**提名国家自然科学奖项目公示**

|  |  |
| --- | --- |
| 项目名称 | 微纳结构化有机电致发光器件物理 |
| 提名单位 | 吉林省 |
| 提名单位意见：我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目均符合国家科学技术奖励工作办公室的填写要求。该项目围绕OLED，尤其是OLED微显示应用面临的效率和稳定性等问题，通过表面界面工程提高白光OLED内量子效率，基于激基复合物发光白光OLED成为OLED的经典工作；提出微纳结构光-电双功能电极和100%填充因子微透镜阵列等创新方案，减少表面等离子激元等模式损耗，解决顶发射OLED效率和稳定性不能兼顾的难题；面向高分辨微显示，提出利用多发光中心碳量子点，实现注入电流调控的颜色可调电致发光单元，使得单一像素彩色显示器件成为可能，有望显著提高显示分辨率。相关工作引领了该领域的前沿研究。在国内较早开展了硅基OLED微显示的工作，2008年实现我国第一个QVGA有机微显示原型样机，继而研制出具有自主知识产权的SVGA单色有机微显示原型样机，填补了我国在OLED微显示领域的空白。在IEEE和影响因子3.0以上期刊发表论文260篇，其中8篇代表性论文被SCI他引702次，在重要国际会议做Plenary、Keynote和Invited报告77次。迄今共培养杰青4人、优青2人、青千2人、全国百篇优博1人、学会优博5人，第一完成人于2017同年入选IEEE、OSA和SPIE Fellow。入选中国光学重要成果奖2项，获中国光学学会最高奖-王大珩光学奖1项，获得吉林省自然科学一等奖2项，教育部自然科学一等奖1项。提名该项目为国家自然科学奖二等奖。 |
| 项目简介：该项目属于信息学科，半导体器件与技术/波导光学与集成光学技术领域。有机电致发光器件（OLED）由于自身轻薄柔性等特点，面向便携式和可穿戴电子产品具有独特优势。尤其随着增强现实/虚拟现实技术（AR/VR）市场持续扩大，OLED硅基微显示已经成为微显示技术的重要发展趋势。OLED面向硅基微显示的更低功耗和更高分辨率需求，与硅基驱动电路兼容的顶发射OLED结构，以及实现彩色微显示的白光OLED，均需满足低电压下的高亮度和高效率。该项目围绕OLED，尤其是OLED微显示应用面临的效率和稳定性等问题，从器件物理、器件结构设计和器件工艺制备的角度展开基础研究，具体通过表面界面工程提高白光OLED内量子效率；应用微纳结构实现器件内部电磁场调控提高外量子效率；进而应用新型纳米材料，实现单一像素彩色显示。主要科学发现包括：（1）在提高白光OLED内量子效率方面，提出激基复合物发光、磷光染料敏化和多异质结结构等有机功能层界面调控方案。其中激基复合物方案采用简单双层非掺杂结构，成为基于激基复合物发光白光OLED的经典工作，被高效率磷光OLED发明人Stephen R. Forrest教授认为是荧光激基复合物白光OLED的最好结果“the best fluorescent exciplex results”。（2）在提升器件外量子效率方面，提出微纳结构光-电双功能电极和100%填充因子微透镜阵列等创新方案，减少表面等离子激元等模式损耗。光电双功能电极实现了厚金属透明，解决顶发射OLED效率和稳定性不能兼顾的难题。高效率PiN结构OLED发明人Karl Leo教授认为光电双功能电极方案可将器件效率提高两倍以上“up to a factor of 2.0”。（3）面向高分辨微显示，提出利用多发光中心碳量子点，实现注入电流调控的颜色可调电致发光单元，使得单一像素彩色显示器件成为可能，有望显著提高显示分辨率，德国国家科学院院士Feldmann教授认为该成果为碳量子点材料特性与器件应用提供了新的见解“provide new insights”。 项目完成人之一刘式墉教授自上世纪九十年代初期率先在国内开展OLED研究，经过三代师生近三十年的努力，为我国OLED的科研、产业发展和人才培养做出了重要贡献。该项目在国内较早开展了硅基OLED微显示的工作，2008年实现我国第一个QVGA有机微显示原型样机，继而研制出具有自主知识产权的SVGA单色有机微显示原型样机，填补了我国在OLED微显示领域的空白。在IEEE和影响因子3.0以上期刊发表论文260篇，其中8篇代表性论文被SCI他引702次，在重要国际会议做Plenary、Keynote和Invited报告77次。迄今共培养杰青4人、优青2人、青千2人、全国百篇优博1人、学会优博5人，第一完成人于2017同年入选IEEE、OSA和SPIE Fellow。入选中国光学重要成果奖2项，获中国光学学会最高奖-王大珩光学奖1项，获得吉林省自然科学一等奖2项，教育部自然科学一等奖1项。 |
