文章编号: 1672-2892(2011)03-0313-07

0.22 THz 折叠波导行波管放大器理论分析与数值模拟

董 烨,董志伟,杨温渊,陈 军

(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100094)

摘 要:为了解折叠波导行波管放大器的性能影响因素,在理论分析的基础上,对 0.22 THz 折叠波导行波管放大器进行系统的数值模拟与分析,重点讨论电子束压、束流、输入信号功率、 结构周期数、材料电导率、引导磁场大小、电子能散度以及发射度对器件输出功率水平的影响。 发现束压存在最佳工作范围,增加束流可以有效提高器件增益;输入信号不宜过强,否则器件增 益反而会下降;器件结构周期数存在一个最优范围,过多过少对器件性能都有影响;采用电导率 高、表面光洁度高的金属材料,可以降低器壁损耗;引导磁场达到聚束要求即可,无需太高;尽 可能控制电子的能散度和发射度,提高电子束质量可以提升器件性能。采用自编的三维全电磁粒 子模拟大规模并行程序 NEPTUNE,对 0.22 THz 折叠波导行波管放大器的性能进行了对比分析,给 出了束波互作用过程的基本图像,并对器件输出端口反射所引发的自激振荡现象进行了重点分析。 关键词:折叠波导行波管放大器;理论分析;数值模拟;三维全电磁粒子模拟程序 中图分类号:TN124

Theoretical analysis and numerical study of 0.22 THz FWG-TWT

DONG Ye, DONG Zhi-wei, YANG Wen-yuan, CHEN Jun

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to study the influence factors on the performance of FWG-TWT(Folded Wave-Guide Traveling-Wave Tube), a 0.22 THz FWG-TWT was designed and simulated, some important elements, including beam voltage, current, input signal power, structure periods number, material conductivity, guide magnet, energy spread, and angular spread of emission electrons, were numerically studied and discussed. The simulation results indicate that, there is an optimal beam-voltage range; the gain can be improved by increasing electric current; the input signal power is not the higher the better, and the number of structure periods is not the more the better; higher conductivity and surface finish of the material could increase the gain of the device; the guide magnet will be high enough when the electron beam can be constrained; and improving electron quality by controlling electron energy and angular spread can increase the gain of the device. The FWG-TWT was also simulated by using a massively 3-D fully electromagnetic PIC code—NEPTUNE, programmed by the authors, the physical images of beam-wave interaction were given, and the simulated results agreed well to other software. At the same time, the self-oscillation phenomena caused by port-reflection were studied and discussed, and some suggestions were put forward.

Key words: Folded Wave-Guide Traveling-Wave Tube; theoretical analysis; numerical simulation; 3-D fully electromagnetic PIC code

THz由于其在国家安全、高清成像、医疗诊断、材料分析、环境检测以及通信领域的广泛应用牵引,很快得到了重视,并在十多年的时间内得到了飞速发展,THz也从一个"空白"学科发展成为21世纪科学技术发展的一个重要领域与方向。光学 THz源主要包括固态源和量子级联激光器,但其功率水平太低。目前,将传统的真空电子学技术与先进微机电加工技术相结合,产生出了一批新型的THz微电真空器件,其可以提供W级水平左右的功率输出以及连续波运行保证,比如:基于折叠波导的行波管放大器(FWG-TWT)或返波管振荡器、基于

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预研项目(9090502-2);国家高技术发展计划项目;中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2009B0402046)

Smith Purcell 效应的 clinotron 器件、扩展腔振荡器以及扩展腔速调管等等^[1]。Northrop 公司最早提出采用折叠波 导作为行波管的高频互作用电路,这种 FWG 结构因其具备散热效果好,色散曲线平坦,高频损耗小,耦合匹配 好以及易于批量化生产加工的优点,被人们广泛关注^[2]。Northrop 公司成功研制了 40 GHz~100 GHz 的 FWG-TWT 源,增益达 30 dB 左右。理论方面,美国威斯康星大学的 Booske 等人开展得比较深入,并联合海军实验室开展 了 560 GHz 下 FWG-TWT 的模拟研究工作^[3-4]。另外,韩国首尔国立大学的 Hyun-Jun Ha 与 Soon-Shin Jung 等人 也开展过折叠波导色散关系和小信号增益方面的理论研究工作^[5]。国内电子科技大学的刘盛纲院士也曾进行过折 叠波导理论分析方面的工作^[6]。针对 0.22 THz 的 FWG-TWT 设计,厦门大学的 Zheng Ruilin 和 Chen Xuyuan 等 人进行了较为深入的理论分析和软件模拟工作,给出了器件优化结构参数^[7]。

