《国际电子学杂志》，
2015http://dx.doi.org/10.1080/00207217.2014.996784

百瓦级S波段近场微波磁控管功率传输系统的实验研究

Biao Zhang、Wan Jiang、Yang Yang、Chengyang Yu、Kama Huang和Changjun Li u*

四川大学电子与信息工程学院，中国成都 610064

（2014年1月5日收到；2014年10月26日接受）

本文介绍了一种多磁控管微波源、一副超材料发射天线和一个大功率整流天线阵列，用于构建近场2.45 GHz微波功率传输系统。该1 m方形整流天线阵列由16个整流天线组成，配备2048个肖特基二极管，用于大功率微波整流。该阵列接收微波功率并将其转换为直流功率。本文详细介绍了单元整流天线及整个整流天线阵列的设计、结构和实测性能。多磁控管微波功率源可在半功率和全功率输出之间切换，即半波和全波模式。发射天线由双层金属孔阵列构成，用于合并各磁控管的输出功率。在距发射天线5.5 m处，整流天线阵列在1.2 Ω 直流负载上实现了67.3 W的直流输出功率。直流输出功率受距离、直流负载和微波功率源工作模式的影响。研究表明，传统的低功率肖特基二极管可用于采用简单磁控管的微波功率传输系统，从而实现大功率微波整流。

关键词：微波整流；微波功率传输；整流天线；近场

1. 引言

微波功率传输（MPT）（Brown，1984）是无线功率传输（WPT）的一项关键技术。由于具有损耗低、功率大、可全天候工作等优点，该技术已得到广泛研究。微波功率传输系统通过微波或激光以无线方式传输电能。微波频段位于大气无线电窗口内，电磁辐射在此频段传播时损耗较低。随着磁控管和大功率固态器件技术的发展，微波输出功率迅速提高，使微波功率传输系统更接近实际应用。

近期，已有研究报道了几种具有线偏振和圆偏振、形状各异的整流天线（Olgun、Chen 和 Volakis，2011；Strassner & Chang，2002；Strassner & Chang，2003）。这些研究大多聚焦于单个整流天线，或在固定传输距离下工作的低功率整流天线阵列。在微波功率传输系统中，至少达到瓦级功率的整流天线阵列具有实用价值（He 和 Liu，2009）。功率容量主要取决于整流天线中使用的二极管。肖特基二极管是一种常用的整流二极管。然而，肖特基二极管的功率容量较低，限制了其在大功率条件下的应用。除了功率容量之外，传输距离也是影响系统传输效率和直流输出功率的另一个重要因素。

*通讯作者。电子邮件：cjliu@ieee.org

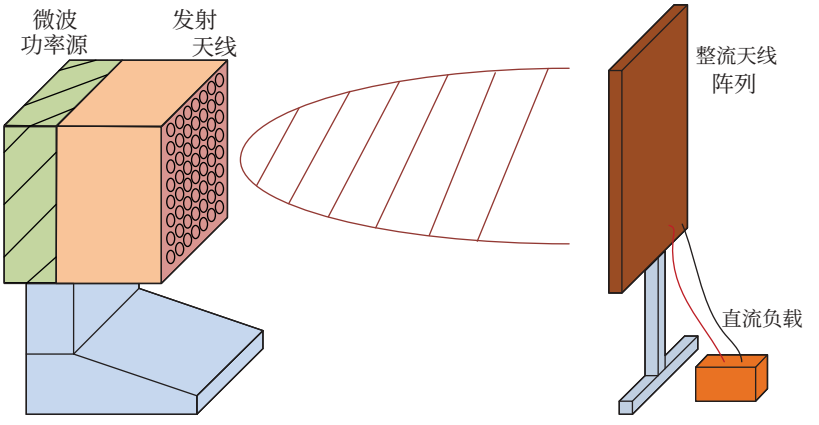


图1。微波功率传输系统的配置。

如图1所示，由微波功率源、发射天线、整流天线阵列和直流负载组成的微波功率传输系统（Shinohara & Matsumoto，1998）能够实现微波功率从一个地点到另一个地点的无线传输。整流天线阵列接收传输的功率并将其转换为直流功率。在接收系统中，整流天线是关键组件，决定了整个系统的功率容量和微波到直流转换效率。整流天线通常由接收微波功率的天线和将微波功率转换为直流功率的整流器组成。本文提出的设计表明，单个整流天线能够输出11.4瓦直流功率，微波到直流转换效率达到55%。

为提升微波功率传输系统的功率容量，本文采用了一些改进措施，将多磁控管微波功率源和超材料发射天线应用于微波功率传输。为微波功率传输系统构建了一个工作于 2.45 GHz 的大功率方形整流天线阵列。该阵列尺寸为 1 m^2 ，由 16 个整流天线组成，共包含 2048 个肖特基二极管。多磁控管微波功率源可在半功率和全功率输出模式之间切换。在距离发射天线 5.5 m 处，整流天线阵列连接 1.2 Ω 直流负载时，直流输出功率达到 67.3 W。直流输出功率受距离、直流负载和微波功率源工作模式的影响。结果表明，传统低功率肖特基二极管可与简单磁控管配合，用于微波功率传输系统，实现大功率微波整流。

