

项目名称:

高性能工业大功率微波源关键技术及其应用

提名单位意见:

我单位认真评阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目均符合四川省科学技术奖励工作办公室填写要求。

四川大学、南京三乐集团有限公司、中国科学院电子学研究所、南京三乐微波技术发展有限公司、深圳麦格米特电气股份有限公司共同完成的“高性能工业大功率微波源关键技术及其应用”项目，完成了以下发明：

(1) 发明了注入锁频磁控管杂散能量回收技术，解决了磁控管高效功率合成的国际难题，首次实现基于注入锁频磁控管 4 路相干功率合成的 60kW 微波源。

(2) 发明了磁控管共形热控技术。提出了微波加热多物理场仿真计算的时空压缩快速算法，首次实现了磁控管热控设计的多物理场仿真，磁控管的共形水冷热控结构优化设计，率先在国际上研制出 125kW/915MHz、在国内研制出 30kW/2450MHz 连续波大功率磁控管。

(3) 发现了工业环境中反射突变引起的磁控管跳模毁伤机理，发明了微波源梯度阈值控制技术，解决了微波源工业应用中可靠性的难题，将工业大功率微波源平均无故障工作时间提高到 7300 小时。

该成果的工业大功率微波源在冶金、化工和国防等领域获得成功应用，大功率磁控管出口到美国和德国等发达国家，取得了很好的经济、社会和生态效益。经过成果评价，专家组一致认为：“高性能工业大功率微波源关键技术及其应用”整体技术为国内领先国际先进，“磁控管共形热控”技术国际领先。

提名该项目为四川省科技进步奖。

项目简介:

微波加热是物料中极性分子在电磁场作用下产生运动从而转化为热的加热方式，与传统热传导的加热方式相比具有效率高的特点，应用在工业中具有很好的节能减排的效果，对实现我国“构建清洁低碳、安全高效的能源体系”的战略目标具有重大意义。目前，缺乏大功率、长寿命和高可靠的微波源是限制微波能大规模应用的瓶颈问题。本项目围绕高性能大功率微波源的关键技术进行攻关，在国家 973 重点基础研发计划“支撑微波能高效工业应用中的新型微波源基础问题研究”等项目支持下，完成了以下发明：

(1) 发明了注入锁频磁控管杂散能量回收技术，解决了磁控管高效功率合成的国际难题，首次实现基于注入锁频磁控管 4 路相干功率合成的 60kW 微波源。该微波源率先实现了 S 波段大功率磁控管的相干功率合成。

(2) 发明了大功率磁控管共形热控技术，解决了磁控管热控无法精确设计的难题。限制磁控管功率的主要因素之一是磁控管的散热。连续波磁控管功率越大产生的热量越多，制约了磁控管功率的提高。本项目提出微波加热多物理场仿真计算的时空压缩快速算法，首次实现了磁控管热控设计的多物理场仿真，磁控管的共形水冷热控结构优化设计，率先在国际上研制出 125kW/915MHz、在国内研制出 30kW/2450MHz 连续波大功率磁控管。

(3) 发明了高可靠微波源梯度阈值控制技术，解决了微波源工业应用中可靠性的难题。微波源中最容易损坏的是磁控管，特别是当微波源应用于化工和冶金生产中时。本项目采用磁控管粒子仿真技术，发现了工业环境中反射突变引起的磁控管跳模毁伤新机理，发明了微波源梯度阈值控制技术，减少了磁控管跳模机率，增加了微波源在工业环境中运行的稳定性，将工业大功率微波源平均无故障工作时间提高到 7300 小时。

该成果授权专利 22 项，软件著作权 4 项，发表 SCI 论文 50 篇，其中 IEEE 论文 14 篇，科技成果评价结论为：项目整体技术为国内领先国际先进，“磁控管共形热控”技术国际领先。该高性能微波源已成功应用于江苏大丰港红土镍铁矿微波冶炼生产线和云南竹子裂解生产线，实现了微波在冶金和化工领域的大规模应用，取得很好的节能效果和经济效益。大功率磁控管远销美国 Richardson Electronics、德国 Muegge 和韩国的多家国际知名微波能企业。项目新增直接产值 3.27 亿，间接产值 3.56 亿元。

