

特邀文章

低维钙钛矿:兼具高效率和稳定性的新型太阳能电池光吸收层候选材料

陈皓然¹, 夏英东¹, 陈永华¹, 黄维^{1,2,3}

(1 南京工业大学先进材料研究院,南京 211816; 2 西北工业大学陕西柔性电子研究院,西安 710072;

3 南京邮电大学信息材料与纳米技术研究院,南京 210023)

摘要 使用有机无机杂化钙钛矿材料作为光吸收层的钙钛矿太阳能电池自进入人们的视野以来,其制备工艺和器件结构不断得到优化,短短几年内效率取得了非常可观的增长。与此同时,这种基于三维钙钛矿材料的电池的缺点也越来越突出,尤其是材料的不稳定性,严重阻碍了其发展。低维钙钛矿材料具有有机胺层与无机层(金属卤化物钙钛矿晶体)之间相互交替的低维(层状)结构,其中被有机胺隔开的独立钙钛矿层中八面体的层数 n 越小,钙钛矿越接近二维结构。相比传统三维钙钛矿结构,低维钙钛矿材料应用于光伏器件具有两大优势:(1)耐湿性、光热稳定性大大增强;(2)可以通过改变 n 和插入的有机胺的种类来实现光学及电学性质的可调性。

然而,低维钙钛矿具有较大的光学带隙,有机胺的引入降低了载流子迁移率,导致低维钙钛矿电池的效率明显低于三维钙钛矿电池。因此,近三年来除研究钙钛矿层数对材料性质和器件性能的影响外,研究者们主要从选择合适的有机胺和优化薄膜制备工艺方面不断尝试,并取得了丰硕的成果,在充分发挥低维钙钛矿稳定性优势的同时大幅提升了器件效率。目前,低维钙钛矿太阳能电池的光电转换效率已由 2014 年的 4.37% 跃升至 13.7%。

在较高效率的低维钙钛矿太阳能电池中已取得成功应用的有机胺类包括苯乙胺(PEA)、正丁胺(n-BA)、异丁胺(iso-BA)、聚乙烯亚胺(PEI)等。其中 PEA 应用得最早;n-BA 是运用在目前为止最高效的低维钙钛矿电池中的有机胺;而 PEI 插层形成的低维钙钛矿拥有相对更小的光学带隙和更高的耐湿性,但载流子的传输会受到更大的限制。低维钙钛矿薄膜的制备起初主要采用简单的一步旋涂法,但此法所得的低维钙钛矿平行于基底生长,器件效率很低。近两年的研究工作将基底预热、浸泡、反溶剂滴加等手段引入到钙钛矿旋涂工艺中,实现了低维钙钛矿优先垂直基底生长,为突破低效率瓶颈提供了可能。此外,以三维钙钛矿为基础,以有机胺为添加剂,制得的二维和三维混合的钙钛矿结构,也可以实现器件效率和稳定性的双提升。

本文归纳了低维钙钛矿光伏器件的研究进展,分别对低维钙钛矿的分子结构、插入的有机胺的选择、钙钛矿薄膜的制备方法等进行介绍,分析了低维钙钛矿太阳能电池面临的问题并展望其前景,以期为制备稳定和环境友好的新型钙钛矿太阳能电池提供参考。

关键词 低维钙钛矿 太阳能电池 有机胺 层状钙钛矿 光伏器件

中图分类号:TM914.4+2 文献标识码:A DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2018.01.001

Low-dimensional Perovskites: a Novel Candidate Light-harvesting Material for Solar Cells that Combines High Efficiency and Stability

CHEN Haoran¹, XIA Yingdong¹, CHEN Yonghua¹, HUANG Wei^{1,2,3}

(1 Key Laboratory of Flexible Electronics (KLOFE) & Institution of Advanced Materials (IAM), Jiangsu National Synergetic Innovation Center for Advanced Materials (SICAM), Nanjing Tech University (Nanjing Tech), Nanjing 211816;

2 Shaanxi Institute of Flexible Electronics (SIFE), Northwestern Polytechnical University (NPU), Xi'an 710072;

3 Key Laboratory for Organic Electronics & Information Displays (KLOEID), and Institute of Advanced Materials (IAM), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023)

Abstract Since the emergence of organic-inorganic hybrid perovskite materials as light harvesters, the perovskite solar cells have attained a considerable efficiency improvement due to notable achievements in optimizing the fabrication process and device structure, while nevertheless been suffering increasingly serious challenges, especially instability. Layered (low-dimensional) perovskite materials are constructed based on a periodical (or quasi-periodical, or hybridized) structure which is composed of alternate layers of organic amines and metal halide perovskite crystals. The layered structure approximates to a two-dimensional structure whilst the number (n) of planes, which consist of the pyramids' squares of the perovskite octahedrons, within one separated perovskite layer approaches 1. For photovoltaic application, these low-dimensional perovskite structures have two advantages compared to their three-dimensional counterparts: I. remarkably enhanced moisture resistance and thermal stability; II. tunable

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2015CB932200);中组部“千人计划”青年项目;国家自然科学基金委青年项目(51035063);江苏省特聘教授(54907024);江苏省自然科学基金青年科学基金项目(55135039;55135040)

陈皓然:女,1996 年生,博士研究生,主要研究方向为低维钙钛矿光伏器件 E-mail:247944066@qq.com 陈永华:通信作者,男,1982 年生,教授,博士研究生导师,主要从事有机及钙钛矿光电材料与器件的研究 E-mail:iamyhchen@njtech.edu.cn

optical and electrical characteristics by varying n and selecting different organic amines.

On the other hand, poor carrier mobility (a consequence of the inhibition of out-of-plane charge transport by the organic amine cations) and wide band gap contribute to a far lower efficiency of low-dimensional perovskite solar cell than three-dimensional perovskite device. This urges intensive research endeavors to seek favorable organic amines and optimize perovskite film fabrication process, aiming at boosting photovoltaic efficiency while exploiting layered perovskite's stability. And in the past three years, impressive strides have been made in promoting the low-dimensional perovskite solar cells, with a giant leap in the reported power conversion efficiency (PCE) from 4.37% to 13.7%.

Phenethylamine (PEA), n-butylamine (n-BA), isobutylamine (iso-BA), polyethylenimine (PEI), etc. have been found to be satisfactory as the hydrophobic amine interlayers for relatively-high-efficiency layered perovskite solar cells. PEA is the first to be involved in the attempts, and the n-BA-intercalated perovskite hold the currently highest efficiency of this new type of photovoltaic devices. PEI intercalation appears to result in narrower band gap and higher moisture resistance, but also leads to a larger inhibition to the carrier transport. Although one-step spin coating provides a facile route to obtain layered perovskite films, this method will cause the horizontal growth (i.e. interlayers parallel to substrate) of the layered structure and in consequence, an extremely low cell efficiency. Works in the past two years have established a new avenue to overcome the low-efficiency bottleneck, by introducing various techniques into the spin coating process, e.g. hot casting, immersion (in short-chain amines), antisolvent dripping, all of which have successfully achieved the preferential out-of-plane alignment of the inorganic perovskite layers. Besides, researchers also have demonstrated that the 2D-3D hybrid perovskite structures, which can be constructed on the basis of 3D perovskite with the presence of organic amine additives, can gain improvements in terms of both efficiency and stability.

This review offers a retrospection of the research efforts with respect to the layered (low-dimensional) perovskite photovoltaic devices, and provides elaborate descriptions about the structure of low-dimensional perovskite, the selection of the intercalating organic amines, and the film fabrication process. We then pay attention to the problems confronting the current state-of-the-art low-dimensional perovskite solar cells. We have confidence that the low-dimensional perovskite solar cells have a bright future in the development and innovation of stable and environmental-friendly photovoltaic devices.

