

文章编号: 2095-4980(2020)01-0010-04

0.14 THz 双注折叠波导行波管的高频系统设计

雷文强, 蒋 艺, 胡 鹏, 宋 睿, 黄银虎, 曾照金, 马乔生, 陈洪斌

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 随着太赫兹通信技术的发展, 对于 0.14 THz 折叠波导行波管(FWTWT)的研究需求向着更高的功率和更宽的带宽发展。对双注行波管中的双路折叠波导慢波电路进行分析, 得到不同参数下的高频特性变化规律。并对双路折叠波导慢波电路的功率分配和功率合成效率进行分析计算, 得到功率合成效率 96.3%。最后对双路慢波电路、功率分配/合成器和集中衰减器进行建模, 并对注波互作用进行计算。在高压 15 kV 和单注电子的发射电流为 40 mA 条件下, 得到 0.14 THz 频率下的合成输出功率为 56 W, 增益为 31.4 dB, 3 dB 带宽为 7 GHz。

关键词: 双注行波管; 双路折叠波导慢波电路; 功率分配/合成器; 注波互作用计算

中图分类号: TN772

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018294

Design of high frequency systems for 0.14 THz two-beam folded waveguide traveling wave tubes

LEI Wenqiang, JIANG Yi, HU Peng, SONG Rui, HUANG Yinhu, ZENG Zaojin, MA Qiaosheng, CHEN Hongbin

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

Abstract: As the development of terahertz communication technology, the research for 0.14 THz Folded Waveguide Traveling Wave Tube(FWTWT) requires higher power and wider band. RF characteristics changes of two-circuit folded waveguide slow wave structure are analyzed with different structure parameters for two-beam traveling wave tubes. The power divider and the power combiner of two circuits folded waveguide are analyzed and calculated. The efficiency of the combined power is about 96.3%. The interaction calculation model is established, including two circuits folded waveguide slow wave, the power divider and the power combiner, and the attenuator. Under the condition of voltage 15 kV and single beam current 40 mA, the combined output power is about 56 W in 0.14 THz frequency, and the gain is 31.4 dB, 3 dB wideband is 7 GHz.

Keywords: two-beam traveling wave tubes; two circuits folded waveguide slow wave structure; the power divider and the power combiner; interaction calculation

太赫兹波指在 0.1~10 THz 波段的电磁波。太赫兹辐射频谱资源丰富, 在高分辨雷达^[1]、高速通信^[2]、深空探测等方面均有广泛的应用前景。折叠波导行波管(FWTWT)具有全金属化结构, 功率容量大, 热稳定性好的特点; 其慢波结构色散较平坦, 工作带宽较宽; 结构加工和装配相对简单, 可采用机械加工、紫外光-光刻-电铸-注塑(UV-LIGA)、深反应离子蚀刻(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)等方法制作慢波结构^[3-6]。折叠波导行波管是获得大功率、宽带宽太赫兹源最有效的途径之一。随着太赫兹技术应用的发展, 在目标检测、雷达成像、远距离通信等领域对大功率太赫兹源有了越来越大的需求, 但高性能宽带太赫兹源的缺乏是制约太赫兹技术广泛应用的因素之一。因此, 开发更大功率、更大带宽的太赫兹源成为国内外学者研究的热点。目前 NG 公司已开发了 5 注的 0.22 THz 折叠波导行波管, 输出功率大于 50 W^[7]。国内有学者也研究了 0.14 THz 的并联 6 注折叠波导行波管, 输出功率达到 95 W^[8], 为今后研究多注行波管提供了一定思路。本文设计一种 0.14 THz 折叠波导行波管的双路折叠波导慢波电路。在双路折叠波导的电路设计中, 需要设计相同的功率分配器和功率合成器

收稿日期: 2018-11-02; 修回日期: 2019-03-07

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2018YFC0115001); 科工局国防基础科研计划(JCKY2018212C015)

作者简介: 雷文强(1972-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为真空电子学和太赫兹技术。email:leton@163.com