| 客观评价：8篇代表性论文被SCI他引702次；8篇代表性论文被影响因子10以上杂志引用78次；被国际排名通常在前100名高水平大学和美国橡树岭国家实验室等顶尖研究机构引用119次。完成人作为发明人获国家发明专利29项，实用新型专利4项；在重要国际会议做Plenary、Keynote和Invited报告77次。**发现点1：表面界面工程提高白光OLED内量子效率方面**这部分工作主要包括提出激基复合物发光、多异质结结构和磷光染料敏化等有机功能层界面调控方案，实现高性能白光OLED，这些工作成为白光OLED发展过程中的代表性工作。《Laser Focus World》杂志以“White LED demonstrates promising optical and electrical performance”为题作为Newsbreak对激基复合物白光OLED进行了专文报道(Laser Focus World, September, 2001)（**代表性论文1**）。高效率磷光OLED发明人，美国科学院院士Stephen R. Forrest教授在其发表的白光OLED综述论文（Adv. Mater. 16, 1585 (2004)）引用了该项目组发表的6篇白光OLED论文，包括发现点1的全部三篇代表性论文，认为我们的工作是实现利用荧光激基复合物发光的最好结果“Some of the best fluorescent exciplex results”（**代表性论文1**），同时在文章中指出我们多异质结结构实现白光OLED的方案能够实现颜色平衡和高效率“the desired color balance and efficiency”（**代表性论文2**）。Stephen R. Forrest教授接受了我们荧光激基复合物实现白光OLED的观点，认为利用激基复合物发光是简化白光OLED器件结构的一种特别有前途的方法“one particularly promising approach”，并基于相同原理发展了基于磷光激基缔合物的白光器件（Adv. Mater. 14, 1032 (2002)）（**代表性论文1**）。韩国科学技术研究院院士Soo Young Park教授指出，利用激基复合物发光是阻断分子施主与受主之间能量转移的创新性概念“innovative concepts”（Adv. Funct. Mater. 21, 644 (2011)）（**代表性论文1**）。磷光染料敏化即磷光材料作为荧光主客体材料的能量转移中间媒质实现白光OLED方案，高效率PiN-OLED的发明人Karl Leo教授指出可解决磷光OLED稳定性差和荧光OLED内量子效率25%局限这一矛盾“may resolve this conflict”（Appl. Phys. Lett. 89, 083509 (2006)）（**代表性论文3**），并在其发表于（Rev. Mod. Phys. 85, 1245 (2013)）的白光OLED综述论文中，引用了我们发表的8篇白光OLED论文，包括发现点1的全部三篇代表性论文。以上充分表明了该项目组在白光OLED方面的工作具有重要的国际学术地位。**发现点二：提出微纳结构电极等创新方案提升器件外量子效率方面**项目组提出飞秒激光直写实现100%填充因子微透镜阵列，可以最大限度减小OLED衬底/空气界面全反射。美国田纳西大学Anming Hu教授指出采用的飞秒激光多光子聚合技术是一种有效的制备具有复杂三维结构微透镜阵列的方法“effective way”（Small 11, 3007 (2015)）（**代表性论文4**）。该项目组研究微纳结构电极提高光取出的工作机理，澄清表面等离子效应增强发光强度与金属微纳结构参数的定量联系，为微纳结构设计提供了直接指导（**代表性论文5**）。澳大利亚科学院、澳大利亚技术科学与工程院院士Tanya M. Monro教授将我们的金属光栅耦合增强荧光的工作列为与棱镜耦合方法并列的有效提取SPP的典型方法之一（Opt. Mater. Express 6, 2128 (2016)）。英国利兹大学Oscar Cespedes教授认为表面等离子模式有效提高了器件量子效率“give rise to a non-resonant enhancement of the quantum yield”（Nat. Commun. 8, 926 (2017)）。该项目组基于微纳结构制备技术和表面等离子发光增强机理方面的研究基础，提出微纳结构光电双功能电极提高OLED光取出（**代表性论文6**）。Karl Leo教授在关于微结构TOLED的论文中，引用项目组三篇相关工作，认为OLED应用微纳结构使底发射OLED的效率提高了2倍以上，同时在顶发射OLED中发挥了重要的作用“enhanced by up to a factor of 2.0”；Karl Leo教授在低折射率薄膜提高TOLED光取出研究论文中，指出如进一步采用我们的布拉格光栅结构，能够获得更高的光取出效果“should be more efficient”（Phys. Rev. B 92, 245306 (2015)）。