

文章编号: 2095-4980(2023)09-1080-06

多阳极 220 GHz 倍频器单片设计

徐森锋¹, 宋旭波^{*2}, 顾国栋¹, 梁士雄², 许婧¹, 周幸叶¹,
张立森², 郝晓林¹, 林勇¹, 冯志红^{*2}

(1. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北石家庄 050051; 2. 固态微波器件与电路全国重点实验室, 河北石家庄 050051)

摘要: 介绍了一款基于 GaAs 肖特基二极管单片工艺的 220 GHz 倍频器的设计过程以及测试结果。为提高输出功率, 倍频器采用多阳极结构, 8 个二极管在波导呈镜像对称排列, 形成平衡式倍频器结构。采用差异式结电容设计解决了多阳极结构端口散射参数不一致问题, 提高了倍频器的转换效率和工作带宽。对设计的倍频器进行流片、装配和测试, 测试结果显示: 倍频器在 204~234 GHz 频率范围内, 转化效率大于 15%; 226 GHz 峰值频率下实现最大输出功率为 90.5 mW, 转换效率为 22.6%。设计的 220 GHz 倍频器输出功率高, 转化效率高, 工作带宽大。

关键词: 倍频器; 太赫兹; 肖特基二极管; 结电容; 单片

中图分类号: TN771

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022184

Design of 220 GHz frequency doubler MMIC with multi-anode structure

XU Senfeng¹, SONG Xubo^{*2}, GU Guodong¹, LIANG Shixiong², XU Jing¹, ZHOU Xingye¹, ZHANG Lisen²,
HAO Xiaolin¹, LIN Yong¹, FENG Zhihong^{*2}

(1. The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang Hebei 050051, China;

2. National Key Laboratory of Solid-state Microwave Devices and Circuits, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: The designing process and measurement results of a 220 GHz frequency doubler based on monolithic GaAs Schottky barrier diode are introduced. Multi-anode structure is adopted in this frequency doubler to improve the output power. Eight anodes are mirror symmetrically arranged along the waveguide to form balanced structure. The conversion efficiency and operating bandwidth are improved by adopting various junction capacitances to suppress the difference of scattering parameters among wave ports. The designed frequency doubler is fabricated and measured. Measurement result shows that the conversion efficiency of frequency doubler is above 15% from 204 GHz to 234 GHz and a peak output power of 90.5 mW with conversion efficiency above 20% is demonstrated at 226 GHz. Finally, a 220 GHz frequency doubler with high output power, high conversion efficiency and wide operating bandwidth is realized by adopting multi-anode structure.

Keywords: frequency doubler; terahertz; Schottky barrier diode; junction capacitance; Microwave Monolithic Integrated Circuit

太赫兹(0.1~10 THz)波具有宽频谱、强穿透以及高定向等特点, 下一代移动通信、气象雷达、安检以及太赫兹射电天文望远镜等应用领域的工作频段正向太赫兹频段延伸^[1]。信号源功率不足是困扰太赫兹频段发展的主要瓶颈之一, 发展具有高输出功率的太赫兹倍频器引发关注^[2]。基于 GaAs 肖特基二极管的倍频技术具有体积小, 频率稳定以及常温工作的特点, 是目前实现太赫兹倍频器的主要技术。从电路形式上可以将 GaAs 基太赫兹倍频器芯片分为异构集成芯片和单片集成芯片(Microwave Monolithic Integrated Circuit, MMIC)2 种。异构集成芯片是将 GaAs 太赫兹二极管芯片采用倒装的形式装配在石英、氮化铝(AIN)等材质的电路基板上实现倍频功能, 是太赫

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62201532); 国家重点研发计划资助项目(2021YFB32001); 河北省自然科学基金杰出青年基金资助项目(F2021516001)

*通信作者: 宋旭波 email:songxb@cetc13.cn; 冯志红 email:ga917vv@163.com

兹倍频器最早采用的电路形式^[3-6]。MMIC 是将 GaAs 太赫兹二极管器件与匹配带线、偏置电路、电容、滤波器等无源部分集成到同一个芯片上。与异构集成芯片相比，MMIC 具有散热好、功率大、损耗低以及一致性好等优势，近年来发展迅速^[7-10]。2018 年，美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)使用 MMIC，在 180 GHz 实现输出功率 500 mW、220 GHz 输出功率 110 mW、330 GHz 输出功率 35 mW、550 GHz 输出功率 30 mW、1.03 THz 及 1.64 THz 输出功率 0.7 mW^[7]。2022 年，中国工程物理研究院报道了基于 MMIC 的 1 THz 收发机前端^[8]。为提高输出功率，MMIC 的倍频器会采用多阳极结构，但不同阳极端口的散射参数差异是限制功率输出的关键问题之一。

