

文章编号: 2095-4980(2018)04-0571-05

## G 波段双注折叠波导行波管的注-波相互作用特性

高鹏鹏<sup>1,2</sup>, 张兆传<sup>1</sup>, 刘文鑫<sup>1</sup>, 马同礼<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 电子学研究所 高功率微波源与技术重点实验室, 北京 101407;

2.中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

**摘要:** 研究了 G 波段双注折叠波导(FWG)TE<sub>20</sub>模的基本特性。首先计算了双注 FWG TE<sub>20</sub>模的高频特性, 采用等效电路法计算了色散特性; 根据定义式计算了耦合阻抗, 同时将二者的计算结果与 HFSS 仿真结果进行对比。结果显示, 色散特性随频率升高差距增大, 耦合阻抗随频率升高差距降低。利用电磁仿真技术(CST)粒子模拟软件对双注 FWG TE<sub>20</sub>模的注-波相互作用情况进行仿真, 得到了慢波结构中电子轨迹以及输入输出信号频谱图, 结果表明, 在工作频率为 205 GHz 时, 四段 FWG 的增益为 34.74 dB。

**关键词:** 太赫兹; 双注折叠波导; 行波管; 注-波相互作用

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0571

## Beam-wave interaction characteristics of G-band two-beam Folded Waveguide Traveling Wave Tube

GAO Pengpeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhaochuan<sup>1</sup>, LIU Wenxin<sup>1</sup>, MA Tongli<sup>1,2</sup>

(1.China Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The basic characteristics of the G-band two-beam Folded Waveguide(FWG) TE<sub>20</sub> mode are investigated. Firstly, the high frequency characteristics of two-beam FWG TE<sub>20</sub> mode are calculated. The dispersion characteristic is calculated by the equivalent circuit method. The coupling impedance is calculated according to the definition. The results are compared with the HFSS simulation results. The results show that the dispersion characteristics differ more greatly as the frequency increases, and the coupling impedance decreases as the frequency increases. Then, the Computer Simulation Technology(CST) particle simulation software is utilized to simulate the beam-wave interaction of the FWG, the electron trajectory and the input and output signal spectrum in the slow wave structure are obtained. The results show that at the operating frequency of 205 GHz, the gain of four-part FWG is 34.74 dB.

**Keywords:** terahertz; two-beam Folded Waveguide; Traveling Wave Tube(TWT); beam-wave interaction

太赫兹波位于电磁波谱中微波和红外之间, 频率范围为 0.1~10 THz。由于位于过渡区域, 太赫兹波表现出不同于其他电磁辐射的特殊性能, 其在公共安全、环境监测、生物医学、军事领域等方面有广泛的用途<sup>[1]</sup>。折叠波导(FWG)是近年来发展起来的一种新型慢波结构, 其具有全金属的结构, 功率容量大、散热性能好。此外, FWG 高频传输损耗小, 耦合匹配容易。由于在太赫兹频段的这些优势, FWG 受到国内外的广泛关注, 围绕其展开了大量的理论与实验研究<sup>[2-3]</sup>。美国 Northrop Grumman、Naval Research Laboratory 等公司在提高 FWG 增益方面做了大量工作, 电子科技大学提出了多种变形结构的 FWG 行波管来提高输出功率。国内外现阶段研究大都集中于 FWG 基模工作方面, 对高次模工作的 FWG 结构研究较少。为了提高 FWG 的输出功率, 本文在双注 FWG 基模工作的基础上, 将工作模式提高到 TE<sub>20</sub>模, 增大了慢波结构的尺寸, 利于加工。采用基模工作时慢波结构尺寸, 对其宽边放大得到工作于 TE<sub>20</sub>模时的慢波结构尺寸, 利用高频仿真软件对该结构的高频特性以及注-波相互作用情况进行了分析。

