

## W 波段平顶型正弦波导行波管的优化设计

阳 权, 张鲁奇, 方栓柱, 国婷婷, 丁 冲, 李 倩, 雷 霞,  
吴钢雄, 江雪冰, 徐 进, 赵国庆, 王文祥, 官玉彬, 魏彦玉\*  
(电子科技大学 微波电真空器件国家级重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要:**通过仿真计算对平顶型正弦波导的慢波特性进行了分析研究,提出了一种可用于 W 波段大功率行波管的两段式平顶型正弦波导高频电磁系统,并完成了输入输出结构和集中衰减器的优化设计;利用粒子模拟方法获得了带状电子注与此结构中慢电磁波注-波相互作用特性,计算结果表明该行波管在 92~101 GHz 的频率范围内可获得 200 W 以上的输出功率,增益大于 30 dB.

**关键词:**平顶型正弦波导;行波管;注-波相互作用;高频系统

**中图分类号:**TN124 **文献标识码:**A

## An optimal design of W-band truncated sine waveguide traveling wave tube

YANG Quan, ZHANG Lu-Qi, FANG Shuan-Zhu, GUO Ting-Ting,  
DING Chong, LI Qian, LEI Xia, WU Gang-Xiong, JIANG Xue-Bing, XU Jing,  
ZHAO Guo-Qing, WANG Wen-Xiang, GONG Yu-Shan, WEI Yan-Yu\*

**Abstract:** The slow wave characteristics of truncated sine waveguide are analyzed by the simulation method. The two-section high frequency electromagnetic system based on truncated sine waveguide (TSWG) is proposed, which can be used for the W-band Traveling Wave Tube (TWT). Meanwhile, the input/output coupler and attenuator are designed for the high frequency system. We obtain the beam-wave interaction results in the high frequency electromagnetic system by the Particle-in-cell (PIC) simulation method. The PIC simulation results indicate that the TWT can produce the output power over 200 W and gain over 30 dB in the frequency range of 92~101 GHz.

**Key words:** truncated sine waveguide, traveling wave tube, beam-wave interaction, high frequency system

**PACS:** 84.40. Az, 84.40. Fe, 84.47. + w, 62.25. Fg

### 引言

行波管作为一种重要的真空器件,具有频带宽、单根管子的增益高、非线性性能优良、噪声较低、工作频率高、电子效率高、采用降压收集级技术能得到很高的总效率、同时空间行波管可以达到 10~15 年以上的超长寿命,稳定性好等优点,它的应用占到整个电真空器件的一半左右<sup>[1-3]</sup>.

在 W 波段,法国 Thales 公司的 TH4402 行波管采用梳状线慢波电路,工作频率为 93~95 GHz,有

两种工作模式,饱和峰值功率输出分别为 100 W 和 150 W,瞬时带宽 500 MHz<sup>[4]</sup>. 美国 L-3 电子器件公司于 2010 年报道了 W 波段大功率连续波行波管,该管采用的是传统的折叠波导全金属慢波结构,设计的平均功率为 100 W,小信号增益 30 dB. 在实际测试中,在 90.6 GHz 和 91.4 GHz 附近分别得到了 300 W 和 200 W 的峰值功率<sup>[5]</sup>. 国内方面,中国电科 12 所、电子科技大学等单位对 W 波段行波管开展了大量的研究工作<sup>[6-10]</sup>,其中 2014 年电子科技大学设计出一款基于新型折叠波导慢波结构的 W 波

收稿日期:2017-07-03,修回日期:2018-01-18

Received date: 2017-07-03, revised date: 2018-01-18

基金项目:国家自然科学基金(61771117)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61771117)

作者简介 (Biography): 阳 权 (1991-),男,四川自贡人,硕士研究生,主要研究领域为行波管、电真空器件慢波结构. E-mail: yang\_quanteste@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: yywei@uestc.edu.cn

