

190 GHz 大功率输出平衡式二倍频器

徐鹏¹, 杨大宝¹, 张立森², 梁士雄^{2**}, 宋旭波¹, 顾国栋¹, 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, 采用平衡式二倍频结构, 研制出了一种 190 GHz 大功率输出二倍频器。使用三维电磁场与非线性谐波平衡联合的方法进行了仿真, 并根据仿真结果完成了倍频器的加工、装配和测试。倍频器在 182~196 GHz 输出频率范围内的倍频效率可达 8% 以上; 当输出频率为 187 GHz 时, 倍频效率和输出功率可分别达到 15.4% 和 85 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

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614022

190-GHz Balanced Frequency Doubler with High Output Power

Xu Peng¹, Yang Dabao¹, Zhang Lisen², Liang Shixiong^{2**}, Song Xubo¹,
Gu Guodong¹, Lü Yuanjie², Feng Zhihong^{2*}

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

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

Abstract Herein, a 190-GHz frequency doubler with a high output power is designed and realized using a balanced double-frequency construction based on the anti-series gallium arsenide planar Schottky varactors. A method that combines a three-dimensional electromagnetic field and nonlinear harmonic balance is employed to conduct a simulation. The simulation results demonstrate that the proposed frequency doubler has been effectively fabricated, assembled, and tested. The frequency-doubling efficiency of the proposed doubler can reach more than 8% in the output frequency range of 182-196 GHz. Moreover, at an output frequency of 187 GHz, the frequency-doubling efficiency and the output power can reach 15.4% and 85 mW, respectively.

Key words Terahertz; frequency doubler; Schottky varactors; high power

OCIS codes 040.2235; 110.6795

1 引 言

太赫兹 (THz) 频率是指从 0.1 THz 到 10 THz 的电磁波频率, 下接毫米波频段, 上接红外频段, 因此, 太赫兹波在电磁波频谱中占有特殊地位。很多物质的特征光谱在太赫兹频段, 并且太赫兹波可以穿透无极性的非金属材料, 可以被水蒸气吸收, 可以极大地拓展无限通信带宽, 因此, 太赫兹技术在探测系统、成像系统、雷达系统、通信系统、安检系统等方面有非常广阔的应用前景^[1-5]。太赫兹频率被称为电磁频谱上的太赫兹空隙, 最重要的原因就是缺少大功率、高可靠性、小体积的固态太赫兹功率源。行

波管、回旋管等真空器件可以产生大功率源, 但其寿命较短, 并且难以集成, 从而限制了这些器件的应用。基于耿氏二极管、雪崩二极管、异质结双极晶体管、高电子迁移率晶体管、金属-氧化物-半导体场效应晶体管等的器件具有很低的振荡器输出功率, 并且输出功率随着频率的提高而急剧下降。由于目前诸多因素的限制, 固态太赫兹源主要基于低频大功率固态源经倍频后获取, 因此对倍频器进行研究是非常重要的。

近年来, 国内研究人员在砷化镓肖特基势垒二极管的制作工艺方面取得了许多成果, 使得国内的太赫兹倍频器得到了较大发展。南京电子器件研究

收稿日期: 2019-01-23; 修回日期: 2019-02-26; 录用日期: 2019-03-07

* E-mail: blueledviet@yahoo.com.cn; ** E-mail: wialliam@163.com

所的姚常飞等^[6]在2013年报道了一款180 GHz的二倍频器,在170 GHz下测得其最高的倍频效率为14.8%,最大输出功率为7.5 mW。2015年,姚常飞等^[7]又报道了一款二倍频器,测得其在202 GHz下的最高倍频效率为9.6%,输出功率为8.25 mW。中国工程物理研究院的缪丽等^[8]在2015年报道了一款二倍频器,其在163 GHz下的倍频效率为11%,输出功率最高可达21.41 mW。中国工程物理研究院的何月等^[9]在2017年报道了一款170 GHz平衡式肖特基二极管倍频器,其最高输出功率大于25 mW。

