

文章编号: 1672-2892(2011)03-0308-05

0.14 THz大功率回旋行波管前级激励源粒子模拟研究

胡林林, 陈洪斌, 徐 翱, 阎 磊, 唐瑞雪, 蒋 艺, 周传明

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要:以折叠波导行波管作为大功率回旋行波管的前级激励信号源,利用电磁仿真软件HFSS和粒子模拟软件(CST粒子工作室),对0.14 THz微电真空折叠波导行波管慢波结构的色散特性、耦合阻抗进行计算分析,然后对折叠波导行波管束波相互作用过程进行粒子模拟,最后通过粒子模拟得到该折叠波导行波管的增益、工作电压、电流等工作特性参数。在电压为13.9 kV、电流为16 mA,输入功率为5 mW的条件下,输出功率为5 W,线性增益为30 dB,带宽3.7 GHz,最大输出功率为6.2 W,该结果为0.14 THz大功率回旋行波管实现kW量级的功率输出提供功率足够的前级馈入信号奠定了基础。

关键词: 折叠波导; 行波管; 太赫兹

中图分类号: TN125.1

文献标识码: A

Particle simulation of pre-driving source for 0.14 THz high-power gyrotron TWT

HU Lin-lin, CHEN Hong-bin, XU Ao, YAN Lei, TANG Rui-xue, JIANG Yi, ZHOU Chuan-ming
(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: The folded waveguide Traveling-Wave Tube(TWT) was served as pre-driving source of high-power gyrotron TWT in this paper. The dispersion curve of Slow Wave Structure(SWS) and coupling impedance were analyzed using EM simulation software HFSS and particle simulation software CST particle studio, and the beam-wave reaction process was simulated to obtain working parameters of gain, working voltage and current. Under the beam voltage of 13.9 kV, current of 16 mA and input power of 5 mW, the 0.14 THz wave was generated with linear gain of 30 dB, bandwidth of 3.7 GHz, maximum power of 6.2 W. The results will provide enough feeding signal power for 0.14 THz high-power gyrotron TWT to realize kW-level power.

Key words: folded waveguide; Traveling-Wave Tube; terahertz

近年来,随着太赫兹波一系列独特的优越特性被发现和认识,太赫兹技术在目标探测、辐射成像、宽带通信、生物医学等众多领域显示出巨大的应用潜力,引起国际上对太赫兹技术研究的极大关注。太赫兹技术的研究亟需太赫兹频段辐射源的发展,目前,太赫兹源主要有真空电子学的太赫兹源、半导体固态太赫兹源、光子学太赫兹辐射源、自由电子激光及量子级联太赫兹源。太赫兹回旋行波管属于电真空器件,由于具有高功率、高效率 and 宽带宽等优点,在先进的太赫兹雷达、电子战和太赫兹通信等方面有着广阔的应用前景。2003年,美国MIT等离子体科学与聚变中心就已经开展0.14 THz的回旋行波管的研究工作,设计指标为0.14 THz,100 kW,增益38 dB和饱和带宽3%;实验获得电子束68 kV/6 A,微秒脉冲最大功率30 kW,非饱和工作时,2 GHz带宽功率大于10 kW。国内对于0.14 THz大功率回旋行波管的研究尚处于起步阶段。大功率回旋行波管的增益能达到30 dB,但如果要实现kW量级的功率输出,前级激励信号功率需达到W量级。因此,为提高大功率回旋行波管的功率,必须研制功率在W级的0.14 THz辐射源。折叠波导行波管是THz频段极具应用前景的新型电真空器件,它具有全金属结构,色散较平坦,高频损耗小,功率容量大,耦合匹配好^[1-5]。本文以折叠波导行波管作为大功率回旋行波管的前级激励信号源,利用电磁仿真软件HFSS和粒子模拟软件CST粒子工作室对0.14 THz微电真空折叠波导行波管的慢波结构的色散特性、耦合阻抗进行计算分析,然后对折叠波导行波管束波相互作用过程进行了粒子模拟,最后通过粒子模拟得到该折叠波导行波管的增益、工作电压、电流等工作特性参数。

