

文章编号: 2095-4980(2020)04-0556-05

基于多双漂移雪崩倍频管太赫兹功率合成方法

王珊珊, 余晓川, 朱忠博

(西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 太赫兹源辐射功率较低已成为制约太赫兹科学技术发展的主要瓶颈问题。为有效提高太赫兹源辐射功率, 提出了基于多双漂移雪崩管的分立腔体倍频方法, 在此基础上设计和实现波导结构的太赫兹功率合成器。在倍频器的输入端对各独立激励源的中频信号进行移相, 完成倍频输出的精确相位控制, 从而实现各单元输出的太赫兹信号同相位合成, 提高功率合成效率, 避免使用太赫兹频段移相器等部组件的问题, 降低实现复杂度, 易于实现。仿真和实测结果表明, 4路激励源太赫兹功率合成器的合成效率约79%~89%。

关键词: 太赫兹; 功率合成; 雪崩二极管; 倍频

中图分类号: TN771

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019094

A novel method of power combining at Terahertz frequency based on double drift region avalanche multiplier diodes

WANG Shanshan, YU Xiaochuan, ZHU Zhongbo

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: The low Terahertz (THz) radiation power has become the main bottleneck restricting the development of Terahertz science and technology. In order to increase the power of THz source, a novel method of detached cavity is proposed to multiply frequency based on double drift region avalanche multiplier diodes, and then the power combiner of waveguide is designed and realized. The phase of the intermediate frequency of the excitation source is adjusted on the input of the frequency multiplier. And then, the phase of the frequency multiplier output radio source can be controlled precisely. Sequentially, the independent signals of THz which are in-phase can be added together. The efficiency of the power combiner is enhanced avoiding using the phase shifter of THz frequency band. The complexity of the processing is reduced and it is easy to be realized. The simulation results and the measured data show that, the efficiency of the power combining working at THz band is 79%–89% approximately.

Keywords: Terahertz; power combining; avalanche diode; frequency multiplication

太赫兹(Terahertz, THz)波是频率介于0.1~10 THz范围内的电磁波, 波长范围为3 000 μm ~30 μm , 是毫米波与红外光之间的过渡区。太赫兹波对宏观经典理论与微观量子理论、电子学与光子学有过渡衔接意义。由于对太赫兹波段的研究工作一直以来受到辐射源和检测方法缺乏的限制, 所以太赫兹波段被称为电磁波谱的“太赫兹间隙(THz gap)”。太赫兹频段可以提供超宽的带宽和很高的传输速率, 近几年来在太赫兹通信、太赫兹探测等方面得到了广泛研究^[1-3]。但是实现高功率的太赫兹连续辐射源是一直制约远距离传输的突出问题。目前, 太赫兹源的产生方法大致可以分为两类^[4-5]: 电子学方法和光学方法。电子学方法主要是用渡越时间雪崩二极管(IMPATT Diode)^[6]、肖特基二极管等固态电子器件^[7-9]来产生低频太赫兹波; 光学方法主要用III-V族半导体激光器件^[6-8,10]、量子级联激光器^[11-13]等光学器件产生高频太赫兹波。图1给出了太赫兹源产生方法及功率分布情况。从图中可看出, 电子学方法和光学方法在0.1~10 THz频带范围内, 功率出现急剧下降现象, 与频率的4次方成反比^[6]。因此, 针对瓦级太赫兹源的研究, 在理论和实现方面都遇到了瓶颈^[14]。

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-04-28

基金项目: 国家重点实验室稳定支持基金资助项目(2018SSFNKLSMT-12)

作者简介: 王珊珊(1982-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信与测控。email:84472935@qq.com

功率合成技术是提高太赫兹源辐射功率的有效手段。本文利用电子学方法，在倍频器的输入端对各单元激励的中频信号进行移相，完成倍频输出的相位控制，实现各单元输出的太赫兹信号同相位叠加，提高多路功率合成的效率，避免了使用太赫兹频段移相器等部组件的问题，降低了实现复杂度。

