

文章编号: 2095-4980(2020)02-0171-04

150 GHz 大功率二倍频器

徐 鹏¹, 杨大宝¹, 张立森², 梁士雄², 顾国栋², 吕元杰², 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.专用集成电路重点实验室, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 基于六阳极结反向串联型砷化镓平面肖特基容性二极管, 采用平衡式二倍频器结构, 成功研制出一种大功率 150 GHz 二倍频器。使用三维电磁场与非线性谐波平衡联合仿真方法, 提高了仿真结果和实际的吻合度, 并根据设计结果完成倍频器的加工、装配和测试。倍频器在输出频率为 146~158 GHz 下的倍频效率达到 7%以上; 在输出频率为 154 GHz 时, 倍频效率达到 12%, 输出功率达到 71 mW。

关键词: 太赫兹; 二倍频; 肖特基二极管; 大功率

中图分类号: TN45

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018330

150 GHz high output power frequency doubler

XU Peng¹, YANG Dabao¹, ZHANG Lisen², LIANG Shixiong², GU Guodong², LYU Yuanjie², FENG Zhihong²

(1.The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050051, China;

2.National Key Laboratory of ASIC, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: A 150 GHz high output power frequency doubler is designed and realized based on six anodes in anti-series GaAs planar Schottky varactors. The doubler is utilized by balanced construction. Co-simulation of 3-D electromagnetic simulator with nonlinear harmonic balance tool is utilized to improve the precision of simulation. According to the design results, the 150 GHz high output power frequency doubler is fabricated and tested. The measured efficiency is above 7% in 146 GHz–158 GHz. The peak efficiency is 12% at 154 GHz, and the output power is 71 mW.

Keywords: Terahertz; frequency doubler; Schottky varactors; high power

太赫兹(Terahertz, THz)频率是对 0.1~10 THz 的电磁波频率的统称, 波长范围 0.03~3 mm, 典型脉宽在亚皮秒量级。太赫兹波介于微波、毫米波和红外电磁波之间, 是微波频率向上延伸进入光波前最后的频率区间, 在电磁波频谱中占有特殊地位, 具有不同于其他频段电磁波的特征。太赫兹波的波长更短, 与微波相比, 具有更好的穿透性, 因此太赫兹技术在雷达系统、通信系统、安检系统等方面具有潜在的应用前景^[1-3]。由于太赫兹波频率非常高, 以基波形式产生的太赫兹信号无法达到所需要的大功率输出和信号稳定度, 这就需要将高功率和高稳定度的低频率源通过倍频的方式得到太赫兹信号。因此高功率、高效率的太赫兹倍频器的研制对于太赫兹技术的发展至关重要^[4]。D 波段(110~170 GHz)是从毫米波迈向太赫兹的初始频段, D 波段倍频器可以用作更高频率太赫兹倍频器的基波驱动源, 驱动源需要足够大的功率输出, 因此需要研制高输出功率的 D 波段倍频器。在较低的太赫兹频段, 倍频器采用基于平面肖特基二极管的工艺技术制作^[5-8], 平面肖特基二极管是太赫兹倍频器的核心器件^[9-11]。近些年, 国内研究单位在砷化镓肖特基势垒二极管制作工艺方面的进步, 使得国内的 D 波段太赫兹倍频器得到了较大的发展。南京电子器件研究所的姚常飞在 2013 年报道了一款 150 GHz 二倍频器, 在 149.2 GHz 测得最高倍频效率为 7.5%, 在 147.4~152 GHz 效率典型值为 6%^[12]。中国工程物理研究院的缪丽在 2013 年报道了一种基于肖特基变容二极管的 140 GHz 二倍频器, 在 20 dBm 的驱动功率下, 倍频器的输出功率最高达 6.6 mW, 倍频效率为 7.15%^[13]。中国工程物理研究院的何月在 2017 年报道了一款 170 GHz 平衡式肖特基二极管倍频器, 最高输出功率大于 25 mW^[14]。