2. 微波源与发射天线

微波源由四个磁控管和四个喇叭天线组成。四个磁控管输出的微波功率由喇叭天线前方的超材料透镜合成。该超材料透镜由用于高功率微波应用的双层金属孔阵列构成（Liu、Yang和Huang，2013年）。通过增大超材料的有效电子质量，可将有效等离子体频率降低至微波频段（Pendry、Holden和Robbins，1998）；而材料的有效介电常数同时取决于工作频率和有效等离子体频率。当工作频率接近有效等离子体频率时，有效介电常数接近

零（Pendry等人，1998），双层金属孔阵列因此等效为零折射率材料（图2）。

在实验中，采用四个分别由四个独立高压电源供电的松下2M244-M1磁控管，以及四个15 dBi喇叭天线，作为微波源和发射天线。高压交流电源的频率为50 Hz，磁控管通常仅在正半周期内工作。图3 显示了一个2.45 GHz炉用磁控管的典型频谱（Mitani、Kawasaki、Shinohara和Matsumoto，2009）。在正常工作条件下，磁控管无法获得高质量的频谱，这意味着频率并不稳定。

通过测试天线方向图，与未采用超材料的情况相比，2.47 吉赫时半功率波束宽度从28°减小至15°，增益提高了1.7 dB（Liu等，2013年）。高增益和较小的半功率波束宽度可提高传输效率，并减小接收整流天线阵列的面积。

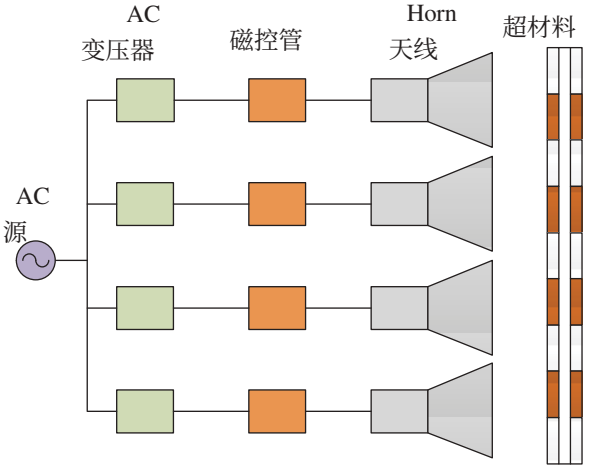


图2. 发射天线示意图。

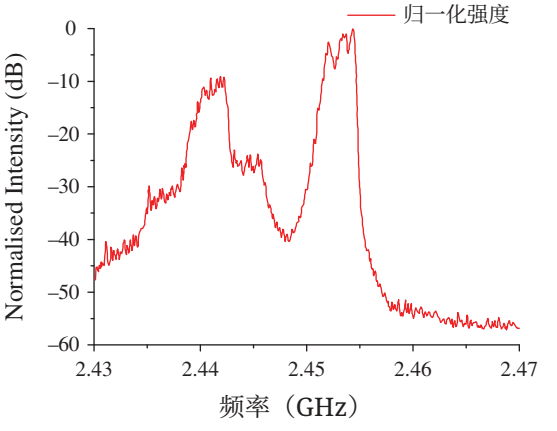


图3. 2.45 GHz炉用磁控管的典型频谱。

3. 微波功率传输系统的整流天线

针对近场微波功率传输系统，开发了一种新型集中式整流天线。该整流天线由一副微带网格阵列天线和一个集中式整流器组成，后者包含32个HSMS-282P二极管桥，以提高功率容量；二者通过 50 Ω同轴电缆的内导体连接。图4展示了集中式整流天线的透视图。该整流天线采用多层结构，由天线层、空气层、接地层和电路层组成。在天线层与空气层之间，以及接地层与电路层之间，分别插入两块介电常数为2.65、厚度为1 mm的F4B-2介质基板。 50 Ω 同轴电缆的内导体穿过中间层，将顶部的天线层与底部的电路层连接起来。

3.1. 接收天线

微带网格阵列天线（Kraus & Marhefka，2002）由 7 个矩形贴片组成，每个贴片通过微带线连接，以匹配阻抗并传输功率。天线通过一点馈电，采用 50 Ω 同轴电缆馈电，其内导体穿过接地平面上的孔，外导体则与接地平面相连。图5 展示了栅格阵列天线的照片，图6 展示了测得的 $|S_{11}|$ 参数和天线方向图。天线在 2.45 GHz 频率处的回波损耗为 20 dB，半功率波束宽度（HPBW）为 25°。