收稿日期: 2011-03-30; 修回日期: 2011-04-30

基金项目: 中国工程物理研究院 909 科技专项基金资助项目(2010-9090502B)

1 折叠波导行波管慢波结构色散特性分析及结构设计

折叠波导慢波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如图 1 所示^[2]。图中 a 表示波导宽边长度， b 表示波导窄边长度， p 为半几何周期， R 为弯曲部分的中心半径，电子束通道半径为 r_c 。电磁场在弯曲的波导中传输，波的纵向等效相速得以降低，在电子束通道处，电磁场与电子发生相互作用，通过对波导尺寸进行合理设计可以实现同步，产生束波相互作用，电磁场信号得到放大。

根据理论计算可以得到折叠波导慢波结构的色散方程：

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

折叠波导轴线耦合阻抗为：

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

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 为谐波阶次， β_m 为 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。

利用 HFSS 对折叠波导慢波结构色散特性进行分析，优化几何结构，得到合适的结构尺寸，优化后的结构参数如表 1 所示。图 2 为该结构下零次空间谐波作用时，慢波结构的色散曲线计算结果。可见在 140 GHz 频带范围内，只有基模一种模式，其余高阶模均在 200 GHz 频带以外，且与基模之间由止带完全隔开。因此，在行波管工作的 140 GHz 频带内不会产生高阶模的模式竞争。图 3 为零次空间谐波作用下，基模色散曲线与电子注线的关系，由图可知：1) 利用 HFSS 计算的结果与理论公式计算结果之间的差异较小，这种差异是由于理论公式未考虑波导弯折影响造成的；2) 电子束与前向波相互作用，能够使行波放大。慢波结构的轴线耦合阻抗如图 4 所示，在中心频率 140 GHz 处，耦合阻抗约为 2.7 Ω 。

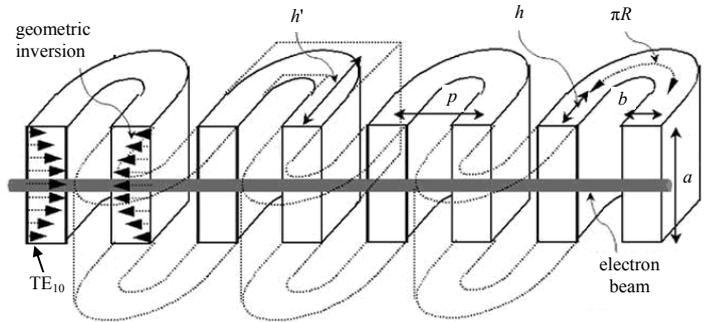


Fig.1 Schematic plot of folded waveguide SWS
图 1 折叠波导慢波结构示意图

表 1 0.14 THz 折叠波导慢波结构几何尺寸(mm)
Table 1 Size of 0.14 THz folded waveguide SWS(mm)

a	b	h	p	r_c
1.23	0.25	0.48	0.35	0.13

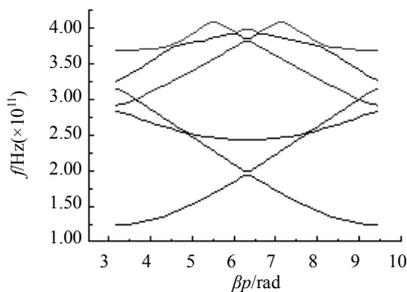


Fig.2 Zero spatial harmonic wave dispersion curve
图 2 零次空间谐波各模式色散曲线

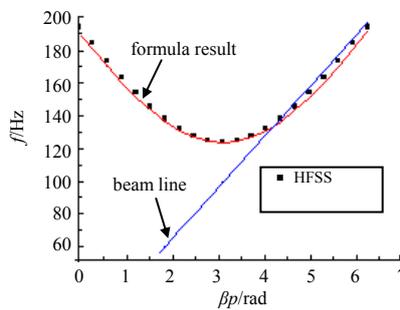


Fig.3 Fundamental mode dispersion curve
图 3 慢波结构色散曲线(基模)

