http://pmse.scu.edu.cn

全聚合物太阳能电池的发展现状

周立苹[1]，史敬伟[2]，李烁楠[1]，胡 荣[1]
(1. 重庆文理学院 材料科学与工程学院，重庆 402160；2. 沈阳理工大学 装备技术研究院 辽宁 沈阳 110159)

摘要：全聚合物太阳能电池具有优异的耐光/热稳定性和力学性能，相较于其他类型的有机太阳能电池展现出更高的稳定性和更长的使用寿命，表现出良好的发展潜力，成为当前有机光伏领域的研究热点。近年来，随着“聚合物小分子受体”概念的提出，高性能的受体聚合物不断涌现，结合器件结构调控和活性层形貌优化，全聚合物太阳能电池的效率突破了20%，推动了有机太阳能电池的发展。为增进对高性能全聚合物太阳能电池的认识与理解，文中从聚合物受体材料的设计与合成、活性层形貌调控及构造、溶剂工程、界面工程和实用性等方面出发综述了全聚合物太阳能电池的发展现状和趋势。

关键词：全聚合物太阳能电池；受体；活性层；器件性能
中图分类号：TM914.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2025)06-0163-08

随着煤、石油、天然气等石化资源的日益枯竭，以及它们所带来的环境污染问题，迫切地需要发展清洁能源，以应对能源需求的持续增长和环境保护的双重挑战。因太阳能具有取之不尽、用之不竭、绿色环保等优点，光伏与光热技术成为当前能源领域的研究热点。太阳能电池是一种可将光能转换为电能的装置，根据技术及发展历程可将其分为硅基太阳能电池(含单晶硅、多晶硅及非晶硅太阳能电池)、无机薄膜太阳能电池(CdTe，CIGS，$Sb_2(S,Se)_3$等)和新型太阳能电池(有机聚合物太阳能电池、钙钛矿太阳能电池、量子点太阳能电池等)。其中，有机聚合物太阳能电池具有材料来源广泛、柔性、可折叠、可溶液法大面积加工制备等优点，是硅基太阳能电池的有益补充，受到人们的广泛关注。

有机聚合物太阳能电池按活性层的给受体搭配类型可分为聚合物/富勒烯分子、聚合物/非富勒烯分子、共轭小分子/聚合物、聚合物/聚合物(即全聚合物)太阳能电池。其中，全聚合物太阳能电池的能量转换效率已经突破20%[1]，并且在耐光/热稳定性、力学耐久性和柔性加工方面具有独特的优势，成为有机光伏能源领域的一个研究热点。为加强对全聚合物太阳能电池的认识与理解，促进其早日满足实际应用需求，现对全聚合物太阳能电池的发展历程与趋势作如下综述。

1 受体聚合物材料的研发

1995年，Friend等将聚合物MEH-PPV和聚合物CN-PPV搭配，构筑成活性层，获得了效率为0.9%的全聚合物太阳能电池，成为此类电池的研究起点[2]。但受高电子迁移率、聚合物受体材料开发难度大和聚合物间共混性难调的影响，全聚合物太阳能电池的发展速度要慢于其它类有机太阳能电池。后来，科研人员设计并合成了基于萘二酰亚胺(NDI)和二萘嵌苯二酰亚胺(PDI)单元的聚合物，有效地提升了受体材料的电子迁移率，使得全聚合物太阳能电池的性能得到显著提高[3,4]。围绕着这2种单元结构的

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0101
收稿日期：2024-05-29
基金项目：国家自然科学基金资助项目(21603020)；重庆市教委科技项目(KJZD-M202401302)
通讯联系人：史敬伟，主要从事装备技术与产业化的研究，E-mail: 13478166700@163.com；
胡荣，主要从事机光伏器件结构与性能研究，E-mail: hurong_82@cqwu.edu.cn

