

文章编号: 1672-2892(2011)03-0299-05

0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构与加工

陈 樟, 王亚军

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 使用一种显式方法对 0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构进行了快速设计, 并通过解析模型、等效电路模型以及电磁场仿真软件(CST MWS)对结构的色散关系和耦合阻抗进行了计算。计算结果表明, 0.14 THz 附近的色散较为平坦, 耦合阻抗在 $1\ \Omega$ 左右。为了满足大功率输出需求, 对初始结构尺寸进行了部分调整。CST PS 互作用模拟结果表明, 在 0.14 THz 附近, 输出功率大于 1 W。用微电火花(EDM)和微铣削方法分别进行了加工实验, 结果表明, 两种方法在尺寸精确度上均能满足指标要求, 微铣削加工能获得更平整、表面粗糙度更好的槽底。

关键词: 折叠波导; 行波管; 慢波结构; 微铣削; 微电火花

中图分类号: TN124

文献标识码: A

Design and manufacture of 0.14 THz folded waveguide traveling wave tube slow wave structure

CHEN Zhang, WANG Ya-jun

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: This study applied an explicit method to the fast structural design of the slow wave circuit in a 0.14 THz folded waveguide traveling wave tube. To valid the primary design, cold-circuit properties, such as dispersion and interaction impedance, were calculated by using both theoretical method and electromagnetic software(CST MWS) simulation. Simulation results showed that, the dispersion curve was almost flat around 0.14 THz, and the interaction impedance was about $1\ \Omega$. In order to satisfy high output power demand, some changes were made. Interactive simulation by CST Particle Studio was found that modified structure could achieve more than 1 W output power around 0.14 THz. Micro Electrical Discharge Machining(EDM) and Micro milling were used for manufacturing a couple of period of the structure, respectively. It is found that both methods could satisfy the size accuracy, however, micro milling could obtain flatter surface and better surface roughness at the bottom.

Key words: folded waveguide; traveling wave tubes; slow wave structure; micro milling; micro EDM

太赫兹频段介于微波与光波之间, 通常是指波长介于 $30\ \mu\text{m}$ ~ $3\ \text{mm}$ 范围内的电磁波。此频段的电磁波在高速率通信、先进电子材料光谱、空间研究、医学、生物、侦察和远程感知等方面有着广泛的潜在应用^[1]。由于缺乏大功率(0.01 W CW~10 W CW)、高效率(1%)、捷变频(瞬时带宽大于 1%)以及紧凑可靠的太赫兹辐射源^[2], 太赫兹波在很长时间内一直未得到人类的有效开发。折叠波导行波管具有结构相对简单, 设计加工相对容易以及有较大带宽和较高功率容量等优点^[3], 因此成为目前极具应用前景的短厘米波段、毫米波段以及 THz 波段宽带大功率行波管。0.14 THz 是重要的太赫兹频段, 因为它不仅具有传输速率高、方向性好、安全性高、散射小及穿透性好等许多特性, 而且正好是大气窗口之一, 在物体成像、环境监测、军事和通信、医学和生物等领域有着非常重要的战略地位^[4], 因此, 发展 0.14 THz 的太赫兹辐射源已成为各发达国家研究的热点。慢波结构作为注波相互作用场所, 其质量好坏直接决定微真空电子器件的性能, 因此被认为是最重要的行波管组件^[5]。目前已经有不少文献介绍了分析色散和耦合阻抗的解析方法^[6-9], 但只有 Han^[10]和 Malek^[11]介绍了如何设计慢波结构的初始尺寸。本文主要利用 Han 的显式方法进行 0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构的理论设计与仿真模拟, 以及对其进行微电火

收稿日期: 2011-03-13; 修回日期: 2011-04-15

基金项目: 中国工程物理研究院 909 科技专项资助项目(9090502-2)

花、微铣削加工的实验情况进行介绍。

1 折叠波导慢波结构设计方法

曲折波导慢波结构中的注-波相互作用线路如图 1(a)所示。假设 TE₁₀ 模式在曲折波导中沿弯曲路径 z' 传播, 如图中虚线所示; 电子注沿着 z 轴方向的通道前进; 并且在传输过程中, TE₁₀ 模式的结构没有发生变化。

