

文章编号: 2095-4980(2015)02-0184-06

多注太赫兹折叠波导行波管的设计与模拟

颜胜美^{a,b}, 苏伟^a, 徐翱^{a,b}, 王亚军^{a,b}, 陈樟^{a,b}, 向伟^{a,b}, 金大志^a

(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: 为解决太赫兹(THz)行波管工作电流过小、输出功率低等问题, 提出了基模多注工作模式的折叠波导行波管(TWT)。首先, 获得了基模多注折叠波导色散特性; 然后, 对基模多注折叠波导的传输特性进行了模拟计算; 最后, 完成了 0.14 THz 基模多注折叠波导行波管的注波相互作用特性分析。电子注参数为 12 mA, 15.75 kV 时, 获得的 3 dB 带宽为 25 GHz(128 GHz~153 GHz), 最大增益为 33.61 dB, 最大峰值功率为 23 W; 电子注参数为 30 mA, 15.75 kV 时, 在 0.14 THz 处获得了 38 dB 增益, 最大脉冲输出功率为 63.1 W。该方法能够有效增大 THz 行波管的工作电流, 提高相互作用增益及效率、3 dB 带宽、输出功率; 在增益相同时, 基模多注行波管可以做得更短、更紧凑。

关键词: 基模; 多注; 折叠波导; 太赫兹行波管

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201502.0184

Design and simulation of multi-beam terahertz folded waveguide TWT

YAN Shengmei^{a,b}, SU Wei^a, XU Ao^{a,b}, WANG Yajun^{a,b}, CHEN Zhang^{a,b}, XIANG Wei^{a,b}, JIN Dazhi^a
(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystems and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: To improve the current and output power of terahertz Traveling Wave Tube(TWT), a Fundamental Mode Multi-Beam Folded Waveguide(FMMBFW) TWT scheme is proposed. Firstly, the high frequency characteristic is gained and compared with numerical simulation result. Secondly, the transmission characteristic of 60 periods FMMBFW is analyzed. Lastly, the beam-wave interaction characteristic of 0.14 THz FMMBFW TWT is completed by numerical simulation and theoretical calculation. When the DC current is 12 mA and the voltage is 15.75 kV, the 3 dB band of 0.14 THz FMMBFW TWT is 25 GHz(128 GHz–153 GHz), the maximum gain is 33.61 dB and the maximum output power is 23 W. When the DC current is 30 mA and the voltage is 15.75 kV, the maximum gain is 38 dB and the maximum pulse output power is 63.1 W at 0.14 THz. This method can effectively increase the current of FMMBFW TWT, and the interaction gain, efficiency, 3 dB band, output power can be improved. When the gain is the same, FMMBFW TWT can be fabricated more short and compact.

Key words: fundamental mode; multi-beam; folded waveguide; terahertz traveling-wave tube

随着太赫兹(terahertz, THz)频段资源的开发利用, THz 技术在许多领域的巨大应用潜力被广泛认同^[1]。然而, 由于国内大功率、宽频带 THz 辐射源所提供的功率和带宽有限, 限制了国内高分辨率 THz 雷达、远距离高速通信、信息对抗、空间探测等系统的进一步推广, THz 行波管具有输出功率高、频带宽、紧凑轻便等优点, 是一种理想的太赫兹辐射源。行波管工作频率上升到 THz 后, 慢波结构横向尺寸减小, 带来了零件加工、高电流密度电子注的产生和传输、聚焦困难等问题, 同时慢波结构尺寸变小导致散热能力降低, 功率容量下降^[2]。为了克服行波管工作频率提升后导致工作电流减小、输出功率降低的问题, 国内外学者对其进行了大量研究。2009 年开始, Shin 等学者在 DARPA HiFIVE 计划的支持下开展了带状注 THz 行波管研究, 分别从长寿命、大电流密度阴极、大纵横比带状注、高效慢波结构、聚焦磁场、慢波结构的加工制作等方面开展了大量工作, 并取得了一定成

收稿日期: 2014-10-24; 修回日期: 2014-11-23

基金项目: 中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室项目资助(2012CJMZZ00007)