Key words low-dimensional perovskite, solar cell, organic amine, layered perovskite, photovoltaic device

0 引言

钙钛矿材料作为目前最火热的新型光吸收材料,是人们近几年一直在关注和研究的对象之一,其中有机无机杂化钙钛矿材料发展迅猛。作为一种光学和电学性质显著的半导体材料,它具有高的消光系数^[1]、高的载流子迁移率^[2]、小的激子结合能^[3]以及易于溶液制造加工^[4]等优点,被研究者们广泛用于各种结构的太阳能电池中。经过对薄膜制备^[5-9]和器件结构^[10]的不断优化,有机无机杂化钙钛矿太阳能电池的效率在短短几年内从最初的 3.81%^[11]已增长到如今的 22.1%^[12]。

随着钙钛矿太阳能电池取得突破性进展,其缺点也更加突出,尤其是材料的不稳定性已成为此种电池发展的最大绊脚石^[13-14]。传统的三维钙钛矿结构如图 1(a)所示,结构式为 ABX_3 ,其中 A 为有机胺或无机阳离子、B 为金属阳离子、X 为卤族元素阴离子。由于空间限制,只能在 A 位将小的无机或有机阳离子整合到立方钙钛矿晶胞内,常见的有铯离子(Cs^+)^[15]、甲胺(MA)阳离子($CH_3NH_3^+$)^[16]和甲脒(FA)阳离子($NH_2CH=NH_2^+$)^[17],这样,一个个八面体 MX_6^{2-} 晶胞紧密排列结合成了整个钙钛矿的晶体。如今研究者们设想将钙钛矿沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向“切开”,形成一段段小的八面体无机层,把(比三维钙钛矿的 A 位阳离子稍大的)有机胺离子作为配体交替地插入,替代(或部分替代)原有的 A 位离子,这样较大的有机胺层与无机层之间相互交替,就形成了低维结构(见图 1(b))。有机胺层与无机层之间以及有机胺层内部存在的范德华力,使得钙钛矿的结构不容易被破坏,并且部分有机胺本身具有疏水性,因而钙钛矿太阳能电池的耐湿性就会大大提高;同时,低维钙钛矿高的形成能^[18]、超低的自掺杂效应^[19]以及显著降低的离子迁移^[20]等特点,使其在光伏器件中可以获得前所未有的高稳定性。

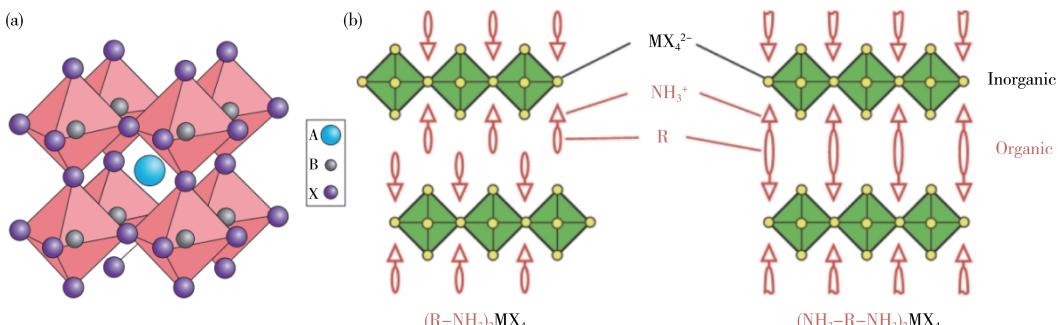


图 1 (a) 三维钙钛矿晶体结构^[21]; (b) 使用不同有机胺离子插层所形成的二维钙钛矿结构^[22]

Fig. 1 The basic structures of (a) three-dimensional perovskites^[21] and (b) two-dimensional layered perovskites intercalated with two different types of organic amine cations^[22]

1 低维钙钛矿分子结构

常见的低维钙钛矿的通式为 $(R-NH_3)_2 A_{n-1} M_n X_{3n+1}$ ，其中 $R-NH_3$ 代表插层的有机胺离子， A 对应于三维钙钛矿中原有的 A 位阳离子， M 为金属阳离子， X 为卤素阴离子， n 表示每一层分开的钙钛矿层中八面体的层数，也统称为低维钙钛矿的层数。插层的有机胺不仅可以是单胺，还可以是双胺甚至多胺(Polyamine)，选择具有不同氨基数目的有机胺，就会形成不同的层间结构(见图1(b))，若选择双胺，那么结构通式就变成 $(NH_3-R-NH_3) A_{n-1} M_n X_{3n+1}$ 。从图2可以看出：当 $n=1$ 时，无机层中的八面体只有一层，这时可以将 $n=1$

的低维钙钛矿称作二维钙钛矿结构；随着 n 的增大，无机层逐渐变厚，这时的低维钙钛矿($n \geq 2$)也可以称为准二维钙钛矿结构；当 n 逐渐增大到无穷时($n = \infty$)，无机层已经厚到可以将有机胺层完全忽略，这样无穷层数的钙钛矿就趋近于三维钙钛矿结构。从晶向上来划分，不同的晶向有不同的结构通式^[23]：常见的用于太阳能电池中的低维钙钛矿 $(R-NH_3)_2 A_{n-1} M_n X_{3n+1}$ 为<100>晶向，此类型的低维钙钛矿在 n 较小($n \leq 10$)时也称作 Ruddlesden-Popper 结构钙钛矿；其他的晶向还有<110>^[24]、<111>^[25]。低维钙钛矿具有不同的晶向，主要是由于不同结构的有机胺与无机层的自组装方式不同。

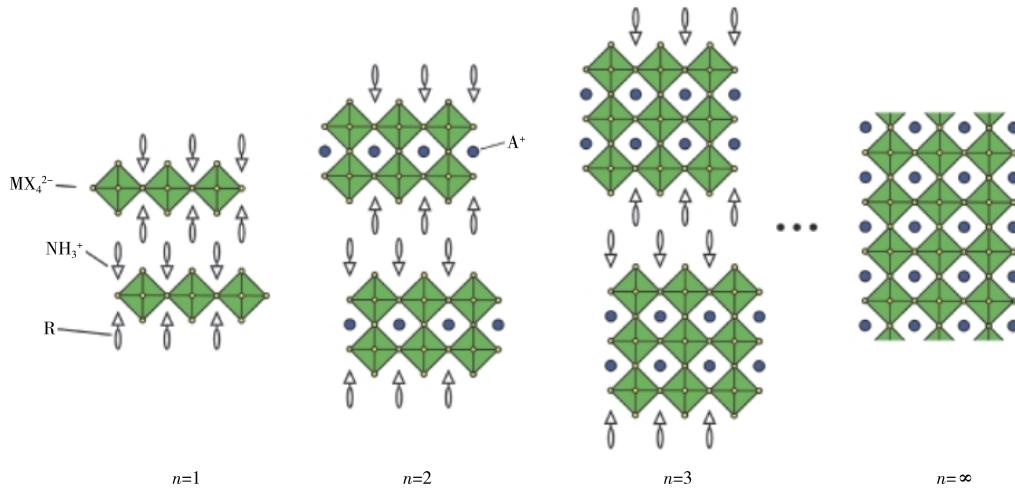


图 2 不同 n 值的 $(R-NH_3)_2 A_{n-1} M_n X_{3n+1}$ 钙钛矿分子结构示意图^[22]

Fig. 2 The molecular structures of the $(R-NH_3)_2 A_{n-1} M_n X_{3n+1}$ perovskites differing in n value^[22]

低维钙钛矿在2014年最初运用到太阳能电池中，得到了4.37%的光电转换效率^[26]，但仅仅经过三年时间，效率就已提升至13.7%^[27]。它的优点十分显而易见：显著提升了薄膜和器件稳定性；可以通过调节前驱体中各反应物的配比来改变层数，以及尝试选择不同的有机配体，来实现钙钛矿薄膜和器件的光学及电学性质的可调性；通过简单的一步旋涂法就能够制备出高质量的低维钙钛矿薄膜。然而，与三维钙钛矿相比，低维的钙钛矿材料具有较大的光学带隙^[28]，虽然这可以为电池结构带来更大的可调范围，但插人体积偏大的有机胺所导致的介电失配的空间限制也会对器件产生束缚障碍，使激子的迁移率大大降低^[29]，成为低维钙钛矿太阳能电池效率难以提升的根本原因之一。因此，需要将合适的有机胺添加到三维钙钛矿结构中进行自组装，并且找到适宜的薄膜制备工艺，才可以得到稳定且高效的低维钙钛矿光伏器件。

2 有机胺的选择和无机层中钙钛矿层数的优化

最先制备出的较高效率的低维钙钛矿太阳能电池中运用了苯乙胺(PEA)作为有机阻挡层(见图3(b))。Smith等^[26]将 $n=3$ 的钙钛矿薄膜 $(PEA)_2(MA)_2Pb_3I_{10}$ 与最常见的三维 $MAPbI_3$ 钙钛矿进行比较，两者带隙的实测结果分别为2.1 eV和1.61 eV，两者的薄膜形貌和薄膜性质也有很大差别。此外，Smith等对固体和粉末低维钙钛矿进行了粉末X射线衍射(PXRD)分析，根据两者测试结果之对比发现，粉末

钙钛矿存在少量对应于1、2、4、5层数的钙钛矿的特征峰，说明所得的钙钛矿并非完全只存在 $n=3$ 的结构，而是掺杂了少量其他层数结构的低维钙钛矿。尽管最终的器件效率很低，但如图3(c)所示，在52%的相对湿度环境下储存了46天的低维钙钛矿薄膜相比于同样条件下的三维钙钛矿薄膜依旧显示出高强度的钙钛矿特征峰，展现出了高耐湿性。