## 1 双注 FWG 慢波结构的高频特性

慢波结构是行波管中相互作用的关键结构, 为了保证电子流与电磁波有效的相互作用, 应满足 2 个条件: 一是速度同步条件; 二是在相互作用间隙处波场的纵向分量越强越好。其中, 第一个条件由电磁波的相速与频率关系的色散特性来确定, 第二个条件由电子流与波的耦合阻抗来表征<sup>[4]</sup>。下面分别计算双注 FWG 高次模的这 2 个参量。

### 1.1 色散特性

色散的本质是电磁波在介质中的传播速度随频率变化的特性。对于横向加载的双注 FWG 电路, 可以将一个相互作用周期分为 4 个部分, 分别是波导的弯曲部分、弯曲部分和直波导的交界、直波导部分和电子注部分。每一部分均可等效为独立传输单元, 然后令级联传输矩阵和单周期 FWG 传输矩阵相等, 即可确定波导的色散特性<sup>[4-6]</sup>。其等效部分如图 1 所示。

将 FWG 看成传输线而构造的等效传输矩阵为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & jZ \sin(\kappa) \\ jY \sin(\kappa) & \cos(\kappa) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\kappa = \beta p$  为周期波导的相位变化,  $\beta$  为相位常数,  $p$  为相互作用周期常数;  $Z$  和  $Y$  分别为电路的阻抗和导纳。

各部分等效情况为: 弯曲波导 A 可以看成一段长为  $l_1$ 、特性阻抗为  $Z_1$  的均匀传输线; 直波导 C 可以看成一段长为  $l_0$ 、特性阻抗为  $Z_0$  的均匀传输线; 对于弯曲波导与直波导连接部分 B 段, 可用一个等效电抗  $X_1$  来表示<sup>[7-8]</sup>。各部分参数关系为<sup>[9]</sup>:

$$Z_0 = \frac{2b}{a} \frac{\eta_0}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} \quad (2)$$

$$\frac{Z_1}{Z_0} = 1 + \frac{1}{12} \left( \frac{b}{R} \right)^2 \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{5} \left( \frac{2\pi b}{\lambda_g} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\frac{X_1}{Z_0} = \frac{32}{\pi^7} \left( \frac{2\pi b}{\lambda_g} \right)^3 \left( \frac{b}{R} \right)^2 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sqrt{1 - \left( \frac{2b}{n\lambda_g} \right)^2} \quad (4)$$

式中:  $a$  为双注 FWG 宽边;  $b$  为双注 FWG 窄边;  $\eta_0$  为自由空间波阻抗;  $R$  为弯曲波导中心半径;  $\lambda$  为自由空间的波长;  $\lambda_c$  为 TE<sub>20</sub> 模截止波长;  $\lambda_g$  为 FWG 直波导部分的导波波长。

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} \quad (5)$$

FWG 弯曲部分的导波波长  $\lambda'_g$  为:

$$\lambda'_g = \lambda_g \xi \quad (6)$$

$$\xi \approx 1 - \frac{1}{12} \left( \frac{b}{R} \right)^2 \left[ -\frac{1}{2} + \frac{1}{5} \left( \frac{2\pi b}{\lambda_g} \right)^2 \right] \quad (7)$$

对于电子注部分, 同时考虑 2 个电子注通道的影响, 图 1 中的电路是 2 个电子注并联后的结果<sup>[10]</sup>, 等效为一阻抗  $X_2$ , 取值如下:

$$\frac{X_2}{Z_0} = \frac{1}{8\pi^2} k_0 b \left( \frac{D}{a} \right)^3 \left( \frac{a}{b} \right)^2 \quad (8)$$

式中  $D=2r_c$ , 为电子注直径。FWG 4 部分(A,B,C,D)的传输矩阵为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos(k_1 l_1 / 2) & jZ_1 \sin(k_1 l_1 / 2) \\ j \frac{1}{Z_1} \sin(k_1 l_1 / 2) & \cos(k_1 l_1 / 2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & -jX_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