长度，以保证两个电路的输出合成相位一致。然后对双路折叠波导电路的高频特性和注波相互作用特性进行模拟，还包括功率分配器、功率合成器，以及衰减器等。在注波相互作用的模拟中，在高压 15 kV，单注发射电流 40 mA 的条件下，得到 0.14 THz 频率下输出功率为 56 W，最大增益为 31.4 dB，3 dB 带宽为 7 GHz。

1 双路折叠波导电路设计

为了取得在 0.14 THz 频段范围内更高的输出功率和更大的带宽，本文提出一种双路折叠波导慢波电路的设计，从而获得放大信号。

折叠波导慢波电路结构采用电场面弯曲波导构成，沿轴线方向按一定周期排列，折叠波导慢波结构的三维几何结构见图 1^[9]。图 1 中 a 表示波导宽边长度， b 表示波导窄边长度， p 表示半几何周期长度， h 表示波导直边的长度， R 表示弯曲部分的中心半径。

在双路折叠波导电路中，需要考虑功率分配器、功率合成器，以及电路的截断和衰减器的设计，从而保证输出电路的相位一致，达到功率合成的目的。使用电磁仿真软件对折叠波导中的功率分配和合成的方式进行建模，其模型如图 2 所示。

在图 2 中，输入信号通过一个分配器将 port1 端口的信号分成两路分别注入到输入折叠波导电路中，再通过一段直波导连接到输出电路中，这段直波导段将设计成截断或是加入衰减器来抑制行波管的自激振荡。在输出电路系统中，两路折叠波导通过一个合成器把两路波导中的信号合成为一个输出电路，达到功率合成的目的，其中两路折叠波导电路中的信号分别定义为 port2 端口和 port3 端口。通过仿真软件对 3 个端口的 S 参数信号进行计算，得到 S 参数的幅值和相位的仿真结果如图 3 和图 4 所示。

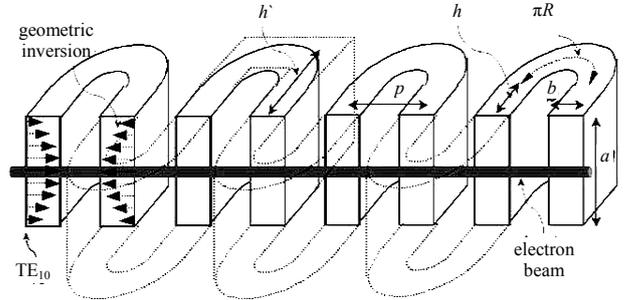


Fig.1 Diagram of folded waveguide slow wave structure
图 1 折叠波导慢波结构示意图

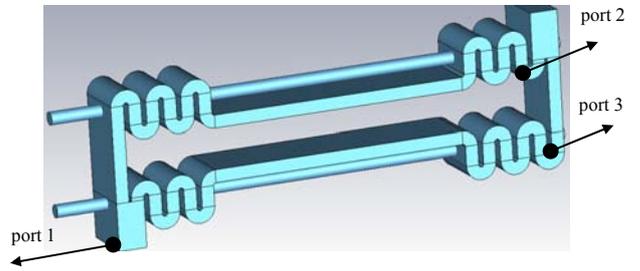


Fig.2 Drawing of the power divider and the power combiner of two circuits folded waveguide
图 2 两路折叠波导中的功率分配与合成结构示意图

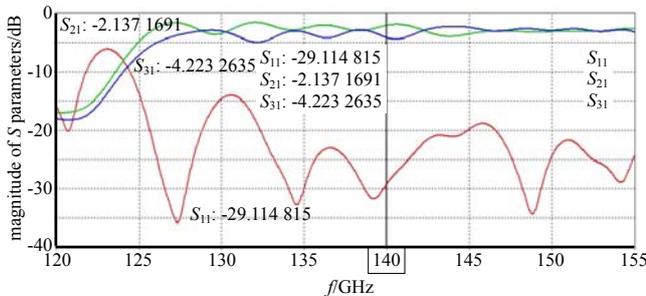


Fig.3 Simulation of amplitude in the power divider and combiner
图 3 功率分配器/合成器的幅值仿真