果，但仍未见整管测试报道；2014 年，开展了相关制管与测试平台的搭建^[3-6]。2009 年开始，Kory 和 Comfoltey 等^[7-8]学者对高次模行波管开展了相关研究，但由于高次模行波管的工作电压过高、带宽小、模式竞争等缺点，仍有待进一步深入研究；2009 年，NGC 在 DARPA HiFIVE 计划支持下进行了 220 GHz、50 W 折叠行波管放大器的研制，2013 年在 IVEC 会议上报道了 56 W、5 GHz 的实验结果^[9-12]，采取功率合成的方式，对各路相互作用完成后的射频信号在输出口处进行合成，实现大功率的输出，但这种方式需确保相位的一致性，对每路折叠波导制作精度的一致性、电子枪与慢波结构的对准、聚焦磁场在多路慢波结构区域的均匀性要求非常高。国内学者在大电流、大功率 THz 行波管方面同样进行了大量的研究^[13-22]，分别从交错双栅带状注、正旋波导带状注行波管进行了设计与理论方面的研究；通过选择高次谐波实现低电压工作；Ka 频段折叠波导的制管；折叠波导大信号理论研究；以及对高次模进行了设计与模拟。

从国内外研究情况来看，为提高 THz 行波管的工作电流和输出功率，主要集中在带状注、高次模、功率合成等方式，然而这些方法易导致带状注产生及稳定传输、模式竞争、工作电压过高、带宽过窄、加工困难等问题。折叠波导结构具有全金属、易耦合、散热强、功率容量高、兼容微加工技术等优点，广泛应用于高频段真空器件领域^[23]。本文拟采用基模多电子注，通过单注小电流、多注大电流传输的工作方式，解决工作电流小、输出功率低等问题，有效规避模式竞争、工作电压过高、带宽较小、幅相一致性要求严格等困难，实现大功率 THz 辐射。

1 基模多注慢波结构的高频特性

慢波结构作为行波管的核心，是高频电场与电子注进行能量交换，完成注-波相互作用，实现输入信号有效放大的重要场所。慢波结构的色散和耦合阻抗特性决定了行波管的工作带宽和相互作用效率，一个设计优良的慢波结构将具有良好的色散和耦合阻抗特性，因此，在设计基模多注行波管之前分析慢波结构的高频特性显得非常重要。

首先，完成 0.14 THz 折叠波导行波管初始结构参数的设计(见表 1)，结构模型如图 1 所示。多注折叠波导慢波在 CST MWS 中进行高频特性的模拟计算，图 2 中获得基模多注折叠波导慢波结构在 0.14 THz 处的归一化相速为 0.241，耦合阻抗为 2.1 Ω，插图 1 为耦合阻抗的局部放大图。

表 1 折叠波导结构优化后尺寸参数值

Table 1 Optimized dimension of folded waveguide structure

a/mm	b/mm	p/mm	h/mm	r ₀ /mm
1.30	0.20	0.39	0.36	0.12

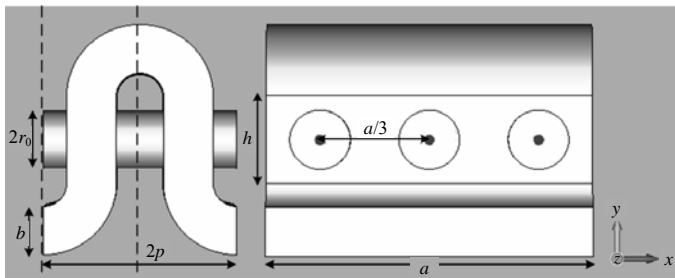


Fig. 1 Model and dimensions of multi-beam folded waveguide
图 1 多注折叠波导模型与结构尺寸标识

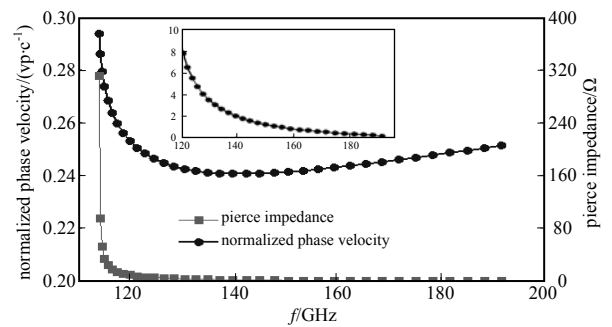


Fig. 2 Dispersion and coupling impedance of multi-beam folded waveguide
图 2 多注折叠波导的色散与耦合阻抗特性

