

引用格式: LI Long, ZHANG Pei, HAN Jiaqi, et al. Key Technologies of Microwave Wireless Power Transfer and Energy Harvesting Based on Electromagnetic Metamaterials (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1016001

李龙,张沛,韩家奇,等. 基于电磁超材料的微波无线能量传输与收集关键技术(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10):1016001

※封面论文※

基于电磁超材料的微波无线能量传输与收集 关键技术(特邀)

李龙^{1,3}, 张沛^{1,3}, 韩家奇^{1,3}, 崔铁军^{2,3}

(1 西安电子科技大学 超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室 电子工程学院, 西安 710071)

(2 东南大学 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

(3 智能超材料研究中心, 琶洲实验室, 广州 510330)

摘要:无线能量传输与收集技术有望为 5G 通信、万物互联等重要领域提供革命性技术变革。近距离耦合式传能已逐渐商业化,但面向远距离应用的微波无线传能的实用化进程还存在诸多技术瓶颈,例如有限的收发天线口径与传输效率的矛盾等。电磁超材料的发展为解决上述问题带来了新的突破口。本文将围绕两者的结合,系统地阐述电磁超材料在微波无线能量传输与无线能量收集中的关键技术。结果表明,基于电磁超材料的近场聚焦技术能显著提升无线能量传输效率。此外,还介绍了光透明超表面以及可重构超表面用于提升无线传能性能与实用性的研究进展;基于亚波长超材料单元的周期性紧密排布,可以设计具备宽角入射特性、极化不敏感特性的无线能量收集器,从而以更高的收集效率取代传统天线结构进行能量接收。与整流二极管共面集成提出整流超表面的新概念,可以简化无线能量收集器系统的整体结构,减小尺寸并提高效率。最后,对无线传能的未来发展进行讨论,指出现场可编程、智能超材料技术将在未来携能通信系统中起到非常重要的作用。

关键词:无线能量传输;无线能量收集;电磁超材料;近场聚焦;整流超表面;智能超材料

中图分类号:TN82

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215010.1016001

Key Technologies of Microwave Wireless Power Transfer and Energy Harvesting Based on Electromagnetic Metamaterials (Invited)

LI Long^{1,3}, ZHANG Pei^{1,3}, HAN Jiaqi^{1,3}, CUI Tiejun^{2,3}

(1 Key Laboratory of High Speed Circuit Design and EMC, Ministry of Education, School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(3 Center of Intelligent Metamaterials, Pazhou Laboratory, Guangzhou 510330, China)

Abstract: Wireless Power Transfer (WPT) and energy harvesting technologies are expected to provide revolutionary technological changes in important fields such as 5G communications and the Internet of Things. The short-range coupling WPT has gradually been commercialized, but there are still many technical bottlenecks in the practical process of microwave power transmission that can realize long-distance applications, such as the contradiction between the limited aperture of transceiver antennas and the

基金项目:国家重点研究发展计划(Nos. 2017YFA**227, 2018YFA**263),国家自然科学基金(No. 62001342),陕西省创新能力支撑计划(No. 2021TD-07),陕西省杰出青年科学基金(No. 2019JC-15)

第一作者:李龙(1977—),男,教授,博士,主要研究方向为电磁超材料,无线能量传输与收集技术。Email: lilong@mail.xidian.edu.cn

通讯作者:崔铁军(1965—),男,中科院院士,教授,博士,主要研究方向为计算电磁学与信息超材料。Email: tjcui@seu.edu.cn

收稿日期:2021-07-09; **录用日期:**2021-08-10

<http://www.photon.ac.cn>

WPT efficiency. The developments of electromagnetic metamaterials and metasurfaces have brought new breakthroughs for solving the above-mentioned problems. In this paper, we will focus on the combination of the two important technologies, and systematically review the applications of metamaterials in microwave wireless power transfer and wireless energy harvesting. The results show that the near-field focusing metasurface can significantly improve the transfer efficiency. We will also introduce the research progress of optically transparent metasurfaces and reconfigurable metasurfaces for improving WPT performance and practicability. Based on the periodically close arrangements of subwavelength metamaterial units, a wireless energy harvester with wide-angle incidence and polarization-insensitive characteristics is designed, which can replace conventional receiving antennas with higher harvesting efficiency. Furthermore, coplanar integration with the rectifying diodes makes a new concept of the rectifying metasurface, which can simplify the overall structure, reduce the size, and improve the efficiency. Finally, we will discuss the future progress of WPT, and point out the vital role that programmable and intelligent metamaterial technologies will play very important roles in future simultaneous wireless information and power transfer systems.

Key words: Wireless power transfer; Wireless energy harvesting; Electromagnetic metamaterials; Near-field focusing; Rectifying metasurface; Intelligent metamaterials

OCIS Codes: 160.1245; 160.3918; 230.4000; 350.4010; 260.2160

0 引言

电磁波既是信息的载体,也是电磁能量的载体。对前者的研究与应用已经使得人类成功迈入信息时代。通过电磁波实现无线能量传输(Wireless Power Transfer, WPT)^[1-2]将给世界带来重大的技术变革。早在百余年前,TESLA N已经展开了尝试,但受限于当时的技术条件未能成功。随着20世纪电磁场与无线通信技术的不断发展,实现能量隔空传输的梦想再次被点燃。无线传能技术无需通过物理布线网络以及人工更换电源的方式进行供能,具备高度的灵活性、便捷性和可持续性,因而得到了科学界和产业界的热切关注,被美国《技术评论》杂志选为未来将给人类生产、生活方式带来巨大变革的十大科研方向之一。

能够实现无线传能的技术形式主要有以下几种:感应耦合及谐振耦合式^[3-4],微波辐射及激光辐射式。感应耦合及谐振耦合都可以划归为非辐射类传输方式,两者主要在低频(kHz到30 MHz)依靠线圈实现电磁能量的耦合传输。感应耦合无线充电技术已经在消费级电子产品市场上占得一席之地,但作用距离很短,仅为厘米级;磁耦合谐振式作用距离远一些,可到米级,目前在汽车无线充电领域已进入标准制定环节^[5]。总的来说,非辐射式传能适合于中短距离的应用场景;但当传输距离需求达到米级,甚至十米和百米,就需要依靠辐射式。激光^[6]和微波都可以实现远距离无线传能。一般而言,激光的准直性,能量汇聚性更好,但易受到气候环境的干扰,且成本高昂;微波在自由空间中传播更易发散,但具备更好的鲁棒性、安全性和性价比。因而,微波无线传能(Microwave Power Transmission, MPT)^[7]成为实现远距离无线传能的一种主流技术方案。

自20世纪60年代起,BROWN W C等展开了对WPT的系统性研究^[7-8],提出了天线收发效率的理论分析方法以及整流天线的设计方法,奠定了该领域的基本技术范式。此后,GLASER P^[9]提出了空间太阳能电站(Space Solar Power Station, SSPS)的宏伟设想,计划在太空中将高密度的太阳能转化为微波能量,再通过极窄波束无线传输至地球表面。数十年来,美国、欧洲、日本和我国相继开展了SSPS研究并取得了阶段性的进展^[10]。随着5G通信、万物互联等概念的不断推进落实^[11],无线传感网络中数以亿万计的微型无线传感器的供电问题引起了人们的担忧。但这也推进了微波无线传能另一个研究分支的发展,无线能量收集(Wireless Energy Harvesting, WEH)^[12-13],即采集环境中的射频能量为低微功耗传感器供电。

虽然WPT被科技界寄予厚望,但其实用化进程还面临诸多阻碍与技术瓶颈,一些关键科学和技术问题亟待解决。首先是收发天线的口径-效率矛盾问题。电磁波在空间中的传播会逐渐发散,为提升传输效率,需要增加发射天线的口径,使得微波功率以更高增益更集中的波束发出;或增加接收天线的口径,使得更多的能量被接收天线所捕获。但实际应用中,收发天线口径往往存在尺寸限制,导致远距离情况下,传能效率受到天线口径的制约。另一方面,环境中可供收集的射频能量的频谱分布较为分散,且对于传感器终端而言,环境射频能量的来波方向、极化状态均不确定。因而对于WEH而言,要求其接收天线在小型化、高效率的基础上应具备宽带、多频、宽角、极化不敏感等特性。这也给WEH天线设计引入更高的难度。

电磁超材料(Electromagnetic Metamaterials, EM MMs)^[14-18]的诞生和发展,为解决以上问题带来了全新思路。本质上讲,电磁超材料代表着一种电磁学全新的结构设计方法与理念。通过将其单元组成视为材料的微观结构,设计单元特性并改变其阵列排布方式,从而使之具备自然界材料难以拥有的奇异物理特性。作为电磁超材料二维平面化结构,电磁超表面(Electromagnetic Metasurfaces, EM MSs)^[16]可灵活调控电磁波的幅度、相位、极化、波型等特性,可在微波波段、红外频段乃至可见光波段实现丰富的功能,如极化转换、高效吸波、波束赋型等。崔铁军院士于2014年首次提出了数字编码和现场可编程超材料^[17],通过控制超材料的空间数字编码序列,实时可编程地操控电磁波的空间分布。2019年进一步提出了时间数字编码超表面^[18],实现了对电磁波频谱的实时可编程操控。这种数字编码表征使超材料由“被动”变“主动”,从“模拟”变“数字”,因而有能力在物理空间上进行信息与能量的调控和数字信号处理运算。基于MMs/MSs技术,我们有望为WPT和WEH的技术瓶颈找到突破口。

