

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.06.008

电沉积法制备纳米线阵列的研究进展

孟香茗¹, 宋振兴^{1*}, 卜路霞², 谢玉娟³, 陈君³

(1. 天津科技大学理学院, 天津 300457; 2. 天津农学院基础科学学院, 天津 300384; 3. 天津市飞鸽集团联合化工厂, 天津 30016)

摘要: 利用电沉积方法制备纳米线阵列具有方法简单、条件温和、调控简便等优点, 具有广阔的应用前景。综述了近期利用电沉积法制备纳米线阵列的研究进展, 通过分析目前技术现状探讨了其未来发展趋势。

关键词: 电沉积; 纳米线阵列; 有序结构; 传感器; 场发射; 磁性器件

中图分类号: TQ153.2 **文献标识码:** A

Research Progress of Producing Nanowire Arrays by Electrodeposition

MENG Xiangming¹, SONG Zhenxing^{1*}, BU Luxia², XIE Yujuan³, CHEN Jun³

(1. College of Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. College of Basic Science, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Feige Group United Chemical Plant, Tianjin 300163, China)

Abstract: For its advantages like simple process, mild reaction conditions, simplifying regulation and so on, the use of electrodeposition to prepare nanowire arrays has broad application prospects. The research progresses on the preparation of nanowire arrays by electrodeposition are reviewed, and its future development trend is discussed by analyzing the current situation of the technology.

Keywords: electrodeposition; nanowire arrays; ordered structure; sensor; field emission; magnetic device

纳米线阵列是由大量相互独立并垂直于基层的纳米线组成的有序整体, 在保留单根纳米线结构及功能的前提下, 具有了规模效应及协同效应, 因此在物理和化学领域有广阔的应用前景。

制备纳米线阵列的方法通常有气相反应法、水热法、溶胶-凝胶法和电沉积等方法^[1]。在众多制备纳米线阵列的方法中, 电沉积法因其具有可控性高、制备过程简便、可大规模生产的优点而具有广阔的应用前景。

电化学方法通过调节溶液物质含量、沉积电压、

沉积电流及沉积时间等参数, 可以灵活控制成品纯度、结构、形貌, 能够轻松制备出 Pd^[2]、CdS^[3]、Ni^[4]、Fe_{0.68}Ni_{0.32}、Ni₅Sb₂、Fe₉₀Rh₁₀ 等任意比例的金属及其化合物组成的纳米线阵列, 并广泛应用于发光二极管、催化剂、太阳能电池、高密度磁存储设备、传感器、场发射源以及柔性永磁体^[5-6]。

本文基于近年来纳米阵列在传感器、场发射器件、磁性器件、催化器件及储能器件领域的应用成果, 综述了电沉积法制备纳米线阵列的研究进展, 通过分析技术现状探讨了其未来的发展趋势。

收稿日期: 2020-04-07

修回日期: 2020-05-10

作者简介: 孟香茗(1995—), 女, 硕士研究生

通信作者: 宋振兴(1981—), 主要从事表面处理及碳纳米材料技术研究。email: szxtju@126.com

基金项目: 第十六届“挑战杯”天津科技大学大学生课外学术科技作品竞赛(3E66B)

1 传感器

纳米线阵列由于具有比表面积大、结构均匀、晶体取向稳定的特点而表现出极高的表面活性,将其作为敏感元件制成的传感器,具有响应迅速、选择性强、设备小型化及灵敏度好等优点,被大量应用于环境检测、生物医疗等领域。

由于含葡萄糖氧化酶的传感器稳定性欠佳,酶易失活,开发坚固耐用、可重复使用的非酶葡萄糖传感器显得尤为迫切。Zhang H Q等^[7]以聚碳酸酯为模板电沉积了双面Cu纳米线阵列,克服了单面纳米线阵列一侧始终处于封闭状态的局限性。Qin L R等^[8]利用固定在ITO电极上的Ni/Au多层纳米线阵列,构建了非酶葡萄糖传感器,灵敏度可达 $1906 \mu\text{A} \cdot \text{mM}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。Wang L F等^[9]将Au纳米颗粒掺入 NiO_{1-x} 纳米线中,在可见光条件下,对葡萄糖有 $4.061 \text{ mA} \cdot \text{mM}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的超高灵敏度和 0.001 mM 的低检测限。

