

文章编号: 2095-4980(2015)01-0013-06

## 双注 THz 折叠波导行波管的设计与传输特性实验

颜胜美<sup>a,b</sup>, 苏伟<sup>a</sup>, 王亚军<sup>a,b</sup>, 徐翱<sup>a,b</sup>, 陈樟<sup>a,b</sup>, 向伟<sup>a,b</sup>, 金大志<sup>a</sup>

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 行波管具有高增益、宽带宽、高输出功率等优点, 但频率提升到 THz 后, 输出功率急剧降低, 为此采用多注与功率合成的方式提高输出功率。对 D 波段折叠波导行波管进行的理论与数值分析表明: 单束的 3 dB 带宽为 13 GHz(0.134 THz~0.147 THz), 0.14 THz 处最大增益为 20.88 dB; 多束合成增益为 20.6 dB, 3 dB 带宽内合成效率不低于 92%。通过微铣削的办法加工完成了 2 路折叠波导, 并对其传输特性进行测量, 对比分析了测试与设计结果。并行多注行波管能够以单束小电流、低聚焦磁场方式工作, 可有效提高 THz 行波管的输出功率。

**关键词:** 两注; 折叠波导行波管; 太赫兹; 3 dB 带宽; 合成效率

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0013

## Design and transmission test of two-beam Terahertz Folded Waveguide Traveling Wave Tubes

YAN Shengmei<sup>a,b</sup>, SU Wei<sup>a</sup>, WANG Yajun<sup>a,b</sup>, XU Ao<sup>a,b</sup>, CHEN Zhang<sup>a,b</sup>, XIANG Wei<sup>a,b</sup>, JIN Dazhi<sup>a</sup>

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystems and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** Traveling Wave Tube(TWT) bears high gain, wide bandwidth and large output power. However, the output power will decline significantly when the operation frequency rises to Terahertz range. In order to increase the output power of THz TWT by parallel multi-beam and power combination method, theoretical analysis and numerical simulation of parallel multi-beam D band Folded Waveguide-TWT(FW-TWT) are performed. The simulation results demonstrate that the method can achieve the power combining output of multi-amplified signals. According to the simulation, single-beam mode behaves flat dispersion characteristics between 0.135 THz and 0.157 THz; the 3 dB gain band is 13 GHz(0.135 THz-0.147 THz) and the largest gain is 20.88 dB at 0.14 THz; multi-beam mode gets 20.8 dB combining gain at 0.14 GHz and the combining efficiency is not below 92% in 3 dB gain frequency range. The structure is fabricated by micro milling with a dimension error below the designed values. The transmission characteristics of D band Two Beams Folded Waveguide Structure(TBFWS) are simulated and tested. The study shows important meaning for achieving high power THz radiation based on nowadays heat cathode level.

**Key words:** two-beam; Folded Waveguide-Traveling Wave Tube; Terahertz; 3 dB band; combining efficiency

近年来, 位于毫米波与远红外波之间的空白区域被定义为太赫兹(THz)波, 它成为了研究热点, 它的巨大应用前景亦被充分挖掘<sup>[1]</sup>。然而国内大功率 THz 辐射源的水平较低, 制约了高分辨率 THz 雷达、远距离高速通信、信息对抗、空间探测等系统的发展。行波管由于其高增益、高效率、宽带宽、高输出功率的特点, 广泛应用于高分率雷达、宽带高速通信等领域, 是一种理想的太赫兹辐射源, 当频率上升到 THz 后, 尺缩效应导致行波管慢波结构横向尺寸急剧减小, 造成 THz 行波管的工作电流过小, 散热能力降低, 功率容量下降<sup>[2]</sup>。为了克服这些困难, 主要的一些措施有<sup>[3-9]</sup>: a) 电子注形状由圆柱形改为带状形, 注的横向尺寸变大, 提高传输电流; b) 工作模采用高次模, 增大慢波结构尺寸, 提高注电流和输出功率; c) 多个单管进行空间功率合成; d) 单管中多慢波

