中国科学: 化学 2026 年 第 56 卷 第 9 期: 3054 ~ 3061
SCIENTIA SINICA Chimica chemcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论 文

纳米多孔SiO_2减反射膜制备及其在有机光伏中的应用

张兆[1], 宿文燕[1], 杜娴[1], 凡群平[2], 杜慧玲[1*]

1. 西安科技大学材料科学与工程学院, 西安 710054
2. 西安交通大学材料学院, 西安 710049
*通讯作者, E-mail: hldu@xust.edu.cn

收稿日期: 2026-05-16; 接受日期: 2026-05-29; 网络版发表日期: 2026-08-07
国家自然科学基金(编号: 52172099)和陕西省联合项目(编号: 2021JLM-28)资助

摘要 针对传统减反射薄膜在有机光伏应用中制备工艺复杂、需高温处理及成本高昂的问题, 本研究采用酸碱溶胶-凝胶法制备SiO_2纳米颗粒减反射涂层, 探究了酸性与碱性催化体系对薄膜微观形貌及光学性能的影响. 结果表明, 碱性体系制备的SiO_2纳米颗粒单分散性优异(平均粒径60 nm), 薄膜呈现均匀无裂纹的纳米多孔骨架结构. 该结构通过引入空气介质使薄膜平均折射率降至1.22, 匹配了空气/玻璃界面的减反射要求, 玻璃基底可见光区平均透过率提升约4.3%. 将该减反射膜集成于有机太阳能电池(基于D18:L8-BO)后, 器件宽波段光谱响应增强, 短路电流密度(J_{sc})提高, 光电转换效率(PCE)从18.87%提升至19.60%.

关键词 SiO_2纳米薄膜, 减反射薄膜, 折射率, 溶胶-凝胶法, 有机太阳能电池, 光电转换效率

1 引言

有机光伏(organic photovoltaic, OPV)技术凭借其柔性、轻质、低成本的溶液加工特性, 在建筑光伏一体化和便携式设备领域展现出巨大潜力. 然而, 当前主流OPV的活性层厚度为百纳米级(通常<150 nm), 导致可见光区反射损耗较大, 且窄带隙材料无法有效覆盖太阳光谱宽域[1~3]. 与此同时, 界面光降解引发的运行稳定性不足进一步制约其产业化进程[4,5]. 针对以上问题, 通过光学工程(光管理)设计不同的光学结构是提高电池光收集能力的有效途径[6~8], 包括减反射结构[9~11]、光捕获结构[12~14]和金属纳米颗粒[15,16]等. 其中, 减反射技术通过构筑光学适配层重构光场分布, 在空气和基底间建立有效的梯度折射率以提高光的透过, 从而增强活性层的光吸收, 最终实现光伏器件效率的提升[17,18].

为了解决光损耗, 构建高性能减反射薄膜(anti-reflective coatings, ARCs)已成为提升器件光捕获能力的主流策略之一. 目前, 减反射技术主要技术路线: 一是基于薄膜干涉原理的单层或多层介质膜系统, 二是利用微纳结构(纳米锥、顶部结构等)构建多层光学层. 在材料选择上, 为满足柔性有机光伏的柔性需求, 聚二甲基硅氧烷(PDMS)等具有高透光性和优异机械柔性的聚合物材料受到了广泛关注[19,20]. 同时, ZnO、SiO_2

引用格式: Zhang Z, Su W, Du X, Fan Q, Du H. Preparation and application of nanoporous SiO_2 antireflective coatings in organic photovoltaics. *Sci Sin Chim*, 2026, 56: 3054–3061, doi: 10.1360/SSC-2026-0111

© 2026 《中国科学》杂志社

等无机金属氧化物及 MgF_2等无机氟化物的纳米结构因其优异的光学调节能力而受到深入研究[21]. 例如, Oproescu等[22]利用水热法合成ZnO纳米结构层, 通过改善光吸收和电荷传输将多晶硅电池的效率显著提升至10.97%; Li等[23]优化了SiO_2/TiO_2双层减反射膜设计, 使电池的最大光电流密度(J_{max})提升了10.01%. 此外, Law等[24]系统研究了光伏组件盖板玻璃减反射涂层的性能与耐久性, 指出多孔结构优化和机械稳定性是产业化应用的重要考量.

空气与玻璃基底折射率差异大, 是导致界面产生反射损耗的主要原因. 在二者之间引入折射率适中的SiO_2薄膜, 可使两界面反射光振幅相近、相位相反, 发生相消干涉以抵消反射. 但是, 目前对其孔径结构的精确调控较少, 还不能使其等效折射率至理想值附近. 因此, 本文以SiO_2纳米颗粒为基础构建高效减反射薄膜, 通过对比酸、碱两种催化反应体系探究最优制备工艺, 精准调控SiO_2孔径结构; 同时严格控制薄膜厚度满足四分之一波长光学匹配条件, 有效引入了空气介质, 显著抑制器件界面光反射行为, 提升入射光向活性层的有效入射量. 经工艺优化所得纳米多孔SiO_2薄膜可在玻璃基底实现理想低折射率梯度匹配, 大幅削减界面光学反射损耗, 最终实现有机太阳能电池光电转换效率的有效提升.

