制具有自主知识产权的高效率长寿命蓝光材料体系,发展与蓝光材料相匹配的高稳定性主

体材料。结合材料搭配、激子管理、光场调控以及器件工艺优化,构筑高效率、长寿命、窄光谱的蓝光OLED。

(2)在近红外OLED材料方面,加强激子与声子的耦合与去耦合机制研究,建立明确的近红外发光材料的构效关系:从分子结构优化、分子堆积调控、发光机制创新等多方面,提出克服能隙定律的新途径。设计合成具有 α 型电子跃迁特性和高自旋量子态的发光自由基,通过研究其激发态基本问题,揭示从高能激发态至第一激发态的弛豫途径。在此基础上,创制具有高发光效率的新型近红外OLED材料体系,实现高效率、高稳定性的近红外OLED。

2.2.3 印刷OLED显示材料与技术

印刷OLED显示材料与技术的突破需跨越材料、工艺、设备等多学科交叉的壁垒,涉及从分子设计到宏观制备的多个尺度耦合问题。在溶液加工过程中,材料自组装行为、膜层形成动力学与多层界面演化之间的关联机制尚不明确,严重制约了器件效率和稳定性的协同提升。此外,印刷OLED材料的产业化应用还要求建立不同于蒸镀技术的新一代技术标准与供应链体系,这是一个系统性、长周期的创新过程。未来需要重点关注的研究方向包括:

(1)研究印刷OLED显示关键材料的宏量合成、墨水配制和器件稳定性的提升方法,重点开发溶液加工型窄谱带发光材料(尤其是蓝色发光材料)、长寿命蓝光材料(LT95>800 h)、高迁移率电荷传输材料与低注入势垒电极界面材料。

(2)深入研究印刷工艺,发展基于流体动力学与界面工程的“打印精度控制物理模型”,优化喷墨打印头设计与技术参数,实现膜厚均匀性(偏差 $\leq 3\%$)、像素定位精度($\leq 2\ \mu\text{m}$)和工艺窗口的显著提升。

2.2.4 新型有机发光器件与功能集成

有机电泵浦激光和有机发光晶体管的进一步发展需要从根本上解决有机材料中“高迁移率”与“强发光”之间的矛盾,并突破激子管理、光场调控与热管理等多重物理极限。这类器件涉及光电耦合、激发态动力学、微纳光子学等多学科前沿问题,对其进行深入研究将推动有机光电子学的发展。发展高效有机电泵浦激光和有机发光晶体管等新型发光器件,以下问题需要重点解决:

(1)在分子设计与材料开发方面,重点关注多层次/多尺度下电荷高离域(对应高迁移率)与激子高局域(对应强发光)的调控与平衡。发展具有高光致发光量子产率(PLQY>90%)、快辐射跃迁速率($k_r > 10^8\ \text{s}^{-1}$)和高载流子迁移率($\mu > 0.1\ \text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$)的有机材料体系。

(2)在器件结构方面,设计具有低损耗的光学谐振微腔结构(如分布反馈光栅、光子晶体微腔等),加强光场限制,降低泵浦阈值;在OLET中通过栅压调控激发态动力学,发展具有高效率、低压驱动、高稳定性的多功能集成器件。同时,需建立适用于柔性衬底的低温、高精度图形化工艺。

2.3 有机光电探测器

有机光电探测器在比探测率、响应速度及光谱覆盖范围等方面虽已取得显著进展,在柔性、大面积和低成本应用场景中展现出不可替代的潜力,但与III-V族半导体探测器相比,其在信噪比、稳定性及红外探测能力等方面仍存在差距^[93]。要进一步推动其从实验室研究走向实际应用,亟需在材料设计、器件工艺与稳定性等多个层面实现协同创新,系统解决以下关键科学问题与技术难题。