结构传输多电子注。前3种方法存在注的产生和传输、模式抑制难、幅相一致性要求高等难题，提升输出功率实现难度较高。而方法d)利用单注工作电流小、总的工作电流较大，能够克服聚焦、阴极发射电流密度高等困难，且同一单管中进行多线路功率的耦合，较易提高THz辐射功率。折叠波导结构是一种广泛应用于THz行波管的慢波结构，有全金属、易耦合、散热强、功率容量高、兼容微加工技术等优点<sup>[10-11]</sup>。中物院研究人员正在研究和加工单注0.14 THz, 0.22 THz 折叠波导行波管<sup>[12-15]</sup>，但功率和带宽仍较难满足实际需求，文献[9]采用级联多注方式提高THz辐射功率，但存在传输路径增大导致高频损耗增加，横向尺寸变大，不利聚焦，前级输出功率对后级驱动控制不方便等问题，据此本文希望通过单管多路互作用完成后耦合输出，以此提高THz辐射功率。

### 1 折叠波导几何参数的确定

折叠波导的各尺寸标识见图1，其中 $a$ 和 $b$ 分别表示为宽边和窄边， $p$ 为半几何周期， $h$ 为直波导， $r_0$ 为注通道半径， $L$ 为半几何周期传输距离。

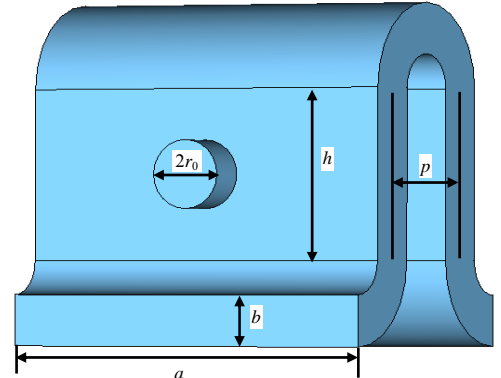


Fig.1 Sketch of folded waveguide  
图1 折叠波导结构示意图

表1 初始参数与结构参数  
Table1 Initial parameters and dimensions

input parameters					output parameters				
beam $U$	beam $I_0$	operation $f$	operation $f/f_c$	center phase shift (relative pi)	waveguide width $a$	waveguide height $b$	periodic length $p$	straight waveguide $h$	hole radius $r_0$
15 750 V	12 mA	140 GHz	1.2	1.48	1.3 mm	0.2 mm	0.39	0.36	0.12

