

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 111 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2021 年 3 月 5 日

“有机光伏材料和器件”论坛综述

一、背景

有机/聚合物太阳能电池（简称有机光伏）因具有器件结构简单、重量轻、可以制备成柔性和半透明器件等突出优点，近年来获得快速发展。尤其是最近几年发展起来的以 n -型有机半导体为受体的非富勒烯有机光伏，其能量转换效率获得快速提升，超过 17%，达到了可以向实际应用发展的阶段。更重要的是，中国学者在引领高效非富勒烯有机光伏的发展。在这样的背景下，组织一次有机光伏材料和器件方面的前沿论坛，研讨下一步发展、尤其是向实际应用发展存在的科学问题和瓶颈，思考解决问题的途径和技术路线，对于我国有机光伏的发展和尽快投入实际应用具有非常重要的意义。

二、论坛概况

2020 年 11 月 27~29 日，“有机光伏材料和器件”科学与技术前沿论坛在北京举办。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院化学学部和学部学术与出版工作委员会承办，中国科学院化学研究所和《中国科学》杂志社协办。

中国科学院化学研究所李永舫院士为论坛召集人，华南理工大学曹镛院士为论坛学术委员会主席。中国科学院学部工作局局长王笃金研究员和中国科学院化学研究所所长张德清研究员应邀出席论坛，来自中国科学院化学研究所、华南理工大学等相关科研机构和高校的200余名师生参加了论坛。

论坛开幕式上，李永舫院士首先致辞，介绍了本次论坛举办的背景及具体安排等。王笃金局长对参加论坛的嘉宾和代表表示热烈欢迎，并介绍了“科学与技术前沿论坛”的情况以及对论坛的要求。

论坛围绕有机小分子受体光伏材料、*n*-型共轭聚合物受体光伏材料和全聚合物太阳电池、聚合物给体光伏材料、有机小分子给体光伏材料、界面修饰层材料与器件性能优化、柔性和半透明器件、大面积器件制备和有机太阳电池稳定性等8个主题开展了学术交流和研讨。每个主题首先由一位主题报告人作40分钟报告，介绍该主题的发展历史、最新研究进展和当前存在的关键科学问题，并对该主题下一步的发展和重点提出自己的看法和见解。之后是50~100分钟的讨论环节，参会者对该主题的发展现状、关键科学问题和下一步的发展方向提出自己的看法，或介绍自己在该主题的最新研究进展，每人发言时间一般不超过6分钟。共有40多位代表在讨论环节发言。曹镛院士、李永舫院士和参会的国家杰出青年科学基金获得者主持了各主题的报告会和讨论环节。最后，李永舫院士作总结发言，他对各位主题报告人、主持人和各位参会代表的积极参与表示感谢，指出有机光伏是我国为数不多的当前在国际上处于引领地位的研究领域，大家需要继续努力保持引领地位。下一步需要在阐明材料和器件稳定性、低成本光伏材料的设计合成、大面积光伏器件的制备技术和隔水隔氧封装技术等方面下大工夫，争取率先在我国实现有机光伏的实际应用。

通过此次论坛，与会专家探讨了有机光伏向实际应用发展存在的科学问题和瓶颈，交流了该领域内的最新研究进展，讨论和明确了下

一步发展需要解决的关键科学问题和技术瓶颈，为确保我国继续保持在有机光伏领域的引领地位、率先在我国实现有机光伏的实际应用奠定基础。

三、报告及研讨

主题一：有机小分子受体光伏材料

中南大学邹应萍教授作了主题报告。

报告介绍了小分子受体光伏材料的发展历史和最新研究进展，包括早期的PCBM和ICBA等富勒烯衍生物受体光伏材料，以及近几年发展起来的ITIC和Y6等非富勒烯小分子受体光伏材料。在有机太阳能电池中，活性层材料是决定有机太阳能电池性能的关键因素，活性层材料包含电子给体与电子受体两大类。自1986年，柯达公司邓青云博士用苝的衍生物作为受体（A），铜酞菁作为给体（D），制备了第一个D/A双层异质结有机太阳电池，由于在D/A异质结界面上实现了高效的激子电荷分离，使有机太阳电池达到了接近1%的能量转换效率

（PCE）。但是有机半导体的激子扩散长度只有10~20 nm，如果给体和受体层厚度超过20 nm，则有些吸光后产生的激子扩散不到D/A界面而衰减到基态发光，对光伏没有贡献。为了克服双层异质结太阳电池界面给体和受体活性层厚度和接触面积的限制，1995年美国加州大学圣塔芭芭拉分校（UCSB）俞刚和Alan J. Heeger等提出了本体异质结的概念，把共轭聚合物给体和可溶性C₆₀衍生物PCBM的共混膜作为活性层制备了本体异质结有机太阳电池，增大了给体/受体材料的接触面积，提高了激子电荷分离与电荷传输效率，从而提高了光电流和能量转换效率。2005年，美国加州大学洛杉矶分校杨阳课题组使用热退火处理的PCBM受体与聚噻吩衍生物P3HT给体共混器件，将效率提高到4.3%。另外，与基于C₆₀的PCBM相比，基于C₇₀的PC₇₁BM具有更强的吸收和更宽的光谱吸收范围。因此，PC₇₁BM后来逐渐成为了高效富勒烯衍生物受体材料的主流。

2010年，李永舫课题组通过茛双加成合成了具有较高 LUMO 能级的新型明星富勒烯衍生物受体 ICBA，提高受体的 LUMO 能级有利于提高了器件的开路电压。使用 ICBA 受体将基于 P3HT 的有机太阳能电池的效率推升至 6.5%。2012年，他们又进一步合成了茛双加成 C₇₀ 的衍生物 IC₇₀BA，使用 IC₇₀BA 为受体将基于 P3HT 的有机太阳能电池的效率进一步提升至 7.4%，为当时基于 P3HT 的有机光伏的最高效率。

自 1995 年合成 PCBM 并将其用于本体异质结有机太阳能电池之后，富勒烯受体主导了有机光伏受体材料约 20 年。2015 年，北京大学肖卫课题组合成了基于 IDTT 核与茛酮类 IC 末端的 A-D-A 型窄带隙小分子受体 ITIC，与李永舫课题组合作表征了其有机光伏性能。2016 年，李永舫课题组使用 J-系列聚合物给体与 ITIC 共混制备的有机光伏器件效率突破了 10%，其中使用 J71 聚合物给体的器件效率达到了 11.41%，使 ITIC 这类非富勒烯受体受到了有机光伏研究者的广泛关注。中国科学院化学研究所侯剑辉课题组对 ITIC 的化学结构进行了优化，通过在其端基引入给电子的甲基，合成了受体分子 IT-M，使基于 PBDB-T 给体和 IT-M 受体的有机太阳能电池效率超过 12%。2017 年，他们对 ITIC 进行端基氟取代，合成了 IT-4F，使基于 PBDB-T-SF（或称为 PM6）给体和 IT-4F 受体的有机太阳能电池效率达到 13.1%。