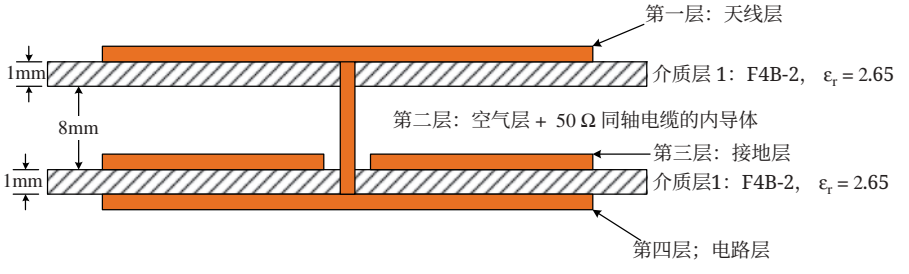


图4. 多层结构整流天线的透视图。

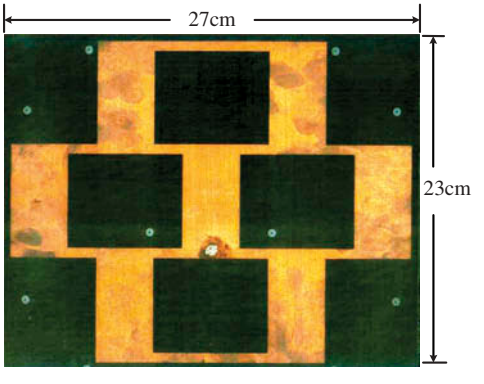


图5. 网格阵列天线的照片。

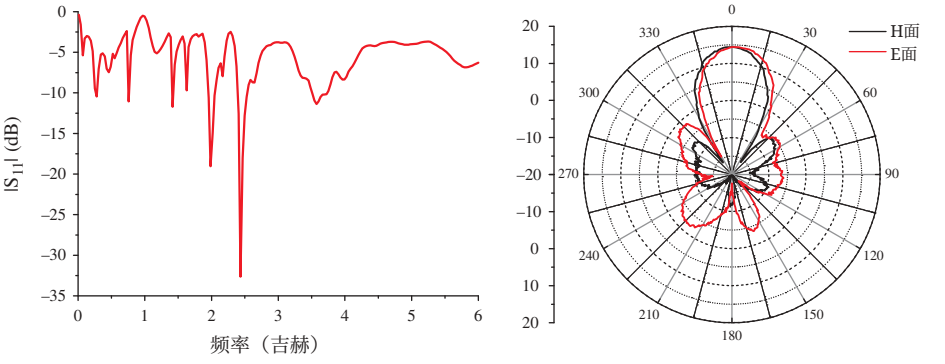


图6. 接收天线的回波损耗和方向图。

3.2. 整流电路

图 9(a) 展示了集中式整流电路的照片。该电路包含八个支路，通过一个 9 dB 功率分配器连接到中心馈电点。每个支路采用四个 HSMS-282P 肖特基二极管桥进行整流，每个 HSMS-282P 二极管桥封装了 4 个 HSMS-282 内部肖特基二极管。对于 9 dB 功率分配器，输入端口和输出端口之间的传输系数约为–9 dB，插入损耗小于 0.3 dB；输入端口的反射系数小于 –25 dB，且在 2.45 GHz 时各输出端口之间的隔离度大于 18 dB。对于每个支路，如图 7所示，在 30 dBm 微波输入功率下，最高转换效率为 69%（Zhang、Zhao、于、Huang 和 Liu，2011）。为避免各支路的二极管过热，设计中在二极管之间加入了两段半波长微带线，以将二极管彼此隔开。半波长微带线可将一个端口的阻抗复制到另一个端口（Pozar，2005）。