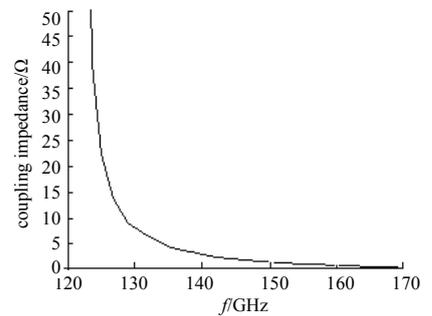


Fig.4 Axial coupling impedance vs. frequency of folded waveguide SWS
图 4 折叠波导慢波结构轴向耦合阻抗随频率变化图

2 0.14 THz 折叠波导行波管粒子模拟

以表 1 折叠波导慢波结构尺寸为基础，利用 CST 粒子工作室对其进行粒子模拟，图 5 为建立的计算模型。在 THz 频段必须考虑波导损耗，因此将慢波结构折叠波导的材料设置成有耗金属。通过粒子模拟计算优化

慢波结构的周期数，最终确定慢波结构周期数为 100。

模拟时，电子束采用直流发射模型，电流设置为 16 mA，电子电压为 13.9 kV。采用周期聚焦磁场对电子束进行聚焦，最大磁感应强度为 0.33×10^{-4} T，周期长度 9 mm，磁场矢量分布如图 5 所示。输入信号平均功率为 5 mW，频率 140 GHz。粒子模拟计算结果如图 7~图 10 所示：图 7 为输出端口部分电子束的相空间分布图，可见电子束在折叠波导慢波结构运动的过程中产生了明显的群聚现象；图 8 为电子束 β 参数沿轴向的分布，可以看到随着电子束的运动，电子束的总能量下降，因此电磁场从电子束中获得能量产生放大效应；图 9 为计算得到的输出端口信号图，对应瞬态峰值功率 10 W，平均功率为 5 W，增益为 30 dB，电子束效率为 2.2%；通过对图 10 输出信号的频谱分析发现，输出信号的频率为 140 GHz，未产生其他的频率，说明束波相互作用过程中未发生自激振荡。

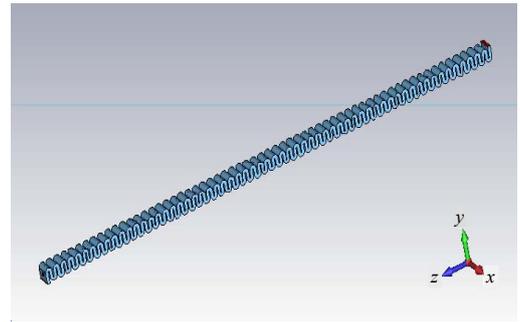


Fig.5 Simulation model of 0.14 THz folded waveguide TWT
图 5 0.14 THz 折叠波导行波管粒子模拟计算模型图

