

# 电子注通道形貌对折叠波导慢波结构的影响

王亚军<sup>1,2</sup>, 陈樟<sup>1,2</sup>, 施志贵<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 折叠波导结构是一种极具潜力的太赫兹行波管慢波电路。分析了电子注通道形貌对折叠波导高频特性的影响, 包括色散特性、耦合阻抗和衰减特性。仿真结果表明, 相比于圆形电子注通道, 矩形电子注通道的折叠波导结构色散要略微陡一些, 损耗也要略微高一些。在中心频率处, 矩形电子注通道结构的耦合阻抗比圆形电子注通道结构低  $0.5 \Omega$  左右。皮尔斯小信号理论表明, 在中心频率处, 矩形电子注通道结构和圆形电子注通道结构的增益速率分别为  $4.85 \text{ dB/cm}$  和  $5.22 \text{ dB/cm}$ , 具有相似的  $3 \text{ dB}$  带宽, 约为  $6.3 \text{ GHz}$  和  $7.2 \text{ GHz}$ 。粒子模拟表明, 对于矩形和圆形电子注通道,  $54 \text{ mm}$  ( $100$  个周期) 的折叠波导慢波结构在  $220 \text{ GHz}$  增益分别为  $24.42 \text{ dB}$  和  $28.44 \text{ dB}$ 。

**关键词:** 冷测特性; 折叠波导; 慢波结构; 太赫兹辐射; 行波管

**中图分类号:** O441 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.018

## Impact of the electron beam tunnel on a folded waveguide slow-wave structure

WANG Ya-jun<sup>1,2</sup>, CHEN Zhang<sup>1,2</sup>, SHI Zhi-gui<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The folded waveguide structure is a promising slow-wave structure for terahertz traveling wave tubes. The influence of the beam tunnel on the circuit cold characteristics was analyzed, including dispersion relation, interaction impedance and circuit attenuation. The simulation results show that a beam tunnel with a rectangular cross section exhibits slightly steeper dispersion relation and higher attenuation coefficient than the beam tunnel with a circular cross section. Compared with the beam tunnel with a circular cross section, interaction impedance of beam tunnel with a rectangular cross section is lower about  $0.5 \Omega$  at a  $220 \text{ GHz}$  central frequency. For cold beam, the linear theory predicts a gain growth rate of  $4.85 \text{ dB/cm}$  and  $5.22 \text{ dB/cm}$ , respectively. They have a similar  $3 \text{ dB}$  bandwidth of  $6.3 \text{ GHz}$  and  $7.2 \text{ GHz}$ . The large signal simulations show that the nonlinear gain is  $24.42 \text{ dB}$  and  $28.44 \text{ dB}$  at  $220 \text{ GHz}$  for  $54 \text{ mm}$  ( $100$  periods) folded waveguide slow-wave structure with rectangular cross section and circular cross section, respectively.

**Key words:** cold characteristics; folded waveguide; slow-wave structure; terahertz radiation; traveling wave tube

### 1 引言

近年来,以折叠波导作为慢波结构的真空电子器件由于其全金属结构,色散较平坦、高频损耗小、功率容量大、耦合匹配好、制造成本低等优点,成为毫米波、亚毫米波和太赫兹波源的一个研究热点。

许多研究机构开展了折叠波导行波管放大器和振荡器的研究工作<sup>[1-4]</sup>。文献[5]对太赫兹折叠波导行

作者简介:王亚军(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为微加工的太赫兹折叠波导行波管与新型慢结构研究。E-mail: yjwang01@163.com

收稿日期:2012-10-29;修订日期:2012-11-13

波管的国内外研究做了很好的介绍和归纳总结。目前研究表明微型折叠波导行波管是一种极具发展潜力的太赫兹器件,能够产生高功率的太赫兹波输出<sup>[6]</sup>。在折叠波导行波管中,弯曲的矩形波导降低了电磁波的轴向相速,轴向运动的电子注同步于电磁波,与电磁波发生相互作用,电磁波获得电子注的能量,从而信号得到放大。