H_2O_2 作为强氧化剂可用于食品、生化工业、医疗、药物灭菌和纸张漂白等领域。开发快速可靠的过氧化氢传感器可以提高上述领域的生产效率。Kurowska E等^[10]通过在AAO模板中电沉积Ag纳米线阵列,制备了超高稳定性的 H_2O_2 传感器,在存储42天后,仍能保持其灵敏度。

硝酸盐的排放不仅会引起水质富营养化,还会对人体健康构成威胁,快速准确的检测水中硝酸盐含量对于环境保护尤为重要。Patella B等^[11]通过电沉积法制备了Cu纳米线阵列,将其作为硝酸盐传感器,可将对于硝酸盐的检测极限降低至 $9 \mu\text{M}$ 。

尿酸是人体内嘌呤分解代谢的终产物,在血液和尿液中的含量可以间接反映人体的健康情况,在痛风等一些疾病的早期诊断中扮演着重要的角色。Gupta J等^[12]利用电沉积法制备了Cu/Co双层纳米线阵列尿酸传感器,在 $10 \mu\text{m}$ 到 $24 \mu\text{m}$ 范围内其对尿酸的检测灵敏度为 $15.07 \mu\text{A} \cdot \mu\text{M}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$,检测极限为 $0.7368 \mu\text{M}$ 。

近年来,传感器的研发重心逐步由提高阵列密度转移至制备中等阵列密度的纳米线阵列,适合的阵列密度,不仅可以提供更多的扩散路径,而且可以为纳米线阵列表面进行化学修饰、改变形貌、负载生物大分子等提供足够的空间,实现传感器功能的多样化^[13]。

2 场发射器件

相较于块状材料而言,纳米线阵列作为场发射器件具有得天独厚的优势:超高的长径比能够保证较低的开启电场和阈值电场,均匀一致的纳米结构能够保证稳定的发射电流及使用寿命,高密度且分布均匀的电子发射点能够保证高的场发射效率。因此,纳米线阵列在场发射平板显示器、便携式X射线发生器、微波源和放大器等设备中有良好的应用^[14]。

Song Z X等^[15]在AAO模板中进行直流电沉积得到了直径为 60 nm 的Co纳米线阵列,阵列开启电压为 $1.66 \text{ V}/\mu\text{m}$,场增强因子为3054,在 $4.3 \text{ V}/\mu\text{m}$ 的较低电压下仍有高于 $600 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的电流密度。He Z等^[16]制备的Cu纳米线,在 $5.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ 时发射电流密度为 $0.1 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,放电击穿电压和消光电压可降低22%。李芹等^[17]以硅基AAO为模板制备了场增强因子高达2490的ZnO纳米线。

在可预见的未来,通过电化学法制备微尖结构和特异晶体取向纳米线阵列,是此领域发展的重要方向。

3 磁性记录器件

电沉积方法制备的磁性纳米线阵列具有磁各向异性,易磁化方向一般与纳米线的轴向一致,单质金属磁性纳米线阵列的矫顽力和剩余磁化强度随着纳米线直径的减小而增大,具有极高的存储密度及较高的热稳定极限。然而,单质磁性金属纳米线阵列表现出的磁性能依旧与理论值相去甚远,利用电化学方法组装复杂结构磁性纳米线可使其磁性能大幅提高,提供了改善磁性能和机械性能的研究方向。

