

四川大学大功率系统级微波无线能量 传输 30 年研究综述及历史发展

黄卡玛, 陈 星, 刘长军, 杨 阳, 卢 萍, 程 飞, 王 策
(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

摘 要: 微波无线能量传输(Microwave Wireless Power Transmission, MWPT)技术可实现电能远距离非接触传输, 具有重要战略价值。四川大学是我国最早开展大功率系统级 MWPT 研究的高校。30 年来, 团队从率先提出“空间匹配”核心理论, 到攻克高效率微波转换等关键器件, 最终实现系统级功率与传输效率的跨越式提升, 使我国跻身世界先进行列, 完成了从理论创新到工程集成的科研闭环。值此 130 周年校庆, 30 年研究积累的理论成果、技术储备与人才团队, 将为空间太阳能电站、无人机无线续航、物联网供电等未来颠覆性应用提供坚实支撑, 激励新一代川大人在世界科技前沿与国家重大需求领域再攀高峰。

关键词: 微波无线能量传输; 大功率系统; 高效率微波转换; 远距离传输

中图分类号: TN99 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.260175

A 30-year research review and historical development of high-power system-level Microwave Wireless Power Transmission at Sichuan University

HUANG Kama, CHEN Xing, LIU Changjun, YANG Yang, LU Ping, CHENG Fei, WANG Ce
(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Microwave Wireless Power Transmission (MWPT) technology enables long-distance, non-contact electrical energy transfer and holds significant strategic value. Sichuan University is the first university in China to conduct research on high-power system-level MWPT. Over the past three decades, the research team has pioneered the core theory of "spatial matching", developed key devices such as high-efficiency microwave converters, and ultimately achieved leapfrog improvements in system-level power output and transmission efficiency, placing China at the international forefront. This journey has completed a closed research loop from theoretical innovation to engineering integration. On the occasion of the university's 130th anniversary, the theoretical achievements, technological reserves, and talented workforce accumulated through 30 years of research will provide solid support for future disruptive applications, including space solar power stations, wireless endurance unmanned aerial vehicles, and powering the Internet of Things. This legacy also inspires a new generation of Sichuan University researchers to scale new heights at the world's scientific frontiers and in fields of major national demand.

Keywords: Microwave Wireless Power Transmission; high-power system; high-efficiency microwave conversion; long-distance transmission

收稿日期: 2026-05-26 修回日期: 2026-06-10 接受日期: 2026-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(62371321); 国家自然科学基金联合基金(U24A20225)

作者简介: 黄卡玛(1964—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 主要研究领域为微波无线能量传输与微波能工业应用. E-mail: kmhuang@scu.edu.cn

微波无线能量传输(Microwave Wireless Power Transmission, MWPT)技术可实现电能的远距离、非接触传输,突破地理与环境限制,具有重要战略价值^[1-5]。受石油危机刺激,20世纪70年代美国能源部和美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)联合开展了“卫星太阳能电站系统”项目,将收集到的太阳能转化为电能,再通过微波或激光等无线能量传输技术输送到地面接收站,转换为直流电并入电网,实现不受昼夜、天气与地理条件制约的大规模可持续清洁能源供应^[1]。MWPT技术不仅是对传统电网的补充,更是通往“能源自由”的关键路径——通过整合空间太阳能,构建覆盖海、陆、空、天的立体化无线供能网络,最终实现能源的无线、无缝、无界获取,为人类文明的可持续发展与战略安全提供根本性支撑。在能源领域,它有助于将偏远地区的清洁电力(如海上风电、沙漠光伏)输送至负荷中心,优化能源配置,摆脱对化石能源及传统电网的依赖,提升能源系统的韧性与安全。在应急场景中,MWPT可为无人机、远程设备等提供持续的能量供给,是未来能源体系的重要支撑^[6-10]。

四川大学是我国最早开始大功率系统级微波无线能量传输技术研究的高校。从30年前前瞻性地布局这一前沿领域开始,川大科研团队便踏上了一条充满挑战的创新之路。研究脉络清晰而坚定:从“空间匹配”核心理论的首次提出与完善,奠定了技术的理论基础,到面向工程应用的高效率微波转换器等关键器件的迭代攻关,一次次突破技术瓶颈,最终实现系统级功率与传输效率的跨越式提升,使我国在该领域跻身世界先进行列。这一过程,完美演绎了从理论创新到技术突破,再到工程集成的完整科研闭环,体现了川大基础研究与应用研究并重的深厚底蕴。

站在130周年校庆的历史节点回顾过往,30年的微波无线能量传输研究历程,是川大服务国家创新驱动发展战略的一个精彩缩影。它所积累的理论成果、技术储备和人才团队,为我国未来空间太阳能电站、无人机无线续航、物联网节点供电等颠覆性应用提供了坚实支撑。校庆不仅是辉煌历史的检阅,更是崭新征程的起点。这笔宝贵的学术与精神财富,必将为川大未来的学科发展、科技创新注入强大动能,激励新一代川大人面向世界