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \tag{1}$$

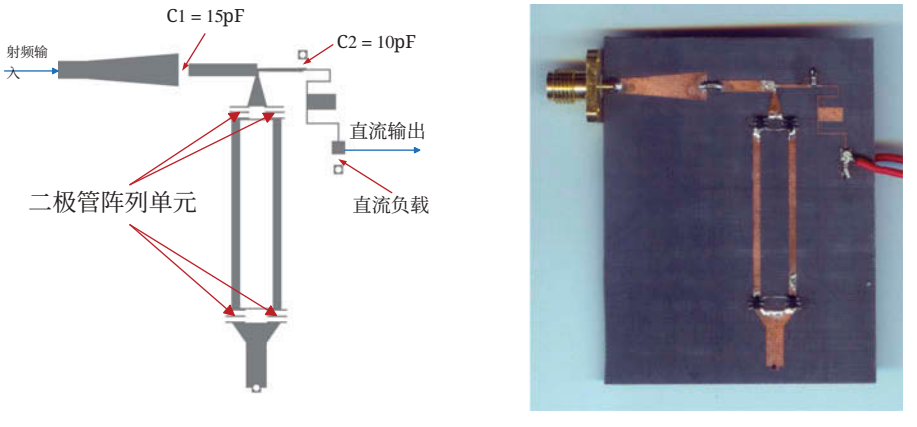


图 7. 支路电路的布局和照片。

其中，Z_{in} 为输入阻抗，Z_0 为传输线特性阻抗，Z_L 为负载阻抗，β 为传播常数。

当 $l = \lambda/2$时，公式（1）表明

$$Z_{in} = Z_L. \tag{2}$$

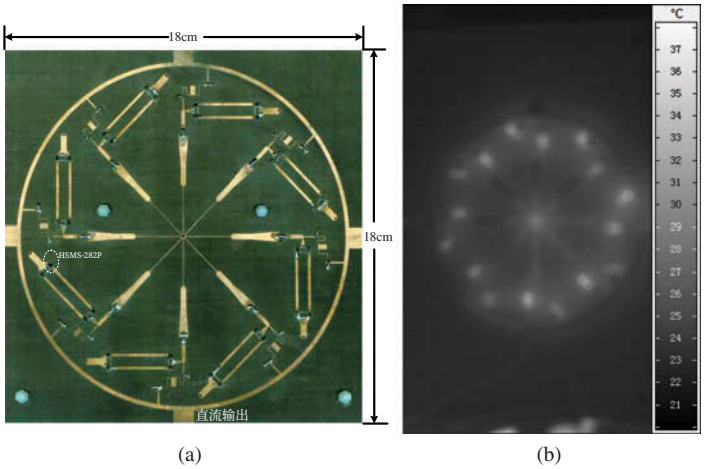
如图 7 和8所示，已采用十六个二极管组成一个 4 × 4阵列。增加两条半波长微带线不仅有助于散热，还能在不改变单个二极管阻抗的情况下补偿二极管的寄生效应。

二极管在整流电路中工作时，温度会升高。为了检测二极管是否处于稳定工作状态，在输入功率为 40 dBm 时对电路温度进行了监测。图 9(b)显示了电路工作 30 分钟后的温度分布，其中图中的白色部分表示高温。与整流电路相比，热源为二极管，且温度分布大致均匀，这意味着二极管的工作状态相近，温度为 32.8°C。在此温度下，二极管的工作状态稳定。

不同负载下整流效率与输入功率的关系如图10所示。当输入功率为76。5 Ω和81。6 Ω 时，输入功率在39至41 dBm之间，转换效率高于65%。随着输入功率的增加，转换效率也随之提高。在76。5 Ω时，效率最高，达到68.1%。

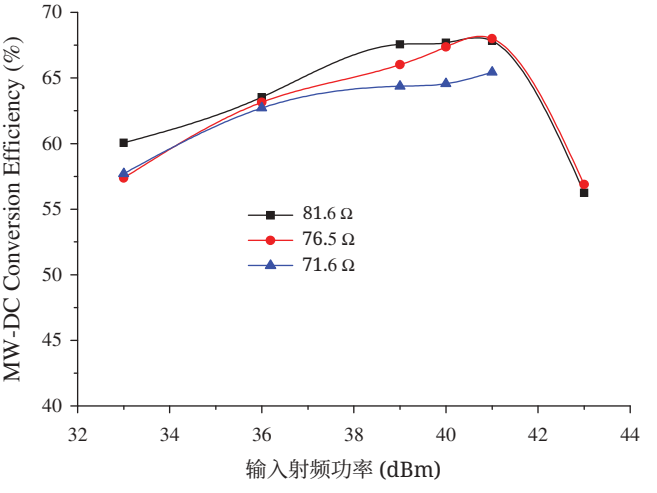


图8. 4 × 4二极管阵列的结构。



(a) (b)

图9. 整流电路的照片及温度分布。



Figu图 10. 不同负载下测得的整流效率与输入功率的关系 .

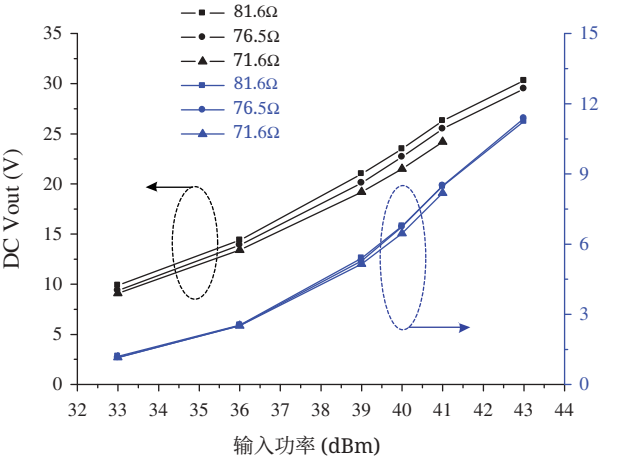


图 11. 测得的直流电压和功率与输入兆瓦功率的关系。

输入功率为41 dBm时的负载。该大功率整流电路的功率容量为43 dBm，整流效率为55%。

图 11 展示了直流电压和功率随输入兆瓦功率的变化关系。六条线表示不同的直流负载等级。对于所有三种直流负载等级，直流电压和功率均线性增加。最高电压为 30 V，对应 81。6 Ω 最大直流功率为 11.4 W，对应 76。5 Ω。