新材料被不断地开发出来，Zhou等[5]基于PDI单元合成了一系列受体聚合物(PV-PDI，PT-PDI，PDTP-PDI，PF-PDI，PC-PDI，PDBS-PDI)，与P3HT或PT1构建的全聚合物太阳能电池效率突破了2%。接着，他们以NDI单元为基础合成了PC-NDI，与TTV7搭配的全聚合物光伏器件效率达到了3%[6]。Guo等[7]基于PDI结构合成了聚合物受体NDP-V，与PTB7-Th搭配制备的全聚合物太阳电池效率达到8.59%。Yan等[8]合成的聚合物受体PDI-V，与PTB7-Th搭配时，效率达到了7.57%。Chen等[9]基于NDI单元合成了受体PNDIT-16，与PTB7-Th混合制成器件，效率达到4.94%。值得一提的是，N2200作为经典的受体聚合物材料，与不同的p型聚合物材料搭配时会表现出不同的能量转换效率，如PTB7:N2200 (1.1%)，J51:N2200 (8.27%)，PTzBI-Si:N2200 (10.1%)，这说明给受体聚合物材料间的兼容性对器件性能也具有重要影响[10~12]。另外，含硼氮配位键(B←N)类聚合物受体材料因N原子呈现正电性，整个聚合物表现为缺电子状态，具备调节分子能级的能力。基于此，Liu等合成了P-BN-TPD，rr-PBN，BNTzT，P-BNBP-T，PBN-12等一系列聚合物受体材料，与p型聚合物搭配时，基于CD1:PBN-12的器件效率突破了10%[13~17]。

近年来，基于聚合物/非富勒烯小分子光伏体系的能量转换效率不断刷新，引起人们的广泛关注。受到非富勒烯小分子结构和性能的启发，人们将其作为共聚单元开发出了聚合物小分子受体材料，取得了非常好的效果。聚合物小分子受体材料不仅具有优异的热稳定性和力学稳定性，而且还兼具小分子的一些优点，如能级可调、光学吸收互补、溶解性强等，这使得全聚合物太阳能电池的效率可得到极大的改善。Li等[18]将IDIC-C16与噻吩单元共聚制备了聚合物小分子受体PZ1，该受体与PM6搭配制备的光伏器件效率达到了11.2%。同样，将Y系列小分子共聚得到了一系列高性能的聚合物受体，如PJ1，PYT，PY-IT，PY-DT等，这些高性能的聚合物受体与PM6，J71，PTQ10，D18等给体材料构筑的二元、三元活性层器件效率可达到15%以上，表现出非常良好的发展前景[19~22]。

2 活性层的形貌调控

活性层的形貌调控作为提升全聚合物太阳能电池性能的一种重要手段而备受人们的关注。活性层的形貌特征包括相结构、相结晶度、相尺寸、相分离尺度、分子取向、相空间分布、表面粗糙度等。活性层形貌对全聚合物太阳能电池的光物理过程有着直接的影响，涉及光的吸收、激子的生成、扩散与解离、电荷的生成、传输、复合及收集过程，这些光物理过程又决定了电池的光电转换效率。研究表明，材料的分子结构(包括主链、侧链、取代基等)、相对分子质量、给/受体材料搭配与比例、溶剂及溶解工艺、薄膜加工技术与工艺、后处理工艺等均会对活性层的形貌产生影响，目前针对活性层形貌的调控就是基于前述所涉及的物理与化学手段。全聚合物活性层的形貌调控相较于其他活性层体系(如聚合物/非富勒烯小分子)更为困难，因为聚合物给体与聚合物受体之间共混相分离形貌常存在相区尺寸偏大和相区纯度偏低的问题，即存在给/受体共混性与结晶性的平衡问题。为了解决这一问题，溶剂工程、后处理、薄膜加工技术与工艺、材料设计与改性等被人们所研究。

目前，溶解全聚合物体系使用最多的溶剂是氯仿、甲苯和氯苯。但单一的溶剂不能很好地对相尺寸、相区纯度、相分离结构进行精细化调控，在溶剂中加入少量高沸点溶剂(如1,8-二碘辛烷、氯萘等)可适当调控聚合物材料的聚集状态和薄膜的成膜过程。Cao等[23]利用氯萘作为溶剂添加剂对PBDB-T:PYF-T全聚合物体系进行了研究，结果表明，氯萘添加剂可促进共混物的垂直相分离和π-π堆叠，有效抑制器件中的非辐射损失和能量紊乱，使器件效率从9.53%提高至16.13%。Zhang等[24]使用1,8-二碘辛烷调控活性层的成膜过程与分子取向，该添加剂优化了D18-Cl:PY-IT活性层的相分离形态，使得器件效率达到16.0%。Park等[25]使用1,8-二碘辛烷和氯萘复合添加剂调控PBDTTT-CT:P(NDI2OD-T2)活性层的形貌，发现该二元添加剂能够促使活性层形成合适的互穿性聚合物网络，且聚合物之间相互作用形成了更好的纳米尺度形貌，使得器件的光电转换性能得到有效提升。此外，挥发性固体添加剂在活性层