根据 FWG-TWT 项目牵引,开展了 0.22 THz 折叠波导行波管放大器的理论分析与数值模拟工作,在理论分析基础上对器件进行了仔细模拟,并深入讨论了结构参数和电参数对器件输出功率水平的影响,比如:电子束压、 束流、输入信号功率、结构周期数、材料电导率、引导磁场大小、电子能散度以及发射度。而后,又利用自编的 三维全电磁粒子模拟程序 NEPTUNE^[8-10],对 0.22 THz 折叠波导行波管放大器进行对比模拟,给出了束波互作用 过程的基本物理图像,并深入讨论了器件输出端口反射引发自激振荡的现象。

1 物理建模

折叠波导行波管放大器的几何结构见图 1,其由 1 个弯曲 折叠的矩波导和 1 个位于轴心位置用于电子束传输的圆柱波导 联合构成。电磁波沿着弯曲的矩波导传输相当于其在轴向上的 速度减慢,以便与轴向传输的电子束同步,发生束波互作用, 吸收电子动能以获得增益和放大。

器件的基本结构参数包括:矩波导宽边 a,高边 b,周期长度 P,直段长度 L_0 ,电子束通道直径 D,图 1 其他参数都可以间接计算得出,如 R=0.5P, g=P-b。

折叠波导的色散关系满足^[5]:

$$\omega^{2} = \omega_{c}^{2} + \left(\frac{Pc}{\pi P/2 + L_{0}}\right)^{2} \left(k_{zm} - \frac{2m+1}{p}\pi\right)^{2}$$
(1)

$$k_{zm} = k_{z0} + \frac{2m\pi}{P} \tag{2}$$

$$\omega_c = \frac{\pi c}{a} \tag{3}$$

电子束线满足^[5]:

$$\omega = k_{z0} v_z \tag{4}$$

式中: c 为光速; π 为圆周率; k_{z0} 为零次谐波波数; k_{zm} 为 m 次 谐波波数; v_z 为电子速度; $\omega = 2\pi f$; f 为工作频率; $\omega_c = 2\pi f_c$; f_c 为矩波导截止频率。

通过一系列参数优化,最终选取: a=0.852 mm,b=0.12 mm, P=0.28 mm,L₀=0.27 mm,D=0.15 mm。该参数下的折叠波导主模

TE10 的色散曲线见图 2, 电子束线与色散曲线的交点即为束波互作用点, 其对应的频率即为工作频率, 由此初 步划定的电子束线为 16.5 kV~17.8 kV 之间。

2 模拟结果及器件性能影响因素分析

对上述 0.22 THz 折叠波导行波管放大器的模拟仿真 工作,选取的几何结构参数如前面所述,共采用 50 个周 期结构,材料选取电导率为 2.2×10⁷ S/m 的金属铜,电参 数选取:束压 17.4 kV,束流 20 mA,输入信号源功率 10 mW, 频率 0.22 THz,轴向外加 1 T 的稳恒引导磁场。电子发射







Fig.2 Dispersion curve of FWG 图 2 折叠波导色散曲线

采用标准静电发射模型,电子束为单能理想束,束直径为电子束通道直径的一半,建模结果见图 3。图 4 为束波 互作用进入稳态时,电子束在器件末端附近的能量分布,可以看出电子束得到了良好的群聚,电子得到了充分的 调整,与器件本征模式发生了能量交换。图 5 为端口信号波形监测,可以看出:信号得到放大,输出功率为 342 mW 左右,增益达 15.34 dB,输入端信号反射较小。图 6 与图 7 分别为输入信号和输出信号时域波形的快速傅里叶变 换,可以看出:输入信号和输出信号的中心频率均在 0.22 THz。器件初步设计合理,下面讨论结构参数与电参数 对器件性能的影响。