段连续波行波管. 实际测试中, 在 93.1 ~ 94.8 GHz 频段内产生了超过 25 W 的平均功率输出, 3 dB 瞬时带宽达到了 2.2 GHz, 在 93 GHz 到 95.2 GHz 之间, 电子效率为 1.94 % 到 3.88 %<sup>[11]</sup>. 但是, 随着对行波管性能要求的不断提高, 传统慢波结构的行波管已很难兼具大功率和宽带宽的工作性能, 提出新型的慢波结构已成为打破这一瓶颈的重要研究方向. 近年来, 在毫米波、短毫米波频段应用于行波管的慢波结构主要有折叠波导<sup>[12]</sup>、矩形交错双栅<sup>[13]</sup>、正弦波导<sup>[14]</sup>等. 特别是本课题组经过长期研究后提出的正弦波导慢波结构, 其具有优良射频传输特性, 同时又具有结构简单、容易加工等特点, 是一种很有价值的新型毫米波、太赫兹慢波结构<sup>[15]</sup>. 为了进一步提高其纵向电磁强度及耦合阻抗, 本课题组又提出了一种新型平顶型正弦波导慢波结构<sup>[16]</sup>. 基于此, 本文将通过三维电磁仿真软件 HFSS 对工作在 W 波段的平顶型正弦波导的慢波特性进行分析, 并构建两段式新型高频电磁系统. 最后, 利用 CST Microwave Studio 粒子工作室来研究该行波管的注-波相互作用特性, 从而预测该器件的潜在工作性能.

## 1 平顶型正弦波导的慢波特性研究

前期研究表明, 在 G 波段, 正弦波导慢波结构和平顶型正弦波导慢波结构在传输特性上表现相当, 但在 220 GHz 处, 平顶型正弦波导慢波结构较正弦波导慢波结构的平均耦合阻抗提高了 31.1%<sup>[17]</sup>. 通过理论分析发现, 随着耦合阻抗的提高, 那么输出功率也会有较大的提升; 因此, 本文针对 W 波段大功率宽带行波管的设计采用此新型慢波结构.

### 1.1 慢波结构描述

图 1 为平顶型正弦波导慢波的结构模型图. 从图中可以看出, 平顶型正弦波导与常规正弦波导相比, 其金属栅的顶部形状改变为平顶形, 同时平顶型正弦波导也可以看成是常规正弦波导消除金属栅顶部而得到. 图 1 中,  $a$  为波导的宽边,  $b$  为波导的窄边,  $h$  为起伏高度,  $p$  为周期长度,  $h_{b1}$  为削顶之后的电子注通道的高度,  $h_b$  为未削顶的电子注通道的高度, 削顶高度  $h_c = (h_{b1} - h_b)/2$ .

### 1.2 慢波特性分析

在设定工作电压为 18.6 kV, 带状电子注横截面为 0.8 mm × 0.2 mm 的条件下, 确定了一组平顶型正弦波导慢波结构的结构参数. 利用 HFSS 软件对平顶型正弦波导的单周期模型进行计算, 可以获得其色散和耦合阻抗曲线, 如图 2 中所示. 从图中可

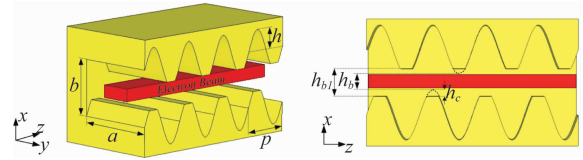


图 1 平顶型正弦波导慢波结构模型图

Fig. 1 The model of TSWG

知, 在 90 ~ 110 GHz 的频段内, 平顶型正弦波导的耦合阻抗大于 3.68 Ω.

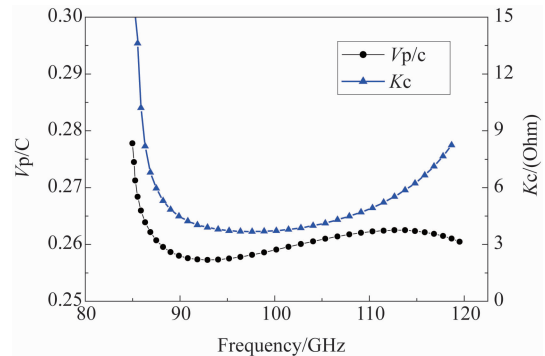


图 2 W 波段平顶型正弦波导的色散特性和耦合阻抗特性

Fig. 2 Dispersion characteristics and interaction impedances of TSWG at W band

为更全面地了解平顶型正弦波导在行波区的慢波特性, 通过改变慢波结构的宽边长度  $a$ , 周期长度  $p$ , 未削顶电子注通道高度  $h_b$ , 以及起伏高度  $h$ , 得到了以上四个结构参数的微小变化对慢波结构的色散特性和耦合阻抗特性的影响.

