

文章编号: 2095-4980(2025)01-0044-05

基于 GaN 肖特基二极管的 200 GHz 二倍频器研制

杨岚馨, 骆祥, 肖飞, 张勇

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 基于 GaN 肖特基二极管设计并实现了一款 200 GHz 高功率二倍频器。该倍频器采用高功率容量的氮化镓(GaN)肖特基二极管代替传统 GaAs 肖特基二极管, 并结合高热导率的氮化铝(AlN)衬底, 较大提升了倍频器的散热性能和输出功率; 采用含有楔形膜片的悬置微带-波导过渡结构, 通过插入标准矩形波导中的楔形膜片实现模式转换并使输入输出同向, 实现倍频器的小型化。考虑到温度对二极管工作的影响, 对传统二极管模型进行修正, 并进行电热耦合仿真。实际测试结果表明, 在 500 mW 连续波输入的情况下, 该二倍频器在 190~220 GHz 频率范围内输出均高于 20 mW, 并在 218 GHz 实现了最大 36 mW 的功率输出, 转换效率为 7.2%。

关键词: 太赫兹; 氮化镓; 二倍频; 氮化铝

中图分类号: TN771

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024395

200 GHz doubler based on GaN Schottky diodes

YANG Lanxin, LUO Xiang, XIAO Fei, ZHANG Yong

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: A high-power frequency doubler at 200 GHz has been designed and implemented based on GaN Schottky diodes. This frequency doubler replaces traditional GaAs Schottky diodes with high-power-capacity Gallium Nitride(GaN) Schottky diodes and combines them with Aluminum Nitride(AlN) substrates, which have high thermal conductivity, significantly enhancing the heat dissipation and output power of the doubler. A suspended microstrip-waveguide transition structure with a wedge-shaped membrane is employed, which realizes mode conversion and codirectional input and output by inserting a wedge-shaped membrane into the standard rectangular waveguide, achieving miniaturization of the frequency doubler. Considering the impact of temperature on diode operation, the traditional diode model is modified, and electro-thermal coupled simulations are performed. Actual test results indicate that under 500 mW continuous-wave input, the doubler outputs more than 20 mW in the frequency range of 190~220 GHz and achieves a maximum output power of 36 mW at 218 GHz, with a conversion efficiency of 7.2%.

Keywords: terahertz; Gallium Nitride(GaN); doubler; Aluminum Nitride(AlN)

太赫兹波频率为 0.1~10 THz, 波长为 3~0.03 mm。由于长期滞后于电子学和光学技术的发展, 形成了“太赫兹间隙”。太赫兹波在电磁频谱中的独特位置使太赫兹波具有许多独特的特性, 这些特性使太赫兹波在医学成像、安全检查、射电天文^[1]等领域具有较强的开发潜力。太赫兹技术的重点在于太赫兹波的产生, 目前主要有光子学^[2-3]和电子学^[4]两种方法。随着小型化、高集成度、室温工作的需要, 固态太赫兹源得到迅速发展。其中, 肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)因具有较高的截止频率和较低的寄生参数, 基于 SBD 的倍频电路成为获取太赫兹源的主流方式。

目前的大多数太赫兹倍频电路依旧采用 GaAs SBD^[5-6], 但由于 GaAs 材料散热差和击穿电压低等问题, 导致 GaAs SBD 在高功率倍频器的应用上遭遇瓶颈。与 GaAs SBD 相比, GaN SBD^[5-8]具有较宽的禁带宽度、更高的击

收稿日期: 2024-08-22; 修回日期: 2024-09-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3609603)

穿场强以及较低的介电常数等优势，结合外延层 SiC 衬底良好的散热性，使高功率的倍频器成为可能。本文基于 GaN SBD 开展高功率倍频器的研究，设计并实现了一款具有高输出功率的 200 GHz 二倍频器。

1 200 GHz 二倍频器设计

本文选用反向串联的 GaN 六管芯肖特基势垒二极管 (GPS3)，串联电阻 R_s 为 5Ω ，零偏结电容 C_{j0} 为 60 fF ，截止频率为 0.53 THz 。管芯结构如图 1(a)所示，三维模型如图 1(b)所示。利用该 GaN SBD 设计平衡式二倍频器电路，可消除输出信号中的奇次谐波信号分量，提高变频效率。由于较高的驱动功率会产生较高的温度，为改善散热性能，降低温度对肖特基势垒二极管工作的影响，采用导热率较高的 $50 \mu\text{m}$ 厚 AlN ($170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 作为衬底。常用作衬底的材料性能对比如表 1 所示。

