

无基片空间合成的 220 GHz 三次倍频电路研究

胡 南

(北京星英联微波科技有限责任公司,北京 100084)

摘 要: 基于四阳极结同向串联型 GaAs 平面肖特基二极管,设计并实现了无基片空间合成的 220 GHz 三次倍频电路。采用四支肖特基二极管协同工作,在脊波导小片上下两侧各倒装焊接两支肖特基二极管,构成上下反向结构。采用场路结合的方式,对倍频电路的倍频效率进行了仿真。仿真结果显示输入功率为 300 mW,输出频率为 213~229 GHz 时,倍频效率大于 3%;采用 E 波段功率放大器推动三次倍频电路,获得了倍频器输出功率。测试数据表明,驱动功率为 300 mW 时,输出频率为 213~229 GHz 时,输出功率大于 5 dBm,倍频效率为 1%~2%。

关键词: 太赫兹; 无基片; GaAs 平面肖特基二极管; 空间合成

中图分类号: TN45 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0225002

Research on no-substrate space-combined 220 GHz tripler frequency multiplier circuit

Hu Nan

(A-INFO Inc., Beijing 100084, China)

Abstract: A 220 GHz tripler frequency multiplier using no-substrate and space combined structure was designed and realized based on four anodes in parallel-series GaAs planar Schottky diodes. Four Schottky diodes was adopted and divided into two groups. One group with two Schottky diodes placed in the same direction was flip-chipped on the top surface of the slab waveguide metal film and the other group on the bottom surface composed anti-series structure. The efficiency of the circuit was stimulated combined of EM simulator and circuit simulator. The stimulated efficiency was bigger than 3% over the band of 213 GHz to 229 GHz with the input power of 300 mW. An E-band power amplifier was used to drive the circuit to get the output power of the multiplier. The measured output power was bigger than 5 dBm over the band of 213 GHz to 229 GHz with the input power of 300 mW. The efficiency was 1% to 2%.

Key words: terahertz; no-substrate; GaAs planar Schottky diode; space combined

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-10-10

作者简介: 胡南(1978-),男,高级工程师,主要从事微波毫米波太赫兹天线和波导设计、系统和电路设计方面的研究。

Email: stanley@ainfoinc.com

0 引言

在太赫兹(Terahertz, THz)通信、测量等系统应用中,太赫兹源提供功率输出。基于固态方式实现的太赫兹源具有小型化、低成本的优势。由于 GaAs 材料迁移率较高,基于该材料的肖特基二极管具有较小的串联电路和寄生电容,目前国内外主要是采用 GaAs 基表面通道超薄衬底肖特基二极管作为非线性器件,利用其非线性电容电压特性,将输入的微波毫米波低频段的信号通过数次倍频的方式,得到太赫兹源^[1-4]。

目前常用的倍频方式多基于介质板材制作微带电路,并将非线性倍频器件 GaAs 肖特基二极管放置在微带电路上实现器件的倍频功能,输入输出端口一般为标准尺寸的矩形直波导^[3-4]。由于介质板材需要工作在太赫兹频段,为了抑制其他不必要的电磁模式,要求介质板材必须做的很薄,薄厚度的板材加工对工艺提出了极为苛刻的条件,实现难度极大。

为了解决介质板材加工工艺难的问题,可以采用无介质板材的技术方案,即在矩形直波导内插入金属小片,构成脊波导结构,通过将非线性肖特基二极管器件搭载在金属小片的上下两面且肖特基二极管器件直接焊接在金属小片上,实现接地和形成电路回路。由于整个倍频过程中不存在任何的介质基片,倍频器的安装调试较有介质基板的安装调试相比简单迅速。金属小片存在边缘电容,当微波毫米波信号在此结构传输时,其工作模式 TE₁₀ 模的截止频率低于标准的直波导,TE₂₀ 模比标准直波导 TE₂₀ 模截止频率高,极大的拓宽了该结构的单模工作带宽,在需要宽带特性的场合具有非常高的应用前景。基于该无介质基板的倍频器,可以在需要宽带的工程化需求中得到很好的应用,例如测试测量仪器仪表行业,可应用于频率拓展模块。