2.3.1 材料本征性能的调控

欲实现OPDs在近红外至短波红外波段与无机探测器媲美,需从材料本征特性入手。当前基于Y6等小分子受体的体系在比探测率和响应速度方面虽已取得显著进展,但仍面临乌尔巴赫能高、能量无序性显著及非辐射复合损失等关键科学问题,导致暗电流偏高、外量子效率受限,尤其在红外波段与无机探测器差距明显^[94]。突破这一瓶颈需聚焦于材料本征属性的调控,发展具有高迁移率、低陷阱态密度、高介电常数及优异稳定性的新材料。分子设计需注重增强共轭刚性及结晶有序性,优化能级匹配,并探索高荧光量子产率材料体系以抑制非辐射复合,实现高效的激子解离与电荷传输。增强结构单元的推/拉电子能力以提升分子内电荷转移(Intramolecular Charge Transfer, ICT)作用,以及引入具有醌式效应的基团(如环外双键、噻吩[3, 4-b]并噻吩)促进 π 电子的更加离域,是将有机半导体的吸光范围拓展1 000 nm以上的有效策略^[95],这对于OPD器件的发展及应用有重要的意义。

2.3.2 面向产业化的器件工艺

面向商业化应用,须发展高效、稳定、柔性的大面积OPDs制备技术。当前研究多集中于小面积刚性衬底器件,与实际应用所需的大面积、柔性化、集成化模块仍有较大距离^[96]。有机半导体激子扩散长度短,活性层厚度通常限于100~300 nm,在大面积制备过程中易出现膜层不均、针孔、界面缺陷等问题,导致器件漏电、短路和性能急剧下降^[97]。要实现更适配商业化应用的OPDs,需重点解决以下问题:(1)厚膜活性层技术。开发在膜厚超过500 nm时仍具高EQE与低噪声的活性层材料。(2)柔性电极与衬底。发展兼具高透光、高导电、低粗糙

度及优异机械韧性的柔性透明电极,避免界面缺陷引起的暗电流升高。(3)大面积成膜工艺。推进狭缝涂布、喷墨打印、卷对卷(R2R)等低温溶液法工艺,实现均匀、无缺陷的高质量薄膜制备。(4)模块与集成。研究OPD阵列与信号读取电路、放大器的单片集成技术,提升系统信噪比与空间分辨率。

2.3.3 器件稳定性的协同提升策略

器件的长期运行稳定性是制约其实际应用的核心挑战。OPDs在光照、湿热及机械应力作用下易发生性能衰退,主要退化机制包括有机材料的光氧化、界面化学反应、活性层形貌演变以及水氧侵入导致的电极与功能层腐蚀^[98]。解决稳定性问题必须结合本征增强与外部封装策略。(1)本征稳定性提升:设计具有高光、热、化学结构稳定的窄带隙材料,抑制光照下的分子结构退化;开发稳定的界面层材料,防止界面反应与离子迁移。(2)高效柔性封装技术:开发高阻隔、耐弯折、抗紫外辐射的新型柔性封装薄膜与结构设计,在阻隔水氧的同时保持器件的机械柔性;此外,还应注意封装层引入可能带来的界面附加应力与光学损耗,而且需要在封装性能与器件柔性之间取得平衡。(3)老化机制与寿命预测:建立加速老化测试平台与可靠性模型,研究OPDs在不同应力条件下的退化机制,为材料筛选与封装设计提供理论依据。

3 发展政策建议

在对以上有机光伏材料与器件、机电致发光和有机光探测三大主题进行深入讨论的基础上,提出以下发展政策建议:

(1)致力于新型有机光电材料的创制,打破传统思路,结合人工智能,加速材料智能化研发,加大对有机光电材料探索性研究的支持力度,关注并鼓励原创性与非共识性的科研工作,在有机高分子光电材料领域,推动新材料发现、新现象揭示等源头创新的探索与突破。

(2)在自然科学基金委的引导和支持下,积极推动有机光电领域开展有组织的科研,通过重大/重点项目群的方式,跨越高校学科组织界限,高效整合领域内优势多学科资源以及不同研究背景的专家学者协同开展任务导向型的研究。加强自然科学基金委主导的重大科研仪器研制项目的资助力度,并建立相应的仪器共享机制,完善有机光电材料和器件的制备和表征平台。

(3)积极探索不同的资助方式,联合自然科学基金委与地方人民政府、企业和其他组织投入资金开展联合资助,建立科技创新合作新机制,探索并实施多元化的人才支持模式,建立并完善有机光电材料领域高端人