国外在太赫兹倍频器方面的研究开展得较早,以美国弗吉尼亚二极管公司、德国ACST公司为代表的众多科研机构研制出了0.1 THz到0.5 THz的容性倍频器。目前最新报道的是德国ACST公司的一款GaAs肖特基二极管150 GHz二倍频器^[10],其单路输出功率为180 mW,效率可达30%以上,并以此作为功率源推动了300 GHz二倍频器,使其功率大于40 mW,效率超过30%。这是由于德国ACST公司所用的肖特基二极管采用了特殊的工艺,使其击穿电压提高至理论极限,从而大大增加了二极管肖特基的结电容-电压非线性特性和功率容量,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,所以尚未发挥出容性倍频的优势。

本文介绍了一种基于GaAs肖特基二极管的190 GHz平衡式二倍频器。倍频电路通过将平面GaAs肖特基二极管倒装焊至石英基片来实现,石英基片电路通过导电胶与波导腔体连接。所有的无源部分均通过三维电磁场仿真工具完成设计。最终的测试结果显示,该二倍频器在187 GHz时的倍频效率可达15.3%,输出功率可达85 mW。

2 二倍频器设计

为了提高倍频效率,二倍频器采用容性倍频模

式。该模式的倍频效率高,功率容量大。本课题组在前期设计了容性GaAs肖特基二极管,为了增加其功率容量,采用反相串联型6阳极结二极管结构并成功流片。

倍频原理如图1所示,电路采用平衡式结构,该结构可以使偶次谐波分量相互叠加,奇次谐波分量相互抵消。并且由于平衡式结构输入信号和输出信号的模式正交,实现了天然的隔离,因此减少了滤波器带来的损耗,缩短了石英基片电路的长度,相较于非平衡式结构有更高的倍频效率。

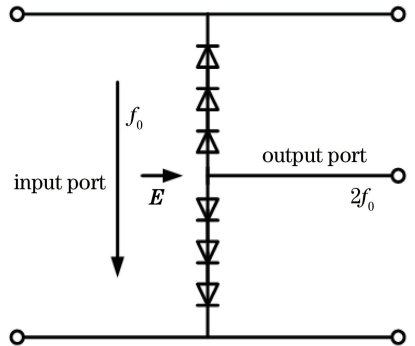


图1 二倍频器原理示意图

Fig. 1 Schematic of frequency doubler

倍频电路衬底材料选用厚度为75 μm的石英,这是因为石英的介电常数只有3.78,相较于其他材料要低很多,可以有效降低传输损耗。该二倍频器将6阳极结二极管芯片倒装焊至石英电路上,中间与石英微带线连接,两边与接地焊盘连接。二极管的长度为0.4 mm,宽度为0.05 mm,厚度为0.02 mm。由于工作频率很高,二极管的尺寸与波长接近,高频寄生参量的影响无法忽略,因此在对二极管进行最优化匹配阻抗设计时,必须考虑二极管高频寄生参量的影响。为了准确提取出二极管的最优化匹配阻抗,建立精确的二极管器件模型至关重要。采用三维电磁场模型与非线性模型相结合的方式建立二极管模型。二极管肖特基结的非线性特性采用SPICE(simulation program with integrated circuit emphasis)模型参数进行表征,如表1所示。

表1 肖特基二极管单阳极结参数

Table 1 Parameters of single anode junction of Schottky diode

Series resistance R_s /Ω	Ideality factor n	Saturation current I_s /fA	Junction potential V_f /V	Zero-bias capacitance C_{j0} /fF
4	1.2	48	0.62	15

建立二极管的三维电磁场模型后,对包含影响二极管寄生参数的全部因素进行仿真分析,二极管所有阳极结的位置都加上激励端口。将仿真得到的

S参数文件导入电路仿真软件中,再加入二极管肖特基结非线性参数,用谐波平衡仿真工具就可以获得二极管的最佳匹配阻抗。其中基波的最佳输入匹

配阻抗 $Z_{in} = 21 + 53j$, 二次谐波的最佳输出匹配阻抗 $Z_{out} = 36 + 28j$. 获得最佳的匹配阻抗对于设计二倍频器至关重要。