客观评价：

2018 年 4 月 16 日，四川省技术市场协会组织同行专家对四川大学、中国科学院电子学研究所和南京三乐微波技术发展有限公司共同完成的“高性能工业大功率微波源关键技术及其应用”进行了成果评价。专家组一致认为：“高性能工业大功率微波源关键技术及其应用”整体技术为国内领先国际先进，“磁控管共形热控”技术国际领先。

推广应用情况：

应用单位名称	应用技术	应用的起止时间	应用情况
北京杰能达机电设备有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术-大功率连续波磁控管	2009 年-2018 年	我公司代理南京三乐微波技术发展有限公司大功率微波源及大功率连续波磁控管，其大功率连续波磁控管直接出口德国牧歌公司（Muegge GmbH）。德国通过多年多批次长时间的使用，反应磁控管产品寿命长，功率高，符合国际用户要求，奠定了我公司与德国牧歌公司长期合作的基础。
四川宏图普新微波科技有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术	2014 年-2018 年	我公司应用于微波烟丝、烟梗膨化干燥设备。该微波源质量可靠，性能稳定，寿命长，功率大，可以替代进口的工业大功率微波源。
德宏森朗热解技术装备有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术	2012 年-2018 年	我公司将高性能工业微波源关键技术应用于微波竹子的裂解、碳化，在国内是首次。微波源质量可靠，性能稳定，寿命长。对竹子裂解、碳化的工艺水平达到国外同等水平。
长飞光纤光缆股份有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术-大功率连续波磁控管	2012 年-2018 年	我公司使用高性能工业大功率微波源及大功率连续波磁控管。通过多批次长时间的使用，产品性能稳定，可靠性高，满足了公司生产的要求，可以替代进口产品。
新冶高科技集团有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术	2014 年-2018 年	我公司使用高性能工业微波源，解决了大功率微波冶炼急需的关键设备不稳定、可靠性低等难题。设备一直运行可靠、稳定。
常州佳得安进口有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术	2013 年-2018 年	我公司代理南京三乐微波技术发展有限公司的高性能工业大功率微波源，直接出口韩国。用户通过长时间使用，反应大功率微波设备性能良好，可靠性高，使用寿命长，符合韩国用户工业应用的要求。
山东科弘微波能有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术大功率连续波磁控管	2014 年-2018 年	我公司应用于食品的微波解冻项目。其大功率连续波磁控管质量可靠，性能稳定，寿命长，为公司成套设备提供了高质量的核心器件。

内蒙古国投保然能源有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术	2013 年-2018 年	本公司应用微波技术进行镁冶炼降低了能耗，提供了效率。微波源质量可靠，性能稳定，寿命长。
成都川科创业投资有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术	2015 年-2018 年	我公司应用于微波等离子裂解甲烷制备乙炔、乙烯项目。该技术为天然气提供了新的低成本的方法。使用中微波源质量可靠，性能稳定，寿命长，满足化工领域长期连续使用的需求。
南京工大开元环保科技有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术	2013 年-2018 年	我公司应用于环保需求的污水处理项目。大功率微波源质量可靠，性能稳定，使用寿命长。污水处理效果好，效率高。
中国林业科学研究院木材工业研究所	高性能工业大功率微波源关键技术	2014 年-2018 年	我公司应用于微波木材膨化设备进行工艺研究。微波源控制可靠，性能稳定，可连续工作，运行维护简便，为工艺研究提供了支撑和保障。
南京澳润微波科技有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术	2014 年-2016 年	我公司应用于微波新材料催化项目。大功率微波源质量可靠，工作性能稳定，寿命长，可连续 7×24 小时不间断工作，提高了生产效率，效果良好。
成都菲斯洛克电子	高性能工业大功率微波源关键技术	2013 年-2018 年	本公司成功应用于中国工程物理研究院项目，在四川大学的技术支持下，满足了用户的工程需要，微波源质量可靠，性能稳定，寿命长。
成都波辐科技有限公司	高性能工业大功率微波源关键技术	2013 年-2018 年	我公司使用的南京三乐微波技术发展有限公司大功率连续波磁控管，成功实现了大功率微波源，在在四川大学的技术支持下，满足了用户的工程需要。磁控管工作寿命长，质量稳定。
北京兆聪国际贸易有限责任公司	高性能工业大功率微波源关键技术大功率连续波磁控管	2016 年-2018 年	我公司代理美国理查森公司采购的南京三乐微波技术发展有限公司大功率微波源及大功率连续波磁控管，用户经过多批次长时间的使用，反应产品性能良好，可靠性高，寿命长。符合用户需求，为我公司与理查森公司建立长期合作关系奠定了基础。