才库。

(4)注重学科交叉与融合,加强材料凝聚态物理的研究,加深对有机光电材料工作物理机制的理解,提升对原创性研究工作的包容度。

(5)人工智能是引领未来的战略性技术,是新一轮科技革命和产业变革的核心驱动力量。在有机光电材料领域引入人工智能和机器学习的研究范式,通过理论、数据与自动化相结合,坚持“四个面向”,加快有机高分子光电材料领域的科技创新。

(6)面向产业需求开展产学研研究,重点支持具有产业化前景的有机光伏、发光显示、近红外探测成像等方向的研究工作,加强科技创新和产业创新深度融合,以科技创新推动产业创新,及时将科技创新成果应用到具体产业链上,发展新质生产力,为新一代能源技术和新型显示技术等战略性新兴产业的发展提供重要理论和技术支撑。

4 结语

有机高分子光电材料是国家新一代能源技术、新型显示技术等战略性新兴产业的关键核心。通过聚焦有机高分子光电材料在光伏发电、发光显示和光探测等应用中的关键科学问题和技术瓶颈,本文系统梳理并凝练出导致材料与器件应用受限的关键基础科学问题,展望了有机高分子光电材料的发展趋势,并提出了其发展政策建议,不仅为有机高分子光电材料领域的后续科研与技术突破提供明确指引,更将为有机光电材料与器件相关产业突破技术壁垒、实现高质量发展注入强劲动力,助力我国在有机高分子光电材料领域持续巩固竞争优势、迈向国际领先行列。

致谢 感谢论坛秘书组成员张建齐、高珂、龚少龙、左立见、李宁、邵世洋、朱晓张等在综述论文整理过程中提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] Zhang DD, Duan L, Li C, et al. High-efficiency fluorescent organic light-emitting devices using sensitizing hosts with a small singlet-triplet exchange energy. *Advanced Materials*, 2014, 26(29): 5050—5055.
- [2] Hatakeyama T, Shiren K, Nakajima K, et al. Ultrapure blue thermally activated delayed fluorescence molecules: Efficient HOMO-LUMO separation by the multiple resonance effect. *Advanced Materials*, 2016, 28(14): 2777—2781.
- [3] Kim HJ, Yasuda T. Narrowband emissive thermally activated delayed fluorescence materials. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(22): 2201714.
- [4] Zheng XJ, Zuo LJ, Yan KR, et al. Versatile organic photovoltaics with a