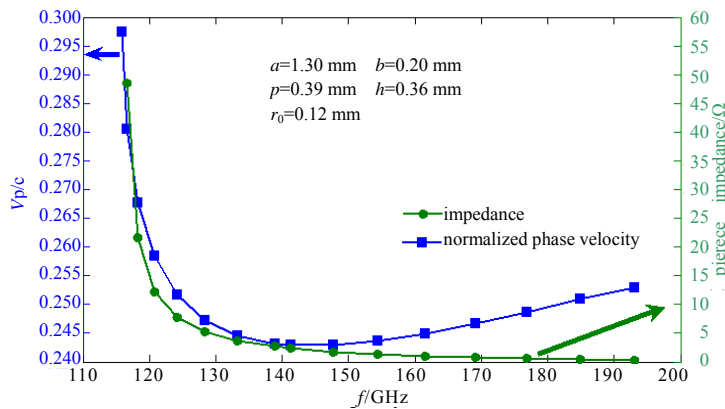


Fig.2 Dispersion and impedance of D band FW  
图2 D波段折叠波导的色散与耦合阻抗特性

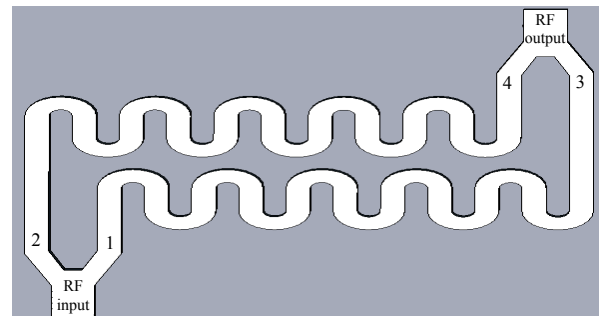


Fig.3 Sketch of parallel multi beams FW  
图3 并联多注折叠波导结构图

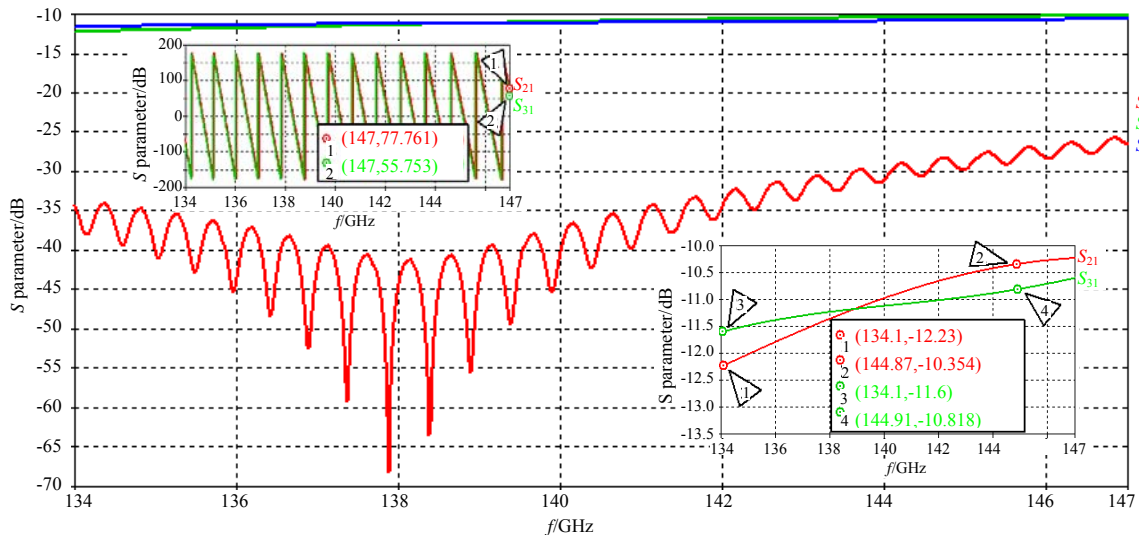


Fig.4 Magnitude and phase of divider  
图4 两路功分器的幅相特性

D 波段折叠波导的各结构尺寸参数和初始参数值见表 1。D 波段折叠波导慢波结构的高频特性见图 2。色散较平坦区在 0.135 THz~0.157 THz, 该区间归一化相速变化率为  $0.00124/0.24412=0.5\%$ , 中心工作频率点 0.14 THz 处的归一化相速为 0.243, 互作用阻抗为  $2.54 \Omega$ 。

## 2 多束折叠波导功分器与合成器的确定

功率合成与分配器中, 相位差对合成效率影响较大, 本文中根据轮换对称性对功分器和合成器进行了设计, 使各路信号的传输距离保持一致, 多束折叠波导慢波结构见图 3, 从图中可以看出本结构所考虑的功率分配器/合成器具有很好的轮换对称性, 从而确保功分器/合成器的相位一致性和高的合成效率。

该多注折叠波导结构的传输特性见图 4, 整个折叠波导结构的周期数为 90 个  $2p$  周期。2 路功分器的理想幅值约为  $-3 \text{ dB}$ , 考虑到折叠波导加工过程中表面粗糙度的影响, 其等效电导率为  $2.064 \times 10^7 \text{ S/m}$ , 140 GHz 信号在传输过程中高频损耗为  $-7.91 \text{ dB}$ , 单位损耗为  $1.127 \text{ dB/cm}$ , 与仿真结果  $S_{21}=-10.98 \text{ dB}, S_{31}=-11.12 \text{ dB}$  相吻合; 图 4 中左上角插图为 2 路信号的相移差  $22^\circ$ , 满足高合成效率的要求。