从图 3 可以看出, 在相同频率下, 随着宽边长度  $a$  的增大, 归一化相速逐渐减小, 耦合阻抗  $K_c$  增大, 在  $a = 1.8p$  附近的色散特性曲线较为平坦.

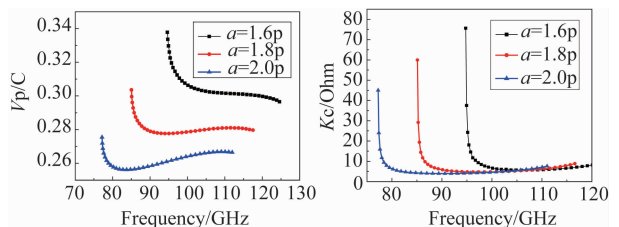


图 3 宽边长度  $a$  对色散特性和耦合阻抗的影响

Fig. 3 Dispersion characteristics and interaction impedances versus broadside length  $a$

从图 4 可以看出, 在相同频率下, 随着周期长度  $p$  的增大, 归一化相速明显增大, 耦合阻抗  $K_c$  明显增大, 而色散特性曲线平坦度变化相对较小.

从图 5 可以看出, 在相同频率下, 随着起伏高度

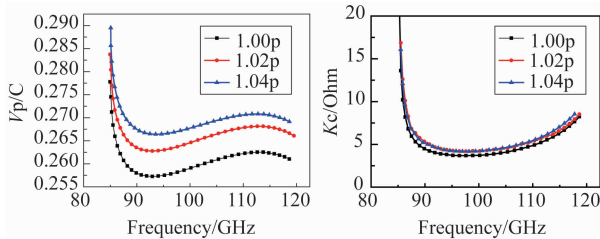


图4 周期长度  $p$  对色散特性和耦合阻抗的影响  
Fig. 4 Dispersion characteristics and interaction impedances versus periodic length  $p$

$h$  的增大,归一化相速逐渐减小,色散特性曲线的平坦度变化较大,耦合阻抗逐渐增大。

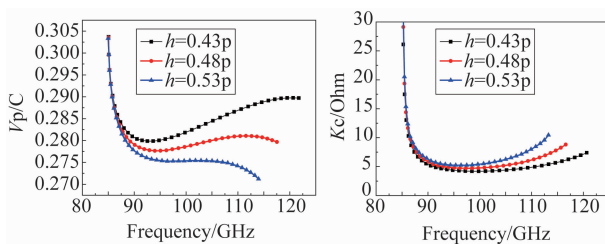


图5 起伏高度  $h$  对色散特性和耦合阻抗的影响  
Fig. 5 Dispersion characteristics and interaction impedances versus undulating height  $h$

从图6可以看出,在相同频率下,随着参数  $h_b$  的减小,归一化相速逐渐增大,色散特性曲线的平坦度变化较小,当  $h_b = 0.5 * h_b1$ ,即  $h_b = 0.17p$ ,此时的耦合阻抗最大。

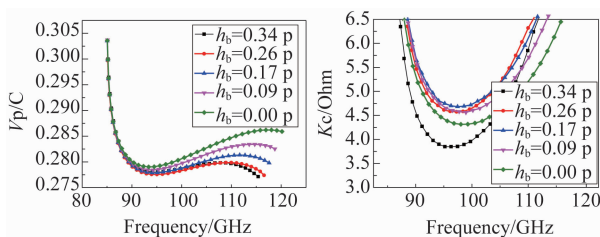


图6 参数  $h_b$  对色散特性和耦合阻抗的影响  
Fig. 6 Dispersion characteristics and interaction impedances versus parameter  $h_b$

该管设计的工作电压小于 20 kV,工作频段为 92 ~ 101 GHz. 通过设计的工作电压反推出归一化相速值的大概范围,保证色散特性曲线在设计频段内较为平坦的同时尽可能使得耦合阻抗较大. 基于此,通过对各参数扫描并分析基本结构参数的变化对平顶型正弦波导在行波区域内的色散特性和耦合阻抗的影响,进行尺寸优化并确定了最终的高频尺寸结构参数. 这不但会为平顶型行波管的结构参数设计