随着频率上升到太赫兹频段,折叠波导慢波结构尺寸变得很小,对加工精度和表面粗糙度要求很高,传统的精密加工方法已经不能满足要求。随着微细加工技术的发展,使得小型化的高频折叠波导行波管成为可能,已有报道采用微细加工方法来制作折叠波导结构<sup>[7-8]</sup>。然而,由于微细加工技术为准三维技术,电子注通道只能加工为矩形。例如,采用 UV-LIGA 工艺制作全金属结构的折叠波导结构,第一次光刻和电镀形成弯曲的波导结构,第二次光刻和电镀形成电子注通道,最后将制造出的镜像的二等份的折叠波导焊接成完整的折叠波导线。虽然可以采用微细加工复合精密加工技术来制作圆形电子注通道的折叠波导结构,但后续的精密加工技术常常会破坏微加工的波导结构,同时其加工尺寸也限制了电子注通道的大小<sup>[9]</sup>。因此,在太赫兹频段,折叠波导慢波结构的电子注通道一般为矩形。电子注通道形貌的不同,在一定程度上会改变波导中电场的分布,使得轴向运动的电子注上有不同的空间电荷效应,从而引起折叠波导结构特性的不同。本文详细分析了不同电子注通道形貌对折叠波导慢波结构高频特性的影响,包括色散特性、耦合阻抗以及损耗等。基于 HFSS 仿真结果,采用皮尔斯小信号理论分析了不同电子注通道形貌的折叠波导结构的小信号增益,最后采用 CST 粒子模拟工作室对 100 个周期的折叠波导结构进行了大信号分析。

## 2 高频特性分析

对于折叠波导的结构参数,我们采用文献[10]的设计参数,其中心工作频率为 220 GHz。慢波结构的具体参数为  $a = 0.8 \text{ mm}$ ,  $b = 0.12 \text{ mm}$ ,  $p = 0.27 \text{ mm}$ ,  $h = 0.2 \text{ mm}$ 。电子注通道为圆形,直径为  $0.16 \text{ mm}$ 。为了比较不同电子注通道形貌对折叠波导慢波结构的影响,我们将矩形电子注通道的边长设为  $0.16 \text{ mm}$ ,这样在相同电子注半径的情况下,电子注边缘离通道壁具有相同的距离,不会改变聚束电子注的周期永磁系统。

色散特性和耦合阻抗是折叠波导慢波结构的两个重要参数,它们分别反映了行波管的工作带宽和相互作用程度。对于色散特性,可以采用等效电路的方法将半周期长的折叠波导结构分解,计算各个部分的传输矩阵,通过级联得到色散曲线。对于电子注通道,可以等效为一并联阻抗,其归一化阻抗  $B$  为<sup>[11]</sup>:

$$B = \frac{2\alpha_m \pi^2}{\beta_{10} a^3 b} \quad (1)$$

式中,  $\alpha_m$  为磁极化率,  $\beta_{10}$  为传播常数;  $a$  和  $b$  分别为矩形波导的宽边和窄边。对于圆形电子注通道,  $\alpha_m = 4r_0^3/3$ 。对于矩形电子注通道,  $\alpha_m = 1.3221 \pi^2 w^3/16$ ,  $w$  为矩形电子注通道的边长<sup>[12]</sup>。

采用 HFSS 提供的准周期边界条件,建立单周期电路模型,如图 1 所示。通过设置周期性边界条件,分别计算每一个指定的轴向相移下的的谐振频率即可得到色散曲线。图 2 是不同电子注通道形貌的折叠波导结构等效电路和 HFSS 仿真的色散曲线。从图中可以看出,等效电路虽然能够快速获得结构的色散特性,在整体趋势上也与仿真一致,但仍然与仿真结果有一定差异。这可能是由于等效电路中电子注通道的经验公式引起的,需要适当调整经验公式的系数,才能提高等效电路的精确度。从仿真来看,相比于圆形电子注通道结构,矩形电子注通道结构的色散曲线要略微陡一些。在 210 ~ 230 GHz 之间,相比于中心频率,矩形电子注通道结构和圆形电子注通道结构的相速变化分别为 1.76% 和 1.65%。这说明,对于矩形电子注通道的折叠波导,其带宽相比于圆形电子注通道的折叠波导略微要小一些。在中心频率处,两种结构的相速相差很小,从而具有较为一致的同步电压。同时从图中可以看出,在低频段,矩形电子注通道的相速大于圆形电子注通道的相速。而在高频段,两种电子注通道的相速基本相等。这说明了电子注通道对色散曲线的影响在低频段会更加强烈一些。

