

附件：

“半导体纳米线结构及器件创新与分数维度晶体电子态系理论”项目公示材料

一. **项目名称：** 半导体纳米线结构及器件创新与分数维度晶体电子态系理论

二. **推荐单位：** 北京邮电大学

三. **主要完成单位：** 北京邮电大学，天津大学，南开大学

四. **拟推荐奖项：** 2017 年度高等学校科学研究优秀成果自然科学奖

五. **项目简介：**

本项目面向信息及能源等领域，重点涉及半导体异质结构物理学。特征线度小至纳米尺度、电子态系呈现低维特征的纳异质结构的出现使得异质结构物理学进入了全新发展阶段，同时也暴露出了现有固体物理学乃至量子力学理论中存在的某些深层次问题。本项目组在承担国家 973 计划项目和国家自然科学基金重大国际合作研究项目的过程中，在 III-V 族半导体纳米线及相关异维异质结构等新材料结构的制备、表征以及相关器件研制方面取得了突破性进展，进而在作为异质结构物理学乃至固体物理学核心内容的晶体电子态系理论方面作出了原创性贡献。具体科学发现包括：

1、揭示了 III-V 族半导体纳米线纯相及晶相可控生长的条件及机理，实现了关键工艺突破。首次在 Si 衬底上通过引入缓冲层生长出了无位错的纯闪锌矿结构 GaAs 纳米线，解决了相应的工艺难题，显著拓宽了此类纳米线高质量生长的高度和半径范围，避免了衬底的 Au 污染和纳米线的 Si 污染，从而拓展了 Si

基 GaAs 纳米线器件制备的可能性和自由度；首次在 GaAs 衬底上生长出了半径细至 12nm 的纯闪锌矿结构 GaAs 纳米线，改变了以往的研究结论，发现了气体超饱和度对其纯相生长的重要影响；发现了在 GaAs 纳米线“基座”上实现设定晶相 InAs 纳米线选择性生长的调控机制及一种新的成核模式，从理论上阐明了纳米线轴向双异质结构无位错生长的相关条件与机理。

2、揭示了 III-V 族半导体纳米线/量子点径向异维复合结构的生长机理及其重要特性，实现了关键工艺突破。首次在 GaAs 基、乃至 Si 基 GaAs 纳米线侧壁上以 S-K 外延模式直接制备出 InAs 量子点，揭示了一种基于扩散的量子点形成机理，发现了量子点的分布及演化规律，开拓了制备“点”“线”异维复合结构的一种有效途径；观察到纳米线侧壁量子点的 F-P 腔谐振现象，并首次在室温下观察到相应的量子点发光峰，表明了该结构应用于室温光电子器件制备的潜在价值；首次在 GaAs 纳米线侧壁上制备出 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 三元系量子点，发现了量子点发光波长及光谱线宽随组分变化的规律，为器件功能结构的灵活、优化设计提供了可能性。

3、首次利用倏逝波泵浦实现了单根 GaAs/AlGaAs 纳米线的室温单模激射，该激光器属于最早报道的 3 例室温近红外纳米线激光器之一；揭示了 III-V 族半导体纳米线中的新颖非线性效应并研制出相应的新型光电子锥形器件，首次利用飞秒脉冲激光在 GaAs 纳米线上获得了宽带倍频与和频信号，此类新型宽带非线性光学转换器件具有重要的潜在应用价值；提出了一种轴向串接径向 pn 结的新

型纳米线阵列太阳能电池结构，其效率比传统单节纳米线阵列太阳能电池高出30%。

4、在长期从事纳异质结构理论和实验研究工作的基础上，提出了分数维度（或弥散化）晶体电子态系理论。发现了令人困惑的一个重要而基本的科学问题，进而突破现行理论，提出了能级弥散的概念和模型，深化了关于能带概念本质的认识，给出了态系维度连续演化的物理图像，进而给出了任意维度态密度函数的表达式和维度区间转换的定量判据（临界线度），从而将晶体电子态系维度理论从整数维度领域拓展到了分数维度领域，为深入进行异质结构物理学乃至固体物理学诸多基本问题的研究提供了新的理论基础。该理论具有原创性，并在国际上有关“0.5 维纳米材料”的实验报道中得到了印证。上述能级弥散概念及相关探索还对更为基础的物理学理论形成了挑战。

发表 SCI 论文 30 余篇，其中影响因子 IF 大于 10 的有 3 篇。10 篇代表性论文共被 SCI 他引 74 次，其中被 Nat. Commun. (IF:11.329)、Mater. Today (IF:17.793)、Nano Lett. (IF:13.779)、ACS Nano (IF:13.334)、Nano Today (IF:13.157)、Adv. Funct. Mater. (IF:11.382) 等 IF 大于 10 的期刊论文他引 18 次，被 Mater. Today、Nano Today 等著名期刊的权威性综述论文他引 14 次，同时还被俄国、美国、韩国、新加坡等国科学家发表的 5 部学术专著他引。另有 16 篇论文被 Nano Lett. 等 SCI 期刊论文他引 53 次。应邀作国际会议特邀报告 5