- power density of nearly 40 W g⁻¹. *Energy & Environmental Science*, 2023, 16(5):2284—2294.
- [5] Yao Y, Liang Y, Shrotriya V, et al. Plastic near-infrared photodetectors utilizing low band gap polymer. *Advanced Materials*, 2007, 19(22): 3979—3983.
- [6] Gong X, Tong MH, Xia YJ, et al. High-detectivity polymer photodetectors with spectral response from 300 nm to 1450 nm. *Science*, 2009, 325(5948):1665—1667.
- [7] Li C, Song JL, Lai HJ, et al. Non-fullerene acceptors with high crystallinity and photoluminescence quantum yield enable >20% efficiency organic solar cells. *Nature Materials*, 2025, 24(3):433—443.
- [8] Chen HY, Huang YT, Zhang R, et al. Organic solar cells with 20.82% efficiency and high tolerance of active layer thickness through crystallization sequence manipulation. *Nature Materials*, 2025, 24(3): 444—453.
- [9] Jiang YY, Sun SM, Xu RJ, et al. Non-fullerene acceptor with asymmetric structure and phenyl-substituted alkyl side chain for 20.2% efficiency organic solar cells. *Nature Energy*, 2024, 9(8):975—986.
- [10] Sun YD, Wang L, Guo CH, et al. π -extended nonfullerene acceptor for compressed molecular packing in organic solar cells to achieve over 20% efficiency. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(17):12011—12019.
- [11] Wang J, Wang PR, Chen TQ, et al. Isomerism effect of 3D dimeric acceptors for non-halogenated solvent-processed organic solar cells with 20 % efficiency. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(12):e202423562.
- [12] Guan ST, Li YK, Bi ZZ, et al. Fine-tuning the hierarchical morphology of multi-component organic photovoltaics *via* a dual-additive strategy for 20.5% efficiency. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(1): 313—321.
- [13] Zhu L, Zhang M, Zhou GQ, et al. Achieving 20.8% organic solar cells *via* additive-assisted layer-by-layer fabrication with bulk p-i-n structure and improved optical management. *Joule*, 2024, 8(11):3153—3168.
- [14] Wei N, Chen JN, Cheng YT, et al. Constructing multiscale fibrous morphology to achieve 20% efficiency organic solar cells by mixing high and low molecular weight D18. *Advanced Materials*, 2024, 36(41):2408934.
- [15] Ren JZ, Wang JQ, Qiao JW, et al. Manipulating aggregation kinetics toward efficient all-printed organic solar cells. *Advanced Materials*, 2025, 37(11):2418353.
- [16] Guan ST, Li YK, Xu C, et al. Self-assembled interlayer enables high-performance organic photovoltaics with power conversion efficiency exceeding 20%. *Advanced Materials*, 2024, 36(25):2400342.
- [17] Chen ZY, Ge JF, Song W, et al. 20.2% efficiency organic photovoltaics employing a π -extension quinoxaline-based acceptor with ordered arrangement. *Advanced Materials*, 2024, 36(33):2406690.
- [18] Wang SY, Wang SX, Wang JR, et al. Achieving 20% efficiency in organic solar cells through conformationally locked solid additives. *Advanced Energy Materials*, 2026, 16(3):2405205.
- [19] Chen YJ, Zheng YQ, Wang J, et al. Ultranarrow-bandgap small-molecule acceptor enables sensitive SWIR detection and dynamic upconversion imaging. *Science Advances*, 2024, 10(23):eadm9631.