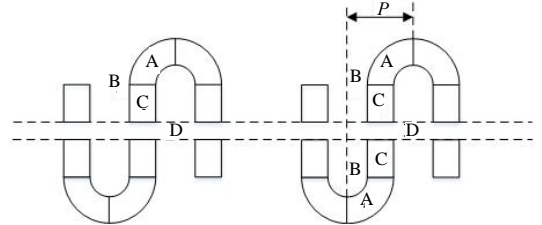


Fig.1 Equivalent model of FWG  
图 1 FWG 等效模型

$$C = \begin{bmatrix} \cos(k_0 l_0/2) & jZ_0 \sin(k_0 l_0/2) \\ j\frac{1}{Z_0} \sin(k_0 l_0/2) & \cos(k_0 l_0/2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中  $k_0$  和  $k_i$  分别为直波导和弯曲波导中的相位常数, 可通过直波导中波长  $\lambda_g$  和弯曲波导波长  $\lambda'_g$  求得。

$$D_x = \begin{bmatrix} 1 & -jX_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$F = ABCD_x CBA \quad (13)$$

选取参数如表 1 所示<sup>[11]</sup>,  $d$  为双注中心间距,  $r_c$  为电子注通道半径,  $p$  为半周期长度,  $h$  为直波导高度,  $r_b$  为电子注半径。将公式(9)、(10)、(11)、(12)代入式(13), 得到 TE<sub>20</sub> 模的色散曲线, 同时引入 HFSS 计算结果, 将二者进行对比, 结果如图 2 所示。

从图 2 可得出, 等效电路法与 HFSS 仿真计算的下截止频率相同, 但随频率升高差距增大。由于等效电路计算中对双电子注通道只是简单并联处理, 没有考虑双注位置对波导的影响, 随频率升高, 双注间距对波导影响增加, 误差增大。此外, 工作于 TE<sub>20</sub> 模时, 波导内部将产生模式竞争, 等效电路法自身产生一定误差。

### 1.2 耦合阻抗

耦合阻抗是表征电子注与微波信号相互作用强度的重要参量, 假定双注 FWG 中传输 TE<sub>20</sub> 模, 利用耦合阻抗的计算公式:

$$K_n = \frac{|E_{zn}|^2}{2\beta_n^2 P_w} \quad (14)$$

式中:  $E_{zn}$  为  $n$  次空间谐波的电场轴向分量;  $\beta_n$  为  $n$  次空间谐波的相位常数;  $P_w$  为波导中 TE<sub>20</sub> 模的传输功率。利用轴向电场分量计算公式以及矩形波导中 TE<sub>20</sub> 模功率计算方法, 可以得到第  $n$  次空间谐波的耦合阻抗为:

$$K_n = \frac{\eta}{\sqrt{1-\omega_c^2/\omega^2}} \cdot \frac{2b}{a} \left( \frac{1}{\beta_n p} \cdot \frac{\sin(\beta_n b/2)}{\beta_n b/2} \right)^2 \quad (15)$$

式中  $\eta$  为媒质的固有阻抗。

零次空间谐波修正后的耦合阻抗<sup>[12]</sup>:

$$K_{c0} = \frac{K_0}{I_0^2(\tau r_c)} \quad (16)$$

式中:  $\tau^2 = \beta_0^2 - k^2$ ;  $I_0$  为零阶修正贝塞尔函数;  $\omega_c$  为 TE<sub>20</sub> 模截止频率。

根据上述关系, 参数设置与表 1 相同, 得到 TE<sub>20</sub> 模耦合阻抗, 同时引入 HFSS 仿真结果, 将二者进行对比, 结果如图 3 所示。从图 3 可得出, 二者计算的耦合阻抗均随频率的增大而减少, 但 HFSS 仿真结果都小于理论计算结果。由于理论计算未考虑电子注通道位置的影响, 以及工作在高次模时模式竞争问题, 结构理想化, 故耦合阻抗较大。

## 2 注-波相互作用的 CST 仿真

本节利用 CST 软件对双注 FWG TE<sub>20</sub> 模的注-波相互作用过程进行模拟<sup>[12]</sup>, FWG 采用横向加载双电子注的方式。由于工作在 TE<sub>20</sub> 模, 波导内部反射和端口反射比工作在基模时更大, 所以利用截断的方法来抑制反射, 兼顾输出功率的大小, 本节中采用的波导结构有 4 段结构, 其结构如图 4 所示。