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

正硅酸乙酯(TEOS, 纯度≥99%)、无水乙醇(EtOH, 分析纯)、氨水($NH_3\cdot H_2O$, 含量25%~28%)、浓盐酸(HCl, 37 wt%)均购自国药集团化学试剂有限公司. 有机光伏活性层材料: 聚合物给体(D18, 纯度>99%)、非富勒烯受体(L8-BO, 纯度>99%), 空穴传输层材料聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸) (PEDOT:PSS), 电子传输层材料*N*,*N*′-双{3-[3-(二甲氨基)丙基氨基]丙基}苝-3,4,9,10-四羧酸二亚胺(PDINN, 纯度>99%)以及固体添加剂1,4-二碘苯(DIB)均购自深圳睿迅光电材料科技有限公司.

2.2 结构性能表征

薄膜的微观形貌(包括俯视图和截面图)通过场发射扫描电子显微镜(FE-SEM, Nova NanoSEM 450)进行采集. 薄膜的表面形貌及均方根粗糙度(R_q)采用原子力显微镜(AFM, Dimension Fastscan, Bruker)进行测定. 采用紫外-可见-近红外分光光度计(Shimadzu UV-2600Plus)测试薄膜的光学透过率光谱, 反射率光谱则使用分光光度计(PerkinElmer Lambda 950)在300~1000 nm波长范围内测定. 薄膜的折射率通过光谱椭偏仪(SE-VM-L)在波长范围300~1000 nm内测定, 测试采用Cauchy模型拟合数据以获得准确的折射率值.

有机太阳能电池(OSCs)的性能测试均在充满高纯氮气(N_2)的手套箱中进行, 在标准模拟太阳光照(AM 1.5G, 100 mW cm^{-2})下, 使用源表(Keysight B2901A)记录器件的电流密度-电压(*J*-*V*)特性曲线, 扫描偏压范围为−0.5~1.5 V. 测试前, 模拟光源开启并预热10 min以确保光强稳定, 随后使用标准硅电池(Oriel PN 91150V, Newport, USA)进行光强校准. 器件的几何面积为0.04 cm^2, 测试时使用Mask界定有效光照面积为0.0324 cm^2. 外量子效率(external quantum efficiency, EQE)光谱采用太阳能电池量子效率测试系统(QE-R 3011, Enli. Tech. Co., Ltd.)测定, 波长范围300~1000 nm, 同样在测试前使用标准硅电池作为参考对光源进行校准.

2.3 SiO_2纳米颗粒溶胶制备

SiO_2纳米颗粒减反射涂层的制备过程如图1所示. SiO_2纳米颗粒溶胶的制备采用改进的溶胶-凝胶法制备碱性SiO_2纳米颗粒溶胶. 前驱体配制: 催化剂为1.5 g氨水(碱催化)或1.15 g的1 mol L^{-1}稀盐酸(酸催化, 由37 wt%浓盐酸稀释制备), 与20.0 g无水乙醇混合, 置于50 °C恒温水浴中以600 r min^{-1}转速磁力搅拌10 min, 记为A液. 水通过催化剂溶液引入, 两体系TEOS:H_2O质量比均为2:1.1. 水解缩合反应: 称取2.0 g TEOS作为硅源, 记为B液, 将其缓慢滴加至A液中. 滴加完毕后, 反应溶液于50 °C恒温水浴中保持600 r min^{-1}转速搅拌1 h. 随后, 将反应液置于室温环境下, 以600 r min^{-1}转速搅拌8 h, 然后静置陈化24 h备用, 分别制得酸性SiO_2溶胶(记作SiO_2-HCl)和碱性SiO_2溶胶(记作SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$).

2.4 有机太阳能电池的制备

器件制备前, 氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)导电玻璃基底经标准清洗流程处理: 依次置于洗涤剂水溶

