2014年2月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2014)01-0014-05

0.22 THz 宽带折叠波导慢波结构的设计

王亚军^{a,b}, 颜胜美^{a,b}, 陈 樟^{a,b}

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

摘 要:通过对折叠波导的理论分析,提出一种快速设计折叠波导慢波结构的方法。优化设计了中心频率为 0.22 THz 的折叠波导慢波结构,分析了结构参数对高频特性的影响。为防止振荡, 仿真中采用截断的慢波结构。互作用仿真表明,在电子注电压为 16 kV,电流为 10 mA 情况下,中心频率处增益为 23.9 dB,输出功率为 1.2 W。其中 3 dB 带宽大于 14 GHz(0.214 THz~0.228 THz),带内输出功率大于 0.5 W,在 7 GHz(0.217 THz~0.224 THz)范围内输出功率大于 1 W。

关键词:折叠波导;慢波结构;仿真;太赫兹

中图分类号: TN124 文献标识码: A doi: 10.11805/TKYDA201401.0014

Design of slow-wave structure for 0.22 THz broadband folded waveguide

WANG Ya-jun^{a,b}, YAN Sheng-mei^{a,b}, CHEN Zhang^{a,b}

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

Abstract: A fast design method of slow-wave structure for 0.22 THz broadband folded waveguide is developed through theoretical analysis of folded waveguide, and the influences of structure parameters on the high-frequency characteristics is analyzed. In order to prevent oscillation in simulations, a truncated slow-wave structure is adopted. Interaction simulations show that the nonlinear gain is 23.9 dB and the output power is 1.2 W at 0.22 THz where the beam voltage and current are 16 kV and 10 mA, respectively. The 3 dB bandwidth is about 14 GHz(0.214 THz-0.228 THz), and the intraband output power is higher than 0.5 W, while it is higher than 1W from 0.217 THz to 0.224 THz.

Key words: folded waveguide; slow-wave structure; simulation; terahertz

太赫兹(THz)是指频率在 0.1 THz~10 THz(波长在 3 μm~3 mm)之间的电磁波,介于毫米波和红外之间。由于 其特殊的优点,使它在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文、卫星通信和军用雷达等方面具有重大的科学 价值和广阔的应用前景。太赫兹波的其中一个优点是宽带性,太赫兹辐射的频带宽度是微波的 1 000 倍,是很好 的宽带信息载体,它比微波的带宽和信道数多得多,特别适合用作卫星间、星地间及局域网的宽带无线通信。当 载波频率在 300 GHz 以上,THz 信号源具有 10%的带宽时,将能够实现>10 GB/s 的高速无线通信^[1]。因此,作为 THz 源的研究,一方面需要尽量提高其输出功率,另一方面也需要不断增大其工作带宽。折叠波导行波管是一种 极具发展潜力的 THz 器件,许多研究机构开展了对太赫兹折叠波导行波管放大器和振荡器的研究工作^[2-12]。折叠 波导慢波结构为全金属结构,具有散热能力强,输入输出耦合简单,高频损耗小等优点。由于其结构为弯曲的矩 形波导,色散较为平坦,合理选取中心频率与波导截止频率之比 *folf*。和波导宽边,冷带宽可达 37%^[13]。本文从 折叠波导结构基本理论出发,提出了一种快速设计折叠波导结构参数的方法。通过分析结构参数对高频特性的影 响,在考虑现有工艺条件下,优化设计出中心工作频率为 0.22 THz, 3 dB 带宽大于 14 GHz,带内增益大于 20 dB, 带内输出功率大于 500 mW 的折叠波导慢波结构。

1 理论设计

图 1 是折叠波导结构示意图,它由 E 面弯曲的矩形波导和穿过波导宽边的电子注通道构成。其中, a 和 b 分别是波导的宽边和窄边, h 为直波导的长度, r_c为电子注通道半径, R_{avg}为波导 E 面弯曲的平均半径, p 为折叠 波导的半周期长度。

第1期

假设折叠波导慢波结构中传输的电磁场为 TE10模式, 而且在传输过程中,模式一直保持很好。理论计算可得零 次空间谐波的色散关系为:

$$\phi^{2} = \omega_{c}^{2} + \frac{1}{L^{2} \mu_{0} \varepsilon_{0}} (\phi - \pi)^{2}$$
(1)

式(1)可以变换为:

$$\frac{L}{a} = \frac{\left(\frac{\phi}{\pi} - 1\right)}{\sqrt{\left(f / f_{\rm c}\right)^2 - 1}} \tag{2}$$

式中: $\omega=2\pi f$ 为角频率; $\omega_c=2\pi f_c$ 为截止角频率,f为频率; $L=h+\pi p/2$; $\phi=\beta_0 p$ 为半周期的相移, β_0 为传播常数; μ_0 为 真空磁导率; ε_0 为真空介电常数。