磁性合金纳米线阵列随着直径降低由多畴转变为单畴,能大幅提高磁各向异性,为垂直磁记录奠定了技术基础。Li W J等^[18]通过电沉积法在AAO中制备了 $\text{Co}_{55}\text{Ni}_{28}\text{Ga}_{17}$ 合金纳米线,基于矫顽力曲线的角度依赖性证实了静磁相互作用在磁化反转过程的重要作用。Xu J C等^[19]在AAO中电沉积了 $\text{Fe}_{30}\text{Ni}_{70}$ 可变直径纳米线,通过直径变化控制了纳米线畴态变化。

多层纳米线由于其独特的结构特点,具有良好的巨磁电阻效应及优异的垂直磁记录性能,可用于制作高密度磁头。姚素薇^[20-21]课题组利用AAO为模板通过电沉积法制备了Co/Cu多层纳米线阵列,

具有明显的磁各向异性,调制波长为50 nm的Co/Cu多层纳米线阵列的磁电阻变化率高达-75%。王宏智等利用电沉积方法制备了一系列磁性金属/非磁性金属多层纳米线阵列,并研究了亚层厚度^[22-23]、退火温度^[24]、直径和重复周期数^[25]对多层纳米线磁性能的影响。

钴铁氧体作为金属氧化物纳米线中的一员,是一种具有适中的饱和磁化强度和高矫顽力的硬磁性材料。Nabil Labchir等^[26]分别在有磁场和无磁场的情况下电沉积了CoFe₂O₄纳米线。SEM研究表明,磁场可加速Co、Fe元素电沉积速率。SQUID测量表明,在磁场作用下电沉积的纳米线的矫顽场从1150增加到1331 Oe,矩形比从0.30增加到0.39。这种铁磁性纳米复合材料可以作为磁光和微波器件的非互易无源元件。

在铁磁性金属中掺杂稀土元素,能使硬磁材料的矫顽力提高,是一种改善磁性能的新方法。Guo J等^[27]在AAO中直流电沉积了Tb-Fe-Co纳米线。Fe-Co纳米线掺杂Tb后的矫顽力和剩磁比显著提高,这归因于硬磁性相Fe₂Tb、Co₂Tb与软磁性相FeCo之间的界面弹性耦合效应以及Fe₂Tb和Co₂Tb的共晶面关系导致的强耦合效应。由于稀土元素原子半径较大,其标准电极电势与过渡族金属的沉积电位相差过大,实现二者的共沉积仍有难度,仍需探索合适的电沉积方法。

目前,通过制备多组分纳米线阵列来提高磁性仍存在制备效率低、结构稳定性差、耐腐蚀性能欠佳等问题,将有机物作为纳米线外皮,从而提高其机械及耐腐蚀性能的方法具有巨大的发展潜力。

4 催化器件

制备高活性、高稳定性、低成本及长寿命的催化剂对于提高反应物转换效率至关重要。不同于常规催化剂,纳米线阵列结构的催化剂尺寸更小,比表面积更大,暴露的活性中心更多,催化效率更高,显著增加了经济效益,在工业生产中将具有更大的优势。

电催化剂:银、铂等贵金属作为电催化剂在极端情况下都有很好的稳定性和活性,将其制备成纳米线阵列不仅可以减少贵金属使用量,还有利于电子传输,在增加催化反应过程中有效作用面积的同时,又不易引起聚集现象,为高催化活性、高稳定性提供了结构基础,在燃料电池相关的电催化反应中至关

重要。Liu C Q等^[28]以AAO为模板通过电沉积法制备了Pd纳米线阵列,并研究了Pd纳米线的长度效应及其在Ag、Cu、Ni、Ti等不同金属基底上的电化学活性。结果表明,长度约4 μm的Pd纳米线阵列在碱性条件下对乙醇氧化反应催化效果最好。

