

文章编号: 2095-4980(2019)01-0079-06

一种紧凑型宽带高效微波整流电路

张磊, 武鹏德, 赵应盛, 刘长军*

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 运用 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线实现无输入低通滤波器的微波整流电路。该结构串联于整流二极管与地之间, 抵消了整流二极管在基频时的容性阻抗, 并抑制了谐波电流, 因此该整流电路移除了输入低通滤波器和匹配电路, 结构和尺寸更加紧凑。理论分析和实验测试表明, 本设计在较大输入功率、频率范围内实现了高效整流。实验结果表明, 在输入功率 12~24 dBm 和频率 1.48~2.02 GHz 范围内, 整流效率超过 70%。当输入功率为 21.8 dBm, 频率为 1.8 GHz 时, 最高整流效率为 83.3%。电路尺寸优于 15 mm × 20 mm。

关键词: 微波无线能量传输; 宽带整流电路; 谐波抑制; 源牵引; 高效率

中图分类号: TN455

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0079

A compact and wideband microwave rectifier with high-efficiency

ZHANG Lei, WU Pengde, ZHAO Yingsheng, LIU Changjun*

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: A novel microwave rectifier with a short-ended eighth-wavelength microstrip transmission line in series with a Schottky diode is presented. The input low-pass filter in conventional rectifiers is removed to improve the conversion efficiency and reduce the size of the rectifier. In the proposed shunt diode topology, a short-ended transmission line is inserted between the diode's cathode and Ground(GND), which balances the capacitive impedance of the diode at the fundamental frequency. As a result, both the input low-pass filter and the impedance matching circuit are removed. Results show that it can realize high conversion efficiency with a wide input power and frequency range. The measured efficiency keeps above 70% while the input power varies from 12 dBm to 24 dBm, and the frequency bandwidth extends to a range from 1.5 GHz to 2.1 GHz. The maximum rectifying efficiency of 83.3% at 21.8 dBm input power is obtained. The fabricated rectifier has a compact dimension of 15 mm × 20 mm.

Keywords: microwave power transmission; wideband microwave rectifier; harmonic termination; source-pull; high efficiency

微波无线能量传输最早于 20 世纪 60 年代提出, 相对传统有线电力传输具有诸多优点^[1]。微波无线能量传输系统通常包括发射微波信号源、发射天线、接收天线、接收整流电路和负载^[2-3]。因此, 整流电路在系统中有不可或缺的作用。传统微波整流电路中, 低通滤波器通常用来抑制非线性器件产生的高次谐波。谐波被限制在输入低通滤波器和输出滤波器之间, 以此提高二极管或三极管整流效率^[4]。一些宽带或多频带微波整流器输入端应用复杂的宽带匹配电路^[5]。定向耦合器和简化实频技术也被用于整流电路的宽带匹配电路中^[6]。

在高效率功放设计中, 谐波负载通常用来对输出电压和电流整形, 减小开关器件上的电压、电流重叠从而提高效率^[7]。在整流电路中也可以利用谐波负载降低二极管损耗, 如文献[8]在直流负载前应用 F 类负载代替低通滤波器, 文献[9]应用扇形枝节对三次和四次谐波回收。在频率较低情况下, 分布式谐波负载具有较大的尺寸, 会增加整流电路体积^[8-9]。

在无线能量传输中, 整流电路需要与接收天线端口匹配, 当天线接收到的微波功率发生变化时, 要求整流电路仍保持高效率。为提高整流电路的频率和功率动态范围, 本文提出一种无输入低通滤波器的二极管整流电路。

收稿日期: 2017-12-07; 修回日期: 2018-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271330)

*通信作者: 刘长军 email:cjliu@scu.edu.cn

$\lambda_g/8$ 终端短路微带线对二次谐波开路并抵消了二极管容性阻抗, 谐波电平被抑制^[10]; 在输入端不需要额外的低通滤波器和谐波负载, 减小了电路尺寸; 同时, 直流输出滤波采用集总元件 LC 代替传统的 $\lambda_g/4$ 传输线, 有效拓展了带宽, 使电路更加紧凑。