315

2.1 电子束压及束流对器件性能的影响

首先,保持其他参数不变,仅改变电子束压,讨论其对器件性能的影响。由图 8 可以看出:随着束压的增加,器件增益先增加后减小,中间存在最优的工作电压,因此器件的工作电压存在一个范围,超出该范围器件则不能 正常工作。通过电子束线与折叠波导色散曲线的关系可知,电子束压越低,束线斜率越小;电子束压越高,束线 斜率越大。电子束线在与折叠波导色散曲线相切的位置增益最大;若束压太低,束线与色散曲线无交点;束压太 高,束线与色散曲线相割,存在 2 个交点,增益下降,且不能满足宽带工作条件。

其次,保持其他参数不变,仅改变电子束流,讨论其对器件 性能的影响。由图 9 可以看出:随着束流的增加,器件增益增 加,但并非线性增长关系,前半段增长快,后半段增长慢,由 于空间电荷效应的影响,当束流达到一定时,器件输出功率和 增益将会出现饱和。实际上,电子束发射面非常小,且对束质 量要求较高,因此发射电流不可能做到太高。当然,在保证束 质量不受影响的前提下,若能有效提高发射电流,对器件性能 的改善是显而易见的。

2.2 信号源输入功率及结构周期数对器件性能的影响

首先,保持其他参数不变,仅改变输入信号功率,讨论其 对器件性能的影响。由图 10 可以看出:随着输入信号功率的增 加,器件增益却在下降,尤其是输入信号功率增加到 100 mW 以上,器件增益下降很快。器件的小信号增益在 15 dB 左右, 所以要使器件工作在较高的增益区间,输入信号功率不宜过高。 过高的输入信号功率,使得电子束的最佳群聚位置提前,致使 输出端口的附近电子束发生过群聚现象,导致器件性能下降。

其次,保持其他参数不变,仅改变器件的结构周期数目, 讨论其对器件性能的影响。由图 11 可以看出:随着器件结构周 期数目的增加,器件增益不是单调增加关系,而是先增加后减 小,说明器件增益会出现饱和,不能无限增加器件长度来提升 增益。原因是器件周期数目增多到一定程度时,会导致电子束 的最佳群聚位置提前,致使输出端口的附近电子束发生过群聚 现象,致使器件性能下降。所以器件周期数过多或过少都不合 适,存在一个优化范围。

2.3 材料电导率及引导磁场大小对器件性能的影响

首先,保持其他参数不变,仅改变器件的材料电导率,讨 论其对器件性能的影响。由图 12 可以看出:随着器件材料电导 率的增加,器件增益明显提高,增加到一定程度时,器件增益 区域饱和,在理想导体的情况下,增益可达 19 dB 左右。电导 率越小,趋肤深度约厚,器壁损耗也越大,而且 THz 频率的电 磁波其趋肤深度相比低频波更薄,所以器壁的光滑度对器件性 能影响更大,也应该引发重视。

其次,保持其他参数不变,仅改变器件引导磁场大小,讨 论其对器件性能的影响。由图 13 可以看出:0.2 T 以下,随着 器件引导磁场的增加,器件增益明显提高,原因是引导磁场增 加了电子束的聚束能力以防束发散打在器壁上。0.2 T 比 0.3 T 的器件增益还大,可能是因为 0.2 T 的电子束扩散程度刚好是充 满整个电子通道又未太多地打到器壁上,增加了慢波表面接触 面积,反而提高了器件性能。引导磁场加到 0.3 T 以上,几乎对 器件性能没有影响。所以实际设计中,要采用确保聚束能力下 的最小引导磁场。对于周期永磁封装结构的引导磁场需要进一 步模拟分析,上述结果不适用。

2.4 发射电子能散度及发射度对器件性能的影响

首先,保持其他参数不变,仅改变发射电子的能散度,讨 图 ^{13 引导磁场大小与增益关系} 论其对器件性能的影响,发射电子中心能量取 17.4 keV。这里能散度的概念是:若电子中心能量为 V₀(eV),发射