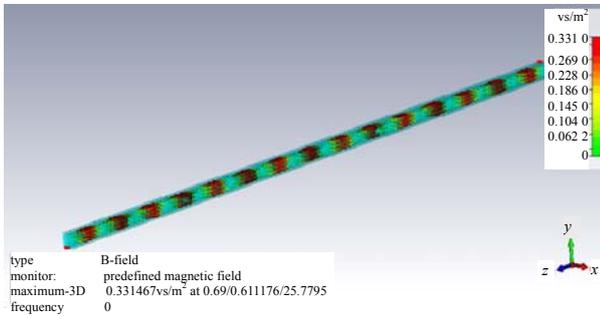


Fig.6 Vector plot of period magnetic field
图 6 周期磁场矢量图

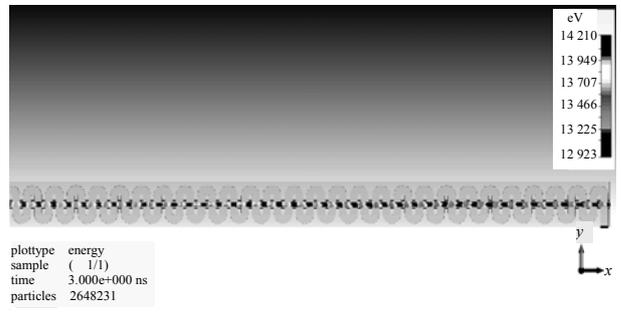


Fig.7 Phase-space distribution of electron beam
图 7 电子束相空间分布图

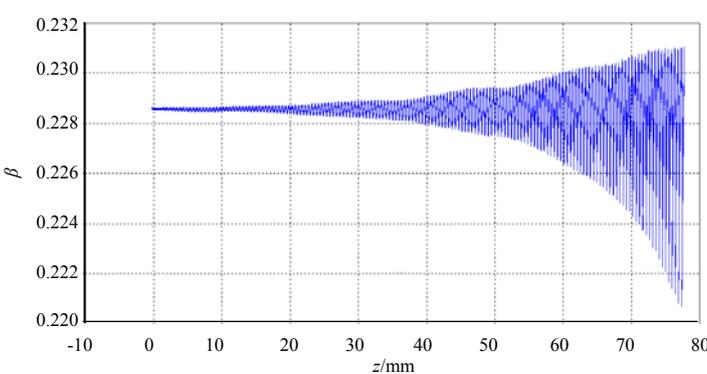


Fig.8 β distribution of beam along axle
图 8 电子束 β 参数沿轴向分布图

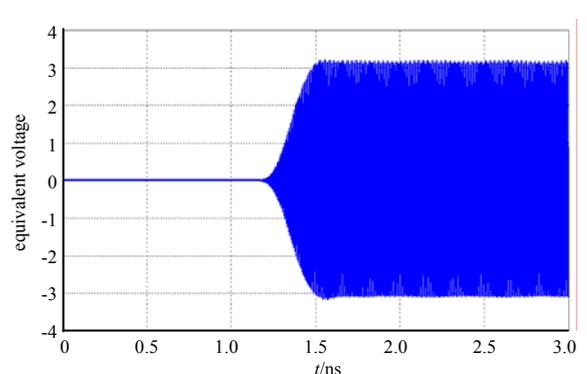


Fig.9 Signal plot at output port
图 9 输出端口信号图

3 电参数变化对行波管工作的影响

改变输入信号的频率、功率、电子束电压和电流，对上一节优化后的折叠波导行波管进行大量的粒子模拟计算，获得折叠波导行波管的工作特性。

图 11 为在电子束电压为 13.9 kV，电流为 16 mA 下计算得到的增益曲线，由图可知行波管的 3 dB 频率范围为 137.5 GHz~141.2 GHz，带宽为 3.7 GHz。图 12 为输出功率及增益随输入功率的变化曲线，由图可知：
1) 输入功率 0 mW~5 mW 范围为线性区，增益约为 30 dB；
2) 输入功率为 10 mW 时，输出功率为 6.2 W，达到饱和状态。