1 电磁超材料/超表面在无线功率传输中的应用

无线功率传输WPT与无线能量收集WEH的基本技术路径如图1所示。

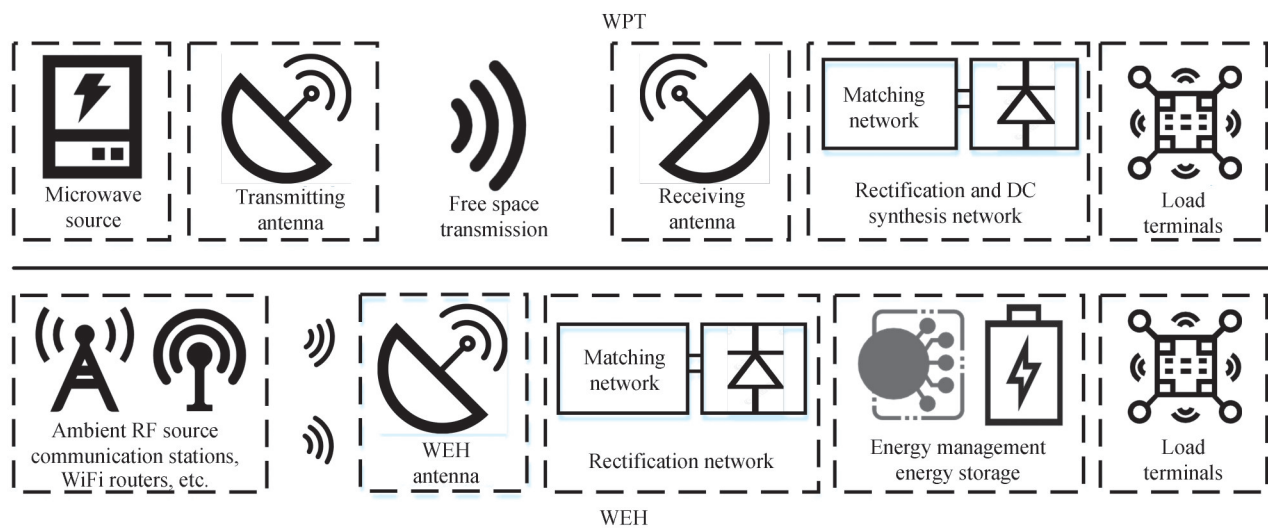


图1 微波WPT与WEH的基本技术路径

Fig. 1 Basic technological path of microwave wireless power transfer and wireless energy harvesting

MMs/MSs在微波无线传能领域的一个应用方向是基于超材料对电磁波波前幅度、相位和极化的灵活调控实现高效聚焦传输。根据传统天线理论,当收发天线位置符合远场条件时,可通过提升发射天线的有效口径提高发射天线增益,使得无线功率以波束宽度更窄、功率密度更集中的方式向接收天线辐射。然而,根据天线口径场理论^[19]可以推导出远场高增益波束的传播轴向电场,其最大电场强度不超过 $2E_0$ (E_0 表征发射端初始电场)。因而,远场高增益波束对无线功率的汇聚作用存在明显上限,提升微波传输效率就必须不断增大发射口径,无论对于实施成本,还是实际工程可行性,都是不现实的。

因而电磁波的近场电磁特性引起了人们的注意。电磁近场区,包括感应近场区和菲涅尔区。电磁波波前在该区域内仍有相位差的存在,因而可以通过相位调控实现特殊的波束电磁特性。近场聚焦(Near-Field Focusing, NFF)^[19-20]便是这样一种近场内独有的电磁特性。当无线功率发射口径具备凹球面相位分布时,电磁波前将在近场区域形成汇聚的焦点,在目标口径上具备更密集的电场分布,从而显著提高传输效率。NFF已通过多种天线形式实现,例如抛物面反射器^[21]、介质透镜天线^[22]、微带相控阵^[23-26]、平面菲涅耳透镜^[27-28]和漏波天线^[29-30]等。然而,处理成本高、体积庞大、馈电网络复杂、效率有限等缺点限制了NFF在高效WPT中的运用。需要一种结构简单,且可以平衡成本和效率的实现方法。

1.1 多源多焦MIMO-WPT超表面

MMs/MSs具有灵活调节入射电磁波的幅度、相位、极化等特性的能力^[31],为这一问题提供了有效的解

决方案。近年来,学者们将MSs和NFF相结合,用于射频^[32]、中近红外^[33]甚至水下超声^[34]应用。也有研究致力于采用新材料与新工艺,拓宽近场聚焦超表面技术的实际工程应用范围并降低其生产成本。2019年YURDUSEVEN O等^[35]提出一款完全基于聚合物介质材料的WPT超表面,通过3D打印技术加工而成。

2019年,西安电子科技大学李龙团队^[36]提出了一种具有多焦点特性的反射超表面,其示意图和实测场景如图2所示。提出的多馈源多焦点反射超表面的设计方法,可实现与无线传感器网络应用的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) WPT需求的无缝连接。具体来说,调整设计的超表面单元,即“三振子”结构的尺寸,从而在5.8 GHz获得不同的反射相移。根据所需的相位补偿分布,所提出的 20×20 超表面阵列可以形成多个不同目标位置的近场聚焦波束,实现无线功率的高效空间合成和分集。超表面尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,在1 m距离处获得了70%的最大聚焦传输效率,且50%效率的相对带宽达到16%。

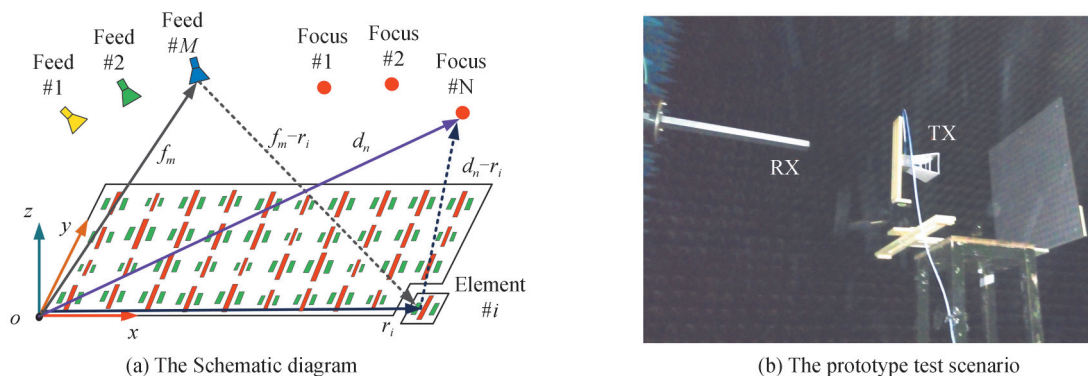


图2 多源多焦MIMO-WPT反射超表面^[36]

Fig. 2 Multi-source and multi-focus MIMO-WPT reflective metasurface^[36]

在此基础上,李龙团队^[37]针对MIMO-WPT的应用需求,设计工作在X波段的具有双极化独立调节特性的超表面单元。通过调整空馈喇叭的极化状态,所设计的“交叉偶极子”结构可以对入射波进行正交极化分解,从而实现聚焦波束的不等功率分配特性,大大提高了MIMO-WPT的灵活性和实用性。近场扫描实测结果如图3所示。单焦点、双焦点,以及单焦点双极化情况下的聚焦传输效率分别获得为71.6%、68.3%和65.9%。

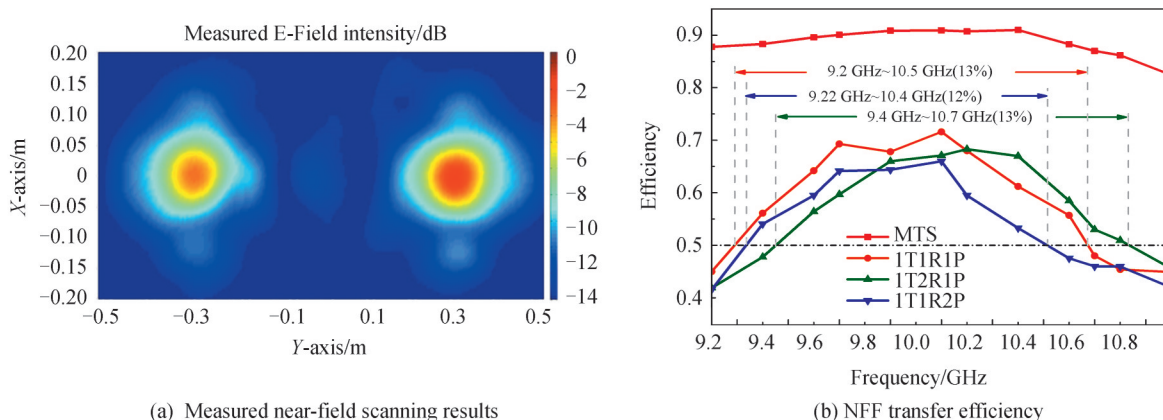


图3 X波段功率不等分配反射超表面^[37]