科技前沿与国家重大需求,再攀高峰,为强国建设贡献更大的川大力量。

1 研究缘起与初创期

1.1 时代背景与研究初衷

20世纪90年代末至21世纪初,全球范围内的微波无线能量传输技术呈现出显著的不平衡发展态势。国外研究中,尤以美国、日本为代表,起步较早并已进入系统化探索阶段。例如,美国NASA在此时期持续推进了利用微波为高空无人侦察机进行远距离无线供电实验,验证了其技术可行性;日本则在此领域投入大量研发经费,专注于太空太阳能发电等前瞻性概念研究^[11]。

相比之下,国内当时的研究整体尚处于起步与跟跑状态,研究力量相对分散,且聚焦点主要集中于低功率、近距离的特定应用场景,如为嵌入式传感器、射频识别等小型电子设备进行微功率无线充电。尽管在这些“小功率”应用层面取得了一定进展,但对于能够实现远距离、高能量传输的“大功率系统级”研究,则存在明显的理论探索与工程实践空白。这种局面对我国在未来空间能源、远程供电等战略高技术的发展形成了潜在制约。

正是洞察到这一关键领域的国内外差距与战略重要性,四川大学充分发挥其在无线电物理领域的传统学科优势,展现了前瞻性的战略眼光。黄卡玛教授团队意识到,大功率微波无线能量传输技术不仅是无线电物理学科本身的深化方向,更是未来能源、航天等多项关键领域的核心技术支撑,其发展不能完全依赖国外技术。

因此,四川大学率先在国内进行战略性布局,将研究重点明确指向了大功率系统级研究。这一决策的核心战略考量在于:一是旨在攻克大功率系统下的基础科学问题,如高效率能量转换、波束精准控制与电磁环境影响等;二是力求构建具有自主知识产权的系统集成技术,从理论仿真到硬件实现进行全链条创新。其初心非常明确,即不仅要实现学术上的从零到一的突破,更要主动肩负起填补国家在该领域研究空白的重任,为我国在未来国际科技竞争中获得主动权奠定坚实的基础。

1.2 初创团队与研究基础

四川大学微波无线能量传输研究的奠基之

旅,始于一支由学术带头人黄卡玛教授引领的核心团队,包括黄卡玛教授、陈星硕士生、刘长军硕士生等。他们凭借在无线电物理领域的学术积淀与共同的科研理想,形成了初始研究班底。四川大学无线电系在系主任黄卡玛的带领下,立足无线电物理专业,立志填补国内研究空白,从生物电磁学研究逐渐转向微波无线能量传输技术研究。

研究初期,团队重点聚焦于实验室的初步搭建、关键设备的引进与适应性改造,以及部分核心部件的自主研发。团队的研究方向高度聚焦,集中攻关大功率微波无线传输的基础理论、简易系统的搭建与关键性能参数的测试方法。其核心目标明确而务实:完成从零到一的原理可行性验证。围绕这一目标,研究内容涵盖了电磁波在空间中的能量传输机理、天线系统的能量耦合效率以及整流电路的初步设计等基础科学问题。

1.3 初创期标志性成果

依托无线电物理教研室搭建初期研究平台,1996年,黄卡玛教授获得四川大学8万元的启动科研经费支持,开始了微波无线能量传输技术的探索和研究,在实验室内成功实现了微波无线能量传输的原理性验证实验。黄卡玛教授带领研究生在经管楼九楼实验室,开展了微波无线能量传输的研究。限于当时的条件,收发均使用喇叭天线,微波功率源采用磁控管,接收端采用多个二极管并联实现微波整流。这是四川大学最早开始的微波能量传输实验研究,传输距离达到了10 m。该成果不仅验证了技术路线的可行性,更极大地坚定了团队面向大功率系统方向深入研究的信心。

四川大学微波无线能量传输初期的研究,先后获得了林为干院士的鼓励和支持,在周寿桓院士的亲自带领下,在林祥棣院士、毛二可院士和吴伟仁院士的支持下逐步建立了完善的实验室。

2 发展期与突破期

2.1 团队扩容与学科支撑

随着初期研究的成功验证,团队进入了以平台系统性升级为核心的发展新阶段。陈星、刘长军、郭庆功、杨阳先后成长为教授和副教授,他们在黄卡玛教授带领下,研究平台从校级逐步开始承担省部级乃至国家级重大科研任务的核心创新平台的战略转型。研究实力的积累获得了国家层

面的认可,团队开始连续承担包括教育部、国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金重点项目在内的国家级基础研究课题,确保了研究工作的前沿性与原创性。同时,团队紧扣国家重大战略需求,成功获批国家自然科学基金委等部门资助的科研项目,标志着其研究方向和成果与国家战略紧密结合。2018年,获批教育部无线能量传输重点实验室,为后续微波无线能量传输技术持续创新提供了强有力的保障。

2.2 核心技术突破与系统升级

从1996年开始,团队采用2.45 GHz频率的磁控管在实验室完成大功率的微波无线能量传输实验,1999年完成外场实验验证。2009年,在民用航天项目的支持下,四川大学开展了200 m微波无线能量传输实验研究。在新津某辅助机场跑道上(图1),团队采用速调管作为微波发射源,频率5.8 GHz,完成了我国首次大规模外场微波无线能量传输实验。系统的发射端采用阵列天线,接收端也采用了整流天线阵列,标志着微波无线能量传输技术实验室走向外场。