表 1 双注 FWG 结构参数(mm)

Table1 Structural parameters of two-beam FWG(size/mm)

parameter	size	parameter	size
$a$	1.66	$b$	0.12
$d$	0.83	$r_c$	0.06
$p$	0.24	$h$	0.20
$r_b$	0.04		

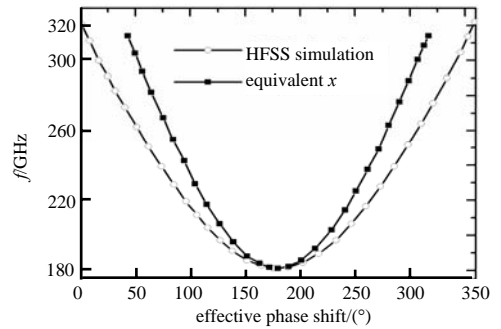


Fig.2 Dispersion curves  
图 2 色散曲线

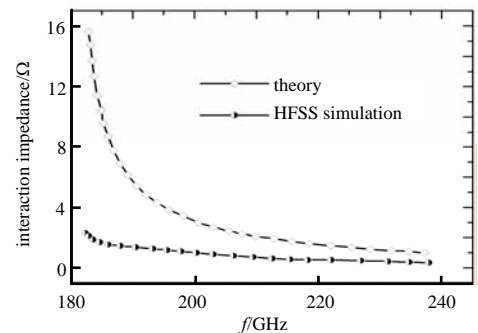


Fig.3 Coupling impedance  
图 3 耦合阻抗

该结构参数与表 1 相同,各段周期数分别为 12,12,15,15,单个电子注电流为 100 mA,电子注电压为 15.7 kV,输入信号为 25 mW 的 205 GHz 正弦波连续信号。利用 CST PIC 粒子模拟软件进行仿真,得到粒子轨迹图与输入输出信号频谱图。

图 5 为第 10 ns 时第 4 段结构的电子轨迹图。在结构末端有明显的电子群聚现象,电子交出能量,微波信号得到能量而被放大。

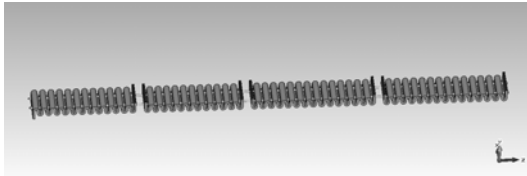


Fig.4 Structure of FWG  
图 4 FWG 结构

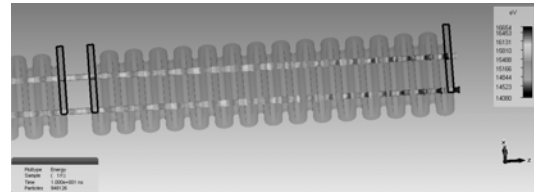


Fig.5 Electronic trajectory  
图 5 电子轨迹图

图 6 为信号频谱图,可以看出,经过 54 个周期的放大,在 205 GHz 处,输入功率由 25 mW 放大到 75.46 W,增益为 34.74 dB。该结构输出功率稳定,反射功率较小,基模  $TE_{10}$  模被抑制,波导内主要传输  $TE_{20}$  模。

### 3 结论

本文对 G 波段双注 FWG 慢波结构的高频特性和注-波相互作用特性进行了研究。在高频特性方面,分别介绍了色散特性和耦合阻抗 2 个重要参量的计算方法,同时将其计算结果与 HFSS 仿真结果进行了对比。结果显示,色散特性随频率升高差距增大,耦合阻抗随频率升高差距降低。在注-波相互作用方面,利用 CST 粒子工作室对 4 段双注 FWG 慢波结构进行了仿真。结果发现,在工作频率为 205 GHz 时,该结构输出功率为 75.46 W,增益为 34.74 dB,  $TE_{20}$  模输出功率稳定,电子注有明显群聚现象。

