中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 9 期: 2316 ~ 2318
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
精选文章导读

覆镍聚苯乙烯微球电极提升硅纳米线水伏器件的输出功率

顾晨洋[1,2], 张丙昌[1*], 俞佳[3], 刘振[4], 张程[1*], 张晓宏[3*]

1. 苏州大学光电科学与工程学院, 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 现代光学技术教育部重点实验室, 苏州 215006
2. 隆德大学工程学院, 隆德 22100, 瑞典
3. 苏州大学功能纳米与软物质研究院, 江苏省先进负碳技术重点实验室, 苏州 215123
4. 常州大学材料科学与工程学院, 常州 213164
* E-mail: zhangbingchang@suda.edu.cn; zhangc@suda.edu.cn; xiaohong_zhang@suda.edu.cn

1 研究背景

近年来, 有诸多研究揭示了水在纳米通道内的定向运动与固液界面双电层产生相互作用, 可驱动载流子的定向迁移, 从而产生电势, 即水伏效应[1]. 这种效应已在包括碳基纳米材料、半导体纳米结构、有机纳米材料和复合材料在内的多种材料中被观察到[2]. 其中, 硅纳米线阵列具有高度有序的纳米通道结构, 可通过金属辅助化学刻蚀技术大规模制备, 兼具硅材料低成本、工艺成熟、稳定性好等优势, 使其成为水伏器件的理想候选材料[3].

在基于硅纳米线阵列制备的水伏器件中, 每根纳米线作为一个独立的水伏微单元, 通过共用的上下电极实现并联, 这种有序并联结构使得器件具有较大的输出功率. 自2020年首次报道硅纳米线水伏器件以来, 研究人员通过调控硅纳米线结构参数、表面改性及界面钝化等手段, 着力提升硅纳米线水伏器件的输出性能[4~6]. 尽管取得了一定进展, 对硅纳米线水伏微单元进行有效的载流子收集仍是当前该类器件性能优化面临的重要挑战. 由于水伏效应由水的微流动驱动, 硅纳米线阵列表面需保持部分开放空间以允许水流经微通道, 这导致电极无法完全覆盖阵列, 难以实现将所有纳米线顶端进行有效连接, 使得部分硅纳米线水伏微单元未被并联而无法产生电输出. 换言之, 硅纳米线水伏器件中微单元并联结构的潜在优势尚未被完全释放, 从而限制了整体功率输出.

2 本文工作

本文提出利用导电微球作为顶部电极以提升硅纳米线水伏器件输出功率的策略. 导电微球兼具优异的导电性、稳定性和高性价比, 堆积的微球不仅能够在不平整的表面上实现与硅纳米线阵列顶端表面的共形接触形成有效的导电通路, 其微球间的孔隙还能为水的微流动预留出充分的空间.

基于以上思路, 本文将覆镍聚苯乙烯微球沉积在硅纳米线阵列的表面(图1(a)和(b)), 利用微球与硅纳米线阵列顶端的共形接触实现电荷的高效收集, 并通过堆积微球形成的导电网络将电荷导出至导电碳胶上, 从而使更多的硅纳米线微单元实现并联. 此外, 本文系统研究了微球直径和沉积密度对器件输出性能的影响, 揭示了微球在增强电荷收集与阻碍水微流动之间的平衡机制, 并通过实验优化确定了最佳微球沉积参数, 显著提高了器件的输出性能.

英文全文见: Gu C Y, Jiang X S, Zhang B C, et al. Nickel-coated polystyrene microsphere electrodes boost power output of silicon nanowire hydrovoltaic devices. Sci China Tech Sci, 2025, 68: 1620203, https://doi.org/10.1007/s11431-024-2919-7