然而,贵金属高昂的成本限制了其大规模的商业应用,一般通过以下方法降低生产成本:首先,制备表面粗糙的非贵金属纳米线阵列,可增大比表面积并提高反应活性位点密度。Zhang L Q等^[29]以AAO辅助电沉积法合成了表面粗糙的Rh纳米线,对析氢反应具有更强的催化活性。其次,通过制备贵金属与过渡金属的合金或多层纳米线,可降低贵金属的负载量,有助于生产出高效廉价的催化剂。Wang C Z等^[30]以AAO中的CdS分级纳米线阵列为牺牲模板,电沉积了Pt和PtNi分级纳米线阵列。Ni的加入有效地提高了样品的抗CO中毒能力并表现出更优秀的电化学活性。再次,壳-线结构电极具有高的催化性能,壳层提供了高活性的催化中心,而具有强电子耦合性的金属纳米线层提供了高效的电荷传输,促进了电子向活性位点的传递,这种结构有助于提高电极催化活性。Du M M等^[31]电沉积了以Pd-Ni合金为壳层、Ni纳米线阵列为芯层的整体开放式壳-线催化剂Ni@Pd-Ni,在联氨氧化反应过程中其起始电位比Ni纳米线阵列催化剂的起始电位降低了800 mV,明显改善了联氨氧化反应动力学。Ma X K^[32]等使用二次电沉积法合成了Au@Ni纳米线阵列电极,其在NaBH₄氧化过程中表现出优良的电化学性能和良好的稳定性,有望用作燃料电池的阳极催化剂。

光催化剂:纳米线阵列因其易于传输光生载流子、电子空穴对复合效率相对较低、化学稳定性好,成为光催化反应的重要研究对象。Cui Y P等^[33]通过模板辅助脉冲电沉积法合成了Fe-Ag@AgCl纳米线阵列,其在可见光照射40 min后对亚甲基蓝的去除率达到89.69%。王宏智等^[34]以AAO为模板,通过控电位法沉积获得了CdSe纳米线阵列,其开路电位差值为324.8 mV,光催化降解罗丹明B 5 h后,CdSe纳米线的降解率达94.29%,远高于CdSe薄膜的52.03%。

目前的催化剂开发大都着眼于对物质比例及晶型变化的研究,而系统地研究纳米线阵列的构效关系,寻找活性位点与结构的相关性,找出具有最佳组

成和表面结构的纳米线阵列催化剂,使其活性位点数量最大化,是今后提高纳米材料催化活性的重要研究方向。

5 储能器件

近年来,为了应对能源危机及环保压力,急需制备大功率、价格低廉、环境友好的储能装置,因此具有高能量密度、高充放电速率和长寿命的储能器件的研发备受关注。纳米线阵列结构不仅可以增加材料的孔隙率,使其强度及韧性大幅提高,还可以有效地预防和缓解电化学反应过程中的巨大体积变化及气体脱附问题。将其制成电极,具有极高的长径比、快速的轴向电子传输和良好的径向离子扩散能力,在超级电容器、锂离子电池等储能器件中具有广阔的应用前景。

锂离子电池目前可用于电动汽车、个人便携电子设备等领域,是目前新能源领域最受关注的部分,探索合适的电极材料以实现高比容量、良好的锂脱嵌可逆性、高安全性和长循环寿命,是进一步提升锂离子电池性能的重要研究方向。Fan H Q等^[35]电沉积了顶部收敛的 Co_3O_4 纳米线阵列,其层次化的多孔纳米结构可以提供空隙空间,适应锂化/脱锂化过程中的体积变化,表现出较高的储锂性能和良好的循环稳定性。Hua K等^[36]采用电沉积法制备了 $\text{Li}_{0.04}\text{V}_2\text{O}_5$ 纳米线阵列,经200℃退火的 $\text{Li}_{0.04}\text{V}_2\text{O}_5$ 纳米线阵列具有良好的电化学可逆性、高的比容量、出色的循环能力和优异的高倍率充放电能力,可应用于锂离子电池的电极材料中。Li X J等^[37]以 $\text{Na}_5\text{V}_2\text{O}_{10}$ 作为牺牲模板,电沉积了PANI纳米线阵列,将其用作锂离子电池阴极电极,初始放电容量为 $159.83\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