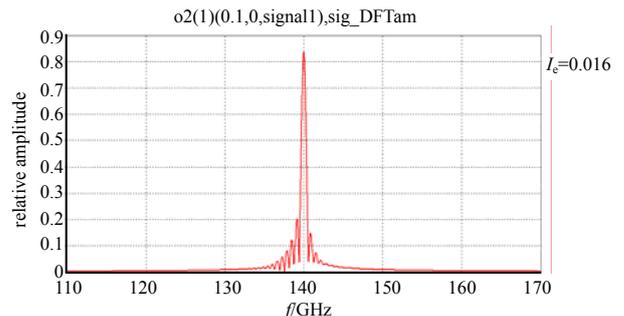


Fig.10 Frequency spectrum of output signal
图 10 输出信号的频谱分析图

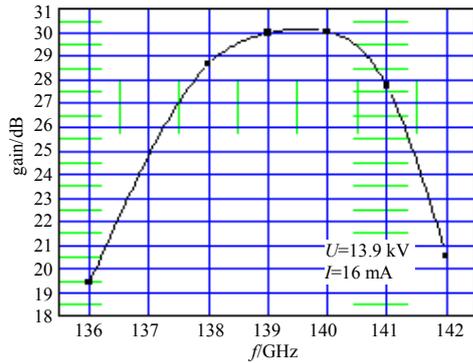


Fig.11 Gain curve of folded waveguide TWT
图 11 折叠波导行波管的增益曲线图

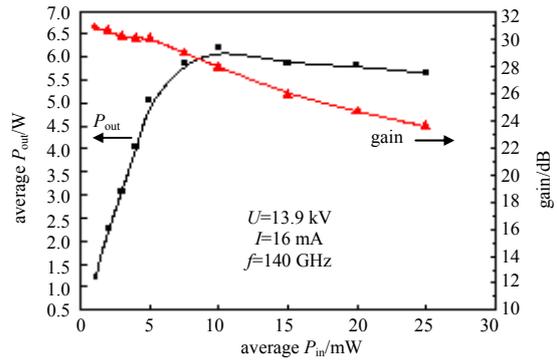


Fig.12 Output power and gain vs. input power
图 12 输出功率及增益与输入功率的关系曲线

图 13 为输入信号频率 140 GHz 下，保持电流为 16 mA 时，输出功率随电子束电压变化的关系曲线，由该图可知，折叠波导行波管工作电压范围较窄，理想的工作电压为 13.9 kV，偏离该电压输出功率下降很快，这主要是由于慢波结构的色散特性造成的。图 14 为输入信号频率 140 GHz 下，保持电压为 13.9 kV 时，输出功率随电子束电流的变化曲线，由图可知，输出功率随电流增大而增大，电流达到 25 mA 后功率达到最大，随后功率随着电流的增大反而下降，这是因为电流密度过大造成空间电荷排斥力增大，影响了电子束的群聚。考虑采用的会聚型电子枪的发射能力，选择适合的电子束电流为 16 mA。

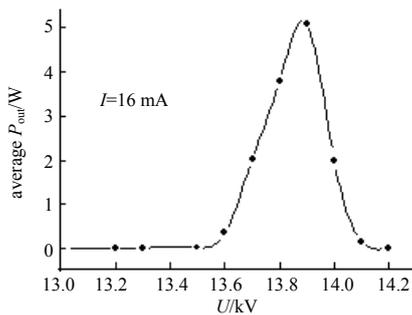


Fig.13 Beam voltage vs. average output power
图 13 电子束电压与平均输出功率关系图

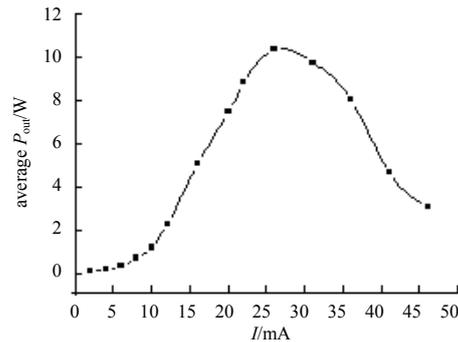


Fig.14 Beam current vs. average output power
图 14 电子束电流与平均输出功率关系图

4 结论

本文采用折叠波导行波管作为千瓦级大功率回旋行波管的前级激励源，通过粒子模拟完成了 0.14 THz 折叠波导行波管的结构设计，并得到了该折叠波导行波管的工作特性。在电压 13.9 kV、电流 16 mA 条件下，行波管线性增益为 30 dB，带宽 3.7 GHz，最大输出功率为 6.2 W；典型结果：输入功率 5 mW 时，输出功率 5 W。模拟结果对 0.14 THz 的回旋行波管的后续工程设计具有重要的参考价值。