2017 年，中南大学邹应萍课题组将缺电子单元引入稠环非富勒烯受体中心核，采用此策略设计合成首个 A-DA'D-A 型窄带隙小分子受体 BZIC。2019 年，她们在 BZIC 的基础上进行结构优化，获得了吸收边红移至 950 nm 的窄带隙小分子受体 Y6，并与李永舫课题组合作进行了 Y6 受体的光伏性能表征。通过使用 PM6 为给体、Y6 为受体使有机太阳能电池效率大幅增加并达到了 15.6%。随后，Y6 及其衍生物受体与多种能级合适的宽带隙聚合物给体匹配，使有机太阳能电池的能量转换效率相继提升到超过 16%和超过 17%，多次刷新了有机太阳能电池的能量转化效率的世界纪录，国际权威机构美国可再生能源实验室

(NREL) 的认证的效率也已超过 17%。Y6 已成为有机光伏领域同行公认的高效率明星受体光伏材料，报道 Y6 的 *Joule* 论文自 2019 年春季发表以来，已被同行引用超过 1300 次。

与会专家探讨了今后高效窄带隙小分子受体材料进一步结构与性能优化的关键点。(1) 为进一步提升有机光伏材料的能量转化效率，需要减少光电转换的能量损失与提高光伏材料的载流子迁移率和发光效率。目前有机太阳能电池中的能量损失相比无机光伏电池依然较大，而造成能量损失的因素除了给受体界面处激子的拆分能量损失外，载流子的辐射和非辐射复合损失也是很重要的因素，需要从提高材料发光效率的角度出发，优化分子结构，探索分子异构化与非辐射能量损失的关系。(2) 设计和合成具有高的介电常数和低的激子束缚能的窄带隙受体光伏材料。(3) 进一步拓宽小分子受体光伏材料的吸收、扩大对近红外区太阳光的利用范围，设计和合成适用于半透明有机太阳能电池以及叠层有机太阳能电池后结活性层的超窄带隙受体光伏材料。(4) 深入开展小分子受体光伏材料的稳定性研究，以及高效小分子受体（尤其是 Y6）光伏材料的放大合成和降低合成成本的研究，设计和合成能满足实际应用的稳定性和成本要求的小分子受体光伏材料，推动和实现有机太阳能电池的实际应用。

主题二：*n*-型共轭聚合物受体光伏材料和全聚合物太阳电池

中国科学院化学研究所李永舫院士作了主题报告。

基于 *p*-型聚合物给体和 *n*-型聚合物受体的全聚合物太阳电池，与其他类型的有机太阳电池相比在柔韧性能和稳定性等方面具有更加突出的优点。他介绍了 *n*-型共轭聚合物受体光伏材料的发展历史和最新研究进展，包括早期用作聚合物受体的第一个 *n*-型聚合物 CN-PPV、基于茈萘亚胺和萘酰亚胺的 D-A 共聚物受体光伏材料，以及近年来发展的“小分子受体高分子化”的窄带隙强吸收聚合物受体光伏材料等。在此基础上，他分析了聚合物受体光伏材料当前存在的关键科学问题，

指出了下一步的努力方向。

1995年，与报道基于聚合物 MEH-PPV 为给体、富勒烯衍生物 PCBM 为受体的本体异质结聚合物太阳电池同步，Alan J. Heeger 等报道了基于 MEH-PPV 为聚合物给体、腈基取代的 PPV 衍生物 CN-PPV 为聚合物受体的全聚合物太阳电池。在光强为 20 mW/cm^2 卤钨灯照射条件下 PCE 为 0.25%。后来，由于基于富勒烯受体的聚合物太阳电池效率的提升，*n*-型聚合物受体和全聚合物太阳电池未能受到大家的重视，不过相关研究工作并没有中断。李永舫课题组 2006 年报道了一个在苯环上乙腈基取代的 PPV 衍生物 DOCN-PPV，2009 年他们使用带共轭侧链的聚噻吩衍生物为给体、DOCN-PPV 为受体制备的全聚合物太阳电池，能量转换效率达到了 0.8%。2007 年，中国科学院化学研究所占肖卫等开发了一种基于茚酰亚胺的 *n*-型 D-A 共聚物受体光伏材料 PDI-DTT。使用李永舫组开发的带噻吩乙烯共轭侧链的聚噻吩衍生物 P3 为给体、制备的全聚合物太阳电池 PCE 达到了 1.02%。接着，李永舫课题组与占肖卫课题组合作对受体聚合物和给体聚合物的结构进行了改进，2008 年使全聚合物太阳电池的 PCE 达到 1.48%。2008 年郭旭刚等报道了一种基于萘酰亚胺的具有高电子迁移率的 *n*-型共轭聚合物 N2200，其后 N2200 成为了一种有代表性的商品化的聚合物 *n*-型有机半导体材料，并被广泛应用于全聚合物太阳电池中。但是到 2015 年之前，使用 N2200 等聚合物受体的全聚合物太阳电池的最高 PCE 仅达到 4%~5%。

2016 年，李永舫课题组使用 N2200 为受体、该组开发的与 N2200 能级匹配且在可见-近红外区吸收互补的聚合物 J51 为给体，使全聚合物太阳电池的能量转换效率提升至 8.27%。华南理工大学应磊和黄飞等 2017~2019 年间开发了一系列宽带隙聚合物给体光伏材料，与 N2200 共混制备的全聚合物太阳电池的能量转换效率提高到了 9%~11%。