加入PEA后钙钛矿的带隙有明显的增大，光吸收范围变小，光生载流子大大减少，而且苯乙胺自身携带苯环，苯环之间的位阻也会在一定程度上影响电荷传输，所以当选择苯乙胺作为插层的有机胺时，往往通过增加无机层的厚度来弥补缺陷以提升效率，同时也可保留良好的稳定性。因此，PEA常出现在高 n 值的低维钙钛矿太阳能电池中。Quan等^[18]试图把三维钙钛矿的维度降低，以得到较稳定的钙钛矿结构。计算表明，对传统的三维钙钛矿而言，相对于形成钙钛矿晶体，分解成 PbI_2 和 MAI (分子式为 CH_3NH_3I)会更加稳定一些，其中甲胺阳离子(MA^+)的亲水性和挥发性使得 $MAPbI_3$ 更容易因湿度和热量而发生降解，并且钙钛矿的分解也不是在内部自发进行，而是由表面开始。而有机胺层间存在范德华力，若要从钙钛矿中去除PEAI，所需的能量就比仅去除 MAI 要高，薄膜的解吸附速率大大降低，从而使钙钛矿的分解速率降低为原来的1/1 000。从图4可以看出，如预期一样，降低维度的钙钛矿无论是薄膜还是器件都展现出了高稳定性，并且足够厚的层数($n=60$)和可降低带隙的甲脒使得电池的认证效率依旧达到了15.3%。

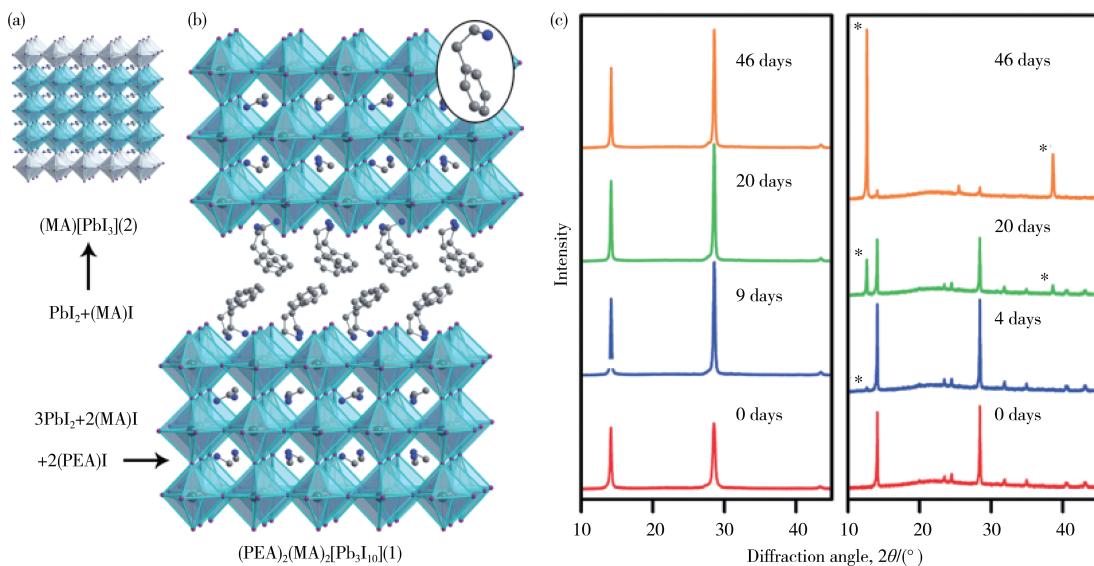


图 3 (a) 三维钙钛矿 MAPbI_3 和 (b) $n=3$ 的低维钙钛矿 $(\text{PEA})_2(\text{MA})_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}(1)$ 的结构示意图^[26]；
(c) 经过不同天数后低维钙钛矿(左)和三维钙钛矿(右)薄膜的 XRD 谱^[26]

Fig. 3 The crystal structures of (a) the 3D perovskite MAPbI_3 and (b) the $n=3$ perovskite $(\text{PEA})_2(\text{MA})_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$ ^[26];
(c) XRD patterns of the films of low-dimensional perovskite (left) and 3D perovskite (right) after a few days^[26]

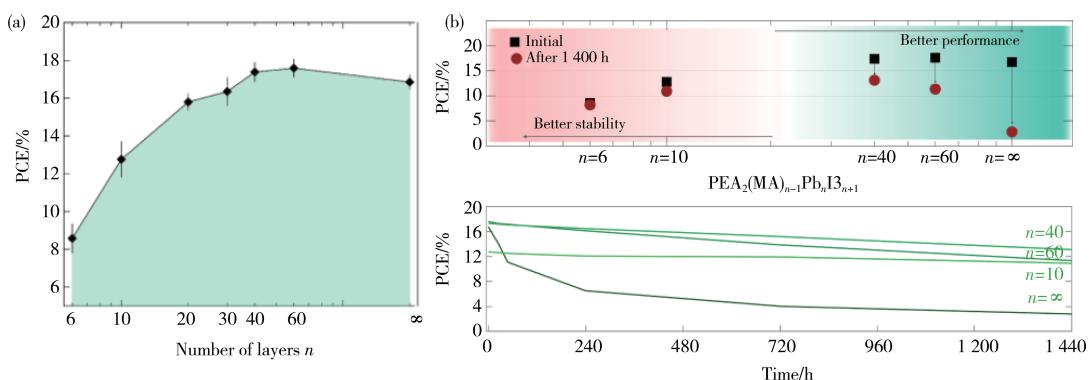


图 4 (a) 不同 n 值的 $(\text{PEA})_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ 光伏器件的效率分布^[18]；(b) 器件性能和稳定性随层数变化的示意图^[18]；
(c) 同层数的器件随时间推移的效率演变^[18]

Fig. 4 (a) The PCEs for $(\text{PEA})_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ perovskite device with different n values^[18]；(b) device performance and stability as functions of n value^[18]；(c) performance evolution of the devices with different n values as a function of time^[18]

Cohen 等^[30]制备出了无空穴传输层和开路电压高达 1.46 V(含空穴传输层结构)的高效低维($n=50$)钙钛矿光伏器件,有机胺的加入可以提高带隙,再将卤素由碘变成溴,就可以大大提高电池的开路电压。借助密度泛函理论(DFT)计算的不同层数的导电率随 n 的升高而增大,这是因为无机层的增多会对苯环产生压力,增加环与环之间的 $\pi-\pi$ 型重叠,苯环间的压力越大,电子空穴对的产生所消耗的能量也越小。从吸收和光致发光(PL)谱线来看,高 n 值的低维钙钛矿已经趋近于三维钙钛矿结构,因此峰位也与三维钙钛矿没有差别,但低维薄膜的瞬态光致发光寿命要比三维薄膜大许多(见图 5)。虽然上述高 n 值的钙钛矿在理论上符合低维钙钛矿的通式,但是经计算得到的 $n=60$ 的钙钛矿薄膜的厚度已经远大于常规三维纳米晶的量子限制极限厚度^[31]。严格意义上讲,在这类层数较高(如 $n=60$)的钙钛矿中,我们更倾向于把有机胺层看作是一种添加剂在发挥有效作用,因而并没有将与其相关的研究中所报道的效率纳入到低维钙钛矿

器件的效率中来。

现如今丁胺(BA)成为低维钙钛矿光伏器件中最常见的较大的有机胺。其中,正丁胺(n-BA)作为直链分子,链长适宜,并且不像苯环那样具有大位阻的、阻碍激子扩散的官能团,它也是运用在目前为止最高效的低维钙钛矿太阳能电池中的有机配体。Cao^[32]分析了低层数范围内($n=1,2,3,4$)层数的变化对钙钛矿晶体结构取向的影响规律。如图 6(a)所示,随着层数的增加,(111)晶面开始出现,丁胺层与无机层之间产生界面竞争,从而改变了晶体生长方向。同时,层数的变化也会导致光学表征的明显差异,由于丁胺相对含量的不同,八面体层数的增多会使带隙变小,吸收和荧光光谱产生相应的红移(见图 6(b))。观察图 6(c)可以发现,将薄膜在湿度为 40% 的环境中放置两个月,三维钙钛矿薄膜(PbI₃)已经明显分解出大量的黄色碘化铅,而 $n=1 \sim 4$ 的钙钛矿薄膜展现了很强的疏水性,颜色没有发生任何变化。此外,当 n 值很小($n \leq 2$)时,有机层中的丁胺离子会进行电荷筛选并捕获长

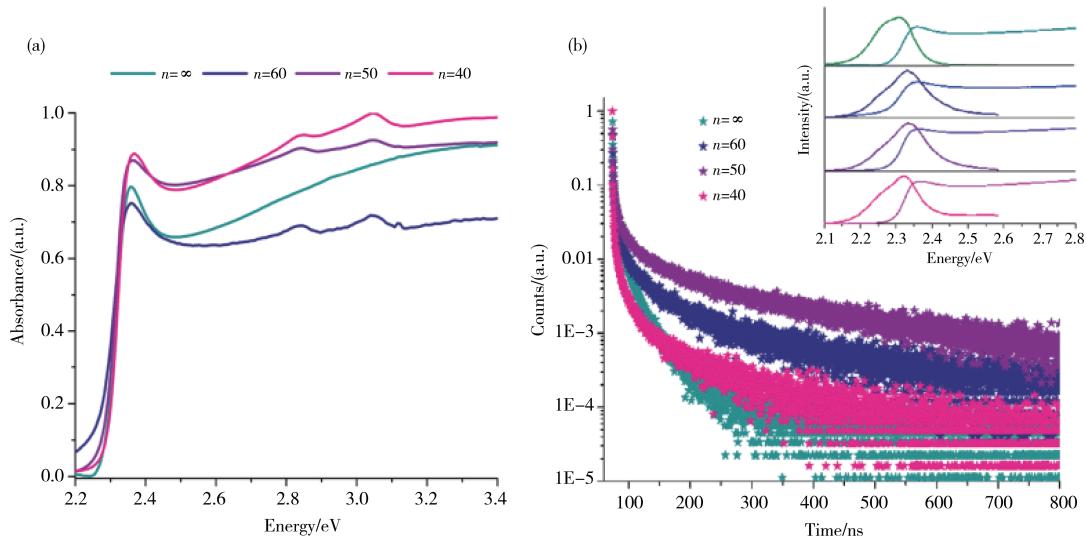


图 5 $n=40, 50, 60$ 的低维钙钛矿 $(\text{PEA})_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ 与三维 ($n=\infty$) 钙钛矿的 (a) 吸收曲线和 (b) 荧光、瞬态荧光曲线对比^[30] (电子版为彩图)