4. 整流天线阵列的实验结果

天线周围的场分为两个主要区域：一个是靠近天线的近场，另一个是远距离处的远场。它们之间的边界由一个比值确定

$$R = \frac{2L^2}{\lambda} \tag{3}$$

其中，L 为天线的最大尺寸。

实验中，根据公式（3），当 L ＝ ffiffiffiffi√2m 时，近远场边界半径为 33 m。发射天线与接收天线之间的最大距离为 8 m。因此，接收天线不处于发射天线的远场范围内。由此，微波功率传输系统工作在近场。

4.1. 实验中使用的整流天线阵列

在近场微波功率传输实验中，整流天线阵列采用子阵系统。每个子阵由两个集中式整流天线并联组成。尺寸为 1.1 m × 0.9 m 的整流天线阵列由 2 × 4 = 8 个子阵列组成，即包含 16 个整流天线单元，如图12所示。这种子阵系统在机械结构和电气连接方面具有灵活性。为了进行比较，本实验不仅测试了单个子阵，还测试了整个整流天线阵列。

4.2. 单个子阵的实验结果

发射天线包含四组相互独立的磁控管和喇叭天线。由于供给磁控管的高电压频率为50 Hz，磁控管仅在正半周期工作。为了使发射天线在整个周期内产生功率，需要在一半磁控管的高压变压器输入端交换火线和零线的位置。因此，在整个50 Hz周期内，两个磁控管协同工作。

首先，对单个子阵整流天线进行了测量，微波功率源与整流天线单元之间的距离为 8 m。两只磁控管作为微波功率源，在三种模式下工作。模式 I 下，单只磁控管作为功率源，并测试直流电压输出。模式 II 下，两只磁控管以相同的

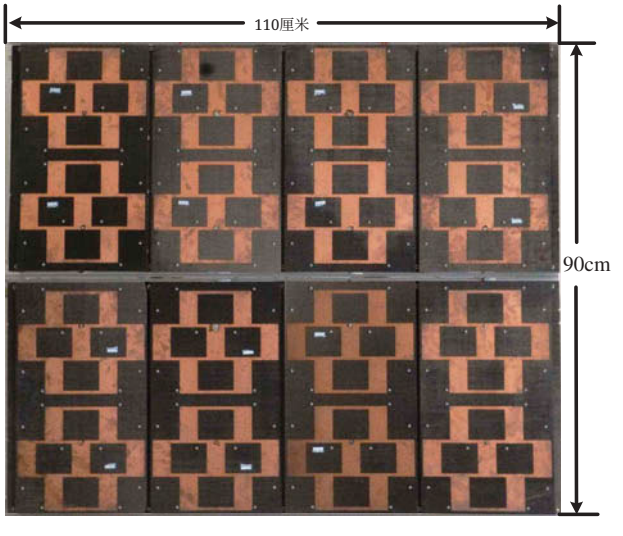


图12. 实验中使用的整流天线阵列。

50赫兹半周期内工作。模式 III 下，一只磁控管在半个周期内工作，另一只则在另半个周期内工作。波形如图 13(a–c)所示，由 Tektronix DPO 7254 数字荧光示波器和 ATTEN ATZ3710A 直流电子负载测得。

图中所示的所有输出波形图 13均近似为方波信号，即使两个磁控管在相反的半周期内工作也是如此。在图 13（a）中，输出电压的幅值为 6.96 V，而电压的均方根（RMS）值为 3.84 V。在图 13（b）中，幅值为 9.04 V，RMS 值为 5.15 V。在图 13（c）中，幅值和 RMS 值分别为 7.44 V 和 5.74 V。

在模式 I 和 III 下，幅值接近，但 RMS 值的平方之差为一半。在模式 II 和 III 下，RMS 值接近，但幅值的平方之差为一半。这些结果表明，两个磁控管在相反的半周期内工作可以降低峰值电压，但即使 RMS 值有所提高，仍保持不变。此外，降低峰值电压是避免二极管损坏的有效方法。在图 13（c）中，由于磁控管谐振腔的振荡延迟，波形之间出现了间隙。若磁控管能够以全波模式工作，RMS 值将更高，电压波形也会更加稳定。

4.3. 整流天线阵列的实验结果

根据上述实验可以得出可靠的结论：与两个磁控管在同一半周期内工作相比，它们分别在两个相反的半周期内工作时效果更好。因此，使用四个磁控管对整个整流天线阵列进行了测试，其中两个在一个半周期内工作，另外两个在另一个半周期内工作。在阵列的输出端增加了一个稳压电路，以保护整流电路中的二极管，并使直流电流的纹波更加平滑。

