

## 0.8 THz 再生反馈振荡器的仿真模拟研究

李天一, 孟维思, 潘攀, 蔡军, 邬显平, 冯进军, 闫铁昌

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

**摘要:** 随着太赫兹技术的发展, 高频率、大功率的太赫兹辐射源一直是国内外研究的热点。再生反馈振荡器作为一种新型太赫兹源器件, 具有可行性高、功率大的优点。基于 0.8 THz 太赫兹波成像系统的需求, 采用折叠波导慢波结构, 对再生反馈振荡器进行设计与研究。首先对 0.8 THz 折叠波导慢波结构进行设计并使用 CST 微波工作室中的本征模求解器进行参数优化, 再通过 CST 粒子工作室中的 PIC 仿真模块对整管进行热特性仿真, 验证了方案的可行性, 仿真结果显示, 最终可产生 60 mW 的稳定输出信号。

**关键词:** 再生反馈振荡器; 太赫兹; 折叠波导; PIC 模拟

**中图分类号:** TN124

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11884/HPLPB201931.190372

## Study of 0.8 THz regenerative feedback oscillators

Li Tianyi, Meng Weisi, Pan Pan, Cai Jun, Wu Xianping, Feng Jinjun, Yan Tiechang

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

**Abstract:** With the development of terahertz technology, high-frequency and high-power terahertz radiation sources have been the focus of researching all over the world. Based on the requirement of 0.8 THz terahertz wave imaging system, the regenerative feedback oscillator is designed and studied by using folded waveguide slow wave structure(SWS). In this paper, the SWS of 0.8 THz folded waveguide is designed and optimized by using the eigenmode solver in CST Microwave Studio. Then the oscillator is simulated and verified by PIC solver in CST Particle Studio. In the initial exploration stage of THz, regenerative feedback oscillator has the advantage of high feasibility and high output power. The simulation results show that a stable output signal of 60 mW can be generated.

**Key words:** regenerative feedback oscillator; terahertz; folded waveguide; PIC solve

**PACS:** 84.47.+w; 85.45.-w

随着太赫兹波在医学成像、安检、光谱分析、星际通讯及雷达领域中应用研究的深入, 近年来, 许多国内外的研究机构致力于高频段太赫兹器件及其应用的研究, 关于太赫兹辐射源的研究则成为了所有研究的基础。再生反馈振荡器作为太赫兹辐射源的一种, 将行波管放大器输入端与输出端通过带损耗的反馈回路连接起来, 并进行耦合输出, 通过对特定相位的电子噪声进行放大, 最终可获得稳定的电磁信号输出。再生反馈振荡器被国内外研究机构列为高频段太赫兹器件的首要研究内容, 2004 年美国威斯康星大学麦迪逊分校联合美国空军研究所和美国海军实验室对一个 65 mW, 560 GHz 的再生反馈振荡器进行了设计和模拟<sup>[1]</sup>。2007 年 Northrop Grumman 公司首次利用折叠波导行波管研制出再生反馈振荡器样管。该样管在中心频率为 638 GHz, 电子注电压为 9.44 kV, 电流为 0.9 mA 时, 可获得 16.3 mW 的输出功率<sup>[2]</sup>。2009 年北京真空电子技术研究所完成了同频段再生反馈振荡器的优化设计, 振荡器的中心频率为 559.63 GHz, 输出功率为 95 mW, 电子效率为 0.45%<sup>[3]</sup>。电子科技大学的高鹏于 2010 年在博士毕业论文中对 560 GHz 再生反馈振荡器进行了仿真模拟, 并利用 5 GHz 螺旋线行波管进行了再生反馈振荡实验, 论证了行波管再生反馈振荡器的可行性<sup>[4]</sup>。

本文对再生反馈振荡理论进行阐述, 并首次针对 0.8 THz 频段对再生反馈振荡器进行设计。针对起振条件对高频结构整体尺寸进行预估, 使用 CST 仿真软件对整体结构进行优化设计, 并通过仿真结果对该方案进行了验证。