本文采用单片结构研制了 220 GHz 二倍频器电路。电路采用多阳极结构，针对多阳极结构电路中存在的散射参数差异问题，采用结电容差异式设计，提高倍频器的转化效率。测试结果显示，在 200 mW 输入功率下，倍频器在 204~234 GHz 频率范围内转换效率大于 15%；在 226 GHz 峰值频点，随着输入功率增加到 400 mW，倍频器实现最大输出功率 90.5 mW。

1 工艺方法

芯片制备工艺基于 GaAs MMIC 工艺，工艺流程如图 1 所示。步骤如下：a) 采用 N-/N⁺结构的 GaAs 晶圆制备二极管的阴极，阴极选用 TiAlNiAu 与 N+GaAs 形成欧姆接触；b) 刻蚀隔离：选用电感耦合等离子体刻蚀(Inductively Couple Plasma, ICP)干法刻蚀实现，刻蚀外延层至绝缘 GaAs 衬底；c) 制备阳极：阳极选用 NiAu，与 N-GaAs 形成肖特基接触；d) 通过蒸发电镀方式制备电路中的悬置微带(Suspended Stripline, SSL)，加厚二极管电极，实现空气桥结构；e) 将衬底减薄至 20 μm，减小衬底的寄生效应；f) 将晶圆分片，完成倍频器芯片的制备，分片过程采用湿法工艺实现。本文选用 N-砷化镓层的掺杂浓度为 $2 \times 10^{17} / \text{cm}^{-3}$ ，厚度为 200 nm，对应击穿电压 U_{br} 为 -7 V，结电容 C_{j0} 为 $1.56 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ ，理想因子 n 为 1.1。

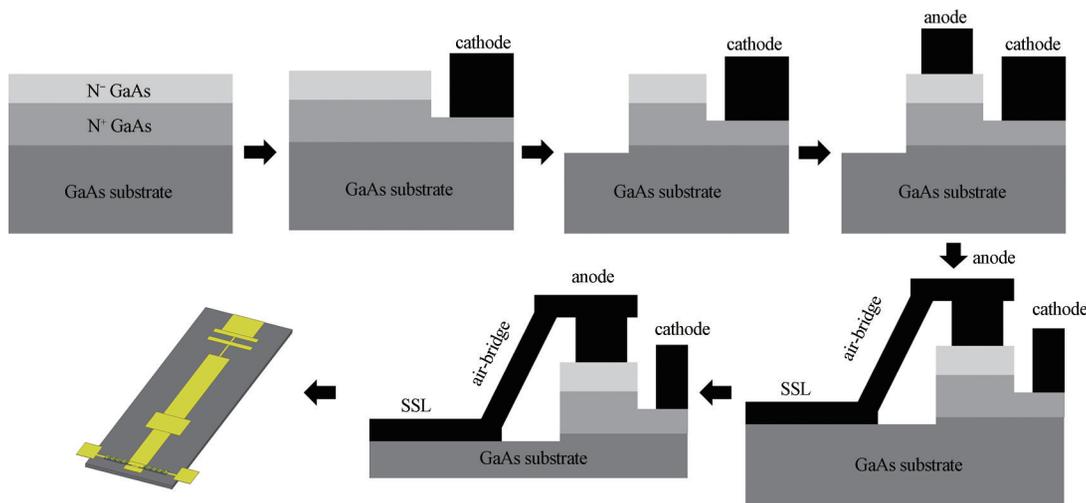


Fig.1 Schematic illustration of the chip fabrication processes
图 1 电路制作工艺流程示意图

2 设计过程

倍频器的倍频次数越高，倍频器转换效率越低。为了维持高的转换效率，目前 220 GHz 频段倍频器主要采用二次倍频和三次倍频 2 种方式。与三次倍频器相比，二次倍频器转化效率更高，制备工艺更简单。本文基于平衡式二倍频器的电路拓扑结构开展电路设计，如图 2 所示。为提高电路的耐受功率和饱和输出功率，采用多阳极结构，通过多个阳极串联的方式提高电路的击穿电压，提升功率。8 个二极管沿电场线方向以镜像对称的形式在波导中排列。输入信号直接耦合到肖特基结产生谐波，奇次谐波互相抵消，偶次谐波叠加后进入悬置微带线以 TEM(Transverse Electro Magnetic field)波的形式向后级传播。最后，谐波通过 E 面探针由悬置