2 基模多注慢波结构的传输特性

慢波结构是高频电磁场与电子注进行相互作用的场所，该高频系数传输特性的好坏将决定行波管的相互作用特性及是否会发生振荡现象，因此了解基模多注折叠波导中电磁传输特性很有必要。根据上节多注折叠波导优化后的高频特性，只需了解该结构色散平坦区 0.13 THz~0.15 THz 之间的传输特性，传输模型采用 60 个半几何周期(如图 3 所示)，加工折叠波导主要采用无氧铜材料，由于加工表面粗糙度会导致电磁波的传输损耗，本文中将无氧铜的电导率设置成等效电导率为 2.064×10^7 S/m。在输入和输出口处将非标准的输入输出口尺寸渐变

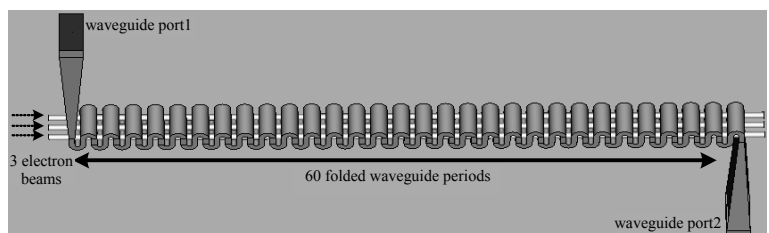


Fig. 3 S parameter of multi-beam folded waveguide TWT
图 3 多注折叠波导 S 参数计算模型

成标准的矩形波导 WM-1651 尺寸(1.651 mm×0.825 5 mm)，这在工艺实现上通过 2 个维度上的渐变铣削完成，2 个方向上同时进行渐变可以有效降低渐变段的长度，减小整管尺寸，降低对聚焦磁场的要求。

利用 CST MWS 的瞬态求解器，图 3 中定义波导端口 1 为 RF 信号输入端口，波导端口 2 为 RF 信号输出端口，背景材料定义为有耗金属材料，电导率指定为 2.064×10^7 S/m，边界条件定义为 x,y,z 三个方向均为电臂，最后获得多注折叠波导的电磁传输特性如图 4 所示。

从图 4 的计算结果可以看出， S_{11} 小于 -20 dB，说明该系统的反射很小； S_{21} 为 -3 dB，VSWR 小于 1.2，说明该系统具有很好的传输特性，在 130 GHz~150 GHz 之间单位长度的损耗低于 1.7 dB/cm，其中 0.14 THz 频率点处的 S_{11} 为 -24.41 dB， S_{21} 为 -3.21 dB，驻波比 VSWR 为 1.13，损耗为 1.36 dB/cm。

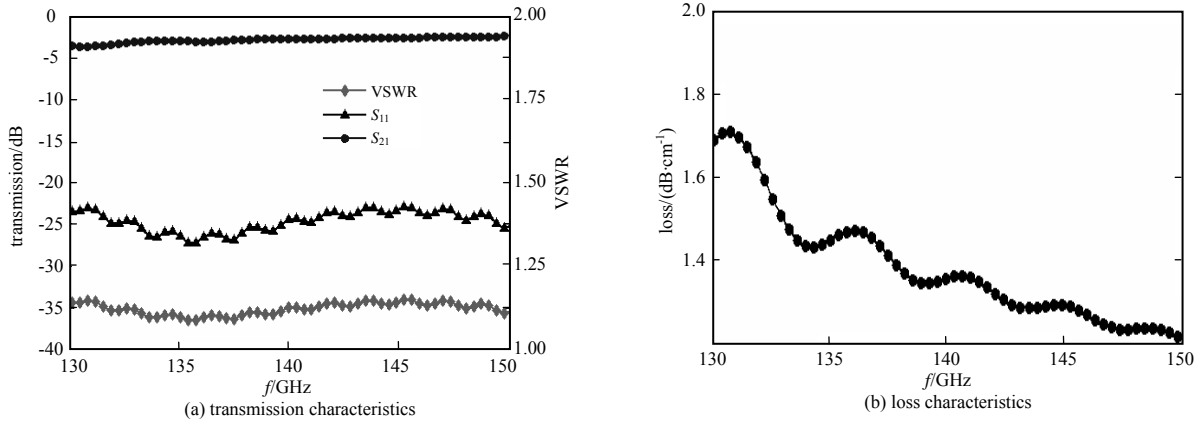


Fig.4 Electromagnetic transmission characteristics of the multi-beam folded waveguide
图 4 多注折叠波导的电磁传输特性