的形貌调控中也起到了重要作用，Kan等[26]利用固体添加剂1,3-二溴-5-氯苯有效地调控了PM6和PY-IT之间的混溶性，优化了给体和受体间的相分离尺度，将该体系的效率由14.6%提高至16.5%。Sun等[27]采用2-甲氧基萘作为固体添加剂，将其引入PM6:PY-DT体系可有效控制薄膜在成膜和热退火过程中的聚集，促使有序分子堆积和合适相分离形态的形成，有效的提升了器件效率。尽管添加剂的使用可实现活性层形貌的调控与器件效率的提升。但是，溶剂与固体添加剂对全聚合物活性层的形貌调控机制仍然不是十分清晰，需要做进一步深入的研究。

目前作为主体溶剂的氯仿、甲苯和氯苯等也存在一些问题。氯仿的沸点较低，不太适合大面积器件的制备。3种溶剂的毒性较大、废液处理较难且成本高，对人体和环境有危害。因而，开发高效的、可绿色溶剂加工的技术对全聚合物太阳能电池的发展具有重要意义。Guo及其合作团队[28]报道了一种有效的非卤化溶剂处理方法，采用一系列非卤绿色溶剂（如二硫化碳、1,2,4-三甲基苯和邻二甲苯）加工制备了全聚合物太阳能电池，结果发现，以邻二甲苯为溶剂可以获得较高的器件性能，证明了绿色溶剂处理在此领域的重要前景。此外，Cao等[29]研究了绿色溶剂环戊基甲醚处理的PTzBI-Si:N2200全聚合物体系，效率达到了11%，利用此溶剂溶解PTB7-Th:N2200，J51:N2200和PTzBI:N2200全聚合物体系也都取得了较高的光电转化效率，证明了绿色溶剂在高性能全聚合物电池器件领域的重要价值。

活性层的后处理可以有效调控其网络互穿结构，提升电荷转移和分相传输能力。其中，热退火和溶剂蒸汽退火在聚合物/富勒烯、聚合物/非富勒烯光伏体系均取得了较好的效果。因此，退火同样可以应用于全聚合物活性层体系。Laquai等[30]基于TQ1:N2200全聚合物体系经过热退火处理后观察到外部量子效率加倍，填充因子提高，从而使得器件的光电转换效率提升。此外，Fahlman等[31]在对TQ1:N2200的研究中发现，热退火不仅对活性层的形貌调控具有重要影响，还能引起能级排列发生变化，通过能级变化在给体/受体界面处引入界面偶极子层，以减少双分子复合来辅助电荷产生，从而显著降低了电压损耗，提高了全聚合物电池器件的性能。

薄膜加工技术与工艺对器件的形貌也有着重要的影响。Yue等[32]开发了一种简单有效的弯液面诱导成膜技术，用于制备高品质的全聚合物活性层，并与传统的旋涂成膜工艺进行了对比，发现弯液面诱导成膜制备的PM6:PY-IT共混膜表面相对粗糙，结晶度更高，晶体取向更均匀，所得器件效率高于旋涂工艺加工的器件效率。Yang等[33]通过研究合适的溶解工艺来控制活性层混合物形态，发现氯仿与少量1,8-二碘辛烷的组合溶液为J71:N2200共混物的最佳溶解工艺，在该工艺下活性层的形貌、相分离和相尺寸可得到较好的调控，器件可获得较佳性能。