Fig. 5 (a) Absorbance spectra and (b) PL and PL lifetime of the $(\text{PEA})_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ layered perovskites ($n=40, 50, 60$) and three-dimensional perovskite ($n=\infty$)^[30]

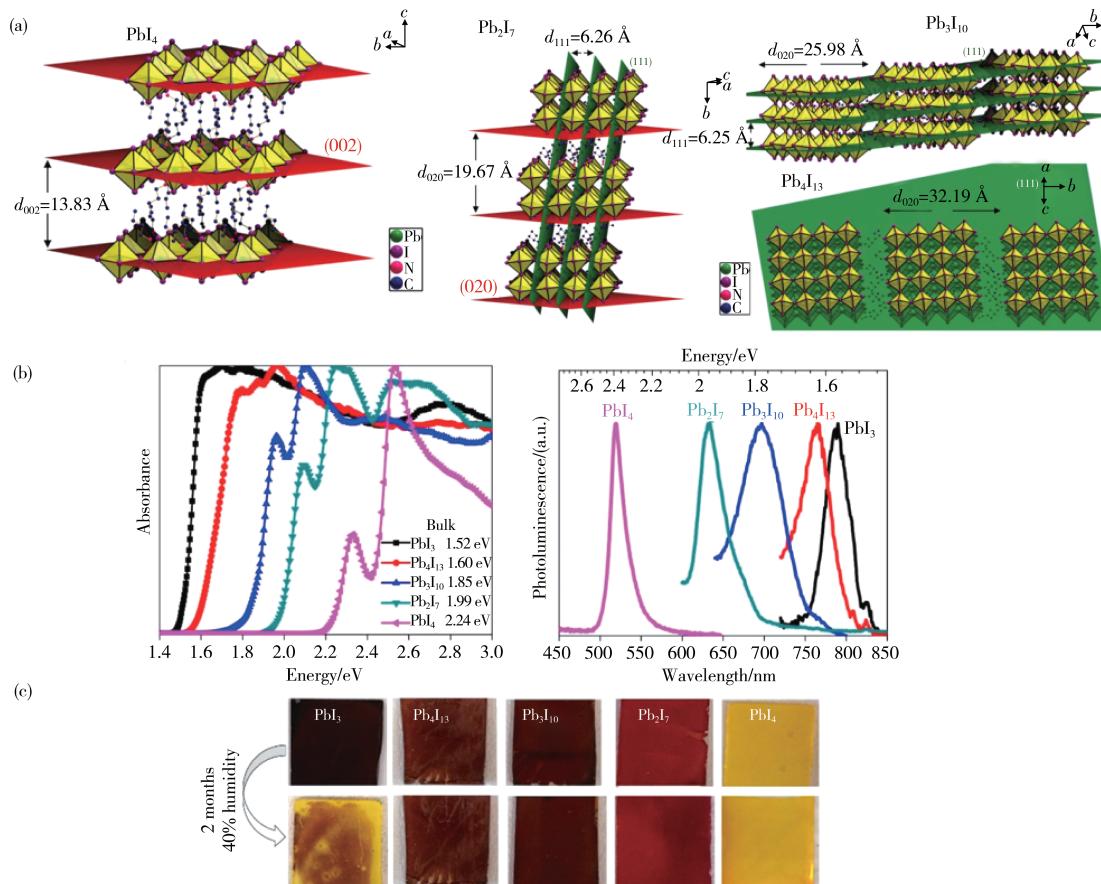


图 6 (a) $(\text{BA})_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ ($n=1, 2, 3, 4$) 低维钙钛矿晶体结构及取向的示意图^[32]；(b) $(\text{BA})_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ ($n=1, 2, 3, 4$) 低维钙钛矿薄膜吸收曲线和荧光光谱对比^[32]；(c) 暴露于 40% 湿度两个月的三维钙钛矿和低维钙钛矿薄膜外观的前后对比^[32]

Fig. 6 (a) The crystal structure and orientation plane of $(\text{BA})_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ ($n=1, 2, 3, 4$) layered perovskites^[32]；(b) the absorption curve and fluorescence spectra of $(\text{BA})_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ ($n=1, 2, 3, 4$) layered perovskite thin films^[32]；(c) the appearance change of 3D and low-dimensional perovskite films with exposure to 40% humidity for two months^[32]

寿命激子，抑制光生电子空穴对的分离，从而增加其复合概率，因此低层数的钙钛矿在发光二极管中可以起到积极作用。

Chen 等^[33]选用异丁胺(iso-BA)作为插层的有机胺，并

与普遍运用在低维钙钛矿中的正丁胺进行比较，两者的 XRD 峰位一致，但 iso-BA 的(111)峰较(202)峰更强，正丁胺则相反。掠入射广角 X 射线散射(GIWAXS)分析显示，(iso-

$(\text{BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ 薄膜的 GIWAXS 图(见图 7(c))相比 $(\text{n-BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ (见图 7(b))薄膜存在更多零散的布拉格点, 说明薄膜中晶粒高度取向。在相同条件下, $(\text{iso-BA})_2-$

$(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ 相比 $(\text{n-BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ 有更高的载流子迁移率, 使得器件的电流密度显著提升, 同时也得到了更高的效率(见图 7(d))。

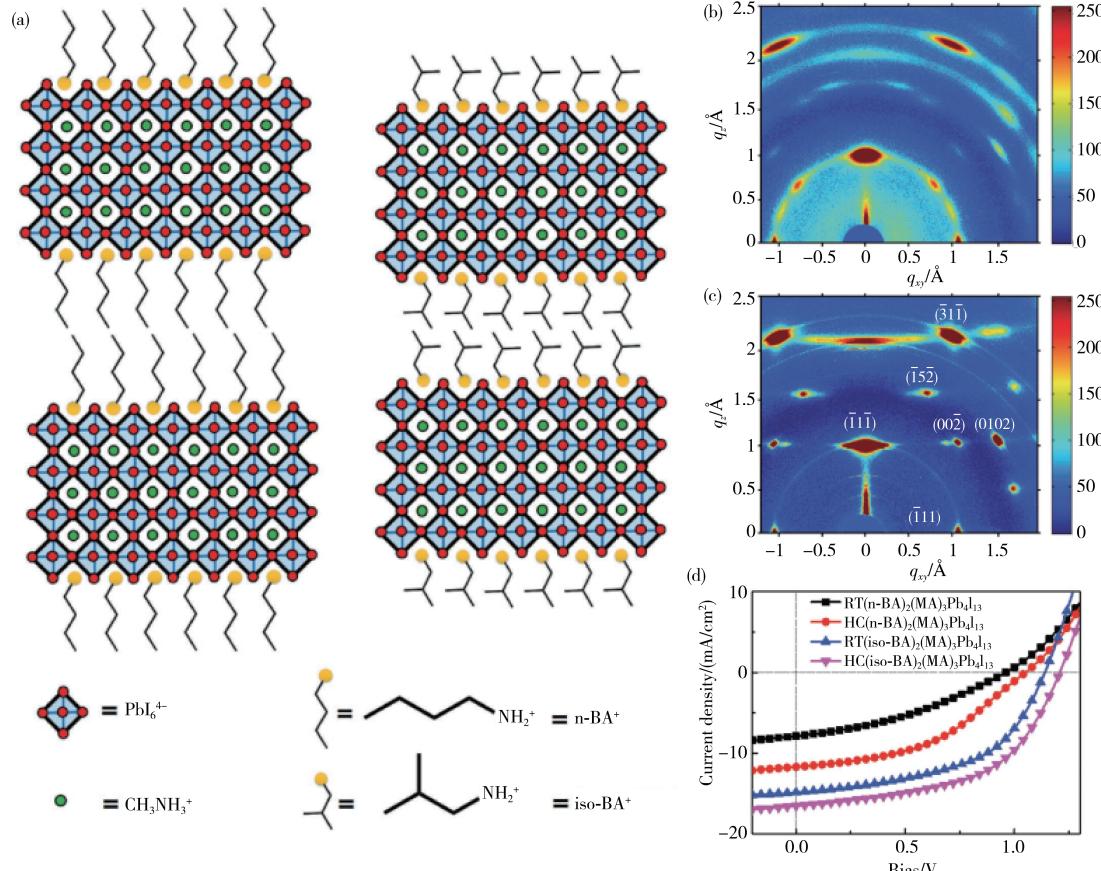


图 7 (a) 以异丁胺(iso-BA)和正丁胺(n-BA)作为有机胺层的低维钙钛矿的分子结构示意图^[33]; (b) $(\text{n-BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ 和 (c) $(\text{iso-BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ 薄膜的 GIWAXS 图^[33]; (d) 不同薄膜制备方法对应的低维钙钛矿器件的 J-V 曲线^[33]