当电路接入整个阵列的 2 Ω 直流负载时，输出直流电压波形如图 14所示。此时，发射天线工作于单个子阵列实验中提到的模式 III。输出直流电压的有效值为 8.12 V。

图 15 和16 展示了不同距离下直流电压和功率随负载的变化情况。随着负载增大，输出直流电压和功率也随之上升。当电阻达到一定值后，电压稳定在 12 V，而由于整流器的自保护电路，功率迅速下降。在距离为 5.5 m 时，最大直流功率达到 67.3 W，负载为 1.2 Ω。

5. 结论

在此次近场微波功率传输实验中，搭建了由四组磁控管、喇叭天线和超材料组成的发射天线。随后，构建了一个 1.1 m × 0.9 m 的整流天线阵列，各单元均采用并联连接。该阵列由 16 个子阵列组成，每个子阵列包含一个微带网格阵列天线和一个集中式整流电路。

为检验发射天线的输出特性，在两台磁控管开启的情况下，对单个子阵列整流天线进行了测试。在不同距离下测量微波功率传输系统，结果表明，在距离为 5.5 m 时，最大直流功率达到 67.3 W，直流负载为 1.2 Ω 。

根据实验结果，得出以下结论：

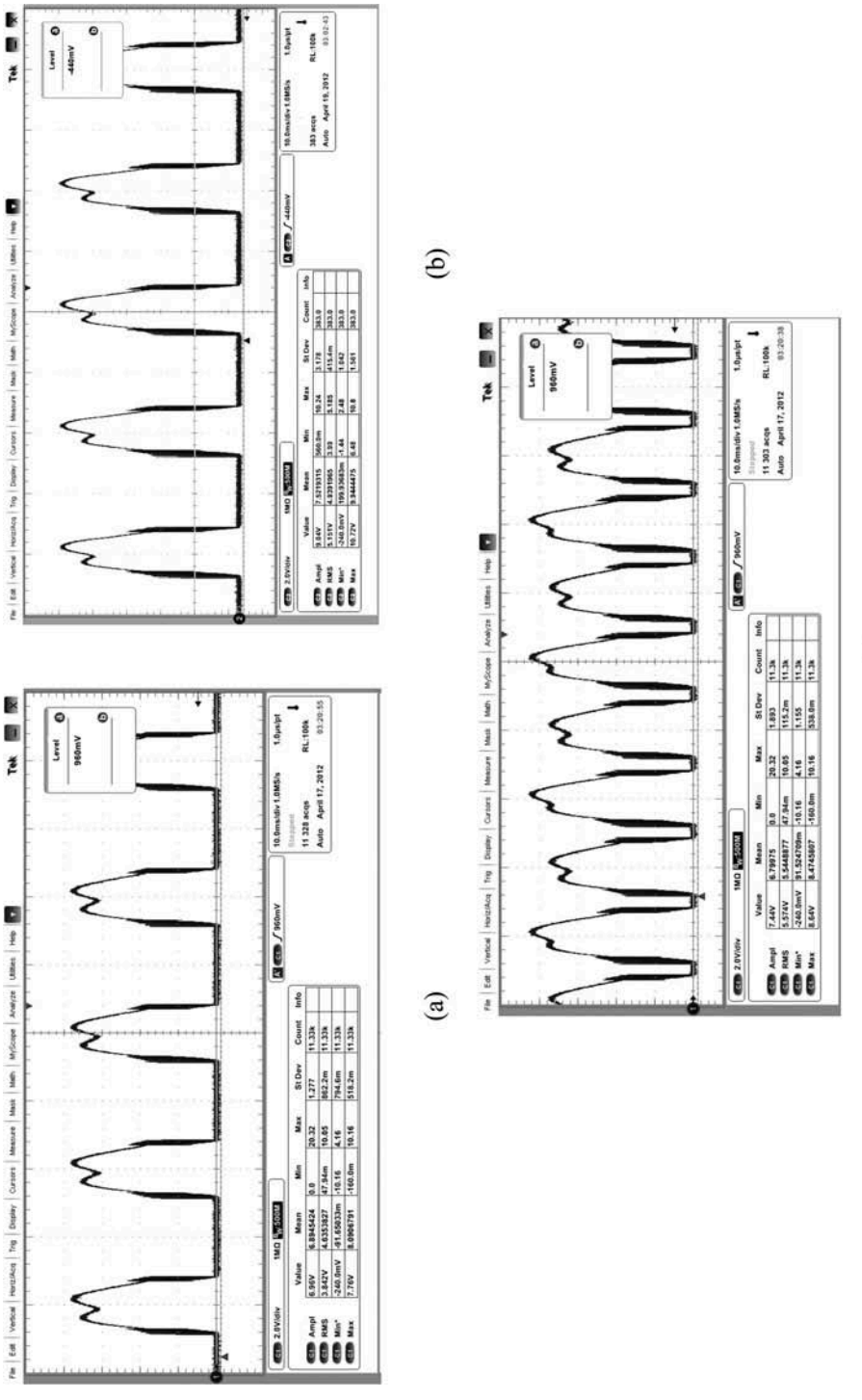


Figure 13. The output voltage waveform of the single sub-array rectenna.

