

2020 年国家自然科学奖提名公示

一、项目名称

中文名称：新型半导体系统的运输、光电特性及量子信息应用

英文名称：Transport, photoelectric characteristics and quantum information application of new semiconductor systems

二、提名单位

中国物理学会

三、提名意见

项目组长期活跃在半导体系统的运输、光电特性及量子信息应用研究前沿，主要研究成果为：(1) 获得自旋-轨道耦合及自旋矩产生的半导体材料载流子的运输特性，发现硅烯中钷掺杂导致的稳定的量子反常霍尔效应和其他过渡金属掺杂产生的量子谷霍尔效应；首次发现类似相对论性电子 Zitterbewegung 的空穴快速振荡现象。(2) 发现半导体载流子运输及光电特性，提出低维半导体光子吸收和载流子传输过程的新物理模型，实验上通过氮化镓基底发光二极管的温度依赖的光致发光特性，发现势垒中漂移出的载流子在内建场的驱动力下对光致发光有贡献，成功制备一种在 535-570 nm 波长范围内拥有优势波长和黄绿两色特性的 LED 器件，该新结构在更强局域效应下可加倍提高光输出效率。(3) 研究半导体系统的量子信息应用，发展各向异性双比特海森堡模型在环境相互作用下的动态纠缠操控方案，可应用于量子点、电子自旋等半导体器件量子比特的纠缠演化；证明从半经典态通过局域保迹信道产生量子关联的充要条件，利用半导体器件生成量子关联、操控量子纠缠。

该项目发表 SCI 论文 115 篇(含 Phys. Rev. Lett. 10 篇)，其中 8 篇代表性论文他引 845 次，2 篇入选 ESI 高被引论文，1 篇入选 2013 年中国百篇最具影响国际学术论文。主要完成人 2005 年获得国家杰出青年基金支持，是 973 计划、国家重点研发计划首席科学家。项目部分成果曾获 2016 年北京市科学技术一等奖。

鉴于此，中国物理学会郑重提名该项目为国家自然科学奖二等奖。

四、项目简介

1991 年以来，科学家相继成功制备了碳纳米管、石墨烯和硅烯等新型材料，并发现自旋霍尔效应、量子反常霍尔效应和马约拉纳零能模等，这些材料的运输性质、光电特性等为突破半导体芯片性能瓶颈开辟了新途径。在此基础上研制新颖半导体量子器件，并利用这些器件的相干特性实现下一代快速信息处理和高速传输。如何发现并呈现这些材料的新奇运输、光电特性，并基于这些新奇特性构筑高性能的器件，一直是困扰本领域研究者的难题之一，也是实现新型半导体材料与器件应用所急需解决的关键问题。围绕这些材料的设计与加工、新奇物理特性的发现及高性能器件的构筑方法，本项目系统研究了几种新型半导体材料的新

奇物理特性和相关纳米器件的构筑，获得了如下科学发现：

(1) 获得了自旋-轨道耦合及自旋矩产生的半导体材料载流子的输运特性，发现硅烯中钷掺杂导致的稳定的量子反常霍尔效应和其他过渡金属掺杂产生的量子谷霍尔效应，并获得三角 Kagome 晶格中强相互作用导致的无能隙近藤金属相；首次发现类似相对论性电子“Zitterbewegung”的空穴快速振荡现象；发展可积模型方法获得具有自旋矩的朗道-栗弗席兹方程精确解，获得了单轴铁磁纳米线中自旋流的孤子解。相关代表性论文被美国德克萨斯大学奥斯汀分校牛谦教授和印度加尔各答大学 D. Jana 教授分别在他们的 *Rep. Prog. Phys.* 综述中正面引用，特别提到钷掺杂的硅烯具有强磁矩，并表现出半金属性质，更重要的是具有大的拓扑非平庸能隙，高度肯定了该项工作。

(2) 发现了半导体载流子输运及光电特性，提出了解释低维半导体光子吸收和载流子传输过程的新物理模型，在实验上通过氮化镓基底发光二极管的温度依赖的光致发光特性，确定了共振激发和非共振激发的适用范围，发现了势垒中漂移出的载流子在内建场的驱动力下对光致发光有贡献，揭示了非共振激发比共振激发更适合研究载流子输运的动力学和评估内部量子效率，并成功制备了一种在 535-570 nm 波长范围（绿色缺口）内拥有优势波长和黄绿两色特性的 LED 器件，该新结构在更强局域效应下可加倍提高光输出效率。该研究对于未来制造新型的 HBT, IGBT 以及其他新型电子器件提供了可能，对其他具有极化特性的半导体材料系（如 ZnO 基材料）实现整流特性也具有重要参考意义。特殊性能 LED 器件的制备使得 InGaN 材料具有更长波长的光致发光特性，导致半导体发光二极管具有更丰富多彩和高效率的照明特性，从而在填补“绿色缺口”研究方面取得重大进展。相关代表性论文被纽约州立大学 Paras N. Prasad 教授在 *Phys. Rep.* 综述中正面引用。

(3) 研究了半导体系统的量子信息应用，发展了各向异性双比特海森堡模型在有环境相互作用下的动态纠缠操控方案，可应用于量子点、电子自旋等半导体器件量子比特的纠缠演化。对于更一般的量子资源理论，证明了从半经典态通过局域保迹信道产生量子关联的充分必要条件，为利用半导体器件生成量子关联，操控量子纠缠提供了理论基础。相关代表性论文被英国皇家学会沃尔夫森研究奖获得者、牛津大学 Vlatko Vedral 教授、美国伊利诺伊大学香槟分校 Eric Chitambar 教授分别在 *Rev. Mod. Phys.* 综述中正面引用。