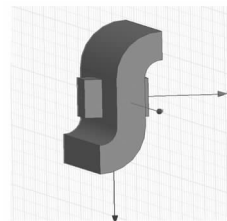


图1 折叠波导慢波结构 HFSS 仿真模型

Fig.1 HFSS simulation model of folded waveguide slow-wave structure

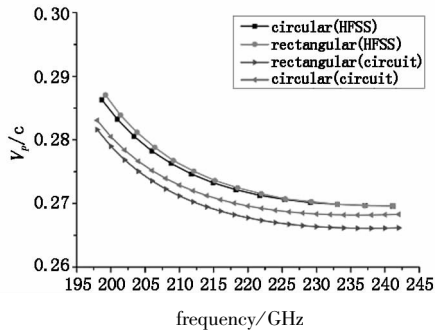


图2 不同电子注通道形貌的色散曲线

Fig. 2 normalized phase velocity versus frequency for the rectangular and circular tunnel models

对于折叠波导的耦合阻抗,仍然利用 HFSS 的准周期边界条件计算轴线上纵向电场幅值和通过系统的功率流,从而得到耦合阻抗,如图 3 所示。从图中可以看出,在中心频率 220 GHz 处,不同电子注通道形貌的折叠波导慢波结构的耦合阻抗大致在 2.5 ~ 3.5  $\Omega$  之间。在该频段上,耦合阻抗都不是很高,从而对于折叠波导行波管,为了得到较大的增益,常常需要较大的相互作用长度。对于矩形电子注通道,其耦合阻抗比圆形电子注通道低 0.5  $\Omega$  左右。因此,从相互作用的角度看,矩形电子注通道的慢波结构相比于圆形电子注通道的慢波结构,其相互作用效率更低,在相同的作用长度上,其增益会低一些。

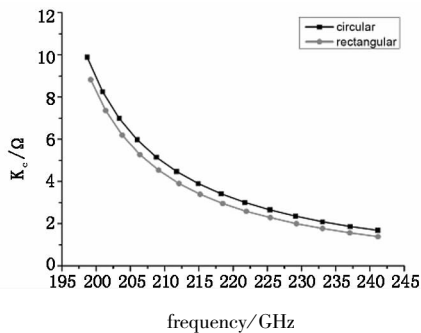


图3 不同电子注通道形貌的耦合阻抗

Fig. 3 interaction impedance for the rectangular and circular tunnel models

此外,还必须考虑的是折叠波导慢波结构的损耗特性。在太赫兹频段,由于有限电导率引起的导体损耗已经不能忽略,将极大的影响折叠波导慢波结构的性能。折叠波导慢波系统是由矩形金属波导电场面弯曲而来,可以根据矩形波导的导体损耗公式对折叠波导慢波系统的导体损耗进行近似理论计算。在仿真中,采用下式计算折叠波导慢波结构的衰减系数(dB/pitch):

$$\alpha_{\text{pitch}} = 8.686 \frac{P_l}{2P_{rf}} \quad (2)$$

其中,  $P_l$  是每周期电路的总损耗;  $P_{rf}$  是系统中传输

的功率流,它们都可以在计算完成后由 HFSS 后处理模块得到。

在理论模型计算损耗时认为波导内壁为光滑表面,并没有考虑波导壁的表面粗糙度,而对于折叠波导的微加工,其表面粗糙度是不可避免的。特别在太赫兹频段,当表面粗糙度与导体的趋肤深度在相同量级时,损耗将随着表面粗糙度增大而增大,因此必须考虑表面粗糙度的影响。在仿真中,将表面粗糙度的影响考虑在对电导率的修正中,由下式给出:

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{K_w^2} = \frac{\sigma}{\left(1 + \exp\left(-\frac{\delta}{2\Delta}\right)^{1.6}\right)^2} \quad (3)$$