Fig. 7 (a) The structures of layered perovskites intercalated by isobutylamine (iso-BA) and n-butylamine (n-BA) molecules^[33]; the GIWAXS of (b) $(\text{n-BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ and (c) $(\text{iso-BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ thin films^[33]; (d) the J-V curves of the layered perovskite devices corresponding to different thin film preparation methods^[33]

前述研究中采用的 PEA、n-BA、iso-BA 均属于单胺, Yao 等^[34]则尝试用多胺阳离子聚合物——聚乙烯亚胺(PEI)作为插层的有机胺。在低维钙钛矿中, 有机-无机结构之间的强相互作用有助于降低整个凝聚体的带隙。单胺阳离子只能分别组装到一个无机层上, 层间会形成范德华间隙, 而插层的多胺阳离子覆盖了相邻无机层之间的整个空间, 一个多胺阳离子同时连接在两个相邻的无机层上并进行自组装结合(见图 8), 使层间相互作用增强, 光学带隙减小。此外, 相较于普通的脂肪胺或芳香胺, 聚合物分子可以更好地起到疏水作用, 从而进一步提升薄膜和器件的整体耐湿性。另外, 基于未来实际光伏应用对器件尺寸的需求, 他们还通过研究证实了利用低维钙钛矿制造大面积电池的优势, 采用一步旋涂方法, 将传统三维钙钛矿 MAPbI_3 与 PEI 插层的低维钙钛矿 $(\text{PEI})_2(\text{MA})_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ ($n=5, 7$) 分别沉积在 $3.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$ 的基板上, 发现除耐湿性外, 大尺寸器件中低维钙钛矿薄膜还展现出更多的优势:(1)薄膜均一性明显优于三维钙钛矿薄膜;(2)电池 PCE(Power conversion efficiency)与小尺寸电池相比只略有降低, 且高于三维钙钛矿电池(三维钙钛矿 2.32 cm^2 电池效率只有其 0.04 cm^2 电

池的 30%, 且大尺寸电池中低维钙钛矿拥有明显高于三维钙钛矿的 PCE);(3)50 个样品的 PCE 标准偏差也比三维钙钛矿电池小得多, 说明器件可重复性方面优势明显。由此可见, 以聚合物多胺作为有机层也是形成稳定的钙钛矿太阳能电池的一条可发展的路径, 但其优点的来源也是造成其本质缺点的根源所在——大分子自组装后产生的空间位阻更大, 也会有更大几率限制激子的扩散, 导致器件的短路电流大大降低。

3 薄膜制备

低维钙钛矿的薄膜通常是采用简单的一步旋涂法制备, 将插层的有机胺盐、A 位有机胺盐和金属卤化物按照一定比例混合溶解后制成钙钛矿前驱体溶液, 这种方法不但简易, 而且可以制备出高质量的薄膜。然而有机胺层的引入相当于在原有的三维层中插入了一层绝缘体, 使低维钙钛矿的晶体趋近于板状结构(见图 9), 平行于基底生长, 导致载流子难以扩散到对应的传输层中, 只能在无机层内扩散, 引发辐射复合, 从而使效率降低。针对这一问题, 研究者们在薄膜制备方法方面展开了优化探究。

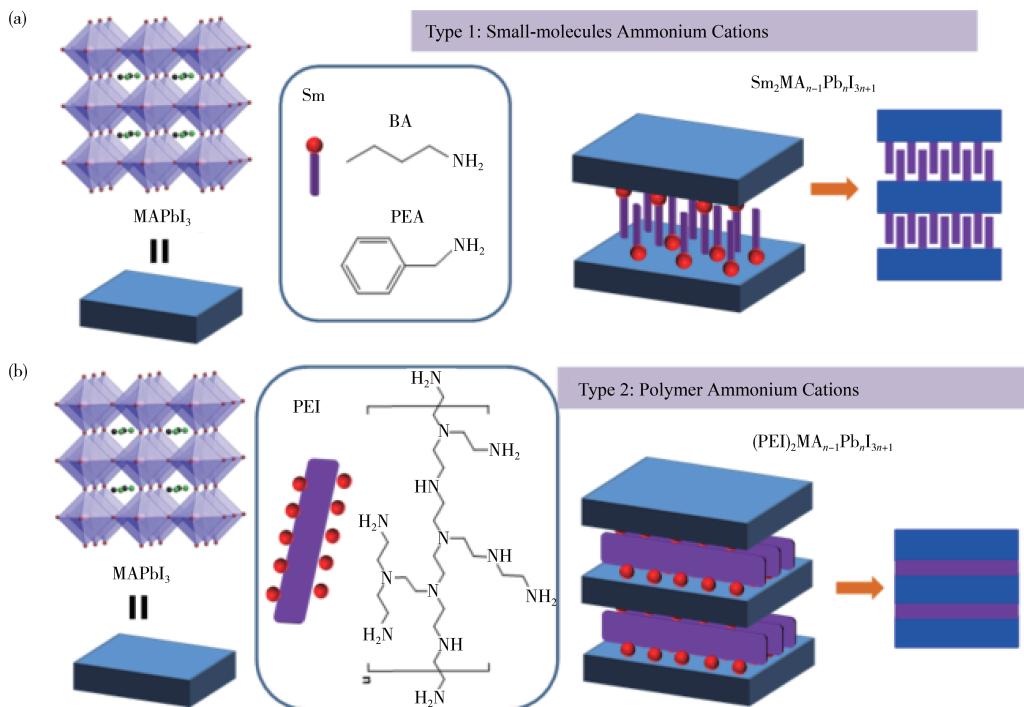
图 8 用(a)有机单胺如 PEA、BA 等与(b)链状多胺聚合物(PEI)插层形成的低维钙钛矿结构示意图^[34]

Fig. 8 Schematic diagram of the low-dimensional perovskite structures with (a) monoamine molecules such as PEA, BA etc. intercalation and (b) linear polyamine macromolecules (PEI) intercalation^[34]

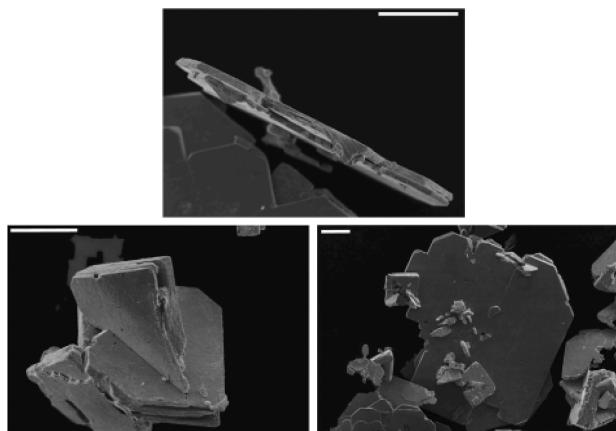
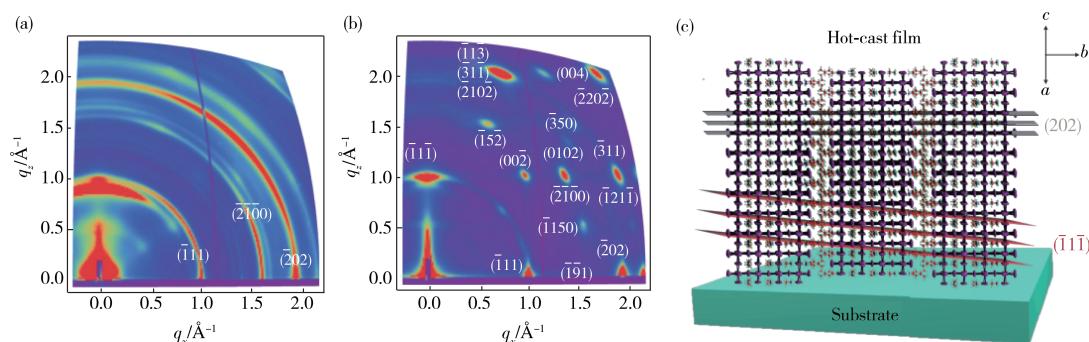
图 9 $(\text{BA})_2(\text{MA})_4\text{Pb}_5\text{I}_{16}$ 单晶的 SEM 微观形貌^[35]

Fig. 9 The SEM topography of $(\text{BA})_2(\text{MA})_4\text{Pb}_5\text{I}_{16}$ single crystal^[35]