主要知识产权证明目录:

	专利名称	专利号	权利人
1	多磁控管串联微波功率合成器	ZL201210006101.0	四川大学
2	一种 75kW /915MHz 大功率连续波磁控管	ZL201310131716.0	南京三乐微波技术发展有限公司
3	一种 2450MHz 大功率连续波磁控管及其制备方法	ZL201310168125.0	南京三乐微波技术发展有限公司
4	一种 15KW/2450MHz 注入锁频磁控管	ZL201410193925.2	南京三乐微波技术发展有限公司

5	一种连续波磁控管阴极的制备方法	ZL201310212940.2	南京三乐微波技术发展有限公司
6	磁控管用的水冷电磁铁及磁控管装置	ZL201310615788.2	南京三乐微波技术发展有限公司
7	一种 2450MHz 频率段大功率连续波磁控管的水冷电磁铁	ZL201310175106.0	南京三乐微波技术发展有限公司
8	Injection locked magnetron microwave generator with recycle of spurious energy	US 9,355,808 B2	四川大学
9	杂散能量回收注入锁频磁控管微波发射系统	ZL201510109032.X	四川大学
10	一种 20kW/2450MHz 注入锁频磁控管	ZL201410438360.X	南京三乐微波技术发展有限公司

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	对本项目技术创造性贡献
黄卡玛	1	学术院长	教授	四川大学	四川大学	总体设计和快速算法
刘长军	2	教研室主任	教授	四川大学	四川大学	磁控管注入锁频
包正强	3	总工	研究员级高工	南京三乐集团有限公司	南京三乐集团有限公司	磁控管共形水冷
杨阳	4	副院长	副教授	四川大学	四川大学	微波源梯度阈值控制法
高冬平	5	研究员	副研究员	中科院电子所	中科院电子所	磁控管共形水冷
王荣川	6	无	工程师	南京三乐微波技术有限公司	南京三乐微波技术有限公司	磁控管共形水冷
官继红	7	微波电源事业部总监	工程师	深圳麦格米特电气股份有限公司	深圳麦格米特电气股份有限公司	微波源梯度阈值控制法

完成人合作关系说明:

国家重点基础研究 973 计划“支撑微波能高效工业应用中的新型微波源基础问题研究” 2013CB328900, 课题一、二、五的主持和参加单位分别是: 四川大学、中科院电子所、南京三乐微波技术发展有限公司。本成果完成人都是该 973 项目的负责人及主要研究成员。

项目第一完成人黄卡玛教授为 973 项目的首席科学家。项目分为 5 个课题, 进行合作技术攻关。课题一由中科院电子所和南京三乐微波完成, 课题二由四川大学和南京三乐微波完成。项目第二、四、五、六完成人刘长军、杨阳、高冬平、王荣川均为

项目主要研究人员，分别负责磁控管热控，注入锁频磁控管杂散能量回收技术，微波源梯度阈值控制等的研究。依托 973 项目，项目完成人围绕 3 个发明点展开了深入合作研究。2017 年 12 月，973 项目已经顺利通过技术验收。

南京三乐微波有限公司是南京三乐集团有限公司（原名：南京三乐电子信息产业集团有限公司）的全资子公司。与四川大学建立联合实验室，围绕高性能微波源开展研究。深圳麦格米特公司与四川大学建立联合实验室，围绕微波源控制技术研究。