Fig. 3 X-band reflective metasurface with unequal power distribution characteristics^[37]

1.2 可重构聚焦超表面

固定聚焦超表面设计方法的提出解决了传输效率与多目标功率分配的问题,但超表面一经加工完成就难以具备再调整的能力,因而实现动态可调的高效无线传能成为新的研究热点。相较于传统天线,如相控阵方案的高昂成本,可编程超表面(Programmable Metasurface, PMS)技术可以实现性能与成本的双赢。通过对超表面进行有源加载,如PIN管、变容管等,超表面通过后端电路可实现对波束波形的实时调控。2016

年,一款基于变容管的可重构超表面被提出^[38],通过改变施加在二极管上的外部电压可以精确地控制超表面的相位波前,从而实现动态可调的聚焦效果。2017年,YURDUSEVEN O等^[39]提出了一种在20 GHz工作的集成PIN管的可重构全息超表面以实现动态WPT。通过控制施加在二极管上的偏置状态,其聚焦传输特性可以重新配置,聚焦在近场的任意位置。可重构超表面技术,连同编码超表面、可编程超表面等技术近年来得到了广泛关注与深入研究,东南大学崔铁军团队从原理层和应用层对其展开了深入探索,并系统性地提出了信息超材料^[40]这项跨学科融合技术。许多用于无线通信、波束赋形等信息流的可重构超表面技术若引入能量流的应用,就具备了任意位置高效自适应传能的应用潜力,如图4所示^[41]。

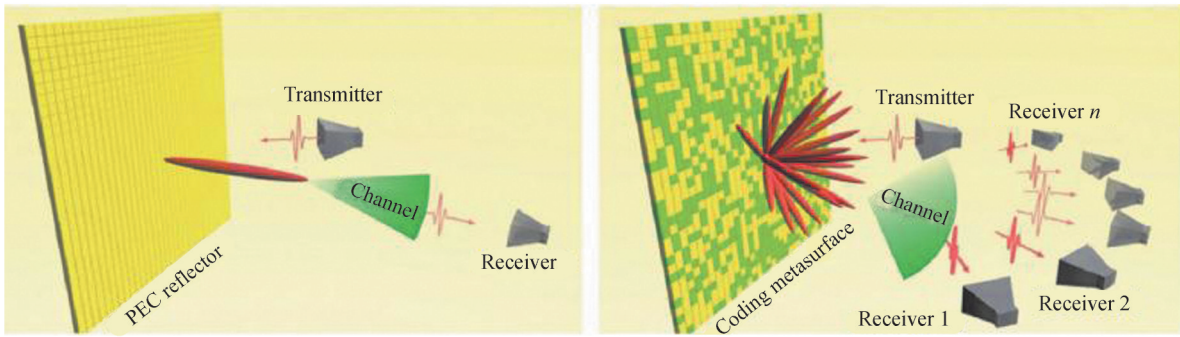


图4 编码超表面在无线通信领域的应用工作原理图^[41]

Fig. 4 Schematic diagram of coding metasurface applications in wireless communication^[41]

聚焦位置的灵活调整只是第一步,更具实用性和挑战性的是实现动目标追踪传能。2021年,崔铁军和李龙团队合作首次提出了一种基于2-bit PMS的微波无线功率自适应传输系统,并设计了一款工作于5.8 GHz的 12×12 的可编程超表面^[42],如图5所示。经过测试验证,该系统对移动目标的功率传输效率达到稳定的

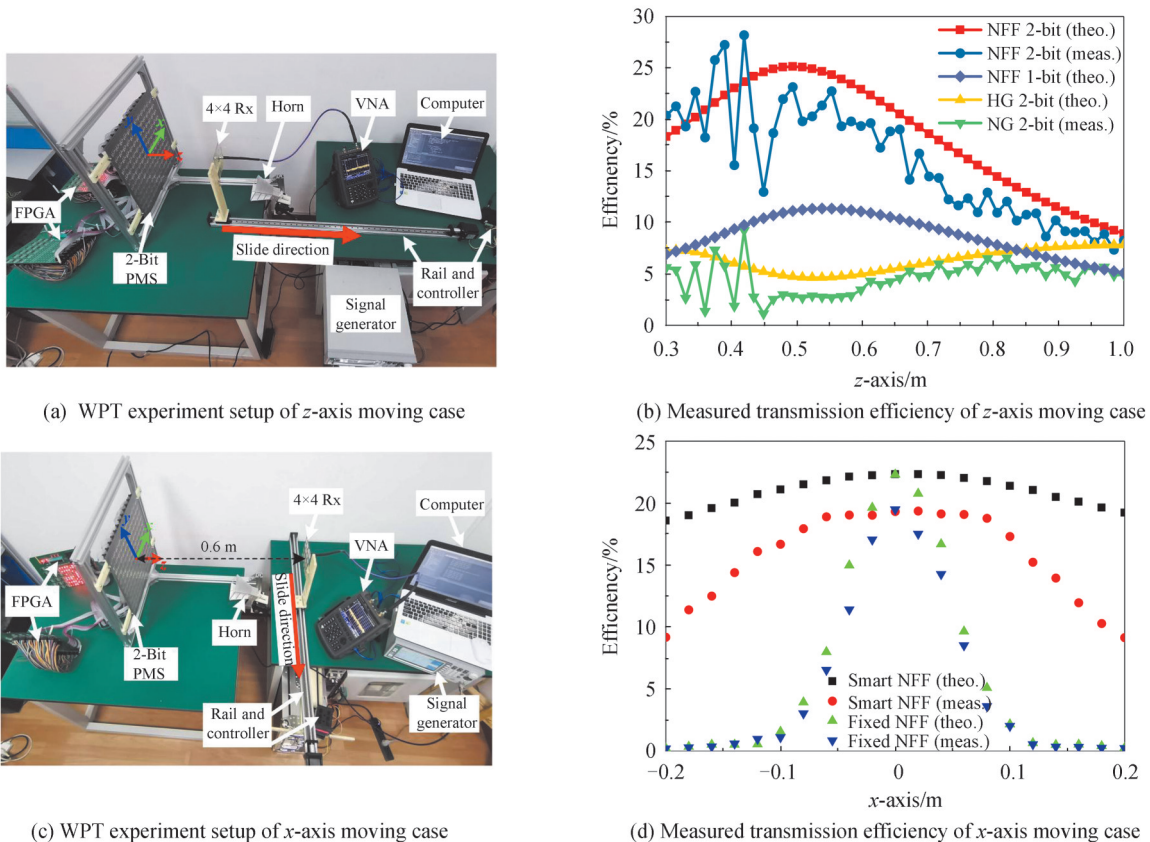


图5 基于2-bit PMS的自适应智能WPT系统实测场景图与传能效率测试结果^[42]

Fig. 5 Testing scenario and measured transfer efficiency of the adaptive intelligent WPT system based on 2-bit PMS^[42]

9.1%以上,且相较于固定设计的聚焦光束,其轨迹末端的传能效果提升了16.3 dB。该方案可进一步完善应用层定位算法并提升整体WPT系统效率,标志着无线功率传输可以基于PMS技术实现真正的实时动态自适应化。

1.3 光透明超表面

采用聚焦超表面技术可以显著提升WPT的传输效率。但对于许多空间资源紧张的应用环境,例如卫星以及室内环境,为提升微波传输效率而增大天线口径的代价是难以承受的。因而提升聚焦超表面的环境共形能力是极有价值的,如实现其光透明化。自2000年以来,陆续有研究关注了反射阵天线和太阳能电池板的共形设计^[43],以解决卫星空间紧张问题。反射阵谐振单元采用传统非透明金属材料,因其结构尺寸有限,占用面积小,而介质采用光透明材料,一定意义上可视为实现了天线整体的透明化。2016年,清华大学杨帆团队^[44]提出一种基于有机玻璃材料的介质反射阵,虽然透光性良好,但有机玻璃基板的使用引入了较为严重的介质损耗。

采用透明金属薄膜材料是一种实现天线透明化的可行方案。常见的透明金属材料包括铟锡氧化物(Indium Tin Oxide, ITO)^[45]、AgHT^[46]、ZnO等。近年来,崔铁军团队^[47-50]提出了多款基于ITO材料的反射型超表面,实现了毫米波高效吸波、后向反射抑制、雷达散射截面减缩等丰富功能。值得注意的是,以上研究的开展都运用了透明金属材料的有耗特性,而在WPT应用中需要尽可能减少损耗,以提升无线能量传输的效率。