1 多双漂移雪崩倍频管功率合成系统组成

太赫兹波段信号功率获取和产生都比较困难，且随着频率升高，可获得的太赫兹功率随频率4次方成反比。为了更好地验证功率合成器的技术指标，探索太赫兹波段获得足够功率的技术途径，本文采用了双漂移雪崩二极管作为倍频器件。

双漂移区雪崩二极管的结构及掺杂分布见图2，在双漂移区雪崩二极管内电子和空穴都在p区和n区相互作用空间漂移，这会提高载流子与高频场的相互作用效率，从而提高二极管的效率，使得太赫兹功率合成能够输出更大的功率。

图3给出了多双漂移雪崩倍频管功率合成系统组成框图，主要包括数字控制电路、匹配网络、恒流源、雪崩二极管倍频腔体、太赫兹功率合成器等模块。数字控制电路根据计算机输入的外部指令，调控4个锁相环频率合成电路，产生4路相位可调的7.33 GHz的射频信号，再经过功率放大后输出增益可调的射频激励信号。数字控制电路也同步对恒流源输出幅度进行调节。射频激励信号经由雪崩二极管15倍频达到0.11 THz的太赫兹波频率，然后调节4路激励信号相位，使得太赫兹波信号达到相位同步，最后由太赫兹功率合成器对相位同步的太赫兹信号完成功率合成。

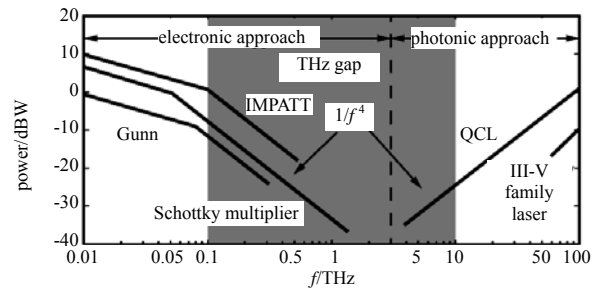


Fig.1 THz source generation method and power distribution
图1 太赫兹源产生方法与功率分布

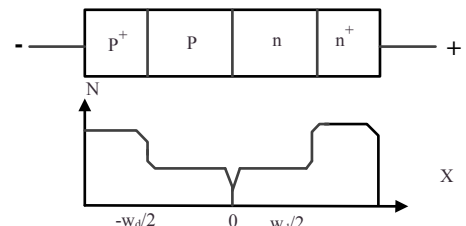


Fig.2 Structure and doping distribution of avalanche diodes with double drift zone
图2 双漂移区雪崩二极管的结构及掺杂分布