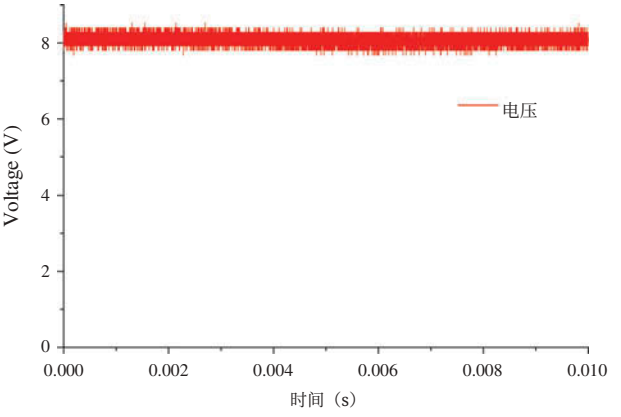


图 14. 带稳压电路的整个整流天线阵列的输出电压波形。

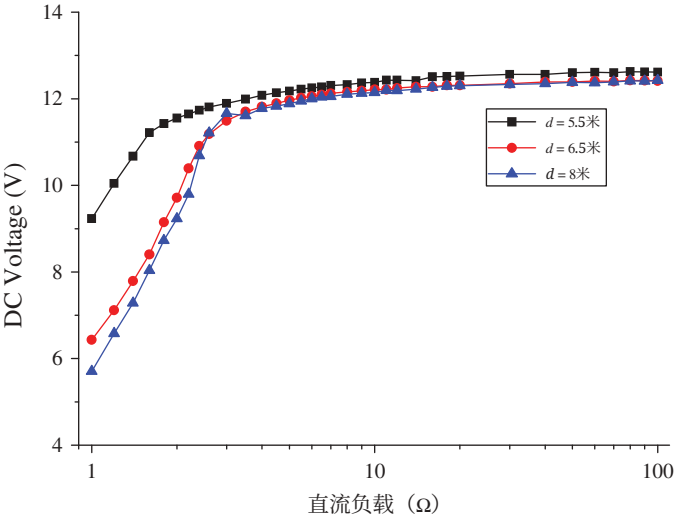


图15。整流天线阵列的直流电压随直流负载的变化。

(1) 低功率肖特基二极管可用于大功率整流电路和微波功率传输系统。(2) 与通信系统相比，微波功率传输对信号质量的要求较低。(3) 就传输效率而言，全波微波源优于半波微波源。

未来工作的重点方向包括：(1) 研究用于微波功率源的全波模式多台频率相位锁定磁控管；(2) 提高单个整流电路的微波到直流转换效率和功率容量；(3) 设计辐射效率高的发射天线或天线阵列，以及接收天线；(4) 研究串联和/或并联连接的整流天线单元阵列的特性（Sakamoto、Ushijima、Nishiyama、Aikawa 和 Toyoda，2013年）。

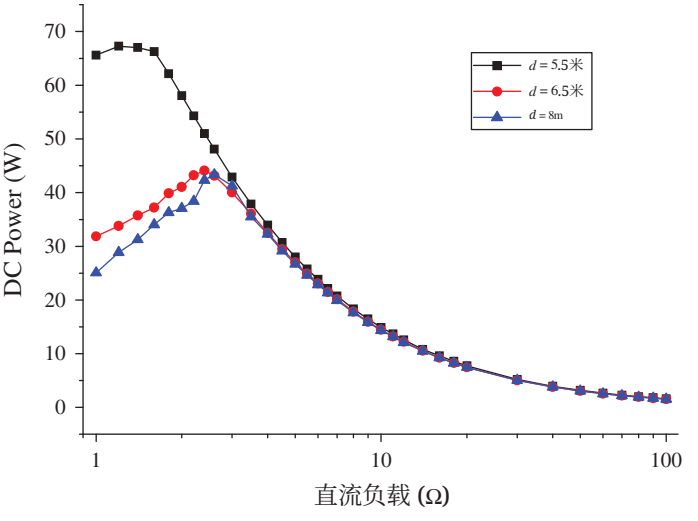


图1 6. 整流天线阵列的直流功率随直流负载的变化关系。

过去几十年来，低能量远场微波功率传输已得到充分研究（Pinuela、Mitcheson 和 Lucyszyn，2013年；Visser，2013年）。然而，关于近场大能量传输的研究很少（Huang、Zhang、Chen、Huang 和 Liu，2013年）。除半波和全波整流器外（Imai、Tamaru、Fujimori、Sanagi 和 Nogi，2011），还需研究用于大功率微波功率传输系统的全波微波源和半波微波源。本文的工作将探索如何通过微波而非导线传输能量。未来，我们将继续研究微波功率传输系统，并尝试将其用于通信系统（Yang、Jiang、Elsherbeni、Yang 和 Wang，2013）。