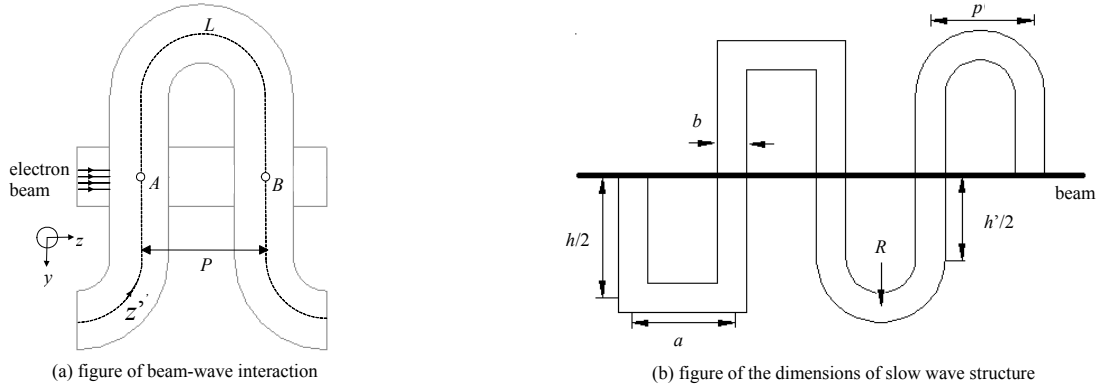


Fig.1 Schematic diagram of slow wave structure

图 1 慢波结构示意图

该结构的各尺寸如图 1(b)所示: a 为波导宽边长度, b 为波导窄边长度, h 为直角波导直波导长度, h' 为蛇形波导直波导长度, p 为半周期轴向长度, L 为半周期弯曲长度。

根据 Han 的文章, 慢波结构的尺寸设计只需 5 个输入参数: 中心频率、工作电压、工作电流、电子注半径及空间谐波数。这几个参数可根据实际系统需求近似估计得到。

在中心频率 $\omega = \omega_0$ 处, 空间谐波的传播常数 β_m 应该与电子注中慢空间电荷波的传播常数 β_e 相匹配:

$$\beta_c = \beta_e + \beta_p = \frac{\omega + \omega_p}{v_b} = \beta_e \left(1 + \frac{\omega_p}{\omega} \right) = \beta_m \quad (1)$$

式中: ω_p 为等离子体角频率; v_b 为电子注速度。与此同时, 空间谐波的群速应该与慢空间电荷波的群速 v_{ss} 同步:

$$\frac{d\omega}{d\beta_m} = v_{ss} \quad (2)$$

经过一些代换, 可得:

$$\frac{h}{p} = -1 + \frac{\sqrt{1-x^2}}{(v_{ss}/c)} \quad (3)$$

$$p = \frac{(2m+1)\pi}{\beta_c x^2} \quad (4)$$

x 是截止频率与中心频率的比值, 考虑带宽和不发生振荡的要求, 一般取 0.8; c 是真空中光速。波导宽边 a 可由截止频率算出, 波导窄边 b 由使耦合阻抗最大化的条件关系算出。以上是直角波导慢波结构的计算方法, 为了减小波导直角转角处的反射和相速的变化, 最好采用蛇形波导。通过关系 $k_g(p+h) = k_{g\phi}\pi R + kh'$, 蛇形波导直边长度可得:

$$h' = \left(1 - \frac{\pi}{2\xi} \right) p + h \quad (5)$$

式中: $\xi \approx 1 - \frac{1}{12} \left(\frac{b}{R} \right) \left[-\frac{1}{2} + \frac{1}{5} (k_g b)^2 \right]$, $\frac{2b}{\lambda_g} < 1$, λ_g 为导波波长; k_g 为直波导的传播常数; $k_{g\phi}$ 为弯波导的传播常数; R 为弯波导的弯曲半径。

2 高频特性分析与模拟

2.1 解析模型

由于折叠波导慢波结构是一个周期结构, 高频线路参数可由半个周期的结构得到。色散关系解析模型中不考

考虑电子注通道的影响,并且将弯波导当成直波导处理。

第 m 次空间谐波的轴向相移为:

$$\beta_m p = \frac{2\pi L}{\lambda_g} + (2m+1)\pi, \quad m=0, \pm 1, \pm 2 \quad (6)$$

式中 λ_g 为导波波长。第 m 次空间谐波的无量纲相速为:

$$\frac{v_p}{c} = \left[\frac{cL}{fP\lambda_g} + \frac{(2m+1)c}{2fp} \right]^{-1} \quad (7)$$

耦合阻抗的解析表达式为:

$$K_{cm} = 376.7 \times \frac{(2b/a)}{\sqrt{\lambda/\lambda_g}} \left[\frac{1}{p\beta_m} \frac{\sin(\beta_m b/2)}{\beta_m b/2} \right]^2 \quad (8)$$