### 1 再生反馈振荡理论

再生反馈振荡器是在行波管放大器的基础上提出的, 图 1 为行波管放大器高频结构的工作原理, 通过电磁波

与电子注能量的交换,最终实现信号放大的作用。图2为带反馈回路的行波管放大器,该结构广泛应用于小信号放大器及储频行波管中。将图2中的输入信号去掉,并将随机的电子注噪声作为信号源进行多次选择性放大并形成稳定的信号输出,即为再生反馈振荡器,结构如图3所示。

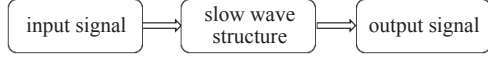


Fig. 1 Operating principle of TWT  
图1 行波管放大器工作原理

再生反馈振荡机制建立的条件有:同步条件、幅值条件、相位条件。同步条件是指电子流速度与电磁波速度需要保持相速同步,通过计算不同慢波结构尺寸的色散和耦合阻抗,最终可得到符合同步条件的慢波结构尺寸;幅值条件是指慢波系统增益应大于反馈回路中的损耗,否则没有信号通过反馈回路进入输入端,则无法起振;相位条件是指电磁信号经过慢波系统、反馈回路及T型耦合装置后产生的相移量应为 $2\pi$ 的正整数倍,否则每次循环的信号不能叠加。

再生反馈振荡器结构的核心是慢波结构和带衰减的反馈回路,慢波结构的色散和耦合阻抗特性直接决定了再生反馈振荡理论中的同步条件,慢波结构与反馈回路共同决定了幅值条件和相位条件。

振荡开始时,由电子注随机产生不同相位的电子噪声,符合振荡条件的信号被选择性放大后,经反馈回路衰减后耦合到输入端口,与噪声进行叠加,最终形成稳定的输出信号。整个过程可以描述为以下迭代过程

$$P_{out,n+1} = f(P_{in,n}) \quad (1)$$

$$P_{in,n+1} = P_{out,n+1} - F_d + P_{in,1} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

式中: $P_{in,1}$ 表示初始噪声大小;函数 $f$ 表示相互作用过程中对信号的放大作用; $F_d$ 表示信号经衰减及耦合后损失的功率大小。通过控制 $F_d$ ,即控制反馈回路的长度及衰减量,最终可使再生反馈振荡器工作于单频状态。

## 2 慢波结构尺寸设计

由于真空电子器件的缩尺效应,传统加工装配工艺遇到了瓶颈,工作频率高于0.5 THz的慢波结构一般使用UV-LIGA或深反应离子刻蚀(DRIVE)技术进行加工<sup>[5]</sup>,适用的高频结构类型有折叠波导、交错双栅、单边矩形栅等平面型结构。折叠波导结构具有散热性好、功率容量大等优点,广泛应用于行波管放大器、返波振荡器、止带振荡器等真空器件中,因此本文选择折叠波导慢波结构对再生反馈振荡器进行设计。在CST微波工作室中建立单周期折叠波导慢波结构模型(长度为 $2p$ ),如图4所示, $a, b$ 分别为波导宽边和窄边长度, $h$ 为直波导长度, $p$ 为半周期长度, $r_c$ 为电子注通道半边长。选取不同尺寸计算色散特性和耦合阻抗并进行对比,最终折叠波导尺寸参数如表1所示。

折叠波导结构中 $n$ 次空间谐波的色散关系为<sup>[6]</sup>

$$\omega^2 = \omega_c^2 + c^2 \left( \frac{p}{\pi p/2 + h} \right)^2 \left( \beta_n - \frac{(2n+1)\pi}{p} \right)^2 \quad (3)$$

由公式可知,色散特性主要与波导宽边长度 $a$ 、直波导长度 $h$ 和半周期长度 $p$ 有关。下面考虑加工误差对色散特性的影响,三个参量的误差设为 $\pm 0.005$  mm,分别改变这三个参量计算并绘制色散特性曲线,结果如图5~7所示。由图可知,波导宽边 $a$ 在0.8 THz处相光速比的变化约为1.6%,直波导长度 $h$ 在0.8 THz频点处的相光速比变化约为1.1%,而半周期长度 $p$ 的误差对色散特性影响较大,变化约为7%。在实际研制过程中, $h$ 与 $p$ 的尺寸只受掩膜尺寸及光刻工艺的影响,所产生的误差可以忽略; $a$ 的尺寸由精密电火花切割及高频压力扩散焊等传统研制工艺决定,易产生误差,但对色散特性的影响可以接受。

