

项目公示信息（自然科学奖）

一、项目名称：面向集成电路应用的大尺寸钙钛矿单晶制备方法研究

二、提名者及提名意见(专家提名项目应公示提名专家的姓名、工作单位、职称和学科专业)

提名专家：

房喻	陕西师范大学	教授	物理化学
----	--------	----	------

安忠维	陕西师范大学	教授	材料化学
-----	--------	----	------

提名意见：

刘生忠教授团队在钙钛矿单晶生长调控方面的研究，揭示了钙钛矿成核生长的关键影响因素，解决了晶体生长尺度小、质量差等科学问题。发展了反应升温析晶法和阶段接力策略，获得了组分和光电性质可调的超大尺寸钙钛矿单晶体。研制了有限厚度反应器，发展了流动法调控单晶生长新方法，获得了厚度和形状可控的大面积高质量钙钛矿薄片单晶，解决了晶体切割过程中的物料损失和材料表面造成的损伤。在集成光电器件领域，在国际上首次设计制备了钙钛矿单晶光电探测阵列，获得了优异的光电探测和成像性能，拓展了钙钛矿材料在光电领域的应用。以上方法均已成为领域的标准方法，受到了广泛的关注和高度评价，为钙钛矿单晶在集成电路中的应用奠定了物质基础。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件，特提名为陕西省自然科学奖一等奖。

三、项目简介

本项目围绕影响钙钛矿材料光电器件性能、大尺寸钙钛矿单晶极难制备的科学技术问题，开展了钙钛矿结晶学研究、光电性质研究、光电器件设计、组装及集成方面的研究，取得主要成果如下：

(1) 发展了基于特色溶剂的钙钛矿前驱体体系，使得钙钛矿材料在该类溶剂体系中的溶解度随温度升高而迅速降低；揭示了其中的热力学规律；发展了升温析晶的生长策略，可快速获得高质量大尺寸钙钛矿单晶材料。发展了阶段接力单晶生长技术，通过调控环境温度及原料在溶液中的溶解度，解决了大尺寸钙钛矿单晶生长过程中出现“套娃”缺陷的问题，获得了最大尺寸可达 120 mm 的优质单晶。

(2) 发展了前驱物溶液混合策略，解决了不同卤化物在溶剂中溶解度的差异而导致的无法采用单一溶剂获得掺杂钙钛矿晶体这一难题，获得了带隙可调的双卤化物钙钛矿单晶材料，可实现发光峰在可见光范围内连续可调。

(3) 发展了钙钛矿单晶切割工艺，创新性地应用有机碘化物作为制冷剂、润滑剂和原位表面钝化剂，解决了传统切割工艺过程对钙钛矿材料的化学损伤，获得了大面积钙钛矿

单晶薄片，为发展大面积钙钛矿光电器件提供了材料基础。

(4) 揭示了离子液体的多官能团对电荷传输层缺陷的钝化、对钙钛矿结晶过程的诱导和对载流子界面输运的调控机制，在国际上首次将其应用于钙钛矿太阳能电池，获得了平面钙钛矿太阳能电池当时的最高效率 19.62%。

(5) 解决了限域空间中溶质的物质输运难题，发展了带液体流动功能的限域晶体生长反应器，获得了薄度、形状可控的大面积钙钛矿薄片单晶。

在这些晶体生长调控的基础上，设计组装了基于钙钛矿单晶材料的光电探测器，获得了高于多晶薄膜 300 多倍响应度的光电探测器件；率先研制了大尺寸单晶钙钛矿太阳能电池，为发展基于钙钛矿单晶的高性能光电器件提供了理论基础和实际指引。

这些研究成果受到了国内外同行的广泛关注，目前论文他引次数为 918 次，其中第一篇代表作论文自 2015 年 8 月发表以来他引次数就达 373 次，其中光电材料和器件领域的国际知名专家对申请团队的工作做出了高度评价。如著名专家 Osman Bakr 教授评价“升温析晶法已发展成为制备大尺寸钙钛矿单晶的最佳方法”。以色列 Eugeng Katz 教授针对我们团队在钙钛矿单晶生长、生长液流动晶片生长系统、双卤素钙钛矿晶体、晶片切割的工作做了专题评论，对每个研究工作分别评述道：“2015 年，刘等发展了反应升温结晶法