2021年,李龙团队^[51]提出了一款基于方阻为 $1 \Omega/\text{sq}$ 的ITO材料的新型透明聚焦反射超表面,同时实现了可见光的高效透射和5.8 GHz微波的近场聚焦传输,如图6。该工作通过超表面单元结构设计调整其谐振阻抗特性,克服了使用有耗ITO薄膜金属材料设计透明超表面的主要挑战,即平衡谐振效应引起的相移特性(所需)和效率损失(应避免)。实现了60%以上的透光率,且相较于基于良导体材料设计的非透明聚焦反射超表面,该设计可以实现其60%以上的电性能。这项工作与建筑物玻璃幕墙、室内玻璃隔断等场景进行共形集成,既可实现高效WPT,又为太阳能/射频混合能量收集提供了应用潜力。

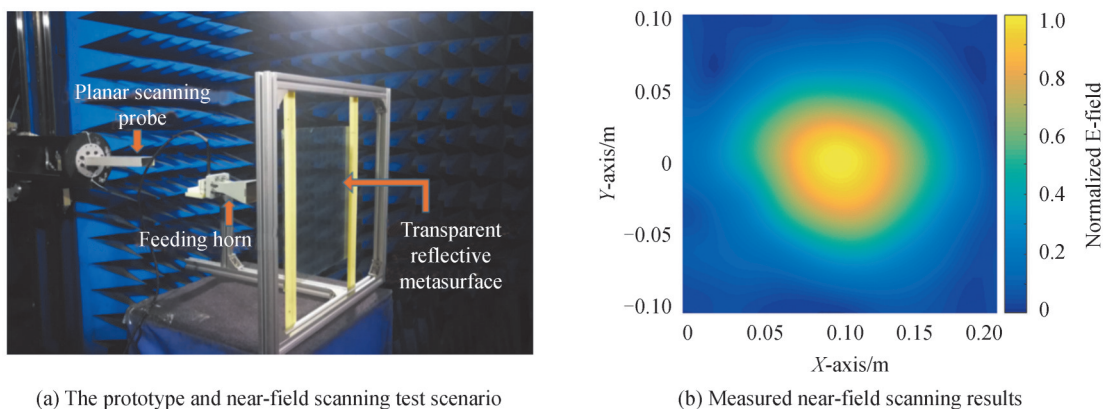


图6 光透明聚焦反射超表面^[51]
Fig. 6 Transparent NFF reflective metasurface^[51]

2 电磁超材料/超表面在无线能量收集中的应用

超材料在微波无线传能领域的另一个主要研究方向是直接采用电磁超表面取代传统天线结构,设计无线能量超表面收集器。该研究的灵感出自于BOSQUESPADILLA F J等于2008年提出的基于电磁超材料的完美电磁吸波器^[52]。不同于电磁吸波器将电磁能量进行耗散,实现无线能量收集需要将收集器捕获的射频能量高效汇集于端口,以进行整流并进行能量管理和存储。

2.1 超表面无线能量收集器

2012年,加拿大滑铁卢大学RAMAHI O团队首先提出了一款基于亚波长分裂谐振环(Split Ring Resonators, SRR)单元结构的超表面阵列能量收集器,通过在超材料粒子间隙内插入电阻负载实现与自由空间阻抗匹配^[53]。由于平面SRR没有地板结构,引入了透射波损耗,因而能量收集效率难以超过80%,且性能受电磁波入射角度的影响。尽管如此,这一开创性的工作吸引了诸多研究者的目光。为提升收集效率,

2015年,该团队提出了一种改进设计,采用亚波长电感电容(Electric-Inductive-Capacitive, ELC)谐振器组成平面阵列^[54]。与SRR的显著区别是,ELC谐振器增加了与超表面顶层拓扑连接的通孔和地板结构,在3 GHz下实现高达97%的射频收集效率。RAMAHI O团队^[55]提出了一种接地互补型SRR结构,并与传统天线构成的射频收集器进行了性能对比。对比双方分别为一个11×11的超表面阵列和一个5×5的贴片天线阵列,工作频率均为5.55 GHz。实测观察到超表面单元收集效率为83%,贴片天线阵列则为60%。超表面阵列中亚波长单元的紧密排列形成了强谐振效应,增强了其本构参数和滤波特性,使超表面表现出比传统天线更好的能量收集效率。在这两款设计的工作基础上,越来越多的WEH超表面单元结构得以设计提出,且有着更丰富的设计性能。由于环境射频能量分布于不同频段的不同信道,因而实现宽带能量收集意义显著。2015年,RAMAHI O等^[56]提出了一种互补SRR结构,以提高效率和带宽。这是一种受到蝴蝶结型谐振腔设计启发的基于接地互补型SRR单元组成的平面阵列,其半功率带宽比之前的工作提高了3倍。上海大学杨雪霞团队^[57]引入了由方环谐振器组成的宽带超表面WEH阵列,其半功率带宽达到110%(6.2~21.4 GHz)。然而,以上设计中谐振器结构过多的端口数量将增大阻抗匹配和加工难度,因而降低了实用性。

基于亚波长超表面单元的结构设计可实现多模谐振效应,有助于实现多频段WEH。通过布置四个围绕单元中心旋转对称的SRR结构,杨雪霞团队^[58]提出的结构在1.75 GHz、3.8 GHz和5.4 GHz分别实现了30%、90%和74%的射频收集效率。李龙团队^[59]提出了一种单通道三频段亚波长蝴蝶型超表面收集器,单元结构尺寸仅为 $0.08\lambda_0$,可以覆盖GSM(0.9 GHz)、LTE(2.7 GHz)和WiFi(5.7 GHz)频段,效率分别达到90%、83%以及81%。2019年,BAGCIF等^[60]提出了一款双层四频段超表面收集器,第一层超表面实现0.9 GHz与1.8 GHz的收集,第二层实现2.6 GHz的收集,而5.8 GHz的工作频段则取决于两层超表面的共同作用。

亚波长超表面单元一般具有紧凑化、小型化和旋转对称的结构特点,表现出极化不敏感和宽角入射的优点。SHANG S等^[61]提出了一种圆形SRR超表面阵列来实现极化选择性,当入射角范围在 $\pm 75^\circ$ 以内时,WEH效率均超过60%。为了提高实用性,一种结构简单紧凑的单频段环形超表面收集器以减少每个单元收集端口被提出^[62],并获得宽角入射和极化不敏感特性。2020年,GAO S等^[63]提出了一种新的设计,当入射角达到 $\pm 75^\circ$ 时,峰值收集效率仍可达到91%,且频率偏移率仅为0.19%。

近年来,更多新颖特性和多学科集成技术被引入到WEH超表面的设计中。像素化编码超表面设计^[64]可以改善端口阻抗的匹配,并自动实现收集效率的最优化。采用二维各向同性柔性材料进行超表面设计可以提高收集器与应用环境的共形能力^[65]。图7给出了超表面无线能量收集器单元设计的重要进展,表1列出了这些超表面设计的重要工作性能对比。

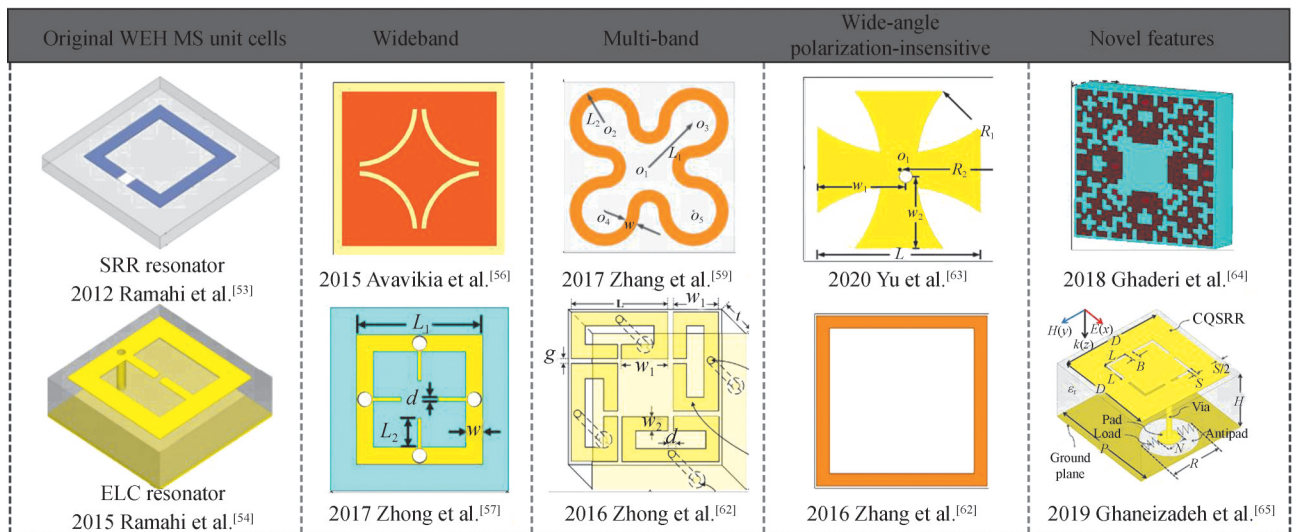


图7 超表面无线能量收集器的单元设计的重要进展
 Fig. 7 Research context and the significant progress of WEH metasurfaces