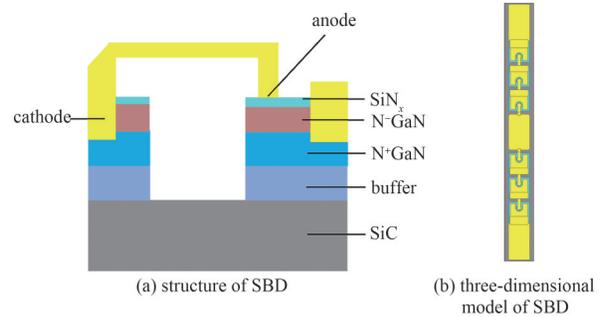


Fig.1 GaN-based SBD
图 1 GaN 六管芯 SBD

表 1 常用衬底材料性能对比

Table1 Comparison of substrate material properties

material	dielectric constant	thermal conductivity/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
AlN	8.8	170.0
quartz	3.8	1.4
GaAs	12.9	46.0

200 GHz 二倍频器的整体设计方案如图 2 所示。该倍频器采用分布设计方法进行设计，主要分 3 大部分：二极管模型、输入部分和输出过渡结构以及直流偏置滤波器。

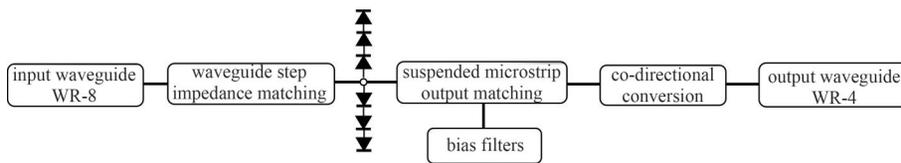


Fig.2 Block diagram of the 200 GHz doubler
图 2 200 GHz 二倍频器整体设计

1.1 二极管模型及阻抗提取

由于该倍频器是混合集成的，因此肖特基二极管采用倒扣的安装方式，二极管及腔体的三维模型如图 3 所示。为实现宽带高效的输出，本文采取阻抗压缩匹配方法进行最佳输入阻抗和最佳输出阻抗的提取。提取出的最佳输入阻抗为 $(45-15j) \Omega$ ，最佳输出阻抗为 $(55-27j) \Omega$ 。

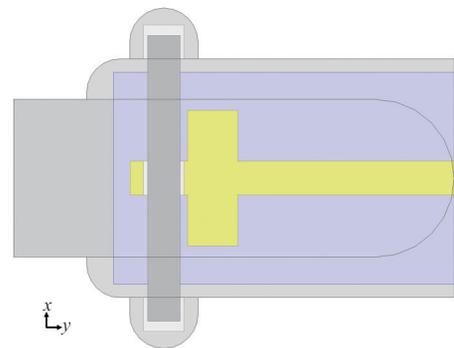


Fig.3 SBD and cavity model
图 3 二极管及腔体模型

1.2 输出部分设计

传统倍频器的输出过渡方式使输入与输出方向是垂直的，在实际使用中并不方便且增加了倍频器的体积。为解决这个问题，本文采用一种带有楔形膜片的微带到波导转换结构^[9]，如图 4 所示。由于楔形波导膜片的插入，在增高波导中实现了悬置微带线准横电磁波模式到波导 TE_{10} 模式转换，同时使输入输出同向，有利于倍频器的小型化。

直流偏置滤波电路采用紧凑微带谐振单元 (Compact Microstrip Resonating Cell, CMRC) 滤波电路，如图 5 所示。常用直流偏置加载方式是在输出波导的悬置微带开槽，这样的方式容易造成基片长度过长，加工时发生翘曲，导致微带电路受损。因此本文采用金丝键合的方式与二极管电