超级电容器具有比普通电容器更高的能量密度,比电池更高的功率密度,备受科研和工业领域的关注。基于纳米线阵列的结构优势,可以直接将其用作超级电容的电极材料,也可以作为超级电容器电极的集流体。刘奔等^[38]采用电沉积法制备了PANI纳米线阵列超级电容器,其克容量可达560 F,循环1000周后电容损失率仅为11%。核-壳结构的纳米复合材料在电荷存储过程中可以大幅提高能量密度、功率密度,通常被用来改善材料的结构稳定性,突破简单纳米线材料的局限性。Zhao G Y等^[39]电沉积了 $\text{Ti}@ \delta\text{-MnO}_2$ 纳米线阵列,该阵列的克容量

为195 F。Schiavi P G等^[40]使用电沉积法制备了Co-CoO核壳纳米线电极阵列,经过200次循环后可获得 $1500\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的实际比容量。Yan Y Q等^[41]电沉积了 $\text{Co}_3\text{O}_4@\text{CoNiS}$ 纳米线,将其与NOPC组装成非对称超级电容器,能量密度高达 $46.95\text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$,20000次循环后容量仅衰减至95.6%。

尽管纳米线阵列储能材料的研究已经取得了一定的进展,但可穿戴式电子器件的出现对纳米电极材料提出了新的要求,因此构建小型化、可体内植入、稳定低耗的纳米线阵列电极材料已成为储能器件发展的一个热门趋势。

6 总结与展望

电沉积法可通过调控沉积电压、温度、时间和电流等因素改变纳米线阵列的形貌和结构,进而达到提高纳米线阵列器件性能的目的。今后的研究重点应致力于利用电化学方法将石墨烯、碳纳米管及半导体多孔纳米颗粒等不同维度的纳米材料作为次级结构固定于纳米线之上,构建多维度复合纳米线阵列,实现有机-无机复合、体相-表相协同、单体-阵列交织,通过研究以上多维结构的构效关系,提升材料性能,提高生产效率,简化生产工序,降低成本,实现纳米线阵列器件的商业应用。

参考文献

- [1] Li L, Zhang Y Q, Liu X Y, et al. One-dimension $\text{Mn-Co}_2\text{O}_4$ nanowire arrays for electrochemical energy storage[J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 116: 467-474.
- [2] Kim K, Kim M, Cho S M. Pulsed electrodeposition of palladium nanowire arrays using AAO template[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2005, 96(2): 278-282.
- [3] Xu D S, Xu Y J, Chen D P, et al. Preparation and characterization of CdS nanowire arrays by dc electrodeposit in porous anodic aluminum oxide templates[J]. *Chemical Physics Letters*, 2000, 325(4): 340-344.
- [4] Xu J X, Wang K Y. Pulsed electrodeposition of monocrystalline Ni nanowire array and its magnetic properties [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(20): 6623-6627.
- [5] Oleg L, Vasilii C, Vasile P, et al. Silver-doped zinc oxide single nanowire multifunctional nanosensor with a significant enhancement in response[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 223: 893-903.
- [6] Dong J P, Ren L X, Zhang Y, et al. Direct electrodeposi-