在中心频率 $\omega = \omega_0 \psi$,零次空间谐波的传播常数 $\beta_0 \omega$ 该等于电子注慢空间电荷波的传播常数:

$$\beta_{\rm e} + \beta_{\rm g} = \beta_0 \tag{3}$$

式中: $\beta_q = \omega_q/v_0$; $\beta_e = \omega/v_0$; $\omega_q^2 = \rho_0 e/\varepsilon_0 m$ 为等离子体角频率, $\rho_0 = J/v_0$ 为电子电荷密度, $J = I/\pi r_0^2$ 为电流密度, v_0 为电 子速度, e 是电子电量, m 是电子质量, r₀是电子注半径。在 THz 频段, 由于折叠波导结构尺寸和电子注通道直 径都较小,受电子枪面积压缩比的限制,电子枪发射电流较小,一般在毫安到几十毫安量级,由此可以得到 ω_a 远远小于 ω_0 , 由此忽略 β_a , 得到:

$$\beta_{\rm e} = \beta_0 \tag{4}$$

以上的近似,避免了像文献[14]和文献[15]的设计方法中需要首先给定工作电流,同时对最后的结构参数的 影响基本可以忽略。而对于折叠波导行波管的工作电流,需要兼顾电子枪能够达到的水平和设计指标来选择。 考虑到相对论效应,当工作电压为 U₀(单位为 kV)时,电子的速度 v₀为:

$$v_{0} = \frac{1}{\sqrt{\mu_{0}\varepsilon_{0}}} \sqrt{1 - \left(\frac{511}{511 + U_{0}}\right)}$$
(5)

对于折叠波导的耦合阻抗 K_c,可以表示为:

$$K_{\rm c} = Z_0 \left[\frac{1}{\beta_0 p} \frac{\sin(\beta_0 b/2)}{\beta_0 b/2} \right]^2$$
(6)

式中 Z₀是矩阵波导特征阻抗。对 b 求导,得到耦合阻抗取最大值的关系为:

$$\beta_0 b = 2.3311$$
 (7)

由此,得到公式(2)、公式(4~5)和公式(7)。一般情况下,折叠波导的中心工作点的相移为 1.5 左右。当 fo/f。 取值为 1.25 时,同时兼顾了增益和带宽^[16],但为了提高其耦合阻抗,常常降低其比值。由此,可通过适当选取 工作电压、中心工作点的相移 ϕ 和 f_0/f_c 的比值来获得结构参数 a,h 和 p_c 而窄边 b 则通过使耦合阻抗最大来获得, 当频带要求较宽时,可适当减小b值。最后,只剩下电子注通道尺寸r。尚未明确。文献[17]讨论了电子注通道尺 寸对增益的影响,给出了一个范围为 r_e/b=0.25~0.5。由此,可通过给定基本参数:工作电压、中心频率相移和 f₀/f_e 比值,来获得折叠波导的初始结构参数。

表 1 是设计的 0.22 THz 折叠波导结构参数增加 5 μm 后,在中心频率和±5 GHz 带宽范围高频特性的变化, 其中负数表示相对于原设计值有所降低。从表中可看出,折叠波导结构的宽边 a 和周期 p 对相速影响最大。增大 a将使色散曲线更平坦,但耦合阻抗会降低。因此,在 a的选择及设计方法中 f₀/f_c值必须兼顾色散和耦合阻抗。 增大 p 将使相速和耦合阻抗增大,从而会增大工作电压,但带内色散曲线不平坦度也会增大,带宽会变窄。直波 导长度 h 的增大会引起相速降低,从而降低工作电压,但带内色散平坦度降低,耦合阻抗也有所降低。对于 h 的取值,在考虑工作电压的情况下,也受到其尺寸必须大于折叠波导电子注通道直径的限制。折叠波导窄边 b 对色散和耦合阻抗都较小,对衰减的影响较大。电子注通道半径 r。的增大会使耦合阻抗减小,衰减增大,同时 带内色散不平坦度增大,但当通道半径变小,总电流不变时,电子注电流密度增大,空间电荷力进一步增强,难 以聚焦。因此,对于 r。的选择必须兼顾总电流密度及电子注通过率。图 2 和图 3 是优化设计的 0.22 THz 折叠波 导结构的色散特性和耦合阻抗。