图1 四川大学2009年完成的200 m距离微波无线能量传输外场实验

Fig. 1 Field experiment of microwave wireless power transmission over a distance of 200 m conducted by Sichuan University in 2009

从2011年起,在基础科研计划项目的资助下,项目组继续承担了第二期项目任务,深入地研究微波能量无线传输关键技术,包括:基于空间能量合成的微波无线能量传输、磁控管稳频调相技术、组件化微波功率发射天线设计技术、分频整流的微波整流天线集成化技术等^[12-13]。在四川大学望江校区基础教学大楼外,团队采用磁控管作为微波发射源,工作频率2.45 GHz,成功驱动小车模型行驶10 m以上(图2),展示了微波无线能量传输技

术的应用前景。

如图 3 所示,2012 年,四川大学在望江校区基础教学大楼顶,采用飞艇携带大功率平面型整流天线,采用磁控管作为微波发射源,工作频率

2.45 GHz,从楼顶向飞艇进行了微波无线能量传输。成功启动飞艇携带的摄像头,采集了视频信息并成功返回地面,首次实现了能信同传。



图 2 四川大学成功驱动小车模型实验

Fig. 2 Experiment demonstrating successful wireless driving of a model car at Sichuan University

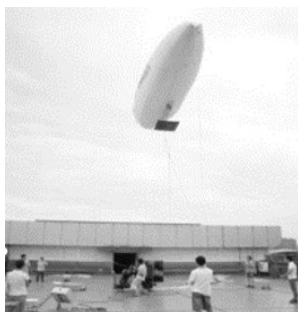


图 3 四川大学成功驱动飞艇实现能信同传

Fig. 3 Demonstration of a microwave-driven airship achieving simultaneous energy and information transmission at Sichuan University

2013 年,在基础科研项目的支持下,四川大学开展了公里级 2.45 GHz 微波无线能量传输研究。在成都市双流区当时未开通的牧华路上(图 4),采用磁控管作为发射源,基于磁控管注入锁频和空间功率合成技术,接收端采用微波高效串联整流技术,完成了 1 km 距离的微波无线能量传输外场演示实验,这是国内基于空间功率合成的微波无线能量传输研究的新里程碑。

2016 年在基础科研项目资助下,在更高的波段上,构建太阳能微波能量传输和利用的集成演示系统,大幅度提高微波无线能量传输技术成熟度和推动工程化应用进程(图 5)。

随后,团队在微带平面阵列天线设计上独辟蹊径,采用了在阵列天线表面加载超材料结构的全新技术,即设计为 2.5 维超材料平面阵列天线,利用超材料结构改善微带阵列天线与空气之间的阻抗匹配特性,从而大幅度提升了微带阵列天线



图 4 四川大学 2013 年完成的 1 km 距离微波无线能量传输外场实验

Fig. 4 The 1 km microwave wireless power transmission field experiment completed by Sichuan University in 2013

的工作带宽和鲁棒性,从而获得了高的微波功率空间合成效率。基于 2.5 维超材料平面阵列天线技术设计了微波发射阵列,测试得到了发射波束

方向图(图6),其波束宽度仅 0.36° 。



图5 2016年微波无线能量传输实验

Fig. 5 Microwave wireless power transmission experiment in 2016

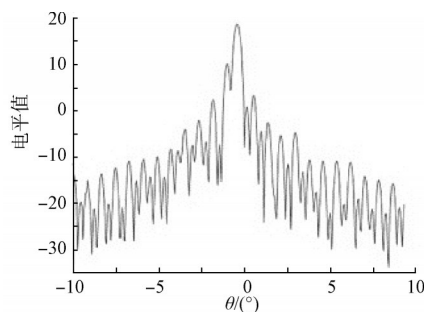


图6 2.5维天线阵列结构及其方向图

Fig. 6 Structure and radiation pattern of the 2.5-D antenna array



图7 机动式微波无线能量供给站

Fig. 7 Mobile microwave wireless power supply station

2016年7月,该机动式微波无线能量供给站成功为1.6 km外的设备无线供电,如图7所示。该技术于2016年8月16日通过了由教育部组织的技术鉴定,以我国著名专家贲德院士为组长的专家组认为“2.5维超材料天线技术达到国际领先水平”。

2019年,在基础科研项目的支持下,在四川省阆中机场(当年未开通)开展了微波无线能量传输实验,传输距离达到1.5 km。接收端采用了非均

匀微波整流和直流功率合成技术,输出直流功率超过了1 kW。

2.3 成果转化与学术影响力提升

在持续获得的平台资源大力支持下,团队科研工作不断取得突破,先后在IEEE系列高水平学术期刊累计发表SCI论文300余篇,其中多篇发表于微波技术与无线能量传输等前沿领域的重要刊物,论文质量与学术影响力受到国际同行广泛认可。同时,团队在技术创新与知识产权布局方面亦成效显著,已获相关的授权国家发明专利30余项、美国专利8项,多项核心技术形成有效保护,为相关领域的自主发展奠定基础。在此基础上,团队积极与中国电子科技集团有限公司等科研机构及华为在内的行业领先企业建立深度技术合作关系,推动多项科研成果向工程化、产品化方向转化,逐步实现学术研究与产业需求的紧密对接。