3 基模多注慢波结构的注波相互作用特性

上面 2 节完成了基模多注折叠波导的高频特性与传输特性分析，本节对电子注与电磁波的相互作用特性进行分析，看电子注和电磁波能否充分相互作用有效放大电磁波，模型结构参数见表 1，计算模型见图 1。电子注的初始参数有电压 U_0 和电流 I_0 ，其中电压的计算根据电子注速度与电磁波相速(图 2 所示)的准同步原则确定；当注电流为 12 mA，得到注电流密度为 106 A/cm^2 ，目前热阴极连续发射电流密度水平为 $3 \text{ A/cm}^2 \sim 4 \text{ A/cm}^2$ ，获得的电子枪面积压缩比为 26.5~35.4，没有现实难度，电子注层流性也较好。轴向聚焦磁场 B_z 取为 2.5 倍布里渊磁场。高频电磁场的馈入峰值功率 P_{in} 为 10 mW。各初始参数如表 2 所示。

表 2 注波相互作用计算的初始参数
Table 2 Initial parameters of beam-wave interaction

U_0/kV	I_0/mA	B_z/T	P_{in}/mW
15.75	0.12	0.34	10

利用 CST PS 模块中的 PIC 求解器完成上述模型的注波相互作用特性分析，向该系统中注入多注圆形电子注和馈入电磁信号，进行注波相互作用，实时观察电子注的运动和端口信号变化情况。

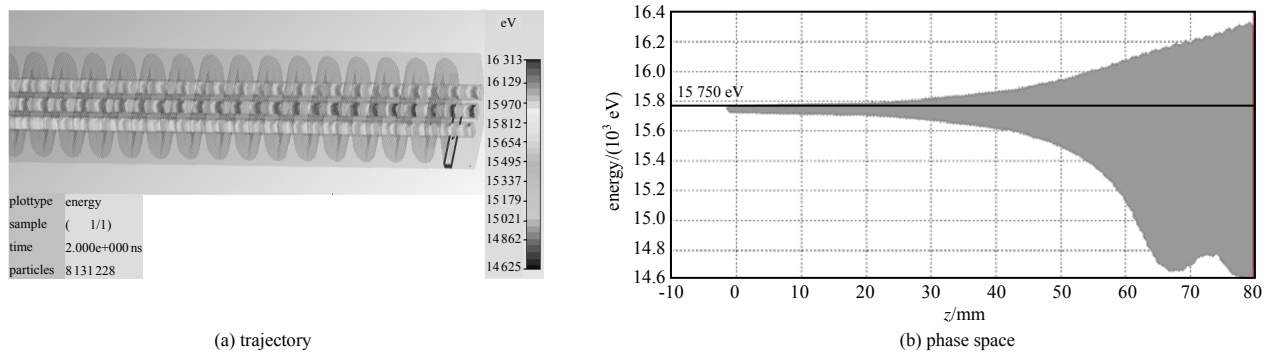


Fig.5 Trajectory and phase space of electron beam
图 5 电子注的运动轨迹和相空间图

模拟计算时，首先，定义多个粒子源，为了简化粒子模拟模型，在每个注通道中单独建立一个实体作为理想电子注发射体，注半径为 $r_0/2$ ，这样有利于电子注的单独加密以提高计算精确度，定义 PIC 发射模型为 DC，宏粒子数为 81 个，粒子输运能量为 15.75 keV，注电流大小为 12 mA；定义激励信号 signal1 为对应频率的正旋信