- [20] Yin BY, Zhou X, Li YY, et al. Sensitive organic photodetectors with spectral response up to 1.3 μm using a quinoidal molecular semiconductor. *Advanced Materials*, 2024, 36(19):2310811.
- [21] Zhang Y, Chen JW, Yang J, et al. Sensitive SWIR organic photodetectors with spectral response reaching 1.5 μm . *Advanced Materials*, 2024, 36(41):e2406950.
- [22] Huang KH, Jiang BH, Lu HC, et al. Electron-rich heptacyclic S,N heteroacene enabling C-shaped A-D-A-type electron acceptors with photoelectric response beyond 1000 nm for highly sensitive near-infrared photodetectors. *Advanced Science*, 2025, 12(9):2413045.
- [23] Huang TY, Wang Q, Zhang H, et al. Delocalizing electron distribution in thermally activated delayed fluorophors for high-efficiency and long-lifetime blue electroluminescence. *Nature Materials*, 2024, 23(11): 1523—1530.
- [24] Sun J, Ahn H, Kang S, et al. Exceptionally stable blue phosphorescent organic light-emitting diodes. *Nature Photonics*, 2022, 16(3):212—218.
- [25] Huang JF, Lee J, Vollbrecht J, et al. A high-performance solution-processed organic photodetector for near-infrared sensing. *Advanced Materials*, 2020, 32(1):1906027.
- [26] Du ZF, Luong HM, Sabury S, et al. High-performance wearable organic photodetectors by molecular design and green solvent processing for pulse oximetry and photoplethysmography. *Advanced Materials*, 2024, 36(9):2310478.
- [27] Tang CW. Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied Physics Letters*, 1986, 48(2):183—185.
- [28] Yu G, Gao J, Hummelen JC, et al. Polymer photovoltaic cells: Enhanced efficiencies *via* a network of internal donor-acceptor heterojunctions. *Science*, 1995, 270(5243):1789—1791.
- [29] Lin YZ, Wang JY, Zhang ZG, et al. An electron acceptor challenging fullerenes for efficient polymer solar cells. *Advanced Materials*, 2015, 27(7):1170—1174.
- [30] Yuan J, Zhang YQ, Zhou LY, et al. Single-junction organic solar cell with over 15% efficiency using fused-ring acceptor with electron-deficient core. *Joule*, 2019, 3(4):1140—1151.
- [31] Liu JS, Jiang JZ, Wang SP, et al. Fast response organic tandem photodetector for visible and near-infrared digital optical communications. *Small*, 2021, 17(43):2101316.
- [32] Lu X, Xie C, Liu Y, et al. Increase in the efficiency and stability of large-area flexible organic photovoltaic modules *via* improved electrical contact. *Nature Energy*, 2024, 9(7):793—802.
- [33] Li C, Zhou JD, Song JL, et al. Non-fullerene acceptors with branched side chains and improved molecular packing to exceed 18% efficiency in organic solar cells. *Nature Energy*, 2021, 6(6):605—613.
- [34] Zhang MJ, Guo X, Ma W, et al. A large-bandgap conjugated polymer for versatile photovoltaic applications with high performance. *Advanced Materials*, 2015, 27(31):4655—4660.
- [35] Liu QS, Jiang YF, Jin K, et al. 18% Efficiency organic solar cells. *Science Bulletin*, 2020, 65(4):272—275.
- [36] Chen SH, Zhu ST, Hong L, et al. Binary organic solar cells with over 19% efficiency and enhanced morphology stability enabled by asymmetric acceptors. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(12):e202318756.
- [37] Jiang YY, Sun LL, Jiang FY, et al. Photocatalytic effect of ZnO on the stability of nonfullerene acceptors and its mitigation by SnO₂ for