但是受体聚合物N2200较弱的吸收系数限制了全聚合物太阳能电池短路电流的进一步提升。李永舫课题组基于最近几年发展的窄带隙小分子受体光伏材料具有强和宽吸收的优点，2017年提出了将窄带隙小分子受体高分子化（Polymerized small molecule acceptor, PSMA）的分子设计策略，通过将窄带隙小分子受体 IDIC 衍生物作为结构单元与噻吩结构单元共聚、合成了新型聚合物受体光伏材料 PZ1，基于 PZ1 为聚合物受体的全聚合物太阳能电池的 PCE 提升至 9.19%。苏州大学张茂杰等使用 PM6 为聚合物给体，基于 PZ1 的全聚合物太阳能电池的 V_{oc} 提高到 0.96 V，PCE 达到了 11.2%。这种 PSMA 策略制备的聚合物受体保持了窄带隙小分子受体自身的优点（包括窄禁带、强吸收和合适的电子能级），同时具备了聚合物拥有的良好的成膜性能和形貌稳定性的优点。此外，可以通过选择不同的小分子受体构筑单元和不同的共轭连接单元来简便有效地调节 PSMA 聚合物受体的物理化学与光电特性。目前，PSMA 型聚合物受体已受到同行广泛关注，一系列以 IDIC 为分子骨架（包括香港科技大学颜河教授课题组、瑞典查尔姆斯理工大学 Ergang Wang 教授课题组和苏州大学张茂杰等的工作）以及以高效明星受体分子 Y6 为分子骨架的高效 PSMA 聚合物受体光伏材料被陆续报道。以 Y6 为分子骨架的 PSMA 聚合物受体将全聚合物太阳能电池的 PCE 提升至 12%~15%（包括李永舫课题组、黄飞课题组、武汉大学闵杰课题组、国家纳米中心周二军课题组、Ergang Wang 课题组等的工作）。

n-型共轭聚合物受体和全聚合物太阳能电池（all-PSC）已经经历了 25 年的发展历程。最近基于小分子受体高分子化（PSMA）的聚合物受体的全聚合物太阳能电池的器件效率突破 15%，达到了可以向实际应用发展的阶段。同时，全聚合物太阳能电池具有成膜性优越、抗弯折柔韧性好、光照稳定性和形貌稳定性高等突出优点，有望在柔性聚合物太阳能电池中优先获得实际应用。

与会代表在报道聚合物受体研究最新进展的同时，也提出了今后需要关注和努力的几个方向：（1）需要关注聚合物受体光伏材料和全聚合物太阳能电池的稳定性研究，3~5 年的使用寿命是实现柔性聚合物太阳能电池实际应用的最低要求。（2）窄带隙小分子受体高分子化（PSMA）策略为新型聚合物受体的设计合成开辟了有效的途径。最近几年，窄带隙小分子受体获得了快速发展，各种新型小分子受体不断涌现，这为设计和合成新型 PSMA 奠定了基础、提供了分子骨架源泉，今后需要继续开展基于高效小分子受体分子骨架的 PSMA 研究，研究连结单元对 PSMA 吸收光谱、电子能级、活性层形貌和光伏性能的影响规律。（3）宽带隙聚合物给体和窄带隙 PSMA 受体共混活性层形貌的优化是下一步需要深入开展的研究工作。为此，需要深入研究聚合物给体和受体结构（主链结构和侧链结构）对给体-受体纳米结构相分离的互穿网络结构的影响。（4）开展柔性全聚合物太阳能电池的器件制备和优化研究。全聚合物太阳能电池将来的应用领域应该是柔性器件，然而当前柔性全聚合物太阳能电池的研究还比较少。下一步应该在大面积全聚合物太阳能电池的溶液加工制备方法、电极界面修饰层材料的选取、界面修饰层材料对器件稳定性的影响、柔性器件的隔水隔氧封装等方面开展系统深入的研究工作，为将来柔性全聚合物太阳能电池的工业化制备和应用打下基础。

主题三：聚合物给体光伏材料

中国科学院化学研究所侯剑辉研究员作了主题报告。

报告介绍了从 MEH-PPV 到 P3HT、再到窄带隙 D-A 共聚物的早期聚合物给体光伏材料的发展历史，以及最近几年发展的与窄带隙非富勒烯小分子受体光伏材料相匹配的宽带系 D-A 共聚物的最新研究进展，并在此基础上讨论了聚合物给体材料面临的挑战和下一步的努力方向。

共轭聚合物作为电子给体材料在有机太阳能电池中具有十分重要的

作用。1995 年，俞刚和 Alan J. Heeger 等采用当时广泛使用的发光共轭聚合物 MEH-PPV 作为电子给体材料与富勒烯衍生物 PCBM 共混制备了第一个本体异质结聚合物太阳电池。但是，MEH-PPV 薄膜的吸收边只有 550 nm，太阳光的利用率较低，第一个本体异质结聚合物太阳电池的能量转换效率（PCE）不到 1%。自 2000 年，MEH-PPV 逐渐被吸收边到 650 nm 的聚（3-己基噻吩）（P3HT）所取代。2005 年，美国加州大学洛杉矶分校的李刚和杨阳等通过热处理等手段调节活性层的形貌，将基于 P3HT 为给体、PCBM 为受体的聚合物太阳电池的 PCE 提高到 4.3%。其后 10 年，P3HT 由于具有结构简单、合成成本低并可以批量合成等突出优点，成为最有代表性的聚合物给体光伏材料之一。

由于 PCBM 的吸收主要在可见区的 350~500 nm 左右的短波长范围，并且其 HOMO 和 LUMO 能级较低，所以设计和合成的聚合物给体总是考虑需要宽吸收、窄带隙和较低的 HOMO 能级，因为窄带隙和宽吸收可以提高短路电流、给体材料较低的 HOMO 能级可以提高器件的开路电压。2003 年，瑞典查尔姆斯理工大学的 Mats R. Anderson 和林雪平大学的 Olle Inganäs 等将芴与苯并噻二唑的 D-A 共聚物 PFDTBT 用于聚合物太阳能电池的给体光伏材料，获得了 2.2% 的光电能量转换效率，其中 $V_{oc}=1.04$ V， $J_{sc}=4.66$ mA/cm²，FF=46%，这引起了聚合物光伏材料研究者的关注，随后 D-A 共聚物逐渐成为设计聚合物给体光伏材料的主流。2008 年，曹镛院士团队报道了基于硅芴和苯并噻二唑的 D-A 共聚物 PSiF-DBT 给体光伏材料，将聚合物太阳电池的 PCE 提升到 5.4%，为当时国内有机光伏研究的最高效率。

苯并[1,2-b:4,5-b']二噻吩（BDT）是一个具有高度平面性的给体结构单元，基于 BDT 的聚合物一般具有较高的空穴迁移率和较低的 HOMO 能级，因此 BDT 成为当前构筑高效聚合物给体材料的最重要的给电子结构单元。侯剑辉在杨阳课题组从事博士后研究期间最早把

BDT 单元引入到聚合物给体光伏材料中，并于 2007~2008 年研究了一系列基于 DBT 给电子结构单元的 D-A 共聚物给体材料。2009 年，美国芝加哥大学 Luping Yu 等合成了一系列基于 BDT 给电子结构单元和带有吸电子的酯基和氟取代的并二噻吩 (TT) 的具有共振结构的窄带隙共聚物 PBDTTT，其中基于 PTB7 (一种 PBDTTT 聚合物) 为给体、PC₇₁BM 为受体的器件效率超过了 7%。后来，华南理工大学吴宏滨等通过使用 PFN 阴极修饰层材料和器件优化，将基于 PTB7:PC₇₁BM 体系的聚合物太阳能电池的效率提升至超过 10%。