其中,  $\Delta$  为波导内壁表面粗糙度;  $\delta$  为趋肤深度。

在仿真中,选择材料为铜,考虑到表面粗糙度,将电导率设定为  $4 \times 10^7$  Simens/m。图 4 是不同电子注通道形貌的折叠波导结构的衰减系数。从图中可以看出,在 210 ~ 230 GHz 之间,两种电子注通道形貌的折叠波导半周期的衰减在 0.04 ~ 0.05 dB 之间。相比于圆形电子注通道,矩形电子注通道折叠波导半周期的衰减要略微高一些。图 5 给出了 HFSS 仿真得到的折叠波导表面电流的分布。可以看到,矩形电子注通道结构的面电流最大值要大于圆形电子注通道结构的面电流的最大值,这也说明了矩形电子注通道折叠波导结构的损耗会大一些。同时可以发现,面电流最大值出现在弯曲波导的内表面,损耗也主要集中在该地方。这是由于与波导壁相切的磁场矢量,在弯曲波导的内表面有最大的改变,磁场的快速变化产生了电流,从而引起了最大的损耗。为了减小折叠波导的高频损耗,必须减小电磁波在波导弯曲面的损耗。已有文献报道在弯曲处采用非传导材料硅代替金属来减小损耗,虽然损耗有所降低,但耦合阻抗也大大降低,效率也极大地降低<sup>[13-14]</sup>。

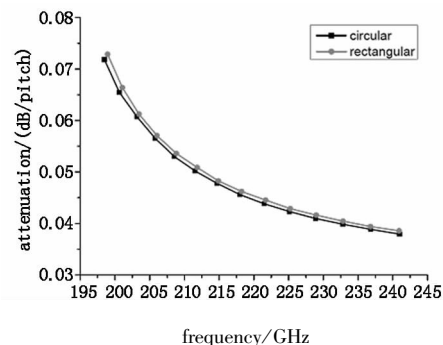


图4 不同电子注通道形貌的衰减常数

Fig. 4 circuit attenuation per pitch for the rectangular and circular tunnel models

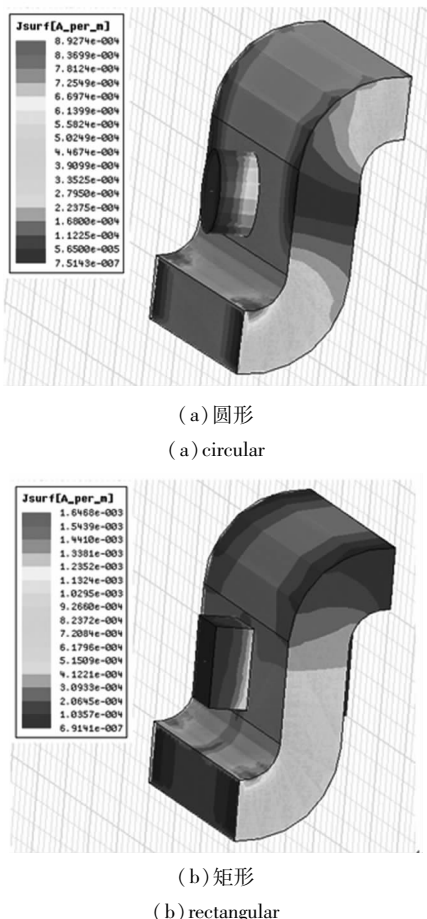


图5 不同电子注通道形貌的折叠波导表面电流分布  
Fig.5 surface current distribution for the different tunnel models

### 3 小信号增益计算

由皮尔斯小信号理论,行波管的工作方程的特征方程为<sup>[15]</sup>:

$$\left[ \frac{\Gamma_0 \Gamma^2}{(\Gamma^2 - \Gamma_0^2)} + \frac{2jQ\Gamma^2}{\beta_c} \right] \frac{j\beta_c}{(\Gamma - j\beta_c)^2} \cdot 2C^3 = -1 \quad (4)$$

在不考虑损耗参量  $d$  的情况下,通过一系列推导,可以得到折叠波导慢波结构的小信号增益速率 (dB/cm) 为:

$$G = 10 \lg \left| \frac{E_z}{E_0} \right|^2 / z / 100 = -0.2 \operatorname{Re}(\Gamma) \lg e = 0.2\beta_c C \operatorname{Re}(\delta) \lg e = -0.2\beta_c C \operatorname{Im}(\varepsilon) \lg e \quad (5)$$