次。诺贝尔奖获得者阿尔费罗夫因其对本项目的指导，荣获 2014 年度中华人民共和国国际科技合作奖。

五. 主要完成人情况表:

姓名: 任晓敏

排名: 第一

技术职称: 教授

工作单位: 北京邮电大学

完成单位: 北京邮电大学

对本项目技术创造性贡献: 本项目负责人, 973 项目首席科学家, 确立了纳异质结构和异质兼容两个相互融合的主攻研究方向并倡导开展异维结构的研究, 是能级弥散和分数维度晶体电子态系理论的提出者, 在关键科学问题的凝炼与解决、理论推导、研究思路及实验方案的提出与论证、实验结果的研判与分析等方面作出了创造性贡献; 是发现点 1、2 和 3 的指导者和主要完成人; 是发现点 4 的唯一提出者和完成人; 是代表性论文 1、2、3、4、5、6 的联合通讯作者以及代表性论文 7、8、9 的共同作者, 是代表性论文 10 的唯一作者。

曾获科技奖励情况: 无

姓名: 张霞

排名：第二

技术职称：教授

工作单位：北京邮电大学

完成单位：北京邮电大学

对本项目技术创造性贡献：本项目总体推进（包括组织实施）的主要协助者之一，973 项目团队成员，重点负责半导体纳米线及相关异维复合结构与相关器件方面的理论与实验研究工作，在相关研究思路及实验方案的提出与论证、实验结果的研判与分析等方面作出了创造性贡献；是发现点 2、3 的指导者和主要完成人，是发现点 1 中部分工作的合作完成人；是代表性论文 3、4、5、8 的联合通讯作者和代表性论文 9 的通讯作者，是代表性论文 2、6、7 的共同作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：颜鑫

排名：第三

技术职称：讲师

工作单位：北京邮电大学

完成单位：北京邮电大学

对本项目技术创造性贡献：本项目骨干，973 项目团队成员，是发现点 2、3 的主要完成人，作出了创造性贡献，研究成效显著；是代表性论文 3、4、5 的第一作者，代表性论文 9 的第二作者，以及代表性论文 6、7 的共同作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：黄辉

排名：第四

技术职称：教授

工作单位：大连理工大学

完成单位：北京邮电大学

对本项目技术创造性贡献：本项目总体推进的主要协助者之一，973 项目团队成员，重点负责纳米线纯相生长方面的理论与实验研究工作，在相关研究思路及实验方案的提出与论证、实验结果的研判与分析等方面作出了创造性贡献；是发现点 1 中以实验为主的相关研究工作的指导者和主要完成人，是发现点 2 初期实验工作的指导者；是代表性论文 1、2 的第一作者和联合通讯作者，是代表性论文 3 的共同作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：贺号

排名：第五

技术职称：副教授，特聘研究员

工作单位：上海交通大学

完成单位：天津大学

对本项目技术创造性贡献：本项目骨干，973 项目团队成员，是发现点 3 中有关 GaAs 纳米线中宽带倍频与和频等非线性效应实验及理论研究工作的主要完成人或合作完成人，作出了创造性贡献；是代表性论文 6 的第一作者和联合通讯作者以及代表性论文 7 的通讯作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：刘艳格

排名：第六

技术职称：教授

工作单位：南开大学

完成单位：南开大学

对本项目技术创造性贡献：本项目骨干，973 项目团队成员，是参与本项目的南开大学团队的负责人，是发现点 3 中单根 GaAs/AlGaAs 纳米线室温单模激射实验研究工作的主要完成人和指导者，作出了创造性贡献；是代表性论文 8 的联合通讯作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：胡明列

排名：第七

技术职称：教授

工作单位：天津大学

完成单位：天津大学

对本项目技术创造性贡献：本项目骨干，973 项目团队成员，是参与本项目的天津大学团队的具体负责人，是发现点 3 中有关 GaAs 纳米线中宽带倍频与和频等非线性效应实验及理论研究工作的合作完成人和指导者；是代表性论文 6、7 的共同作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：魏巍

排名：第八

技术职称：预研工程师

工作单位：华为技术有限公司

完成单位：北京邮电大学

对本项目技术创造性贡献：本项目骨干，973 项目团队成员，是发现点 3 中单根 GaAs/AlGaAs 纳米线室温单模激射实验研究工作的主要完成人，作出了创造性贡献；是代表性论文 8 的第一作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：王思佳

排名：第九

技术职称：高级前端开发工程师

工作单位：阿里巴巴集团淘宝（中国）软件有限公司

完成单位：北京邮电大学

对本项目技术创造性贡献：本项目骨干，973 项目团队成员，是发现点 3 中新型纳米线阵列太阳能电池结构方面理论工作的主要完成人，作出了创造性贡献；是代表性论文 9 的第一作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：王清月

排名：第十

技术职称：教授

工作单位：天津大学

完成单位：天津大学

对本项目技术创造性贡献： 973 项目团队成员，是参与本项目的天津大学团队的总体指导者，是发现点 3 中有关 GaAs 纳米线中宽带倍频与和频等非线性效应实验及理论研究工作的合作完成人，作出了重要贡献；是代表性论文 6、7 的共同作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：王琦