2005~2006 年，为了拓展当时占主导地位的给体材料 P3HT 的吸收光谱和提高其空穴迁移率，李永舫课题组提出了引入共轭侧链的策略，合成了一系列带共轭侧链的二维共轭聚噻吩衍生物，其中带噻吩乙烯共轭侧链的聚噻吩衍生物给体与 PCBM 受体共混获得 3.18% 的 PCE，比同样条件下基于 P3HT 给体的器件效率显著提高。2011 年，侯剑辉与李永舫课题组合作将共轭侧链的策略引入到高效的 PBDTTT 聚合物体系中，在 BDT 给体单元上引入噻吩共轭侧链、合成了带噻吩共轭侧链的 PBDTTT 衍生物给体光伏材料 PBDTTT-E-T 和 PBDTTT-C-T，基于 PBDTTT-C-T:PC₇₁BM 体系的聚合物太阳能电池的效率达到 7.59%。其后，噻吩取代 BDT 单元 (BDTT) 被国内外同行在设计和合成有机光伏材料中广泛使用，已经成为构成有机光伏材料的明星给体结构单元。

随着窄带隙有机小分子受体光伏材料的发展，宽带隙聚合物成为了给体光伏材料的主流。而且，自 2015 年以来，与小分子受体一样，中国学者在聚合物给体的设计合成方面也是处于国际领先和引领地位。李永舫课题组从 2012 年起开发了一系列基于 BDTT 给体单元和氟取代苯并三氮唑受体单元的 J-系列 D-A 共聚物给体，这类聚合物给体与窄带隙受体 ITIC 和 IDIC 共混获得了 10%~12% 的 PCE。侯剑辉课题组 2014~2015 年开发了基于 BDTT 给体单元和 BDD 受体单元的

D-A 共聚物 PBDB-T 和 PBDB-T-2F (PM6), 这两种聚合物已经成为非富勒烯受体体系的最有代表性的给体光伏材料, 尤其是与 Y6 匹配已经成为最具代表性的高效有机光伏体系。黄飞等也合成了一些基于 BDTT 单元的高效 D-A 共聚物给体光伏材料, 这些聚合物在用作全聚合物太阳能电池给体材料中表现出优异的光伏性能, 最近基于 PSMA 聚合物受体的全聚合物太阳能电池的 PCE 超过了 15%。

然而, 目前高效给体材料大多结构复杂、合成步骤多, 制约了材料的放大合成和成本。2018 年, 李永舫课题组设计并合成了一个具有简单分子结构的低成本聚合物给体 PTQ10, 为设计简单高效的聚合物给体材料提供了新思路。PTQ10 是一种以简单的噻吩单元为给电子单元、以氟取代喹啉为受电子单元的 D-A 共聚物, 仅需两步合成, 并可实现接近 90% 的总产率, 表现出非常突出的成本优势。苏州大学崔超华使用明星分子 Y6 为受体, 基于 PTQ10 的器件的效率也达到了 16.53%。

有机太阳能电池近年来取得了快速进展, 在研究过程中, 新型聚合物给体和非富勒烯受体材料起到了同等重要的推动作用。就基本光电性能而言, 具有较宽带隙和较深 HOMO 能级的聚合物给体在增强器件的光吸收特性和降低能量损失方面表现出显著的潜力。但是, 现有的聚合物给体材料的发展有些跟不上受体材料的发展, 与 Y6 匹配后有能达到高效率的聚合物给体体系依然较少, 选择较为单一。另外, 当前使用的聚合物给体在 400 nm 左右的吸收都比较弱, 急需开发更多具有更宽吸收谱带的新型的高效、稳定、且合成工艺简单的聚合物给体光伏材料。

主题四：小分子给体光伏材料

南开大学陈永胜教授作了主题报告。

小分子半导体材料具有确定的化学结构、易于提纯等优点, 因此, 全小分子太阳能电池也吸引了广泛的研究兴趣。其实最早的有机光伏

研究是从真空蒸镀的有机小分子光伏材料开始的。1995 年报道了可溶液加工的本体异质结有机太阳电池之后，在发展共轭高分子给体光伏材料的同时，可溶液加工的有机小分子给体光伏材料也受到了研究者的关注。2006 年法国国立昂热大学 Jean Roncali 研究组报道了基于三苯胺为给体 (D) 核、噻吩或噻吩乙烯噻吩为臂、氰基为末端受体 (A) 单元的可溶性 A-D-A 结构星形有机分子，将其用作给体与 PCBM 共混，得到了效率为 1.17% 的有机太阳电池。此后，基于三苯胺的星形有机分子给体光伏材料受到多个研究组的重视，李永舫课题组合成了一系列的基于三苯胺核、共轭臂上含有苯并噻二唑或氰基受体单元的星形有机小分子给体光伏材料，使用 PCBM 为受体、光伏效率 2008 年达到 1.33%，2009 年达到 2.39%，2011 年达到 3%。德国乌尔姆大学的 Peter Bauerle 研究组 2007~2008 年开发了一系列超支化噻吩齐聚物给体光伏材料，与 PCBM 共混的光伏效率达到 1.7%。

但是基于三苯胺的星形分子和超支化噻吩齐聚物给体材料都缺少合适的聚集和分子之间的相互作用，导致电荷传输性能较差，因而其有机太阳电池的短路电流和填充因子都较低，能量转换效率很难进一步提高。因此，需要另辟途径来寻找和开发高效的可溶液加工的有机小分子给体光伏材料。这使研究者想起了分子间具有较强相互作用的平面型的分子结构。美国加州大学圣塔芭芭拉分校 Thuc-Quyen Nguyen 研究组开发了一类基于 3,6-diaryl-2,5-dihydro-pyrrolo-[3,4-c]pyrrole-1,4-dione (DPP) 为受体中心核的 D-A-D 结构线性平面结构小分子给体光伏材料，其中他们 2009 年开发的一种基于 DPP 的小分子给体、使用 PC₇₁BM 为受体制备的有机太阳电池获得了 4.4% 的 PCE，这是当时基于有机小分子给体光伏器件的最高效率。

与此同时，Peter Bauerle 研究组开发了一类中心为齐聚噻吩、两端为受体单元的线形 A-D-A 结构共轭有机分子、用于真空蒸镀有机太阳电池的给体材料。陈永胜课题组通过引入柔性侧链以及末端吸电子