国外在太赫兹倍频器研究方面开展较早, 以美国弗吉尼亚二极管公司(Virginia Diode Inc, VDI)、喷气推进

收稿日期: 2018-11-12; 修回日期: 2019-03-28

作者简介: 徐 鹏(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 THz 固态电子器件、模型及电路设计。email:maxuanxupeng@126.com

实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)和英国卢瑟福阿普尔顿实验室(Rutherford Appleton Laboratory, RAL)为代表的众多科研机构研制出从 0.1~0.5 THz 的容性倍频器。德国 ACST 公司在 2018 年报道了一款 150 GHz 二倍频器, 输出功率为 180 mW, 效率达到 30%以上^[15]。这是由于该倍频器所用的肖特基二极管采用了特殊的工艺, 可以将阳极结击穿电压提高至接近理论极限, 大大增加了阳极结 $C-U$ 非线性特性和功率容量, 从而提高了倍频效率和输出功率。目前国内研制的肖特基二极管的击穿电压只能达到理论极限的一半左右, 再加上仿真模型的误差, 尚未发挥出容性倍频的更大优势。

本文基于本单位自主设计并加工制作的六阳极结反向串联型砷化镓肖特基容性二极管, 完成了 0.15 THz 平衡式二倍频器的研制。该倍频器基于金属波导腔体搭载石英基片微带电路的形式实现, 通过电磁耦合结构设计实现了波导-微带转换。为提高输出功率, 采用容性倍频方式。使用三维电磁场仿真软件和电路仿真软件交替迭代协同仿真的方法, 完成了 150 GHz 二倍频器的设计和优化, 并对该倍频器进行了加工和测试。

1 150 GHz 二倍频器设计

根据倍频方式的不同, 倍频器可以分为阻性倍频和容性倍频。阻性倍频是利用二极管的 $I-U$ 非线性特性实现倍频, 容性倍频是利用二极管的 $C-U$ 非线性特性实现倍频。阻性倍频方式工作频率高, 带宽大, 但倍频效率和输出功率低; 容性倍频方式工作频率低, 在 0.5 THz 以下, 但倍频效率和输出功率高。由于本文设计的倍频器工作于 150 GHz, 综合考量之后, 最终选用容性倍频方式。倍频二极管选用低掺杂容性肖特基二极管, 通过控制加载在二极管上的偏置电压, 使二极管工作于容性倍频模式。研制的二倍频器采用平衡式结构, 如图 1 所示。该结构的输入信号为 TE_{10} 模式, 输出信号为 TEM 模式, 2 种模式正交, 因此不需要滤波器就可以完成输入基波信号与输出二次谐波信号之间的隔离, 大大减小了输入波导和输出波导之间的石英基片电路的长度, 避免了滤波器带来的损耗, 提高了倍频效率。同时平衡式结构在输出端可以使偶次谐波分量互相叠加, 基次谐波分量互相抵消, 很好地抑制奇次谐波的输出, 提高了谐波抑制度。