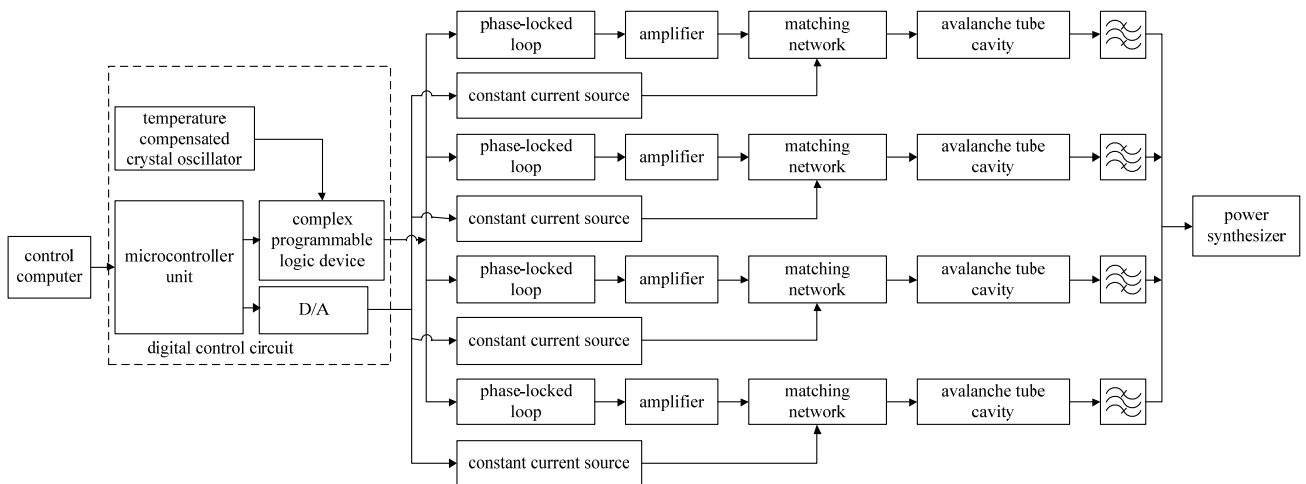


Fig.3 Power combination system of multiple double drift avalanche frequency multiplication diodes
图3 多双漂移雪崩倍频管功率合成系统

2 多双漂移雪崩管高次倍频输出功率合成方法

2.1 雪崩二极管腔体设计

多双漂移雪崩倍频管的输出频率为0.11 THz，选择激励源为7.33 GHz的稳定信号进行15次倍频，功率为15 mW左右。由于获得的雪崩管倍频效率和一致性无法满足要求，提出了采用分立腔体方式进行倍频的方法，可以避免在同一腔体内雪崩管之间的互耦，稳定性更好，减小了设计和加工难度；同时，每个单腔可以独立进行测试、替换，易于更换损坏的雪崩管。

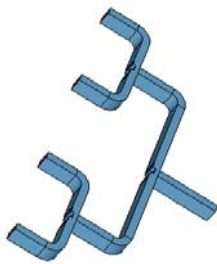
雪崩倍频的腔体结构采用了微带转同轴馈电,通过微带匹配结构调节输入端信号的匹配,输出端的匹配程度由短路滑块和腔体本身的高度、宽度来决定。腔体的结构由3部分组成:外部匹配、微带滤波匹配和倍频腔体,见图4。频率为7.33 GHz的信号进行外部匹配和微带滤波后,利用微带到同轴转换送给雪崩二极管,激发出高次谐波,15阶的高次谐波经过腔体的选频滤波后,输出0.11 THz信号。这种结构馈电简单有效,整个腔体结构的谐振和场模式受外部影响最小。

图5给出了输入端信号匹配的仿真结果。主要是优化外部匹配结构以及微带到同轴的转换部分,从仿真结果可以看出,在7.33 GHz左右能够达到很好的匹配,回波损耗较小。

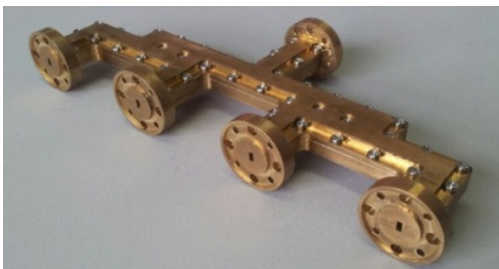
图6给出了雪崩倍频腔的仿真结果。通过调节腔体的短路滑块、高度和宽度,使之谐振在0.11 THz,并通过WR8波导输出。从仿真结果可以看出,在0.11 THz左右的反射很小,达到40 dB以下。

2.2 功率合成器的设计与实现

本文设计并实现了波导结构的宽带功率合成器,图7为太赫兹功率合成器的仿真模型和实物图。为了保证与雪崩二极管倍频腔体输出信号的直接匹配,合成器的输入端和输出端都采用了标准WR8法兰接口,每个二合一结构都采用标准T型节实现支路到合路间的匹配。



(a) simulation model of 4-channel power synthesizer



(b) photo of 4-channel power synthesizer

Fig.7 Simulation model and photo of THz power synthesizer
图7 太赫兹功率合成器的仿真模型与实物图

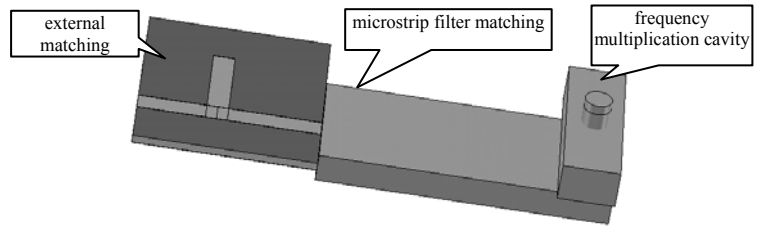


Fig.4 Simulation model structure of avalanche frequency multiplication cavity
图4 雪崩倍频腔体的仿真模型结构