1 理论分析和仿真

1.1 传统微波整流电路

微波二极管整流电路主要由微波源、输入低通滤波器(匹配电路)、整流二极管、输出低通滤波器和负载组成^[11], 如图 1 所示。在微波频段, 整流二极管常使用肖特基二极管, 由于二极管的非线性特性, 会产生不需要的谐波信号, 因此整流电路输入端低通滤波器的作用是抑制二极管产生的高次谐波返回接收天线或信号源^[12]。整流二极管在不同频率、功率下具有不同的输入阻抗, 输入滤波器抑制高次谐波同时作为匹配电路, 使得整流电路尺寸变大。输出低通滤波器通常采用 $1/4$ 微带线, 进一步限制了整流电路的带宽。通过电磁仿真软件对二极管进行仿真研究可以发现, 高次谐波分量主要集中于二、三次谐波, 若对二、三次谐波抑制较差, 则整流效率会下降 6%~10%以上^[13]。因此抑制整流过程产生的高次谐波是必要的。

1.2 二极管输入阻抗

普通的输入阻抗匹配电路具有窄带的特点, 而宽带匹配, 如阻抗压缩网络, 设计复杂、电路尺寸增大。本文提出使用终端短路传输线抵消二极管容性阻抗的方法, 可以大幅度降低输入匹配难度。二极管输入阻抗主要由结电容 C_j 和结电阻 R_j 决定, 如图 1 所示。由上节可知, 二极管在大功率输入下呈现非线性特点, 输入阻抗 Z_d 可由式(1)简化计算:

$$Z_d = C_j // R_j \quad (1)$$

引入频率:

$$Z_d = \frac{R_j}{1 + (R_j \omega C_j)^2} - j \frac{R_j^2 \omega C_j}{1 + (R_j \omega C_j)^2} \quad (2)$$

可以得出输入阻抗实部和虚部分别为:

$$\text{Re}(Z_d) = \frac{1}{\frac{1}{R_j} + R_j C_j^2} \quad (3)$$

$$\text{Im}(Z_d) = -\frac{1}{\frac{1}{R_j^2 C_j} + C_j} \quad (4)$$

式中 $C_j = \omega C_j$, $\omega = 2\pi f$ 。

C_j 一般在偏置电压影响中变化较小; R_j 随二极管导通角和瞬时导通电流改变, 变化范围可以从 10Ω 到上千欧姆。在不同输入功率下, 可以通过调整直流负载改变二极管导通角, 从而改变整流电路的实部阻抗。低功率下二极管电压小于导通电压, 二极管效率较低; 当功率逐渐升高后, 二极管导通, 并产生高次谐波, 效率逐渐上升并趋于稳定; 当输入功率上升到负载电压大于二极管击穿电压后, 二极管被击穿, 整流效率急剧下降^[14]。

2 整流电路设计

2.1 新型微波整流电路结构

为了实现小型化和高带宽, 设计出新型的不需要输入滤波器的微波整流电路, 如图 2 所示。电路由微波源、微波整流二极管、 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线、输出低通滤波器组成。使用肖特基二极管 HSMS-2820 作整流元件, 二极管输入阻抗主要由结电阻