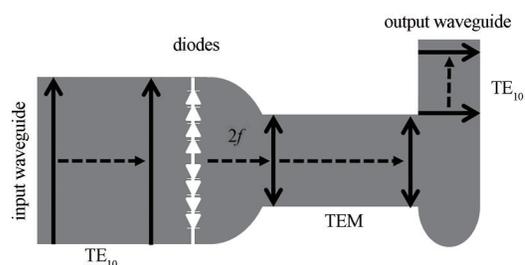


Fig.2 Circuit topology of balanced frequency doubler
图 2 平衡式二倍频器电路拓扑结构

带线过渡至输出波导，以 TE_{10} (Transverse Electric) 波的形式输出。本文通过三维电磁场仿真软件以及电路设计仿真软件等计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 软件完成倍频电路的设计。设计过程包括器件三维电磁场建模、 E 面探针过渡结构优化以及倍频器谐波仿真。

基于肖特基二极管工作的太赫兹倍频器，二极管的零偏结电容 (C_{j0}) 需根据注入功率进行选取。 C_{j0} 太大，不利于产生谐波； C_{j0} 太小，则容易引起输出功率饱和。本文采用负载牵引的方法，设定注入功率 (P_{in}) 为 50 mW，获得了 C_{j0} 取值范围为 20~80 fF 时，二极管在 220 GHz 下可实现的最大转换效率 (Efficiency)，如图 3 所示。 C_{j0} 为 20 fF 时，二极管能实现的最大转换效率为 23%，随着 C_{j0} 增加至 50 fF，最大转换效率达到峰值 36%，然后开始下降。因此选取 C_{j0} 为 50 fF 作为仿真初值。

在太赫兹倍频器的器件三维电磁场建模中，通过构建精确的三维模型，设置波端口，提取端口间的散射参数矩阵用于谐波仿真。本文中二极管三维电磁场建模如图 4(a) 所示，输入 WR8 减高波导设置为端口 1，输出悬置带线设置为端口 2。为提高输出功率，芯片选用 8 个二极管，依次设置为端口 3~10，排序见图 4(b)。高频下的分布效应会导致各端口的寄生电感不同，由端口 3 至端口 6 方向 (或由端口 7 至端口 10 方向) 寄生电感依次增加，引起负载阻抗虚部增加，造成端口间散射参数具有较大的不一致性，尤其是 $S(2,3) \sim S(2,10)$ ，如图 4(c) 所示。该现象会导致传输效率降低，是限制转换效率提升的一个关键问题。根据最大功率传输定理，本文通过提高结电容容值，增加源阻抗虚部，使每个端口的阻抗都满足共轭匹配，实现最佳传输效率。

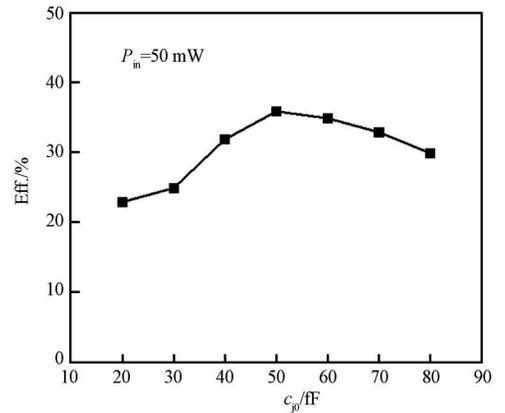


Fig.3 Estimated maximum conversion efficiency of diode varying with C_{j0}
图3 二极管最大转换效率随结电容变化趋势