太赫兹科学与电子信息学报

		initial	<i>a</i> +5 μm	<i>b</i> +5 μm	<i>h</i> +5 μm	<i>p</i> +5 μm	r _c +5 μm
central frequency f_0	phase velocity	$V_{\rm pc0}$	-0.503 1%	0.041 9%	-0.293 5%	1.635 2%	0.125 8%
	interaction impedance	K_{c0}	-5.458 3%	0.249 1%	-1.962 9%	4.544 8%	-11.150 5%
	circuit attenuation(dB/p)	α_0	-1.624 1%	-2.784 2%	0.928 1%	0.928 1%	1.160 1%
$f_0 \pm 5 \text{ GHz}$	$(V_{\rm pl} - V_{\rm ph})/V_{\rm p0}$	0.922.4%	0.800.7%	0.922.0%	0.967.2%	0.990.1%	1.005.0%





2 注波互作用分析

根据前面的高频特性分析,所设计的 0.22 THz 折叠波导慢波结构的工作电压为 16 kV 左右。由此,采用 CST 的 PS 工作室对折叠波导结构进行注波互作用分析,建立的仿真模型见图 4。在驻波互作用分析中,聚焦磁场为 0.35 T,考虑到粗糙度的影响,金属电导率为 2.2×10⁷ Simens/m。对于电子注电流的选择,考虑到阴极电流发射 密度为 4 A/cm²,电子枪面积压缩比为 36,电子注填充比在 50%的情况下,电子注电流确定为 10 mA。

首先,建立了无截断的 100 个周期的仿真模型,见图 4(a)。通过注波互作用分析,在 0.22 THz 中心频率处, 在输入功率为 5 mW 的情况下,输出功率为 2 W,增益为 26 dB,但是输入端口的反射功率逐渐增大,从图 5 可 以看出,反射功率不断增大,已经超过了输入功率幅值,这会引起行波管的振荡,从而不能稳定工作。因此,需 要在折叠波导结构中加入集中衰减器或是截断。图 4(b)是具有截断的仿真模型,其中截断的位置设置为端口,两 段的长度均为 50 个周期。从图 6 可以看出,反射信号在 1 ns 后保持稳定,其幅值远远小于输入信号幅值,从而 行波管可稳定工作。

图 7 给出了输入输出信号和端口 2 的傅里叶变换图,在 0.17 THz~0.27 THz 的频率范围内,只有一个频率点 0.22 THz,说明输出信号的频谱特性良好。其中,在第一段慢波线中的增益值为 10.6 dB,在电子注通过截断区 后,迅速在折叠波导中激励其高频场,在输出端行波管的总增益为 23.9 dB。相比于没有截断的结构,其增益有 所降低,这主要是由于互作用长度还不够。截断的加入,理论上不会影响行波管的饱和增益,但饱和长度会有所 增加,因此在行波管未达到饱和时,相同长度的慢波结构,具有截断结构相比于没有截断的慢波,其输出增益会 降低。图 8 是输入功率为 5 mW 情况下,增益和输出功率随频率的变化关系。从图中可看出,其 3 dB 带宽大于 14 GHz(0.214 THz~0.228 THz),增益大于 21 dB,带内输出功率大于 500 mW,在 7 GHz(0.217 THz~0.224 THz) 范围内输出功率大于 1 W。

3 结论

通过对折叠波导慢波结构的理论分析,提出了一套快速设计折叠波导结构的设计方法。该方法只需要给定工作电压、中心频率相移和 *folf*。比值,就可获得折叠波导的初始结构参数,而不需要预先给定工作电流。分析了各结构参数对高频特性的影响,从而可针对性的开展优化设计。互作用仿真分析表明,无截断的折叠波导结构反射功率过大,容易引起振荡。因此,采用了截断的两段慢波电路仿真模型。在电子注电压为 16 kV,电流为 10 mA 情况下,在 0.22 THz 增益为 23.9 dB,输出功率为 1.2 W。3 dB 带宽大于 14 GHz(0.214 THz~0.228 THz),带内输出功率大于 0.5 W,在 7 GHz(0.217 THz~0.224 THz)范围内输出功率大于 1 W。但在仿真中,将截断设置在慢波电路的中间,没有对截断位置和截断长度进行优化,这是下一步仿真中需要进一步研究的问题。



参考文献:

- Bhattacharjee S,Booske J H,Kory C L,et al. Folded Waveguide Traveling-Wave Tube Sources for Terahertz Radiation[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2004,32(3):1002-1014.
- [2] Wang Yajun, Chen Zhang. Investigation of 0.14 THz Folded Waveguide TWT[C]// 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Paris, French: [s.n.], 2013.
- [3] 董烨,董志伟,杨温渊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管放大器理论分析与数值模拟[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(3):313-319. (DONG Ye,DONG Zhiwei,YANG Wenyuan, et al. Theoretical analysis and numerical study of 0.22 THz FWG-TWT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(3):313-319.)
- [4] Gong Yubin, Yin Hairong, Yue Lingna, et al. A 140-GHz Two-Beam Overmoded Folded-Waveguide Traveling-Wave Tube[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2011,39(3):847-851.
- [5] 高鹏,Booske John H,杨中海,等. 太赫兹折叠波导行波管再生反馈振荡器非线性理论与模拟[J]. 物理学报, 2010,59 (12):8484-8489. (GAO Peng,Booske John H,YANG Zhonghai, et al. Physics and simulation of terahertz folded waveguide traveling wave tube regenerative feedback oscillators[J]. ACTA PHYSICA SINICA, 2010,59(12):8484-8489.)
- [6] He Jun, Wei Yanyu, Gong Yubin, et al. Investigation on a W Band Ridge-Loaded Folded Waveguide TWT[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2011,39(8):1660-1664.

18	太赫兹科学与电子信息学报 第 12 卷	
[7]	CAI Jun, FENG Jinjun, HU Yinfu, et al. Development of W-band Folded Waveguide pulsed TWT[C]// 2013 IEEE 14 InternationalVacuum Electronics Conference(IVEC). Paris, French: [s.n.], 2013.	rth
[8]	Kreischer E K, Tucek J C, Basten M A, et al. 220 GHz Power Amplifier Testing at Northrop Grumman[C]// 2013 IEEE 14 International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Paris, French: [s.n.], 2013.	4th
[9]	Tucek J C,Basten M A,Gallagher D A,et al. Testing of a 0.850 THz Vacuum Electronic Power Amplifier[C]// 2013 IEEE 14 International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Paris,French:[s.n.], 2013.	4th
[10]	Tucek J C,Basten M A,Gallagher D A,et al. A 100 mW,0.670 THz Power Module[C]// 2012 IEEE International Vacuu Electronics Conference(IVEC). Montery,USA:[s.n.], 2012:31-32.	ım
[11]	Tucek J C,Gallagher D A,Kreischer k A. Compact,High Power,0.65 THz Source[C]// 2008 IEEE International Vacuu Electronics Conference(IVEC), Montery,USA:[s,n.], 2008:16-17.	um
[12]	Joye C,Cook A,Calame J,et al. Demonstration of a High Power,Wideband 220 GHz Serpentine Waveguide Amplifier Fabricat by UV-LIGA[C]// 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference(IVEC) Paris French:[s n] 2013	ted
[13]	Ha HyunJun, Jung SoonShin, Park GunSik. Theoretical Study for Folded Waveguide Traveling Wave Tube[J]. Internation Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1998, 19(9):1229-1245.	ıal
[14]	Han S T,Kim J I,Park G S. Design of a folded waveguide traveling-wave tube[J]. Microwave and Optical Technology Lette 2003,38(2):161-165.	er,
[15]	Zhang Changqing,Gong Yubin. Analytical Exploration of Folded Waveguide Circuit Design for High-power Traveling-wa Tube Amplifier[J]. Journal of Infrared,Millimeter and Terahertz Waves, 2011,32(4):407-417.	ve
[16]	Dohler G,Gagne D,Gallagher D,et al. Serpentine Waveguide TWT[C]// 1987 IEEE International Electron Devices Meetir 1987,33:485-488.	ıg.
[17]	Stuart R A, Wright C C, Al-Shamma'a A I, et al. The dimensions of the Electron beam Tunnel in a Folded waveguide TWT[C IRMMW-THz. Piscataway, N.J.:[s.n.], 2005,2:545-546.]//
作者	简介:	



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.email:yjwang01@163.com. **颜胜美**(1979-),男,湖南省娄底市人,在读博士研究生,主要研究方向为大功率太赫兹真空 电子器件研究.

陈 樟(1982-),男,四川省开江县人,博士,助理研究员,主要研究方向为太赫兹微纳电子学器件.

湘潭大学研制成功国内首款石油勘探用 MEMS 加速度传感器伺服电路 SOC 芯片

湘潭大学金湘亮教授课题组在 MEMS 加速度传感器伺服电路信号处理芯片关键技术研发上取得突破性进展,在国内首次研制成功面向石油勘探 MEMS 加速度传感器伺服电路 SOC 芯片。该芯片研究了高性能数字地震检波器的特征,建立了 5 阶数字闭环模型,特别是解决了高阶 Σ-Δ系统稳定性问题,实现高动态范围;芯片集成 多模式信号、过载恢复与控制、系统休眠与瞬时启动以及 I2C 通讯协议等功能,测试结果表明芯片达到设计目标。 本项目是面向国家应用重要需求而开展的专项研究,对提升国内装备制造水平和石油勘探行业的技术水平具有重要的社会和经济意义。