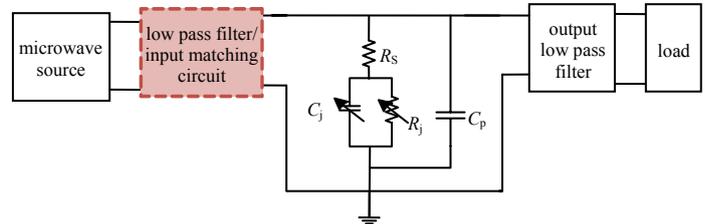


Fig.1 Schematic of rectifier with input low pass filter
图 1 输入低通滤波器的整流电路原理图

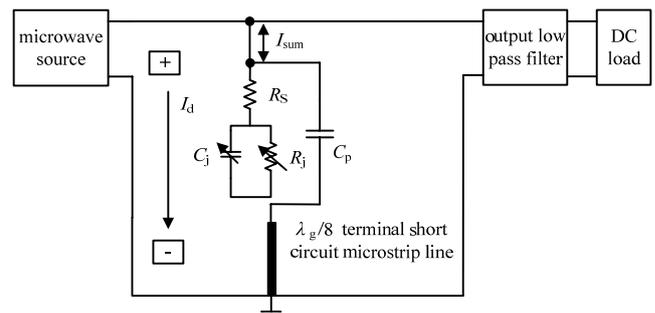


Fig.2 Schematic of rectifier for low pass filter without input
图 2 无输入滤波器整流电路原理图

R_j 和结电容 C_j 决定。由于二极管的非线性，输入功率、输出直流电压、反向偏置电压、二极管导通角等均可改变 R_j 和 C_j 的大小。利用全波仿真软件可以得到等效结电容和结电阻，在直流负载为 400Ω ，输入功率为 20 dBm 的情况下，等效的 R_j 和 C_j 分别为 250Ω 和 0.38 pF 。

$\lambda_g/8$ 终端短路微带线被插入二极管和地之间。通过分析可知， $\lambda_g/8$ 终端短路微带线作为最简单的二次谐波抑制结构，在微波整流电路中具有以下优点：

- 1) 在基频下呈现纯电抗 jZ_c ，二倍频下呈现开路，三倍频下呈现较高阻抗(使用较窄终端短路微带线)。因此可以抑制二、三次谐波，从而提高整流效率；
- 2) 补偿二极管容抗。 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线呈现感抗性质，补偿了二极管基频阻抗，使二极管输入阻抗呈纯电阻。通过调节线宽，可以使二极管输入阻抗匹配到源阻抗；
- 3) $\lambda_g/8$ 终端短路传输线提供输出的直流通路。

$$Z_{\lambda_g/8} = jX_L = jZ_S \tan\left(\frac{\pi}{4} \times \frac{\omega}{\omega_0}\right) = \begin{cases} 0, & \omega = 0 \\ jZ_S, & \omega = \omega_0 \\ \infty, & \omega = 2\omega_0 \\ -jZ_S, & \omega = 3\omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

为了验证本文提出 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线谐波抑制性能，设置不同长度终端短路微带线测试谐波电平和整流效率，结果如图 3 所示。可以看出， $\lambda_g/8$ 终端短路微带线可以同时很好地抑制 2 次谐波和三次谐波。由于抵消了二极管容抗，整流效率也提高到 80% 以上。而其他长度终端短路微带线，不能较好地抑制二次谐波的同时兼顾基波的匹配，因此效率也较低。

2.2 阻抗与效率分析

源牵引技术可以用在二极管整流电路输入阻抗分析中。源牵引是通过改变源阻抗从而获得其大信号参数模型的测量技术，常用于功率放大器非线性电路设计中。微波整流电路中二极管在大信号时为非线性，因此可以在已知器件模型后通过全波仿真软件模拟源牵引，从而得到最佳输入阻抗。仿真过程如下：固定仿真频率、输入功率和直流负载，通过软件设置改变输入阻抗可以得到等效效率圆图。

如图 4 所示，利用源牵引技术在输入功率为 20 dBm ，直流负载 500Ω 时，最高效率为 84.4% 。可以看出，在最大效率处，输入阻抗接近于系统特征阻抗 50Ω 。源牵引仿真结果证明，本文提出的整流电路不需要输入低通滤波器和额外的匹配电路。