Tsai 等^[36]将基底预热(Hot-casting)运用到钙钛矿薄膜

制备工艺中,即在旋涂钙钛矿前驱液前,对基底进行不同温度的加热,得到了 12.52% 的器件效率。研究发现,基底预热会改变钙钛矿在旋涂过程中的生长方式:在传统的室温旋涂中,低维钙钛矿是平行于基底生长的;而在加热条件下,低维钙钛矿会沿基底平面垂直生长,这样无机层中的电子和空穴在垂直生长的钙钛矿中不受大分子阻挡层的束缚,使载流子更加有效地传输。为了探测在薄膜中相对于基底的钙钛矿取向,用同步加速器辐射对薄膜进行了 GIWAXS 分析,如图 10 所示,室温旋涂薄膜的 GIWAXS 图像表现出沿着某些延伸弧段具有较大强度的德拜-谢勒衍射环,而基底预热后,沿相同的环表现出了锐利的离散布拉格点。这表明在不预热基底的条件下旋涂钙钛矿,晶粒的生长是完全随机的,而在基底预热条件下钙钛矿晶粒高度取向。GIWAXS 图中心处所指向的 $(\bar{1}1\bar{1})$ 面为钙钛矿沿基底生长的优先取向,因而可以凭相应取向推断出低维钙钛矿在基底加热条件下优先沿垂直基底方向生长。

图 10 (a) 室温旋涂法和(b)基底预热法制备的 $(\text{BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ 钙钛矿薄膜的 GIWAXS 图^[36];

(c) 低维钙钛矿晶体中 $(\bar{1}1\bar{1})$ 和 (202) 面示意图^[36]

Fig. 10 The GIWAXS maps for $(\text{BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ perovskite films with (a) room temperature spin coating and (b) hot-casting method^[36]; (c) schematic rendering of $(\bar{1}1\bar{1})$ and (202) planes in a low-dimensional perovskite crystal^[36]

Koh 等^[37]使用浸泡手段制备出混合维度的钙钛矿材料 $(\text{IC}_2\text{H}_4\text{NH}_3)_2(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ 太阳能电池(见图 11), 得到了大于 9% 的效率。如图 11(a) 所示, 将已旋涂好的纯二维($n=1$)钙钛矿薄膜浸泡在溶有一定浓度的有机小分子胺(MAI)的溶液中, 通过对浸泡时间(1~5 min)的调节, 可以得到不同的混合维度钙钛矿。混合维度由于存在多种维度的钙钛矿层, 可以实现卤化铅晶格不同程度的堆叠, 这样可

以减小因有机胺的引入而变大的带隙。从吸收谱和 PL 谱中能明显看出随浸泡时间延长, 混合维度钙钛矿薄膜具有类似于一步旋涂法制备出的低维钙钛矿薄膜的随着层数递增的特征表现, 并且 GIWAXS 图像证实在有机小分子胺中浸泡也可以改变低维钙钛矿在基底上的生长方向。此外, 采用浸泡方法获得的混合维度钙钛矿薄膜依旧能够保持非常良好的耐湿性。

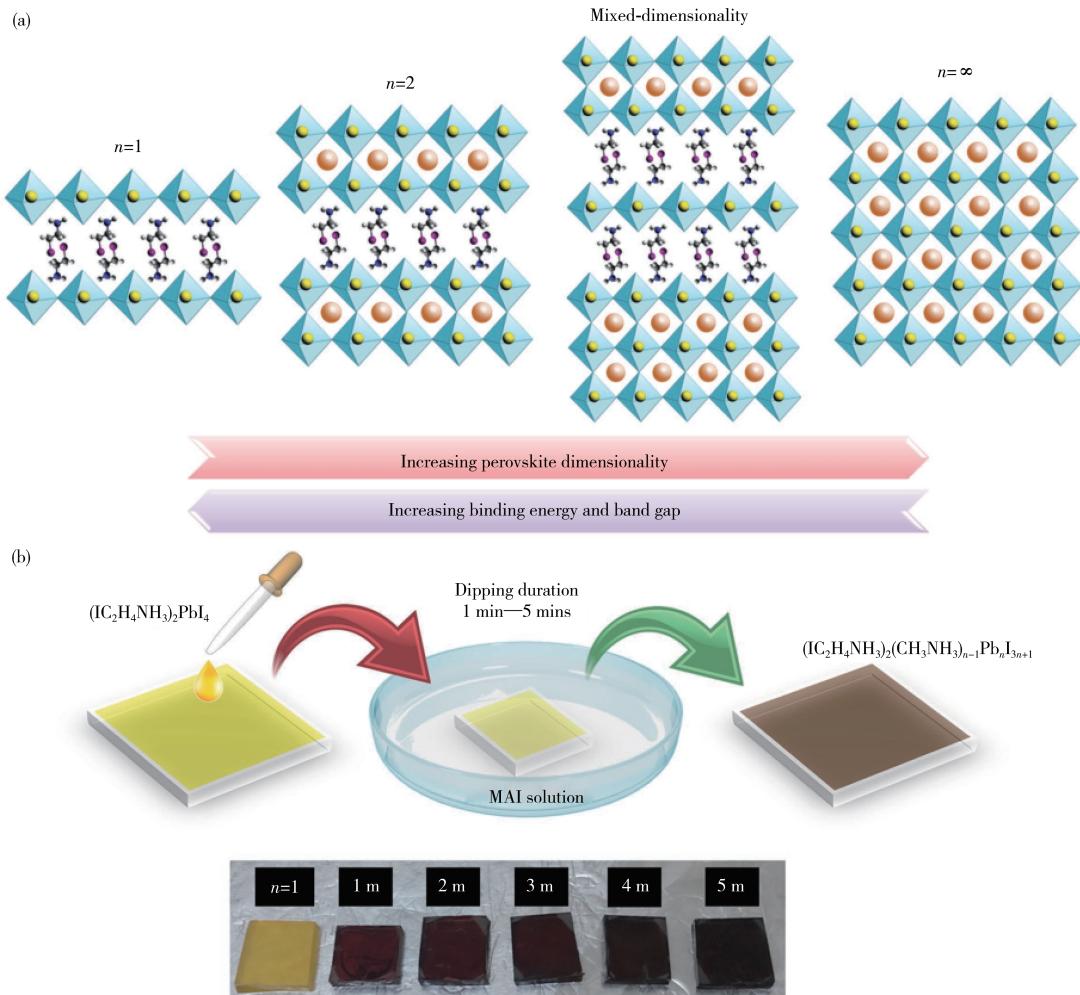


图 11 (a)混合维度钙钛矿 $(\text{IC}_2\text{H}_4\text{NH}_3)_2(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ 结构示意图^[37]; (b)浸泡法制备混合维度钙钛矿示意图和不同浸泡时长条件下得到的钙钛矿薄膜的颜色变化情况^[37]

Fig. 11 (a) A schematic illustration showing the crystalline structure of mixed-dimensional perovskites $(\text{IC}_2\text{H}_4\text{NH}_3)_2(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ ^[37]; (b) a schematic illustration for the fabrication process of mixed-dimensional perovskites via immersion method, and the color change of perovskite films with different dipping durations^[37]

Liao 等^[38]使用甲苯作为反溶剂, 在旋涂钙钛矿过程中滴加, 同样制得垂直取向生长的低维钙钛矿薄膜。将传统三维钙钛矿 FASnI_3 (分子式为 $\text{NH}_2\text{CH}=\text{NH}_2\text{PbI}_3$)与加入不同含量 PEA 的钙钛矿薄膜 $(\text{PEA})_2(\text{FA})_{n-1}\text{Sn}_n\text{I}_{3n+1}$ 进行了 GIWAXS 对比分析, 发现加入 20% 的 PEA($n \approx 9$)可以使晶粒高度取向, 得到垂直于基底的钙钛矿结构, 而更高 PEA 含量和三维的钙钛矿并没有高度取向的特征, 这同样解释了 n 值很小的低维钙钛矿在 XRD 图中靠前位置区别于三维钙钛矿的特征峰的存在。另外, Bai 等^[39]采用一种类似原位生长的方法, 如图 12(a) 所示, 在甲苯中溶解适量碘化苯乙胺, 在

MAPbI_3 钙钛矿的旋涂过程中滴加, 形成三维-二维($\text{MAPbI}_3\text{-}(\text{PEA})_2\text{Pb}_2\text{I}_4$)分层的钙钛矿。三维 MAPbI_3 钙钛矿首先在基板上结晶, 二维的 $(\text{PEA})_2\text{Pb}_2\text{I}_4$ 在此基础上被诱导结晶, 形成一层超薄的覆盖层, 借助 SEM 观察发现含碘化苯乙胺的甲苯作反溶剂并没有对结晶质量产生负面影响, 薄膜晶粒变得更大并且未观察到缺陷。二维结构的引入改变了界面能级, 减弱了钙钛矿与电子传输层之间的电荷重组, 由此制得的器件同时具有水、热稳定性和较高的光电转换效率(19.89%)。此外, 与之类似的分步旋涂沉积法^[40](见图 12(b))也适用于制备混合维度的钙钛矿器件, 同样可显著提升器件性能。