#### 参考文献:

- [1] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报, 2010,22(6):703-707. (YAO Jianquan. Introduction of THz wave and its applications[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2010,22(6):703-707.)
- [2] 董焯,董志伟,杨温渊,等. 0.22 THz FWG 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 Wenyan,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.)
- [3] 冯进军,蔡军,胡银富,等. FWG 慢波结构太赫兹真空器件研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009,4(3):249-254. (FENG Jinjun,CAI Jun,HU Yinfu,et al. THz vacuum electronics devices using folded waveguide slow wave structure[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009,4(3):249-254.)
- [4] 程兆华. THz 器件中的 FWG 线路传输特性的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2006. (CHENG Zhaohua. Research on transmission characteristics of folded waveguide in THz device[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2006.)
- [5] 刘顺康,周彩玉,包正强. FWG 慢波电路的传输特性[J]. 真空电子技术, 2002(4):39-43. (LIU Shunkang,ZHOU Caiyu,BAO Zhengqiang. Propagating characters for folded waveguide slow wave circuit[J]. Vacuum Electronics, 2002(4):39-43.)
- [6] 李科,刘文鑫,王勇,等. 太赫兹双电子注 FWG 色散特性的精确等效电路分析[C]// 中国电子学会真空电子学会学术年会. 黄山,安徽,中国:[s.n.], 2013:285-288. (LI Ke,LIU Wenxin,WANG Yong,et al. Accurate equivalent circuit analysis of dispersion characteristics of THz two-beam folded waveguide[C]// The Proceedings of the 19th Annual Conference of the Institute of Vacuum Electronics of the Chinese Society of Electronics. Huangshan,Anhui,China:[s.n.], 2013:285-288.)
- [7] BOOSKE J H,CONVERSE M C,GALLAGHER D A,et al. Parametric modeling of folded waveguide circuits for millimeter-wave traveling wave tubes[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005,52(5):685-694.
- [8] HA H J,JUNG S S,PARK G S. Theoretical study for folded waveguide traveling wave tube[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 1998,19(9):1229-1245.

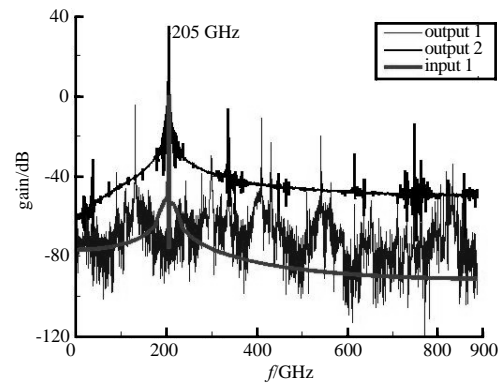


Fig.6 Signal spectrum  
图 6 信号频谱图

- [9] MARCUVITZ N. Waveguide handbook[M]. Stevenage,UK:Peregrinus, 1986.
- [10] 颜胜美. 多注太赫兹 FWG 行波管技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2015. (YAN Shengmei. Study on traveling wave technology of multi-beam THz folded waveguide[D]. Mianyang,China:Chinese Academy of Engineering Physics, 2015.)
- [11] 张长青. 大功率毫米波 FWG 行波管的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (ZHANG Changqing. Investigation of the high-power millimeter wave folded waveguide traveling-wave tube[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [12] 李科. 基于 FWG 慢波结构的双电子注太赫兹辐射源研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2016. (LI Ke. Investigation of the terahertz resource based on two-beam fold waveguide slow wave structure[D]. Beijing,China:University of Chinese Academy of Sciences, 2016.)

#### 作者简介:



高鹏鹏(1993-), 男, 陕西省延安市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹 FWG 行波放大器 .email:gaopengpeng15@mails.ucas.ac.cn.

张兆传(1965-), 男, 江苏省沛县人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为高功率微波真空电子器件与技术.

刘文鑫(1976-), 男, 湖南省衡阳市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为新型太赫兹源研究.

马同礼(1989-), 男, 河南省新乡市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为微波电真空器件电子光学系统.