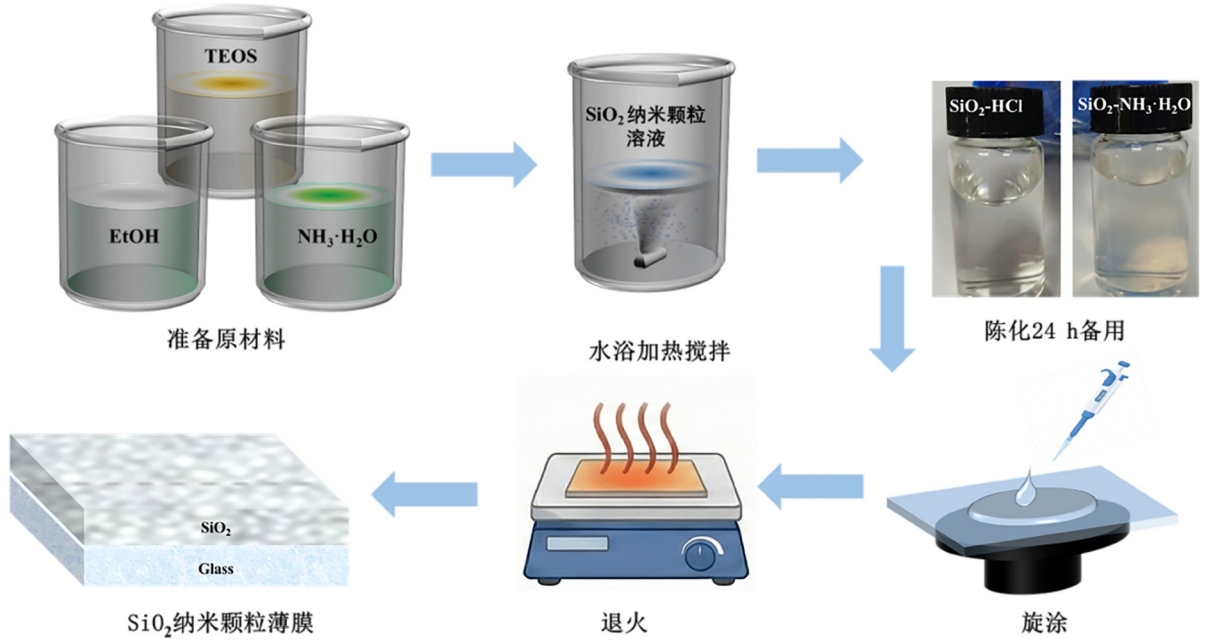


图 1 (网络版彩图) SiO_2纳米颗粒减反射涂层的制备工艺流程示意图
Figure 1 (Color online) Schematic illustration of the preparation process for the SiO_2 nanoparticle anti-reflective coatings.

液、去离子水(超声清洗2次)和异丙醇(超声清洗2次)中, 各超声清洗15 min; 清洗结束后, 于鼓风干燥箱中烘干; 使用前经紫外臭氧处理10 min, 以去除表面有机污染物并改善润湿性. 本研究基于D18:L8-BO活性层体系制备有机太阳能电池, 器件结构如图2所示: PEDOT:PSS作为阳极界面层(AIL), PDINN作为阴极界面层(CIL), 并在ITO基底光入射面集成SiO_2减反射层, 通过界面光学优化最大化光捕获效率, 进而提升器件光电转换性能.

有机太阳能电池采用正置结构: SiO_2/Glass/ITO/PEDOT:PSS/活性层(D18:L8-BO)/PDINN/Ag. 减反射层制备: 取清洗后的ITO玻璃基底, 在其非导电面(光入射侧)旋涂SiO_2纳米颗粒溶胶, 旋涂转速为4000 r min^{-1}, 随80 °C热台退火5 min. 空穴传输层制备: PEDOT:PSS溶液经0.45 μm聚醚砜(PES)针头过滤器过滤后, 采用静态旋涂法涂覆于ITO导电面, 参数为4500 r min^{-1}、40 s、热台150 °C退火15 min. 活性层制备: D18与受体L8-BO按1:1的质量比溶解于氯仿溶剂中, 配制成总浓度为9 mg mL^{-1}的混合溶液, 固体添加剂1,4-二碘苯作为添加剂, 其浓度为5 mg mL^{-1}, 将该混合溶液在80 °C搅拌溶解2 h, 取15 μL溶液, 采用动态旋涂法沉积在PEDOT:PSS层上, 参数为3000 r min^{-1}、时间40 s、热台100 °C退火10 min. 电子传输层制备: PDINN以1 mg mL^{-1}的浓度溶解于甲醇溶剂中, 室温搅拌2 h, 取45 μL溶液以3000 r min^{-1}、30 s动态旋涂于活性层表面, 此步骤无需退火. 顶电极蒸镀: 器件转移至高真空蒸镀舱, 当真空度抽至3×10^{-4} Pa以下时,

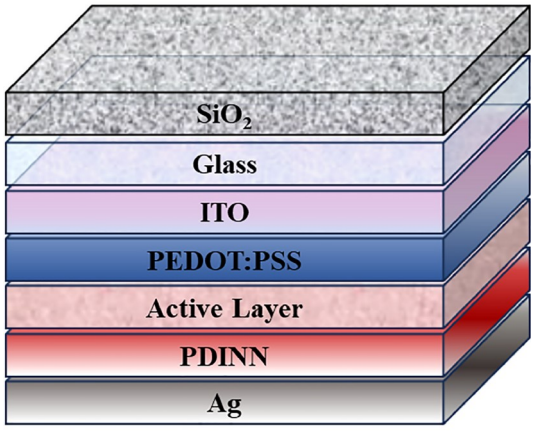


图 2 (网络版彩图)集成SiO_2减反射膜的有机太阳能电池示意图
Figure 2 (Color online) Schematic diagram of organic photovoltaic device with SiO_2 nanoparticle anti-reflective coating.