单元优化等分子设计策略，设计了一系列可溶液加工的 A-D-A 构型的有机小分子给体材料。2010 年他们合成的两端为氰基的七连寡聚噻吩为给体的有机太阳能电池的 PCE 达到了 3.7%。2014 年，经过末端受体单元的优化，他们将这类基于寡聚噻吩的 A-D-A 结构有机小分子给体 (DRCN7T) 的光伏效率提高至 9.30%。2011 年，他们将寡聚噻吩中心的噻吩单元换成平面稠环的苯并二噻吩 (BDT) 单元，增强了这类分子的共轭程度和分子平面性，将有机小分子给体光伏材料的 PCE 提高到 5.44%。他们通过在 BDT 中心单元上引入烷氧基侧链、再对末端受电子单元进行优化，2012 年又将这类小分子给体的 PCE 进一步提升至 7.38%。2013 年，李永舫研究组将噻吩共轭侧链引入这类分子的中心 BDT 单元上，使用茛酮为末端受体单元合成了含有噻吩或者是二连噻吩 pi-桥的 A-D-A 结构小分子给体光伏材料，并于 BDT 单元上位烷氧基侧链的对应分子进行对比，发现使用噻吩共轭侧链以及延长噻吩共轭 pi-桥的长度可以增强和红移其薄膜的吸收，从而可改善其光伏性能。陈永胜研究组 2014 年在 BDT 单元上引入烷硫基共轭侧链合成了 A-D-A 结构有机小分子 DR3TSBDT，其有机太阳能电池的 PCE 达到了 9.95% (接近 10%)。2016 年，国家纳米中心魏志祥课题组通过调节侧链的长度以及末端吸电子单元的氟取代数量，得到了小分子给体 BTID-2F，基于 BTID-2F 为给体的有机小分子太阳能电池获得了 11.3% 的效率。

与聚合物给体材料的发展类似，新型窄带隙有机小分子受体材料的研发也进一步推动了有机小分子给体材料的发展，使有机小分子给体的研究也进入了使用有机小分子受体的非富勒烯时代，同时促进了全小分子太阳能电池效率的提升。2017 年，侯剑辉课题组报道了一种基于 BDT 单元的宽带隙小分子给体 DRTB-T，基于 DRTB-T 和小分子受体 IDIC 的全小分子有机太阳能电池获得了 9.08% 的效率，同时还有较高的开路电压 (0.98 V)。同年，李永舫课题组基于聚合物 J52 设计了

两个基于 BDT 给电子 (D) 单元和苯并三氮唑受电子 (A) 单元的小分子给体 (H11 和 H12), 其中, 基于 H11 的全小分子的太阳能电池表现出 9.73% 的能量转换效率。他们进而开发了基于 BDTT 为给体核、三联噻吩为 π -桥、氰基酯基为受体末端单元的 A-D-A 结构小分子给体 SM1, 使用 IDIC 为受体的全有机小分子太阳电池的 PCE 达到 10.11%。

高效的小分子给体与明星受体 Y6 组合效率获得了进一步提升。2019 年, 中国科学院重庆绿色智能技术研究院陆仕荣研究组和重庆大学孙宽研究组合作设计了氯取代的 BTR 小分子给体 BTR-Cl, 与 Y6 受体匹配后的器件获得了 13.61% 的 PCE。同时, 魏志祥等报道了一种新型小分子给体 ZR1, 其与 IDIC-4Cl 匹配具有 9.64% 的效率, 与 Y6 匹配能得到 14.34% 的效率。2020 年李永舫课题组在 SM1 的中心 BDTT 单元的噻吩共轭侧链上引入氟取代合成了新的有机小分子给体 SM1-F, 使用 Y6 为受体的全有机小分子太阳电池的效率达到了 14.07%。近期, 侯剑辉课题组将烷硫链取代的苯环引入到 BTR 小分子中, 得到小分子给体 B1, 基于 B1 和 BO-4Cl 的全小分子有机太阳电池的效率超过了 15%。

有机小分子给体光伏材料具有光伏性能批次重复性好等优点, A-D-A 结构寡聚型给体材料具有广阔的发展前景。然而, 为了实现将来的实际应用, 小分子光伏材料的形貌稳定性和光照下的稳定性需要引起高度关注。

主题五：界面修饰层材料与器件性能优化

华南理工大学黄飞教授作了主题报告。

有机太阳能电池的器件结构, 一般是由给体和受体的共混活性层夹在两个电极 (负极 (或称阴极) 和正极 (或称阳极)) 之间形成的 “三明治” 结构。其中, 至少有一侧电极为透明电极。通常而言, 为了提高器件的效率, 需要在活性层与电极之间插入界面层调节电极功函数

以实现载流子的高效抽取（正极需要具有与给体材料 HOMO 能级匹配的高的功函数、负极需要具有与受体材料 LUMO 能级匹配的低的功函数）。对于溶液加工的传统 *p-i-n* 结构有机太阳电池，PEDOT:PSS 是传统的修饰 ITO 电极的正极修饰层材料。而可溶液加工的低功函数负极修饰层要求其使用的溶剂不能溶解下面的活性层材料，这就要求需要与活性层材料的溶剂正交，而活性层一般为有机溶剂，所以负极修饰层材料应该是水/醇溶性的材料。

水/醇溶的有机分子和共轲聚合物都需要有强极性的取代基或侧链。2004 年，黄飞等设计并合成了一系列以聚芴为共轲主链，侧链含胺基的水/醇溶共轲聚合物及其季铵化衍生物（包括 PFN 与 PFNBr）。PFN 及其季铵化衍生物修饰负极可以显著降低电极的功函数，提高电子的收集效率。2011 年，吴宏滨等将 PFN 用作有机太阳电池的负极修饰层，基于 PTB7:PC₇₁BM 的有机太阳电池的 PCE 达到 8.37%。2012 年，他们又将 PFN 用于反向结构器件，通过优化将器件效率进一步提升至 9.2%。但是 PFN 是基于聚芴的 *p*-型共轲链，其电子迁移率较低，用于负极修饰层只能使用很薄（不超过 7 nm）的薄膜，这给将来的大面积制备带来困难。2016 年，黄飞等设计合成了一种芴与萘酰亚胺的 D-A 共聚物 PNDIT-F3N 和 PNDIT-F3N-Br，这两种聚合物是具有高的电子迁移率的 *n*-型共轲聚合物，用做负极修饰层材料制备的基于 PTB7-Th:PC₇₁BM 有机太阳电池的 PCE 达到 9.7%，并且其光伏性能对负极修饰层厚度在 5~20 nm 范围内不敏感，这对将来的大面积制备非常重要。