由于二极管非线性，不同输入功率下，二极管输入阻抗非线性变化^[14]。如图 5 所示，通过仿真二极管大信号模型，改变输入功率，可以得到二极管实部非线性增大，而虚部非线性减小。通过简单的 $\lambda_g/8$ 终端短路线，可以明显地在大功率下降低二极管实部阻抗，抵消二极管容抗。

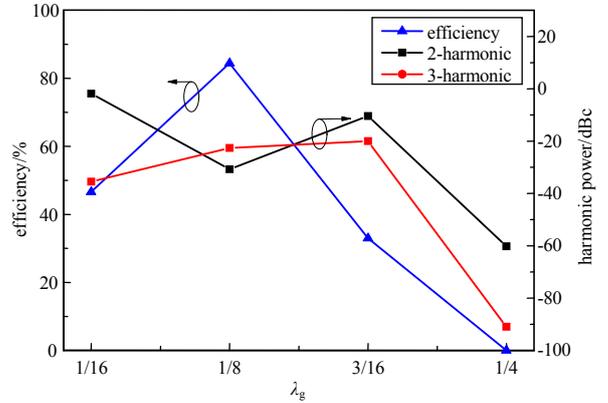


Fig.3 Effect on the harmonic by short-ended transmission line with different lengths
图 3 不同长度终端短路线对谐波的影响

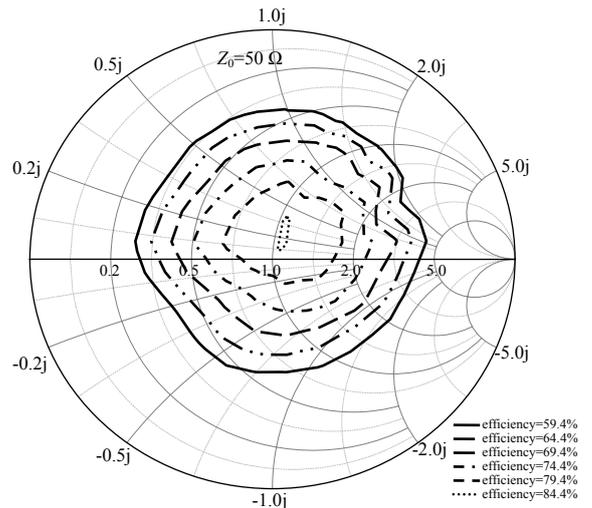


Fig.4 Efficiency of RF-DC by source-pull of rectifier
图 4 整流电路源牵引效率

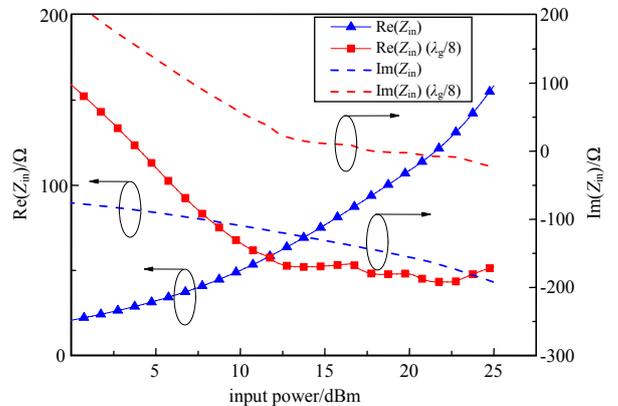


Fig.5 Effect of different input powers on diode's impedance
图 5 不同输入功率对二极管输入阻抗的影响