基于 HFSS 仿真计算的结果,采用 matlab 编程来计算折叠波导慢波结构的增益速率,如图 6 所示。其中,电子注参数为电流 10 mA,电压分别为 19.45 kV 和 19.5 kV。从图 6 可以看出,矩形电子注通道结构的增益速率要明显低于圆形电子注通道的增益速率。在中心频率处,其增益速率分别为 5.22 dB/cm 和 4.85 dB/cm。这也验证了矩形电子注通道结构具有较低的耦合阻抗。为了比较其带

宽,采用下式来计算折叠波导的 3 dB 增益带宽<sup>[16]</sup>:

$$g_{\min} = (1 - 3/G_t) g_{\max} \quad (6)$$

其中,  $g$  为小信号增益 (dB/cm);  $G_t$  为行波管的整体增益,设为 20 dB。从图 6 可以看出,对于矩形和圆形电子注通道折叠波导慢波结构,其增益峰值分别为 4.89 dB/cm 和 5.25 dB/cm。矩形电子注通道的增益要明显小于圆形电子注通道的增益,这说明了前者的注波相互作用效率更低,在相同的相互作用长度上,总增益更小。同时,得到其 3 dB 增益带宽分别为 6.3 GHz 和 7.2 GHz,矩形电子注通道的带宽略微小一些,但两者相差不大。

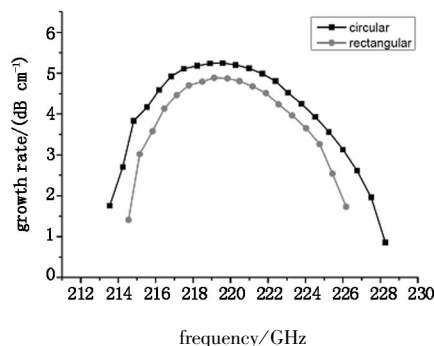


图6 不同电子注通道形貌的折叠波导的小信号增益曲线  
Fig.6 small signal gain for the rectangular and circular tunnel models

### 4 注-波相互作用大信号模拟

为了进一步验证电子注通道对折叠波导结构整体性能的影响,采用三维电磁场软件 CST 进行了粒子模拟分析。材料电导率仍然取为  $4 \times 10^7$  Simens/m,其中,矩形电子注通道的折叠波导慢波结构的最佳电压为 20.2 kV,圆形电子注通道的慢波结构最佳电压为 20 kV,电流为 10 mA,轴向加 0.4 T 的均匀磁场,输入信号源功率均为 10 mW。仿真表明,对于 100 个周期 (54 mm) 的折叠波导慢波结构,在 220 GHz 增益分别为 24.42 dB 和 28.44 dB,矩形电子注通道的慢波结构相比于圆形电子注通道增益小 4 dB 左右。图 7 是输入和输出信号时域波形的傅里叶变换。从图 7 可以看出,矩形电子注通道的折叠波导结构输出信号幅度要明显低于圆形电子注通道的折叠波导结构。同时,我们发现,矩形电子注通道的慢波结构在输出末端电子注出现了饱和,而圆形电子注通道的慢波结构还未达到饱和,随着周期数增加,增益仍然可以增大。粒子模拟的结果验证了前面的分析,可以看出,电子注通道对折叠波导慢波结构有较大的影响。