通过掩膜板热蒸镀150 nm厚的银(Ag)电极，测试时使用Mask界定器件有效光照面积为0.0324 cm^2 (器件几何面积0.04 cm^2).

2.5　减反射膜机制

图3揭示了SiO_2纳米颗粒涂层的减反射机制. 基于薄膜干涉原理，入射光在透过涂层时会形成分别来自空气/SiO_2与SiO_2/玻璃界面的两束反射光R_1和R_2. 通过调控薄膜等效折射率与厚度使两者发生相消干涉，可最大程度抑制总反射损耗.

为实现界面反射光波的振幅匹配，减反射层的折射率应满足以下理论模型(式(1)):

$$n = \sqrt{n_1 n_2} \tag{1}$$

为了使R_1与R_2之间产生π的相位差(即光程差为半波长的奇数倍)，从而实现相消干涉，涂层的物理厚度需满足四分之一波长(式(2)):

$$d = \frac{\lambda}{4n} \tag{2}$$

式中: n为减反射涂层(SiO_2)的有效折射率; n_1为入射介质(空气)的折射率，取值为1.0; n_2为基底材料(玻璃)的折射率, 通常约为1.5; d为减反射涂层的物理厚度; λ为入射光的中心波长(本研究取可见光中心波长550 nm).

3　结果与讨论

3.1　SiO_2纳米颗粒薄膜的形貌表征

在溶胶-凝胶体系中，催化剂的选择直接决定了SiO_2前驱体的水解与缩合动力学，进而主导了最终薄膜产物的微观形貌演变. 不同催化体系下SiO_2薄膜的表面与截面微观形貌如图4所示，结果表明溶胶-凝胶化学过程对薄膜微结构具有调控作用. 如图4a所示，以HCl为催化剂制备的SiO_2薄膜表面呈现高度平整的致密形貌, 无明显特征. 其对应的截面图4b进一步证实了薄膜内部结构的均一性和连续性, 无明显孔隙.

以$NH_3 \cdot H_2O$为催化剂制备的薄膜呈现纳米多孔骨架结构，由大量球形纳米颗粒(粒径60 nm)堆积而成，形成典型的球状堆积粗糙结构如图4c所示. 从图4d所示的截面形貌可以看出，薄膜由单分散纳米颗粒随机堆积构成，颗粒间存在丰富的纳米级孔隙. 这种微观结构差异源于两种催化体系对水解-缩聚反应动力学的不同调控机制: 酸性条件下, TEOS缩聚速率慢, 形成结构紧凑的均匀网络, 难以形成纳米孔隙; 而碱性体系中$NH_3 \cdot H_2O$加速反应, 促进颗粒成核与堆积, 形成纳米多孔骨架. 微观结构的差异直接决定了薄膜的光学物理性质. 致密结构使酸性薄膜的有效折射率接近玻璃基板(n=1.5)，无法满足减反射涂层的低折射率要求. 碱性薄膜的纳米孔隙填充空气介质(n=1.0)，依据有效介质理论降低了等效折射率，从而实现空气/玻璃界面

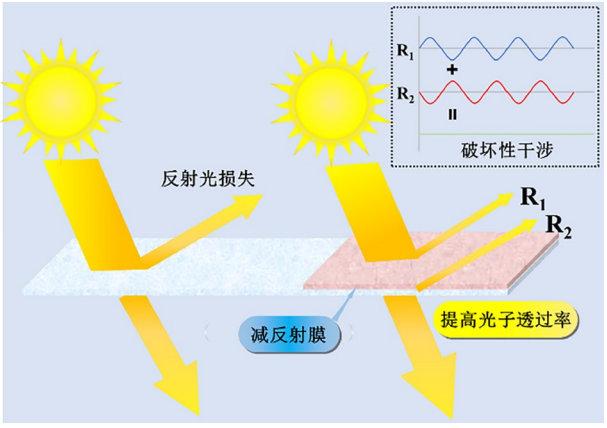


图 3　(网络版彩图)减反射膜机制
Figure 3　(Color online) Mechanism of anti-reflective coating.

