

文章编号: 2095-4980(2018)05-0763-04

基于平面肖特基二极管的 220 GHz 二倍频器

陈 鹏, 蒋 均, 邓贤进

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 介绍了一个基于平面肖特基二极管的 220 GHz 倍频器。该倍频器工作在室温下, 结构简单。为了实现倍频, 将一个具有 4 个反向串联肖特基结的变容二极管安置在石英基片上, 直流偏置通过一个石英微带构成的低通滤波器加到二极管上。所有的石英电路基片都用导电胶粘接在波导腔体上, 波导腔体是 E 面剖分的, 表面镀金。220 GHz 倍频器的测试结果表明, 在选择合适的偏置电阻时, 该倍频器具有 15 mW 的输出功率和 5% 的效率。在 213~230 GHz 频段, 二倍频器的输出功率均在 10 mW 以上, 且带内的功率波动非常小。

关键词: 肖特基二极管; 二倍频器; 谐波平衡仿真

中图分类号: TN771

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0763

A 220 GHz frequency doubler based on planar Schottky diodes

CHEN Peng, JIANG Jun, DENG Xianjin

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The development of a 220 GHz frequency doubler based on GaAs planar Schottky diodes is described. The doubler works at room temperature, and its structure is very simple. A planar Schottky varactor flip chip with four anodes arranged in anti-series is mounted onto a quartz based microstrip circuit to realize frequency multiplication. DC bias is put on the varactor through a low-pass filter circuit which is also constructed on a quartz microstrip. All the quartz circuits are glued into the waveguide block with conductive adhesive. The block is split in the E-plane and its surface is gold plated. Test data for the 220 GHz doubler show 15 mW output power with 5% efficiency when appropriate external bias resistor is selected. Over the 213–230 GHz, the output power of the doubler is above 10 mW, and the power fluctuation in this band is very small.

Keywords: Schottky diode; doubler; harmonic balance simulation

太赫兹频段位于红外和毫米波频段之间, 是近年来十分有价值的研究领域。太赫兹频段的仪器设备在安检、遥测、通信等领域有着十分广阔的应用前景。太赫兹仪器中最重要的组成部分是太赫兹信号源^[1]。在太赫兹高频段, 量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)、光学泵浦激光器(Optical Pumping Laser, OPL)以及自由电子激光器(Free Electron Laser, FEL)常被用来产生太赫兹辐射; 在太赫兹低频段, 采用平面肖特基二极管的倍频技术是更好的选择。平面肖特基二极管是制作太赫兹频段倍频器的最常用器件^[2-5], 通过将微波振荡器与基于肖特基二极管的倍频器级联可以实现全固态、小型化、高效率的太赫兹源^[6]。这样的太赫兹信号源无需冷却系统, 可以工作在室温条件下, 具有良好的性能, 十分方便进行电调节。

本文介绍了一种 220 GHz 二倍频器。采用 Ansoft 的 HFSS(High Frequency Structure Simulator)软件对倍频器的腔体、石英基片等三维结构进行电磁仿真分析。采用安捷伦的 ADS(Advanced Design System)软件对二极管的非线性特性进行电路仿真。通过将电磁仿真与电路仿真结果相结合, 得到了倍频器电性能的仿真结果, 倍频器样品的实测数据验证了设计方法的有效性。

1 电路设计

220 GHz 倍频器的原理图如图 1 所示, 110~115 GHz 的驱动信号由 WR8 标准波导微带探针输入(输入信号通

过波导传输线探针转换耦合到石英基片电路中), 经由微带传输线穿过低通滤波器以激励肖特基变容二极管, 低通滤波器为高低阻抗线形式, 对二次谐波输出信号呈阻带, 对基波输入信号呈通带, 起到抑制输出信号向输入端口传播的作用。220~230 GHz 倍频输出信号由微带探针馈入 WR4.3 输出波导。低通滤波器驱动信号位于输出波导截止频率以下, 由输出波导特性实现端口抑制。为提高倍频器的倍频效率, 在变容管的输入和输出端均设计阻抗匹配结构。此外, 利用微带 T 型结和低通滤波器, 还对该倍频器二极管施加了直流偏置。本次设计的二倍频器采用 TeraTech 公司的非线性肖特基二极管 AS2/4G2/6P6。