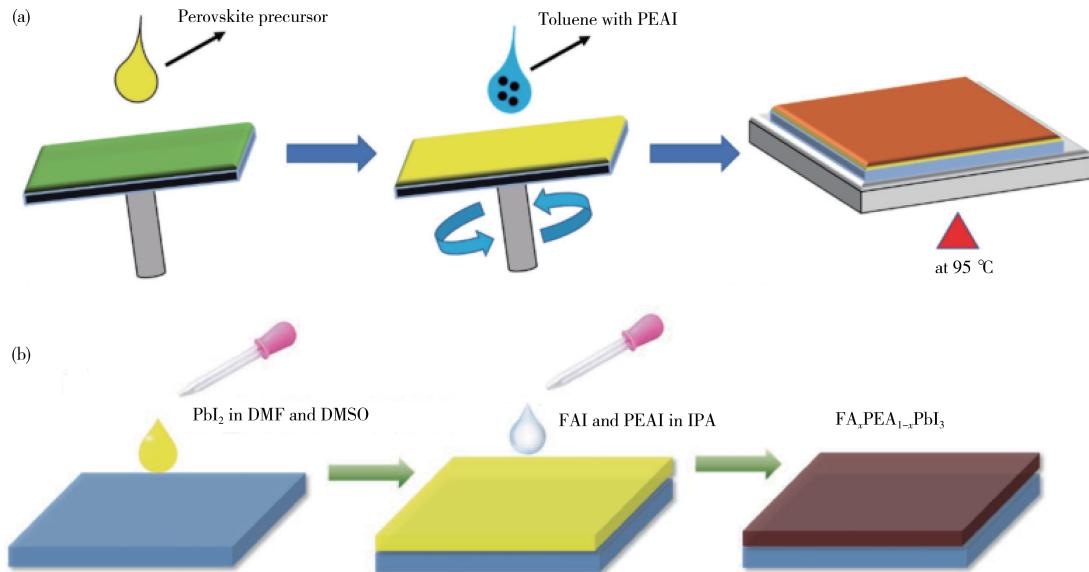


图 12 (a) 反溶剂法制备 $\text{MAPbI}_3\text{-}(\text{PEA})_2\text{Pb}_2\text{I}_4$ 三维-二维分级钙钛矿的示意图^[39]; (b) 分步沉积法制备 $(\text{FA})_x(\text{PEA})_{1-x}\text{PbI}_3$ 钙钛矿薄膜的示意图^[40]

Fig. 12 Schematic illustration showing the fabrication processes of: (a) $\text{MAPbI}_3\text{-}(\text{PEA})_2\text{Pb}_2\text{I}_4$ 3D-2D graded perovskite film by antisolvent dripping^[39]; (b) $(\text{FA})_x(\text{PEA})_{1-x}\text{PbI}_3$ perovskite films by sequential deposition^[40]

4 结语与展望

低维钙钛矿作为一种新型的钙钛矿型光伏材料体系,表现出对水、热以及光照等极好的稳定性,有望解决传统三维钙钛矿为人们所诟病的不稳定性问题,对钙钛矿光伏器件最终的产业化起到至关重要的作用。但由于低维的钙钛矿仍然是尚未完全开发的一类新材料,目前也存在着一些待解决的问题,具有较大的提升空间。(1)有机胺的引入会不同程度地影响薄膜的电学性质,例如载流子的传输和扩散长度,这也是导致器件效率较低的根本原因之一。如今研究者们从薄膜工艺方面入手,实现了低维钙钛矿垂直基底生长,使低效率的瓶颈找到了突破口。(2)目前有机胺的选择基本局限于苯乙胺和丁胺两种,虽然一些相关文献报道了其他种类的有机胺,例如2-碘乙胺^[37]、环丙胺(CA)^[42]、组胺(HA)^[43]、苄胺(BZA)^[44]和一些其他官能团分子^[45-48],但这些研究并不是以精确原料计量比来制备低维的钙钛矿,而是通过随机自组装,对三维钙钛矿层起到钝化作用,从而提升薄膜和器件的稳定性。所以,探究并寻找到其他更合适的有机胺进行插层,是未来低维钙钛矿的发展趋势之一。(3)从各种表征结果可以分析得出,将原料按照化学计量比进行旋涂所制成的薄膜并不是单一层数的低维钙钛矿,而是大多为混合相^[49]。目前为止的最佳方案是将已合成的低维钙钛矿的单晶溶解在溶剂中^[35],但单晶溶解之后溶液里是否会有部分离子重新自组装形成混合层数的钙钛矿还有待明确。(4)低维钙钛矿在很大程度上解决了传统三维钙钛矿不稳定性的缺点,但重金属铅的毒性问题依然难以改变^[50],尽管有研究涉及了以丁胺^[51]、苯乙胺^[38]和其他杂环胺^[43]为有机层的低维卤化锡钙钛矿材料,但器件效率都不甚理想。因此,在未来的低维钙钛矿光伏器件中,无铅化也是必要的研究方向。(5)部分低维钙钛矿光伏器件的迟滞效应比较明显,这有可能与电荷在

低维钙钛矿中的传输及界面有关,低维钙钛矿的光物理和光化学性质同样值得深入探究。

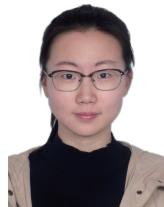
参考文献

- 1 Lee M M, Teuscher J, Miyasaka T, et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites [J]. *Science*, 2012, 338(6107):643.
 - 2 Wehrenfennig C, Eperon G E, Johnston M B, et al. High charge carrier mobilities and lifetimes in organo lead trihalide perovskites [J]. *Advanced Materials*, 2013, 26(10):1584.
 - 3 Innocenzo V, Grancini G, Alcocer M J P, et al. Excitons versus free charges in organo-lead tri-halide perovskites [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(4):3586.
 - 4 You J, Hong Z, Yang Y M, et al. Low-Temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2):1674.
 - 5 Liu M, Johnston M B, Snaith H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition[J]. *Nature*, 2013, 501(7467):395.
 - 6 Xiao M, Huang F, Huang W, et al. A fast deposition-crystallization procedure for highly efficient lead iodide perovskite thin-film solar cells [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(37):9898.
 - 7 Liang P, Liao C, Chueh C, et al. Additive enhanced crystallization of solution-processed perovskite for highly efficient planar-heterojunction solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(22):3748.
 - 8 Xiao Z, Bi C, Shao Y, et al. Efficient, high yield perovskite photovoltaic devices grown by interdiffusion of solution-processed precursor stacking layers [J]. *Energy & Environment Science*, 2014, 7(8):2619.
 - 9 Burschka J, Pellet N, Moon S, et al. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells [J].