2009 年,电子测试技术国家重点实验室的范围清报道了一款基于无基片脊波导结构的 100 GHz 三次倍频电路,实现了 75~110 GHz 的全波段覆盖^[5]。2007 年,美国 VDI 公司的 David W.Porterfield 博士发表了可以工作在 220 GHz 的三次倍频器,其倍频效率高达 16%,输出功率达到 23 mW,该倍频效率突破了阻性三次倍频的极限^[6]。2013 年,钟伟博士

发表了有关 220 GHz 的三次倍频设计电路,其仿真结果显示,倍频电路在在 210~231 GHz 共计 21 GHz 的带宽内,单边带变频损耗小于 11.5 dB,但当时的报道仅限于设计,未制作倍频器实物^[7],2015 年,南京姚常飞博士发表了一篇有关 220 GHz 附近频率的二次倍频电路,其报道的输出功率在 214 GHz 处为 5.4 mW,对应的倍频效率为 6.1%^[8]。2017 年,中国工程物理研究院蒋均等人报道 170 GHz 倍频器在工作频率为 152~176 GHz 范围典型倍频效率典型值大于 8%,且典型输出功率为 10 mW^[9]。

文中给出了一种无基片空间合成的 220 GHz 三次倍频电路,非线性倍频器件采用四支 GaAs 平面肖特基二极管,每支二极管采用四阳极结同向串联形式,该电路可以用于 220 GHz 宽带小功率发射源。由于 220 GHz 频段为太赫兹低频段的大气窗口频率,自由空间传输损耗较低,在测试测量仪表,通信,太赫兹主动式人体安检等领域具有巨大的应用前景,文中制作的倍频模块可满足该类小功率宽频宽的太赫兹应用场景。

1 无基片空间合成的 220 GHz 三次倍频器设计

该电路采用的导波结构采用 E 面分裂波导结构^[6],为了便于机械加工,分成上下两部分。具体如图 1 所示。整体倍频电路由非线性器件肖特基二极

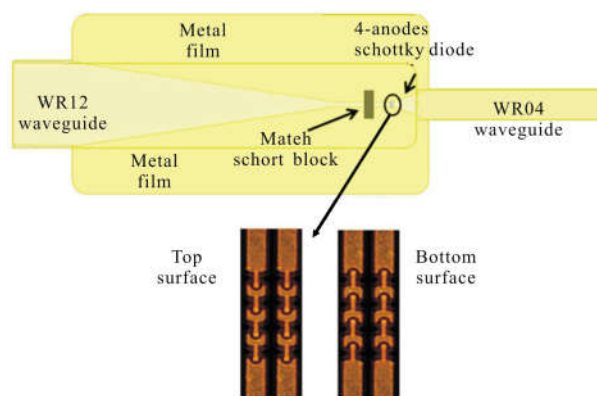


图 1 无基片空间合成的 220 GHz 三次倍频电路拓扑结构图
Fig.1 Architecture of no-substrate space-combined 220 GHz tripler frequency multiplier circuit

管(共采用四颗芯片)、射频输入输出端口波导-脊波导渐变过渡以及介质调节匹配块组成。渐变脊波导两端通过涂敷导电银胶粘贴在金属腔壁上。电路中

所采用的四支倍频肖特二极管采用直流同向串联、射频并联的结构,通过导电胶焊接在脊波导的两个金属小片上,在金属小片的上下两边各焊接两支肖特基二极管,每面的肖特基二极管同方向焊接,上下两面构成反向连接。具体的器件排布结构和安装位置如图 1 所示。

四阳极同向串联形式肖特基二极管,要求其串联电阻小,可以降低无效的功率损耗,同时要求具有较小的寄生电容。为了评估肖特基二极管在太赫兹频段的性能,需要知道所采用的二肖特基二极管所需要的 SPICE 模型参数,具体如表 1 所示。