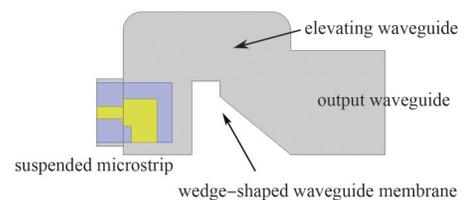


Fig.4 Schematic diagram of wedge-shaped membrane conversion structure
图 4 含楔形膜片转换结构示意图

路连接，有效缩短基片长度。

输入部分通过波导减高实现端口阻抗的匹配。最后通过场路协同仿真优化得到 200 GHz 二倍频器的整体结构，如图 6 所示。

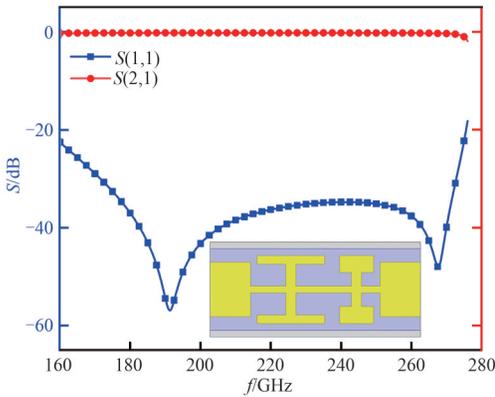


Fig.5 CMRC filter circuit and simulation results
图 5 CMRC 滤波电路及仿真结果

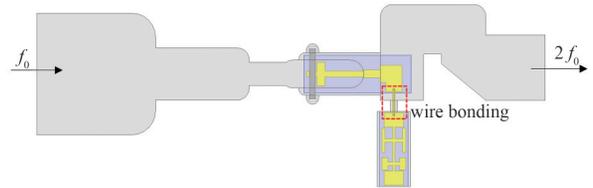


Fig.6 Structure of 200 GHz frequency doubler
图 6 200 GHz 二倍频器整体结构

2 200 GHz 二倍频器仿真结果

考虑到肖特基势垒二极管在实际工作中时，内部温度会影响一些本征参数与非本征参数。因此对二极管的串联电阻与饱和电流进行了修正^[10]，将温度因素加入到仿真中。将各频点的电磁损耗作为热源，利用有限元法，通过仿真得出各频点倍频器的温度。选取中心频点 200 GHz 时的倍频器温度分布，如图 7 所示，可以看出最高温度出现在肖特基势垒处，为 356 K。利用修正后的二极管模型对倍频器进行仿真，结果如图 8 所示。在 500 mW 输入情况下，偏置电压为 -6.5 V 时，在 190~220 GHz 带宽内，效率均高于 6%。最高效率为 15%(75 mW@218 GHz)。改变偏置电压，转换效率如图 9 所示。随着偏压增大，转换效率下降。