表1 近年来 WEH MSs 的重要工作性能对比
Table 1 Comparison of performances among different WEH metasurfaces

References (year)	Frequency /GHz	Metasurface	Periodicity metasurface size	Maximum harvesting efficiency	Remarks
[53] 2012	5.8	SRR	$0.18\lambda_0$ 9×9	76%	First introducing metasurface to WEH
[54] 2015	3	ELC resonator	$0.08\lambda_0$ 13×13	97%	Single band
[55] 2015	5.55	Complementary SRR	$0.34\lambda_0$ 11×11	92%	Wideband high efficiency
[57] 2017	6.2~21.4	Square ring resonator	$0.44\lambda_0$ 5×5	96%	Wideband polarization-insensitive
[59] 2017	0.9, 2.6, 5.7	Butterfly-type closed loop resonator	$0.08\lambda_0$ 7×7	90% at 0.9 GHz 83% at 2.6 GHz 81% at 5.7 GHz	Tri-band miniaturized wide-angle polarization-insensitive
[64] 2018	2.45, 6	Ring resonator and symmetric ELC resonator	$0.09\lambda_0$ 9×9	90%	Coding metasurface algorithm optimization
[65] 2019	5.33	Modified complementary SRR	$0.13\lambda_0$ 11×11	86%	Flexible ultra-thin
[63] 2020	5.8	Centrally symmetrical circular sectors surrounded by metal vias	$0.29\lambda_0$ 5×5	91%	Frequency stability wide-angle polarization-insensitive

2.2 超材料整流天线及整流超表面

基于电磁超表面设计的射频能量收集器可以匹配 WEH 所需的诸多特性,但还需要结合整流的实施才得以完成能量收集的完整功能链路。BROWN W C 于 20 世纪 70 年代首次提出了整流天线的概念^[7],即实现用于射频接收的天线与实现射频-直流(Radio Frequency-Direct Current, RF-DC)转换的整流电路的协同设计。沿此路线,一些研究工作也开始尝试将超材料/超表面引入到整流天线的设计之中^[66-69],致力于通过超材料的奇异物理特性实现整流天线的小型化、多频段,并提升天线与整流之间的阻抗匹配。2013 年, HAWKES A M 等^[70]提出了一款如图 8(a)所示的集成整流功能的 5×1 SRR 线阵能量收集器,该设计工作

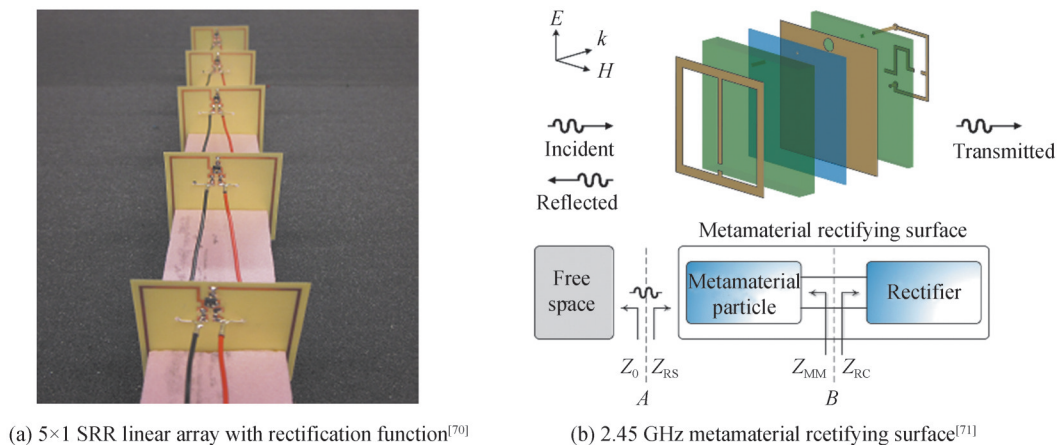


图8 超材料整流天线设计举例
Fig. 8 Design examples of metamaterial rectifying antennas

于 900 MHz,在射频输入功率为 24 dBm 时实现了 36% 的 RF-DC 转换效率。2020 年,ZIOLKOWSKI R W 等提出了一款基于复合左右手传输线技术的小型化双频整流天线^[69],相对于低频 2.5 GHz 电尺寸仅为 $0.36 \times 0.2 \times 0.00049 \lambda_0^3$,在 2.5 GHz 和 3.6 GHz 分别实现 59% 和 41% 的整流效率。

将 WEH 超表面与整流电路进行协同设计,这方面的工作也吸引了不少关注。2016 年,南京信息工程大学文舸一团队^[71]提出了一款三层结构的超表面无线能量收集器,单元结构如图 8(b) 所示。基于 ELC 谐振器组成一个 8×8 的射频接收阵列,再通过一个 64 路合路器连接整流电路,该设计在 2.45 GHz 实现了 67% 的整流效率(射频输入 10 dBm)。同年,四川大学陈星团队^[72]提出一种基于 ELC 谐振器单元的 6×6 的双层超表面收集器,该设计舍弃了合路器结构从而降低了结构层数与剖面,在每个超表面单元的背面刻蚀整流电路,在 5 mW/cm^2 射频输入功率密度条件下于 2.45 GHz 实现了 66.9% 的整流效率。

对于整流天线阵列而言,不可避免地会引入射频合路网络或直流合成网络,不仅给阻抗匹配网络的设计增加难度,且会带来更多损耗和制造误差。此外,连接器的存在使整体结构共形能力不足,难以满足紧凑、小型化、平面化应用场景需求。一种新颖有效的解决方案是将超表面与整流二极管共面集成设计,以提高无线能量收集器的整体性能,即整流超表面或整流表面。2014 年,KEYROUZ S 等^[73]最早提出了一种移除匹配网络的设计,直接将整流二极管集成于频率选择表面阵列的无线能量收集器,如图 9(a) 所示。在射频收集、直流转化功能共面集成的基础上,该设计具备极化不敏感特性,在 -6 dBm 的射频输入下,获得了 25% 的辐射-直流转换效率。同年,WANG R 等^[74]提出了一款面向空间太阳能卫星应用的共面最优匹配的整流表面,其采用嵌有整流二极管的“T”型超表面单元进行组阵,在 2.18 GHz 获得了约 28% 的辐射一直流转换效率(射频输入 0 dBm)。

早期的整流表面的设计工作虽然实现了结构上的创新,但显然整体效率较低。2017 年,比利时布鲁塞尔大学 TÉKAM G T O 等^[75]提出了一种集成二极管的“Cut-wire”型单层超表面收集器,如图 9(b),在 6.75 GHz 可以获得 50% 的辐射-直流转换效率(射频输入 0 dBm)。但该结果是基于仿真计算得出的,未能得到实测的论证。2020 年,一种工作在 2.45 GHz 的整流超表面被提出^[76],其结构由改进型 ELC 单元和整流电路分别双面刻蚀构成,在 0.4 dBm 的输入功率下,可以将辐射-直流转换效率提升到 76.8%。

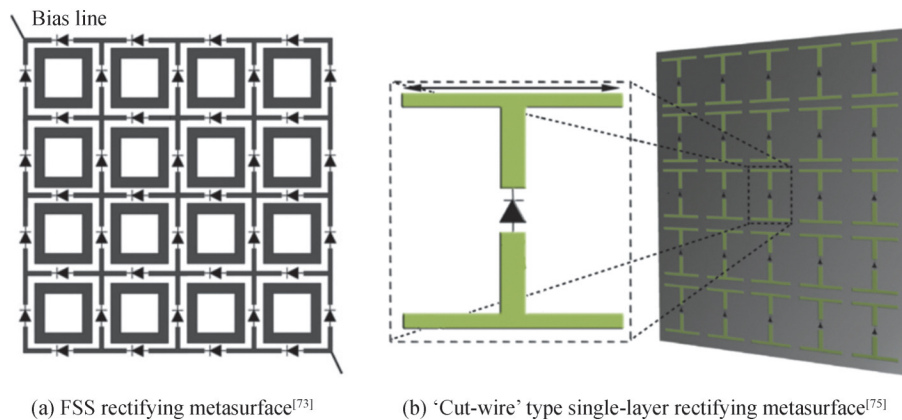
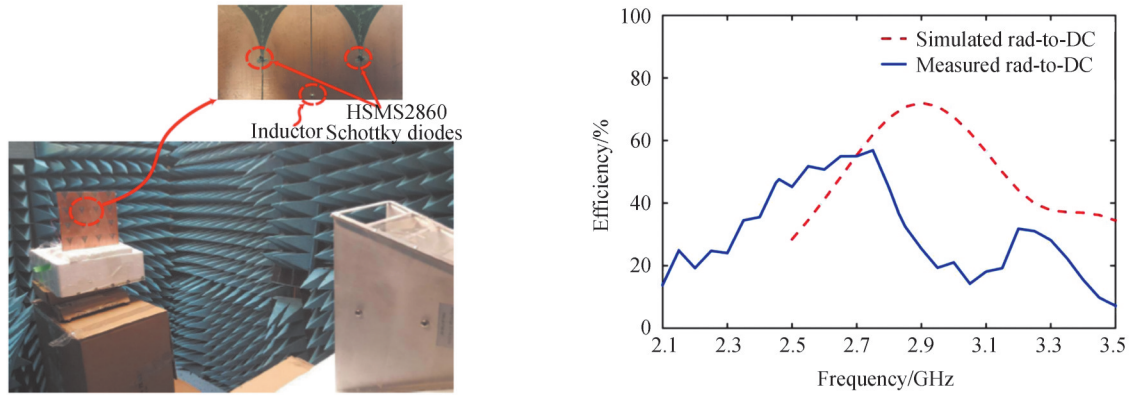