材料的结构设计也是影响活性层形貌和提升器件性能的重要手段。Peng等[34]基于氟取代策略，合成了一系列高性能受体材料(PYDT-2F，PYDT-3F和PYDT-4F)，氟原子的引入增强了分子间结晶性的同时，也略微调控了材料的带隙和轨道能级，提升了聚合物受体的电子迁移率，在n-型掺杂剂的协同作用下，基于双层PM6/PYDT-2F(PYDT-3F或PYDT-4F)光伏体系的器件效率得到极大的提升。Yan等[35]从增强聚合物链内共平面性和主链刚性的角度出发，合成了基于亚乙烯链接基元的n型聚合物PY-V-γ，通过密度泛函及分子动力学模拟发现，该聚合物的结构设计表现出更好的共轭和链间堆积，降低构象混乱度，使得基于PM6:PY-V-γ的光伏器件实现了17.1%的效率。Bao等[36]通过引入低聚聚苯乙烯侧链在受体共轭骨架上，减小了共混膜中的相分离尺寸，提高了器件的性能。

3　活性层与器件结构的设计

有机太阳能电池的活性层结构可分为单层结构、双层平面结构、体相异质结和叠层结构，全聚合物太阳能电池活性层均可以采用前述结构。单一聚合物活性层由于受到激子扩散和解离驱动力的影响，器件的效率极低，目前很少使用。1995年，科学家们开发出了体相异质结活性层，可实现给/受体网络互穿结构，利于激子扩散和解离，逐渐发展成活性层结构的主流。Jenekhe等[37]采用体相异质结制备的PBDB-T:BSS10光伏器件，在没有使用任何添加剂的情况下，效率达到了10.1%。Sun等[38]采用PM6:PY-

82共混体系取得了当时二元体系的最高效率(16.7%)。Guo等[39]构建的PTB7-Th:PBDB-T:DCNBT-TPC三元体相异质结器件也取得了较好的效率。尽管关于体相异质结的研究取得了瞩目的成绩,但这种结构也存在电子和空穴在分相传输过程中电荷复合损耗较大的问题,以及受光、热等因素的影响,活性层相结构存在稳定性差的问题,影响器件的寿命。叠层活性层结构的优点是可实现对太阳光谱更宽范围和更强响应的光吸收,获得更高的开路电压。Ma等[40]将PTP8:P(NDI2HD-T)作为前电池,PBFSF:N2200作为后电池,利用前电池和后电池2种材料之间具有互补吸收的性质实现了8.3%的效率。然而,叠层器件的制作工艺较为复杂,对活性层和传输层材料的稳定性要求极高,这是其在实际应用中面临的挑战之一。

双层异质平面结构的研究始于20世纪80年代,依靠层间异质能级差驱动激子解离,但这主要体现在两相界面附近10 nm左右,超过这一范围激子无法有效扩散至界面处。但这种结构中电子和空穴可有效实现分相传输,电荷的复合损耗较小,且这种结构的器件稳定性显著强于体相异质结。这种结构自开发以来受激子扩散的影响器件效率一直不高。但近年来,双层平面结构的研究取得了极大的进步。Zhang等[41]以PM6和PYF-T-o分别作为给受体,运用逐层的方法制备了双层平面结构器件,对比研究了体异质结结构的正型和倒置器件,发现逐层方法制备的正型全聚合物太阳能电池器件实现了15.28%的最优效率,高于正型体异质结器件(14.97%)、倒置体异质结器件(13.03%)和倒置逐层制备的器件(8.54%)。之后,有研究者基于PM6和PY-DT体系分别制备了逐层的正型和倒置,以及体异质结正型和倒置的全聚合物太阳能电池器件,其中正型逐层制备的器件效率最高(17.32%)[27]。

在全聚合物太阳能电池中,除了活性层之外,还有功能界面传输层,其作用在于调节器件内的能级结构,减少电荷在活性层和电极间的复合,有效提升电荷的收集效率。PEDOT:PSS是目前应用最广泛的空穴传输层,但其本身的酸性特性易腐蚀电极,降低器件的稳定性。除此之外,V_2O_5,MoO_3,NiO_x等金属氧化物也常被用作空穴传输层,以促进空穴注入和传输。n型半导体材料PDINO,PNDIT-F3N,PDINN及一些功函数较低的金属氧化物(ZnO,TiO_2,SnO_2)被广泛应用于电子传输层材料。在这些材料中,PDINN由于其侧链中的基团易与给受体材料形成氢键,从而促进电子传输,提高电荷分离效率,成为目前应用最为广泛的电子传输层材料。Zhang等[42]采用PDINN作为电子传输层,将基于PM6:PY-IT器件的填充因子从69.21%提高到72.05%,效率从15.47%提高到16.41%。这种由界面层带来的性能优化在不同的全聚合物材料体系中都得到了有效验证[43,44]。