如果考虑电子注通道效应,耦合阻抗可表示为:

$$K'_{cm} = \frac{K_{cm}}{I_0^2(\tau r_c)} \quad (9)$$

$$\tau = \beta_m^2 - k^2 \quad (10)$$

式中: I_0 为变态贝塞尔函数; k 为自由空间波数; r_c 为电子注通道半径。

2.2 等效电路模型

慢波结构的不同部分可用不同的电路元件表示,如图2所示。直波导段可看成是特性阻抗为 Z_0 的均匀传输线,弯波导段可看成是特性阻抗为 Z_1 的传输线。直波导和弯波导的结合处看成值为 X_1 的电抗,电子注通道看成是值为 X_2 的电抗。将这些独立元件级联相乘,最终可得到慢波结构的色散方程。

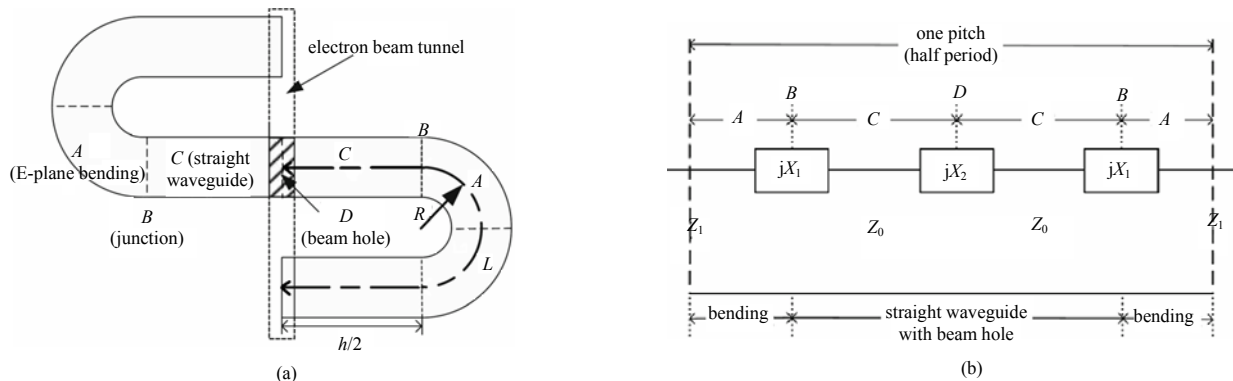


Fig.2 Equivalent circuit model of slow wave structure
图2 慢波结构等效电路模型

2.3 CST 仿真模型

建立一个周期的慢波结构,采用特征值模式求解器,可得到慢波结构色散曲线,根据耦合阻抗的定义表达式,通过 VBA 编程后处理得到耦合阻抗与频率的关系曲线。采用 CST 粒子模拟工作室,可以模拟驻波互作用过程。

3 慢波结构加工、结果与讨论

0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构的特征尺寸在亚毫米量级,处于介观尺度,常规精密加工和微加工对此尺度皆有些束手无策,目前,国际上也掀起了介观尺度加工的研究热潮。作者用微电火花和微铣削方法对慢波结构进行了加工实验。表1显示了输入参数以及设计得到的尺寸参数。

设计的慢波结构的色散曲线如图3所示。从图中可以看出,在中心频率附近,归一化相速基本为一常数。3种方法得到的曲线一致性较好,等效电路模型与 CST 模拟结果更为相符,这是由于等效

表1 输入参数与慢波结构设计尺寸

input parameters		designed results	
beam voltage/kV	10.8	half period/ μm	335
beam current/A	0.05	broad wall length/ μm	1 339
beam radius/ μm	100	narrow wall length/ μm	159
space harmonic number	0	straight part length/ μm	497
center frequency/THz	0.14		

电路模型考虑了 E 面弯曲和电子注通道效应, 这比解析模型要精确一些。

耦合阻抗与频率的关系曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 电子注通道对互作用阻抗有较大影响。考虑电子注通道效应的解析模型与 CST 模拟结果较为相符。在中心频率处, 耦合阻抗在 $1\ \Omega$ 左右。