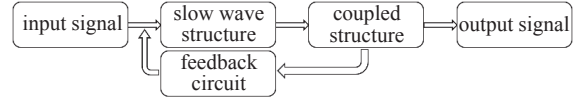


Fig. 2 Operating principle of TWT with feedback circuit  
图2 带反馈回路行波管工作原理

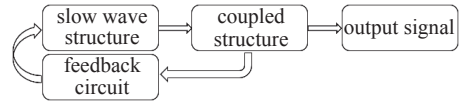


Fig. 3 Operating principle of regenerative feedback oscillator (RFO)  
图3 再生反馈振荡器工作原理

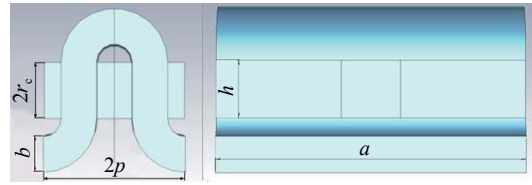


Fig. 4 0.8 THz folded waveguide module  
图4 0.8 THz 折叠波导模型

表1 折叠波导尺寸参数

Table 1 Dimension parameters of folded waveguide

$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$p/\text{mm}$	$r_c/\text{mm}$
0.210	0.025	0.040	0.050	0.020

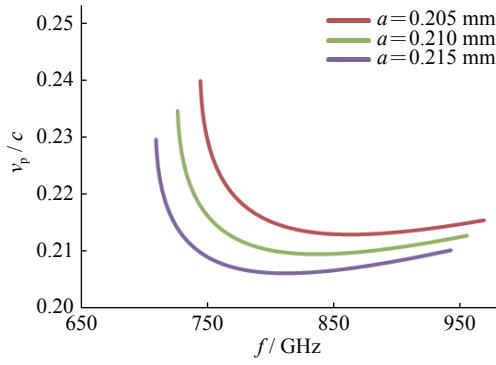


Fig. 5 Influence of waveguide broadside on dispersion curve  
图 5 波导宽边  $a$  对色散曲线的影响

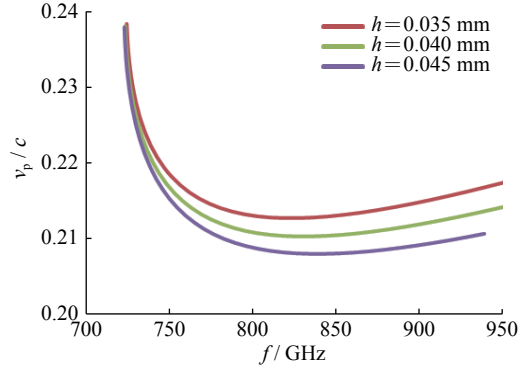


Fig. 6 Influence of straight waveguide length on dispersion curve  
图 6 直波导长度  $h$  对色散曲线的影响

折叠波导轴上耦合阻抗为<sup>[6]</sup>

$$K_n = Z_0 \frac{1}{(\beta_n p)^2} \left( \frac{\sin \beta_n p / 2}{\beta_n p / 2} \right)^2 \frac{1}{I_0^2(k_{cn} r_c)} \quad (4)$$

由式(4)可知,耦合阻抗主要与波导窄边  $b$  长度、半周期长度  $p$  以及电子注通道半边长  $r_c$  有关。考虑加工误差,对  $b$ 、 $p$  和  $r_c$  分别取  $\pm 0.005$  mm,  $\pm 0.005$  mm 和  $\pm 0.004$  mm 误差进行仿真分析,其结果如图 8~10 所示。可以得到,波导窄边长度  $b$  的误差对耦合阻抗的影响范围为  $1.8 \sim 2.25 \Omega$ ,半周期长度  $p$  的误差对耦合阻抗的影响范围为  $2.04 \sim 2.36 \Omega$ ,电子注通道半边长  $r_c$  的误差对耦合阻抗的影响范围为  $2.08 \sim 2.59 \Omega$ 。其中  $b$  和  $p$  的尺寸由光刻掩膜所决定,加工误差较小; $r_c$  沿波导宽边方向尺寸由机械加工精度决定,其尺寸越小耦合阻抗越大,可提高注-波相互作用效果,但电子注通道的缩小会导致部分电子轰击到折叠波导金属壁上,降低整管通过率。实际加工过程中需要对波导宽边  $a$  及电子注通道半边长  $r_c$  的尺寸进行严格把控。