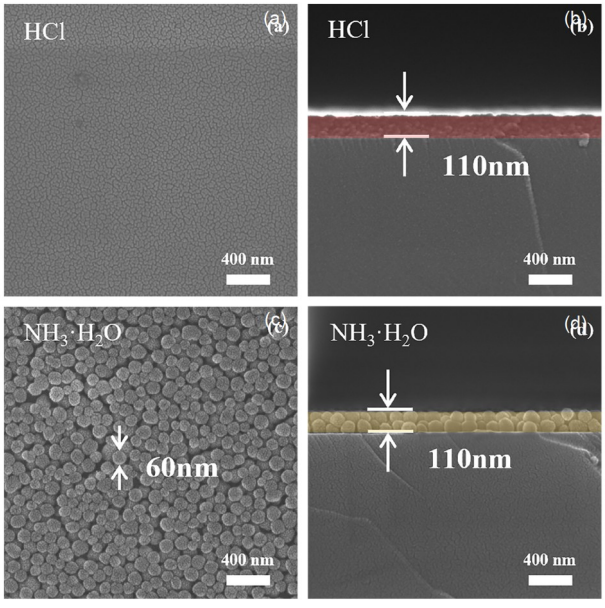


图 4　(网络版彩图) SiO_2薄膜在不同催化剂条件下的SEM图: (a) SiO_2-HCl表面; (b) SiO_2-HCl截面; (c) SiO_2-$NH_3 \cdot H_2O$表面; (d) SiO_2-$NH_3 \cdot H_2O$截面
Figure 4　(Color online) The SEM images of SiO_2 films prepared under different catalytic conditions: (a) SiO_2-HCl surface; (b) SiO_2-HCl cross-section; (c) SiO_2-$NH_3 \cdot H_2O$ surface; (d) SiO_2-$NH_3 \cdot H_2O$ cross-section.

的折射率匹配.

为探究催化剂对薄膜表面结构的影响, 采用原子力显微镜对两种SiO_2薄膜进行形貌表征. AFM表征对比了两种催化体系制备的SiO_2薄膜表面形貌(图5). 酸性催化的SiO_2-HCl薄膜(图5a)表面平整, 均方根(root mean square, RMS)粗糙度仅0.911 nm, 未见明显颗粒结构(图5b), 致密表面特征与SEM结果一致, 说明酸性条件下SiO_2薄膜呈紧密堆积结构. 碱性催化的SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$薄膜(图5c)表面呈现颗粒堆积特征, RMS粗糙度增至5.78 nm, 说明碱性体系制备的纳米颗粒在成膜过程中形成了纳米多孔骨架(图5d), 表面颗粒结构清晰.

碱性相比酸性催化薄膜RMS粗糙度从0.911 nm增加至5.78 nm (约为前者的6倍). 尽管粗糙度显著增加, 但其尺度及颗粒尺寸(约60 nm)仍远小于可见光波长(400~800 nm). 因此, 这种亚波长尺度的颗粒结构难以引起显著的米氏散射而造成光子反射损失.

3.2 SiO_2纳米颗粒薄膜的减反射性能

图6所示的透射光谱展示了SiO_2涂层对玻璃透光性能的影响. 空白玻璃因菲涅尔反射损失约8.5%的入射光, 最大透过率(T_{max})为91.5%. 涂覆SiO_2-HCl后提升至93.8%, 但酸性薄膜结构致密、折射率接近玻璃基底, 界面处的折射率匹配不够理想, 减反射效果有限. 相比之下, SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$涂层的纳米多孔堆积结构实现了更优的光学性能, T_{max}达到95.8%, 绝对透射率比空白玻璃提高了4.3%. 因此, 碱性体系下的多孔骨架有效降低了光在界面处的反射损失, 为光伏器件性能优化奠定了基础.

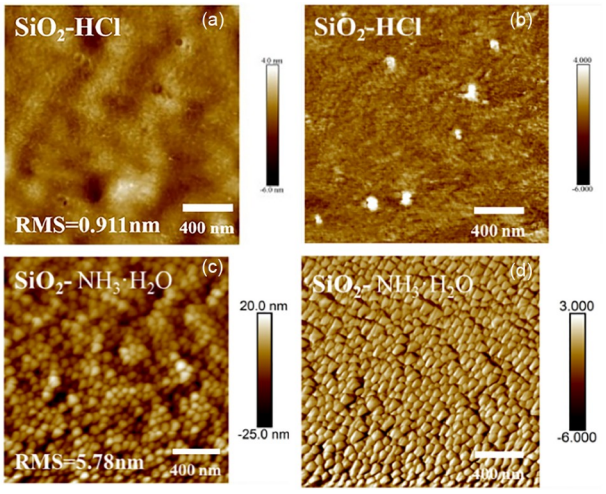


图 5 (网络版彩图) SiO_2薄膜在不同催化剂条件下的AFM图: (a) SiO_2-HCl高度图; (b) SiO_2-HCl相图; (c) SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$高度图; (d) SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$相图

Figure 5 (Color online) The AFM images of SiO_2 films prepared under different catalytic conditions: (a) SiO_2-HCl height image; (b) SiO_2-HCl phase image; (c) SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$ height image; (d) SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$ phase image.