(RITC)，生长了 71 毫米大的钙钛矿单晶。正像大尺寸单晶硅的发展在电子和光伏等行业带来了革命性的突破，大尺寸钙钛矿单晶必将对相应的光探测、太阳电池、LED、激光等领域产生同样的影响。”、“刘团队研发了动态流动微反应器策略，实现了薄度和形状可控的超薄钙钛矿薄片单晶的可控制备。”、通过调节卤素配比，刘团队研发了一系列大尺寸双卤素钙钛矿单晶，实现了发射光波长在整个可见光谱从 400–800 纳米的连续调节。”、“更激动人心的是，刘团队与世界最大单晶硅企业合作，成功发展了单晶钙钛矿切片技术。他们进一步在一片单晶上，设计集成制备了超过 100 个光探测器，充分显示了在钙钛矿单晶上发展大规模集成电路的可行性”。韩国 Park Jong Hyeok 教授指出“刘等人第一次报道了采用切割大尺寸晶体制备的晶体薄片来制作电池，解决了在特定的透明导电衬底上生长单晶钙钛矿膜困难的挑战”。Thuat Nguyen-Tran 教授评价“刘教授课题组报道了一种生长尺寸约为 120 mm 的钙钛矿单晶的方法，这为开发基于钙钛矿的高质量器件提供了可能性。Pablo Docampo 教授评述“通过在两个带有适当间隔的薄片的微反应器中限制生长，可以得到非常薄的钙钛矿晶片，该方法为大规模溶液处理生产晶片铺垫了道路”。美国可再生能源实验室 Kai Zhu 研究员评述“刘采用离子液体修饰二氧化钛层，有效提高了载流子抽取效率和器件性能，降低了离子迁移速率，获

得了高达 19.62%的能量转换效率。”

四、客观评价

本项目的研究成果受到了广泛的关注和高度评价，研究中所采用的策略已发展成为该领域的标准方法。目前研究论文他引次数 918 次，引用者包括许多材料和光电器件领域著名专家领导的研究团队，如厦门大学田中群院士，中科院福建物构所国家杰出青年基金获得者罗军华研究员，都对这些工作做出了高度的评价。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 篇，其中代表作论文不超过 5 篇）

序号	论文专著名称	刊名	作者	第一完成单位	年卷页码（xx 年 xx 卷 xx 页）	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	知识产权是否归国内所有
1	Two-Inch-Sized Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ (X = Cl, Br, I) Crystals: Growth and Characterization	Advanced Materials	Liu, Yucheng; Yang, Zhou; Cui, Dong; Ren, Xiaodong; Sun, Jiankun; Liu, Xiaojing; Zhang, Jingru; Wei, Qingbo; Fan, Haibo; Yu, Fengyang; Zhang, Xu; Zhao, Changming; Liu, Shengzhong	陕西师范大学	2015 年 27 卷 5176-5183 页	201509	杨周, Liu, Shengzhong	刘渝城	刘渝城, 杨周, 崔东, 任小东, 孙健焜, 刘晓静, 张静茹, 魏清渤, 范海波, 于凤阳	373	是
2	Surface optimization to eliminate hysteresis for record efficiency planar perovskite solar cells	Energy & Environmental Science	Yang, Dong; Zhou, Xin; Yang, Ruixia; Yang, Zhou; Yu, Wei; Wang, Xiuli; Li, Can; Liu, Shengzhong;	陕西师范大学	2016 年 9 卷 3701-3708 页	201608	李灿, Liu, Shengzhong	杨栋	杨栋, 周新, 杨瑞霞, 杨周, 于为, 李灿	331	是

3	Thinness- and Shape-Controlled Growth for Ultrathin Single-Crystalline Perovskite Wafers for Mass Production of Superior Photoelectronic Devices	Advanced Materials	Liu, Yucheng; Zhang, Yunxia; Yang, Zhou; Yang, Dong; Ren, Xiaodong; Pang, Liuqing; Liu, Shengzhong	陕西师范大学	2016 年 28 卷 9204-9209 页	201611	杨周, Liu, Shengzhong	刘渝城	刘渝城, 张云霞, 杨栋, 任小东, 庞柳青, 杨周	90	是
---	--	--------------------	--	--------	-------------------------	--------	---------------------	-----	----------------------------	----	---

4	20-mm-Large Single-Crystalline Formamidinium-Perovskite Wafer for Mass Production of Integrated Photodetectors	Advanced Optical Materials	Liu, Yucheng; Sun, Jiankun; Yang, Zhou; Yang, Dong; Ren, Xiaodong; Xu, Hua; Yang, Zupei; Liu, Shengzhong (Frank)	陕西师范大学	2016 年 4 卷 1829-1837 页	201611	杨周, Liu, Shengzhong	刘渝城, 孙健焜	刘渝城, 孙健焜, 杨周, 杨栋, 任小东, 徐华, 杨祖培	94	是
---	--	----------------------------	--	--------	---------------------------	--------	---------------------	----------	--------------------------------	----	---