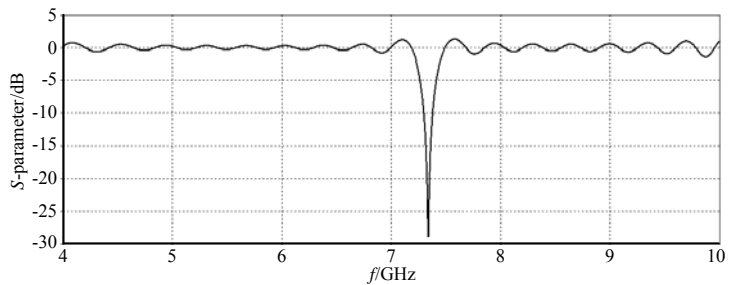


Fig.5 Simulation result of input terminal(7.33 GHz)
of avalanche frequency multiplication cavity
图5 雪崩倍频腔输入端(7.33 GHz)仿真结果

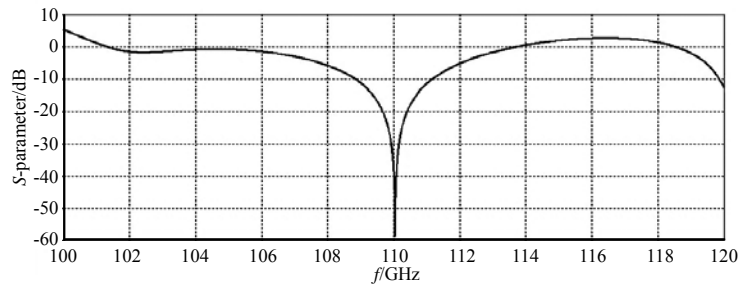


Fig.6 Simulation result of output terminal(0.11 THz)
of avalanche frequency multiplication cavity
图6 雪崩倍频腔输出端(0.11 THz)仿真结果

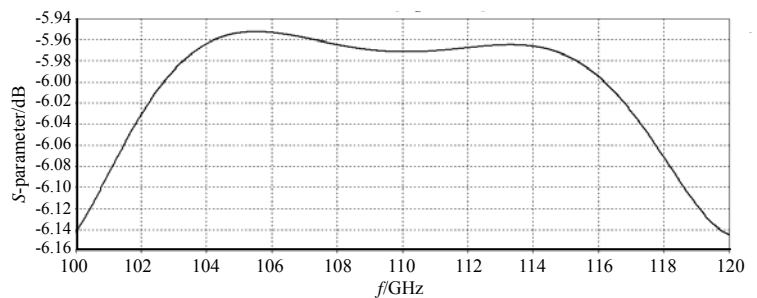


Fig.8 Simulation result of transmission coefficient of power synthesizer
图8 功率合成器传输系数仿真结果

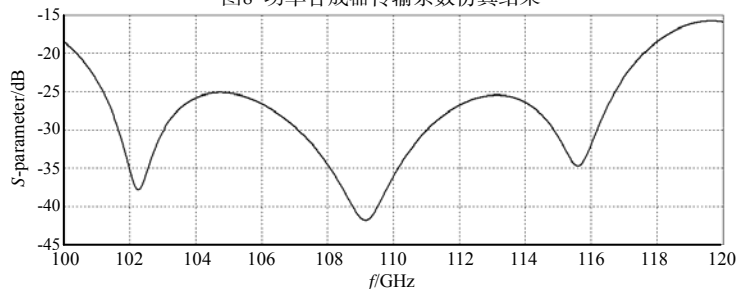


Fig.9 Simulation result of reflection coefficient of power synthesizer
图9 功率合成器反射系数仿真结果