英国沃里克大学的Ross A Hatton教授认同我们的微纳结构金属电极方案的可行性“a viable class of transparent electrode”（Adv. Mater. 25, 284 (2013)）。**发现点三：应用新型纳米材料，实现单一像素彩色显示方面**澄清新型荧光碳纳米材料发光机理，对碳基纳米发光器件发展具有至关重要的意义。该项目组率先澄清了荧光石墨烯量子点中类分子态发光占主导的发光机制，这作为碳基纳米材料中荧光起源的解释之一（**代表性论文7**），已被国内外研究者广泛接受。康涅狄格大学Luyi Sun教授认为这是对现有发光机制的重要补充“an important supplement”（J. Mater. Chem. C 3, 1157 (2015)）。Radek Zboril教授认为该成果澄清了碳点的三个发光态“Wang et al. identified three emission states”（Chem. Mater. 28, 4085 (2016)）。该项目组提出利用多发光中心碳量子点，实现注入电流调控的颜色可调电致发光单元，使得单一像素彩色显示器件成为可能（**代表性论文8**）。德国国家科学院院士Feldmann教授认为该成果为碳量子点材料特性与器件应用提供了新的见解“provide new insights”（Nano Lett. 15, 6030 (2015)）。Nano Lett.副主编Milliron教授和J Am. Chem. Soc.副主编Hyeon教授认为该成果照亮了碳量子点材料实现色度可控光致和电致发光的前景“highlight the promise of CD-based composites with controlled chromaticity photo- and electroluminescence”（ACS Nano 9, 1012 (2015)）。香港科技大学Shihe Yang教授在碳量子点的综述论文中同时正面评价了发现点三的两篇代表性论文，指出碳量子点LED对发展多色LED非常有用“useful for the development of colorful LEDs”（Nano Today 11, 565 (2016)）。 |
| 代表性论文专著目录： 1. White light emission from exciplex using tris-(8-hydroxyquinoline)aluminum as chromaticity-tuning layer/Appl. Phys. Lett./Jing Feng, Feng Li, Wenbao Gao, Shiyong Liu, Yu Liu, Yue Wang；发表时间：2001-06-18；通讯作者：Shiyong Liu, Yue Wang；影响因子：3.495；SCI他引：115；是否国内完成：是。
2. White light emission induced by confinement in organic multiheterostructures/Appl. Phys. Lett./Z. Y. Xie, J. S. Huang, C. N. Li, S. Y. Liu, Y. Wang, Y. Q. Li, J. C. Shen; 发表时间：1999-02-01；通讯作者：Z. Y. Xie；影响因子：3.495；SCI他引：94；是否国内完成：是。
3. White organic light-emitting devices using a phosphorescent sensitizer/Appl. Phys. Lett./Gang Cheng, Feng Li, Yu Duan, Jing Feng, Shiyong Liu, Song Qiu, Dong Lin, Yuguang Ma, S. T. Lee；发表时间：2003-06-16；通讯作者：Gang Cheng, Yuguang Ma；影响因子：3.495；SCI他引：96；是否国内完成：是。
4. High numerical aperture microlens arrays of close packing/APPLIED PHYSICS LETTERS/Dong Wu, Si-Zhu Wu, Li-Gang Niu, Qi-Dai Chen, Rui Wang, Jun-Feng Song, Hong-Hua Fang, Hong-Bo Sun；发表时间：2010-07-19；通讯作者：Qi-Dai Chen, Hong-Bo Sun；影响因子：3.495；SCI他引：53；是否国内完成：是。