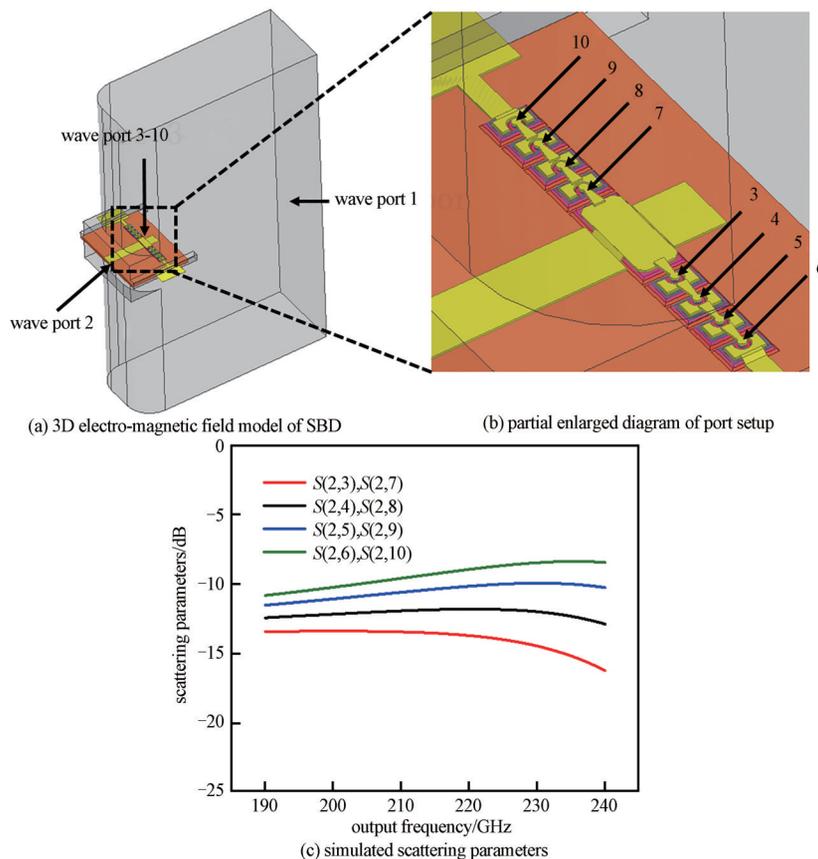


Fig.4 Schematic diagrams of 3D electromagnetic field model of diode
图4 二极管三维电磁场模型示意图

E 面探针过渡结构用于实现信号由悬置带线转至输出波导，仿真结构如图 5(a) 所示。TEM 由端口 1 输入，由端口 2 输出为 TE_{10} 模式横电波，端口 3 用于给二极管提供偏压，使倍频器中的二极管工作在反偏状态以提高转换