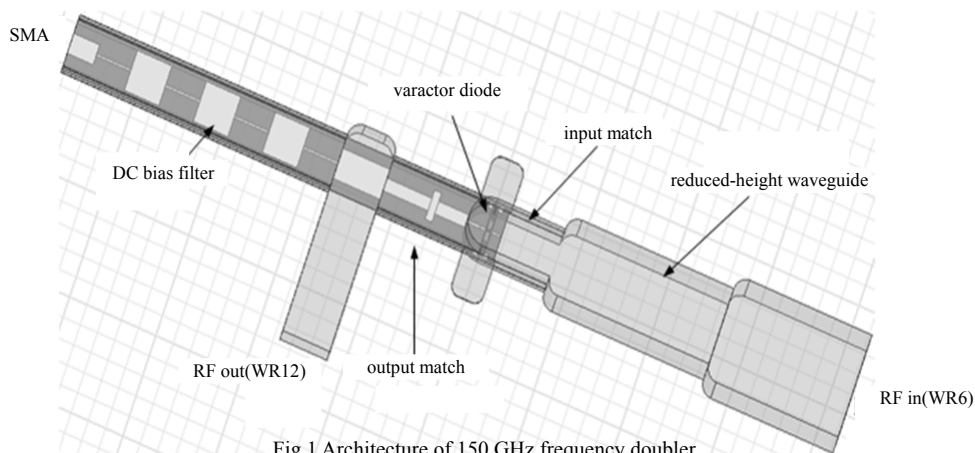


Fig.1 Architecture of 150 GHz frequency doubler

图 1 频率 150 GHz 二倍频器结构图

倍频器的基波信号以 TE_{10} 模式通过标准波导 WR12 引入, 通过减高波导对二极管的基波输入阻抗进行匹配。由于倍频器要求较高的输出功率和较大的功率承载能力, 因此倍频二极管采用多阳极结的结构, 用于提高倍频二极管的功率容量。本文采用的二极管结构由本单位自主设计并加工, 包含 6 个阳极结, 分为两边, 每边各 3 个阳极结, 呈对称结构。该二极管如果由一端向另一端看, 阳极结是反向串联; 如果从中间 PAD(焊盘)向两端看, 是同向并联。二极管横跨在减高波导内, 中间 PAD 与石英悬置微带线粘结, 两端 PAD 与石英的接地 PAD 粘结用于直流接地。输出的二次谐波是 TEM 模式, 采用石英悬置微带线对二极管的输出阻抗进行匹配。波导-微带探针过渡使二次谐波传输至矩形波导 WR6 并输出。直流偏置电压通过 SMA 接头引入, 直流偏置滤波器采用高低阻抗线形式, 用于阻止二次谐波从直流偏置电压端泄露。

倍频器所用二极管的单阳极结参数如表 1 所示。

表 1 单阳极结肖特基二极管参数

Table1 Parameters of single anode Schottky diode junction

series resistance R_s/Ω	ideality factor n	saturation current I_s/fA	junction potential U_j/V	zero-bias capacitance C_{j0}/fF
4	1.15	50	0.65	40

采用三维电磁场仿真软件和电路仿真软件交替迭代协同进行二倍频器的设计优化。采用有限元分析法对二倍频器的无源部分进行三维电磁场仿真分析，采用谐波平衡分析法对非线性部分进行仿真分析。为了提高倍频效率，必须最大程度利用二极管的非线性特性，需要对二极管在相应频段的端口阻抗进行最优匹配。

采用源极牵引法和负载牵引法提取出二极管的最佳基波输入阻抗和最佳二次谐波输出阻抗。其中基波的最佳输入匹配阻抗 $Z_{in}=13+j34$ ，二次谐波的最佳输出匹配阻抗 $Z_{out}=26+j48$ 。然后建立包含二极管无源部分在内的二倍频器的三维模型结构，代入最佳基波输入阻抗和最佳二次谐波输出阻抗对无源部分进行三维电磁场仿真。将三维电磁场仿真后得到的九端口 S 参数包 S9P 文件代入电路仿真软件中，同每个单阳极结二极管的非线性模型一同进行谐波平衡仿真，单阳极结二极管的非线性模型参数如表 1 所示。

调节偏置电压和输入功率优化倍频效率，然后调节三维模型结构中的无源电路参数继续进行优化，直至最终仿真结果达到预期效果。倍频器的最终仿真结果如图 2 所示。固定直流偏置电压为 -3 V，基波输入功率为 400 mW，基波输入频率为 65~87.5 GHz，在输出频率为 144~162 GHz 时，倍频效率在 10% 上下浮动，3 dB 带宽为 22 GHz，带内为 142~164 GHz，基本符合预期。