图7利用反射光谱表征了减反射膜对空气/玻璃界面反射损失的抑制效果. SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$涂层在有机太阳能电池主要响应的可见光波段(400~800 nm)内, 表现出优异的宽带减反射特性. 该薄膜展现出优异的减反射性能, 最低反射率为5%.

依据菲涅尔光学理论, 单层减反射涂层在空气(n_{air}=1.0)与玻璃基底($n_{Glass}\approx$1.5)界面的理想折射率n可由式(1)计算, 理论值为1.23. 本研究制备的SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$

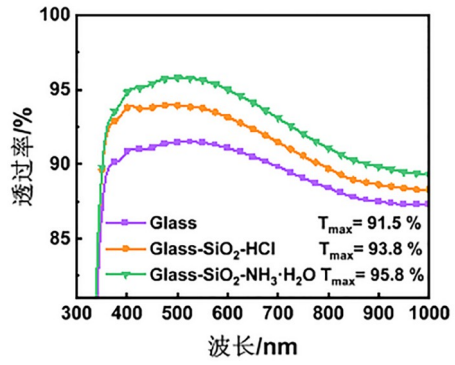


图 6 (网络版彩图) SiO_2-HCl薄膜、SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$薄膜在玻璃基板上的透过率图

Figure 6 (Color online) The transmittance spectra of SiO_2-HCl and SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$ films on glass substrates.

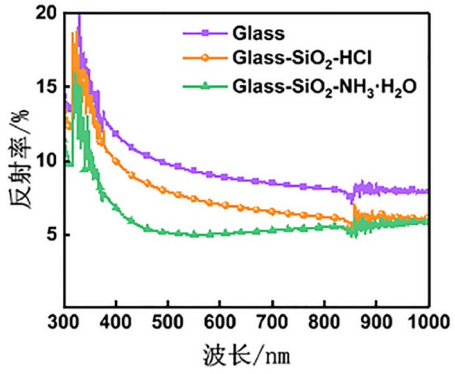


图 7 (网络版彩图) SiO_2-HCl薄膜、SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$薄膜在玻璃基板上的反射率图

Figure 7 (Color online) The reflectance spectra of SiO_2-HCl and SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$ films on glass substrates.

薄膜平均折射率为1.22，与理论值1.23非常接近. 根据四分之一波长减反射公式(式(2))，以中心波长λ=550 nm、理论折射率n_{ideal}=1.23计算得出的理论薄膜厚度为111 nm. 该薄膜实际物理厚度为110 nm (图4d)，与理论值非常接近.

碱性溶胶-凝胶工艺构建的纳米多孔结构成功将薄膜材料折射率调控至减反射理论最优值. 此外，图8中两种薄膜在整个可见光及近红外区域的消光系数(k)值较低，表明制备的SiO_2材料具有较高的光学纯度和透明度. 较低的寄生光吸收损失确保了减反射涂层在提升光透过率的同时不会引入额外的光损耗.

3.3　SiO_2纳米颗粒薄膜的光伏器件性能

为验证碱性纳米多孔减反射层在实际光伏器件中的性能，本研究制备了基于D18:L8-BO体系的有机太阳能电池，并系统对比了集成减反射层前后的光伏参数. 光伏性能参数汇总于表1, 对应的J-V曲线如图9a所示. 在标准AM 1.5G光照下, 未涂覆SiO_2-$NH_3\cdot H_2O$减反射层的对照组器件表现出良好的器件性能，最高PCE为18.87%，短路电流密度(J_{sc})为25.85 mA cm^{-2}. 集成SiO_2纳米多孔减反射层后, 器件效率获得显著提升, 最优PCE达19.60%.

表1数据显示，效率提升主要源于J_{sc}显著增加. 多孔SiO_2减反射层通过抑制界面反射损失、增加光子通量，使器件短路电流密度J_{sc}由对照组的25.85提升至26.74 mA cm^{-2}.

图9b所示的EQE谱图进一步证实了器件电流增强

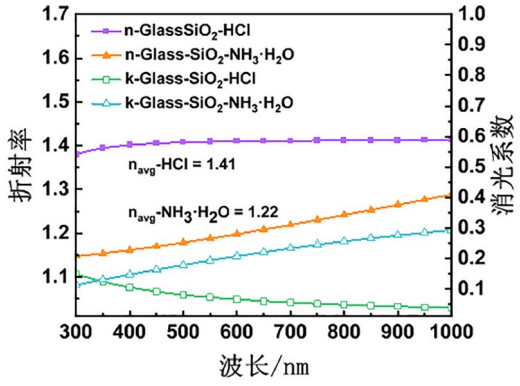


图 8　(网络版彩图)不同催化条件下SiO_2薄膜的折射率和消光系数色散曲线

Figure 8　(Color online) Dispersion plots of refractive index and extinction coefficient of SiO_2 films with wavelength under different catalytic conditions.