倍频器的基波信号通过 WR-8 标准波导引入, 只存在 TE_{10} 模式。为了使输入射频(RF in)信号尽可能多地馈入二极管, 需要根据最佳输入匹配阻抗专门优化设计输入短路面的位置和减小波导的长度, 以减少回波损耗。输出部分包括石英悬置微带电路和波导-微带转换电路。通过二极管的电容-电压非线性产生的二次谐波, 首先以非平衡式的横电磁波(TEM 波)在二极管芯片和输入短路面之间的微带线上传输, 然后通过微带线进行阻抗匹配, 倍频后的射频信号(RF out)最终耦合至 WR-4 标准波导输出。

在上述过程中, 最佳匹配阻抗对于设计输入和输出电路非常重要。为了提高设计效率, 首先采用三维电磁场仿真工具对输入电路和输出电路分别进行独立设计和优化, 优化完毕之后需要对整个倍频电路进行整体仿真分析。整体电路的三维电磁场仿真如图 2 所示。

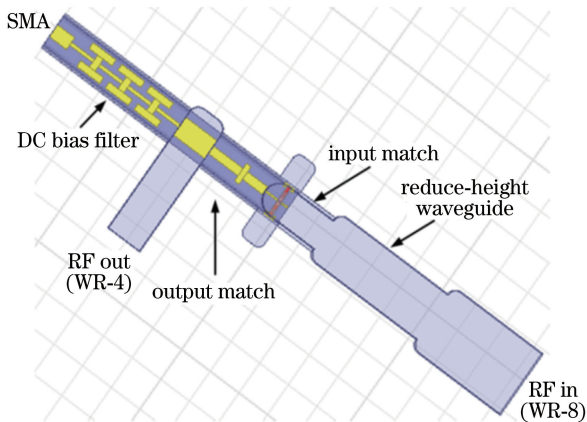


图 2 二倍频器结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of frequency doubler

直流(DC)偏置滤波电路采用预先设计的工型滤波器结构, 用于阻止二次谐波的泄漏, 该电路通过 SMA 型接头与外部直流电源连接, 为二极管提供直流偏置电压。对整体电路进行三维电磁场仿真得到 9 端口的 S 参数文件, 导入电路设计软件中与二极管的非线性部分一起进行谐波仿真, 就可以得到倍频效率仿真结果。根据整体电路的仿真结果进一步进行优化, 直至达到预期的仿真效果。

3 测试与讨论

根据整体优化后的结果设计腔体图和石英电路

版图, 并加工制作。石英电路采用镀金工艺制作并划片, 用导电胶将石英电路安装至波导腔体中。倍频器模块的实物照片如图 3 所示, 模块尺寸为 $21\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 。输入端口采用 WR-8 标准波导, 输出端口采用 WR-4 标准波导。采用 SMA 型接头为二极管提供直流偏置电压。

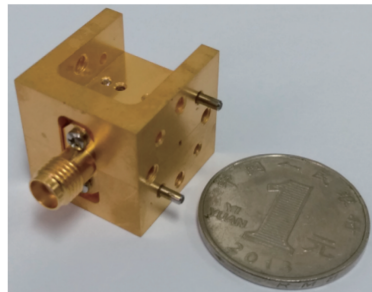


图 3 二倍频器实物

Fig. 3 Physical map of frequency doubler

二倍频器测试系统框图如图 4 所示。功率源 N5173B 信号发生器产生的信号经过八倍频器后进入 W 波段功率放大器(PA), 再经过隔离器后为二倍频器测试提供基波信号, 二倍频器的输出功率值由 PM5 型功率计测试得到。该 PM5 型功率计经过了计量部门的计量与校准, 测量频率范围是 $75\text{ GHz} \sim 3\text{ THz}$, 最高功率可以达到 200 mW , 测量精度为 $0.02\text{ }\mu\text{W}$, 能够满足测试要求。直流稳压电源为八倍频器、功率放大器和二倍频器被测件(DUT)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信号的频率扩展到 $91 \sim 98\text{ GHz}$, 功率达到 $500 \sim 700\text{ mW}$, 可以满足二倍频器的测试需求。