## 3 多束折叠波导行波管粒子模拟

在分析完多注折叠波导的传输特性后, 利用计算机仿真技术(Computer Simulation Technology, CST)粒子工作室中的粒子节点法(Particle In Cell, PIC)求解器, 定义多个粒子发射源, 并定义相应的信号输入端口、信号监控端口, 粒子源定义为直流电(Direct Current, DC), 驱动信号为正弦信号, 完成对电子注与电磁波相互作用过程的动态分析。

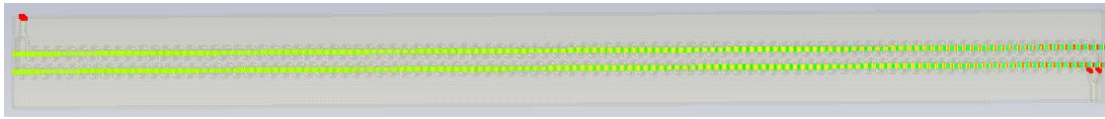


Fig.5 Electron trajectory  
图 5 电子注轨迹图

图 5 显示了 PIC 模拟 5 ns 时长后两电子注在各路折叠波导中的群聚分布, 图示表明两电子注在信号输出位置处实现了最佳的群聚, 这表明该多注折叠波导结构工作在线性增益区, 仍未进入饱和工作区。

图 6(a)为输出端口的合成信号相对于时间的变化, 输出信号在 1.2 ns 后达到稳定放大。对图 6(a)的输出信号进行快速傅里叶反变换, 变换频率范围为 100 GHz~180 GHz, 抽样频率点为 5 000 个, 最后得到的频域信号见图 6(b), 结果表明该合成信号频率能量集中在 0.14 THz 处, 频谱很纯净, 未有高次谐波得到放大, 这也说明两路放大后的射频信号能较佳地合成。输入峰值功率为 10 mW, 注电压为 15 750 V, 注电流为 12 mA 时, 0.14 THz 处获得 20.88 dB 增益, 1.22 W 输出功率; 多注合成情况获得 20.6 dB 增益, 2.3 W 输出功率。

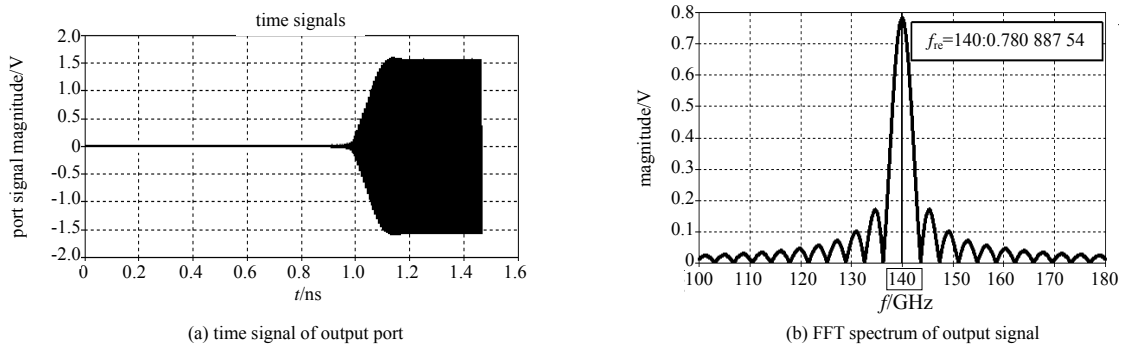


Fig.6 Time signal and FFT spectrum of output signal

图 6 输出信号幅值与 FFT 频谱图

图 7 为单注与多注的增益对比及合成效率曲线, 结果表明在 3 dB 带宽内, 合成效率不低于 92%, 0.14 THz 处的功率合成效率达到了 95%, 单注与多注的 3 dB 带宽基本未变, 这表明功率合成不会导致 3 dB 带宽发生变化, 保证了合成信号的 3 dB 带宽。

### 4 多束折叠波导传输特性的实验测量

通过微铣削工艺加工完成了两路折叠波导慢波结构，尺寸参数见表 1，机加实物见图 8，主要评价 2 路信号的传输特性及 2 个输出端口的相位一致性，实际加工的慢波结构长度为 40 个  $2p$  周期。