表 1　光伏器件在AM 1.5G, 100 mW cm^{-2}照明下的光伏参数

Table 1　Photovoltaic parameters of OPV devices under the illumination of AM 1.5G, 100 mW cm^{-2}

减反射膜	V_{OC} (V)	J_{sc} (mA cm^{-2})[a)]	填充因子(FF)	PCE (%)[b)]
未涂覆 SiO_2 (w/o)	0.911	25.85 (25.01)	80.2	18.87 (18.72±0.15)
SiO_2	0.910	26.74 (25.92)	80.5	19.60 (19.45±0.15)

a) 源自EQE光谱的积分值. b) 括号内的平均值取自6个器件.

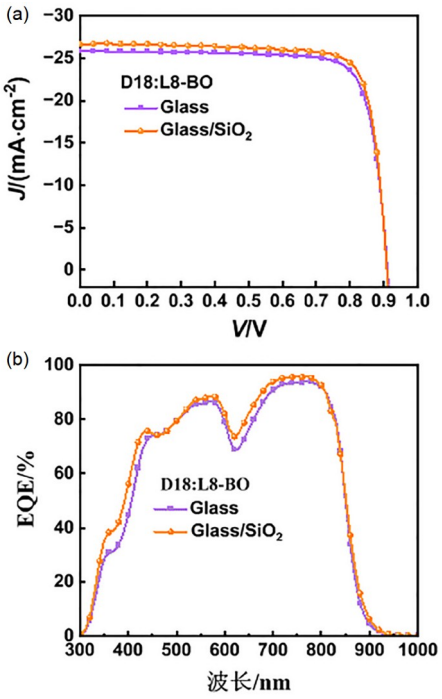


图 9　(网络版彩图)基于D18:L8-BO体系的有机太阳能电池光伏性能表征: (a) 对照组与集成SiO_2减反射层器件的电流密度-电压(J-V)曲线; (b) 器件的外量子效率光谱

Figure 9　(Color online) Photovoltaic performance of D18:L8-BO based organic solar cells: (a) J-V curves for control devices and devices with integrated SiO_2 antireflection coatings; (b) EQE spectra of the devices.

源于宽波段光谱响应的提升. 特别是在600~800 nm特征吸收波段，EQE提升幅度更为显著；宽带减反射层增强了全波段的光子透过率，使更多光子被活性层捕获, 从而促进了光生载流子的生成. 此外, EQE曲线积分计算所得的电流密度(J_{cal})分别为25.01和25.92 mA cm^{-2}.

4　结论

本研究针对OPV器件空气/玻璃界面的菲涅尔反

射损耗, 采用溶胶-凝胶法制备了SiO_2纳米颗粒减反射涂层. 通过对比酸碱催化体系, 发现两者分别形成致密型和纳米多孔型SiO_2纳米颗粒薄膜. 与酸性条件下的致密结构相比, 碱性体系制备的薄膜呈现均匀无裂纹的纳米多孔骨架, 有效引入了空气介质, 为低折射率实现提供了结构基础. 纳米多孔骨架将薄膜折射率降至1.22, 实现了与空气/玻璃界面的折射率匹配, 使可见光透射率提升4.3%. 将该减反射层集成于D18:L8-BO有机太阳能电池后, 器件J_{sc}从25.85提升至26.74 mA cm^{-2}, PCE从18.87%提升至19.60%, 验证了减反射策略的器件增效能力. 纳米多孔SiO_2层通过抑制界面反射、增加光子通量, 最终提高了器件的光电转换效率. 该纳米多孔SiO_2减反射涂层兼具优异的减反射性能与工艺兼容性, 通过优化光传输界面的反射损耗, 为有机光伏的低成本制造与产业化发展提供了有效途径.

