

储能领域国家重点专项专栏

“高效纳米储能材料与器件的基础研究”项目介绍

谢清水, 王来森, 彭栋梁

(厦门大学, 福建 厦门 361005; “高效纳米储能材料与器件的基础研究”项目组)

摘要: 2016年2月国家科技部组织编制了“纳米科技”重点专项实施方案并发布了2016年度项目申报指南。通过形式审查、函评、视频答辩等申报环节,“纳米科技”重点专项最终在7个研究方向上启动了43个项目。针对指南中“5.2 纳米能量存储材料及器件”,由厦门大学牵头,联合武汉理工大学、华南理工大学及中山大学,组织申报的“高效纳米储能材料与器件的基础研究”项目获得了支持。本文介绍了“高效纳米储能材料与器件的基础研究”项目的目的与意义,研究目标,拟解决的关键科学问题,研究内容与考核指标,研究团队与研究基础,研究挑战和项目预期效益。

关键词: 纳米电极材料; 固体电解质; 储锂机制; 高性能锂离子电池

doi: 10.12028.j.issn.2095-4239.2016.0092

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239(2017)01-162-03

Project “Basic research on high efficiency energy storage devices based on nanostructured materials”

XIE Qingshui, WANG Laisen, PENG Dongliang

(Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China organizes “nano science and technology” key implementation project in Feb. 2016 and releases the annual project declaration Guide. Totally 43 projects focusing on seven different research areas are announced in Jun. 2016. A research team led by Prof. PENG Dongliang from Xiamen University with the project title of “Basic research on high efficiency energy storage devices based on nanostructured materials” has been funded. In this project, scientific and technological issues concerning advanced lithium ion batteries will be studied, aiming to greatly improve their energy density (≥ 400 W·h/kg) and cycling stability (≥ 500 cycles).

Key words: nanostructured electrode materials; solid-state electrolytes; lithium storage mechanism; advanced lithium ion batteries

为继续保持我国在纳米科技国际竞争中的优势,并推动相关研究成果的转化应用,2016年国家科技部会同有关部门编制了“纳米科技”重点专项实施方案,并指出该重点专项的总体目标是获得重大原始创新和重要应用成果,提高自主创新能力及

研究成果的国际影响力,力争在若干优势领域率先取得重大突破。申报指南指明重点专项包括“新型纳米制备与加工技术、纳米表征与标准、纳米生物医药、纳米信息材料与器件、能源纳米材料与技术、环境纳米材料与技术及纳米科技重大问题”7个方面的研究方向。通过形式审查、函评、视频答辩等申报环节,最终有43个相关项目获得资助。“能源纳米材料与技术”方向中的“5.2 纳米能量存储材料及器件”明确要求在“下一代锂、铝等储能电池的纳米电极材料结构的设计和充放电过程中的电子结

收稿日期: 2016-12-06。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0202600)。

第一作者: 谢清水(1987—),男,助理教授,研究方向为锂离子电池、钠离子电池, E-mail: xieqsh@xmu.edu.cn; 通讯联系人: 彭栋梁,教授,研究方向为低维纳米能源材料、磁性材料, E-mail: dlpeng@xmu.edu.cn。

构、晶体结构、界面反应的演化规律”方面开展研究工作，并指出相应的考核指标为新型纳米电极材料的锂电池储能密度大于 $400 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，循环稳定性大于 500 次。

针对指南“5.2”要求，厦门大学作为项目牵头单位，联合武汉理工大学、华南理工大学和中山大学，组织申报了以“高效纳米储能材料与器件的基础研究”为题目的项目，并最终获得了支持，项目批准号为 2016YFA0202600。下文介绍该项目的主要研究思路。

1 项目目的和意义

当前，煤、石油等化石燃料不断消耗导致的能源危机和环境污染成为了人类可持续发展面临的严峻挑战。开发可再生能源以及发展高效、廉价和环境友好的绿色储能系统迫在眉睫。近年来，随着科技的进步和需求的增长，锂离子电池从电子终端设备进一步扩展到电动汽车、智能电网、航空航天、军事储能等新能源高能耗领域，成为了今后的重点发展方向之一。然而，现有体系已难以满足高能量、高功率、长寿命和低成本的要求。因此，研发高能量密度、长循环寿命以及安全性能良好的新一代高性能锂离子电池对推进新能源产业的快速发展具有重要的科学意义和现实的紧迫性。

高性能锂离子电池的开发和应用是一项极其复杂的系统工程，国家重点研发计划“纳米科技”重点专项“高效纳米储能材料与器件的基础研究”项目正是聚焦在该领域中亟待系统和深入研究的关键科学问题，将在理论计算、材料制备、原位表征及器件组装等方向进行协同创新。通过完成本项目，研制出高性能锂离子电池纳米电极材料和新型固体电解质体系，深刻揭示纳米材料储能机制和容量衰减的本征因素，获得具有自主知识产权和国际核心竞争力的高比能新型高效纳米储能材料与器件的相关技术资料，推动纳米科技产业发展，显著提升我国在电化学储能领域的研发水平和技术创新能力。

2 项目总体目标

结合理论计算和实验结果验证，力争在下一代锂、铝等储能电池的关键材料及器件设计方面取得突破；发展电极微纳结构与表界面的原位表征技术；获得稳定且紧密结合的“纳米电极材料-电解质”界面关键核心技术；明确提升电池能量密度的优化策

略及其实现途径；在电池能量密度、安全性、使用寿命以及生产成本等方面获得一系列原创性成果，解决其中一些重大基础和应用问题；最终实现锂离子样品电池能量密度大于 $400 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，循环稳定性大于 500 次的目标。