- nonfullerene organic solar cells. *Materials Horizons*, 2019, 6(7): 1438—1443.
- [38] Liu BW, Sandberg OJ, Qin J, et al. Inverted organic solar cells with an in situ-derived SiO_xN_y passivation layer and power conversion efficiency exceeding 18%. *Nature Photonics*, 2025, 19(2): 195—203.
- [39] Li MP, Tian LL, He F. How can we improve the stability of organic solar cells from materials design to device engineering? *Aggregate*, 2024, 5(5): e567.
- [40] Wang YW, Luke J, Privitera A, et al. The critical role of the donor polymer in the stability of high-performance non-fullerene acceptor organic solar cells. *Joule*, 2023, 7(4): 810—829.
- [41] Basu R, Gumpert F, Lohbreier J, et al. Large-area organic photovoltaic modules with 14.5% certified world record efficiency. *Joule*, 2024, 8(4): 970—978.
- [42] Yin C, Xin YY, Huang TY, et al. Ultra-low power-consumption OLEDs via phosphor-assisted thermally-activated-delayed-fluorescence-sensitized narrowband emission. *Nature Communications*, 2025, 16: 30.
- [43] Tan WL, Yu Y, Shi TY, et al. Achieving ultra-narrow-band deep-red electroluminescence by a soliton-type dye squaraine. *Advanced Materials*, 2024, 36(46): 2410418.
- [44] Hua T, Cao XS, Miao JS, et al. Deep-blue organic light-emitting diodes for ultrahigh-definition displays. *Nature Photonics*, 2024, 18(11): 1161—1169.
- [45] Pu YX, Cai XL, Qu YP, et al. Spiro-carbon-locking and sulfur-embedding strategy for constructing deep-red organic electroluminescent emitter with high efficiency. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(8): e202420253.
- [46] Fan XC, Wang K, Shi YZ, et al. Ultrapure green organic light-emitting diodes based on highly distorted fused π -conjugated molecular design. *Nature Photonics*, 2023, 17(3): 280—285.
- [47] Wang X, Wang L, Meng GY, et al. Improving the stability and color purity of a BT.2020 blue multiresonance emitter by alleviating hydrogen repulsion. *Science Advances*, 2023, 9(19): eadh1434.
- [48] Fan TJ, Zhu SQ, Cao XD, et al. Tailored design of π -extended multiresonance organoboron using indolo[3,2-b]indole as a multi-nitrogen bridge. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(48): e202313254.
- [49] Fan TJ, Du MX, Jia XQ, et al. High-efficiency narrowband multiresonance emitter fusing indolocarbazole donors for bt. 2020 red electroluminescence and ultralong operation lifetime. *Advanced Materials*, 2023, 35(30): 2301018.
- [50] Tang R, Xu S, Cheng G, et al. Highly stable and efficient copper(I) sensitizer for narrowband red organic light-emitting diodes with an operational lifetime (LT_{95}) of up to 3689 h at 1000 cd m^{-2} . *Nature Communications*, 2025, 16(1): 7776.
- [51] Chan CY, Tanaka M, Lee YT, et al. Stable pure-blue hyperfluorescence organic light-emitting diodes with high-efficiency and narrow emission. *Nature Photonics*, 2021, 15(3): 203—207.
- [52] Mamada M, Katagiri H, Chan CY, et al. Highly efficient deep-blue organic light-emitting diodes based on rational molecular design and device engineering. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(32): 2204352.
- [53] Ghosh P, Alvertis AM, Chowdhury R, et al. Decoupling excitons from high-frequency vibrations in organic molecules. *Nature*, 2024, 629(8011): 355—362.
- [54] Wang SF, Su BK, Wang XQ, et al. Polyatomic molecules with emission quantum yields >20% enable efficient organic light-emitting diodes in the NIR(II) window. *Nature Photonics*, 2022, 16(12): 843—850.
- [55] Meng QY, Wang R, Wang YL, et al. Longevity gene responsible for robust blue organic materials employing thermally activated delayed fluorescence. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 3927.
- [56] Xu YW, Liang XM, Zhou XH, et al. Highly efficient blue fluorescent OLEDs based on upper level triplet-singlet intersystem crossing. *Advanced Materials*, 2019, 31(12): 1807388.
- [57] Huang TY, Wang Q, Zhang H, et al. Enhancing the efficiency and stability of blue thermally activated delayed fluorescence emitters by perdeuteration. *Nature Photonics*, 2024, 18(5): 516—523.
- [58] Zeng XY, Tang YQ, Cai XY, et al. Solution-processed OLEDs for printing displays. *Materials Chemistry Frontiers*, 2023, 7(7): 1166—1196.
- [59] Woo JY, Park MH, Jeong SH, et al. Advances in solution-processed OLEDs and their prospects for use in displays (adv. mater. 43/2023). *Advanced Materials*, 2023, 35(43): 2370314.
- [60] Zheng H, Zheng YN, Liu NL, et al. All-solution processed polymer light-emitting diode displays. *Nature Communications*, 2013, 4: 1971.
- [61] Zhou L, Yu MJ, Chen XL, et al. Screen-printed poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(styrenesulfonate) grids as ITO-free anodes for flexible organic light-emitting diodes. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(11): 1705955.
- [62] Ai X, Evans EW, Dong SZ, et al. Efficient radical-based light-emitting diodes with doublet emission. *Nature*, 2018, 563(7732): 536—540.
- [63] Liu WS, Deng WY, Wang WP, et al. Ultrahigh-radiance near-infrared organic light-emitting diodes. *Nature Photonics*, 2025, 19(6): 650—657.
- [64] Wu ZY, Yan LC, Li YQ, et al. Development of 55-in. 8K AMOLED TV based on coplanar oxide thin-film transistors and inkjet printing process. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(5): 418—427.
- [65] Du ZH, Zhou H, Yu XH, et al. Controlling the polarity and viscosity of small molecule ink to suppress the contact line receding and coffee ring effect during inkjet printing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 602: 125111.
- [66] Cinquino M, Prontera CT, Maggiore A, et al. Toward highly efficient solution-processable OLEDs: Inkjet printing of TADF emissive layer. *Advanced Electronic Materials*, 2024, 10(2): 2300358.
- [67] Chang YF, Zhang KY, Zhao L, et al. Endo-encapsulated multiresonance dendrimers with through-space interactions for efficient narrowband blue-emitting solution-processed OLEDs. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(3): e202415607.
- [68] Wang K, Zhao YS. Pursuing electrically pumped lasing with organic semiconductors. *Chem*, 2021, 7(12): 3221—3231.
- [69] Tang X, Senevirathne CAM, Matsushima T, et al. Progress and perspective toward continuous-wave organic solid-state lasers. *Advanced Materials*, 2024, 36(20): 2211873.
- [70] Qin ZS, Wang TY, Gao HK, et al. Organic polarized light-emitting transistors. *Advanced Materials*, 2023, 35(40): 2301955.
- [71] Lin J, Hu YS, Lv Y, et al. Light gain amplification in microcavity