参考文献

1 Zhu L, Zhang M, Xu J, Li C, Yan J, Zhou G, Zhong W, Hao T, Song J, Xue X, Zhou Z, Zeng R, Zhu H, Chen CC, MacKenzie RCI, Zou Y, Nelson J, Zhang Y, Sun Y, Liu F. *Nat Mater*, 2022, 21: 656–663
2 Su W, Zhou X, Wu Q, Wu Y, Qin H, Liang Z, Li H, Bai H, Guo J, Jiang L, Liu Y, Ma R, Li Y, Zhu W, Fan Q. *Adv Funct Mater*, 2025, 35: 2415090
3 Zhu J, Xia J, Li Y, Li Y. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2025, 17: 5595–5608
4 Shen YF, Liu Y, Zhang J, Wei Z. *Sci Sin Chim*, 2022, 52: 2001–2026 (in Chinese) [沈伊凡, 刘耀虎, 张建齐, 魏志祥. 中国科学: 化学, 2022, 52: 2001–2026]
5 Zhou Y, Qi G, Liu H, Bai H, Li T, Maqsood MH, Liu C, Song B, Chen N, Lu G, Gao C, Liu Y, Su W, Du H, Ma R, Ma W, Fan Q. *Sci China Mater*, 2025, 68: 850–859
6 Zou W, Sun Y, Sun L, Wang X, Gao C, Jiang D, Yu J, Zhang G, Yin H, Yang R, Zhu H, Chen H, Gao K. *Adv Mater*, 2025, 37: 2413125
7 Zhai Y, Chang Y, Tang A, Lu K. *J Mater Chem A*, 2025, 13: 9589–9618
8 Ji C, Liu W, Bao Y, Chen X, Yang G, Wei B, Yang F, Wang X. *Photonics*, 2022, 9: 906
9 Padhan AK, Singh V, Ray S, Voolapalli RK. *RSC Appl Polym*, 2025, 3: 317–335
10 Zhang W, Hu K, Tu J, Aierken A, Xu D, Song G, Sun X, Li L, Chen K, Zhang D, Zhuang Y, Xu P, Wu H. *Sol Energy*, 2021, 217: 271–279
11 Shanmugam N, Pugazhendhi R, Madurai Elavarasan R, Kasiviswanathan P, Das N. *Energies*, 2020, 13: 2631
12 Solak EK, Irmak E. *RSC Adv*, 2023, 13: 12244–12269
13 Alsaigh RE, Bauer R, Lavery MPJ. *Opt Express*, 2020, 28: 31714
14 Zhou J, Gao F, Xu H, Long Y. *AIP Adv*, 2024, 14: 105022
15 Ali A, El-Mellouhi F, Mitra A, Aïssa B. *Nanomaterials*, 2022, 12: 788
16 Subhan A, Mourad AHI. *Next Mater*, 2025, 6: 100509
17 Gao N, Bin H, Wu S, Janssen RAJ, Li Y. *Sci China Chem*, 2024, 67: 2248–2256
18 Li W, Cao W, Zhou H, Zhang X, Wang K. *RSC Adv*, 2024, 14: 2757–2762
19 Zhu C, Zheng H, Zhao L, Zhu X. *Sci China Mater*, 2025, 68: 1314–1329
20 Yoo GY, Nurrosyid N, Lee SJ, Jeong Y, Yoon I, Kim C, Kim W, Jang SY, Do YR. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 10626–10636
21 Yudha DS, Andari RCA, Florence E, Adhyaksa GWP. *Surf Interfaces*, 2026, 80: 108286
22 Oproescu M, Schiopu AG, Calinescu VM, Fidelus JD. *Crystals*, 2025, 15: 398
23 Li J, Lu Y, Lan P, Zhang X, Xu W, Tan R, Song W, Choy KL. *Sol Energy*, 2013, 89: 134–142
24 Law AM, Jones LO, Walls JM. *Sol Energy*, 2023, 261: 85–95

Preparation and application of nanoporous SiO_2 antireflective coatings in organic photovoltaics

Zhao Zhang[1], Wenyan Su[1], Xian Du[1], Qunping Fan[2], Huiling Du[1*]

[1] *School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China*
[2] *State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*
**Corresponding author (email: hldu@xust.edu.cn)*

Abstract: Addressing the challenges of complex fabrication processes, high-temperature treatment requirements, and elevated costs associated with traditional anti-reflective films in organic photovoltaics, SiO_2 nanoparticle anti-reflective coatings were prepared via a sol-gel method in this study. The effects of acidic and alkaline catalytic systems on the micromorphology and optical properties of the films were systematically investigated. The results demonstrate that the SiO_2 nanoparticles synthesized under the alkaline system exhibit superior monodispersity with an average particle diameter of 60 nm. The resulting film presents a uniform, crack-free nanoporous framework. By introducing an air medium, this porous structure reduces the average refractive index of the film to 1.22, which successfully satisfies the anti-reflection requirements at the air and glass interface and enhances the average visible light transmittance of the glass substrate by approximately 4.3%. Upon integrating this anti-reflective film into organic solar cells based on the D18 and L8-BO blend, the broadband spectral response of the device is significantly enhanced. Consequently, the short-circuit current density J_{sc} is improved, driving an increase in the power conversion efficiency PCE from 18.87% to 19.60%.

Keywords: SiO_2 nano-film, antireflective coating, refractive index, sol-gel method, organic solar cell, power conversion efficiency

doi: 10.1360/SSC-2026-0111