3 理论分析和仿真

3.1 测试原理

根据前述分析,设计如图 6 所示整流电路,使用介质基板为 rogers4350B,介电常数 3.66,损耗角正切 0.003,厚度 0.762 mm,覆铜厚度 18 μm 。实际电路尺寸为 15 mm \times 20 mm。反射和谐波抑制测试如图 7 所示。信号源输出微波功率进入双向定向耦合器端口 1,通过连接功率计可以测量端口 4 功率,获取输入整流电路的实际微波功率;端口 3 耦合出反射功率,通过频谱仪可以测量基波的反射功率和谐波的功率。基波的 $S_{11}(\text{dB})$ 可以通过式(6)计算。

$$S_{11} = P_3 + C_3 - P_1 \quad (6)$$

式中: P_3 为端口 3 频谱仪测量基波功率,单位为 dBm; C_3 为双向定向耦合器端口 3 耦合度,单位为 dB; P_1 为端口 1 输入功率,单位为 dBm。 P_1 可以通过功率计于端口 4 测量,功率计测量的功率 P_4 加上端口 4 的耦合器可以得到端口 1 的输入功率,计算公式见式(7)。整流电路效率计算公式见式(8)。通过控制输入功率、测量输出端直流电压和负载电阻,可以得到整流效率。

$$P_1 = P_4 + C_4 \quad (7)$$

$$\eta_{\text{RF-DC}} = \frac{P_{\text{DC}}}{P_{\text{RF}}} \times 100\% = \frac{U_0^2}{R_L} \times \frac{1}{P_{\text{IN}}} \times 100\% \quad (8)$$

3.2 测试结果

利用图 7 的测试方法,可以测试本文提出的新型整流电路效率、反射系数、谐波抑制和带宽等参数。首先寻找最佳工作频率,给二极管输入较大微波功率,利用信号源扫频得到效率最大的频率,就是最佳工作频率;其次寻找最佳直流负载,利用获得的最佳工作频率,固定输入功率,可以得到在固定频率、功率下最佳直流负载;最后经过扫描频率、扫描直流负载和扫描功率,得到待测整流电路的测试曲线。

图 8 为仿真和测试不同频率下整流效率图,输入功率为 20 dBm,直流负载为 550 Ω 时,可以看出,频率范围为 1.24~2.14 GHz,实测整流效率大于 50%;频率范围为 1.48~2.02 GHz 时,实测整流效率大于 70%;频率范围为 1.62~1.92 GHz 时,实测效率大于 80%。对比仿真可以发现,实测整流效率与仿真接近。 S_{11} 实测小于 -10 dB,带宽为 420 MHz(1.60~2.02 GHz)。

图 9 为不同直流负载下整流效率测试与仿真图。测试、仿真条件为:输入功率 20 dBm,频率 1.8 GHz,在输入功率一定时,随着直流负载增大,整流效率逐渐增大,当负载达到 500 Ω 左右时,效率达到最大。其次,测试了在不同输入功率下的整流效率,此时设置频率为 1.8 GHz,为防止二极管因输入功率过大而击穿,设置较小的直流负载 400 Ω 。输入功率扫描范围为 0~24 dBm,仿真和测试整流效率对比如图 10 所示,图 10 也展示了电路输入端的二次和三次谐波电平。

图 10 为不同输入功率下整流效率和谐波电平仿真与测试结果,表明本文提出的整流电路可在较宽的输入功率范围内实现高效率。在输入功率为 10 dBm 时,整流效率超过 70%;输入功率为 16 dBm 时,整流效率超过 80%。超过 80%的输入功率范围为 16.0~22.5 dBm。输入功率为 21.8 dBm 时,最大整流效率为 83.3%。输入端二次谐波和三次谐波电平抑制均优于 20 dBc,测试二次谐波功率结果表明,本文所提结构能有效抑制高次谐波进入输入端。