通过矢量网络分析仪对上述结果进行传输特性的测量，实验平台见图 9。

2 个输出端口的传输特性参量结果见图 10，从幅值测量结果来看，在 130 GHz~150 GHz 之间， $S_{21}$  和  $S_{31}$  的值落在 -4.5 dB~8.7 dB 之间， $S_{11}$  在 -15 dB 以下；两输出端口的相位差在  $30^\circ$  左右。结果表明实际制作的三端口在 130 GHz~150 GHz 之间  $S_{21}$  的测试值在 -4.4 dB~-8.7 dB 区间，实验加工的周期数为 40 个  $2p$  周期，综合换算成单位损耗值为 0.45 dB/cm~1.83 dB/cm；模拟结果是在 90 个  $2p$  周期条件下得出的，单位损耗值为 1.127 dB/cm。实验测试结果在频率段高端区传输损耗优于仿真值，而在频率段低端区传输损耗劣于仿真值，特别是在 140 GHz 附近处的损耗最大。造成这些差异的原因主要是由于实际加工的结构与数值模拟的结构存在尺寸误差，以及在实际加工过程中引入了表面粗糙度的变化；另外由于功分器的设计过程中，在 140 GHz 附近处出现了传输特性的较大波动，所以在实际测试过程中亦出现了这种情况。对应功率合成来说相位相差  $30^\circ$ ，结果对合成效率的影响不会太大，合成效率可以达到 90%。造成相位差的主要因素是加工工艺误差，因为各路传输线制作误差的引入，导致各路传输信号的有效传输距离发生偏差，导致了各路信号的相位差，为了优化这些指标，在以后的加工制作过程中，应该更加注重各结构尺寸参数加工误差的控制，及折叠波导表面粗糙度的精确度控制。

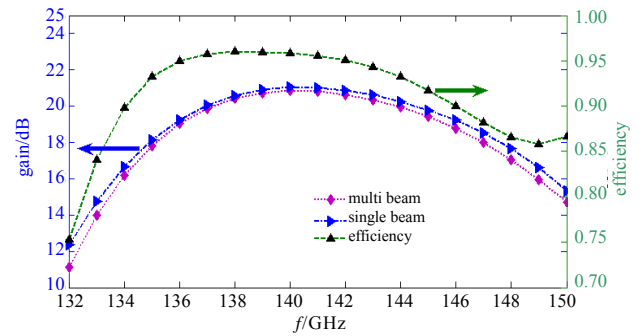


Fig.7 3 dB band and combining efficiency of single and multiple beams  
图 7 单注、多注的 3 dB 带宽及合成效率