参考文献：

- [1] Bhattacharjee S,Kory C L,Lee W J,et al. Comprehensive simulations of compact THz radiation sources using microfabricated, folded waveguide TWTs[C]// IVEC 2002. USA:[s.n.], 2002:26-27.
- [2] Seong Tae Han,Jang K H,Jin-kyu So,et al. Low-voltage operation of Ka-band folded waveguide traveling-wave tube[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004,32(1):60-66.
- [3] Liu shunkang. A new type of millimeter wave high power devices folded waveguide TWTs[J]. Journal of Electron Devices, 2001,24(2):158-161.
- [4] Booske John H,Converse Mark C,Kory Carol L,et al. Accurate parametric modeling of folded waveguide circuits for millimeter-wave traveling wave tubes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005,52(5):685-694.
- [5] 冯进军,蔡军,胡银福,等. 折叠波导慢波结构太赫兹真空器件研究[J]. 真空电子技术, 2009,4(3):249-254.

作者简介:



胡林林(1983-),男,湖北省荆州市人,硕士,助理研究员,主要从事高功率微波器件、大功率THz电真空器件及信号测量方面的研究.email:hu_linlin2005@yahoo.com.cn.

唐瑞雪(1983-),女,四川省绵阳市人,硕士,助理研究员,主要从事大功率毫米波器件的设计工作。

蒋 艺(1983-),男,成都市人,硕士,主要从事大功率太赫兹器件的设计工作。

陈洪斌(1969-),男,重庆市人,博士,研究员,主要从事高功率微波器件、大功率毫米波/THz电真空器件等的研究。

徐 翱(1982-),男,武汉市人,博士,助理研究员,主要从事大功率THz电真空器件的研究。

阎 磊(1984-),男,西安市人,研究实习员,主要从事毫米波器件、大功率THz电真空器件的输能系统及磁聚焦系统的设计研究。

周传明(1941-),男,成都市人,研究员,主要负责中物院高技术领域微波方面的规划与管理的工作。

(上接第 302 页)

- [5] Cai J,Feng J J,Li B Y,et al. Analysis of W-Band Folded Waveguide Slow-Wave Structure[C]// 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings. Beijing:[s.n.], 2005:740-743.
- [6] Liu S K. Folded Waveguide Circuit for Broadband MM Wave TWTs[J]. Int. J. Infrared Millim. Waves, 1995,16(4): 809-815.
- [7] Booske J H. Accurate Parametric Modeling of Folded Waveguide Circuits for Millimeter-Wave Traveling Wave Tubes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005,52(5):685-694.
- [8] Na Y H, Chung S W, Choi J J. Analysis of a Broadband Q-band Folded-waveguide Traveling-wave Tube[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2002,30(31):1017-1022.
- [9] Sumathy M, Vinoy K J, Datta S K. Equivalent circuit analysis of serpentine folded-waveguide slow-wave structures for millimeter-wave traveling-wave tubes[J]. J. Infrared Milli. Terahz Waves, 2009,30(2):151-158.
- [10] Han S T, Kim J I, Park G S. Design of a folded waveguide traveling-wave tube[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003,38(2):161-165.
- [11] Malek F. Design and analytical modeling of folded waveguide traveling wave tube[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009,612(1):176-186.

作者简介:



陈 樟(1982-),男,四川省开江县人,博士,助理研究员,主要研究方向为 THz 微纳电子学器件.email:czcaep@gmail.com.

王亚军(1984-),男,四川省盐亭县人,硕士,研究实习员,主要研究方向为 THz 微纳电子学器件。