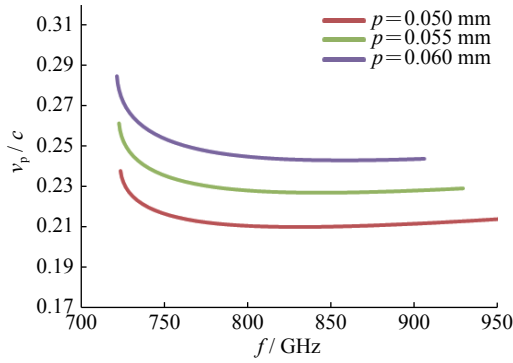


Fig. 7 Influence of half period length on dispersion curve  
图 7 半周期长度  $p$  对色散曲线的影响

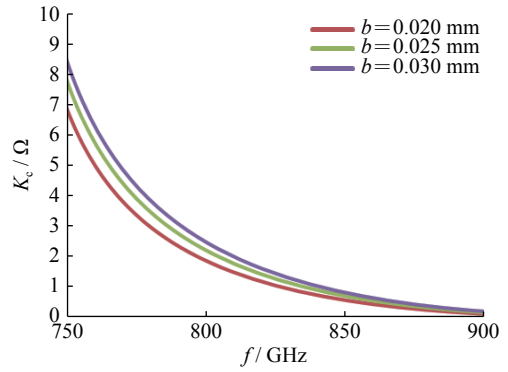


Fig. 8 Influence of waveguide narrow side length on coupled impedance  
图 8 波导窄边  $b$  对耦合阻抗的影响

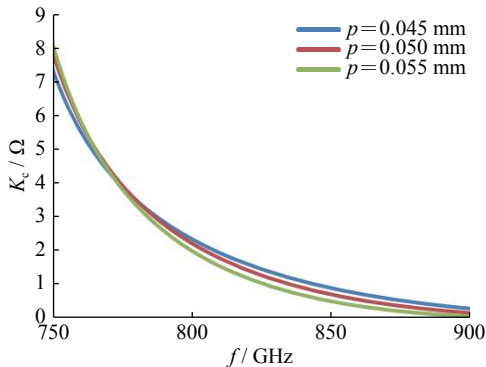


Fig. 9 Influence of half period length on coupled impedance  
图 9 半周期长度  $p$  对耦合阻抗的影响

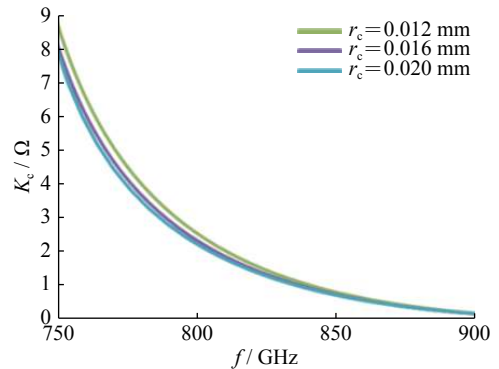


Fig. 10 Influence of half edge length of electronic channel on coupled impedance  
图 10 电子注通道半边长  $r_c$  对耦合阻抗的影响

### 3 相互作用系统设计

相互作用系统的设计主要是关于慢波结构周期数、反馈回路的长度及 T 型耦合结构的设计, 需要考虑到相位条件及幅值条件。实现单频振荡的相位条件为<sup>[7]</sup>

$$\beta L + \beta_b L_b = 2N\pi \quad (N = 1, 2, \dots) \quad (5)$$

式中:  $\beta$ ,  $\beta_b$  和  $L$ ,  $L_b$  分别为折叠波导和反馈回路中的相位常数和长度。

与返波振荡器的电子注反馈回路不同, 再生反馈振荡器的反馈回路为矩形波导, 位于高频结构外, 因此中心频点附近存在无数频点的电磁波可以满足相位条件。通过高频电路的同步条件对电磁波进行选择, 最终可得到目标频率电磁波。幅值条件指高频慢波结构的增益需大于反馈回路的损耗。