号；定义离电子注近端为波导端口 1，另一端为波导端口 2，然后在 PIC 求解器中指定波导端口 1 作为激励信号端口，并定义馈入信号的峰值电压为 0.141 4 V(即峰值功率为 10 mW)，信号源选择为 signal1，同时定义 0.34 T 的轴向均匀磁场实现对电子注的约束，指定仿真时长为 2 ns。

根据上面的设置完成粒子模拟，图 5(a)显示了 100 个完整几何周期长度下，0.14 THz 频率点处 PIC 模拟中电子注与高频场的相互作用过程，3 个电子注在 RF 输出口处实现了很好的群聚；图 5(b)表示电子注的相空间图，图示表明在相互作用段的后半部分中减速的电子数远多于被加速的电子数，从而确保了电子注动能向电磁能的转换，有效放大电磁波。图 6(a)所示为输出端口处观测得到输出功率，信号在 1.4 ns 后达到稳定，在 0.14 THz 处获得了 22.2 W 的峰值功率，增益为 33.44 dB；图 6(b)为输出端口信号的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)频谱分布，图示说明输出端口的信号仅在 0.14 THz 实现了有效放大，频谱纯净，没有其他谐波成份。

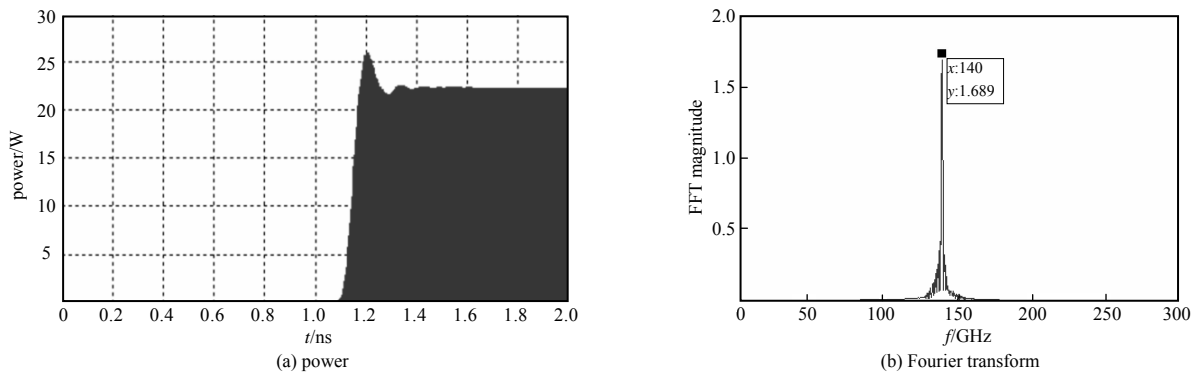


Fig.6 Power and Fourier transform of the output signal
图 6 输出端口信号的功率大小和傅里叶变换频谱分布

通信系统中，非常看重 3 dB 带宽这个指标(即功率减半带宽)，因此，行波管作为功率放大链的末端，分析其 3 dB 带宽特性尤显重要，通过改变馈入 RF 信号的频率，其他参数均与上面的相同，重复 PIC 计算过程，获得注波相互作用的幅频响应特性曲线，如图 7 所示。可以看出，在 138 GHz 处取得了 23 W 的最大峰值功率、33.61 dB 的最大增益，3 dB 带宽为 25 GHz(128 GHz~153 GHz)，且在该带宽内获得了 10 W 以上的峰值输出功率。

注电流从 12 mA~30 mA 变化，注电压为 15.75 kV，聚焦磁场为 2.5 布里渊磁场，输入峰值功率为 10 mW，结构参数见表 1，90 个完整周期长，获得不同电流下的增益特性如图 8 所示。图 8 结果表明在注电流为 30 mA 时，增益大小为 38 dB，脉冲峰值功率为 63.1 W。