5. Surface Plasmon Enhanced Fluorescence of Dye Molecules on Metal Grating Films/J. Phys. Chem. C/Ying Jiang, Hai-Yu Wang, Hai Wang, Bing-Rong Gao, Ya-wei Hao, Yu Jin, Qi-Dai Chen, Hong-Bo Sun；发表时间：2011-06-30；通讯作者：Hai-Yu Wang, Hong-Bo Sun；影响因子：4.484；SCI他引：43；是否国内完成：是。
6. Solving Effciency-Stability Tradeoff in Top-Emitting Organic Light-Emitting Devices by Employing Periodically Corrugated Metallic Cathode/Adv. Mater./Yu Jin, Jing Feng, Xu-Lin Zhang, Yan-Gang Bi, Yu Bai, Lu Chen, Tian Lan, Yue-Feng Liu, Qi-Dai Chen, Hong-Bo Sun；发表时间：2012-03-02；通讯作者：Jing Feng, Hong-Bo Sun；影响因子：21.950；SCI他引：45；是否国内完成：是。
7. Unraveling Bright Molecule-Like State and Dark Intrinsic State in Green-Fluorescence Graphene Quantum Dots via Ultrafast Spectroscopy/Adv. Optical Mater./Lei Wang, Shou-Jun Zhu, Hai-Yu Wang, Ya-Feng Wang, Ya-Wei Hao, Jun-Hu Zhang, Qi-Dai Chen, Yong-Lai Zhang, Wei Han, Bai Yang, Hong-Bo Sun；发表时间：2013-03-01，通讯作者：Hai-Yu Wang, Bai Yang, Hong-Bo Sun；影响因子：7.430；SCI他引：57；是否国内完成：是。
8. Color-Switchable Electroluminescence of Carbon Dot Light-Emitting Diodes/ACS NANO/Xiaoyu Zhang, Yu Zhang, Yu Wang, Sergii Kalytchuk, Stephen V. Kershaw, Yinghui Wang, Peng Wang, Tieqiang Zhang, Yi Zhao, Hanzhuang Zhang, Tian Cui, Yiding Wang, Jun Zhao, William W. Yu, Andrey L. Rogach；发表时间：2013-12-01日；通讯作者：Yu Zhang, William W. Yu, Andrey L. Rogach；影响因子：13.709；SCI他引：199；是否国内完成：是。
 |
| 主要完成人情况： 1. 孙洪波，排名1，教授，工作单位：清华大学，完成单位：吉林大学，项目负责人，该项目科学问题和总体学术思想的提出，主要研究路线的设计，以及项目的管理和协调。具体提出飞秒激光直写制备100%填充因子微透镜阵列和微纳结构光电双功能电极提高OLED外量子效率思想和核心技术，以及瞬态光谱研究材料与器件发光动力学。主要学术贡献为发现点2、3，代表性论文4、5、6、7的共同通讯作者。2. 冯晶，排名2，教授，工作单位：吉林大学，完成单位：吉林大学，项目组核心成员。1997至2003年作为研究生在项目团队工作，2006年作为人才引进回到吉林大学加入项目团队。一直从事有机光电器件研究，对本项目的贡献体现在提出了激基复合物实现非掺杂双层简单结构白光OLED和微纳结构实现器件内部电磁场调控，具体承担OLED器件设计、制备工艺和结构优化的工作。主要学术贡献为发现点1、2，代表性论文1的第一作者，代表性论文3的共同作者，代表性论文6的共同通讯作者。3. 张宇，排名3，教授，工作单位：吉林大学，完成单位：吉林大学，于2005年作为研究生加入项目组，成为项目组第三代成员。对项目的主要贡献为研究多种纳米发光材料的设计合成和器件应用，提出多发光中心碳量子点，实现注入电流调控的颜色可调电致发光单元，使得单一像素彩色显示器件成为可能。主要学术贡献为发现点3，代表性论文8的共同通讯作者。4. 赵毅，排名4，教授，工作单位：吉林大学，完成单位：吉林大学，于1998年作为研究生加入项目组至今。主要贡献为OLED微显示的研制，2008年实现我国第一个QVGA有机微显示原型样机，继而研制出具有自主知识产权的SVGA单色有机微显示原型样机，填补了我国在OLED微显示领域的空白。主要学术贡献为发现点3，代表性论文8的共同作者。5. 刘式墉，排名5，教授，工作单位：吉林大学，完成单位：吉林大学。自上世纪九十年代初期率先在国内开展OLED研究，组建了早期的项目团队。对项目的主要贡献体现在白光OLED和OLED微显示的研制，提出磷光染料敏化和多异质结结构等有机功能层界面调控方案，为白光OLED的发展做出了重要贡献。主要学术贡献为发现点1，代表性论文1的通讯作者，代表性论文2、3的共同作者。 |