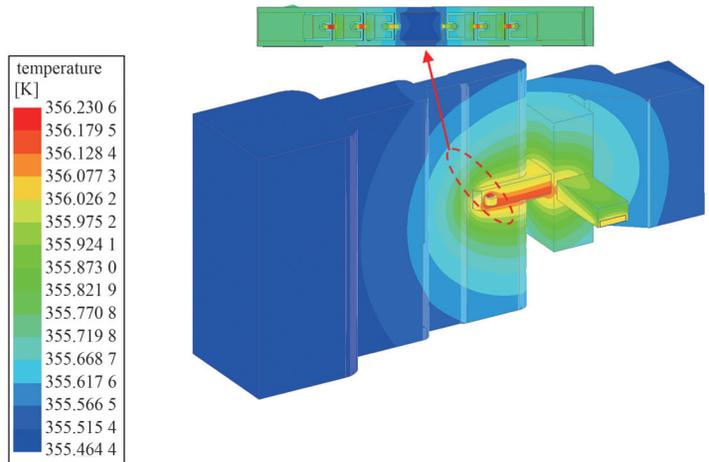


Fig.7 Temperature distribution of 200 GHz doubler
图 7 200 GHz 二倍频器温度分布

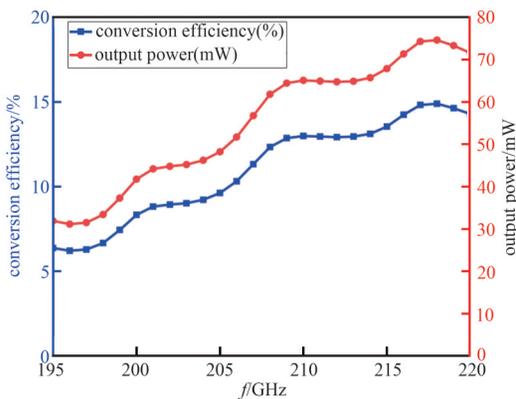


Fig.8 Simulation results of 200 GHz frequency doubler
图 8 200 GHz 二倍频器仿真结果

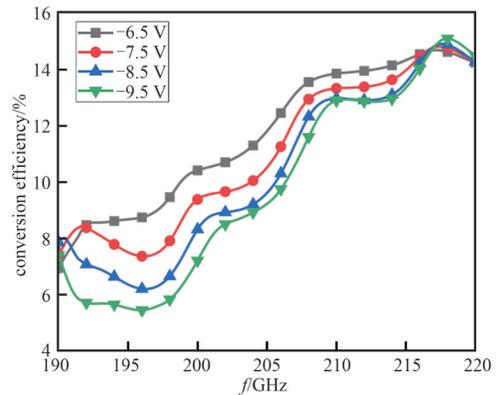


Fig.9 Simulation results at different voltages
图 9 不同偏压仿真结果

3 200 GHz 二倍频器装配测试

装配后的倍频器腔体外形如图 10 所示，分为上下腔体，电路安装于下腔。为获得较高的输入功率，采用三级功放级联形式，测试链路如图 11 所示。在测试之前使用衰减器和功率计对功放 300 mW、400 mW、500 mW 的输出功率进行校准，并记录相应信号发生器的驱动功率。校准之后，将倍频器与链路相连，测试不同输入功率下的输出功率。



Fig.10 200 GHz frequency doubler
图 10 200 GHz 二倍频器

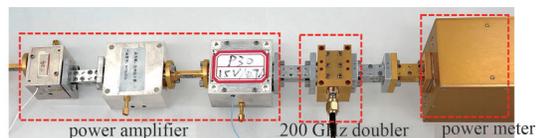


Fig.11 Test link of 200 GHz frequency doubler
图 11 倍频器测试链路

200 GHz 二倍频器的连续波测试结果如图 12 所示。图 12(a)和图 12(b)分别为不同输入功率下的输出功率及转换效率。在整个测试频带内，二倍频器的输出较为平坦。在 500 mW 的输入情况下，偏置电压为 -6.5 V 时，190~220 GHz 输出功率均高于 20 mW，最高输出功率可达 36 mW@218 GHz。为获得更高的输出功率，可进一步加大输入功率。

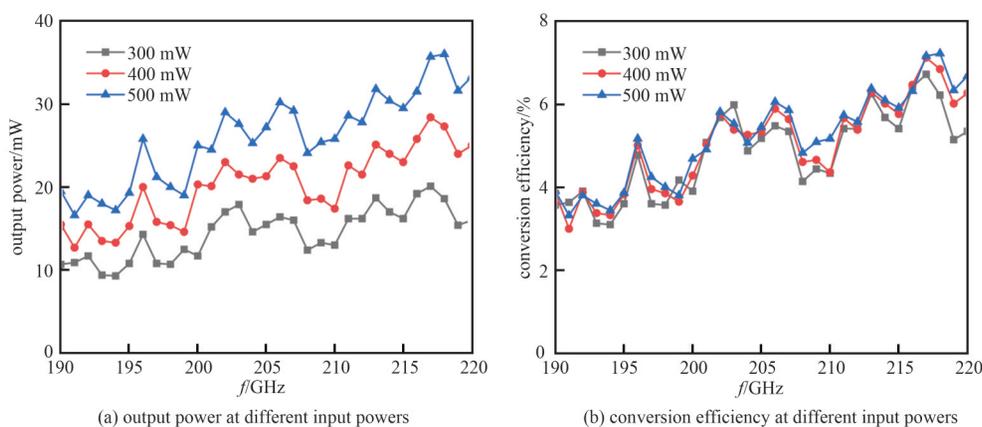


Fig.12 Test results of 200 GHz frequency doubler
图 12 测试结果

本文所设计的 GaN 二倍频器与其他同频段倍频器的主要性能比较如表 2 所示。通过比较可以看出，本文设计的倍频器结合了 GaN 的高功率容量和 AlN 较好的散热性，可承受较大的输入功率，实现较大的输出提升。