2014 年，中国科学院化学研究所张志国等合成了含有胺基或者氧化胺基修饰的 *n*-型有机半导体萘二酰亚胺衍生物 PDIN 和 PDINO 用于阴极修饰层。这类材料环境友好，可溶液加工，并且具有较高的电子迁移率和较高的导电性能（ $\sim 10^{-5}$ S/cm），因而修饰层厚度可以做到 6~30 nm。这些萘二酰亚胺类阴极修饰层的另外一个特点是允许使用

高功函金属 (Ag、Au) 做负极, 因为这种负极修饰层可以显著降低金属电极的功函数。使用 PDINO 为负极修饰层、基于 PTB7:PC₇₁BM 的有机太阳电池, 使用 Al 或 Ag 为金属负极能量转换效率都超过 8%。最近, 张志国等在此基础上又设计合成了一种具有氢键作用的阴极界面材料 (PDINN), 发现 PDINN 能够在增加界面偶极矩、降低空气稳定金属负极 (Cu、Ag) 功函的同时, 通过氢键作用可增强和活性层材料之间的兼容性, 从而很好地调和了界面工程中器件稳定性和效率之间的矛盾。选用 PM6:Y6 为器件活性层材料, 基于 PDINN/Ag 电极的光伏器件获得了 17.23% 的光电转换效率 (美国可再生能源实验室认证效率 16.8%)。PDINN 具有简单高效、环境污染小、成本低、便于大规模批量制备等突出优点, 有希望在将来大面积制备有机太阳电池中获得实际应用。

有机太阳能电池的商业化应用仍然面临着许多亟待解决的问题, 例如器件的稳定性、器件工艺可行性等。继续围绕水/醇溶共轭分子展开研究, 特别是围绕通过分子设计开发面向产业化应用的界面修饰层材料, 将有助于提高模组器件的光电转换效率, 降低制造成本, 推进有机光电器件的市场化进程。此外, 围绕水/醇溶共轭聚合物稳定性以及相关有机光电器件稳定性的研究也需要进一步展开和加强。

主题六：柔性和半透明器件

苏州大学李耀文教授作了主题报告。

有机太阳电池与已经商品化的硅基太阳电池和无机半导体薄膜太阳电池相比, 其最大的优势就是重量轻, 可以制备成柔性器件。此外, 有机太阳电池的光活性层厚度非常薄 (通常在 100~200 nm 左右), 且具有光谱的部分光透明性, 可以通过调节给体和受体材料的能级与带隙来调节活性层的颜色, 这使得有机太阳电池也适用于作为半透明太阳电池。随着新型光伏材料的发展, 有机太阳电池光电转换效率得到了迅速的提高, 因此, 柔性与半透明器件在有机太阳电池中的应用前

景备受关注。

柔性有机太阳电池的关键部件包括柔性底部透明电极、光活性层、阳极或阴极缓冲层（界面层）以及顶部金属电极。其中柔性底部透明电极是柔性有机太阳电池与基于 ITO/玻璃底电极的刚性有机太阳电池的唯一区别。因此，开发高性能的柔性底部透明电极是关键问题。高性能柔性底部透明电极应具有以下特点：（1）低成本；（2）高透明度、低面电阻（高导电性）；（3）高抗弯耐久性，以防止裂纹随弯曲度而增加。此外，能够低温处理的界面修饰层材料也很重要，因为基于塑料基板的柔性透明电极不允许进行过高温度的处理。到目前为止，常用的柔性底部透明电极都是制备在透明塑料基底上的透明导电电极，包括 ITO、透明导电聚合物、金属纳米线、超薄金属层和金属网格等。

在柔性透明导电聚合物电极中，PEDOT:PSS 是长期被广泛使用的底电极材料。2008 年，韩国光州科学技术院 Dong-Yu Kim 等人报告了一种使用二甲基亚砷（DMSO）处理的 PEDOT:PSS（PH500）作为柔性底电极，并可将其涂覆在 PET 薄膜上。他们发现在 PH500 水溶液中加入 DMSO 能有效控制材料的导电性、形貌和功函数等，基于 P3HT:PCBM 的柔性器件达到 3.27%的效率。2018 年，中国科学院宁波材料所葛子义等报道了一种全溶液处理的柔性器件，他们利用甲磺酸在室温条件下便可处理塑料衬底上的 PEDOT:PSS（PH1000），由于 PSS 的去除，PEDOT:PSS 发生结构重排，导电性大大提高（面电阻显著降低）（ $\sim 40 \Omega \text{ sq}^{-1}$ ）。基于 PBDBT:IT-M 的柔性有机太阳电池实现了 10.12%的效率，基于 PM6:Y6:PCBM 的三元器件达到 14.06%的效率

（小面积）。2020 年，中国科学院宁波材料研究所樊细等报道了使用高氯酸（ HClO_4 ）喷雾处理的 PH1000 电极，使用少量高氯酸喷雾掺杂后，可以有效降低 PH1000 在阳极处的费米能级，提升导电性，并与活性层界面形成良好的电学接触，最终实现了效率为 16.44%的高效柔

性器件。喷雾掺杂的方法还避免了高氯酸与塑料基板之间的直接接触，保持了器件良好的柔韧性。

另外，金属柔性透明电极（包括金属网格、超薄金属、金属纳米线等）也被广泛研究并应用于柔性太阳电池的电极。李耀文和中国科学院苏州纳米研究所陈立桅发展了一种嵌入式的银栅格电极，先在柔性基底上通过纳米压印制备出设计好图案的凹槽，再将银浆涂布到其中，最后烧结形成连通的银栅格电极。之后，他们在此基础上进一步发展，优化了凹槽的深宽比、银油墨的涂布填充技术，以及表面抛光粗糙度处理工艺等。2019年，李耀文等采用高导电性、高规整度的银纳米线（AgNWs），通过掺杂的方式有效调控了 PEDOT:PSS (PH1000) 薄膜的光透过率和导电性，并以此作为 PET/银栅格电极（Ag-mesh）的导电薄膜构筑了 PET/Ag-mesh/PH1000:AgNWs 新型复合柔性透明电极。以 PBDB-T-2F（给体）和 IT-4F（受体）作为活性层，基于 PET/Ag-mesh/PH1000:AgNWs 复合电极制备的柔性有机太阳能电池效率达到了 12.07%。随后，李耀文等在嵌有银纳米线的聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）基底上旋涂银纳米线溶液，通过毛细力作用与具有高透光性的铝掺杂氧化锌（AZO）进行复合，构筑了 Em-Ag/AgNWs: AZO-SG 柔性透明电极，基于该电极制备的柔性有机太阳能电池效率实现了大幅度提升，以 PBDB-T-2F:Y6 为活性层，效率达到了 15.21%。另外，苏州大学唐建新等采用蛾眼纳米结构的 AgNWs/ZnO 复合电极，该协同复合电极在光学透明性、导电性、机械柔韧性和低温可加工性方面表现出良好的性能，平均透光率超过 93%，基于其的器件效率达到 12.02%。华中科技大学周印华在聚合物阴极修饰材料聚乙烯亚胺（PEI）基础上，通过采用锌离子进行配位，获得了光电性能、机械性能均优的电子传输层（PEI-Zn）。基于此界面层材料，在 1.3 μm 的柔性基底 PEN 上，分别以 PEDOT:PSS 和 AgNWs 为底电极，以 PBDB-T-2F:Y6 为活性层，实现了效率为 12.3% 和 15.0% 的有机太阳能电池。

