**2020年国家自然科学奖拟提名项目公示表**

|  |  |
| --- | --- |
| 项目名称 | 宽禁带氧化物半导体的载流子调控及其光电子器件研究 |
| 提名意见 | 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。提名意见：氧化锌等宽禁带氧化物半导体是制备紫外光电子器件的理想材料，在高精度加工、生物医疗等领域有重要的应用前景。通过可控掺杂等手段实现的半导体载流子（电子和空穴）调控是获得高性能光电子器件的基础和核心。氧化锌等宽禁带氧化物半导体是天然n型（电子导电）材料，且自补偿效应强，所以在该项目开展之初，高效稳定的p型（空穴导电）掺杂在理论和技术上都遇到了巨大障碍，是制约其发展的世界性重大科学难题。项目组在国家863/973计划（首席）等项目的支持下，针对该问题进行了近20年的研究，提出了动态复合掺杂等载流子调控的新思想和新策略，解决了p型掺杂等重大科学问题，在宽禁带氧化物半导体紫外光电子器件方面取得了重大突破，为该领域的发展做出了开拓性贡献。被包括美国科学院院士、澳大利亚科学院院士等国际顶尖科学家在内的同行评论为“避免了本征施主的自补偿效应”、是“一种可靠的p型掺杂方式”和“为稳定可重复p型ZnO 制备提供了可行途径”等。8篇代表性论文发表在Phys. Rev. Lett., Adv. Mater., Chem. Rev.等国际著名期刊，被他引1026次（SCI-E数据库），2篇文章入选ESI高被引论文。相关工作获吉林省科学技术一等奖4项。提名者：中国科学院。提名该项目为国家自然科学奖 **二** 等奖。 |
| 项目简介 | 该项目属于信息领域**宽禁带氧化物半导体光电子材料与器件**方向。氧化锌等宽禁带氧化物半导体是制备**激子型高效**紫外发光二极管、**低阈值**紫外激光器和**高性能**紫外探测器**等紫外光电子**器件的理想材料，在高精度加工制造、生物医疗和国防等领域**有重要的应用前景。**通过**可控掺杂等手段**实现的半导体**载流子**（电子和空穴）**调控**是获得高性能光电子器件的**基础和核心**。但是，由于氧化锌是**天然n型**（电子导电）材料，且**自补偿效应极强**，即掺入的受主（产生空穴）很容易被伴随掺杂而新产生的施主（产生电子）所补偿，因此其**高效稳定的p型**（空穴导电）**掺杂**在理论和技术上都面临**巨大障碍**，成为制约宽禁带氧化物半导体光电子器件发展的**世界性重大科学难题**。项目组在国家**973计划（首席）等项目**的支持下，针对该问题进行了近二十年的研究，提出了动态复合掺杂等**载流子调控的新思想和新策略**，解决了高效稳定的p型掺杂等**重大科学问题**，发展了**半导体掺杂理论和技术**，实现了宽禁带氧化物半导体**紫外光电子器件的重大突破**。主要**科学发现**如下：**1.** 提出了**动态复合掺杂**学术思想，利用亚稳态双施主向稳态双受主的动态转化过程**避免了自补偿效应，**解决了宽禁带氧化物半导体的**p型掺杂难题**，发展出**第一个激子型**ZnO**电致发光**器件和**低阈值紫外激光，**有**超过半数**的ZnO同质pn结薄膜发光二极管的后续报道**引用和跟进**了该思想。美国科学院院士D. E. Aspnes、西班牙皇家工程院院士E. Muñoz等认为该发现**“避免**了本征施主的**自补偿**效应**”、“**为**稳定可重复p型**ZnO 制备提供了**可行途径”**和得到了**“唯一的”激子型**发光二极管等。**2.** 发现了**表面晶格无序化控制实现载流子高效自发分离**的新策略，利用表面无序晶格和内核有序晶格对电子和空穴的**空间分布限制**，解决了传统宽禁带氧化物半导体中**载流子复合**导致的**光电转换效率低**的难题，得到了美国、德国等**40余个**国家和地区的**300余个**研究单位的**引用和跟进**研究。顶级材料学家德国埃朗根-纽伦堡大学教授P. Schmuki等认为该发现**“**提供了一条**高效电荷分离**（的途径）**”，**是**“**高效光生电荷分离的**引领潮流的战略方法”**等。**3.** 发现了**异质微界面操控实现载流子可控输运**的新机制，结合界面势垒对载流子的限制作用和光对势垒的调控作用，解决了**响应度和暗电流难以协同优化**的半导体光电探测器传统难题，实现了氧化物半导体紫外探测器的响应度、暗电流和响应速度等**核心指标的高性能并举，**其日盲波段**响应度**（255nm附近）已达主流同类商品化器件的**100倍以上。