资助
本工作部分得到国家自然科学基金 [61271074], 973计划 [2013CB328902], [新世纪优秀人才支持计划-12-0383]的资助。

ORCID
刘长军 http://orcid.org/0000-0003-0079-6793

参考文献

Brown, W. C.（1984）。无线电波功率传输的历史。《IEEE微波理论与技术汇刊》，*32*(9), 1230–1242。doi：10.1109/TMTT.1984.1132833 He, Q., & Liu, C.（2009）。采用HSMS-282的增强型微波整流电路。《微波与光学技术快报》，*51*(4), 1151–1153。doi：10.1002/mop.24237 Huang, W., Zhang, B., Chen, X., Huang, K.-M., & Liu, C.（2013）。用于无线微波能量传输的S波段整流天线阵列研究。《电磁学研究进展》，*135*，747 75810252812120314–。doi：。/PIERImai, S., Tamaru, S., Fujimori, K., Sanagi, M., & Nogi, S.（2011年5月12日–13日）。半波和全波整流器类型的微波直流转换电路效率及谐波产生。IMWS-IWPT2011，京都。doi：10.1109/IMWS.2011.5877081 Kraus, J. D., & Marhefka, R. J.（2002）。各类应用的天线（第3版）。新泽西州上萨德尔河：麦格劳-希尔。

Liu, Q., Yang, Y., & Huang, K. M.（2013）。高功率微波超材料的设计与应用。《太赫兹科学与电子信息技术》，11(2)，245–249。Mitani, T., Kawasaki, H., Shinohara, N., & Matsumoto, H.（2009年4月）。面向空间应用发射机的炉用磁控管研究。载于2009年真空电子学会议（IVEC'09），IEEE国际会议（第323–324页）。罗马：IEEE。doi:10.1109/IVELEC.2009.5193408 Olgun, U., Chen,-C.-C., & Volakis, J. L.（2011）。提升射频能量收集性能的整流天线阵列配置研究。《IEEE天线与无线传播快报》，10，262–265。doi:10.1109/LAWP.2011.2136371 Pendry, J. B., Holden, A. J., & Robbins, D. J.（1998）。细线结构中的低频等离激元。《凝聚态物理杂志》，10(22)，4785–4809。Pinuela, M., Mitcheson, P. D., & Lucyszyn, S.（2013）。城市和半城市环境中的环境射频能量收集。《IEEE微波理论与技术汇刊》，61(7)，2715–2726。doi:10.1109/TMTT.2013.2262687 Pozar, D. M.（2005）。微波工程（第3版，第77页）。纽约：Wiley。Sakamoto, T., Ushijima, Y., Nishiyama, E., Aikawa, M., & Toyoda, I.（2013）。采用可扩展差分整流天线单元的5.8 GHz串联/并联整流天线阵列。《IEEE天线与传播汇刊》，61(9)，4872–4875。doi:10.1109/TAP.2013.2266316 Shinohara, N., & Matsumoto, H.（1998）。用于微波能量传输的大型整流天线阵列实验研究。《IEEE微波理论与技术汇刊》，46(3)，261–268。doi:10.1109/22.661713 Strassner, B., & Chang, K.（2002）。用于无线微波能量传输的5.8 GHz圆极化整流天线。《IEEE微波理论与技术汇刊》，50 (8)，1870–1876。doi:10.1109/TMTT.2002.801312 Strassner, B., & Chang, K.（2003）。用于无线微波能量传输的高效C波段圆极化整流天线阵列。《IEEE天线与传播汇刊》，51(6)，1347–1356。doi:10.1109/TAP.2003.812252 Visser, H. J.（2013年1月）。远场射频能量传输。载于《2013年无线电与无线通信研讨会》（RWS），IEEE（第34–36页）。德克萨斯州奥斯汀：IEEE。doi:10.1109/RWS.2013.6486632 Yang, -X.-X., Jiang, C., Elsherbeni, A. Z., Yang, F., & Wang, Y.-Q.（2013）。适用于数据通信系统的新型紧凑型印刷整流天线。《IEEE天线与传播汇刊》，61 (5)，2532–2539。doi:10.1109/TAP.2013.2244550 Zhang, B., Zhao, X., Yu, C. Y., Huang, K. M., & Liu, C.（2011）。基于二极管阵列的高功率增强型高效2 25, 76545 774 10 1163 156939311794827159 。吉赫整流器。《电磁波与应用杂志》，–。doi：。/