有机太阳电池相对于传统无机太阳电池的另一个独特优势是其光活性层的半透明性和颜色可调性，这为半透明太阳电池提供了广阔的应用前景。半透明有机太阳电池的透射率通常通过在可见光区域（370~740 nm）的平均可见光透射率（AVT）来表征。半透明太阳电池的光电性能可以在两种光照模式下进行表征：顶部入射和底部入射。通常，不同的照明模式会导致不同的光场强度分布从而导致不同的光伏性能。为了实现器件的半透明性，不仅要使前电极透明，还要使后电极透明。因此，研制一种易于沉积在光活性层上的高透明、高导电性的顶部透明电极对于半透明有机太阳电池具有重要意义。另一方面，高性能光伏材料的设计也是获得高性能半透明太阳电池的关键，对光活性层带隙的精确控制可以实现对器件颜色的精细调节。2014年，浙江大学陈红征等以PCPDTFBT和PIDT-phanQ分别作为前结电池和后结电池的给体，制备了高效的半透明叠层电池，得到7.4%的效率以及高的透光率（AVT=40%）和优良的显色指数(CRI=97.2)。2017年，占肖卫课题组设计了新型受体IHIC，基于PTB7-Th:IHIC活性层组分的半透明器件得到了9.77%的能量转化效率（AVT=36%，CRI=86）；侯剑辉课题组设计合成了新型非富勒烯受体IEICO-4Cl，基于PTB7-Th:IEICO-4Cl体系实现了效率为8.38%的半透明太阳电池（AVT=25.6%）。2018年，华南理工大学叶轩立等利用布拉格光学反射镜，构造了效率为6.2%的半透明有机太阳电池，同时具备超过80%的红外光反射率，拥有可隔热效果。2020年，浙江大学李昌治等利用三元策略构筑活性层，将受体BTTPC与Y6共混形成合金结构，基于PM6:BTTPC:Y6的半透明太阳电池达到了13.1%的效率，AVT达到22.4%。随后，中国科学院福建物质结构研究所郑庆东课题组利用三元策略，基于PBDB-TF:DTNIF:Y6体系，实现了效率为13.49%，AVT为22.58%的有机半透明太阳能电池。综上，窄带隙光伏材料的开发在制备高可见光透过率的半透明太阳电池中也具有重要的意义，其可以

进一步拓展活性层对近红外光的吸收，增强可见光的透射率，以实现更加理想的半透明太阳能电池。

主题七：大面积器件制备

国家纳米中心魏志祥研究员作了主题报告。

报告评价了大面积有机太阳能电池的快速发展，主要内容集中在：

(1) 光伏材料体系的要求：大面积印刷一般要求光伏性能对活性层厚度不敏感（厚活性层下仍能获得高的光电转换效率），因此近年来厚膜活性层材料引起了不少的关注，包含聚合物-富勒烯、聚合物-非富勒烯、三元体系等其他具有高厚度耐受性的体系。(2) 模块化设计和印刷方法；为了制造大面积电池或模组，可采用的制造技术包刮刀涂布、槽模涂布、丝网印刷等。因此，通过将高效并且其光伏性能对活性层膜厚不敏感的光伏材料体系与具有低效率损耗的模块化设计相结合，然后采用正确的印刷方法，有潜力在不久的将来成功地实现大面积有机太阳能电池的制造。

在光伏材料方面，侯剑辉课题组对高效的非富勒烯受体 **BTP-4Cl** 进行侧链工程设计，合成了具有较低能量损失和良好加工性能的 **BTP-4Cl-12**。基于该材料，他们采用旋涂法制备的小面积 (0.09 cm^2) 器件实现了高达 17% 的光伏效率。使用刮刀涂布法制备的 1 cm^2 器件仍然能够保持 15.5% 的能量转化效率。黄飞课题组报道了通过延长 Y6 分子的烷基链合成的受体 **DTY6**，当与聚合物给体 **PM6** 共混时，无论加工溶剂是 **CF** 还是非卤溶剂 **XY**，基于 **PM6:DTY6** 的太阳能电池都显示出超过 16% 的 PCE。对于 **PM6:DTY6** 的共混物，由于长支链烷基链可确保溶剂加工能力，且长支链烷基链的位阻效应抑制了过度聚集，**CF** 和 **XY** 处理的膜显示出光滑得多的表面和合理的相分离以及较小的畴区。

在制备条件与加工方法方面，西安交通大学马伟课题组研究了刮涂这种实验室大面积印刷加工的原型工具的成膜过程形貌演变。研究

发现，在刮涂制备 PBDB-T:FOIC 体系的器件时，受体 FOIC 的结晶性过强导致器件性能变差，通过先预沉积一层薄的 PBDB-T:IT-M 层，可以在加工 PBDB-T:FOIC 这一主体系时为给体 PBDB-T 的结晶提供大量聚合物晶核，使得给受体结晶动力学更平衡，从而获得了最高 11.9% 的光电转换效率。进一步将这一工艺-形貌-性能构效关系应用到高效的 PM6:Y6 体系，调节加工温度在使用含卤溶剂（氯苯）和非卤溶剂（二甲苯、三甲苯）加工时获得相似的动力学过程（给受体聚集与结晶动力学平衡），从而获得和旋涂加工相媲美的印刷器件效率（15.6%）。