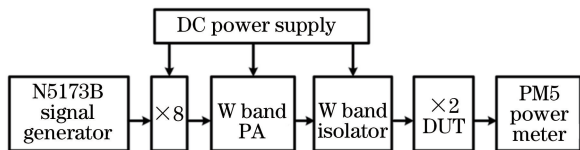


图 4 测试系统框图

Fig. 4 Block diagram of testing system

二倍频器输出功率和效率的测试结果如图 5 所示, 二倍频器在基波信号输入频率为 $91 \sim 98\text{ GHz}$, 输出频率为 $182 \sim 196\text{ GHz}$ 下的输出功率超过了 50 mW , 倍频效率可达 8% 以上。由于测试条件所限, 无法实现更大范围频率的测试。在输出频点为 187 GHz 时, 输出功率达到 85 mW , 倍频效率达到 15.4% 。通过对比之前的文献报道可知, 该功率是目前已知的该频段倍频器输出功率的国内最高水平。

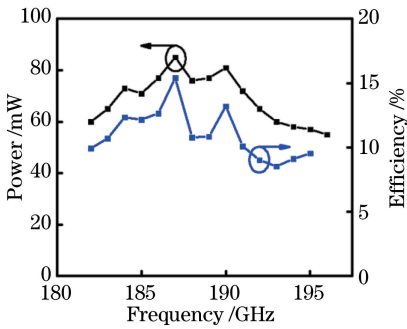


图 5 二倍频器输出功率和效率的测试结果
Fig. 5 Measured output power and efficiency of frequency doubler

4 结 论

基于本单位自主研制的 6 阳极结砷化镓肖特基容性二极管,采用平衡式倍频结构,使用三维电磁场与非线性谐波平衡联合仿真方法完成了二倍频器的设计。平衡式倍频结构相较于非平衡式结构减少了输出滤波器带来的损耗,具有更高的倍频效率。根据设计结果完成了倍频器的加工、装配和测试。测试结果表明:该二倍频器在 182~196 GHz 下的输出功率可达 50 mW 以上,倍频效率可达 8% 以上。在输出频点为 187 GHz 时,倍频效率为 15.4%,输出功率为 85 mW,是目前该频段倍频器输出功率的国内最高水平。

本次研究实现的 190 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。该二倍频器结构简单,成本低,易于实现,但倍频效率仍偏低,需要进一步加以改进。

未来提高二倍频器输出功率和工作频率需要突破的技术难点在于:1)改进容性肖特基二极管的工艺技术,进一步提高肖特基结的击穿电压以及结电容随结电压的变化率;2)提高电路仿真模型的精度,尤其是基波频率倍频至二次谐波频率的非线性模型的精度。以上两点都离不开广大太赫兹研究人员的继续努力。

参 考 文 献

[1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
[2] Cheng Z H, Zhu D J, Liu S G. Research progress of terahertz technology[J]. Modern Physics, 2005, 17(5): 40-44.

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.
[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 Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(2): 177-185.
[4] Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, *et al.* Research on the terahertz active ghost imaging technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0814001. 闫显琪, 赵成强, 徐文东, 等. 太赫兹主动关联成像技术研究[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0814001.
[5] Wang J L, Zhang B Z, Duan J P, *et al.* Flexible dual-stopband terahertz metamaterial filter[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1016001. 王俊林, 张斌珍, 段俊萍, 等. 柔性双阻带太赫兹超材料滤波器[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1016001.
[6] Yao C F, Zhou M, Luo Y S, *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. 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.
[7] Yao C F, Zhou M, Luo Y S, *et al.* A 190-225 GHz high efficiency Schottky diode doubler with circuit substrate flip-chip mounted [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(1): 6-9, 28. 姚常飞, 周明, 罗运生, 等. 基于倒扣技术的 190~225 GHz 肖特基二极管高效率二倍频器[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(1): 6-9, 28.
[8] Miao L, Deng X J, Wang C, *et al.* Implementation of 140 GHz frequency doubler [J]. Information and Electronic Engineering, 2013, 11(3): 359-362. 缪丽, 邓贤进, 王成, 等. 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.
[9] He Y, Jiang J, Lu B, *et al.* High efficiency 170 GHz balanced Schottky diode frequency doubler [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0120003. 何月, 蒋均, 陆彬, 等. 高效 170 GHz 平衡式肖特基二极管倍频器[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0120003.
[10] Cojocar O, Moro-Melgar D, Oprea I, *et al.* High-power MM-wave sources based on Schottky diodes [C] // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 9-14, 2018, Nagoya, Japan. New York: IEEE, 2018: 8509861.