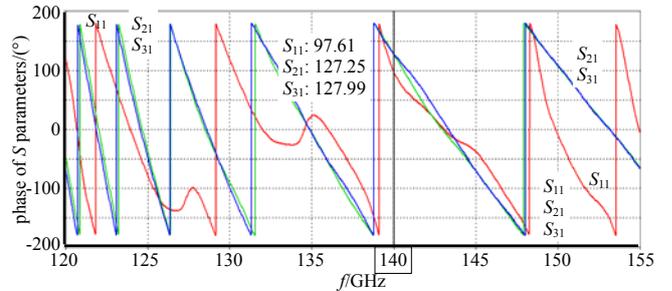


Fig.4 Simulation of phase in the power divider and combiner
图 4 功率分配器/合成器的相位仿真

在设计两路折叠波导的功率分配器和合成器时，需要考虑两路电路的相同长度，达到两路输出信号的相位和幅度的一致性。根据 S 参数网络中的幅值和相位的关系，可以得到功率分配与合成效率 η 的计算公式^[10]：

$$\eta = \frac{1 + 2\rho \cos\theta + \theta^2}{2(1 + \rho^2)} \times 100\% \quad (1)$$

式中： ρ 为 S_{21} 和 S_{31} 两路信号之间的幅值差，图 3 中计算得到两路折叠波导慢波信号的幅值差为 -2.086 dB； θ 为 S_{21} 和 S_{31} 两路信号之间的相位差，图 4 中计算得到两路折叠波导慢波信号的相位差为 0.739° 。由式(1)可计算得到两路信号功率的合成效率为 96.3%，达到功率合成的目的。

2 双路折叠波导相互作用设计

通过选择折叠波导慢波结构的高频参数，可以计算得到慢波电路的归一化相速和耦合阻抗，如图 5 和图 6 所示。其中的波导宽边为 1.22 mm，波导直边可以从 0.4 mm 优化到 0.48 mm。

根据理论计算可得到折叠波导慢波结构的色散方程：

$$f^2 = f_c^2 + \left[\frac{cp}{2\pi(h + \pi p/2)} \right]^2 [\beta_m - (2m+1)\pi/p]^2 \quad (2)$$

折叠波导轴线耦合阻抗为：

$$K_m = \frac{Z_0}{(\beta_m p)^2} \left[\frac{\sin(\beta_m b/2)}{\beta_m b/2} \right]^2 \frac{1}{I_0^2(k_m r_c)} \quad (3)$$

式中： Z_0 为波导等效阻抗； $k_m^2 = \beta_m^2 - k^2$ ， k 为空间相位常数， m 为谐波阶数， β_m 为第 m 次空间谐波的相位常数； I_0 为零阶变态贝塞尔函数； f_c 为截止频率。

由图 5 可以发现，当 h 由 0.4 mm 变化到 0.48 mm 时，归一化相速变慢了，而耦合阻抗的值变化不大。这样可以达到色散再同步的作用，使得在注波相互作用模拟时提高电子效率。

折叠波导慢波结构的耦合阻抗曲线如图 6 所示。特性计算完后，运用仿真软件进行注波相互作用计算，其模型如图 7 所示。模型包括两个折叠波导电路，输入功率分配器，输出功率合成器，以及在慢波某一个特定位置的截断和加载集中衰减器。通过截断和衰减的加载，可以抑制自激振荡的出现，从而使行波管工作在稳定输出的状态。

在每个电子通道的位置分别设置电子发射模型，独立发射，设置工作电压 15 kV，发射电流 40 mA，并且设置均匀磁场峰值为 0.42 T。由此计算得到 0.14 THz 频率下的输出功率和输出频谱图，如图 8 所示。

当单路折叠波导慢波中的输入功率为 20 mW 时，图 8 显示了从电压信号计算得到的输出功率图和输出频率谱。其中，输出功率计算得到 56 W，输出频率 0.14 THz。增益 31.4 dB。在频率带宽 136 GHz 到 144 GHz 范围内，计算得到了输出功率与电子效率对应频率的结果，如图 9 所示。