© 2026《中国科学》杂志社

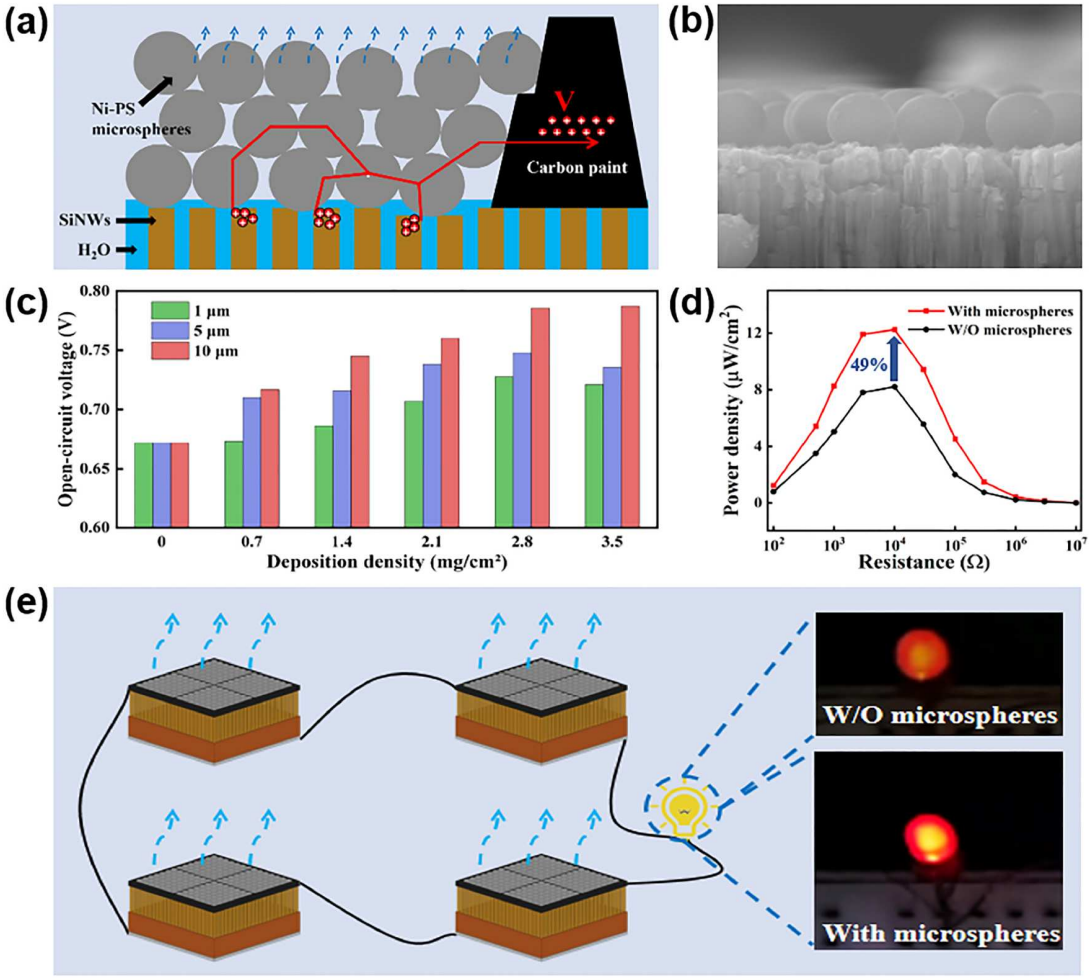


图 1　(网络版彩图) (a) 具有覆镍聚苯乙烯微球电极的硅纳米线水伏器件中载流子的收集与传输示意图; (b) 硅纳米线阵列上沉积覆镍聚苯乙烯微球的SEM图像; (c) 硅纳米线水伏器件的开路电压与覆镍聚苯乙烯微球直径和沉积密度之间的关系; (d) 连接不同外部负载时, 具有/不具有覆镍聚苯乙烯微球电极的硅纳米线水伏器件的输出功率密度; (e) 由四个串联的硅纳米线水伏器件供电点亮LED的示意图及照片, 观察到具有微球电极的器件亮度显著增强

Figure 1　(Color online) (a) Schematic diagram of charge carrier collection and transport in SiNW HDs with the Ni-coated PSMS electrode; (b) SEM image of Ni-coated PSMSs depositing on the SiNW array; (c) open-circuit voltages of SiNW HDs versus diameters and deposition densities of Ni-coated PSMSs; (d) output power densities of SiNW HDs with/without the Ni-coated PSMS electrode when they were connected to different external loads; (e) schematic diagram and photograph of a LED powered by four series-connected SiNW HDs, with enhanced brightness observed in devices with microsphere electrodes.

3　本文结论

在本文实验中, 我们制备了具备不同直径的覆镍聚苯乙烯微球, 并将它们以不同的面密度沉积在硅纳米线阵列表面, 作为联合顶部电极以优化水伏器件性能.

研究表明, 在相同的沉积密度下, 随着微球直径从1 μm逐渐增大到10 μm, 器件的开路电压随直径增大而逐步提高, 其中10 μm微球表现出最佳的提升效果. 这是因为在同等密度下, 较小直径的微球堆积更为紧密, 显著抑制了作为水伏效应能量来源的水微流动. 当保持微球直径为10 μm时, 随着沉积面密度的增加, 器件性能呈现先上升后饱和的趋势(图1(c)). 这是由于低密度下增加微球可完善导电通路, 更好地实现载流子收集, 但当面密度超过2.8 mg cm^{-2}后, 过量的微球沉积会开始阻碍水微流动, 导致优化效果不再提升.

经过优化发现, 微球直径10 μm和面密度2.8 mg cm^{-2}

的参数选择在“改善电荷收集带来的正向效应”与“微球沉积对水微流动造成的负面影响”之间取得了最佳平衡. 在此条件下, 沉积微球使得硅纳米线水伏器件的最大输出功率密度提升了49%(图1(d)), 从无微球电极器件的8.2 μW cm^{-2}增加至有微球电极器件的12.2 μW cm^{-2}. 最后, 通过成功驱动商用LED进一步验证了具有微球电极的硅纳米线水伏器件在应用中的价值(图1(e)). 这种利用导电微球作为顶部电极的策略, 为提高硅纳米线水伏器件的功率输出提供了一种极具前景的方法, 推动了这一新型硅基能源器件的发展与应用.

参考文献

1 Sheng G, Shi Y, Zhang B, et al. Surface modification of silicon nanowires with siloxane molecules for high-performance hydrovoltaic devices. ACS Appl Mater Interfaces, 2024, 16: 8024–8031

2 Wang X, Lin F, Wang X, et al. Hydrovoltaic technology: From mechanism to applications. Chem Soc Rev, 2022, 51: 4902–4927

3 Jiang X, Gao K, Sheng G, et al. Tandem silicon photovoltaic/hydrovoltaic devices for synergistic utilization of solar energy. ACS Appl Mater Interfaces, 2025, 17: 32194–32202

4 Qin Y, Wang Y, Sun X, et al. Constant electricity generation in nanostructured silicon by evaporation-driven water flow. Angew Chem Int Ed, 2020, 59: 10619–10625

5 Zhang B, Zhang B, Sheng G, et al. Modulating the density of silicon nanowire arrays for high-performance hydrovoltaic devices. Nanotechnology, 2024, 35: 185401

6 Shao B, Xing C, Song Y, et al. Boosting electrical output of nanostructured silicon hydrovoltaic device via cobalt oxide enabled electrode surface contact. Nano Energy, 2023, 106: 108081