电子能量在(V₀-u/2,V₀+u/2)之间均匀分布,则发射电子能散度 =u/V₀。由图 14 可以看出:随着发射电子能散度增加,器件增益 快速下降。说明器件对电子束质量要求较高,若发射电子能散度 不能控制在很小的范围内,会降低器件性能,并产生致命影响。

其次,保持其他参数不变,取能散度为 0.5%,改变发射电子 的发射度,讨论其对器件性能的影响,这里发射度的概念是指: 发射电子束线方法与发射面法向的夹角。由图 15 可以看出:随着 发射度的增加,器件增益先缓慢增加而后迅速下降。开始增加的 原因可能是适当增加的发射度,使得电子束扩散程度刚好是充满 整个电子通道又未太多地打到器壁上,增加了慢波表面接触面积, 提高了器件性能。而后迅速下降的原因是,电子束发射角增加, 使得电子横向发散,过多的电子传输不远就会打到器壁上,直接 影响到电子束的传输过程。

3 NEPTUNE 程序模拟与结果分析

利用自编的三维全电磁粒子模拟程序 NEPTUNE 开展对 FWG-TWT 器件的数值模拟和分析工作,器件结构参数取值与第 1 节相 同,输入信号功率为 3.3 mW,电子束压为 17.2 kV,束流为 50 mA, 引导磁场为 1 T。

图 16~图 22 为模拟结果。图 16 为器件几何建模结果,共有 50 个周期组成。图 17 为器件内部电场幅值的实空间分布,可以 看出电场幅值沿着+z 方向得到了明显放大。图 18 为电子轴向动

量的实空间分布,可以看出电子动量在轴向得到了很好的调制,并且沿着+z 方向的推进群聚效果也愈发明显, 在输出端达到最大。图 19 为电子相空间 P_z-z 分布,可以看出电子得到了充分调制,调制幅度也沿着+z 方向明显 增强。说明束波达到了充分换能。通过图 20 电子束实空间局部细微分布可以看出,电子束轴向传输良好,横向 未发散碰壁。图 21 为器件输入信号功率的时域与频域波形,可以看出输入端信号存在较小反射,这里的输入信 号功率计及了电子束自身产生的电场和磁场,去除电子自身场的影响,输入信号平均功率 3.3 mW 左右,信号频 率 0.22 THz。图 22 为输出放大信号功率的时域与频域波形,可以看出输入端信号也存在较小反射,平均功率 0.85 W 左右,器件增益达 24.11 dB。对比 2.1 节 50 mA 束流时器件增益 22.65 dB,由于 NEPTUNE 程序采用理想导体边 界,增益会比 2.1 节具有电导率导体边界的结果高一些,所以程序模拟结果基本可靠。

对于 FWG-TWT 器件,信号可以沿着 ±z 方向任意传输,这样输出端口的信号会有一部分反射,重新回到器件中沿着-z 方向传播,其到达输入端口信号又会有一部分反射,重回器件内部沿着+z 方向传播,如此往复,器件会出现自激振荡。NEPTUNE 程序设计输入输出端口采用的平面波边界条件辅以吸收介质加载的办法,所以端口反射较大,让程序模拟更长的时间,可以发现:虽然输出端口的放大信号相对自身反射较小,当其传回输入端时,其相对更小的输入信号却大得多,见图 23(a),该信号又沿着+z 方向传输,进一步获得放大,到达输出端口时信号功率又有所提升,见图 23(b),在输出端口又会反射回器件内部,如此往复,就形成了自激振荡。

Fig.16 Geometrical structure of FWG-TWT 图 16 器件三维几何结构

Fig.17 Magnitude distribution of electric field in device 图 17 器件内部电场幅值分布

Fig.18 Momentum distribution of electrons at axial direction 图 18 电子轴向动量实空间分布

程序模拟中要克服自激振荡的产生,需要在输出端口加入吸波效果更好的 PML 边界条件(一般可达-50 dB 以上)。为克服自激振荡,实际器件设计时应该加入吸收电介质,彻底切断信号反馈通道。