3 成熟期与引领期

3.1 团队引领与平台建设

团队建设实现了从核心开创到可持续发展的跃迁。在黄卡玛教授、陈星教授、刘长军教授和杨

阳教授等创始团队的学术引领下,团队展现出强大的吸引力与活力,先后引进了卢萍副教授、程飞副教授、王策副研究员等一批富有创新能力的青年骨干,形成了“领军学者-中坚力量-青年后备”的高效衔接、代际传承的完善人才梯队。这一梯队不仅是科研攻关的核心力量,更是人才培养的摇篮,已培养了大量的博士、硕士研究生,这些毕业生已成为国内外相关领域的技术骨干,持续扩大着团队的战略影响力。

研究平台实现了质的飞跃,依托无线能量传输教育部重点实验室平台,从理论仿真、核心部件设计、系统集成及应用推广,承担国家重大科研任务和实现微波无线能量关键核心技术突破。团队积极推行“走出去、请进来”的国际化战略,通过多渠道开展高水平的国际学术交流与合作。承办了第五届无线能量传输会议,微波能应用大会等国内外会议,团队成员频繁出席顶级国际会议并作特邀报告,与法国、英国等多所世界知名大学及

研究机构建立了稳定的合作关系,通过互访、联合研究、共同举办学术研讨会等多种形式,不仅快速跟踪国际前沿动态,更有力地提升了团队在国际学术界的能见度与影响力,推动了相关技术的全球化发展。

3.2 重大成果与技术引领

3.2.1 空间匹配理论

针对微波无线能量系统效率低问题,团队在国际上首次提出了一种微波无线能量传输空间匹配技术,建立了系统最高传输效率公式,将发射天线和带有二极管非线性整流电路的接收天线综合设计,从口径场匹配,接收功率匹配和非线性阻抗匹配出发,优化系统获得最高效率。该理论发表在国际微波领域顶刊 IEEE MTT 期刊上^[14],并在科学出版社出版专著《微波无线能量传输原理与技术》^[15]。基于空间匹配理论,开发了一款微波无线能量传输全链路优化分析软件(图 8),现已在国内多个单位应用,获得广泛好评。

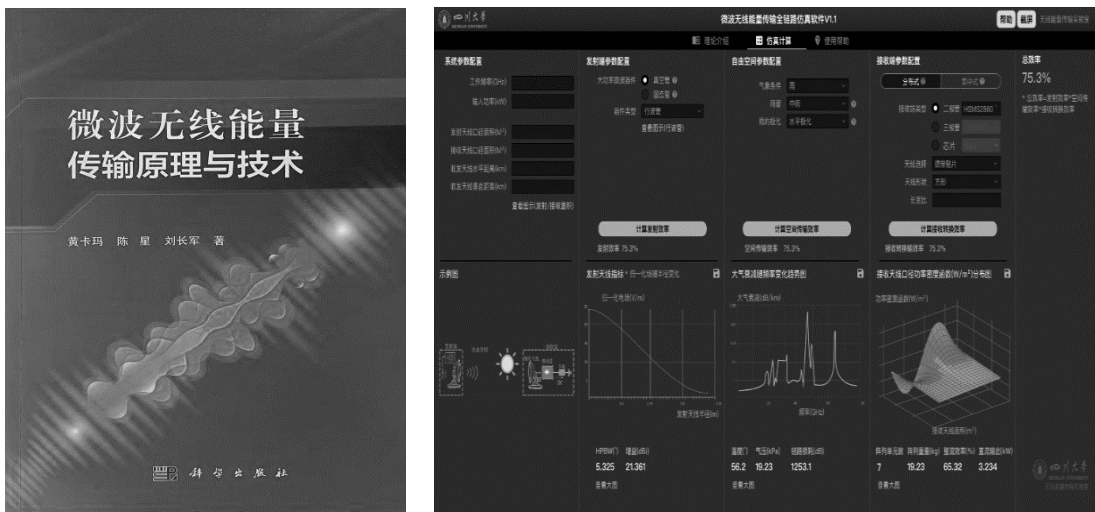


图 8 空间匹配专著及其软件

Fig. 8 Monograph on spatial matching and its accompanying software

3.2.2 高效率 GaN 同质/异质结整流器及整流电路

基于宽禁带半导体材料,本团队设计了 GaN 异质/同质结整流器件的单二极管并联拓扑整流电路。如图 9 所示, GaN 同质结异质结器件结构与整流效率图。该电路主要由输入阻抗匹配网络、F 类多次谐波抑制网络及 GaN 整流器件构成。电路分别工作于 5.8 GHz 与 10.1 GHz 两个频段;其中 5.8 GHz 整流器实测转换效率可达 90%, 10.1 GHz 整流器实测效率高达 87.5%。