效率。该 E 面探针过渡结构具有损耗低，驻波好以及泄漏少的优点，仿真结果如图 5(b) 所示。

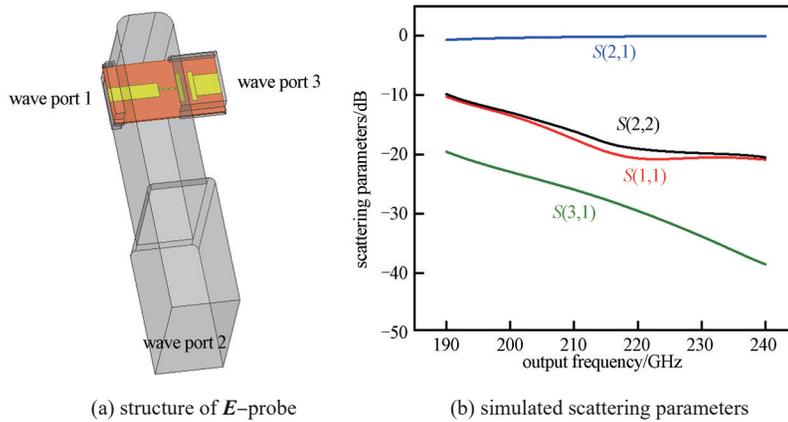


Fig.5 Diagrams of output transition structure

图 5 输出过渡结构示意图

倍频器的谐波仿真设置如图 6 所示，图中①为器件三维电磁场仿真的散射参数文件，②为肖特基二极管电路模型，③为 E 面探针过渡结构的散射参数文件，④为波导形式的输入匹配电路，⑤为悬置带线形式的输出阻抗匹配结构，⑥为输入激励源，⑦为输出负载，⑧为偏置端阻抗。通过给二极管施加反向偏压，使二极管工作在反偏状态，实现容性倍频，提高倍频器转换效率。结合谐波仿真结果，可以对器件的阳极结直径、输入匹配电路、输出匹配电路等进行优化。针对高频下端口间散射参数不一致性问题，通过结电容差异化设计方法，提升倍频器的转化效率，优化后的二极管参数如表 1 所示。其中 C_{j0} 、 R_s 、 U_{br} 、 n 、 U_j 和 I_s 依次表示二极管零偏结电容、串联电阻、反向击穿电压、理想因子、结电势和反向饱和电流。二极管反偏电压为 -2.4 V ，仿真结果如图 7 所示。在输入功率为 300 mW 时，采用相同结电容倍频器最大转换效率为 20.4% ，转换效率 $>15\%$ 的工作带宽为 $206\sim 234\text{ GHz}$ ；而采用差异结电容倍频器可实现的最大转换效率为 22.5% ，工作带宽为 $204\sim 238\text{ GHz}$ ，转换效率及带宽指标均获得改善。

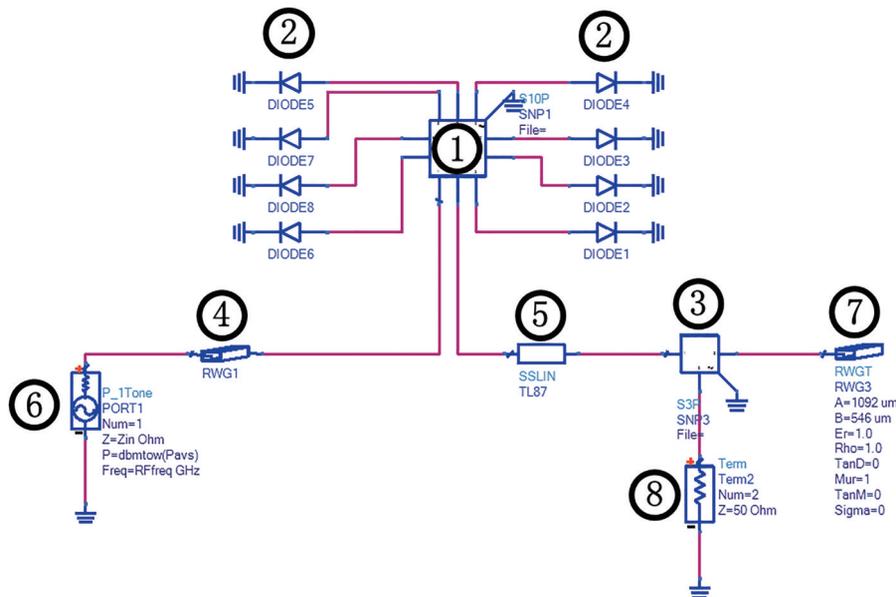


Fig.6 Harmonic simulation of frequency doubler

图 6 倍频器谐波仿真

表 1 二极管模型参数

Table1 Model parameters of diodes

port number	C_{j0}/fF	R_s/W	U_{br}/V	n	U_j/V	I_s/fA
3、7	58.6	3.0	-7	1.1	0.8	231
4、8	60.4	2.9	-7	1.1	0.8	238
5、9	63.9	2.8	-7	1.1	0.8	252
6、10	71.0	2.5	-7	1.1	0.8	280

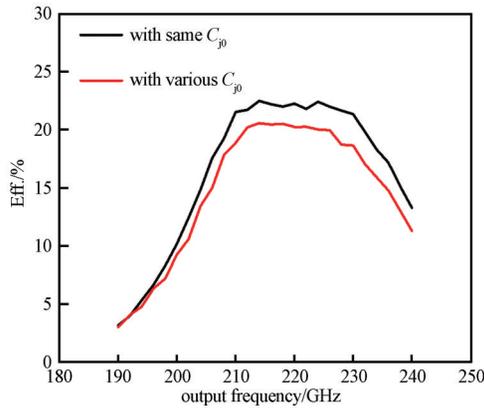


Fig.7 Simulated conversion efficiency with input power of 300 mW
图 7 300 mW 输入功率条件下转换效率仿真结果