魏志祥课题组通过协同优化形态并减少柔性基板内的电损耗，成功地使用狭缝涂布技术制造了低效率损耗的大面积柔性有机太阳能电池器件。他们在 PTB7-Th: COi8DFIC 的基础上，通过使用 PET/银栅网格基底，在高温（80°C）下加工活性层，使 1 cm² 柔性器件的效率达到了 12.16%，这非常接近旋涂工艺制备的小面积（0.04 cm²）刚性器件的效率（12.37%）。同样，对于面积高达 25 cm² 和 50 cm² 的模组，分别也实现了 10.98% 和 9.05% 的高效率，这是通过狭缝涂布制造的柔性器件最高效率之一。南昌大学陈义旺教授团队为了探究旋涂和刮涂两种不同涂布方式的联系，引入了剪切冲量的概念，并巧妙地用于涂布/印刷过程中富勒烯和非富勒烯受体体系的 BHJ 层形貌的优化，最终得到了 8.9% 效率的 15 cm² 柔性模块。另外，他们在 PBDB-T-2F:IT-4F 体系中引入富勒烯衍生物 ICBA 控制刮刀涂布过程中的活性层形貌。ICBA 作为一种对称的富勒烯衍生物，可以调节结晶取向和分子堆积方向，抑制电荷载流子复合。这种三元策略克服了刮刀涂层过程中由于较弱的剪切作用而引起的形貌问题。利用此策略可以降低非辐射复合损耗，最终通过刮刀涂层工艺制备了效率为 13.70% 的 1.05 cm² 器件。这种方法为在大面积印刷工艺中减少电压损失提供了有效的支持。接着，他们通过将给体 PM6 和受体混合物 ICBA:IT-4F 分别刮涂，成功

得到有效面积为 1.04 cm^2 的三元准平面异质结器件 (PM6/ICBA:IT-4F), 器件效率达到 14.25%。

主题八：有机太阳能电池稳定性

中国科学院苏州纳米研究所马昌期研究员作了主题报告。

有机太阳能电池器件稳定性是决定其能否大规模商业化应用重要衡量标准。因此, 研究器件老化机制, 探索光、热、环境 (水、氧等) 对材料、形貌、结构稳定性的影响等科学问题, 并通过器件结构设计和材料体系优化, 有针对性地提高器件工作寿命以达到实际应用要求, 这是一个非常重要的研究课题。

在光伏材料稳定性方面, 非富勒烯受体的中心稠环单元与末端受体单元之间的双键 (以下称为“环外双键”) 被认为是影响非富勒烯有机太阳能电池光、热稳定性的主要因素。因此需要通过合理的分子设计来提高光伏材料的稳定性。浙江大学陈红征课题组设计了一种具有本征光热稳定性的非富勒烯受体, 他们采用 **Stille** 偶联方法将给电子中心核与吸电子末端单元通过碳碳单键连接, 避免在分子中引入环外双键结构, 显著提高了有机太阳能电池器件的光热稳定性。马昌期课题组发现氧化锌界面层光照后会生成 **OH** 自由基, **OH** 自由基会氧化活性层中小分子受体的环外双键, 使材料发生降解。因此他们通过在氧化锌表面修饰一层 **C₆₀** 分子来抑制界面光化学氧化过程。华中科技大学李忠安课题组提出了一种环锁定共轭桥策略降低了环外双键的光化学反应活性。环锁定共轭桥的引入可以增加 β -碳的空间位阻效应, 降低双键的反应活性; 同时还能形成六元环氢键, 稳定构象, 抑制光异构。因此, 基于环锁定桥联受体的光伏器件的光稳定性显著提高。闵杰课题组通过在活性层体系中掺杂一种镍基螯合物作为活性氧猝灭剂, 抑制了活性层材料在光照过程中活性氧的产生并且降低了材料的光氧化反应速率, 有效提高了器件的光稳定性。

在活性层微观形貌稳定性方面, 器件的使用过程中, 光、力、热

等因素会导致活性层发生相聚集，不利于电荷分离及传输，从而显著降低器件性能。因此需要通过合理的分子设计以及器件制备手段来提高活性层的形貌稳定性。闵杰课题组通过引入聚合物受体 **PZ1** 作为添加剂，**PZ1** 的引入能明显抑制受体分子聚集，固化共混物的微观结构，提升了热稳定性能。中国科学院化学研究所李韦伟课题组设计了一种 **D-A** 双链型单组分光伏材料，将主链聚合物给体和与 **PBI** 受体通过烷基链相连，有效抑制了给受体相在持续退火过程中的过度聚集，实现了高稳定性的聚合物太阳能电池器件。

四、共识和建议

从本体异质结结构于 1995 年被报道算起，有机光伏的发展已经经过了四分之一世纪，能量转换效率从最初的不到 1% 发展到现在的超过 18%，有机半导体给体和受体光伏材料也已经历了几代的更新。尤其是 2015 年以来中国学者引领了有机光伏材料的发展，中国学者开发的窄带隙非富勒烯受体光伏材料以及与之匹配的宽带隙聚合物给体光伏材料、使有机太阳能电池的效率获得大幅度提升，达到了可以向实际应用发展的阶段。最近沙特国王大学的研究者在活性层中添加少量的 *n*-型有机掺杂剂分子，使活性层有机半导体发生 *n*-型掺杂、同时调节了活性层聚集态形貌，将单结有机太阳能电池的效率提升至 18.3%。这为进一步提升有机太阳能电池的效率开辟了一条新的途径，值得我们关注和开展相关研究。同时，国际上对有机太阳能电池器件物理方面的研究进展也值得我们密切关注。

有机光伏的下一步发展，在争取进一步提高效率的同时，需要关注材料和器件的稳定性和成本，同时需要开展大面积柔性和半透明器件制备工艺的研究，争取早日实现有机太阳能电池的实际应用。有机太阳能电池的应用主要在柔性器件、半透明器件以及室内光伏器件等方面。在小分子受体方面，需要关注开发吸收边红移至 1100 nm 左右的高效稳定的超窄带隙受体材料和吸收边在 700 nm 左右的中间带隙受体材

料，超窄带隙受体用于半透明有机太阳电池和叠层有机太阳电池的后结受体材料，中间带隙受体材料用于室内应用的有机太阳电池的受体材料。同时，需要开发高效的与超窄带隙受体匹配的窄带隙给体光伏材料以及与中间带隙受体匹配的宽带隙给体光伏材料。这次论坛与会者普遍认为全聚合物太阳能电池在材料化学结构稳定性以及形貌稳定性方面具有突出的优势，是实现稳定聚合物太阳能电池的重要候选。同时基于将稠环受体小分子高分子化的聚合物受体，可以实现高效率的全聚合物太阳能电池。另外，需要深入和系统开展光伏材料和器件稳定性研究，需要开展结构简单的高效光伏材料（比如已经开发的PTQ10给体材料）来降低光伏材料的制备成本。开展高效和低成本光伏材料的放大合成研究，为大面积光伏器件的制备奠定基础。大家有信心，经过共同努力，有望在“十四五”期间，在我国率先实现有机光伏的实际应用。

（作者：李永舫，中国科学院院士，中国科学院化学研究所/有机固体重点实验室研究员；孟磊，中国科学院化学研究所/有机固体重点实验室研究员）

联系方式：中国科学院学部工作局学术与文化处，010-59358366