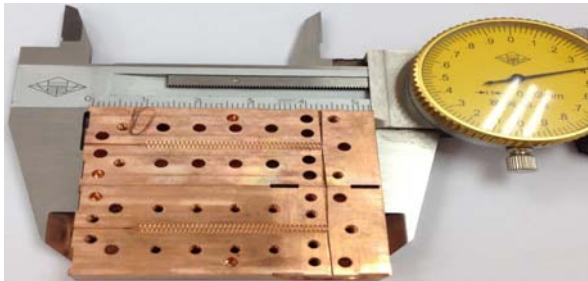


Fig.8 Photo of two beams FW  
图 8 两路折叠波导实物图

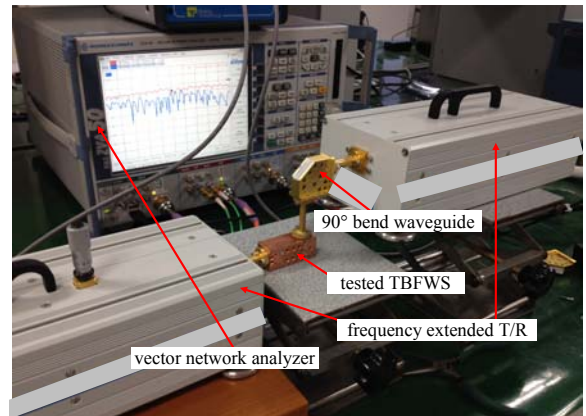
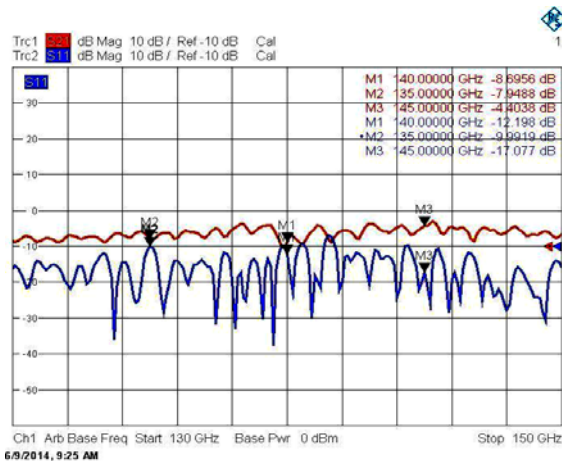
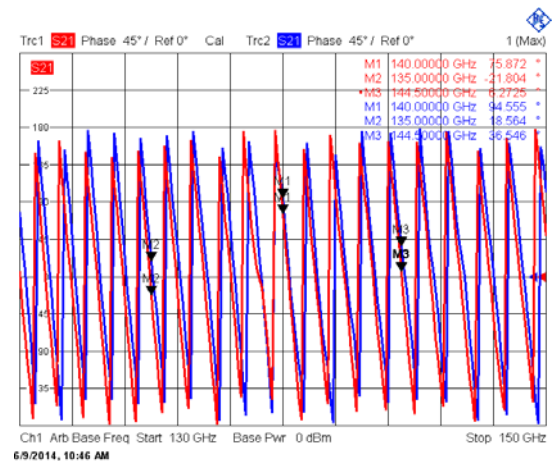


Fig.9 Test platform  
图 9 传输特性测量平台



(a) magnitude of S parameter



(b) phase of S parameter

Fig.10 Magnitude and phase of transmission characteristics of two ports

图 10 两输出端口传输特性的幅值和相位

## 5 结论

本文提出了并行多注折叠波导结构提升 THz 行波管输出功率的方法,通过对该结构的高频特性、传输特性、相互作用特性的分析,结果表明这种方法能够有效提高 THz 行波管的输出功率。并行多注的工作方式能够实现单注小电流、多注大电流的工作,有效降低了对聚焦磁场、热阴极的发射电流密度的要求,有利于现有工艺的实现。这种方法也能规避级联方式使传输路径增大导致的高频损耗增加,横向尺寸变大不利聚焦,前级输出功率对后级驱动控制不方便等问题。通过微铣削的方法完成了 2 路折叠波导慢波结构的加工,并对其传输特性进行了测量,测量与设计结果较吻合。