- Nature, 2013, 499(7458):316.
- 10 Zhao Y, Zhu K. Organic-inorganic hybrid lead halide perovskites for optoelectronic and electronic applications [J]. Chemical Society Reviews, 2016, 45(3):655.
 - 11 Kojima A, Teshima K, Shirai Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells [J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(17):6050.
 - 12 Yang W S, Park B W, Jung E H, et al. Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells[J]. Science, 2017, 356:1376.
 - 13 Niu G, Li W, Meng F, et al. Study on the stability of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ films and the effect of post-modification by aluminum oxide in all-solid-state hybrid solar cells[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(3):705.
 - 14 Wang Z, Shi Z, Li T, et al. Stability of perovskite solar cells: A prospective on the substitution of the A Cation and X anion[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2017, 129(5):1210.
 - 15 Eperon G E, Stranks S D, Menelaou C, et al. Formamidinium lead trihalide: A broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(3):982.
 - 16 Chen Y, Chen T, Dai L. Layer-by-layer growth of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ for highly efficient planar heterojunction perovskite solar cells [J]. Advanced Materials, 2015, 27(6):1053.
 - 17 Eperon G E, Beck C E, Snaith H J. Cation exchange for thin film lead iodide perovskite interconversion [J]. Materials Horizons, 2015, 3(1):63.
 - 18 Quan L N, Yuan M, Comin R, et al. Ligand-stabilized reduced-dimensionality perovskites[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(8):2649.
 - 19 Peng W, Yin J, Ho K, et al. Ultralow self-doping in two-dimensional hybrid perovskite single crystals[J]. Nano Letters, 2017, 17(8):4759.
 - 20 Lin Y, Bai Y, Fang Y, et al. Suppressed ion migration in low-dimensional perovskites[J]. ACS Energy Letters, 2017(2):1571.
 - 21 Green M A, Ho-Baillie A, Snaith H J. The emergence of perovskite solar cells[J]. Nature Photonics, 2014, 8(7):507.
 - 22 Mitzi D B. Templating and structural engineering in organic-inorganic perovskites[J]. Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions, 2001, 1(1):1.
 - 23 Cheng Z, Lin J. Layered organic-inorganic hybrid perovskites: Structure, optical properties, film preparation, patterning and templating engineering[J]. CrystEngComm, 2010, 12(10):2646.
 - 24 Wang S, Mitzi D B, Feild C A, et al. Synthesis and characterization of $[\text{NH}_2\text{C}(\text{I})=\text{NH}_2]_3\text{M}_5$ ($\text{M} = \text{Sn}, \text{Pb}$): Stereochemical activity in divalent tin and lead halides containing single (110) perovskite sheets[J]. Journal of the American Chemical Society, 1995, 117:5297.
 - 25 Zaleski J, Pietraszko A. Structure at 200 and 298 K and X-ray investigations of the phase transition at 242 K of $[\text{NH}_2(\text{CH}_3)_2]_3\text{Sb}_2\text{Cl}_9$ (DMACA)[J]. Acta Crystallographica Section B: Structural Science, Crystal Engineering and Materials, 1996, 52(2):287.
 - 26 Smith I C, Hoke E T, Solisbarra D, et al. A layered hybrid perovskite solar-cell absorber with enhanced moisture stability[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2014, 53(42):11232.
 - 27 Zhang X, Ren X, Liu B, et al. Stable high efficiency two-dimensional perovskite solar cells via cesium doping[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10:2095.
 - 28 Kamminga M E, Fang H, Filip M R, et al. Confinement effects in low-dimensional lead iodide perovskite hybrids[J]. Chemistry of Materials, 2016, 28(13):4554.
 - 29 Muljarov E, Tikhodeev S, Gippius N, et al. Excitons in self-organized semiconductor/insulator superlattices: PbI -based perovskite compounds[J]. Physical Review B, 1995, 51(20):14370.
 - 30 Cohen B, Wierzbowska M, Etgar L. High efficiency and high open circuit voltage in quasi 2D perovskite based solar cells[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(5):1604733.
 - 31 Protesescu L, Yakunin S, Bodnarchuk M I, et al. Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX_3 , $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}$, and I): Novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut[J]. Nano Letters, 2015, 15(6):3692.
 - 32 Cao D H, Stoumpos C C, Farha O K, et al. 2D Homologous perovskites as light-absorbing materials for solar cell applications [J]. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137(24):7843.
 - 33 Chen Y, Sun Y, Peng J, et al. Tailoring organic cation of 2D air-stable organometal halide perovskites for highly efficient planar solar cells[J]. Advanced Energy Materials, 2017, 7(18):1700162.
 - 34 Yao K, Wang X, Xu Y, et al. Multilayered perovskite materials based on polymeric-ammonium cations for stable large-area solar cell [J]. Chemistry of Materials, 2016, 28(9):3131.
 - 35 Stoumpos C C, Soe C M M, Tsai H, et al. High Members of the 2D Ruddlesden-Popper halide perovskites: Synthesis, optical properties, and solar cells of $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{NH}_3)_2(\text{CH}_3\text{NH}_3)_4\text{Pb}_5\text{I}_{16}$ [J]. Chem, 2017, 2(3):427.
 - 36 Tsai H, Nie W, Blancon J C, et al. High-efficiency two-dimensional Ruddlesden-Popper perovskite solar cells[J]. Nature, 2016, 536(7616):312.
 - 37 Koh T M, Shanmugam V, Schlipf J, et al. Nanostructuring mixed-dimensional perovskites: A route toward tunable, efficient photovoltaics[J]. Advanced Materials, 2016, 28(19):3653.
 - 38 Liao Y, Liu H, Zhou W, et al. Highly-oriented low-dimensional tin halide perovskites with enhanced stability and photovoltaic performance[J]. Journal of the American Chemical Society, 2017, 139(19):6693.
 - 39 Bai Y, Xiao S, Hu C, et al. Dimensional engineering of a Graded 3D-2D halide perovskite interface enables ultrahigh V_{oc} enhanced stability in the p-i-n photovoltaics[J]. Advanced Energy Materials, 2017, 7(20):1701038.
 - 40 Li N, Zhu Z, Chueh C C, et al. Mixed Cation $\text{FA}_x\text{PEA}_{1-x}\text{PbI}_3$ with enhanced phase and ambient stability toward high-performance perovskite solar cells [J]. Advanced Energy Materials, 2017, 7(1):1601307.
 - 41 Xu F, Zhang T, Li G, et al. Mixed cation hybrid lead halide perovskites with enhanced performance and stability[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(23):11450.
 - 42 Ma C, Leng C, Ji Y, et al. 2D/3D perovskite hybrids as moisture-tolerant and efficient light absorbers for solar cells[J]. Nanoscale, 2016, 8(43):18309.
 - 43 Mao L, Tsai H, Nie W, et al. Role of organic counterion in lead-and tin-based two-dimensional semiconducting iodide perovskites and application in planar solar cells[J]. Chemistry of Materials, 2016, 28

- (21):7781.
- 44 Wang F, Geng W, Zhou Y, et al. Phenylalkylamine passivation of organolead halide perovskites enabling high-efficiency and air-stable photovoltaic cells[J]. Advanced Materials, 2016, 28(45):9986.
- 45 Zhang T, Xie L, Chen L, et al. In situ fabrication of highly luminescent bifunctional amino acid crosslinked 2D/3D $\text{NH}_3\text{C}_4\text{H}_9\text{-COO}(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3)_n$ perovskite films[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(1):1603568.
- 46 Li X, Ibrahim Dar M, Yi C, et al. Improved performance and stability of perovskite solar cells by crystal crosslinking with alkylphosphonic acid ω -ammonium chlorides[J]. Nature Chemistry, 2015, 7(9):703.
- 47 Bi D, Gao P, Scopelliti R, et al. High-performance perovskite solar cells with enhanced environmental stability based on amphiphile-modified $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ [J]. Advanced Materials, 2016, 28(15):2910.
- 48 Zhao T, Chueh C C, Chen Q, et al. Defect passivation of organic-inorganic hybrid perovskites by diammonium iodide toward high-performance photovoltaic devices[J]. ACS Energy Letters, 2016, 1(4):757.
- 49 Yan L, Niu H J, Duong G V, et al. Cation ordering within the perovskite block of a six-layer Ruddlesden-Popper oxide from layer-by-layer growth-artificial interfaces in complex unit cells [J]. Chemical Science, 2011, 2(2):261.
- 50 Shi Z, Guo J, Chen Y, et al. Lead-free organic-inorganic hybrid perovskites for photovoltaic applications: Recent advances and perspectives[J]. Advanced Materials, 2017, 29(16):1605005.
- 51 Cao D H, Stoumpos C C, Yokoyama T, et al. Thin films and solar cells based on semiconducting two-dimensional Ruddlesden-Popper $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{NH}_3)_2(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{Sn}_n\text{I}_{3n+1}$ perovskites[J]. ACS Energy Letters, 2017, 2(5):982.

(责任编辑 房威)



陈皓然,2016年6月毕业于内蒙古民族大学,获得理学学士学位。现为南京工业大学先进材料研究院博士研究生,在陈永华教授的指导下进行研究。目前主要的研究领域为低维有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池。



陈永华,南京工业大学先进材料研究院,教授、博士研究生导师。2006年7月本科毕业于内蒙古大学化学化工学院,2011年7月在中国科学院长春应用化学研究所高分子化学与物理专业取得博士学位,2011—2015年分别在美国的维克森林大学和凯斯西储大学进行博士后研究工作。2015年12月回国后,先后入选第十四批江苏省六大人才高峰、第六批江苏省特聘教授和第十三批“千人计划”青年项目。主要从事有机光电子材料与器件的研究工作。近年来,在有机光电子材料与器件领域发表论文50余篇,包括 *Nature Communications*、*Advanced Materials*、*Light: Science & Applications*、*Nano Letters*、*Angewandte Chemie International Edition* 和 *Advanced Functional Materials* 等。



黄维,中国科学院院士,俄罗斯科学院外籍院士、名誉博士,西北工业大学常务副校长,教授,博士研究生导师,有机电子学/柔性电子学家。教育部“长江学者”特聘教授,国家杰出青年科学基金获得者,中组部“千人计划”国家特聘专家,科技部“973”项目首席科学家。英国谢菲尔德大学名誉博士,英国皇家化学会会士,美国光学学会会士,中国科协常委,中国化学会副理事长,中国化工学会副理事长,江苏省科协副主席,江苏省侨联副主席, *Advanced Materials*, *Advanced Electronic Materials* 和 *npj Flexible Electronics* 等国际权威学术杂志主编或(顾问)编委。长期从事有机光电、柔性电子等相关领域的研究,并取得了大量系统性、创新性的研究成果,以第一或通讯作者身份在 *Nature Materials*, *Nature Photonics*, *Nature Nanotechnology*, *Nature Communications*, *Advanced Materials*, *Journal of the American Chemical Society* 等 SCI 学术期刊发表研究论文 560 余篇,获授权或公开美国、新加坡和中国等国发明专利 200 余项,出版了《有机电子学》、《生物光电子学》等学术专著。曾获国家自然科学奖二等奖和何梁何利基金科技进步奖等奖励,成果入围中国高等学校十大科技进展。