- tion of cable-like CuO@Cu nanowires array for non-enzymatic sensing[J]. *Talanta*, 2015, 132: 719-726.
- [7] Zhang H Q, Wang Y N, Gao X S, et al. High reproducibility and sensitivity of bifacial copper nanowire array for detection of glucose[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2017, 27(3): 311-315.
- [8] Qin L R, He L Z, Zhao J W, et al. Synthesis of Ni/Au multilayer nanowire arrays for ultrasensitive non-enzymatic sensing of glucose[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 240: 779-784.
- [9] Wang L F, Lu W B, Zhu W Q, et al. A photoelectrochemical sensor for highly sensitive detection of glucose based on Au-NiO_{1-x} hybrid nanowires[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 304: 127330.1-127330.8.
- [10] Kurowska E, Brzózka A, Jarosz M, et al. Silver nanowire array sensor for sensitive and rapid detection of H₂O₂[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 104: 439-447.
- [11] Patella B, Russoa R R, O'Riordan A, et al. Copper nanowire array as highly selective electrochemical sensor of nitrate ions in water[J]. *Talanta*, 2021, 221: 121643.1-121643.7.
- [12] Gupta J, Arya S, Verma S, et al. Performance of template-assisted electrodeposited Copper/Cobalt bilayered nanowires as an efficient glucose and uric acid sensor[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, 238: 121969.1-121969.11.
- [13] Xu K, Yu X, Zhao W, et al. Density-dependent of gas-sensing properties of Co₃O₄ nanowire arrays[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2020, 118: 113956.1-113956.7.
- [14] Wang L B, Zhao Y Y, Zheng K S, et al. Fabrication of large-area ZnO nanowire field emitter arrays by thermal oxidation for high-current application[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 484: 966-974.
- [15] Song Z X, Xie Y J, Yao S W, et al. Field emission properties of electrodeposited cobalt nanowire arrays grown in anodic aluminum oxide[J]. *Materials Letters*, 2010, 65 (1): 44-45.
- [16] He Z, Liang Z H, Zhang X N, et al. Influence of copper nanowires grown in a dielectric layer on the performance of dielectric barrier discharge[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Nanotechnology and Microelectronics*, 2016, 35(1): 010603.1-010603.5.
- [17] 李芹, 张海明, 李菁, 等. 硅基 AAO 模板内电化学沉积 ZnO 纳米线及其光电性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2012, 41(1): 136-140.
- Li Q, Zhang H M, Li J, et al. Study on preparation and photoelectric properties of ZnO nanowires within AAO/Si substrate by electrodeposition process[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2012, 41(1): 136-140(in Chinese).
- [18] Li W J, Khan U, Irfan M, et al. Fabrication and magnetic investigations of highly uniform CoNiGa alloy nanowires [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 432: 124-128.
- [19] Xu J C, Zhang J, Wang J, et al. Effects of gradient diameter on magnetic properties of FeNi alloys nanowires arrays[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 499(C): 166207.1-166207.7.
- [20] 姚素薇, 宋振兴, 王宏智. Co/Cu 多层纳米线阵列的制备与磁性能[J]. *物理化学学报*, 2007, 23(8): 1306-1310. Yao S W, Song Z X, Wang H Z. Fabrication and magnetic properties of Co/Cu multilayer nanowire Arrays[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2007, 23(8): 1306-1310(in Chinese).
- [21] Song Z X, Xie Y J, Yao S W, et al. Microstructure and magnetic properties of electrodeposited Co/Cu multilayer nanowire arrays[J]. *Materials Letters*, 2011, 65(11): 1562-1564.
- [22] Zhang W G, Deng H Q, Li H C, et al. Synthesis and magnetic properties of Ni-Fe/Cu/Co/Cu multilayer nanowire arrays[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, 26(4): 2520-2524.
- [23] Wang H Z, Huang B, Li H C, et al. Effect of sub-layer thickness on magnetic and giant magnetoresistance properties of Ni-Fe/Cu/Co/Cu multilayered nanowire arrays [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, 23 (7): 1231-1235.
- [24] 张卫国, 马晓龙, 许琰, 等. 热处理对[NiFe/Cu/Co/Cu]_n 纳米多层线磁性能的影响[J]. *物理化学学报*, 2014, 30 (4): 768-772. Zhang W G, Ma X L, Xu Y, et al. Effects of annealing on the magnetic properties of [NiFe/Cu/Co/Cu]_n multilayer nanowire arrays[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2014, 30(4): 768-772(in Chinese).
- [25] Zhang W G, Li H C, Wang H Z, et al. Effect of nanowire diameter and period number on magnetic properties and CPP-GMR of Ni-Fe/Cu/Co/Cu multilayer nanowire arrays[J]. *Journal of Electrochemical Society*, 2014, 161 (4): 176-180.
- [26] Labchir N, Hannour A, Vincent D, et al. Magnetic field effect on electrodeposition of CoFe₂O₄ nanowires[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(11): 1-9.