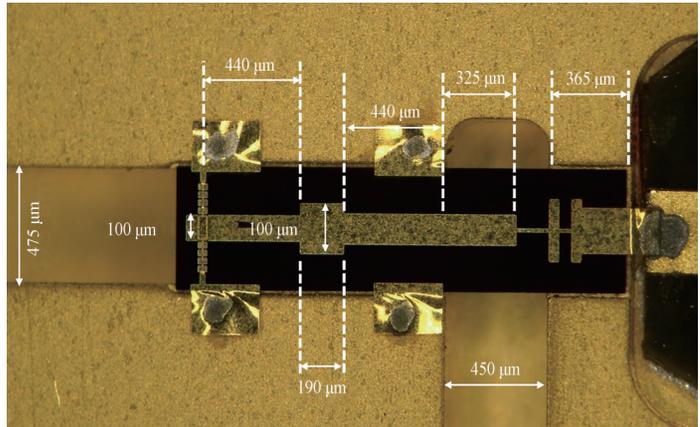


Fig.8 Photographs of a fabricated 220 GHz doubler
图 8 220 GHz 二倍频器照片

3 结果分析

按图 1 所示工艺流程，对倍频器芯片进行了流片制备。分别加工了沿波导 E 面中心切割的倍频器腔体。芯片上需要与腔体或直流偏置连接的部位采用梁式引线结构，该结构具有易安装和低寄生的优点，连接使用导电胶实现，如图 8 所示。

测试过程中，倍频器模块的输出端连接热耦式功率计，输入端连接一个 10 dB 耦合器用于测试输入功率和反射功率。倍频器输出功率如图 9 所示，该倍频器模块具有较宽的工作带宽和较高的转换效率，在 200 mW 注入功率下，204~234 GHz 频率范围内倍频器输出功率大于 30 mW；在 226 GHz 下，倍频器输入功率达到峰值，为 50.9 mW，转换效率为 25.5%。通过测试反射功率，可得到倍频器的输入反射系数，带内反射系数最低为 -15.8 dB。

在 226 GHz 峰值频点下，将倍频器偏置于 -15 V，输出功率与转换效率随输入功率变化曲线如图 10 所示。输入功率为 50 mW 时，不足以产生高谐波，输出功率仅为 2.4 mW，对应转化效率为 4.8%。随着输入信号的增加，二极管非线性的动态范围显著扩大。在输入功率为 250 mW 时，实现 60.9 mW 输出功率和 24.8% 的转化效率。功率继续增加时，由于热效应等因素，转化效率开始下降，输出功率趋于饱和。400 mW 输入功率下，实现最大输出功率为 90.5 mW，转化效率为 22.6%。

表 2 将本文结果与国内外相关文献结果进行对比。与三倍频结果相比，二倍频器可以在较大注入功率下，转换效率高，输出功率也较高。即使将功率合成结构也纳入比较，本文指标也仅低于 JPL 通过两路合成达到的 110 mW，倍频器性能具有较强的先进性。

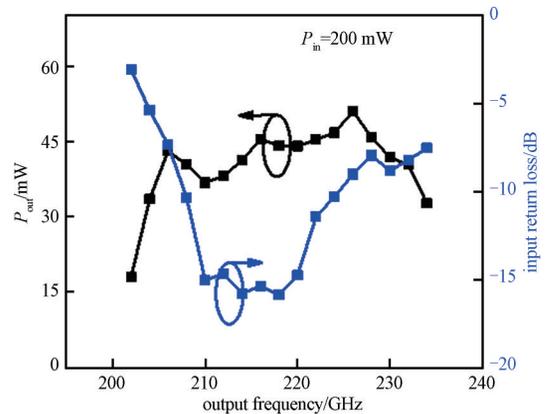


Fig.9 Characteristics of fabricated 220 GHz doubler
图 9 220 GHz 二倍频器特性曲线

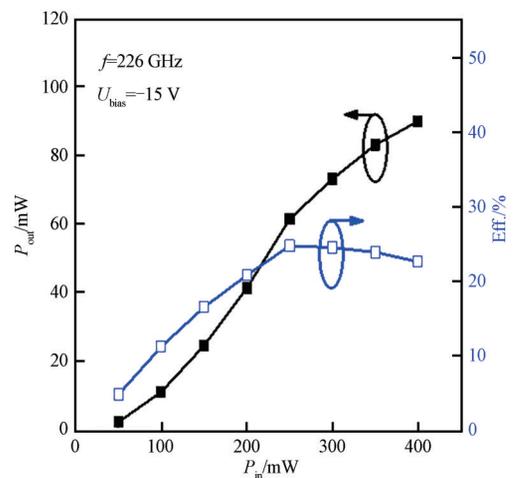


Fig.10 Curves of output power and conversion efficiency with various input powers
图 10 输出功率、转换效率随输入功率变化曲线