使用诺埃一维大信号软件对初步设计进行模拟, 慢波结构长度为 18 mm, 饱和输出功率为 128 mW, 小信号增益 20 dB。在 CST 微波工作室中建立反馈回路及 T 型结构的模型, 金属电导率设置为  $1 \times 10^7$  S/m, 长度为 18 mm, T 型耦合结构为标准 E-T 接头, 尺寸与折叠波导尺寸相同。反馈回路引入的损耗包含材料损耗和 T 型耦合结构损耗两部分, T 型结构为整体输出信号引入了 3.5 dB 的衰减量, 长度为 18 mm 的无氧铜直波导引入了 10.4 dB 的衰减量, 则反馈回路整体衰减量为 13.9 dB, 小于高频结构的小信号增益, 符合再生反馈振荡器起振的幅值条件。

### 4 PIC 设计结果

根据设计的高频结构, 在 CST 粒子工作室 PIC 模块中建模, 图 11 为模型示意图。电子从左端的阴极入射, 在右端被截获。电子注中的噪声信号进入折叠波导并与电子注进行能量交换, 放大后的信号通过 T 型耦合结构, 一部分输出到外部, 另一部分沿慢波结构上方的反馈回路传输到阴极端, 重新进入慢波结构并进行注-波互作用, 经过多次振荡, 最终输出饱和功率。

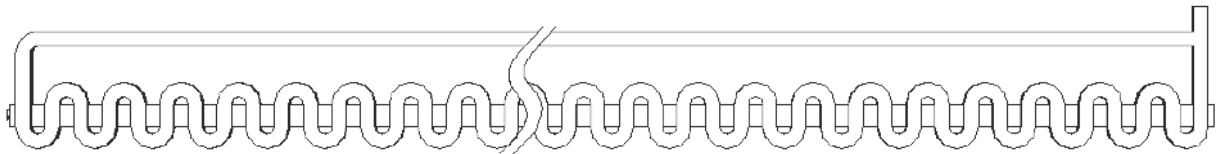


Fig. 11 Model of regenerative feedback oscillator

图 11 再生反馈振荡器模型图

建模过程中考虑 0.8 THz 无氧铜材料电导率为  $1.6 \times 10^7$  S/m, 同步电压为 11.9 kV, 电子注电流为 0.003 A, 慢波结构周期为 80 个周期, 均匀永磁磁场为 0.45 T。图 12 展示了振荡器逐渐起振的过程, 经过 0.12 ns 后, 电子注携带的随机噪声经同步条件筛选, 首次传输到慢波结构的输出端口, 经过 T 型耦合结构后沿着反馈回路重新进入慢波结构的输入端口, 3.5 ns 后, 信号趋于稳定。折叠波导慢波结构色散平坦, 起振初期, 在中心频率 801.7 GHz 附近相差 5 GHz 处各有一个信号同时处于起振状态, 频谱如图 13 傅里叶分析所示。随着位于中心频率处信号的放大, 电子注被不断调制, 最终稳定在 801.7 GHz 频点处与电磁波进行能量交换, 稳定后的振荡功率如图 14、图 15 所示, 可获得 60 mW 稳定输出功率。