- [27] Guo J, Cui C X, Yang W, et al. Microstructures and magnetic properties of Tb-Fe-Co magnetic nanowire arrays prepared by electrochemical deposition[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2019, 128: 298-306.
- [28] Liu C Q, Ethan A, Li Z Y, et al. Effect of metal substrate on electrocatalytic property of palladium nanowire array for high performance ethanol electro-oxidation[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2019, 35(43): 13821-13832.
- [29] Zhang L Q, Liu L C, Wang H D, et al. Electrodeposition of rhodium nanowires arrays and their morphology-dependent hydrogen evolution activity[J]. *Nanomaterials*, 2017, 7(5): 257-264.
- [30] Wang C Z, Zhang Y, Zhang Y J, et al. Highly ordered hierarchical Pt and PtNi nanowire arrays for enhanced electrocatalytic activity toward methanol oxidation[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2018, 10(11): 9444-9450.
- [31] Du M M, Sun H J, Li J W, et al. Integrative Ni@Pd-Ni alloy nanowire array electrocatalysts boost hydrazine oxidation kinetics[J]. *ChemElectroChem*, 2019, 6(22): 5581-5587.
- [32] Ma X K, Ye K, Wang G, et al. Facile fabrication of gold coated nickel nanoarrays and its excellent catalytic performance towards sodium borohydride electro-oxidation [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 414: 353-360.
- [33] Cui Y P, Peng L, Lei L D, et al. Synthesis and photocatalytic performance of superparamagnetic Fe-Ag@AgCl nanowire with 1-D core-shell structure under visible light [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2020, 397: 112586.1-112586.8.
- [34] 王宏智, 卢敬, 姚素薇, 等. 控电位法制备 CdSe 纳米线阵列及其性能研究[J]. *电镀与精饰*, 2014, 36(7): 1-6.
- Wang H Z, Lu J, Yao S W, et al. Synthesis and photoelectrochemical properties of CdSe nanowires by constant potential deposition method[J]. *Plating and Finishing*, 2014, 36(07): 1-6 (in Chinese).
- [35] Fan H Q, Yang J, Huang L A, et al. Controllable fabrication of hierarchical top-converged Co₃O₄ nanowire array with enhanced lithium storage performance[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, 198: 107-114.
- [36] Hua K, Li X J, Fang D, et al. Electrodeposition of high-density lithium vanadate nanowires for lithium-ion battery[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 447: 610-616.
- [37] Li X J, Wu Y C, Hua K, et al. Vertically aligned polyaniline nanowire arrays for lithium-ion battery[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2018, 296(8): 1395-1400.
- [38] 刘奔, 张行颖, 陈韶云, 等. 一维有序聚苯胺纳米阵列的制备及电化学储能性能[J]. *高等学校化学学报*, 2019, 40(3): 498-507.
- Liu B, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Preparation and electrochemical energy storage performance of one dimensional orderly polyaniline nanowires array[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2019, 40(3): 498-507 (in Chinese).
- [39] Zhao G Y, Zhang D, Zhang L, et al. Ti@ δ -MnO₂ core-shell nanowire arrays as self-supported electrodes of supercapacitors and Li ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 202: 8-13.
- [40] Schiavi P G, Farina L, Altamari P, et al. A versatile electrochemical method to synthesize Co-CoO core-shell nanowires anodes for lithium ion batteries with superior stability and rate capability[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 290: 347-355.
- [41] Yan Y Q, Ding S X, Zhou X Y, et al. Controllable preparation of core-shell Co₃O₄@CoNiS nanowires for ultralong life asymmetric supercapacitors[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 867: 158941.1-158941.8.