表 2 结果比较

Table2 Comparison of consequences

ref.	multiplying factor	operating bandwidth/GHz	peak output power/mW	peak conversion efficiency/%	characteristics
[11]	3	220~235	57.5	23.0	flip-chip
[4]	3	220~230	38.2	12.7	flip-chip
[12]	3	204~232	84.5	18.0	power combining
[7]	3	210~240	110.0	-	power combining
this work	2	202~234	90.5	22.6	MMIC

4 结论

基于GaAs MMIC工艺,研制了工作频率为220 GHz的二倍频器电路。围绕倍频器设计,开展了三维电磁场建模、 E 面探针过渡结构优化以及倍频器谐波仿真优化研究,并对设计的倍频器进行了流片、装配以及测试。测试结果显示该倍频器具有输出功率高,转化效率高以及工作带宽宽等优势。

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] 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.
- [3] 陈鹏, 蒋均, 邓贤进. 基于平面肖特基二极管的220 GHz二倍频器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(5):763–766. (CHEN Peng, JIANG Jun, DENG Xianjin. A 220 GHz frequency doubler based on planar Schottky diodes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(5):763–766.) doi:10.11805/TKYDA201805.0763.
- [4] YANG Yilin, ZHANG Bo, WANG Yiwei, et al. Development of high power 220 GHz frequency triplers based on Schottky diodes[J]. IEEE Access, 2020(8):74401–74412. doi:10.1109/ACCESS.2020.2988454.
- [5] 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.
- [6] MORO-MELGAR D, COJOCARI O, OPREA I. High power high efficiency 270~320 GHz source based on discrete Schottky diodes[C]// 2018 The 48th European Microwave Conference (EuMC). Madrid, Spain: IEEE, 2018: 1357–1360. doi: 10.23919/EuMC.2018.8541364.
- [7] SILES J V, COOPER K B, LEE C, et al. A new generation of room-temperature frequency-multiplied sources with up to $10\times$ higher output power in the 160 GHz~1.6 THz range[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(6):596–604. doi:10.1109/TTHZ.2018.2876620.
- [8] HE Yue, LI Li, LIU Ge, et al. A 1 THz Schottky transceiver front-end based on $5\ \mu\text{m}$ GaAs monolithic membrane[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64(12):2143–2150. doi:10.1002/mop.33424.
- [9] SILES J V, LEE C, LIN R, et al. A high-power 105~120 GHz broadband on-chip power-combined frequency tripler[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(3):157–159. doi:10.1109/LMWC.2015.2390539.
- [10] 毋自贤, 郭诚, 温潇竹, 等. 基于片上肖特基二极管的高功率三倍频器设计[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(5):647–654. (WU Zixian, GUO Cheng, WEN Xiaozhu, et al. Design of high power tripler based on on-chip Schottky diodes[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(5):647–654.) doi:10.11972/j.issn.1001-9014.2021.05.011.
- [11] ACST. High-efficiency 200~235 GHz frequency tripler[EB/OL]. [2022-09-22]. https://acst.de/wp-content/uploads/2023/04/211005_ACST_200-%E2%80%93235GHz_Tripler213A_Datasheet_V2.2.pdf.
- [12] TIAN Yaoling, HUANG Kun, HE Yue, et al. A novel balanced frequency tripler with improved power capacity for submillimeter-wave application[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(8):925–928. doi:10.1109/LMWC.2021.3084622.

作者简介:

徐森锋(1983-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为半导体材料与器件. email: senfeng2000@163.com.

宋旭波(1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波器件与电路.

顾国栋(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为固态太赫兹电子技术.

梁士雄(1981-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为固态太赫兹电子技术.

许婧(1987-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为半导体器件.

周幸叶(1983-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为半导体材料与器件.

张立森(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹固态倍频技术.

郝晓林(1996-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为半导体器件.

林勇(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波电路.

冯志红(1973-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为宽禁带半导体、碳电子和固态太赫兹电子技术.