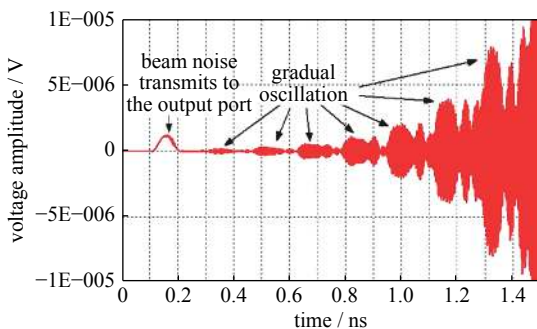


Fig. 12 Progress of self-oscillation

图 12 起振过程

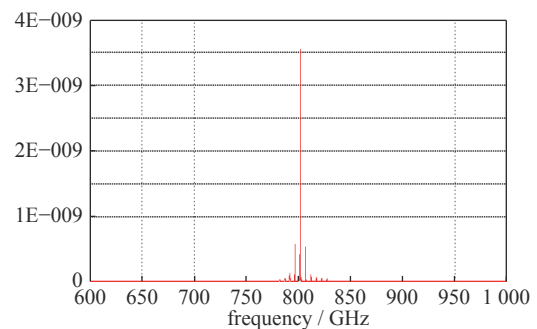


Fig. 13 FFT spectrum analysis

图 13 快速傅里叶频谱分析

将电子注电压范围从 11 800 V 调节到 19 800 V, 可见振荡频率随同步电压的改变发生阶梯式跳变, 如图 16 所示。由于相位条件的约束, 当电压在 11 800 V 到 11 880 V 内调节时, 谐振频率在小范围内进行线性变化, 当电

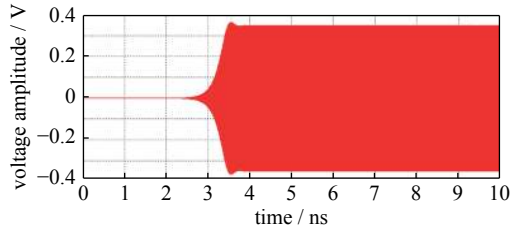


Fig. 14 Output signal amplitude

图 14 输出信号幅值

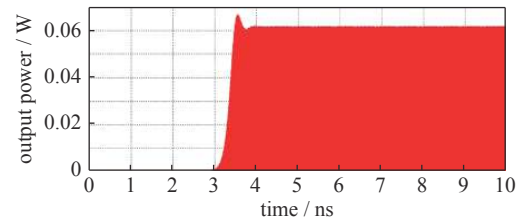


Fig. 15 Output signal power

图 15 输出信号功率

压从 11 880 V 调节到 11 900 V 时, 相位条件发生改变, 对应的相位常数变为  $n+1$  或  $n-1$ , 导致输出信号频率跳变到附近的谐振频率上, 形成阶梯式跳变工作状态。本文介绍的再生反馈振荡器可工作于 811.1 GHz, 801.7 GHz 两个频点处。

## 5 结论

本文对 0.8 THz 再生反馈振荡器进行设计与理论分析。首先对折叠波导慢波结构进行了冷特性分析, 并结合相应制作工艺确定了结构尺寸参数, 并进行了 PIC 热特性仿真。仿真结果表明可在 801.7 GHz 处得到 60 mW 稳定输出信号, 下一步将开展 0.8 THz 功率源实验研究。

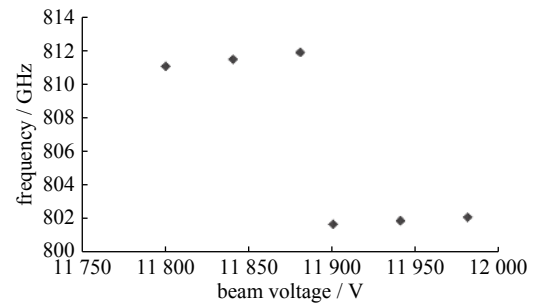


Fig. 16 Oscillation frequency jumps with the electron voltage

图 16 振荡频率随电子注电压跳变

## 参考文献:

- [1] Limbach S, Gallagher S, Welter J D, et al. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2004, 32(3): 1002-1014.
- [2] Tucek J, Kreischer K, Gallagher D, et al. Development and operation of a 650 GHz folded waveguide source[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2007.
- [3] Cai Jun, Hu Yinfu, Wu Xianping, et al. Investigation of THz regenerative oscillator[C]//IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2010.
- [4] 高鹏. 行波管再生反馈振荡器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010. (Gao Peng. Study on traveling wave tube regenerative feedback oscillators. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010)
- [5] Kory C, Ives L, Read M, et al. W-band MEMS-based TWT development[C]//IEEE International Conference on Vacuum Electronics. 2004.
- [6] 蔡军. W波段折叠波导慢波结构的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006. (Cai Jun. Study on W-band folded waveguide slow wave structure. Ji'nan: Shandong University, 2006)
- [7] 刘盛纲. 微波电子学导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 349-364. (Liu Shenggang. Introduction to microwave electronics. Beijing: National Defence Industry Press, 1985: 349-364)