从图 9 可以发现最大输出功率为 56 W，电子工作效率为 4.5%，增益为 31.4 dB。144 GHz 时的输出功率较小，为 25 W。136 GHz 时的输出功率为 40 W。在 136~144 GHz 的频率范围，3 dB 带宽为 7 GHz。因此采用两路折叠波导慢波电路，明显提高了注波互作用的功率和相互作用效率，并且增加了带宽，为后续高功率行波管的设计打下了基础。

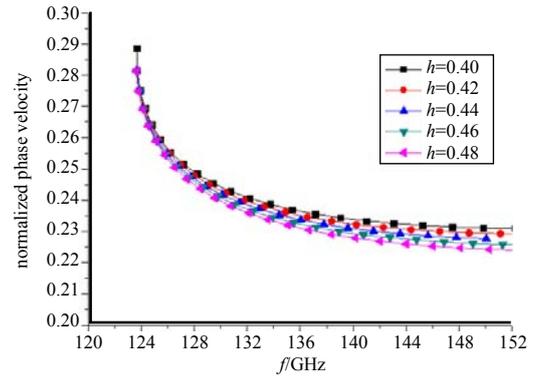


Fig.5 Normalized phase velocity curves of folded waveguide slow wave structure

图 5 折叠波导慢波结构的归一化相速曲线

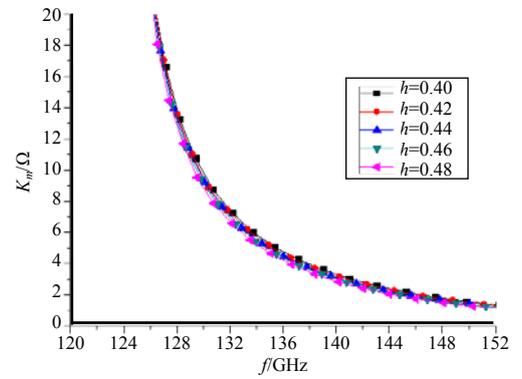


Fig.6 Impedance curves of folded waveguide slow wave structure

图 6 折叠波导慢波结构的耦合阻抗曲线

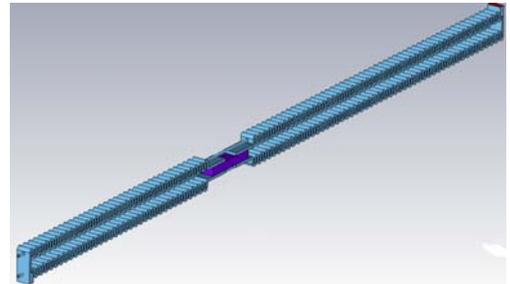


Fig.7 Beam-wave interaction model of two circuits folded waveguide slow wave structure

图 7 两路折叠波导慢波电路的注波相互作用模型

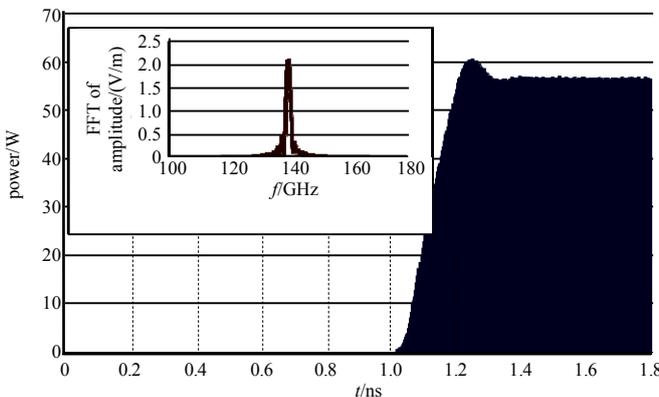


Fig.8 Simulation of output power and output frequency spectrum in 0.14 THz
图 8 在 0.14 THz 下模拟得到的输出功率和输出频谱图