团队于 2024 年 7 月基于所提出的 GaN 同质结整流器件在全国第一届无线传能技术挑战赛中荣获最佳效率奖(图 10)。

3.2.3 高效率整流芯片

2018 年,团队研制出我国第一款微波砷化镓整流芯片,如图 11 所示。该芯片在 5.8 GHz 测得的整流效率最高为 62%,芯片尺寸为 1.7 mm×0.9 mm×0.1 mm,功率质量比为 9.03 W/g。整流芯片实现了整流电路的小型化,高功质比。

2021 年,改进了整流电路的匹配与滤波电路,

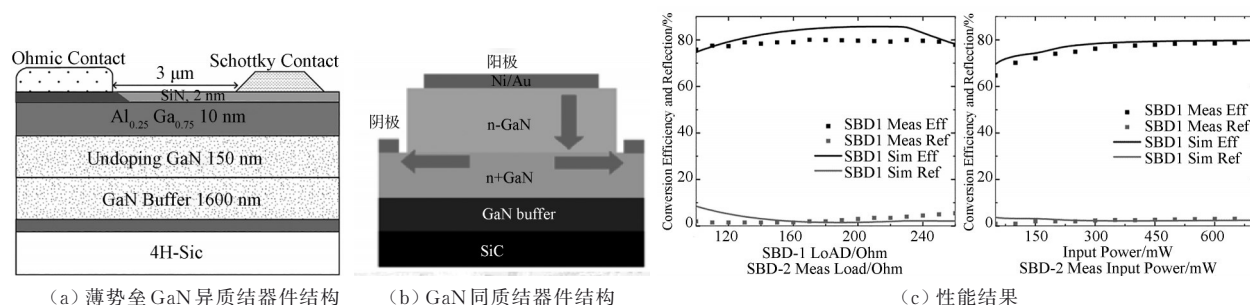


图 9 AlGaIn/GaN 肖特基二极管(SBD)结构图与整流效率

Fig. 9 Structure and rectification efficiency of AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diode (SBD)



图 10 最佳效率奖获奖证书

Fig. 10 Certificate of the best efficiency award

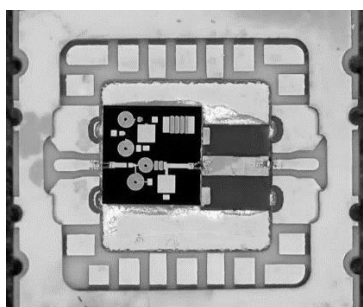


图 11 5.8 GHz 砷化镓整流芯片

Fig. 11 5.8 GHz GaAs rectifier chip

设计的第二款 5.8 GHz 整流芯片效率达到 70%，芯片如图 12 所示，芯片的大小为 2.8 mm×3.2 mm×0.1 mm，封装后的重量为 35 mg，功率质量比达到

了 28.57 W/g。该芯片在第一届无线传能技术挑战赛微波单项赛中获得优胜奖。

2022 年,研制了 5.8 GHz 与 10 GHz 的砷化镓整流芯片。其中,5.8 GHz 整流芯片功率质量比提高至 57.14 W/g,10 GHz 整流芯片最高效率为 60%，功率质量比为 14.29 W/g。

3.3 成果转化与行业贡献

基于空间匹配理论,本团队开发的一款微波无线能量传输全链路优化分析软件,现已在国内多个单位应用,获得广泛好评。此外,建立了精确的大功率 GaAs 肖特基二极管模型,通过多管自适应技术设计了大功率整流芯片,在相关院所也得到了广泛应用。采用 GaAs、GaN 器件,实现了最高转化效率,并以此类器件制成高集成度整流模块。参与了我国“逐日工程”研究计划,获得重大进展。该整流器件与模块已经应用于多家企业、高校,获得直接经济价值 1000 余万元。

团队积极践行“产学研用”一体化模式,与华为技术有限公司等龙头企业和尖端科研院所建立了深度合作关系。合作聚焦于前瞻性的混合能量收集系统研发,成功将薄膜太阳能电池与多频段微波整流天线进行一体化集成设计,并率先采用零功率开启的 GaN 肖特基二极管作为核心整流器件,从而实现了对环境空间中超低功率微波的高

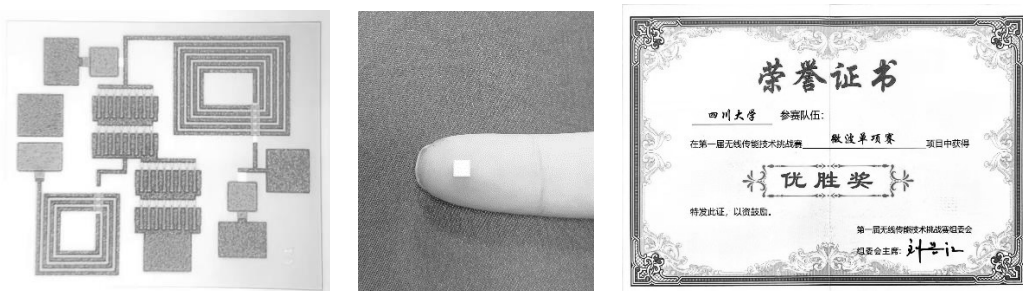


图 12 5.8 GHz 砷化镓整流芯片及获奖证书

Fig. 12 5.8 GHz GaAs rectifier chip and certificate of award

效捕获与转换。这项创新技术突破了单一能量收集的局限,能同时在多个常用通信频点(如 2.4 GHz、5.8 GHz 等)上收集能量,显著提升了能源获取的可靠性和效率,实现全天候、全场景的供能。