4 结论

根据 FWG-TWT 的项目牵引,开展了 0.22 THz 折叠波导行波管放大器的理论分析与数值模拟工作。对器件 进行了仔细模拟,并深入讨论了结构参数和电参数对器件输出功率水平的影响,比如:电子束压、束流、输入信 号功率、结构周期数、材料电导率、引导磁场大小、电子能散度以及发射度。得到的结论是:束压存在一个工作 范围,不宜过高或过低;增加束流可以有效提高器件增益;输入信号不宜过强,否则器件增益反而会下降;器件 结构周期数存在一个最优范围,过多或过少对器件性能都有影响;尽可能采用电导率高、表面光洁度高的金属材 料,以降低器壁损耗;引导磁场达到聚束要求即可,没必要太高;尽可能控制电子的能散度和发射度,提高电子 束质量,从而提升器件性能。而后,利用自编的三维全电磁粒子模拟程序 NEPTUNE,对 0.22 THz 折叠波导行波 管放大器进行对比模拟,给出了束波互作用过程的基本物理图像,物理图像合理,模拟结果可靠。讨论了器件输 出端口反射引发自激振荡现象。实际器件设计时,应该加入吸收电介质,彻底切断信号反馈通道,避免自激振荡。

参考文献:

- [1] Siegel P. Terahertz technology[J]. IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):910–928.
- [2] Theiss A J,Lyon D B,Hiramatsu Y. An integral-polepiece folded-waveguide slow wave circuit for high-power millimeterwave TWTs[C]// Proc. IEDM. washington:[s.n.],1993:149-151.
- [3] Bhattacharjee S,Booske J H,Kory C L,et al. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2004,32(3):1002-1013.
- [4] Booske J H,Kory C L,Gallagher D,et al. Terahertz-Regime,Micro-VEDs:Evaluation of Micromachined TWT Conceptual Designs [C]// IEEE PPPS-2001Conference Record, Las Vegas:[s.n.], 2001:1265-1268.
- [5] Hyun-Jun Ha, Soon-Shin Jung, Gun-Sik Park. Theoretical study for folded waveguide traveling wave tube[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1998, 19(9):1229-1245.
- [6] Liu Shunkang. Study of propagating characteristics for folded waveguide TWT in millimeter wave[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2000,21(4):655-660.
- [7] Zheng Ruilin, Chen Xuyuan. Parametric Simulation and Optimization of Cold-test Properties for a 220 GHz Broadband Folded Waveguide Traveling-wave Tube[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009, 30(9):945-958.
- [8] 董烨,杨温渊,董志伟,等.3 维全电磁粒子模拟软件的外加波与粒子模块设计[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(4):481-488.
 (DONG Ye,YANG Wenyan,DONG Zhi Wei, et al. Design of external-wave and particle modules for 3D fully electromagnetic and PIC simulation software[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009,21(4):481-488).
- [9] 董烨,杨温渊,陈军,等.并行三维全电磁粒子模拟软件 NEPTUNE 的外加磁场模块设计[J].强激光与粒子束, 2010,22 (3):664-670. (DONG Ye,YANG Wenyan,CHEN jun,et al. The Design of External Magnetic Field Loading Modules for the 3D Full Electromagnetic and PIC Simulation Parallel Code NEPTUNE[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(3):664-670).
- [10] 陈军,董烨,杨温渊,等. NEPTUNE:并行三维全电磁粒子模拟软件[J]. 计算机工程与科学, 2009,31(A1):216-217. (CHEN Jun,DONG Ye,YANG Wenyuan, et al. A 3D fully electromagnetic Particle parallel software[J]. Computer engineering and science. 2009,31(A1):216-217).

作者简介:

董 烨(1981-),男,西安市人,助理研究员,研究方向为高功率微波技术、全电磁粒子模拟算法设计及应用.email:dongye0682@sina.com.

董志伟(1962-),男,河北省滦县人,研究员, 研究方向为高功率微波技术。

杨温渊(1973-), 女, 山西省平遥县人, 副研 究员, 研究方向为高功率微波器件理论与数值研 究.

陈 军(1974-), 女, 湖南省衡阳市人, 研究员, 研究方向为并行算法与技术。

319