图8给出了4路激励信号进行功率合成的 S_{21} 参数仿真结果。在0.11 THz中心频率的宽带工作频段内，合路效率非常接近6 dB，具有良好的合成性能。

图9给出了4路激励信号进行功率合成的 S_{11} 参数仿真结果。从仿真结果可以看出，太赫兹功率合成器在宽频段内具有较好的驻波特性。

图10给出了4路激励信号功率合成器的合路效率实测结果。 S_{11} 介于-10~-20 dB之间，四路功分输出介于-6.5~-7 dB之间，对应合路增益约5~5.5 dB，合路效率约79%~89%。

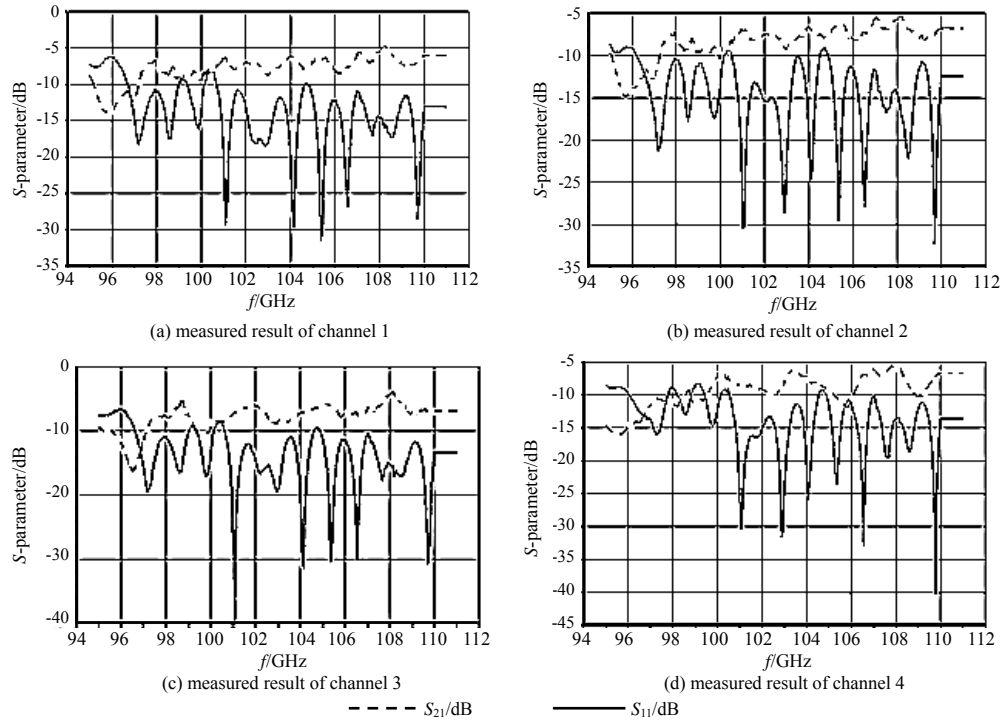


Fig.10 Measured results of 4-channel power synthesizer
图 10 4 路功率合成器实测结果

3 结论

功率合成技术是提高太赫兹源辐射功率的有效手段。本文利用电子学方法，在倍频器的输入端对各单元激励的中频信号进行移相，完成倍频输出的相位控制，实现各单元输出的太赫兹信号同相位叠加，提高多路功率合成的效率，避免了使用太赫兹频段移相器等部组件的问题，降低了实现复杂度。

参考文献：

- [1] SONG H J, NAGATSUMA T. Present and future of terahertz communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011, 1(1):256-263.
- [2] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2):97-105.
- [3] CHATTOPADHYAY G. Technology, capabilities, and performance of low power terahertz sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011, 1(1):33-53.
- [4] CROWE T W, BISHOP W L, PORTERFIELD D W. Opening the terahertz window with integrated diode circuits[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(10):2104-2110.
- [5] TREW R J. High-frequency solid-state electronic devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(5):638-649.
- [6] SILES J V, GRAJAL J. Physics-based design and optimization of Schottky diode frequency multipliers for terahertz applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2010, 58(7):1933-1942.
- [7] 何月, 沈川, 王成, 等. 基于肖特基二极管的太赫兹二倍频器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(5):691-695. (HE Yue, SHEN Chuan, WAN Cheng, et al. Terahertz doubler design based on Schottky barrier diodes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(5):691-695.)

(下转第 594 页)