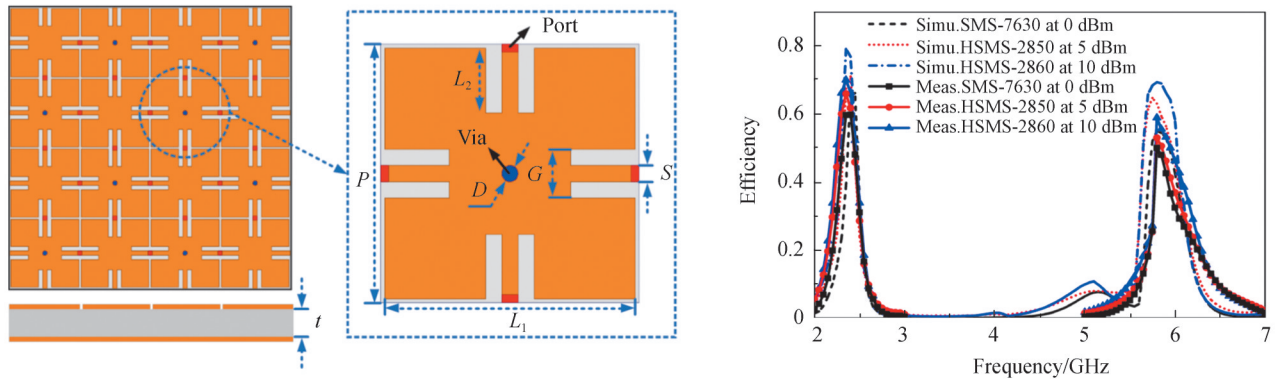
图9 早期整流超表面设计举例

Fig. 9 Early examples of rectifying metasurface designs

近年来,RAMAHI O 团队发表了一些关于整流表面的研究工作^[77-81],采用了多种不同的谐振器单元结构与整流二极管进行共形集成,包括紧耦合天线单元、偶极子单元以及频率选择表面等。移除了匹配网络,在紧凑化设计基础上,最高可实现 76% 的辐射一直流转换效率^[79]。2020 年,在 1.9 GHz 将这一效率提升至 80%,且对应的射频输入功率仅为 -5 dBm^[82]。但值得注意的是,只有阵列中央的 2×2 的单元区域具备整流功能,而非整个完整的 8×8 阵列都可实现辐射一直流转化。2021 年,李龙团队^[83]提出了一种双频段、宽角、极化不敏感、紧凑、小型化的整流超表面,在实现完全移除匹配网络和合路网络的基础上,在 2.4 GHz 和 5.8 GHz 的射频-直流转换效率分别为 79% 和 69%,如图 10 所示。



(a) The prototype and the measured radiation-DC conversion efficiency of the rectifying metasurface based on the tightly coupled antenna element^[79]



(b) The structure diagram and measured radiation-DC conversion efficiency of the dual-band miniaturized rectifying metasurface based on PBG element^[83]

图 10 近期整流超表面设计举例

Fig. 10 Recent examples of rectifying metasurface designs

3 研究展望

本文系统地回顾了电磁超材料和超表面在微波无线传能领域的主要关键技术和研究进展,即在发射端实现微波波束的高效汇聚传输,在接收端替代传统天线进行高效能量收集。在WPT和WEH中,超材料扮演的角色和运用的技术原理不同。表2对两者之间的异同进行了对比。虽然WPT和WEH共同追求高效

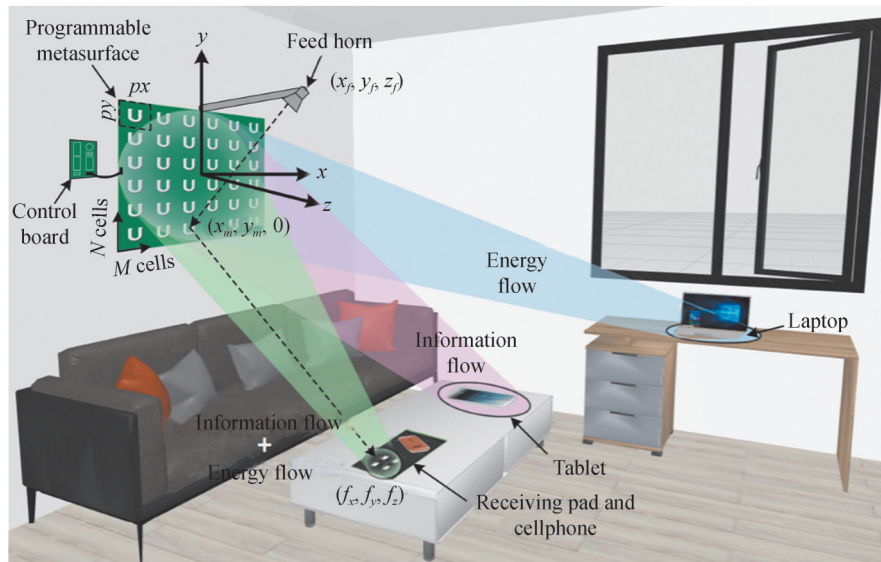
表 2 微波 WPT 和 WEH 的详细比较

Table 2 Detailed comparison of microwave WPT and WEH

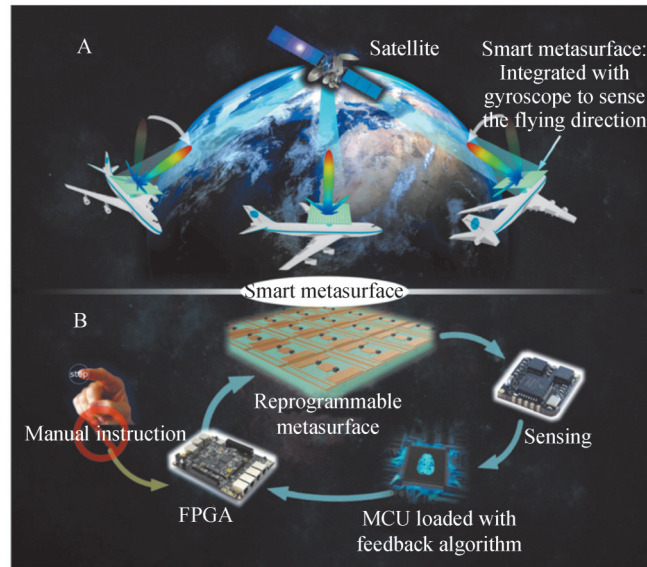
	WPT	WEH
Main requirement	High energy transmission and conversion efficiency	
Application scenarios	Mid to high power devices	Low power sensors
Transmitting-receiving	Point-to-point	Space-to-point
Operating frequency	Dedicated narrowband	Communication bands, ISM bands, etc. wideband/multi-band
Radiation pattern	High gain/directivity	Wide incident angle (omni-directivity)
Polarization requirement	Alignment	Polarization insensitive
Required characteristics of metasurface	Amplitude, phase, and wavefront regulation of metasurface unit	Harvest wireless energy Multimode resonance effect of metasurface array
Future directions with metasurface	Adaptive, programmable, intelligent regulation Simultaneous wireless information and power transfer	Rectifying metasurface Hybrid energy harvesting for energy Autonomous of WSN

率,但两者在技术需求上存在差异。相对而言,WPT面向中高功率应用,是点对点、极化对准的,工作在特定的窄带频段,要求天线方向图呈现高定向性。在聚焦无线传能应用中,引入了超表面并基于其幅相调节特性实现了对波束的自适应控制。另一方面,WEH主要收集环境射频功率,是空间对点的,因此需要天线方向图呈现全向特性。环境射频功率离散地分布在通信频段和工业科学医学(Industrial Scientific Medical, ISM)频段的不同信道中,从数百MHz到数GHz,因而无线能量收集器应具有宽带或多频段特性。此外,环境电磁波通常伴随着不同的极化状态,要求无线能量收集器具有极化不敏感特性。此外,为满足应用端无线传感网络的实际需求,无线能量收集器应具备平面化、低剖面和小型化的结构特征。基于亚波长单元紧密排列、基于多模谐振效应的超表面收集器可完美解决以上需求。