提供指导,还可以对因结构加工误差所引起的慢波特性和变化作出预测。

## 2 射频传输特性及高频系统的设计

除了对其慢波特性的研究外,平顶型正弦波导慢波结构的射频传输特性很大程度上决定了器件的工作性能. 因此,下面将对平顶型正弦波导慢波结构的射频传输特性进行分析并开展高频系统的设计。

### 2.1 平顶型正弦波导的传输特性计算模型

图7为在 CST Microwave Studio 软件中所建立的平顶型正弦波导传输特性计算模型,该模型包括以 80 个平顶型正弦波导的主慢波结构,主慢波结构两端各 6 个渐变过渡结构,而在模型的两端则用具有相同横截面的矩形波导引出. 在计算过程中,模型的外壁材料设置为金属铜,铜的电导率为  $5.8 \times 10^7$  S/m,在考虑到高频损耗和加工等因素后,将其电导率设置为  $2.25 \times 10^7$  S/m<sup>[18-19]</sup>.

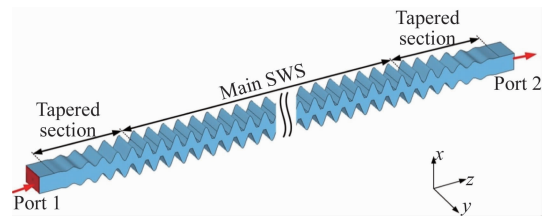


图7 平顶型正弦波导的传输特性计算模型  
Fig. 7 Transmission characteristics calculation model of the TSWG

### 2.2 平顶型正弦波导的传输特性计算结果

利用 CST Microwave Studio 软件中的时域求解器对上述的计算模型进行求解,可以获得该模型的散射参量,计算结果如图8所示,可以看出在 90 ~ 110 GHz 频段内  $S_{11}$  参数小于 -28 dB,  $S_{21}$  大于 -1.2 dB. 在 94 GHz 中心频率处,其损耗低于 0.1 dB/cm,在全频段内,其损耗低于 0.12 dB/cm. 其中  $S_{11}$  为信号端口的反射参量,  $S_{21}$  为信号端口的传输参量. 计算结果表明,平顶型正弦波导慢波结构具反射小和损耗低的特点。

### 2.3 高频系统设计

在毫米波段,为了将微弱的信号放大到较高的功率水平,增益必然要设计得比较高. 但是,单段互作用结构的增益较大时,容易出现返波振荡现象,因此,设计了两段式的互作用结构,中间采用集中衰减器进行隔离. 本文在许雄提出的模型基础上对衰减器和输入输出结构进行优化后提出了一种可行的模型,其整体的高频系统如图9所示. 在图9中,信号

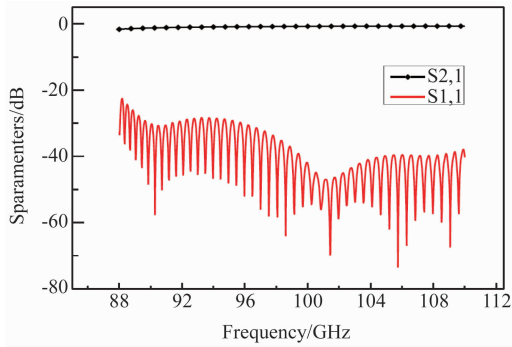


图8 慢波结构传输特性曲线图  
Fig. 8 Transmission characteristic curve of the TSWG

由端口 1 输入,经过输入结构进入第一段慢波结构,与由端口 4 进入的带状电子注在慢波结构中同步并相互作用,带状电子注受到信号的调制而发生电子群聚现象.信号经过衰减器后,信号功率被衰减器吸收转换为热能,而被调制后的带状电子注在第二段慢波结构中又重新激励起高频场,之后与该高频场形成自洽的相互作用.在慢波结构的末端,由于带状电子注将部分直流能量交给了高频场,从而可以从输出端口 2 获得大功率的信号输出.而参与相互作用完了的带状电子注则由端口 3 进入电子光学系统的收集极.