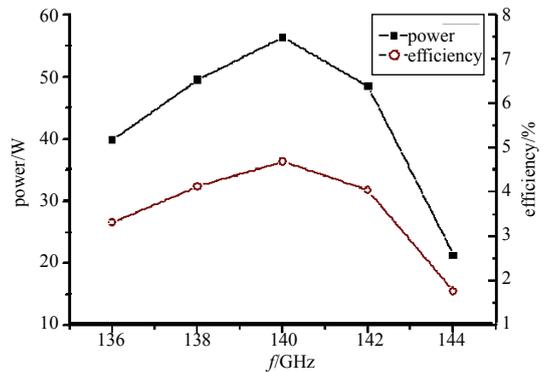


Fig.9 Output power and efficiency versus frequency
图 9 输出功率、效率分别与频率的关系曲线

3 结论

本文对 0.14 THz 双注行波管中的双路折叠波导慢波电路进行了设计, 在考虑双路慢波 S 参数信号的幅值和相位一致的基础上, 对电路中的功率分配器和功率合成器进行了设计, 经过计算得到功率合成效率为 96.3%。

对折叠波导慢波电路的高频特性进行了分析并建模。经过注波相互作用的计算, 得到 0.14 THz 频率下最大输出功率为 56 W, 电子工作效率为 4.5%, 增益为 31.4 dB, 3 dB 带宽为 7 GHz。本文设计的双路慢波电路考虑了色散再同步和工程化设计, 提高了行波管的功率与效率, 为后续大功率太赫兹行波管的设计打下了基础。

参考文献:

- [1] 蔡英武,杨陈,曾耿华,等. 太赫兹极高分辨力雷达成像试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(1):7-9. (CAI Yingwu, YANG Chen,ZENG Genghua,et al. Experimental research on high resolution terahertz radar imaging[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(1):7-9.)
- [2] 张健,邓贤进,王成. 太赫兹高速无线通信: 体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):1-13. (ZHANG Jian,DENG Xianjin,WANG Cheng. Terahertz high speed wireless communication: systems, techniques and demonstrations[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):1-13.)
- [3] FENG Jinjun,REN Dapeng,LI Hanyan,et al. Study of high frequency folded waveguides BWO with MEMS technology[J]. Terahertz Science and Technology, 2011,4(4):164-180.
- [4] 李含雁,白国栋,李兴辉,等. 采用 UV-LIGA 技术制作 340 GHz 折叠波导慢波结构[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4):527-530. (LI Hanyan,BAI Guodong,LI Xinghui,et al. Microfabrication of 340 GHz folded waveguide slow wave structure using UV-LIGA technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):527-530.)
- [5] 陈樟,王亚军. 0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构设计与加工[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(3):299-302. (CHEN Zhang,WANG Yajun. Design and manufacture of 0.14 THz folded waveguide traveling wave tube slow wave structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(3):299-302.)
- [6] 雷文强,蒋艺,胡林林,等. 0.14 THz 折叠波导行波管的设计与实验研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):334-338. (LEI Wenqiang,JIANG Yi,HU Linlin,et al. Design and experiment research for 0.14 THz folded waveguide traveling wave tubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,12(3):334-338.)
- [7] KREISCHER K E,TUCEK J C,BASTEN M A,et al. 220 GHz power amplifier testing at Northrop Grumman[C]// Proceeding of 2013 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Paris,France:IEEE, 2013.
- [8] YAN Shengmei,SU Wei,WANG Yajun,et al. Design and theoretical analysis of multibeam folded waveguide traveling-wave tube for subterahertz radiation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015,43(1):414-421.
- [9] HAN Seong-Tae,JANG Kyu-Ha,SO Jin-Kyu,et al. Low-voltage operation of Ka-band folded waveguide traveling-wave tube[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004,32(1):60-66.
- [10] MARCUVITZ N. Waveguide handbook[M]. Stevenage,UK:Institution of Engineering and Technology,1986:333-365.