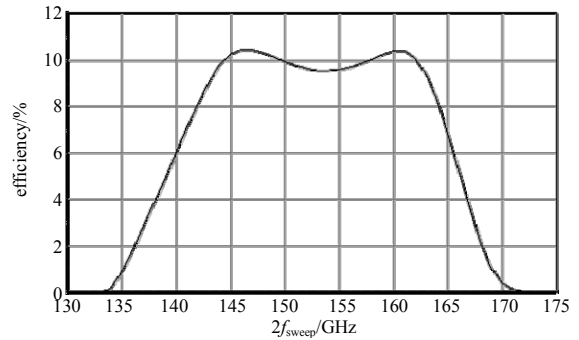


Fig.2 Simulated output efficiency of 150 GHz frequency doubler
图 2 150 GHz 二倍频器仿真效率

2 150 GHz 二倍频器测试与讨论

图 3 为二倍频器完成加工和装配之后的实物照片，包括 3 个端口，分别为直流偏置 SMA 接口、WR12 标准矩形波导口和 WR6 标准波导口。对二倍频器进行测试的系统框图如图 4 所示。功率源 N5173B 产生的信号经过 6 次倍频后进入 E 波段功率放大器。直流稳压电源为六倍频器、功率放大器和二倍频器提供直流偏置电压。该测试系统可以将输入二倍频器的基波驱动信号的功率提高至 400~600 mW，频率为 73~79 GHz，可以满足二倍频器的测试需求。

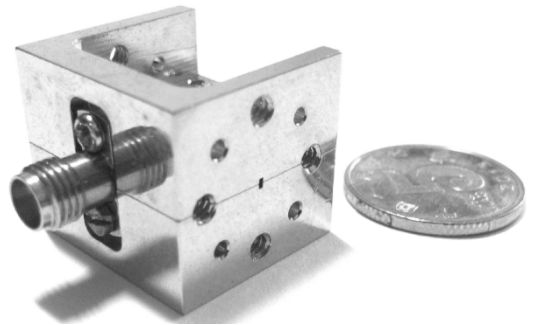


Fig.3 Photo of 150 GHz frequency doubler
图 3 150 GHz 二倍频器照片

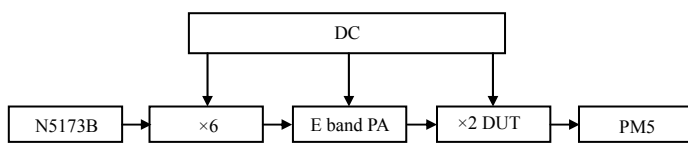


Fig.4 Block diagram of the test system
图 4 测试系统框图

测试的基波驱动信号输入频率为 73~79 GHz，采用连续波方式进行测试。测试时首先调整直流偏置电压，在偏置电压为 -5 V 时，倍频效率最高，与仿真结果存在偏差，这是由于模型误差导致的。测试结果如图 5 所示，倍频器在输出频率为 146~158 GHz 范围内的倍频效率达到 7% 以上，输出功率达到 30 mW 以上。带宽比仿真结果小，这是由于测试条件所限，无法实现更大范围频率的测试。

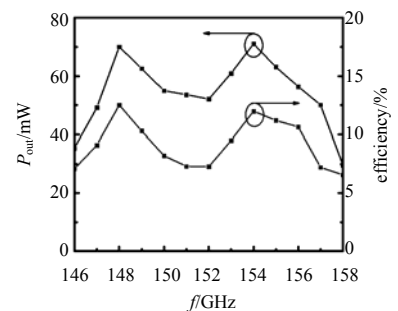


Fig.5 Measured output power and efficiency of 150 GHz frequency doubler
图 5 150 GHz 二倍频器输出功率和效率测试数据

该倍频器在输出频点为 154 GHz 时，倍频效率达到 12%，输出功率达到 71 mW。通过对比之前已发表的文献资料，达到目前该频段倍频器输出功率的国内最高水平。