4 全聚合物太阳能电池的实用化研究

有机太阳能电池要实现真正的应用并在市场上形成竞争力,除了要满足一定的器件效率外(一般需要>15%),还需要在器件稳定性、服役寿命、低成本大面积制备等方面取得良好的结果。有机太阳能电池的稳定性会受到两方面的考验,一是使用环境的影响,如氧气、湿度、紫外线、温度变化、受力等。二是活性层的热力学稳定性差(尤其是给受体共混的体相异质结构造),在器件工作过程中易发生形貌变化,导致器件性能衰减。为了提升全聚合物太阳能电池器件的稳定性,Zhang等[45]从提高材料玻璃化转变温度的角度出发,通过异构化的酯基取代噻吩单元,合成了聚合物受体TDY-α,与PM6搭配时器件的效率达到18.1%,由于TDY-α具有高的玻璃化转变温度,所得的PM6:TDY-α光伏器件表现出优异的稳定性(T80外推接近35000 h)。Yan等[46]利用三元策略提升二元全聚合物太阳能电池效率的同时,也改善了器件的稳定性,将聚富勒烯受体PFBO-C12加入二元PM6:PY-V-γ和PM6:PYF-T-o体系中,PFBO-C12可改善活性层薄膜的结晶度,有效减少相偏析,使器件的稳定性和力学坚固性得到提升。Zhang等[47]利用低聚物具有明确的分子结构,能有效降低链间缠结的特性,合成了二聚体2BTP-2F-T受体,此材料表现出高的光稳定性和热稳定性,证实了二聚体策略有利于器件的稳定性。在器件结构方面,He等[48]将准平面异质结结构应用于全聚合物太阳电池的制备中,在获得高效率器件的同时,与本体异质结器件相

比,器件稳定性得到了显著提升。

器件的大面积制备是全聚合物太阳能电池的一个优势,能够实现其大面积制备的技术有超声喷雾法、刮刀涂布法、卷对卷法、喷墨打印法等。Bao等[49]基于PII2T-PS:PPDIT体系,采用连续卷对卷狭缝模头印刷技术制备了大面积全聚合物太阳能电池器件,其组合电池面积达10 cm^2时,光电转换效率突破5%。Wei等[50]采用卷对卷技术制备了基于PTQ10:PYF-T-o体系的全聚合物太阳能电池,在面积达到1 cm^2时,其光电转化效率可达11.24%,且用其制备的全聚合物柔性器件具有优良的力学弯曲稳定性,在1000次循环弯曲测试后,器件效率仍能维持初始值的95%以上。

此外,加强制备工艺方面的研究,也是提升大面积全聚合物太阳能电池器件性能的研究重点。Hou等[51]采用刮刀刮涂技术制备了基于PTB7-Th:PNDI-T10的全聚合物太阳能电池,通过掺入添加剂将薄膜干燥时间从120 s延长至1000 s,以形成更好的活性层形态和更高的结晶度,此加工技术可使面积为2.03 cm^2的器件效率达到6.65%。Chen等[52]使用多组分共混策略,选取PM6,PBQx-TCl与PY-IT为光活性层材料,在小面积器件上取得19.0%的高效率基础上制备大面积器件,全聚合物体系从液态到成膜的时间比小分子体系更长,具有更充足的加工时间,从而获得更均匀的形貌,最终在面积为19.3 cm^2的模组上实现了16.26%的效率。这些研究表明,在大面积制备技术上兼顾考虑活性层薄膜的成膜状态有助于提升器件的效率,也有助于推动未来有机光伏产业的发展。