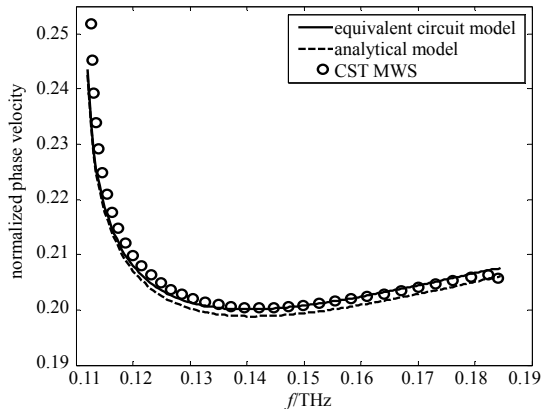


Fig.3 Dispersion curves
图 3 色散曲线

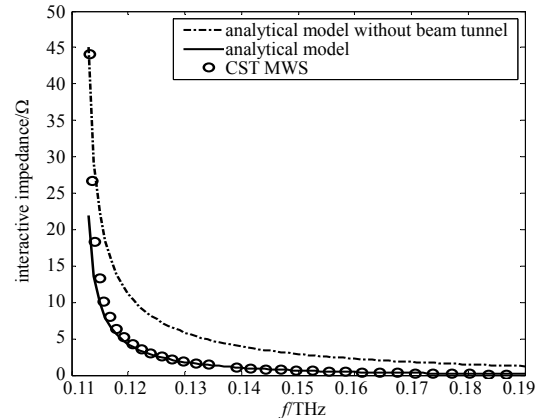


Fig.4 Interactive impedance curves
图 4 耦合阻抗曲线

为了得到较高的增益, 需要增加互作用耦合阻抗, 在初始设计结构基础上进行了一些调整。CST 粒子模拟相互作用过程后得到输出功率与频率的关系曲线如图 5 所示。从图中可以看出, 在中心频率处, 可获得大于 $1\ \text{W}$ 的输出功率。

微电火花加工后的照片如图 6 所示。经激光共聚焦显微镜测量, 其尺寸精确度小于 $2\ \mu\text{m}$, 加工后的槽底呈“U”字型, 槽底表面粗糙度为 $5\ \mu\text{m}$ 左右。微铣削加工后的照片如图 7 所示。经激光共聚焦显微镜测量, 其尺寸精确度小于 $5\ \mu\text{m}$, 槽底表面粗糙度小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 。

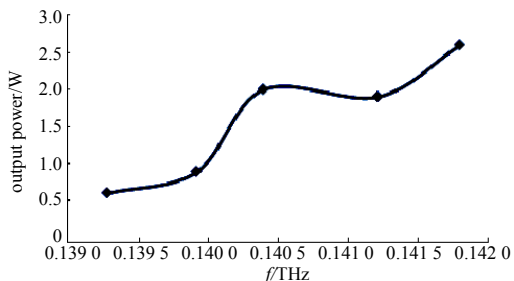


Fig.5 Curve of output power
图 5 输出功率曲线



Fig.6 Microscopic image of EDM
图 6 微电火花加工图片

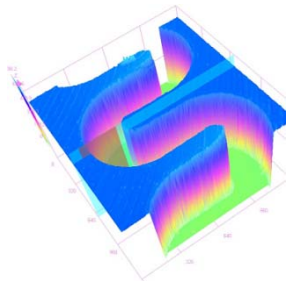


Fig.7 Image of micro milling
图 7 微铣削加工图片

4 结论

本文介绍的方法可以用于 $0.14\ \text{THz}$ 折叠波导行波管慢波结构的快速、初始设计, 在此基础上可根据实际加工条件和需求, 进行尺寸调整优化。仿真优化后的结构, 得到了 $2\ \text{W}$ 的输出功率。作者用微电火花和微铣削方法分别进行了加工实验, 两者加工的尺寸精确度均能满足指标要求, 微铣削加工的槽底形貌和表面粗糙度要优于微电火花加工。

参考文献:

- [1] Chusseau L, Lampin J F, Bollaert S, et al. THz Active Devices and Applications: a Survey of Recent Researches[C]// 35th European Microwave Conference. Paris:[s.n.], 2005:1-4.
- [2] Ives R L. Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(3):1277-1291.
- [3] Dohler G, Gallagher D, Richards J. Millimeter wave folded waveguide TWTs[C]// Vacuum Electronics Annual Review Proceedings. Crystal City:[s.n.], 1993:15-20.
- [4] Zheng R L, Chen X Y. Parametric simulation and optimization of cold-test properties for a $220\ \text{GHz}$ broadband folded waveguide traveling-wave tube[J]. J. Infrared Milli. Terahz Waves, 2009, 30(9):945-958.

(下转第 312 页)