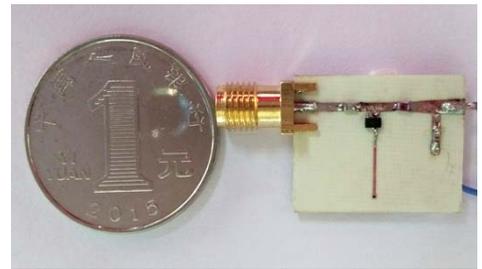


Fig.6 Photograph of fabricated microwave rectifier
图 6 实际加工整流电路

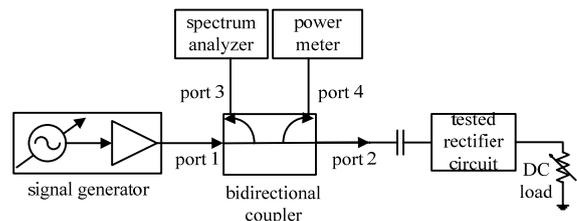


Fig.7 Test block diagram of efficiency, reflection and harmonic
图 7 效率、反射、谐波电平测试框图

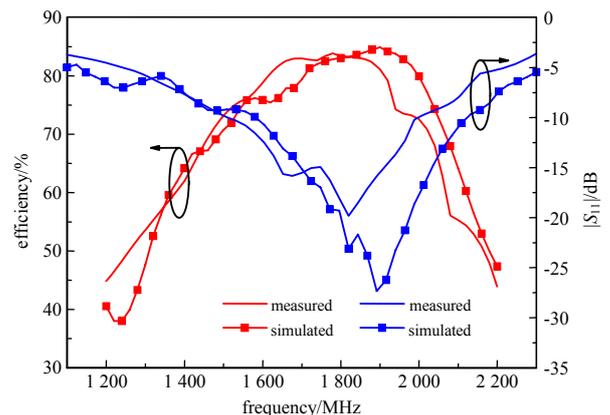


Fig.8 Measured and simulated RF-DC efficiency and S_{11} by sweeping frequency
图 8 不同频率下仿真和测试整流效率和 $|S_{11}|$

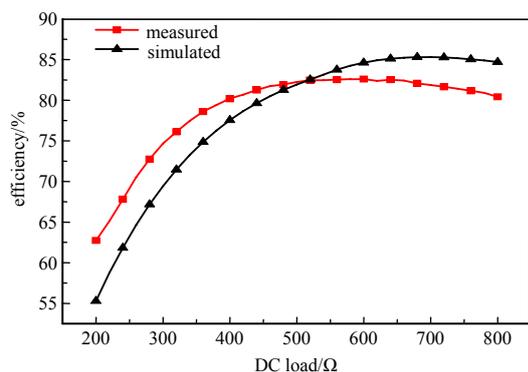


Fig.9 Measured and simulated RF-DC efficiency by sweeping DC load

图 9 不同直流负载下仿真和测试整流效率

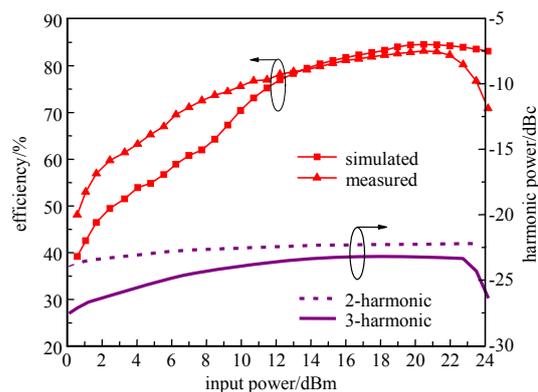


Fig.10 Measured and simulated RF-DC efficiency by sweeping input power

图 10 不同输入功率下仿真和测试整流效率和谐波功率

3.3 测试结果分析

本文设计的整流电路与常规整流电路相比，具有以下优点：

- 1) 体积小。本文所设计整流电路在实现宽频带同时保证较小的尺寸，具有紧凑型特点。
 - 2) 宽频带。本文设计整流电路在大于 900 MHz 范围内整流效率大于 50%，大于 540 MHz 范围内整流效率大于 70%，大于 300 MHz 范围内整流效率大于 80%。
 - 3) 宽功率输入范围。输入功率 12~24 dBm 时，整流效率大于 70%；16.0~22.5 dBm 时，整流效率大于 80%。
- 本文提出的整流电路依然存在一些问题，在低输入功率时，二极管整流效率仿真和实测有 10% 差异，主要由整流二极管模型不准确引起。