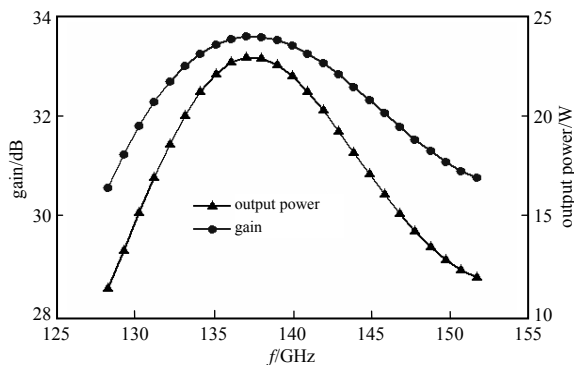


Fig.7 3 dB gain and output power
图 7 3 dB 增益与输出功率

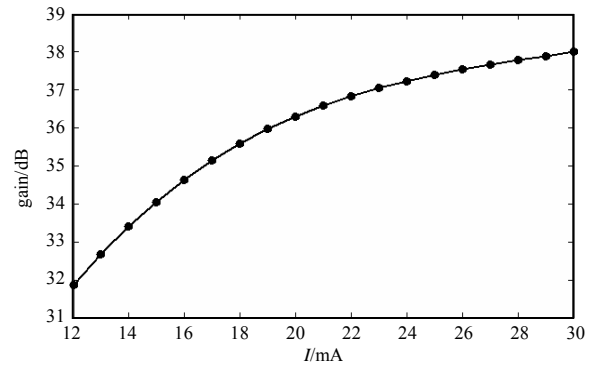


Fig.8 The gain vs. variable beam current
图 8 不同注电流所对应的增益

4 结论

本文通过对 0.14 THz 基模多注折叠波导行波管的高频特性、传输特性及注波相互作用特性分析，结果表明通过基模多注工作方式，能够有效增大行波管的工作电流，提高相互作用增益及效率、3 dB 带宽，增大输出功率。为提高 THz 行波管的输出功率，采用基模多注工作方式是一条有效可行的途径。上述结构的实验制作，主要采用三明治结构方式进行。

参考文献：

- [1] Siegel P H. Terahertz Technology[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):910-928.

- [2] Booske J H. 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] Shin Young-Min, Barnett L R, Luhmann N C, et al. Quasi-optical output-cavity design for a 50-kW multicavity W-band sheet-beam klystron[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009,56(12):3196–3202.
- [4] Kory C L, Read Michael E, Ives R L, et al. Design of overmoded interaction circuit for 1-kW 95-GHz TWT[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009,56(5):713–720.
- [5] 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.
- [6] Pershing D E, Nguyen K T, Abe D K, et al. Demonstration of a wideband 10-kW Ka-band sheet beam TWT amplifier[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014,61(6):1637–1642.
- [7] Kotiranta M, Krozer V. Harmonic distortion in a traveling wave tube at 850 GHz and its use in frequency multiplication [C]// 2011 Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits(INMMIC). Vienna, Austria:IEEE, 2011:1–4.
- [8] Paoloni C, Brunetti F, Di Carlo A, et al. The OPTHER project: progress toward the THz amplifier[C]// 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Bangalore, India:IEEE, 2011:55–56.
- [9] Dayton J A, Kory C L, Mearini G T, et al. Fabrication and testing of the 0.650 THz helical BWO[C]// 2012 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA:IEEE, 2012:33–34.
- [10] 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:University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [11] 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.)
- [12] Kreischer K E, Tucek J C, Basten M A, et al. 220 GHz power amplifier testing at Northrop Grumman[C]// 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Paris, France:IEEE, 2013:1–2.
- [13] 颜胜美, 苏伟, 王亚军, 等. 并行多注 THz 折叠波导行波管的理论分析与数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2014,26(8):083105. (YAN Shengmei, SU Wei, WANG Yajun, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of parallel multi-beam THz folded waveguide traveling-wave tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014,26(8):083105.)
- [14] 张芳, 董志伟, 董烨. 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.)
- [15] Dohler G, Gagne D, Gallagher D, et al. Serpentine waveguide TWT[C]// IEEE 1987 International Electron Devices Meeting. 1987:487–488.
- [16] 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.
- [17] 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.)
- [18] 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.)
- [19] 张芳, 董志伟, 董烨, 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.)
- [20] 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.)
- [21] ZHANG Changqing, GONG Yubin. Analytical exploration of folded waveguide circuit design for high-power traveling-wave tube amplifier[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011,32(4):407–417.
- [22] Curnow H J. A general equivalent circuit for couple-cavity slow-wave structures[J]. *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.* 1965,13:671–675.