3.4 艰苦外场攻坚

在广袤的外场实验基地,无线能量传输团队通常顶着烈日与风沙奋战(图 13)。设备调试、信号校准、数据采集等每一个环节都充满挑战:高温下仪器过热、风沙干扰传输效率、野外供电不稳

定。为了捕捉到更精确的实验数据,团队成员主动放弃休息,加班加点反复调整发射天线角度,优化接收端匹配参数,调试每一个整流电路的转换效率。深夜的帐篷里,大家盯着屏幕上的波形图和效率图,争论着下一轮测试的改进方案——尽管汗水浸透衣背,疲惫写在脸上,但所有人都明白:只有多熬一个通宵,多测一组数据,才能让无线能量传输的远方更近一步。

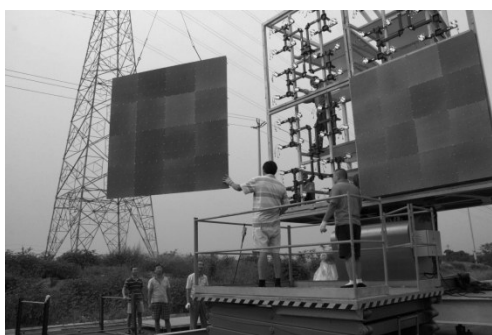


图 13 外场测试照片

Fig. 13 Photograph of the field test

4 30 年研究总结:传承与积淀

4.1 研究脉络梳理

四川大学在无线能量传输技术领域 30 年的发展,形成了一条清晰而完整的“初创-发展-成熟”三阶段演进轨迹,生动诠释了学校在该领域从填补国内空白到确立国际前沿地位,最终实现行业引领的跨越式发展历程。

第一阶段——初创期,研究始于前瞻性的基础研究与技术探索。面对国内在该领域的空白,研究团队率先开展理论奠基与技术验证,完成了从零到一的原始突破,发表了系列早期重要论文,奠定了学科发展的根基。

第二阶段——发展期,研究实现了从理论向关键技术的纵深突破。团队围绕高效率整流、波束控制、电磁安全等核心难题开展集中攻关,取得了多项标志性的技术突破,获得大量国家发明专利,并与重点科研院所及行业龙头企业建立合作,推动技术从实验室走向工程化。

第三阶段——成熟期,标志着技术体系化与生态影响力的形成。研究成果不仅在 IEEE 系列顶级期刊持续产出高水平论文,形成了显著的学术影响力,更成功应用于特定工程实践,并依托入

选的相关的特色学科,构建了教学、科研与产业需求紧密联动、相互反哺的成熟发展模式。

贯穿这一历程的核心脉络,是一条“理论创新-技术突破-系统研发-成果转化-人才培养”深度融合、正向循环的一体化发展路径:以空间匹配原理为前沿基础研究引领方向,以国家发明专利和核心技术为驱动,解决实际应用中的关键瓶颈,将关键技术集成为可验证、可演示的模块化系统与原型样机。通过与产业界的深度合作,将实验室成果推向实际应用,创造经济与社会价值。

4.2 团队与平台建设

依托无线能量传输创新平台,团队持续加强人才梯队建设,培养了一批活跃在学术前沿的青年学者,并积极引进高端人才,为团队注入了持续的活力与创新能力。实验室主任黄卡玛教授获得国家杰出青年科学基金项目资助,并被聘为教育部重要人才,长期引领团队发展方向;两位四川省学术技术带头人刘长军教授和陈星教授作为团队中坚力量,在科研与育人方面贡献突出,入选了教育部新世纪优秀人才支持计划;刘长军教授当选 IEEE MTT TC-25 无线能量传输和转换技术委员会委员,四川省有突出贡献的专家;杨阳教授入选了国家级重要人才计划青年项目;一批优秀青年

教师如卢萍副教授、程飞副教授、王策副研究员等迅速成长,在各自研究方向上展现出良好的发展潜力,构成了团队可持续发展的后备军。此外,团队成功引进了国家级重要人才计划入选者侯建操教授,进一步增强了科研实力与人才储备。

在科研成果方面,团队屡获重要荣誉。黄卡玛教授因其在微波能应用领域的杰出贡献,荣获该领域国际最高成就奖——Ricky Metaxas Pioneer Award,体现了国际学界对其学术影响力的高度认可。刘长军教授指导的参赛作品《透明“绿色”能量接收系统——空间太阳能电站地面新模式》荣获首届“全国空间太阳能电站青年创新竞赛”卓越奖。