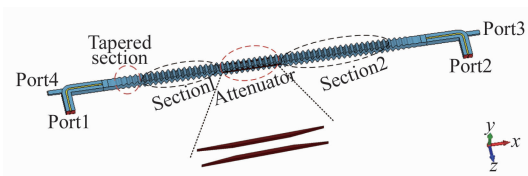


图9 高频系统整体模型设计图  
Fig. 9 Overall model of the high frequency system

通过 CST MWS 中的时域求解器可以对上述的高频系统整体模型进行计算求解.其中,衰减器的渐变段分别为 5 个周期长度,均匀段为 8 个周期长度.边界条件设置为电导率为  $2.25 \times 10^7$  S/m 的无氧铜电导体边界.整个系统传输特性的计算结果如图 10 所示.从图中可知,在 91 ~ 101 GHz 频段内,反射参数  $S_{11}$  小于 -16 dB,传输参数  $S_{21}$  小于 -45 dB,说明整个高频系统具有良好的电磁特性和衰减特性.

### 3 注-波相互作用特性模拟

通过完成对电磁系统参数的基本仿真设计之后,为了进一步研究 W 波段平顶型正弦波导行波管的潜在工作性能,基于上面的尺寸参数,我们利用 CST 软件中的粒子工作室对其注-波相互作用过程进

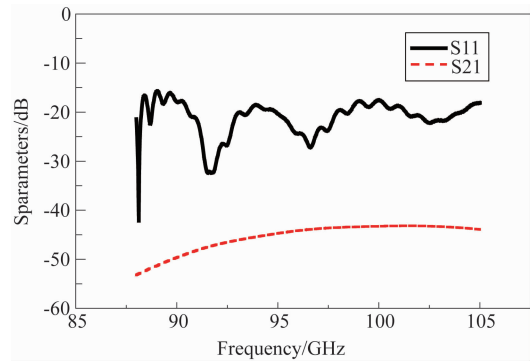


图10 整管模型传输特性曲线图  
Fig. 10 Transmission characteristics of the whole tube model

行了计算分析.通过仿真过程中电子注的运动情况和检测端口的信号变化情况来预测电磁系统的性能.

进行仿真计算时,第一段波导数为 35,第二段波导数设置为 55.为了简化粒子仿真计算模型,这里采用直接注入截面为  $0.8 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$  的理想带状电子注,其中加速电压设置为 18.6 kV,电流为 0.2 A,并设置 1T 的均匀磁场来引导电子注无截获地通过相互作用区.

首先计算 94 GHz 时的注-波相互作用过程,如图 11 所示.图 11 为在慢波结构的末端观察到的带状电子注的群聚图和 3 端口处的电子注横截面图,从图中可以明显可看出电子注顺利地通过了相互作用区.可以看出在输出结构的电子注通道中的电子注虽然发生了较大的横向偏转,有部分电子几乎和金属表面相贴而过,但是所有的电子都正常地通过了相互作用区.

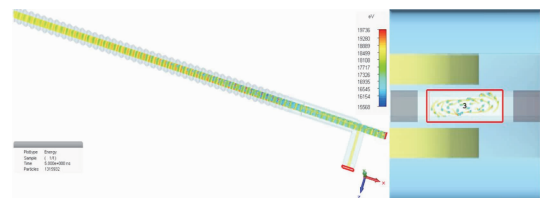


图11 带状电子注的群聚图和流通情况  
Fig. 11 Electron bunching and circulation of the sheet electron beam

图 12 为电子注能量和分布随相互作用的距离的变化情况.首先,由于建模时的全局坐标是以第一个渐变段前的端口中心点作为起始点,因此相互作用的起始点为 -20 mm 处.从图中可以看,在 18.6 kV 电压下,电子注经过相互作用之后,大量的电子被减速,少量的电子被加速,使得电子的总能量减少,减少的

电子能量交给了高频场,使得电磁信号得到了放大.图 13 为输出端口上检测到的信号平均功率图和频谱图,从图中可以明显看出在 2.7 ns 之后,信号的平均功率达到了 323 W 并且稳定,同时从频谱图可以看出,频谱非常纯净.