**该发现被立陶宛科学院外籍院士Michael S. Shur、印度科学院院士Raychaudhuri等同行关注和跟踪，被认为**“**为高性能ZnO紫外探测器的实现**提供一条可行途径”，**并肯定了器件的**“超高的响应度”**等。该项目**8篇代表性论文**发表在Phys. Rev. Lett., Adv. Mater., Chem. Rev.等国际著名期刊，累计**影响因子110.619**，被Nature Photon., Nature Nanotech.等**SCI**期刊**他引1026次**，**2篇**文章入选**ESI高被引**论文（前1%）。相关工作成果分别于**2008年**（发现1）、**2012年**（发现3）、**2015年**（发现1）**和2019年**（发现2）获**吉林省科学技术一等奖4项**。 |
| 代表性论文专著目录 | 1. Lei Liu, Jilian Xu, Dandan Wang, Mingming Jiang, Shuangpeng Wang, Binghui Li, Zhenzhong Zhang, Dongxu Zhao, Chong-Xin Shan, Bin Yao, D. Z. Shen, p-Type conductivity in n-doped ZnO: the role of the N Zn− V O complex, ***Physical Review Letters***, 108(21), 2012, 215501(5).
2. Lei Liu, Peter Y. Yu, Xiaobo Chen, Samuel S. Mao, D. Z. Shen, Hydrogenation and disorder in engineered black TiO2, ***Physical review letters***, 111(6), 2013, 065505(5).
3. Hai Zhu, Chong-Xin Shan, Bin Yao, Bing-Hui Li, Ji-Ying Zhang, Zheng-Zhong Zhang, Dong-Xu Zhao, De-Zhen Shen, Xi-Wu Fan, You-Ming Lu, Zi-Kang Tang, Ultralow-Threshold Laser Realized in Zinc Oxide, ***Advanced Materials,*** 21(16), 2009, 1613-1617.
4. Lei Liu, Xiaobo Chen, Titanium Dioxide Nanomaterials: Self-Structural Modi ﬁ cations, ***Chemical reviews***, 114(19), 2014, 9890-9918.
5. S. J. Jiao, Z. Z. Zhang, Y. M. Lu, D. Z. Shen, B. Yao, J. Y. Zhang, B. H. Li, D. X. Zhao, X. W. Fan, Z. K. Tang, ZnO p-n junction light-emitting diodes fabricated on sapphire substrates, ***Applied Physics Letters***, 88(3), 2006, 031911(3).
6. Z. P. Wei, Y. M. Lu, D. Z. Shen, Z. Z. Zhang, B. Yao, B. H. Li, J. Y. Zhang, D. X. Zhao, X. W. Fan, Z. K. Tang, Room temperature p-n ZnO blue-violet light-emitting diodes, ***Applied Physics Letters***, 90(4), 2007, 042113(3).
7. M. M. Fan, K. W. Liu, Z. Z. Zhang, B. H. Li, X. Chen, D. X. Zhao, C. X. Shan, D. Z. Shen, High-performance solar-blind ultraviolet photodetector based on mixed-phase ZnMgO thin film, ***Applied Physics Letters***, 105(1), 2014, 011117(5).