5 结语与展望

总体而言,全聚合物太阳能电池相较于其他类有机光伏电池具有更佳的薄膜形貌稳定性和力学稳定性。尽管全聚合物太阳能电池在能量转换效率、器件稳定性、大面积制备等方面取得了令人瞩目的进展。但离实际应用仍然有一定差距。为此,人们还要在如下方面做深入的研究:(1)全聚合物太阳能电池的能量转化效率还有进一步提升的空间,首先加强高性能的聚合物材料的设计与研发是必不可少的,其次是优化活性层的形貌与结构,调控给受体材料的共混性和结晶性。(2)绿色环保加工与大面积低成本制造是未来全聚合物太阳能电池发展的一个重要方向,也是提升其竞争力的一个关键,相关制备工艺需要不断开发与创新。(3)进一步提升全聚合物太阳能电池稳定性也将是人们必须重视的问题,需要在材料结构设计、活性层结构设计、器件结构设计、器件封装技术、服役条件与环境等方面展开研究。(4)对全聚合物太阳能电池的超快光电转换机制的认识仍然不够清晰,需要人们对大量的全聚合物光伏体系进行广泛而深入的研究,找出它们之间光电转换的共同规律和差异特征,以便为全聚合物太阳能电池性能的提升提供理论依据与技术支持。总之,有理由相信在科研人员不懈的努力下,聚合物太阳能电池的实际应用即将到来。

参考文献:

[1] Qiu W, Liao C, Li Y, *et al*. Breaking 20% efficiency of all-polymer solar cells via benzo [1, 2-d: 4, 5-d′] bisthiazole-based terpolymer donor strategy for fine morphology optimization[J]. Advanced Functional Materials, 2025: 2503009.

[2] Halls J J M, Walsh C A, Greenham N C, *et al*. Efficient photodiodes from interpenetrating polymer networks[J]. Nature, 1995, 376: 498-500.

[3] Zhan X, Tan Z, Domercq B, *et al*. A high- mobility electron-transport polymer with broad absorption and its use in field-effect transistors and all-polymer solar cells[J]. Journal of the American Chemical Societ, 2007, 129: 7246-7247.

[4] Yan H, Chen Z, Zheng Y, *et al*. A high- mobility electron-transporting polymer for printed transistors[J]. Nature, 2009, 457: 679-686.

[5] Zhou E, Cong J, Wei Q, *et al*. All- polymer solar cells from perylene diimide based copolymers: material design and phase separation control[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2011, 12: 2799-2803.

[6] Zhou E, Cong J, Hashimoto K, *et al*. Control of miscibility and aggregation via the material design and coating process for high-performance polymer blend solar cells[J]. Advanced Materials, 2013, 25: 6991-6996.

[7] Guo Y, Li Y, Awartani O, *et al*. Improved performance of all-polymer solar cells enabled by naphthodiperylenetetraimide-

based polymer acceptor[J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1700309.

[8] Guo Y, Li Y, Awartani O, *et al*. A vinylene- bridged perylenediimide- based polymeric acceptor enabling efficient all-polymer solar cells processed under ambient conditions[J]. Advanced Materials, 2016, 28: 8483-8489.

[9] Shen G, Li X, Wu X, *et al*. Naphthalene tetracarboxylic diimide (NDI)- based polymer solar cells processed by non- halogenated solvents[J]. Organic Electronics, 2017, 46: 203-210.

[10] Tang Y, McNeill C R. All-polymer solar cells utilizing low band gap polymers as donor and acceptor[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2013, 51: 403-409.

[11] Fan B, Ying L, Zhu P, *et al*. All-polymer solar cells based on a conjugated polymer containing siloxane- functionalized side chains with efficiency over 10% [J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1703906.

[12] Gao L, Zhang Z G, Xue L, *et al*. All-polymer solar cells based on absorption- complementary polymer donor and acceptor with high power conversion efficiency of 8.27% [J]. Advanced Materials, 2015, 28: 1884-1890.

[13] Dou C, Ding Z, Zhang Z, *et al*. Developing conjugated polymers with high electron affinity by replacing a CC unit with a B←N unit[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2015, 54: 3648-3652.

[14] Zhao R, Lin B, Feng J, *et al*. Amorphous polymer acceptor containing B←N units matches various polymer donors for all-polymer solar cells[J]. Macromolecules, 2019, 52: 7081-7088.

[15] Shao X, Wang J, Marder T B, *et al*. N – B← N bridged bithiophene: a building block with reduced band gap to design n-type conjugated polymers[J]. Macromolecules, 2021, 54: 6718-6725.

[16] Ding Z, Long X, Meng B, *et al*. Polymer solar cells with open-circuit voltage of 1.3 V using polymer electron acceptor with high LUMO level[J]. Nano Energy, 2017, 32: 216-224.