3 结论

基于本单位自主研制的六阳极结反向串联型砷化镓肖特基容性二极管，采用平衡式结构，设计并实现了一种 150 GHz 大功率二倍频器。采用三维电磁场与非线性谐波平衡联合仿真方法，提高了仿真结果和实际的吻合

度。根据设计结果完成倍频器的加工、装配和测试。在输出频点为 154 GHz 时, 倍频效率达到 12%, 输出功率达到 71 mW, 是目前该频段倍频器输出功率的国内最高水平。研究实现的 150 GHz 二倍频器的电路结构和设计方法均可用于更高频段的容性二倍频器设计, 同时该倍频器也可用作更高频段倍频器的驱动信号源。但该二倍频器的效率仍偏低, 需要在后续的工作中加以改进。

参考文献:

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2002,50(3):910-928.
- [2] 程兆华,祝大军,刘盛纲. 太赫兹技术的研究进展[J]. 现代物理知识, 2005,17(5):40-44. (CHENG Zhaohua,ZHU Dajun, LIU Shenggang. Research progress of terahertz technology[J]. Modern Physics Knowledge, 2005,17(5):40-44.)
- [3] MAESTRINI A,MEHDI I,SILES J V,et al. Design and characterization of a room temperature all-solid-state electronic source tunable from 2.48 to 2.75 THz[J]. IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology, 2012,2(2):177-185.
- [4] KURTZ D S,HESLER J L,CROWE T W,et al. Submillimeter-wave sideband generation using varactor Schottky diodes[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(11):2610-2617.
- [5] MAIWALD F,SCHLECHT E,MAESTRINI A,et al. Terahertz frequency multiplier chains based on planar Schottky diodes[J]. SPIE, 2002(4855):447-458.
- [6] CHATTOPADHYAY G,SCHLECHT E,GILL J,et al. A broadband 800 GHz Schottky balanced doubler[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2002,12(4):117-118.
- [7] 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.)
- [8] MAESTRINI Alain,THOMAS Bertrand,WANG Hui,et al. Schottky diode based terahertz frequency multipliers and mixers[J]. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences-Physique, 2010,11(7):480-495.
- [9] CHATTOPADHYAY G,SCHLECHT E,WARD J,et al. An all-solid-state broad-band frequency multiplier chain at 1500 GHz[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004,52(5):1538-1547.
- [10] 张勇,林元根. 185 GHz 固态二倍频器研究[J]. 电子科技大学学报, 2010,39(2):232-235. (ZHANG Yong,LIN Yuangen. 185 GHz solid-state circuits frequency doubler[J]. Journal of UEST of China, 2010,39(2):232-235.)
- [11] PORTERFIELD D W. High-efficiency terahertz frequency triplers[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu,Hawaii,USA:IEEE, 2007:337-340.
- [12] 姚常飞,周明,罗运生,等. 基于肖特基平面二极管的 150 GHz 和 180 GHz 固定调节式倍频源[J]. 红外与毫米波学报, 2013,32(2):102-107. (YAO Changfei,ZHOU Ming,LUO Yunsheng,et al. 150 GHz and 180 GHz fixed-tuned frequency multiplying sources with planar Schottky diodes[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013,32(2):102-107.)
- [13] 缪丽,邓贤进,王成. 140 GHz 二倍频器的研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(3):359-362. (MIAO Li, DENG Xianjin,WANG Cheng. Implementation of 140 GHz frequency doubler[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(3):359-362.)
- [14] 何月,蒋均,陆彬,等. 高效 170GHz 平衡式肖特基二极管倍频器[J]. 红外与激光工程, 2017,46(1):0120003-1-0120003-8. (HE Yue,JIANG Jun,LU Bin,et al. High efficiency 170 GHz balanced Schottky diode frequency doubler[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017,46(1): 0120003-1-0120003-8.)
- [15] COJOCARI Oleg,MORO-MELGAR Diego,OPREA Ion,et al. High-power mm-wave sources based on Schottky diodes[C]// 2018 43th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves. Nagoya,Japan:[s.n.], 2018:1-2.