- organic semiconductor laser diodes under electrical pumping. *Science Bulletin*, 2017, 62(24): 1637—1638.
- [72] Wu WP, Gao H, Jia LB, et al. Stable and uniform self-assembled organic diradical molecules for perovskite photovoltaics. *Science*, 2025, 389(6756): 195—199.
- [73] Wu L, Xin ZR, Liu DH, et al. Bifunctional group modulation strategy enables MR-TADF electroluminescence toward BT.2020 green light standard. *Advanced Materials*, 2025, 37(9): 2416224.
- [74] Li LH, Yu XX, Lin ZY, et al. Interface capture effect printing atomic-thick 2D semiconductor thin films. *Advanced Materials*, 2022, 34(49): 2207392.
- [75] Liu D, De JB, Gao HK, et al. Organic laser molecule with high mobility, high photoluminescence quantum yield, and deep-blue lasing characteristics. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, 142(13): 6332—6339.
- [76] Zaumseil J, Friend RH, Sirringhaus H. Spatial control of the recombination zone in an ambipolar light-emitting organic transistor. *Nature Materials*, 2006, 5(1): 69—74.
- [77] Ahmad V, Sobus J, Greenberg M, et al. Charge and exciton dynamics of OLEDs under high voltage nanosecond pulse: Towards injection lasing. *Nature Communications*, 2020, 11: 4310.
- [78] Qin ZS, Zhang Y, Wang TY, et al. Intrinsically white organic polarized emissive semiconductors. *Nature Photonics*, 2025, 19(4): 378—386.
- [79] Yoshida K, Gong JY, Kanibolotsky AL, et al. Electrically driven organic laser using integrated OLED pumping. *Nature*, 2023, 621(7980): 746—752.
- [80] McCarthy MA, Liu B, Donoghue EP, et al. Low-voltage, low-power, organic light-emitting transistors for active matrix displays. *Science*, 2011, 332(6029): 570—573.
- [81] Wu ZB, Liu Y, Guo EJ, et al. Efficient and low-voltage vertical organic permeable base light-emitting transistors. *Nature Materials*, 2021, 20(7): 1007—1014.
- [82] Zimmerman JD, Diev VV, Hanson K, et al. Porphyrin-tape/C60 organic photodetectors with 6.5% external quantum efficiency in the near infrared. *Advanced Materials*, 2010, 22(25): 2780—2783.
- [83] Wu ZH, Zhai YC, Yao WC, et al. The role of dielectric screening in organic shortwave infrared photodiodes for spectroscopic image sensing. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(50): 1805738.
- [84] Miao ZG, Gao C, Shen ML, et al. Organic light-emitting transistors with high efficiency and narrow emission originating from intrinsic multiple-order microcavities. *Nature Materials*, 2025, 24(6): 917—924.
- [85] Zhong WT, Wang XY, Wang W, et al. Fast near-infrared organic photodetectors with enhanced detectivity by molecular engineering of acceptor materials. *Advanced Science*, 2025, 12(3): 2410332.
- [86] Wijaya TJ, Xiong SX, Sasaki K, et al. A highly stable organic-inorganic hybrid electron transport layer for ultraflexible organic photodiodes. *Advanced Materials*, 2025, 37(21): 2501951.
- [87] Jacoutot P, Scaccabarozzi AD, Nodari D, et al. Enhanced sub-1 eV detection in organic photodetectors through tuning polymer energetics and microstructure. *Science Advances*, 2023, 9(23): eadh2694.
- [88] Yuan TT, Chen WL, Miao JH, et al. A molecular acceptor with absorption wavelength of >1400 nm for short-wavelength infrared organic photodetectors. *Journal of Materials Chemistry C*, 2025, 13(17): 8623—8630.
- [89] Chen PY, Suthar G, Su YY, et al. Enhancing performance in top-illuminated shortwave infrared organic photodetectors *via* microcavity resonance. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(35): 2401806.
- [90] Kublitski J, Hofacker A, Boroujeni BK, et al. Reverse dark current in organic photodetectors and the major role of traps as source of noise. *Nature Communications*, 2021, 12: 551.
- [91] Xing S, Nikolis VC, Kublitski J, et al. Miniaturized VIS-NIR spectrometers based on narrowband and tunable transmission cavity organic photodetectors with ultrahigh specific detectivity above 1014 Jones. *Advanced Materials*, 2021, 33(44): 2102967.
- [92] Song Y, Zhong ZM, He PH, et al. Doping compensation enables high-detectivity infrared organic photodiodes for image sensing. *Advanced Materials*, 2022, 34(29): 2201827.
- [93] Kielar M, Daanoun M, François-Martin O, et al. Insights into the failure mechanisms of organic photodetectors. *Advanced Electronic Materials*, 2018, 4(2): 1700526.
- [94] Kielar M, Dhez O, Pecastaings G, et al. Long-term stable organic photodetectors with ultra low dark currents for high detectivity applications. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39201.
- [95] Wang YY, Yang MQ, Li YY, et al. Silicon-rivalling large-area flexible broadband organic photodetectors. *Advanced Materials*, 2025: e16087.
- [96] Jiang BH, Lin DW, Shiu MN, et al. Efficient, ambient-stable, all-polymer organic photodetector for machine learning-promoted intelligent monitoring of indoor plant growth. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(15): 2203129.
- [97] Li YZ, He X, Chen SC, et al. Intelligent photodetectors: Postmanufacturing tunability toward enhanced performance and advanced functions. *Chemical Reviews*, 2025, 125(15): 6977—7022.
- [98] Yokota T, Nakamura T, Kato H, et al. A conformable imager for biometric authentication and vital sign measurement. *Nature Electronics*, 2020, 3(2): 113—121.