| 完成人合作关系说明：该项目组的五位主要完成人系吉林大学集成光电子学国家重点实验室的核心成员。项目组最初由刘式墉教授建立于上世纪九十年代初，项目组成员孙洪波、冯晶和赵毅作为刘式墉教授指导的研究生先后于1992，1997和1998年加入该项目组，并分别于1996、2003和2001年获得博士学位。张宇作为项目组第三代成员，于2005年作为研究生加入。该项目组围绕有机电致发光器件（OLED）物理与集成开展工作。五位完成人中，孙洪波于2004年全职回国后成为该项目组的核心和组长，冯晶负责OLED的微纳结构化制备和白光OLED研究。刘式墉和赵毅负责顶发射OLED以及OLED微显示的研制，张宇负责量子点新材料器件的制备研究。他们根据各自学术背景协调分工、互相合作、组成导师团共同指导学生，共同完成科研任务，共同署名发表论文。如：（1）代表性论文1作者包括冯晶和刘式墉，代表性论文3作者包括冯晶和刘式墉，代表性论文6作者包括冯晶和孙洪波；代表性论文8作者包括张宇和赵毅。其中孙洪波是4篇代表性论文（代表性论文4,5,6,7）的通讯作者和主要完成人，冯晶是三篇代表性论文（代表性论文1,3和6）的通讯作者和主要完成人，张宇是一篇代表性论文（代表性论文8）的通讯作者，赵毅是一篇代表性论文（代表性论文8）的主要完成人，刘式墉是三篇代表性论文（代表性论文1,2和3）的主要完成人。（2）“新型电发光器件物理”荣获2002年吉林省科学技术奖一等奖，刘式墉和冯晶为获奖人。（3）该项目团队2008年获得教育部创新团队项目资助，孙洪波为团队负责人，冯晶为核心成员，刘式墉教授为团队顾问。（4）“微纳集成器件制备新材料新工艺研究”荣获2012年吉林省科学技术奖一等奖，孙洪波和冯晶为获奖人。（5）“激光微纳制造基础研究”荣获2014年教育部自然科学奖一等奖，孙洪波和冯晶为获奖人。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 合作方式 | 合作者 | 合作时间 | 合作成果 | 证明材料 | 备注 |
| 1 | 共同获奖 | 孙洪波冯晶 | 2018年11月07日 | 2018年吉林省科学技术奖一等奖：微纳结构化有机光电器件物理 | 其他证明 | 无 |
| 2 | 共同获奖 | 孙洪波冯晶 | 2015年02月 | 2014年教育部自然科学奖一等奖，名称：激光微纳制造基础研究 | 其他证明 | 无 |
| 3 | 共同获奖 | 孙洪波冯晶 | 2012年11月 | 2012年吉林省科学技术奖一等奖：微纳集成器件制备新材料新工艺研究 | 其他证明 | 无 |
| 4 | 共同立项 | 孙洪波冯晶 | 2008年-2010年 | 教育部创新团队，项目名称：超快激光技术与前沿光电器件物理 | 未列入附件 | 无 |
| 5 | 论文合著 | 冯晶刘式墉 | 2001年06月18日 | White light emission from exciplex using tris-(8-hydroxyquinoline)aluminum as chromaticity-tuning layer | 代表性论文1 | 无 |
| 6 | 论文合著 | 冯晶刘式墉 | 2003年6月16日 | White organic light-emitting devices using a phosphorescent sensitizer | 代表性论文3 | 无 |
| 7 | 论文合著 | 冯晶孙洪波 | 2012年03月02日 | Solving Efficiency–Stability Tradeoff in Top-Emitting Organic Light-Emitting Devices by Employing Periodically Corrugated Metallic Cathode | 代表性论文6 | 无 |
| 8 | 论文合著 | 张宇赵毅 | 2013年12月1日 | Color-Switchable Electroluminescence of Carbon Dot Light-Emitting Diodes | 代表性论文8 | 无 |
| 9 | 论文合著 | 冯晶赵毅刘式墉孙洪波 | 2009年6月1日 | Enhanced hole injection in organic light-emitting devices by using Fe3O4 as an anodic buffer layer | 其他证明 | 无 |

 |