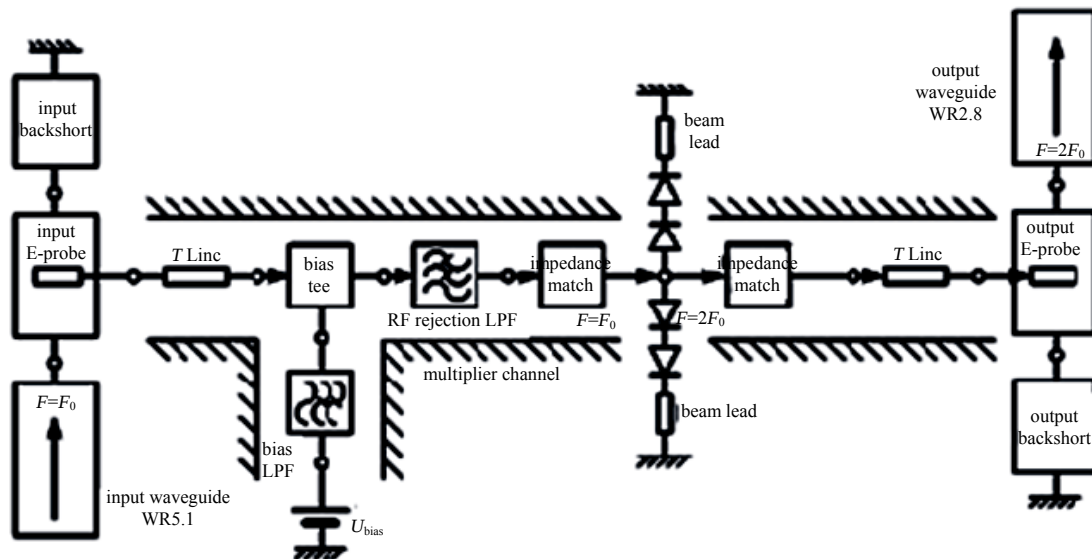


Fig.1 Principle diagram of 0.22 THz doubler
图 1 0.22 THz 倍频器的原理框图

220 GHz 二倍频器的结构如图 2 所示。它是由 E 面剖分的波导腔体、平面二极管芯片、基于石英的微带电路和去耦芯片电容组成。输入和输出波导接口分别是 WR-8 和 WR4.3。变容二极管芯片由美国 Teratech 公司制造, 具有 4 个肖特基结, 为反向串联结构, 整个芯片的尺寸是 $425\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$, 其结构如图 3 所示。变容二极管同主微带上的对位标记对齐, 二极管芯片的中心焊盘粘接在主微带上, 两端的焊盘直接固定在波导腔体上。主微带连接输入和输出波导, 包括 2 个 E 面波导到微带的探针过渡、输入输出匹配电路和 1 个低通滤波器。主微带厚度 $50\ \mu\text{m}$ 。输入和输出波导的短路端口是固定的, 没有可调节的机械旋钮。直流偏置通过 1 个 SMA 接头和 1 个抑制射频信号的低通滤波器馈入, 该低通滤波器也制作在石英基片上。一个芯片电容粘接在腔体上用来抑制高频信号干扰。所有的石英电路都使用导电胶粘接在波导腔体上。直流偏置馈线、芯片电容、射频抑制低通滤波器和主微带采用直径 $25\ \mu\text{m}$ 的金丝键合连接在一起。该二倍频器的结构同文献[7]中描述的倍频器类似。