Key Scientific Issues and Technological Bottlenecks in the Applications of Organic Optoelectronic Materials

Hongzheng Chen^{1*} Fei Huang² Lian Duan³ Yinhua Zhou⁴ Yuguang Ma²
Yongfang Li⁵ Chunlei Zhu⁶ Jin Ma⁶ Yuqin Ding^{6*}

1. State Key Laboratory of Silicon and Advanced Semiconductor Materials, Department of Polymer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China
2. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China
3. Key Laboratory of Organic Optoelectronics and Molecular Engineering of Ministry of Education, Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing 100084, China
4. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
5. Beijing National Laboratory for Molecular Sciences, CAS Key Laboratory of Organic Solids, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China
6. Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

Abstract Organic/polymeric optoelectronic materials have always been a key research focus, strongly supported as part of national strategic initiatives and recognized as crucial electronic materials. It is also a research and application field where China is expected to achieve international leadership. Based on the 388th “Shuangqing Forum” organized by the National Natural Science Foundation of China, this paper focuses on several key scientific issues and technological bottlenecks encountered in the application of organic optoelectronic materials, including the contradiction between energy-level alignment and device performance, the challenges in regulating charge carrier transport and recombination processes, as well as material degradation and device failure. It summarizes and refines the fundamental scientific problems limiting the practical application of organic/polymeric optoelectronic materials and devices from the perspectives of organic solar cells, organic light-emitting devices and organic photodetectors. It proposes feasible development recommendations to bridge the gap between basic research and industrial applications from new material-design strategies, synergistic optimization of materials and device architectures, the physical mechanisms of device failure, as well as from new research paradigm and relevant development policies. It also explores future development trends in organic/polymeric optoelectronic materials and provides important theoretical and technical support for the development of strategic emerging industries such as next-generation energy technologies and new display technologies.

Keywords organic optoelectronic materials; photovoltaics; light-emitting display; photodetections

陈红征 浙江大学求是特聘教授, 中国化学会会士, 兼任 *ACS Applied Polymer Materials* 执行编辑。主要从事有机光电材料与器件的研究工作。发表学术论文 600 余篇, 连续入选科睿唯安全球高被引科学家榜单, 出版专著 1 部, 获国家发明专利 60 余项, 部分成果实现转化落地。获浙江省自然科学奖一等奖、中国材料研究学会科学技术奖一等奖、中国化学会青年化学奖等奖项。

丁玉琴 博士, 研究员, 现任国家自然科学基金委员会工程与材料科学部材料科学二处有机高分子材料学科项目主任。

(责任编辑 贾祖冰 张强)

* Corresponding Authors, Email: hzchen@zju.edu.cn; dingyq@nsfc.gov.cn