

2020 年度国家科学技术奖拟提名 项目公示内容

项目名称：功能纳米颗粒与微/纳结构阵列的制备及其器件性能研究

提名者：中国科学院

提名意见：

面向纳米材料与微/纳器件的科学前沿，该项目针对特殊结构纳米颗粒的可控制备，微/纳结构阵列的按需构筑及其器件性能与结构相关性等科学问题，发展了基于极端非平衡途径的纳米颗粒制备方法，实现了高浓度间隙缺陷的可控引入；首次在ZnO中实现了强且稳定的光致蓝色发光特性，揭示了间隙缺陷态的发光机制；发明了基于有机模板无损转移的微/纳结构阵列构筑方法，实现了在任意指定衬底上阵列与器件的按需构筑；提出了微/纳结构融合的器件设计理念，揭示了阵列的结构增强功能特性及构效关系，设计了网格状微/纳结构有序孔阵列气敏薄膜与器件，突破了传统氧化物薄膜灵敏度低和纳米薄膜稳定性差等技术极限，同时实现了秒量级响应速率、ppb量级灵敏度及高稳定性与低功耗，并在公共安全等领域得到应用等。

该项目在新型复合结构纳米颗粒特性、任意指定衬底上微/纳结构阵列及其器件的制作方法和相关氧化物器件性能

与应用等方面取得了有重要影响的创新性成果，在材料与纳米科学类的国际一流刊发表了系列论文，产生了广泛影响与关注，被学术界公认和广泛引用与验证。该项目研究系统深入，获得了多项重要发现和创新成果，为纳米结构器件的设计与研制提出了新的思路与新的途径，不仅丰富了纳米科学研究内容，也为其提供了重要理论指导，为我国纳米材料科学技术发展做出了重要贡献。

提名等级：国家自然科学奖二等奖。

项目简介

功能纳米颗粒与微/纳结构阵列是下一代器件的重要基础。实现纳米结构器件优异功能特性，存在的主要瓶颈是：在纳米单元层次上，要设计制备出结构独特的纳米颗粒，实现所需要的优异功能特性；在纳米单元所构成的微/纳结构阵列层次上，要实现结构的按需构筑；在器件性能上，要解决高效能与稳定性之间的矛盾问题。针对上述难题，本项目以典型的氧化物半导体为主要材料体系，从纳米单元与阵列两个层次以及器件性能方面开展工作，着重围绕缺陷控制、界面结合、结构耦合三个关键科学问题进行了深入系统的研究。在独特结构纳米颗粒的可控制备方法、任意指定衬底上微/纳结构阵列及其器件的构筑原理与新的优异光电特性的实现等方面，取得了一系列国际上有重要影响的创新性成果，

主要有以下三点：

1、发展了基于极端非平衡途径的纳米颗粒制备方法，实现了高浓度间隙缺陷的可控引入。发展了基于活性金属靶的液相激光烧蚀方法，提出了模板-弱酸选择侵蚀的策略，获得了高浓度间隙缺陷的氧化物纳米颗粒；首次在 ZnO 中实现了强且稳定的光致蓝色发光，揭示了间隙锌缺陷态的发光机制，澄清了多年来常规 ZnO 蓝色发光很弱的物理起因，并被同行作为蓝色发光点，设计和实现了量子点白光 LED。

2、发明了基于有机模板无损转移的微/纳结构阵列构筑方法，实现了在任意指定衬底上阵列与器件的按需构筑。调控有机胶体与衬底间的界面特性，揭示了界面结合机制，实现了以溶液为介质的有机胶体模板可转移特性，解决了模板制作与器件衬底的相容性以及结构多样性问题；进而发展了基于模板的溶液浇注策略、电化学生长技术等，实现了在任意指定衬底(平表面或弯曲粗糙等)上微/纳结构阵列的原位构筑，为在任意功能性衬底上按需构筑纳米器件提供了高效而又简便的实现途径，被国际同行认为是“高效而又简便的有序纳米结构阵列构筑方法”。

3、提出了微/纳结构融合的器件设计理念，发现并揭示了阵列的结构增强功能特性及构效关系。设计、制备了由氧化物纳米片构造而成的微/纳结构阵列组装体，实现了光吸收效率的显著增强，为新型光子器件的设计提供了新思路；发明了光透射截止带与入射角无关的微/纳结构单层空心球

阵列光子晶体器件，为克服常规光子晶体与入射角相关的光透射截止带的难题提供了新途径；结合硅基 MEMS 芯片，设计了网格状微/纳结构有序孔阵列气敏薄膜与器件，突破了传统薄膜灵敏度低响应慢和常见纳米薄膜稳定性差等技术极限，同时实现了秒量级响应速率、ppb 量级灵敏度及高稳定性与低功耗，并在公共安全等领域得到应用。

上述工作不仅为新型纳米器件的设计研制提供了依据与材料基础，而且为纳米颗粒与微/纳结构阵列的基础理论研究开辟了新途径。8 篇代表性论文他引 2533 次，1 篇入选“中国百篇最具影响优秀国际学术论文”。部分成果获得了安徽省科学技术奖一等奖。