表 2 同频段倍频器性能比较

Table2 Comparison of performance of frequency multiplier in the same frequency band

references	frequency multiplication coefficient	f/GHz	input power/mW	output power/mW	SBD type
[6]	×2	140~220	5.0	3.2	GaAs
[7]	×2	140~220	31.9	3.8	GaAs
[8]	×2	190~220	300.0	31.8	GaN
[5]	×2	204~218	900.0	87.0	GaN
this article	×2	190~220	500.0	36.0	GaN

4 结论

本文基于高热导率的 AlN 衬底设计并实现了一款输出频率为 190~220 GHz 的高功率容量 GaN 二倍频器。考虑到高功率输入条件下温度对 SBD 的影响，修正了二极管模型，并进行了电热耦合仿真。对倍频器进行装配和测试，结果表明，该倍频器输出较为平坦，在 500 mW 连续波输入下，196~200 GHz 输出均高于 20 mW，并且在 218 GHz 时，最高输出功率为 36 mW，转换效率为 7.2%。由于采用人工装配二极管，误差较大，因此仿真和实测有一定的偏差。

参考文献:

- [1] MEHDI I, SILES J V, LEE C, et al. THz diode technology: status, prospects, and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(6):990–1007. doi:10.1109/JPROC.2017.2650235.
- [2] BURFORD N M, EL-SHENAWEE M O. Review of terahertz photoconductive antenna technology[J]. Optical Engineering, 2017, 56(1):010901.
- [3] LEPESHOV S, GORODETSKY A, KRASNOK A, et al. Enhancement of terahertz photoconductive antenna operation by optical nanoantennas[J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(1):1600199.
- [4] 常少杰, 吴振华, 黄杰, 等. 真空电子太赫兹器件研究进展[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1):85–102. (CHANG Shaojie, WU Zhenhua, HUANG Jie, et al. The research progress of vacuum electron device in terahertz band[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1):85–102.) doi:10.11972/j.issn.1001-9014.2022.01.005.
- [5] KIURU T, DAHLBERG K, MALLAT J, et al. Schottky frequency doubler for 140~220 GHz using MMIC foundry process[C]// 2012 the 7th European Microwave Integrated Circuit Conference. Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2012:84–87.
- [6] DENG Jianqin, YANG Yintang, ZHU Zhangming, et al. A 140~220 GHz balanced doubler with 8.7%~12.7% efficiency[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(6):515–517. doi:10.1109/LMWC.2018.2823006.
- [7] LUO Xiang, ZHU Huali, ZHANG Tiedi, et al. A 200 GHz GaN-based frequency doubler with bidirectional electro-thermal coupling method[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2024, 34(7):931–934. doi:10.1109/LMWT.2024.3398001.
- [8] SONG Xubo, LIANG Shixiong, LYU Yuanjie, et al. GaN-based frequency doubler with pulsed output power over 1 W at 216 GHz[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(12):1739–1742. doi:10.1109/LED.2021.3119391.
- [9] WU Chengkai, ZHANG Yong, LI Yukun, et al. Millimeter-wave waveguide-to-microstrip inline transition using a wedge-waveguide iris[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(2):1087–1096. doi:10.1109/TMTT.2021.3123349.
- [10] 宋洁晶, 高渊. 204~218 GHz AlN 基板散热增强式 GaN 二倍频器[J]. 半导体技术, 2023, 48(9):800–804. (SONG Jiejing, GAO Yuan. 204~218 GHz GaN frequency doubler with AlN substrate for heat dissipation enhancement[J]. Semiconductor Technology, 2023, 48(9):800–804.)

作者简介:

杨岚馨(1998-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹固态电路与系统等. email:lanxinyang@std.uestc.edu.cn.

骆祥(1996-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹固态电路与系统等.

肖飞(1975-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微波毫米波电路器件及系统设计、天线设计及测量、先进芯片封装等.

张勇(1975-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微波与毫米波集成电路、固态太赫兹技术等.