表 1 肖特基二极管 SPICE 模型参数

Tab.1 Schottky diode SPICE modal parameter

Series resistor R_s/Ω	Ideal factor/ n	Saturation current I_s/fA	Cut-in voltage V_f/V	Zero bias junction capacitance C_{j0}/fF
4	1.2	40	0.58	12

在上述肖特基二极管 SPICE 模型参数的基础上,在电路设计软件中,输入肖特基二极管的各个参数,用于非线性电路谐波仿真。由于工作频率进入太赫兹频段,波长短,非线性器件的分布效应较为明显,传统的 SPICE 参数不能准确的反映器件的工作性能,需考虑肖特基二极管的非线性参量分布。通过对肖特基二极管进行三维电磁场建模,在电磁场仿真软件中提取其在目标工作频率和输入频率下的寄生参量,以更好的去匹配输入和输出阻抗。电磁场软件得到的寄生参量导入电路设计软件中,整体的倍频仿真结构在电路设计软件中完成,所采用的倍频器拓扑结构如图 2 所示。

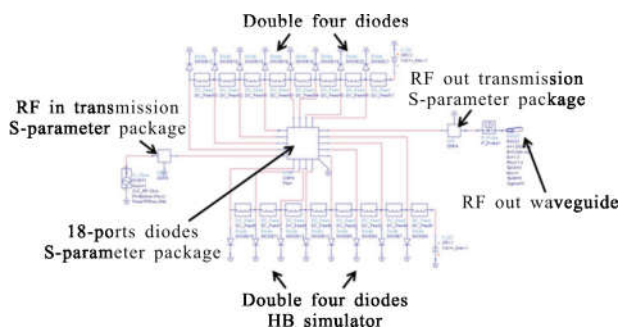


图 2 220 GHz 三次倍频器仿真

Fig.2 Whole simulation of 220 GHz tripler frequency multiplier

在电路设计软件中,一般采用谐波平衡对倍频器进行仿真,主要优化倍频器的输出效率。考虑到一共采用四支肖特基二极管,共计 16 个肖特基结,考虑到每个肖特基结承受 20 mW 以内比较安全,因此仿真时,设置的仿真输入功率为 300 mW,结合实际现有测试条件,对输入频率从 71~76 GHz 变化时的倍频效率进行了仿真,仿真结果如图 3 所示。

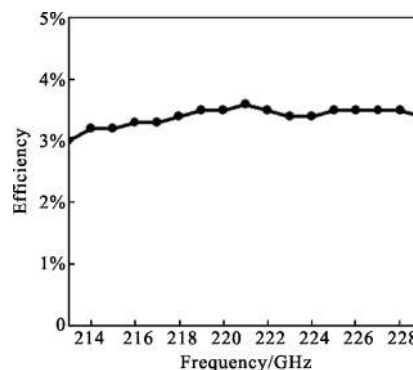


图 3 220 GHz 三次倍频器仿真效率

Fig.3 Stimulated output efficiency of 220 GHz tripler frequency multiplier

倍频器仿真结果显示,在固定输入基波功率为 300 mW 时,零偏置时,在输入频率为 71~77 GHz,三次倍频的效率大于 3%。

2 倍频电路测试与讨论

对倍频电路在 300 mW 驱动功率下进行了测试。输入基波频率从 71 GHz 步进到 76 GHz,测试得到了倍频器的输出功率。

由图 4 可以看出,最大输出功率为 7.9 dBm,为 6.2 mW,在 213~228 GHz,输出功率大于 5 dBm。倍频器的倍频效率在整个带内为 1%~2%。