值得注意的是,目前环境射频能量的功率量级较低,在通信基站和WiFi路由器等有源设备附近区域外,往往只有 $-50\sim-40$ dBm的分布^[84-85],显然难以满足无线传感网络的终端需求。因而一项值得期待的技术是实现环境混合能量的收集^[86-88],包括太阳能、风能、热能、动能等。如何基于电磁超表面技术实现与其他环境能源收集器的共形设计与协同工作值得进一步探索。对于微波无线传能技术而言,下一步研究将基于可编程、可重构超材料/超表面技术,实现对无线传能实时、自适应、智能化的调控。数字编码和可编程超材料自2014年首次提出以来发展迅速,兼顾了丰富高效的电磁调控性能与可控的实现成本,目前已在波束赋形^[89-92]、极化调控^[93-94]、微波成像^[95-96]和无线通信^[97-98]方面显示出强大的实时控制能力。进一步集成传感器和自适应算法或机器学习技术,还可实现智能可编程超表面的应用设备^[99-101]。使用“0”和“1”二进制编码来表征不同的电磁响应,将电磁调控设计理论从等效媒介转变为数字编码,桥接了物理世界和数字信息世界。更加引人注目的是,数字编码超材料引入数字化直接交互和操作,同时实现了对电磁场的信息处理与功率传输。因而,借助于信息超材料技术,电磁场的信息流与能量流得以实现协同调控,获得一个统一的无线能源和信息系统。在通信领域,这项研究被称为携能通信技术(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)^[99-103],如图11所示;在电磁场与无线传能领域,这方面的研究尚处于起步阶段,有待进一步开拓。



(a) Concept map of SWIPT technology based on smart metasurface in smart home applications^[42]



(b) Concept map of applications and closed-loop system of smart metasurface technology in future SWIPT network^[99]

图 11 智能超表面在未来的应用展望

Fig. 11 Future applications of smart metasurfaces

4 结论

电磁超材料和超表面的引入,为微波无线传能与射频能量收集的关键技术突破和实用化进程注入了强大的动力。当前,电磁超材料和超表面技术主要用于为无线功率传输与能量收集系统实现尺寸减小、效率提升、性能丰富等基本效用。下一步,将基于现场可编程和可重构的信息超材料技术,其动态、自适应和智能的调控手段将实现对电磁波的信息流与能量流的协同控制,从而实现携能通信技术,打造能信一体化的综合系统,为5G/6G通信和万物互联的时代提供全新的技术范式。

参考文献

- [1] GARNICA J, CHINGA R A, LIN J. Wireless power transmission: from far field to near field [J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1321-1331.
- [2] SHINOHARA N. Power without wires [J]. IEEE Microwave Magazine, 2011, 12(7): 64-73.
- [3] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [4] ZHANG Z, PANG H, GEORGIADIS A, et al. Wireless power transfer—an overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1044-1058.
- [5] MUSAVI F, EBERLE W. Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging [J]. IET Power Electronics, 2014, 7(1): 60-66.
- [6] TANG Liang, ZHONG Yuanchang, ZHANG Chengxiang, et al. Research situation and development trend of laser wireless power transmission key technology [J]. Laser Journal, 2017, (10): 28-32.
唐亮, 仲元昌, 张成祥, 等. 激光无线传能关键技术研究现状及发展趋势 [J]. 激光杂志, 2017, (10): 28-32.
- [7] BROWN W C. The history of power transmission by radio waves [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(9): 1230-1242.
- [8] BROWN W C. Adapting microwave techniques to help solve future energy problems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 21(12): 753-763.
- [9] GLASER P E. Power from the sun: its future [J]. Science, 1968, 162(3856): 857-886.
- [10] DUAN B Y. The updated ssps-omega design project and the latest development of China [C]. 2019 Asian Wireless Power Transfer Workshop (AWPT2019), October 31-November 2, 2019, Xi'an China.
- [11] MORABITO I G. The internet of things: a survey [J]. Computer Networks, 2010, 54(15): 2787-2805.
- [12] PRIYA S, INMAN D J. Energy harvesting technologies [M]. Springer US, 2009.
- [13] KIM S, VYAS R, BITO J, et al. Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(11): 1649-1666.
- [14] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics

- Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [15] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [16] YU N, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [17] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [18] ZHAO J, YANG X, DAI J Y, et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems [J]. National Science Review, 2019, 6(2): 231-238.
- [19] SHERMAN J, III. Properties of focused apertures in the Fresnel region [J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1962, 10(4): 399-408.
- [20] HANSEN R C. Focal region characteristics of focused array antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985, 33(12): 1328-1337.
- [21] SHAFAI L, KISHK A A, SEBAK A. Near field focusing of apertures and reflector antennas [C]. Proceedings of the 1997 IEEE WESCANEX 97 Conference on Communications, Power and Computing, May 1997, Winnipeg, MB, Canada.
- [22] BOR J, CLAUZIER S, LAFOND O, et al. 60GHz foam-based antenna for near-field focusing [J]. Electronics Letters, 2015, 50(8): 571-572.
- [23] BUFFI A, NEPA P, MANARA G. Design criteria for near-field-focused planar arrays [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(1): 40-50.
- [24] STEPHAN K D, MEAD J B, POZAR D M, et al. A near field focused microstrip array for a radiometric temperature sensor [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(4): 1199-1203.
- [25] TOFIGH F, NOURINIA J, AZARMANESH M N, et al. Near-field focused array microstrip planar antenna for medical applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13(13): 951-954.
- [26] SIRAGUSA R, LEMAITRE-AUGER P, TEDJINI S. Tunable near-field focused circular phase-array antenna for 5.8-GHz RFID applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10(1): 33-36.
- [27] MININ I V, MININ O V. Basic principles of Fresnel antenna arrays [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [28] KARIMKASHI S, KISHK A A. Focusing properties of Fresnel zone plate lens antennas in the near-field region [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(5): 1481-1487.
- [29] MEZ-TORNERO J L G, BLANCO D, RAJO-IGLESIAS E, et al. Holographic surface leaky-wave lenses with circularly-polarized focused near-fields—part I: Concept, design and analysis theory [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(7): 3475-3485.
- [30] MART NEZ-ROS A J, MEZ-TORNERO J LG, MONZ-CABRERA J. Microwave near-field focusing properties of width-tapered microstrip leaky-wave antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(6): 2981-2990.
- [31] XU H, HU G, HAN L, et al. Chirality-assisted high-efficiency metasurfaces with independent control of phase, amplitude, and polarization [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(4): 1801479.
- [32] CHOU H, HUNG T, WANG N, et al. Design of a near-field focused reflectarray antenna for 2.4 GHz RFID reader applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(3): 1013-1018.
- [33] ZHANG S, KIM M H, AIETA F, et al. High efficiency near diffraction-limited mid-infrared flat lenses based on metasurface reflectarrays [J]. Optics Express, 24(16): 18024-18034.
- [34] WU X, XIA X, TIAN J, et al. Broadband reflective metasurface for focusing underwater ultrasonic waves with linearly tunable focal length [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(16): 163502.
- [35] YURDUSEVEN O, YE S, FROMENTEZE T, et al. 3D conductive polymer printed metasurface antenna for Fresnel focusing [J]. Designs, 2019, 3(3): 1-4.
- [36] YU S, LIU H, LI L. Design of near-field focused metasurface for high-efficient wireless power transfer with multi-focus characteristics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3993-4002.
- [37] ZHANG P, LI L, LIU H, et al. Design, measurement and analysis of near-field focusing reflective metasurface for dual-polarization and multi-focus wireless power transfer [J]. IEEE Access, 2019, 7: 110387-110399.
- [38] XU H, MA S, LUO W, et al. Aberration-free and functionality-switchable meta-lenses based on tunable metasurfaces [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(19): 193506.
- [39] YURDUSEVEN O, MARKS D L, GOLLUB J N, et al. Design and analysis of a reconfigurable holographic metasurface aperture for dynamic focusing in the Fresnel zone [J]. IEEE Access, 2017, 5: 15055-15065.
- [40] MA Q, CUI T. Information metamaterials: bridging the physical world and digital world [J]. PhotonIX, 2020, 1(1):1.
- [41] CUI T, LIU S, LI L. Information entropy of coding metasurface [J]. Light: Science and Applications, 2016, 5(11):