[17] Wang N, Yu Y, Zhao R, *et al*. Improving active layer morphology of all- polymer solar cells by solution temperature[J]. Macromolecules, 2020, 53: 3325-3331.

[18] Zhang Z G, Yang Y, Yao J, *et al*. Constructing a strongly absorbing low- bandgap polymer acceptor for high- performance all- polymer solar cells[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2017, 129: 13688-13692.

[19] Zhang L, Jia T, Pan L, *et al*. 15.4% efficiency all-polymer solar cells[J]. Science China-Chemistry, 2021, 64: 408-412.

[20] Wang W, Wu Q, Sun R, *et al*. Controlling molecular mass of low-band- gap polymer acceptors for high- performance all- polymer solar cells[J]. Joule, 2020, 4: 1070-1086.

[21] Luo Z, Liu T, Ma R, *et al*. Precisely controlling the position of bromine on the end group enables well- regular polymer acceptors for all- polymer solar cells with efficiencies over 15% [J]. Advanced Materials, 2020, 32: 2005942.

[22] Li Y, Song J, Dong Y, *et al*. Polymerized small molecular acceptor with branched side chains for all polymer solar cells with efficiency over 16.7% [J]. Advanced Materials, 2022, 34: 2110155.

[23] Li Z, Liang Y, Qian X, *et al*. Suppressing non-radiative loss via a low- cost solvent additive enables high- stable all- polymer solar cells with 16.13% efficiency[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 136877.

[24] Zhao Y, Wu J, Li W, *et al*. Morphology control realizes fast charge dissociation and transport in high- performance all-polymer solar cells[J]. American Chemical Society Applied Energy Materials, 2024.7: 4180-4189.

[25] Kim Y J, Ahn S, Wang D H, *et al*. A mechanistic understanding of a binary additive system to synergistically boost efficiency in all-polymer solar cells[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 18024.

[26] Zhu C, Chung S, Zhao J, *et al*. Vertical phase regulation with 1, 3, 5- tribromobenzene leads to 18.5% efficiency binary organic solar cells[J]. Advanced Science, 2023, 10: 2303150.

[27] Song J, Li Y, Cai Y, *et al*. Solid additive engineering enables high-efficiency and eco- friendly all- polymer solar cells[J]. Matter, 2022, 5: 4047-4059.

[28] Liu B, Sun H, Lee J W, *et al*. Achieving highly efficient all-polymer solar cells by green- solvent- processing under ambient atmosphere[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14: 4499-4507.

[29] Li Z, Ying L, Zhu P, *et al*. A generic green solvent concept boosting the power conversion efficiency of all- polymer solar cells to 11%[J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12: 157-163.

[30] Karuthedath S, Melianas A, Kan Z, *et al*. Thermal annealing reduces geminate recombination in TQ1: N2200 all- polymer solar cells[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6: 7428-7438.

[31] Wang C, Moro F, Ni S, *et al*. Thermal- annealing effects on

energy level alignment at organic heterojunctions and corresponding voltage losses in all-polymer solar cells[J]. Nano Energy, 2020, 72: 104677.

[32] Yue Y, Zheng B, Yang W, *et al*. Meniscus-assisted coating with optimized active-layer morphology toward highly efficient all-polymer solar cells[J]. Advanced Materials, 2022, 34: 2108508.

[33] Liu X, Li X, Wang L, *et al*. Synergistic effects of the processing solvent and additive on the production of efficient all-polymer solar cells[J]. Nanoscale, 2020, 12: 4945-4952.

[34] Zhou D, Liao C, Peng S, *et al*. Binary blend all-polymer solar cells with a record efficiency of 17.41% enabled by programmed fluorination both on donor and acceptor blocks[J]. Advanced Science, 2022, 9:2202022.

[35] Yu H, Wang Y, Kim H K, *et al*. A vinylene-linker-based polymer acceptor featuring a coplanar and rigid molecular conformation enables high-performance all-polymer solar cells with over 17% efficiency[J]. Advanced Materials, 2022, 34: 2200361.

[36] Kurosawa T, Gu X, Gu K L, *et al*. Understanding the impact of oligomeric polystyrene side chain arrangement on the all-polymer solar cell performance[J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8: 1701552.

[37] Kolhe N B, Tran D K, Lee H, *et al*. New random copolymer acceptors enable additive-free processing of 10.1% efficient all-polymer solar cells with near-unity internal quantum efficiency [J]. American Chemical Society Energy Letters, 2019, 4: 1162-1170.