团队始终围绕国家重大战略需求开展科研攻关,取得了系列具有代表性的成果。团队已获得国家技术发明二等奖1项、四川省技术发明一等奖1项,以及多项其他省部级科技进步奖。团队获得四川省教学成果一等奖2项,于2018年入选四川大学第二届“德渥群芳”标兵团队,团队负责的《射频通信电路》与《电磁场与电磁波》两门电子信息类核心课程,先后荣获国家级一流本科课程认定,与此同时,电磁场与微波技术专业凭借深厚的学科积淀与相关领域的突出贡献,成功入选相关的特色学科建设序列,逐步构建起教学提升、科研反哺、学科引领三者协同并进的良性发展机制。这些成就标志着团队在微波无线能量传输领域的研究已达到国内外先进水平,具有重要的学术影响力与技术引领作用。

4.3 核心积淀与精神传承

历经30年的探索与发展,本团队已构建起一套贯穿基础理论、前沿技术、系统集成与多元应用的完整研究体系。我们在关键领域形成了扎实的理论基础,积累了丰富的技术经验,研制出多个标志性系统平台,并成功实现了从实验室到行业实践的转化落地。团队主持及参与国家级、省部级重点重大科研项目等多项,发表高水平学术论文数百篇,荣获多项重要科技奖励,科研积淀深厚,形成了具有持续创新能力的学术生态。

团队深深植根于四川大学130年悠久办学传统,传承“海纳百川,有容乃大”的校训精神,在实践中凝练并秉持“严谨务实、勇于创新、科研报国、薪火相传”的核心理念。我们注重科学精神的坚守与学术道德的培育,倡导开放协作、攻坚克难的

作风,始终将国家战略需求与学科前沿发展紧密结合。一代代团队成员在此精神指引下接续奋斗,形成了凝聚力强、传承有序、富有家国情怀与开拓意识的科研文化。

三十载耕耘不辍,团队始终坚持“立德树人”根本任务,将人才培养置于核心位置。通过构建“教学相长、研教融合”的特色培养模式,我们不仅传授专业知识,更注重科学思维、创新能力和学术品格的塑造。已累计培养博士、硕士研究生数百名,许多毕业生已成为国内外高校、科研机构及行业企业的中坚力量与领军人才,获得广泛赞誉。

4.4 行业地位与贡献总结

自上世纪90年代初率先在国内布局并系统开展大功率微波无线能量传输研究以来,四川大学在该领域开创了具有里程碑意义的先河,成为国内系统级工程化研究的重要孕育地。我们持续引领技术迭代,攻克了高效率能量转换、远距离精准传输、系统稳定控制等系列世界性难题,研究成果直接应用于国家重大科技基础设施与新兴战略产业,从技术上推动了我国在空间太阳能电站、无人系统持久供电等尖端方向从概念走向实践,实现了从“跟跑”到“并跑”乃至部分“领跑”的历史性转变。

团队30年的科研历程是学校扎根中国西部大地、服务国家战略需求的又一生动体现。我们主动将研究方向与国家在能源安全、航天科技等领域的紧迫需要相对接,将实验室建在祖国需要的地方,把科技成果应用到现代化建设的事业中。这30年学科建设的跨越式发展深刻表明,一所大学的生命力在于其与国家民族命运的同频共振,一流的学科建设能够有力反哺学校整体发展,提升学校在国内国际学术界的声誉与影响力,共同谱写新时代教育强国、科技强国、人才强国的壮丽篇章。

5 未来展望

5.1 技术发展方向

聚焦国家重大战略需求,团队将着力攻克微波无线能量传输技术的核心瓶颈,致力于实现更高功率、更优效率、更远距离的能量传输能力。重点突破高效率能量转换器件、高精度波束指向与控制、自适应能量接收与整合等关键技术,构建稳定可靠、低损耗的无线传能系统,为长距离、规模

化能源传输奠定坚实基础。通过无线能量传输技术,我们将构建新型能源互联网,实现能量与信息的一体化协同传输。这不仅能支持能源的灵活调度与实时分配,还可实现用能设备与能源网络的智能交互,推动能源系统向数字化、网络化、智能化方向发展,为未来智慧能源网络提供关键支撑。

长远来看,此项技术旨在获取并利用空间能量,特别是通过建设空间太阳能电站,将太空中丰富、持续的太阳能转化为电能,并以无线方式传回地面。这将极大拓展人类能源获取边界,缓解地面能源紧缺与分布不均问题,为可持续发展与人类福祉提供新的能源解决方案。因此,我们将持续深化微波无线能量传输技术在空间太阳能电站、无人机大功率持久供电、物联网设备无源运行、智能制造生产线无线供能等领域的融合应用。通过场景驱动技术迭代,提升系统的环境适应性、安全性与经济性,推动技术从实验走向规模化、商业化落地。

同时,我们将积极促进跨学科交叉融合,推动微波无线能量传输技术与人工智能、新型材料、航空航天、信息通信等领域的深度结合。例如,借助人工智能优化传输调度与效率,利用新材料提升天线与整流器件性能,结合航空航天技术拓展空间能源系统构建能力。通过学科协同创新,培育新的研究方向与技术生态,形成持续发展的创新体系。