- e16172.
- [42] HAN J, LI L, MA X, et al. Adaptively smart wireless power transfer using 2-bit programmable metasurface [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68, doi: [10.1109/TIE.2021.3105988](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3105988).
- [43] HASSAN M A, KISHK A A. Optically transparent reflectarray antenna design integrated with solar cells [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(5): 1700–1712.
- [44] AN W, XU S, YANG F, et al. A Ka-band reflectarray antenna integrated with solar cells [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(11):5539–5546.
- [45] OUTALEB N, PINEL J, DRISSI M, et al. Microwave planar antenna with RF-pattered indium tin oxide films [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000, 24(1): 3–7.
- [46] KATSOUNAROS A, HAO Y, COLLINGS N, et al. Optically transparent antenna for ultra wide-band applications [C]. *Proceedings of the 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, Mar. 2009 Berlin, Germany, 2009.
- [47] ZHANG C, YANG J, CAO W, et al. Transparently curved metamaterial with broadband millimeter wave absorption [J]. *Photonics Research*, 2019(4):478–485.
- [48] HONG B, MA Q, BAI G, et al. Optically transparent coding metasurfaces based on indium tin oxide films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(2):023102.
- [49] ZHAO J, ZHANG C, CUI T, et al. An optically transparent metasurface for broadband microwave antireflection [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(7): 073504.
- [50] SONG G, ZHANG C, CUI T. Transparent coupled membrane metamaterials with simultaneous microwave absorption and sound reduction [J]. *Optical Express*, 2018, 26(18): 22916.
- [51] LI L, ZHANG P, CHENG F, et al. An optically transparent near-field focusing metasurface [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(4): 2015–2027.
- [52] BOSQUESPADILLA F J, LANDY L N, SMITH W K, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20):207402.
- [53] RAMAHI O M, ALMONEEF T S, ALSHAREEF M, et al. Metamaterial particles for electromagnetic energy harvesting [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(17): 173903.
- [54] ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Metamaterial electromagnetic energy harvester with near unity efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(15): 153902.
- [55] ALAVIKIA B, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Complementary split ring resonator arrays for electromagnetic energy harvesting [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(3):033902.
- [56] ALAVIKIA B, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Wideband resonator arrays for electromagnetic energy harvesting and wireless power transfer [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(24): 243902.
- [57] ZHONG H, YANG X, SONG X, et al. Wideband metamaterial array with polarization-independent and wide incident angle for harvesting ambient electromagnetic energy and wireless power transfer [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(21):213902.
- [58] ZHONG H, YANG X, TAN C, et al. Triple-band polarization-insensitive and wide-angle metamaterial array for electromagnetic energy harvesting [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(25):253904.
- [59] ZHANG X, LIU H, LONG L, et al. Tri-band miniaturized wide-angle and polarization-insensitive metasurface for ambient energy harvesting [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(7): 071902.
- [60] KARAKAYA E, BAGCI F, YILMAZ A E, et al. Metamaterial-based four-band electromagnetic energy harvesting at commonly used GSM and Wi-Fi frequencies [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 48(4): 2307–2316.
- [61] SHUAI S, YANG S, JING L, et al. Metamaterial electromagnetic energy harvester with high selective harvesting for left- and right-handed circularly polarized waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(4): 045106.
- [62] ZHANG X, LIU H, LI L. Electromagnetic power harvester using wide-angle and polarization-insensitive metasurfaces [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(4): 497.
- [63] YU F, HE G, YANG X, et al. Polarization-insensitive metasurface for harvesting electromagnetic energy with high efficiency and frequency stability over wide range of incidence angles [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(22): 8047.
- [64] GHADERI B, NAYYERI V, SOLEIMANI M, et al. Pixelated metasurface for dual-band and multi-polarization electromagnetic energy harvesting [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 13227.
- [65] GHANEIZADEH A, MAFINEZHAD K, JOODAKI M. Design and fabrication of a 2D-isotropic flexible ultra-thin metasurface for ambient electromagnetic energy harvesting [J]. *AIP Advances*, 2019, 9(2): 025304.
- [66] DUAN X, XING C, ZHOU Y, et al. Wideband metamaterial electromagnetic energy harvester with high capture efficiency and wide incident angle [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(9): 1617–1621.
- [67] CHANDRASEKARAN K T, AGARWAL K, NASIMUDDIN, et al. Compact dual-band metamaterial-based high-efficiency rectenna: an application for ambient electromagnetic energy harvesting [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2020, 62(3): 18–29.

- [68] FERREIRA D, SISMEIRO L, FERREIRA A, et al. Hybrid FSS and rectenna design for wireless power harvesting [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(5): 2038–2042.
- [69] ZHU N, ZIOLKOWSKI R W, XIN H. A metamaterial-inspired, electrically small rectenna for high-efficiency, low power harvesting and scavenging at the global positioning system L1 frequency [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(11): 114101.
- [70] HAWKES A M, KATKO A R, CUMMER S A. A microwave metamaterial with integrated power harvesting functionality [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(16): 163901.
- [71] XU P, WANG S, WEN G. Design of an effective energy receiving adapter for microwave wireless power transmission application [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(10):105010.
- [72] DUAN X, CHEN X, ZHOU L. A metamaterial electromagnetic energy rectifying surface with high harvesting efficiency [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(12):125020.
- [73] PEROTTO G, KEYROUZ S, VISSER H J. Frequency selective surface for radio frequency energy harvesting applications [J]. *IET Microwaves Antennas and Propagation*, 2014, 8(7): 523–531.
- [74] WANG R, YE D, DONG S, et al. Optimal matched rectifying surface for space solar power satellite applications [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, 62(4): 1080–1089.
- [75] TEKAM G T O, GINIS V, DANCKAERT J, et al. Designing an efficient rectifying cut-wire metasurface for electromagnetic energy harvesting [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(8): 083901.
- [76] LEE K, HONG S K. Rectifying metasurface with high efficiency at low power for 2.45 GHz band [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(12): 2216–2220.
- [77] BADAWE M, ALMONEEF T S, RAMAHZ O M, et al. A metasurface for conversion of electromagnetic radiation to DC [J]. *AIP Advances*, 2017, 7(3): 035112.
- [78] ERKMEN F, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Scalable electromagnetic energy harvesting using frequency-selective surfaces [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(5): 2433–2441.
- [79] ALMONEEF T S, ERKMEN F, ALOTAIBI M A, et al. A new approach to microwave rectennas using tightly coupled antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(4): 1714–1724.
- [80] ASHOOR A Z, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. A planar dipole array surface for electromagnetic energy harvesting and wireless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 66(3): 1553–1560.
- [81] ASHOOR A Z, RAMAHI O M. Polarization-independent cross-dipole energy harvesting surface [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(3): 1130–1137.
- [82] ALDHAEABI M, ALMONEEF T. Highly efficient planar metasurface rectenna [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 214019–214029.
- [83] LI L, ZHANG X, SONG C, et al. Compact dual-band, wide-angle, polarization-angle-independent rectifying metasurface for ambient energy harvesting and wireless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(3): 1518–1528.
- [84] PINUELA M, MITCHESON P D, LUCYSZYN S. Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(7): 2715–2726.
- [85] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2015, 17(2): 757–789.
- [86] NIOTAKI K, COLLADO A, GEORGIADIS A, et al. Solar/electromagnetic energy harvesting and wireless power transmission [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(11): 1712–1722.
- [87] BITO J, BAHR R, HESTER J G, et al. A novel solar and electromagnetic energy harvesting system with a 3D printed package for energy efficient internet-of-things wireless sensors [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(5): 1831–1842.
- [88] ZHANG Y, SHEN S, CHIU C, et al. Hybrid RF-solar energy harvesting systems utilizing transparent multiport micro-meshed antennas [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(11): 4534–4546.
- [89] ZHANG L, CHEN Q, LIU S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces [J]. *Nature Communications* 2018, 9: 4334.
- [90] ZHANG L, WANG Z, SHAO R, et al. Dynamically realizing arbitrary multi-bit programmable phases using a 2-bit time-domain coding metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2020, 68(4): 2984–2992.
- [91] YANG H, CAO X, YANG F, et al. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35692.
- [92] LIU G, LI L, HAN J, et al. Frequency-domain and spatial-domain reconfigurable metasurface [J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2020, 12(20): 23554–23564.
- [93] MA Q, HONG Q, BAI G, et al. Editing arbitrarily linear polarizations using programmable metasurface [J]. *Physics Review Applied*, 2020, 13(2): 021003.
- [94] MA Q, SHI C, BAI G, et al. Beam-editing coding metasurfaces based on polarization bit and orbital-angular-momentum-

- mode bit [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5:1700548.
- [95] HAN J, LI L, TIAN S, et al. Millimeter-wave imaging using 1-bit programmable metasurface: Simulation model, design, and experiment[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2020, 10(1): 52-61.
- [96] LI L, CUI T, JI W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2017, 8:197.
- [97] TANG W, CHEN M, DAI J, et al. Wireless communications with programmable metasurface: New paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 180-187.
- [98] ZHAO H, SHUANG Y, WEI M, et al. Metasurface-assisted massive backscatter wireless communication with commodity Wi-Wi signals[J]. *Nature Communications*, 2020, 11:3926.
- [99] MA Q, BAI G, JING H, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8:98.
- [100] LI L, SHUANG Y, MA Q, et al. Intelligent metasurface imager and recognizer[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8:97.
- [101] LI L, RUAN H, LIU C, et al. Machine-learning reprogrammable metasurface imager[J]. *Nature Communications*, 2019, 10:1082.
- [102] CLERCKX B, ZHANG R, SCHOBER R, et al. Fundamentals of wireless information and power transfer: from rf energy harvester models to signal and system designs[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 4-33.
- [103] BI S, HO C, ZHANG R. Wireless powered communication: opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(4): 117-125.