5	120 mm single-crystalline perovskite and wafers: towards viable applications	Science China-C hemistry	Liu, Yucheng; Ren, Xiaodong; Zhang, Jing; Yang, Zhou; Yang, Dong; Yu, Fengyang; Sun, Jiankun; Zhao, Changming; Yao, Zhun; Wang, Bo; Wei, Qingbo; Xiao, Fengwei; Fan, Haibo; Deng, Hao; Deng, Liangping; Liu, Shengzhong.	陕西师范 大学	2017 年 60 卷 1367-1376 页	201707	杨周, Liu, Shengz hong	刘渝 城, 任 小东, 张静	刘渝城, 任小东, 张静, 杨 周, 杨 栋, 于凤 阳, 孙健 焜, 赵常 明, 姚 准, 王 渤, 魏清 渤海, 肖 锋伟, 范 海波, 邓 浩, 邓良 平	30	是
---	--	--------------------------------	--	------------	----------------------------	--------	-------------------------------	-------------------------	--	----	---

六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
刘生忠	1	无	教授	陕西师范大学	陕西师范大学	总体规划、提出设想
刘渝城	2	无	无	陕西师范大学	陕西师范大学	晶体生长设计、器件组装测试
杨周	3	无	副教授	陕西师范大学	陕西师范大学	器件设计
杨栋	4	无	研究员	陕西师范大学	陕西师范大学	器件设计、器件组装测试
张云霞	5	无	无	陕西师范大学	陕西师范大学	晶体生长设计、器件组装测试
李灿	6	无	研究员	中国科学院大连化学物理研究所	中国科学院大连化学物理研究所	总体规划、提出设想

七、主要完成单位情况

第1完成单位	陕西师范大学				
单位性质	学校				
联系人	王彩红	联系电话	02985310337	传真	02985310230
电子信箱	chwang@snnu.edu.cn				
通讯地址	陕西省西安市长安南路199号			邮政编码	710062
主要贡献	作为本项目的依托单位，陕西师范大学为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献，主要表现为：				

	1) 组织并完成了项目策划和实施工作； 2) 为项目的顺利实施提供了人力资源与优质的工作环境与场所； 3) 提供了本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源。
--	---

第2完成单位	中国科学院大连化学物理研究所				
单位性质	事业单位/研究所				
联系人	曹恒	联系电话	041184379298	传真	041184691570
电子信箱	caoheng@dicp.ac.cn				
通讯地址	辽宁省大连市沙河口区中山路457号			邮政编码	710062
主要贡献	作为本项目的依托单位，中国科学院大连化学物理研究为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献，主要表现为： 1) 组织并完成了项目策划和实施工作； 2) 为项目的顺利实施提供了人力资源与优质的工作环境与场所； 3) 提供了本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源。				

八、完成人合作关系说明

本项目完成人为：刘生忠、刘渝城、杨周、杨栋、张云霞、李灿。刘生忠、杨周、杨栋为陕西师范大学教师。李灿为中国科学院大连化学物理研究所研究员。刘渝城、张云霞为陕西师范大学博士研究生，参加项目期间为陕西师范大学硕士

研究生。团队成员共同完成成果-“面向集成电路应用的大尺寸钙钛矿单晶制备方法研究”的相关工作。

刘生忠、刘渝城、杨周、杨栋、参与了“大尺寸钙钛矿晶体的生长、表征、集成光电器件组装”。其中刘渝城（第1作者）、杨周（通讯作者）和刘生忠（通讯作者）共同合著了代表性论文1。其中刘渝城（共同第1作者）、杨栋（第4作者）杨周（通讯作者）和刘生忠（通讯作者）共同合著了代表性论文4。其中刘渝城（共同第1作者）、杨栋（第5作者）、杨周（通讯作者）和刘生忠（通讯作者）共同合著了代表性论文5。

刘生忠、刘渝城、杨周、杨栋、参与了“钙钛矿单晶薄片制备及其光电器件研究”。其中刘渝城（第1作者）、张云霞（第3作者、）杨栋（第4作者）、杨周（通讯作者）和刘生忠（通讯作者）共同合著了代表性论文3。

刘生忠、李灿、杨周、杨栋、参与了“离子液体钝化界面研究”。其中杨栋（第1作者）、杨周（第4作者）、李灿（通讯作者）和刘生忠（通讯作者）共同合著了代表性论文2。