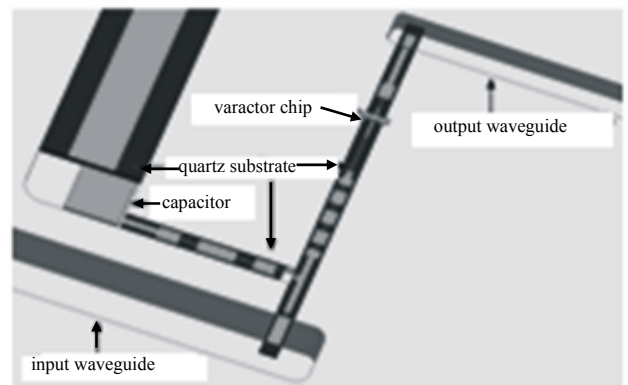


Fig.2 Structure diagram of 0.22 THz doubler
图 2 220 GHz 二倍频器结构图



Fig.3 TeraTech GaAs anti-series Schottky diodes
图 3 TeraTech GaAs 反向串联肖特基二极管

二倍频器的设计包括三维结构的全波电磁仿真和整个二倍频器的谐波平衡仿真。二倍频器的三维结构采用 HFSS 软件进行仿真分析。整个三维结构分成 4 部分: 输入波导到微带的过渡和直流偏置低通滤波器、二次谐波低通滤波器和输入阻抗匹配电路、二极管芯片和底部微带以及输出波导到微带过渡和输出阻抗匹配电路。每一部分都单独建模和仿真, 以减少复杂性。各无源分段结构经 HFSS 软件优化仿真后, 都得到了比较理想的结果。再利用 ADS 软件中的谐波平衡分析法对该倍频器的整体电路结构进行仿真分析。首先调节 HFSS 中低通滤波器至二极管安置点的长度, 使其对 220 GHz 频点谐振; 同理, 调节输出探针二极管安置点的长度, 使其对 110 GHz 频点谐振, 将 HFSS 软件中仿真得到的波导—微带探针过渡、低通滤波器、二极管安置段的 S 参数仿真结果以 SnP 文件的形式导入 ADS, 建立谐波平衡仿真电路。谐波平衡仿真中的肖特基二极管电路模型是 ADS 软件中的 PN 结二极管模型。二极管的参数为: 零偏置电容 9.8 fF , 串联电阻 4.3Ω , 正向电压 $496 \text{ mV}@1 \mu\text{A}$, 理想化因子 1.155, 饱和电流 $3.4 \times 10^{-14} \text{ A}$ 。

为了得到最佳的倍频效率, 二极管的偏置电压和输入输出匹配电路在基波频率和二次谐波频率同步进行优化^[8]。阻抗匹配电路由一系列连续的高低阻抗微带线组成, 通过优化级联微带的长度和宽度, 二极管中心焊盘处的输入输出阻抗分别与二次谐波抑制低通滤波器和微带到输出波导过渡进行共轭匹配。由于输入阻抗匹配电路和输出阻抗匹配电路相互影响, 阻抗匹配设计是一个迭代过程。优化得到的偏置电压为 -2 V 。当输入功率为 200 mW 时, 优化得到二极管输入输出阻抗为: 110 GHz 时 $27-j39 \Omega$; 220 GHz 时 $9-j2 \Omega$ 。仿真优化得到的二倍频效率为 16% , 峰值输出功率为 32 mW 。