[38] Li Y, Li Q, Cai Y, *et al*. An efficient polymer acceptor via a random polymerization strategy enables all-polymer solar cells with efficiency exceeding 17% [J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15: 3854-3861.

[39] Feng K, Wu Z, Su M, *et al*. Highly efficient ternary all-polymer solar cells with enhanced stability[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31: 2008494.

[40] Yuan J, Ford M J, Xu Y, *et al*. Improved tandem all-polymer solar cells performance by using spectrally matched subcells[J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8: 1703291.

[41] Liu Z, Ma X, Xu W, *et al*. 15.28% Efficiency of conventional layer-by-layer all-polymer solar cells superior to bulk heterojunction or inverted cells[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450: 138146.

[42] Zhang G, Wang L, Zhao C, *et al*. Efficient all-polymer solar cells enabled by interface engineering[J]. Polymers, 2022, 14: 3835.

[43] Ding S, Ma R, Yang T, *et al*. Boosting the efficiency of non-fullerene organic solar cells via a simple cathode modification method[J]. American Chemical Society Applied Materials & Interfaces, 2021, 13: 51078-51085.

[44] Lee C, Lee J, Lee S, *et al*. Importance of device structure and interlayer design in storage stability of naphthalene diimide-based all-polymer solar cells[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8: 3735-3745.

[45] Bai Y, Zhang Z, Zhou Q, *et al*. Geometry design of tethered small-molecule acceptor enables highly stable and efficient polymer solar cells[J]. Nature Communications, 2023, 14: 2926.

[46] Yu H, Wang Y, Zou X, *et al*. Improved photovoltaic performance and robustness of all-polymer solar cells enabled by a polyfullerene guest acceptor[J]. Nature Communications, 2023, 14: 2323.

[47] Zhang L, Zhang Z, Deng D, *et al*. “N-π-N” Type oligomeric acceptor achieves an OPV Efficiency of 18.19% with low energy loss and excellent stability[J]. Advanced Science, 2022, 9: 2202513.

[48] Cao C, Wang H, Qiu D, *et al*. Quasiplanar heterojunction all-polymer solar cells: a dual approach to stability[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32: 2201828.

[49] Gu X, Zhou Y, Gu K, *et al*. Roll-to-roll printed large-area all-polymer solar cells with 5% efficiency based on a low crystallinity conjugated polymer blend[J]. Advanced Energy Materials, 2017, 7: 1602742.

[50] Shen Y F, Zhang J, Tian C, *et al*. Slot-die coated large-area flexible all-polymer solar cells by non-halogenated solvent[J]. Nano Research, 2023, 16: 13008-13013.

[51] Lin Y, Dong S, Li Z, *et al*. Energy-effectively printed all-polymer solar cells exceeding 8.61% efficiency[J]. Nano Energy, 2018, 46: 428-435.

[52] Chen T, Zheng X, Wang D, *et al*. Delayed crystallization kinetics allowing high-efficiency all-polymer photovoltaics with superior upscaled manufacturing[J]. Advanced Materials, 2024, 36: 2308061.

Development Status of All-Polymer Solar Cells

Liping Zhou[1], Jingwei Shi[2], Shuonan Li[1], Rong Hu[1]

(*1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China; 2. Institute of Equipment Technology Research, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China*)

ABSTRACT: All-polymer solar cells (All-PSCs) have excellent light/thermal stability and mechanical properties, which provide higher stability and longer service life than other organic solar cells. Thus, they are regarded as having great development potential and have emerged as a research hotspot in the field of organic photovoltaics at present. In recent years, with the introduction of the concept of polymer small molecule receptors, high efficiency acceptor polymers have continuously emerged, and combined with the device structure regulation and active layer morphology optimization, the efficiency of all-PSCs has surpassed 20%, driving the development of organic solar cells. To enhance the understanding and recognition of the efficient all- PSCs and to promote their practical application value, the current status and trends of all-PSCs were reviewed in this work from the perspectives of the design and synthesis of polymer acceptor materials, morphology control and structure design of the active layer, solvent engineering, interface engineering, and practicality.

Keywords: all-polymer solar cells; acceptor; active layer; device performance