该项目共发表 SCI 论文 115 篇(含 *Phys. Rev. Lett.* 10 篇)，其中 8 篇代表性论文 *Web of Science* 他引 845 次，2 篇入选 ESI 高被引论文，1 篇入选 2009 年中国百篇最具影响国际学术论文。被著名国际综述期刊 *Rev. Mod. Phys.*、*Phys. Rep.* 等发表专题评价，应邀撰写英文专著 2 部，中文专著 1 部，在重要国际学术会议做大会报告 50 多次。该成果在新型半导体系统输运、光电特性和量子信息应用领域做出具有国际影响力的开创性工作，对该领域的发展起到了重要的推动作用。项目主要完成人于 2005 年获得了国家杰出青年基金支持，也是国家重点基础研究发展计划（亦称 973 计划）首席科学家、国家重点研发计划“量子调控与量子信息”重点专项首席科学家。该项目部分成果曾获得 2016 年北京市科学技术奖一等奖。

五、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 (xx年 xx卷 xx页)	发表时间 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	国内作者	SCI 他引次数	他引总次数	论文署名单位是否包含国外单位
1	Quantum anomalous Hall effect and tunable topological states in 3d transition metals doped silicene/ Scientific Reports/张小龙, 刘兰峰, 刘伍明	4.011	2013年 3卷 2908-1 -2908-8 页	2013年 10月9日	刘伍明	张小龙	张小龙, 刘兰峰, 刘伍明	110	126	否
2	Kondo Metal and Ferrimagnetic Insulator on the Triangular Kagome Lattice/ Phys. Rev. Lett./陈耀桦, 陶红帅, 姚道新, 刘伍明	9.227	2012年 108卷 246402-1 -246402-5 页	2012年 6月13日	刘伍明	陈耀桦	陈耀桦, 陶红帅, 姚道新, 刘伍明	60	71	否
3	Semiclassical time evolution of the holes from Luttinger Hamiltonian / Z. F. Jiang, R. D. Li, S. C. Zhang, W. M. Liu	3.736	2005年 72卷 045201-1 -045201-5 页	2005年7月1日	刘伍明	蒋占峰、	蒋占峰、 李瑞东、 刘伍明	85	97	否
4	Soliton solution for the spin current in ferromagnetic nanowire/ Phys. Rev. E/李再东, 李秋艳, 李禄, 刘伍明	2.353	2007年 76卷 026605-1 -026605-7 页	2007年8月21日	刘伍明	李再东	李再东, 李秋艳, 李禄, 刘伍明	101	110	否
5	Temperature-dependent photoluminescence in light-emitting diodes/	3.736	2014年 4卷	2010年 12	陈弘	卢太平	卢太平, 马紫光,	88	99	否

	T.P. Lu, Z.G. Ma, C.H. Du, Y.T. Fang, H.Y. Wu, Y. Jiang, L. Wang, L.G. Dai, H.Q. Jia, W.M. Liu, H. Chen, / Scientific Reports 4, 6131 (2014)		6131- -245102-5 页	月 2 日			江洋, 李阳 峰, 邓 震, 刘 伍明			
6	Realization of high-luminousefficiency InGaN light-emitting diodes in the “green gap” range/ Yang Jiang*, Yangfeng Li*, Yueqiao Li, Zhen Deng, Taiping Lu, Ziguang Ma, Peng Zuo, Longgui Dai, Lu Wang, Haiqiang Jia, Wenxin Wang, Junming Zhou, Wuming Liu & Hong Chen/ Scientific Reports 4, 6131 (2014)	3.736	2010 年 82 卷 245102-1 -245102-5 页	2010 年 12 月 2 日	陈弘	江洋	卢 太 平, 江 洋, 李 阳峰, 邓震, 马 紫 光, 刘 伍明	78	89	否
7	Entanglement control in an anisotropic two-qubit Heisenberg XYZ model with external magnetic fields / Phys. Rev. A / Abliz Ahmad, 高鸿钧, 谢心澄, 吴咏时, 刘伍明	2.907	2006 年 74 卷 052105-1 -052105-5 页	2006 年 11 月 8 日	刘伍 明	Abliz Ahmad	高鸿 钧, 谢心 澄, 吴咏 时, 刘伍 明	101	111	否
8	Necessary and sufficient conditions for local creation of quantum correlation / Phys. Rev. A / 胡雪元, 范桁, 周端陆, 刘伍明	2.907	2012 年 85 卷 032102-1 -032102-4 页	2012 年 3 月 5 日	刘伍 明	胡雪 元	胡 雪 元 , 范 桁 , 端 陆 , 刘 伍 明	90	108	否
合计								703	811	

六、主要完成人：

刘伍明，中国科学院物理研究所研究员，对发现点 1、2、3 均有贡献，完成单位：中国科学院物理研究所

陈弘，中国科学院物理研究所研究员，对发现点 2 有贡献，完成单位：中国科学院物理研究所

李再东，天津理工大学物理系教授，对发现点 1 有贡献，完成单位：中国科学院物理研究所

陈耀桦，北京应用物理与计算数学研究所副研究员，对发现点 1 有贡献，完成单位：中国科学院物理研究所

胡雪元，山东大学信息学院副教授，对发现点 3 有贡献，完成单位：中国科学院物理研究所