4 结论

本文提出一种无输入低通滤波器和匹配电路的微波整流电路。应用终端短路微带线实现谐波抑制和二极管阻抗匹配。无输入低通滤波器和匹配电路使本设计电路尺寸优于传统二极管整流电路，同时拓展了整流电路频带宽度，提高了功率适应性和整流效率。实验结果表明，大于 70% 整流效率所对应的功率动态范围为 12 dB，大于 70% 整流效率所对应的相对带宽达到 30%。

参考文献：

- [1] BROWN W. Experiments in the transportation of energy by microwave beam[C]// IRE International Convention Record. New York, NY, USA:IEEE, 1964:8-17.
- [2] GLASER P E. An overview of the solar power satellite option[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1992,40(6):1230-1238.
- [3] 王洪彬,刘长军. 一种基于 GaAsFET 的 S 波段功率放大和整流双向电路[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(2):239-242. (WANG Hongbin,LIU Changjun. An S band microwave amplifier and rectifier bi-directional circuit based on GaAs FET[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):239-242.)
- [4] ROBERG M,REVEYRAND T,RAMOS L et al. High-efficiency harmonically terminated diode and transistor rectifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2012,60(12):4043-4052.
- [5] SAKAKI H,NISHIKAWA K. Broadband rectifier design based on quality factor of input matching circuit[C]// Asia-Pacific Microwave Conference. Sendai,Japan:IEEE, 2015:1205-1207.
- [6] WANG D,NGHIEM X A,NEGRA R. Design of a 57% bandwidth microwave rectifier for powering application[C]// IEEE Wireless Power Transfer Conference. [S.l.]:IEEE, 2014:68-71.
- [7] 刘长军,黄卡玛,闫丽萍. 射频通信电路设计[M]. 北京:科学出版社, 2005. (LIU Changjun,HUANG Kama,YAN Liping. RF communication circuit design[M]. Beijing:Science Press, 2005.)
- [8] GUO J,ZHU X. Class F rectifier RF-DC conversion efficiency analysis[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(MTT). Seattle,WA,USA:IEEE, 2014:1-4.

- [9] KORHUMMEL S,KUESTER D G,POPOVIC Z. A harmonically-terminated two-gram low-power rectenna on a flexible substrate[C]// IEEE Wireless Power Transfer(WPT). Perugia,Italy:IEEE, 2013:119-122.
- [10] LIU C,TAN F,ZHANG H,et al. A novel single-diode microwave rectifier with a series band-stop structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2017,65(2):600-606.
- [11] WU P,ZHANG L,LIU C,et al. A C-band microwave rectifier based on harmonic termination and with input filter removed[C]// Wireless Power Transfer Conference(WPTC). Taipei,Taiwan,China:IEEE, 2017:1-4.
- [12] 张鹤馨,刘长军. 一种基于子阵分解的高效整流天线阵列[J]. 应用科技, 2016,43(4):57-61. (ZHANG Hexin,LIU Changjun. A high-efficiency microwave rectenna array based on subarray decomposition[J]. Applied Science Technology, 2016,43(4):57-61.)
- [13] YOO T W,CHANG K. Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1992,40(6):1259-1266.
- [14] MCSPADDEN J O,FAN L,CHANG K. Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8 GHz rectenna[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1998,46(12):2053-2060.

作者简介:



张磊(1992-),男,四川省广安市人,在读硕士研究生,主要研究方向为电磁场与微波技术.email:z2272777183@gmail.com.

武德鹏(1988-),男,四川省南充市人,在读博士研究生,主要研究方向为电磁场与微波技术.

赵应盛(1993-),男,广州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为电磁场与微波技术.

刘长军(1973-),男,河北省邢台市人,教授,博士生导师,主要研究方向为微波系统.