代表性论文专著

(1) Blue Luminescence of ZnO Nanoparticles Based on Non-Equilibrium Processes: Defect Origins and Emission Controls, *Adv. Funct. Mater.*, Haibo Zeng(曾海波), GuotaoDuan(段国韬), Yue Li(李越), Shikuan Yang, Xiaoxia Xu, WeipingCai(蔡伟平), 2010 年 20 卷 561 页

(2) ZnO-based hollow nanoparticles by selective etching: Elimination and reconstruction of metal-semiconductor interface, improvement of blue emission and photocatalysis, *ACS Nano*, Haibo Zeng(曾海波), WeipingCai(蔡伟平), Peisheng Liu, Xiaoxia Xu, Huijuan Zhou, Claus Klingshirn, Heinz Kalt, 2008 年 2

卷 1661 页

(3) Phase Diagram, Design of Monolayer Binary Colloidal Crystals, and Their Fabrication Based on Ethanol-Assisted Self-Assembly at the Air/Water Interface , ACS Nano, Zhengfei Dai, Yue Li (李越), Guotao Duan (段国韬), Lichao Jia, and Weiping Cai (蔡伟平), 2012 年 6 卷 6706 页

(4) Morphology-controlled growth of large-area two-dimensional ordered pore arrays, Adv. Funct. Mater., Fengqiang Sun(孙富强), WeipingCai(蔡伟平), Yue Li(李越), Bingqiang Cao, Yong Lei, Lide Zhang, 2004 年 14 卷 283 页

(5) Ordered micro/nanostructured arrays based on the monolayer colloidal crystals, Chem. Mater., Yue Li (李越), Weiping Cai (蔡伟平), Guotao Duan (段国韬) 2008 年 20 卷 615 页

(6) Direct growth of mono- and multilayer nanostructured porous films on curved surfaces and their application as gas sensors, Adv. Mater., Fengqiang Sun(孙富强), WeipingCai(蔡伟平), Yue Li(李越), LichaoJia, Fang Lu, 2005 年 17 卷 2872 页

(7) ZnO hierarchical micro/nanoarchitectures: Solvothermal synthesis and structurally enhanced

photocatalytic performance, Adv. Funct. Mater., Fang Lu, WeipingCai(蔡伟平), Yugang Zhang, 2008 年 18 卷 1047 页

(8) A hierarchically structured Ni(OH)(2) monolayer hollow-sphere array and its tunable optical properties over a large region, Adv. Funct. Mater., GuotaoDuan(段国韬), WeipingCai(蔡伟平), Yuanyuan Luo, Fengqiang Sun(孙丰强), 2007 年 17 卷 644 页

主要完成人 (完成单位): 中国科学院合肥物质科学研究院

(1) 第一完成人: 蔡伟平

工作单位: 中国科学院合肥物质科学研究院 研究员

对本项目主要学术贡献: 他是本项目组长与项目主要完成人, 他是本项目的组织者、设计者与直接参与者, 对所列的三点“重要科学发现”均做出了创造性贡献, 由代表性论文 1-8 支持。投入的工作量占他工作总量的 80% 以上。

(2) 第二完成人: 李越

工作单位: 中国科学院合肥物质科学研究院

对本项目主要学术贡献: 本项目的主要参与者, 对“重要科学发现之一”、“重要科学发现之二”, 做出了重要贡献。由代表性论文 1、3、4、5、6 支持。尤其在高质量的有机胶体模板的制备, 微/纳米结构阵列与器件的构筑方法方面做出了创造性贡献。投入的工作量占他工作总量的 80%

以上。

(3) 第三完成人：段国韬

工作单位：华中科技大学

对本项目主要学术贡献：本项目的主要参与者，对“重要科学发现之一”、“重要科学发现之二”、“重要科学发现之三”均做出了贡献，由代表性论文 1、3、5、8 支持。参与本项目的纳米颗粒性质、微/纳米结构阵列构筑及其器件性能的研究，在阵列的构筑方法及光学性质的结构相关性以及气敏器件与应用方面做出了创造性贡献。投入的工作量占他工作总量的 80% 以上。

(4) 第四完成人：曾海波

工作单位：南京理工大学

对本项目主要学术贡献：本项目的主要参与者，对“重要科学发现之一”做出了重要贡献，由代表性论文 1、2 支持。参与复合结构纳米颗粒合成及其相关性能研究，在 ZnO 纳米颗粒蓝色发光及其机制研究方面，做出了创造性贡献。投入的工作量占他工作总量的 80% 以上。

(5) 第五完成人：孙富强

工作单位：华南师范大学

本项目主要学术贡献：本项目的主要参与者，对“重要科学发现之一”做出了重要贡献，由代表性论文 1、2 支持。参与复合结构纳米颗粒合成及其相关性能研究，在 ZnO 纳米颗粒蓝色发光及其机制研究方面，做出了创造性贡献。投入

的工作量占他工作总量的 80% 以上。