8. K.W. Liu, J.G. Ma, J.Y. Zhang, Y.M. Lu, D.Y. Jiang, B.H. Li, D.X. Zhao, Z.Z. Zhang, B. Yao, D.Z. Shen, Ultraviolet photoconductive detector with high visible rejection and fast photoresponse based on ZnO thin ﬁlm, ***Solid-State Electronics***, 51(5), 2007, 757-761.
 |
| 主要完成人 | 1. **申德振，**排名1，国家重点实验室主任，研究员。**工作单位：**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。**项目完成单位：**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。**主要学术贡献：**对科学发现1、2、3做出了创造性的贡献。全面负责项目工作的实施和总体目标的实现，提出了动态复合掺杂、表面晶格无序化控制、异质微界面操控等载流子调控的新思想和新策略，实现了ZnO基激子型发光二极管等宽禁带氧化物半导体紫外光电子器件，是代表性论文1、7的通讯作者，代表性论文2、3、5、6、8的主要作者。**曾获国家科技奖励情况：**2015年，国家自然科学奖二等奖，项目名称：低维氧化锌材料的载流子调控与功能化研究，排名第二，证书编号：2015-Z-108-2-04-R02。
2. **刘雷，**排名2，国家重点实验室副主任，研究员。**工作单位：**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。**项目完成单位：**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。**主要学术贡献：**对科学发现1、2做出了创造性的贡献。提出了动态复合掺杂实现高质量p型ZnO和表面无序化实现TiO2载流子自发分离调控的新理论和新方法。是代表性论文1、2、4的第一作者和通讯作者。**曾获国家科技奖励情况：**无。
3. **单崇新，**排名3，物理学院院长，教授，**工作单位：**郑州大学。**项目完成单位：**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。**主要学术贡献：**对科学发现1、3做出了创造性贡献。实验上验证了动态复合掺杂思想，实现了稳定的p型ZnO，获得了ZnO基激子型发光和低阈值激光，并实现了国际上首个ZnO基雪崩探测器。是代表性论文3的通讯作者，代表性论文1、7的主要作者。**曾获国家科技奖励情况：**无。
4. **刘可为，**排名4，研究员。**工作单位：**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。**项目完成单位：中**国科学院长春光学精密机械与物理研究所。**主要学术贡献：**对科学发现3做出了创造性贡献。发现了异质微界面操控实现载流子可控输运的新策略，实现了高性能的紫外光电器件。是代表性论文7的通讯作者，代表性论文8的第一作者和通讯作者。**曾获国家科技奖励情况：**无。
5. **吕有明，**排名5，教授。**工作单位：**深圳大学。**项目完成单位：**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。**主要学术贡献：**对科学发现1做出了创造性贡献。实验上首次在蓝宝石衬底上实现了ZnO基紫外发光二极管。是代表性论文5、6的通讯作者，代表性论文3、8的作者。**曾获国家科技奖励情况：**无。

  |
| 合作人关系说明 | 本项目成果第一完成人申德振研究员是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所“宽禁带氧化物半导体材料及其光电器件研究团队”的学术带头人，近二十年来，先后主持完成本项成果依托的国家863/973计划项目（项目首席科学家），国家自然科学基金重点项目等系列科研项目。刘雷、单崇新、刘可为、吕有明分别于2010年、2008年、2003年和2000年加入申德振研究员的团队，作为骨干研究人员，从事宽禁带氧化物半导体材料及其光电器件的相关研究，其中单崇新和吕有明由于工作调动原因分别于2018年和2007年离开团队。5位完成人于2001至2014年期间共同参与完成了国家863/973计划项目、国家自然科学基金重点项目等项目多项，相关工作获吉林省科学技术一等奖4项。完成人之间有多篇共同署名论文发表，详细见下表：

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 合作方式 | 合作者 | 合作时间 | 合作成果 | 证明材料 | 备注 |
| 1 | 共同发表文章 | 申德振/1刘 雷/2单崇新/3 | 2012 | p-Type Conductivity in N-Doped ZnO: The Role of the NZn-VO Complex | 代表性论文1 | SCI论文 |
| 2 | 共同发表文章 | 申德振/1单崇新/3吕有明/5 | 2009 | Ultralow-Threshold Laser Realized in Zinc Oxide | 代表性论文3 | SCI论文 |
| 3 | 共同发表文章 | 申德振/1单崇新/2刘可为/4 | 2014 | High-performance solar-blind ultraviolet photodetector based on mixed-phase ZnMgO thin film | 代表性论文7 | SCI论文 |
| 4 | 共同发表文章 | 申德振/1刘可为/4吕有明/5 | 2007 | Ultraviolet Photoconductive Detector With High Visible Rejection And Fast Photoresponse Based on ZnO Thin Film | 代表性论文8 | SCI论文 |

 |