### 参考文献:

- [1] Siegel P H. Terahertz Technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2002,50(3):910-928.
- [2] John H Booske. Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation[J]. Physics of Plasmas, 2008,15(5):055502-055516.
- [3] XU Xiong,WEI Yanyu,SHEN Fei,et al. Sine waveguide for 0.22-THz traveling-wave tube[J]. IEEE Electron Device Letters, 2011,32(8):1152-1154.
- [4] Mikko Kotiranta,Viktor Krozer. Harmonic distortion in a traveling wave tube at 850 GHz and its use in frequency multiplication[C]// IVEC. Bangalore,India:[s.n.], 2011.
- [5] Paoloni C,Brunetti F,Di Carlo A,et al. The OPTHER project:progress toward the THz amplifier[C]// IVEC. Bangalore,India:[s.n.],2011:55-56.
- [6] Dayton James A,Kory Carol L,Mearini Gerald T,et al. Fabrication and testing of the 0.650 THz helical BWO[C]// IVEC. Monterey,CA:[s.n.], 2012:33-34.
- [7] 徐翱. 变周期慢波系统的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (XU Ao. The study of variable periodic slow-wave structure[D]. Chengdu,China:UESTC, 2009.)
- [8] 胡权. 变周期大结构低压工作折叠波导行波管的理论与模拟研究[J]. 物理学报, 2012,61(1):135-142. (HU Quan. Theoretical and simulation study of variable periodic, big structure and low voltage Folded waveguide TWT[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(1):135-142.)
- [9] 张芳,董志伟,董焯. 140 GHz 多束折叠波导行波管仿真分析[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(4):989-992. (ZHANG Fang, DONG Zhiwei, DONG Ye. Simulation of 140 GHz multi-beam folded waveguide traveling-wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(4):989-992.)
- [10] Dohler G,Gagne D,Gallagher D,et al. Serpentine Waveguide TWT[C]// IEEE International Electron Devices Meeting. 1987, 33:487-488.
- [11] Ha H J,Jung S S,Park G S. Theoretical study for folded waveguide traveling wave tube[J]. Int. J. Infrared Millim. Waves, 1998,19(9):1229-1245.
- [12] 陈樟,王亚军. 0.14 THz 瓦量级折叠波导行波管设计[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1483-1488. (CHEN Zhang,WANG Yajun. Design of 0.14 THz watt level folded waveguide traveling wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1483-1488.)
- [13] 徐翱,胡林林,阎磊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管部件设计与加工[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(9):2135-2140. (XU Ao,HU Linlin,YAN Lei,et al. Design and machining of components of 0.22 THz folded waveguide traveling wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(9):2135-2140.)
- [14] 张芳,董志伟,董焯,等. 束流发射度对太赫兹微电真空折叠波导行波管性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1450-1454. (ZHANG Fang,DONG Zhiwei,DONG Ye,et al. Influence of beam emittance on performance of FWG-TWT[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1450-1454.)
- [15] 徐翱,周泉丰,阎磊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管初步实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(11):2954-2958. (XU Ao, ZHOU Quanfeng,YAN Lei,et al. Initial experimental study on 0.22 THz folded waveguide TWT[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(11):2954-2958.)

## 作者简介:



颜胜美(1979-),男,湖南省娄底市人,在读博士生,主要研究方向为大功率太赫兹真空电子器件研究. email:7076856@qq.com.

苏伟(1964-),男,四川省遂宁市人,博士,研究员,主要从事引信技术方面的研究工作.

王亚军(1984-),男,四川省绵阳市人,硕士,助理研究员,主要从事太赫兹微型电真空器件研究.

徐翱(1982-),男,武汉市人,副研究员,主要研究方向为毫米波及太赫兹真空电子学器件技术.

陈樟(1982-),男,四川省开江县人,博士,助理研究员,主要从事太赫兹微纳电子学器件研究.

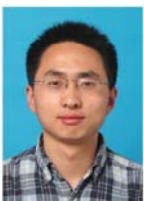
向伟(1967-),男,重庆市人,博士,研究员,主要从事电真空器件研究.

金大志(1970-),男,四川省遂宁市人,研究员,主要从事特种电真空器件的研究.

(上接第12页)

- [28] WANG X,XIE Z,SUN W,et al. Focusing and imaging of a virtual all-optical tunable terahertz Fresnel zone plate[J]. Optics Letters, 2013,38(22):4731-4734.
- [29] GEORGIU G,TYAGI H K,MULDER P,et al. Photo-generated THz antennas[J]. Scientific Reports, 2014,4(3584):1-5.
- [30] 郭超,罗振飞,王度,等. 基于二氧化钒薄膜的太赫兹开关器件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):644-646. (GUO Chao,LUO Zhengfei,WANG Du,et al. Terahertz switching device based on vanadium dioxide thin film[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):644-646.)

## 作者简介:



王波(1986-),男,四川省眉山市人,在读博士研究生,主要研究方向为波前调制和亚波长器件. email:wangbo.cnu@gmail.com.

张岩(1972-),男,北京市人,博士,教授,主要研究方向为太赫兹波谱与成像,微纳光学器件设计和光学数字全息.