5.2 校庆赋能与使命担当

以建校 130 周年这一重要历史节点为契机,团队系统梳理和总结了近 30 年来我们团队的发展历程、重要贡献与宝贵经验。这不仅是一次对奋斗足迹的深情回望,更是一次对科研精神内核与育人使命初心的深刻凝练与集体传承。我们将通过举办学术纪念活动、展示重大成果等形式,弘扬团队历代学者“厚植基础、追求卓越、服务国家”的学术传统,增强全体成员的归属感、自豪感与使命感,将校庆转化为凝聚共识、汇聚力量、激发斗志的新起点。

立足这一承前启后的新起点,将团队未来发展深度融入学校“双一流”建设的宏伟蓝图。聚焦国家能源安全与科技自立自强的重大战略需求,以更高远的目标、更坚实的行动,持续产出具有标志性的原创成果,培养拔尖创新人才。我们致力于将微波无线能量传输研究,打造成为学校服务

国家战略的特色标杆和学术名片,以实实在在的“川大贡献”支撑强国建设。展望未来 30 年,我们满怀信心,誓以开拓进取的锐气与笃行不怠的坚持,在无线能源供给这一充满无限可能的领域,续写新的发展篇章。

6 结 语

三十载风雨兼程,四川大学在大功率微波无线能量传输领域的开拓与坚守,是其 130 年办学史上“海纳百川,有容乃大”精神的璀璨注脚。这段历程,不仅书写了一部服务国之大家的“硬核”奋斗史,更凝练了一种敢于问鼎前沿、甘坐冷板凳的学术品格。站在新的历史起点,回顾这段征程,既是对过往成绩的回望总结,也明确了今后努力的方向。四川大学将继续肩负起时代赋予的使命,在这一充满无限可能的领域持续深耕,为人类能源革命与空间探索的宏伟蓝图,贡献更为卓越的“川大智慧”与“中国方案”。

应用电磁所团队介绍:现有教授 10 名,特聘研究员 1 名,副教授 6 名,特聘副研究员 1 名,专职博士后 5 名,全为留学回国人员;教育部重要人才计划入选者 1 名,国家杰出青年科学基金项目获得者 1 名,973 计划项目首席科学家 1 名,国家级重要人才计划入选者 3 名,教育部跨世纪和新世纪优秀人才 3 名。获得国家技术发明二等奖 1 项,四川省技术发明一等奖 1 项,其他省部级科技进步奖多项,微波无线能量传输的研究在国内外具有重要影响。已培养研究生 300 多人,在读研究生 180 余人。

参考文献:

- [1] Brown W C. The technology and application of free-space power transmission by microwave beam [J]. Proc IEEE, 1974, 62(1): 11-25.
- [2] Brown W C. The history of power transmission by radio waves [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1984, 32(9): 1230-1242.
- [3] Glaser P E. Power from the sun: its future [J]. Science, 1968, 162(3856): 857-861.
- [4] Strassner B, Chang K. Microwave power transmission: Historical milestones and system components [J]. Proc IEEE, 2013, 101(6): 1379-1396.
- [5] Dickinson R M. Performance of a high-power, 2.388-GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km [C]//IEEE-MTT-S Interna-

- tional Microwave Symposium, 1976: 139-141.
- [6] McSpadden J O, Mankins J C. Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology [J]. IEEE Microw Mag, 2002, 3(4): 46-57.
- [7] Prathima A, Gurjar D S, Yadav S, *et al.* UAV-assisted wireless information and power transfer for self-sustained IoT communications [J]. IEEE Sens J, 2022, 22(24): 24593-24606.
- [8] Loubet G, Takacs A, Dragomirescu D, *et al.* Wirelessly powered battery-free sensing nodes for internet of things applications [J]. IEEE Microw Mag, 2025, 26(7): 26-46.
- [9] Brown W C, Eves E E. Beamed microwave power transmission and its application to space [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1992, 40(6): 1239-1250.
- [10] Lu P, Xia Y K, Lei E P, *et al.* Airborne flexible rectifying metasurface system for wirelessly powered unmanned aerial vehicles (UAVs) [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2024, 72(10): 7710-7721.
- [11] Brown W C. The solar power satellite as a source of base load electrical power [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(6): 2766-2774.
- [12] Liu C J, Tan F F, Zhang H X, *et al.* A novel single-diode microwave rectifier with a series band-stop structure [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2017, 65(2): 600-606.
- [13] Chen X J, Yang B, Shinohara N, *et al.* Low-noise dual-way magnetron power-combining system using an asymmetric H-plane tee and closed-loop phase compensation [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2021, 69(4): 2267-2278.
- [14] Lu P, Huang K M, Yang Y, *et al.* Space matching for highly efficient microwave wireless power transmission systems: Theory, prototype, and experiments [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2021, 69(3): 1985-1998.
- [15] Huang K M, Chen X, Liu C J. Principle and technology of microwave wireless power transmission [M]. Beijing: Science Press, 2021. [黄卡玛, 陈星, 刘长军. 微波无线能量传输原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021.]

(责任编辑: 刘颖慧)