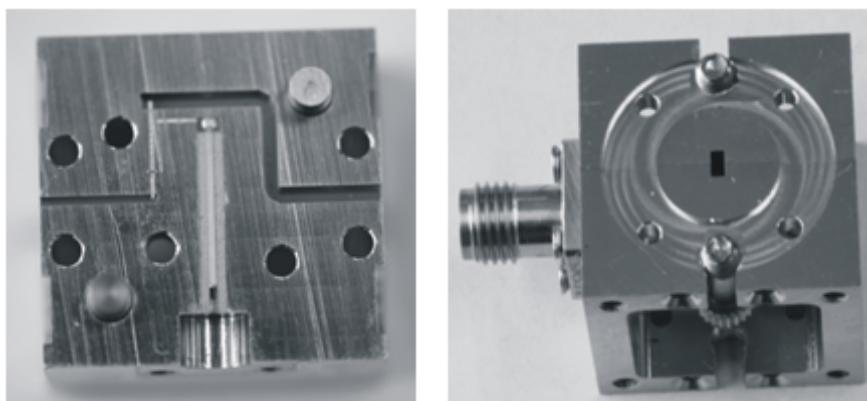


Fig.4 Picture of the fabricated 220 GHz doubler
图 4 220 GHz 二倍频器实物照片

2 结论

本文设计、制造和测试了一个 220 GHz 二倍频器。它由 E 面剖分的波导腔体、平面二极管芯片、基于石英的微带电路和去耦芯片电容组成。加工出来的 220 GHz 倍频器的实物照片如图 4 所示。输入信号由安捷伦的信号源、2 个级联的放大器和 VDI(Virginia Diodes Inc)公司的高功率产生。倍频器的输出功率采用 Erickson 功率计在室温下测量, 测试结果如图 5 所示。当采用合适的外部偏置电阻时, 其最大输出功率为 15 mW , 最高效率为 5% 。在整个 $213 \sim 230 \text{ GHz}$ 频段, 倍频器的输出功率在 10 mW 以上, 带内的功率波动非常小, 测试结果和仿真结果之间的偏差是由于以下原因造成的: a) 变容二极管实际的串联阻抗比仿真中的阻抗要大很多; b) 仿真中的波导腔体和石英基片电路没有考虑导体的表面粗糙度, 从而实际的波导和微带传输损耗要比仿真结果大很多。通过增加二极管仿真模型的精确度,

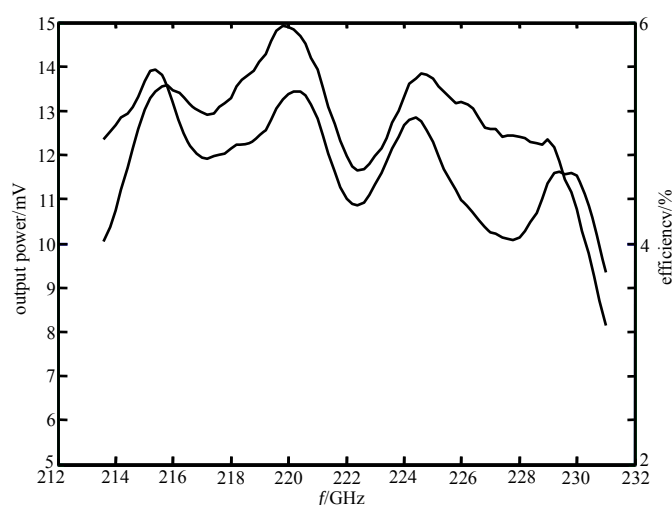


Fig.5 Measured output power and efficiency versus output frequency for an input-power level of 200 mW
图 5 输入功率 200 mW 时测得的倍频器输出功率和效率

可以进一步提升倍频器的性能。

参考文献:

- [1] KURTZ D S, HESLER J L, CROWE T W, et al. Submillimeter-wave sideband generation using varactor Schottky diodes[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2002, 50(11): 2610–2617.
- [2] MAIWALD F, SCHLECHT E, MAESTRINI A, et al. Terahertz frequency multiplier chains based on planar Schottky diodes[J]. SPIE, in Proc., 2002(4855): 447–458.
- [3] CHATTOPADHYAY G, SCHLECHT E, GILL J, et al. A broadband 800 GHz Schottky balanced doubler[J]. IEEE Microw. Compon. Lett., 2002, 12(4): 117–118.
- [4] 王成, 蒋均, 缪丽, 等. 基于肖特基阻性二极管的 140 GHz 二倍频器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 842–852. (WANG Cheng, JIANG Jun, MIAO Li, et al. 140 GHz doubler based on Schottky varistor[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(6): 842–852.)
- [5] 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.
- [6] CHATTOPADHYAY G, SCHLECHT E, WARD J, et al. An all solid-state broadband frequency multiplier chain at 1 500 GHz[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2004, 52(5): 1538–1547.
- [7] PORTERFIELD D W. High-efficiency terahertz frequency triplers[C]// 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu, HI, USA: [s.n.], 2007: 337–340.
- [8] TUOVINEN J, ERICKSON N R. Analysis of a 170 GHz frequency doubler with an array of planar diodes[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1995, 43(4): 962–968.

作者简介:



陈 鹏(1983–), 男, 湖北省孝感市人, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为微波电路与系统、太赫兹电路设计.email: cpwhu@yeah.net.

蒋 均(1987–), 男, 重庆市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹非线性器件、毫米波组件与电路设计.

邓贤进(1973–), 男, 四川省安岳县人, 研究员, 主要研究方向为电磁场理论、仿真技术、微波技术、收发信道系统技术、通信系统技术等.