排名：第十一

技术职称：教授

工作单位：北京邮电大学

完成单位：北京邮电大学

对本项目技术创造性贡献：本项目总体推进（包括国际合作和实验室建设）的主要协助者之一，973 项目团队成员，就发现点 4 与任晓敏教授进行过有益的讨论，是发现点 1 和 2 中相关实验研究工作的合作完成人，作出了重要贡献；是代表性论文 1、2、3、4、5 的共同作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：黄永清

排名：第十二

技术职称：教授

工作单位：北京邮电大学

完成单位：北京邮电大学

对本项目技术创造性贡献：项目总体推进（包括组织实施和实验室建设）的主要协助者之一，973 项目团队成员，是发现点 1 和 2 中相关实验及理论研究工作的合作完成人，作出了重要贡献；是代表性论文 1、2、3、4、5 的共同作者。

曾获科技奖励情况： 无

姓名：蔡世伟

排名：第十三

技术职称：初级实验师

工作单位：北京邮电大学

完成单位：北京邮电大学

对本项目技术创造性贡献：本项目实验技术人员，973 项目团队成员，部分参与了相关实验研究工作，主要在设备安全有效运行和相关技术支持方面作出了重要贡献，是代表性论文 1、2、3、4 的共同作者。

曾获科技奖励情况： 无

六. 代表性论文专著目录:

序号	论文、专著 名称/刊名/作者	影响因子	年卷页码 年(卷):页码	发表年月
1	Growth of Stacking-Faults-Free Zinc Blende GaAs Nanowires on Si Substrate by Using AlGaAs/GaAs Buffer Layers/Nano Letters/Hui Huang, Xiaomin Ren, Xian Ye, JingweiGuo, Qi Wang, Yisu Yang, ShiweiCai, and Yongqing Huang	12.186 (当前: 13.779)	2010(10):64-68	2010.01
2	Control of the crystal structure of InAs nanowires by tuning contributions of adatom diffusion/Nanotechnology/Hui Huang, Xiaomin Ren, Xian Ye, JingweiGuo, Qi Wang, Xia Zhang, ShiweiCai, and Yongqing Huang	3.644 (当前: 3.573)	2010(21): 475602	2010.10
3	Growth of InAs Quantum Dots on GaAs Nanowires by Metal Organic Chemical Vapor Deposition/Nano Letters/Xin Yan, Xia Zhang, Xiaomin Ren, Hui Huang, JingweiGuo, Xin Guo, Minjia Liu, Qi Wang, ShiweiCai, and Yongqing Huang	13.198 (当前: 13.779)	2011(11):3941-3945	2011.09
4	Formation Mechanism and Optical Properties of InAs Quantum Dots on the Surface of GaAs Nanowires/Nano Letters/Xin Yan, Xia Zhang, Xiaomin Ren, XiaolongLv, Junshuai Li, Qi Wang, ShiweiCai, and Yongqing Huang	13.025 (当前: 13.779)	2012(12):1851-1856	2012.04
5	Growth and photoluminescence of In _x Ga _{1-x} As quantum dots on the surface of GaAs nanowires by metal organic chemical vapor deposition/ Applied Physics Letters/ Xin Yan, Xia Zhang, Xiaomin Ren, Junshuai Li, XiaolongLv, Qi Wang, and Yongqing Huang	3.794 (当前: 3.142)	2012(101):023106	2012.07
6	Broadband second harmonic generation in GaAs nanowires by femtosecond laser sources/ Applied Physics Letters/ Hao He, Xiaoqing Zhang, Xin Yan, Lili Huang, ChenglinGu, Minglie Hu, Xia Zhang, Xiaomin Ren, and Chingyue Wang	3.515 (当前: 3.142)	2013(103):143110	2013.10
7	Sum frequency generation in pure zinc-blende GaAs nanowires/ Optics Express/ Xiaoqing Zhang, Hao He, Jintao Fan, ChenglinGu, Xin Yan, Minglie Hu, Xia Zhang, Xiaomin Ren, and Chingyue Wang	3.525 (当前: 3.148)	2013(21):28432-28437	2013.11
8	Evanescence-wave pumped room-temperature single-mode GaAs/AlGaAs core-shell nanowire lasers/Applied Physics Letters/Wei Wei, Yange Liu, Xia Zhang, Zhi Wang, and Xiaomin Ren	3.302 (当前: 3.142)	2014(104):223103	2014.06

9	Axially connected nanowire core-shell p-n junctions: a composite structure for high-efficiency solar cells/ Nanoscale Research Letters/ Sijia Wang, Xin Yan, Xia Zhang, Junshuai Li and Xiaomin Ren	2.584	2015(10):22	2015.01
10	Novel Understanding of Electron States Architecture and its Dimensionality in Semiconductors/Optics and Photonics Journal/Xiaomin Ren	0.66 (Google Scholar)	2013(3):322-330 (国际会议 SOPO 2013 大会特邀报告, 会后自动收入该杂志)	2013.06