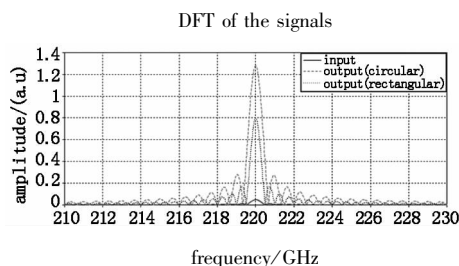


图7 输入与输出信号的傅里叶变换

Fig. 7 discrete fourier transform of input and output signals

## 5 结论

本文主要分析了不同电子注通道形貌的折叠波导慢波结构的色散、耦合阻抗和衰减特性。仿真结果表明,相比于圆形电子注通道,矩形电子注通道的折叠波导结构色散要略微陡一些,损耗也要略微高一些。在中心频率处,矩形电子注通道结构的耦合阻抗比圆形电子注通道结构低 $0.5 \Omega$ 左右。采用皮尔斯小信号理论分析了折叠波导的线性增益,计算结果表明,在中心频率处,矩形电子注通道结构和圆形电子注通道结构的增益速率分别为 $4.89 \text{ dB/cm}$ 和 $5.25 \text{ dB/cm}$ ,具有相似的 $3 \text{ dB}$ 带宽,约为 $6.3 \text{ GHz}$ 和 $7.2 \text{ GHz}$ 。注波相互作用分析表明,矩形电子注通道形貌的折叠波导结构,虽然在带宽和衰减常数方面微低一些,但在注波相互作用效率上明显低于圆形电子注通道形貌的折叠波导结构,对于100个周期( $54 \text{ mm}$ )的折叠波导慢波结构,在中心频率处增益分别为 $24.42 \text{ dB}$ 和 $28.44 \text{ dB}$ 。在仿真中发现,对于矩形电子注通道,在慢波结构末端,电子注已经出现饱和,无法通过继续加工相互作用长度来增加增益。因此,对于工作在太赫兹频段的矩形电子注通道的折叠波导结构,必须对其结构参数进行必要的优化,以平衡增益和带宽的关系,获得高功率,宽带宽的太赫兹波辐射。本文的计算和分析也将为设计和研制太赫兹折叠波导行波管奠定一定的基础。

## 参考文献:

- [1] Shin Y M, So J K, Jang K H, et al. Experimental investigation of 95 GHz folded waveguide backward wave oscillator fabricated by two-step LIGA [J]. IVEC, 2006: 419 – 420.
- [2] Ives R L, Kory C, Read M, et al. High frequency source development at calabazas creek research [C]. IRMMW-THz, 2007: 312 – 314.
- [3] Tucek J, Kreischer K, Gallagher D, et al. Development and operation of a 650 GHz folded waveguide source [C]. IVEC, 2007: 1 – 2.
- [4] Jinjun Feng, Yinfu Hu, Jun Cai, et al. Progress of W-band 10 W CW TWT [C]. IVEC, 2010: 501 – 502.
- [5] Zhang Zhang. Research progress of THz traveling wave tubes [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(3): 250 – 257. (in Chinese)  
张章. 太赫兹行波管的研究进展 [J]. 激光与红外, 2012, 42(3): 250 – 257.
- [6] Tucek J, Basten M, Gallagher D, et al. A 100 mW, 0.670 THz Power Module [C]. IVEC, 2012.
- [7] Makarova O V, Divan R, Tucek J, et al. Fabrication of solid copper 220 GHz folded waveguide circuits by UV lithography [C]. IVEC, 2010: 183 – 184.
- [8] Han S T, Jeon S G, Shin Y M, et al. Experimental investigations on miniaturized high-frequency vacuum electron devices [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2): 679 – 684.
- [9] Shin Y M, So J K, Han S T, et al. Microfabrication of millimeter wave vacuum electron devices by two-step deep-etch x-ray lithography [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(9): 16 – 19.
- [10] Yajun Wang, Zhang Chen, Yanlin Cheng, et al. 220 GHz folded waveguide slow-wave structure [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1589 – 1592. (in Chinese)  
王亚军, 陈樟, 程焰林, 等. 220 GHz 折叠波导慢波结构 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1589 – 1592.
- [11] Collins R E. Field theory of guided waves [M]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1991: 514.
- [12] McDonald N A. Polynomial approximations for the transverse magnetic polarizabilities of some small apertures [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1987, 35(1): 20 – 23.
- [13] David P S, Nathan D S, Jeffrey D W. Using COMSOL multiphysics software to model anisotropic dielectric and metamaterial effects in folded-waveguide traveling-wave tube [J]. NASA/TM, 2008.
- [14] Starinshak D P, Wilson J D. Investigating dielectric and metamaterial effects in a terahertz traveling-wave tube amplifier [J]. NASA/TM, 2008.
- [15] S Liu, H Li, W Wang, et al. Introduction to microwave electronics [M]. National Defense Industry Press, 1985: 349. (in Chinese)  
刘盛纲, 李宏福, 王文祥, 等. 微波电子学导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 349.
- [16] Ganguly A K, Choi J J, Armstrong C M. Linear theory of slow wave cyclotron interaction in double-ridged folded rectangular waveguide [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1995, 42(2): 348 – 355.