3 项目拟解决的关键科学与技术问题

围绕项目的总体目标，本项目凝炼出三个关键的科学问题：探寻高性能锂、铝等电池纳米电极材料和新型固体电解质体系，提出微纳复合结构电极材料的优化设计理论，实现纳米电极材料的可控制备，开发电极/电解质一体化界面构筑技术；发展电极微纳结构与表界面的原位表征方法，探索电极添加剂对材料性能的影响以及材料晶体结构、电子结构和界面反应的原位演化规律，揭示材料储能机制和容量衰减的本征因素；开发高性能、低成本纳米储能材料的大面积可控制备技术，实现新型高效储能器件的设计与研制。

4 项目主要研究内容和主要技术指标

针对以上关键科学与技术问题，本项目拟开展以下几个方面的研究。

(1) 高性能电池关键材料的理论预测与设计 通过第一性原理的电子结构计算以及分子动力学模拟方法，结合先进的结构预测方法，实现对电池关键材料电子性质的计算和晶体结构的预测，为研制新型高能量密度的锂、铝等电池提供理论指导。

(2) 纳米电极材料及电解质的研制与结构调控 在前期理论计算与预测的基础上，探索高性能锂、铝等电池纳米电极材料新体系，提出微纳复合结构电极材料的性能优化策略；研制高离子导电率的电解质材料，并开发稳定且紧密结合的“纳米电极材料-电解质”界面新技术。

(3) 电极微纳结构与表界面的原位表征及演化规律 发展电极微纳结构与表界面的原位表征方法，探索锂、铝等电池的纳米电极材料在电化学反应过程中的电输运、电子结构、晶体结构、表面形貌和界面反应的演化规律，从而揭示电极材料的储能机制、容量衰减因素、SEI 膜和负极金属枝晶的形成过程及添加剂对电极材料电化学性能的本征影响，为进一步优化纳米电极材料的电化学性能提供理论指导。

(4) 高效储能器件的设计与性能优化 基于理

论计算预测和电池材料的实验验证,确定具有优异性能且匹配性良好的正负极材料,结合本项目研制的高离子导电率的电解质、隔膜及电池添加剂材料,通过均衡设计方法,设计和开发高比能的新型高效储能器件。

本项目的主要技术指标包括:获得2~3个比容量不低于350 mA·h/g(正极材料)和1500 mA·h/g(硅基负极)的锂电池新材料体系;获得1~2个具有高离子导电率的聚合物($10^{-3} \sim 10^{-2}$ S/cm)及无机硫化物(10^{-2} S/cm)电解质;发展1种以上电极微结构与表界面的新型原位表征技术;锂离子样品电池能量密度大于400 W·h/kg、循环稳定性大于500次。

5 项目团队及研究基础介绍

项目团队集成厦门大学、武汉理工大学、华南理工大学和中山大学在纳米储能领域的优势力量,依托厦门大学固体表面物理化学国家重点实验室、武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室和国家能源材料化学协同创新中心(厦门大学),研究团队的组成具有良好的互补性。在前期研究中项目团队已获得了比容量达300 mA·h/g的正极材料,构建了单根纳米线全固态电化学器件,实现了电化学反应过程中锂离子电池电极材料的形貌、结构及晶相变化和电荷载流子电输运性能的原位检测;钒系锂离子动力电池完成装车检测,显示出优异的安全性和低温性能。这些前期研究作为本项目新型高效纳米储能器件的设计、组装与研制奠定了坚实基础,同时为将纳米能量存储材料的研究由“材料制备”层次提升到“器件研制”层次提供了可靠的技术保障。

6 技术挑战与风险

研制新一代高性能锂离子电池的关键是如何在多种技术路线中选择合理的研究方向,明确其中涉

及的关键核心技术并提供确实可行的解决方案。为了降低技术风险,推进项目研究工作顺利进行,本项目将在理论计算和实验验证相结合的基础上制定合理的技术路线。此外,项目研究人员长期在纳米储能领域开展研究工作,具有较好的研究基础和经验,并与国内外锂电池研究团队及相关企业保持着密切的合作关系,由其前期自主研发的纳米线钒系锂离子动力电池的装车检测和结果为本项目开展高性能锂离子电池的基础研究与应用开发奠定了较好的基础。项目启动后,将定期开展项目课题间的研讨会并及时向项目专家组汇报最新研究进展、问题与成果,调整并逐步完善研究方案和实验路线,及时优化技术路线,尽量将完成本项目的总体目标的技术风险控制在最低范围内。

7 项目预期效益

电化学储能材料与器件是解决清洁能源转换、存储和利用的关键。发展高能量密度锂电池技术将为电动汽车、大规模储能、航空航天等提供亟需的、强有力的技术支撑,具有重要的科学意义和广阔的市场前景。本项目通过对高效纳米储能材料与器件的关键科学问题开展研究,预期在理论创新、材料制备、器件组装方面取得突破,即获得下一代锂离子电池关键材料的性能优化策略,实现性能优异的不同维度纳米电极材料及其复合材料的可控构筑和功能化,揭示电极微观结构对电荷载流子传输与扩散迁移等本征电化学行为的影响机制,设计并研制出高效纳米储能器件,完成锂离子样品电池能量密度大于400 W·h/kg,循环稳定性大于500次的项目目标。项目实施将产生一批原创性学术成果和发明专利,推动高能量密度锂电池产业快速发展,提升我国在新一代电池技术的核心竞争力。