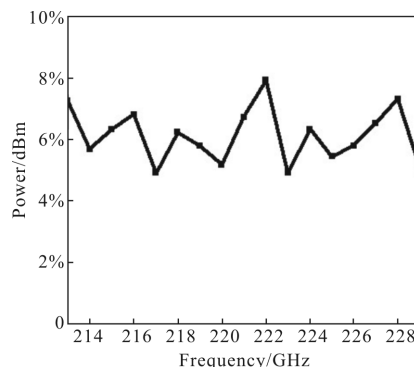


图 4 倍频电路输出功率测试数据

Fig.4 Measured output power data of frequency multiplier circuit

在金属脊波导小片上下两个,各放置的两支肖特基二极管,在空间上进行了功率合成,在实际工作中,每支二极管同时开启或者关闭,工作状态一致。由于肖特基二极管两端通过导电胶直接焊接在金属小片上,相当于肖特基二极管两端均进行了接地,无法对肖特基二极管进行单独的直流偏置供电,肖特基二极管主要由射频功率将管结打开到正向偏置状态,属于纯阻性倍频。因此无论是从仿真结果来看,还是从实际测试结果来看,其倍频效率较有偏置的倍频相比,倍频效率较低。为了提高倍频效率,需要采用纯阻性管试用这种倍频工作方式。

由于采用上下反向的电路形式进行倍频,可以有效抑制偶次倍频,其输出频率仅有奇次倍频频率输出,即三次、五次、七次倍频等频率进行输出,在该实验中,以输入 72 GHz 为例,输出频率可能包含三次谐波频率 216 GHz,五次谐波频率 360 GHz,七次谐波频率 504 GHz,由于所采用的肖特基二极管截止频率为 3.3 THz,其有效工作频率为 330 GHz 及其以下频率,因此五次和七次频率在器件上进行了器件截止。通过对倍频器的输出频率进行混频测量时发现,输出主频率对其他杂波的有效抑制制度达到了 35 dB。

该种倍频电路方式与目前常用的基于石英电路的倍频工作方式相比,由于不需要加工介质电路,结构更加简单,加工容易,成本低,缩短了研制周期。

3 结 论

基于四阳极结同向串联型 GaAs 平面肖特基二极管,设计并实现了无基片空间合成的 220 GHz 三次倍频电路。在 300 mW 驱动功率对倍频器进行了测试,最大输出功率为 7.9 dBm(6.2 mW)@222 GHz,在 213~228 GHz 整个带内输出功率大于 5 dBm,倍频器的倍频效率为 1%~2%。为了进一步提升倍频效率,可进一步改进肖特基二极管的加工工艺,降低二极管的串联电阻,进一步提升二极管的阻性非线性特性或者采用在二极管一端放置芯片电容,引入直流偏置,对射频构成虚拟回路接地的方式,提升倍频

效率。

经查证,基于无基片结构和国产器件的 220 GHz 倍频器在国内属于首次报道。该工作也为未来更高工作频率的倍频器奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] Goutam Chattopadhyay. Technology, capabilities, and performance of low power terahertz sources [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 33-52
- [2] Wu Bin, Liu Zhiming, Wang Hengfei, et al. Terahertz generation and transmission in CaAs waveguide structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3903-3906. (in Chinese)
- [3] Wang Junlong, Yang Dabao, Xing Dong, et al. Research of 0.2 THz unbalanced multiplier circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0106003. (in Chinese)
- [4] Jiang Jun, Zhang Jian, Deng Xianjin, et al. 340 GHz frequency multiplier without matching circuit based on Schottky diodes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4028-4034. (in Chinese)
- [5] Fan Guoqing, Zhao Aiying. Design of W-band broadband frequency tripler [C]//2009 National Conference on Microwave and Millimeter Wave, 2009: 1026-1029.
- [6] David W Porterfield. High-efficiency terahertz frequency tripler[C]//IEEE MTT-S Int. Microwave Symp, 2007: 337-340.
- [7] Zhong Wei, Zhaong Yong, Wang Yunfei, et al. Design of a 220 GHz frequency tripler using varactor diodes [C]//2013 National Conference on Microwave and Millimeter Wave, 2013: 1385-1388. (in Chinese)
- [8] Yao Changfei, Zhou Ming, Luo Yunsheng, et al. A 5.4 mW and 6.1% efficiency fixed-tuned 214 GHz frequency doubler with schottky barrier diodes [J]. *High Technology Letters*, 2015, 21(11): 85-89.
- [9] 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. (in Chinese)