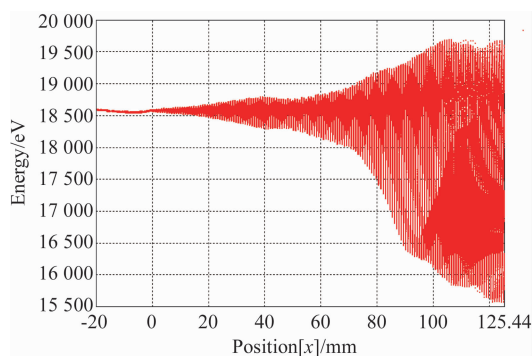


图 12 带状电子注能量随相互作用距离的变化图  
Fig. 12 Beam energy versus longitudinal distance

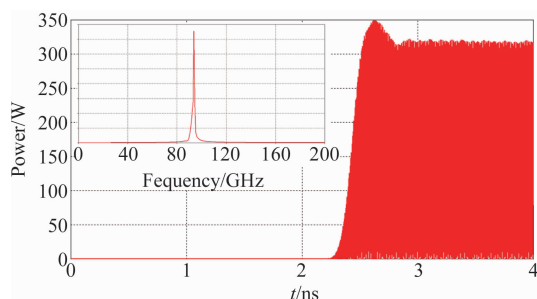


图 13 输出端的时域信号功率和频谱图  
Fig. 13 The signal power and spectrum of the output port

通过对上面各个仿真计算的结果观察,发现所设计的电磁系统能够 94 GHz 出实现有效的注-波相互作用,同时产生 320 W 以上的平均功率输出.

通过改变输入信号的频率,得到如图 14 所示的注-波相互作用的幅频特性曲线.从图中可以看出,在 91 ~ 101 GHz 频段内,获得大于 150 W 的平均功率输出,其中在 92 ~ 101 GHz 频率范围内实现了 200 W 以上的平均功率输出以及 30 dB 以上的增益,电子效率为 5.5 % 到 8.7 %. 在 94 GHz 处,实现了 323 W 的最大平均功率输出和 33.2 dB 最高增益.与 W 波段正弦波导行波管相比,电子效率有了较大的提升.该管工作在 90 ~ 98 GHz 频段内,输入电压为 21.1 kV,注入电流为 0.4 A 时,其电子效率大于 4%<sup>[20]</sup>.

#### 4 结论

针对宽带大功率平顶型正弦波导慢波结构行波

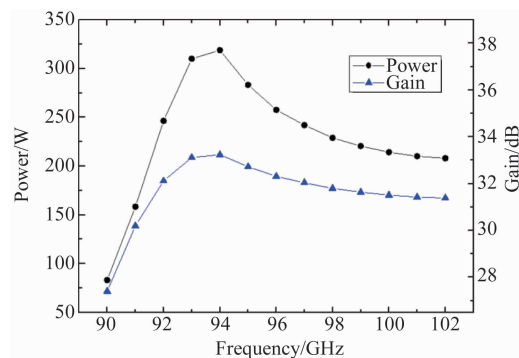


图 14 同一输入功率下的幅频特性  
Fig. 14 Amplitude-frequency characteristics at the same input power

管进行了理论研究.通过模拟计算方法,对该种平顶型正弦波导的色散特性、耦合阻抗特性、传输特性展开了分析工作,并预测了该器件的注-波相互作用特性.研究表明,本文研究的 W 波段平顶型正弦波导行波管具有宽带宽、大功率、高增益的潜在工作性能,在 92 ~ 101 GHz 的频率范围内产生超过 200 W 的平均功率输出,电子效率大于 5.5 %. 在典型频点 94 GHz 处,最大功率输出达到了 323 W.

#### References

- [1] FENG Jin-Jun, HU Yin-Fu, CAI Jun, *et al.* Review of the development of W band traveling wave tube[J]. *Vacuum electronic technology* (冯进军, 胡银富, 蔡军, 等. W 波段行波管发展评述. *真空电子技术*), 2010, **2**:27-32.
- [2] GUAN Zhao-Hui. Current situation and development trend of traveling wave tube technology [J]. *Vacuum electronic technology* (官朝晖. 行波管技术现状与发展趋势. *真空电子技术*), 2011, **6**:41-43.
- [3] LI Zhuo-Cheng. Current situation and development of foreign space traveling wave tube amplifier[J]. *Space electronic technology* (李卓成. 国外空间行波管放大器现状与发展. *空间电子技术*), 2012, **9**(4):28-34.
- [4] Thales Electron Device TH4402. [www.thalesgroup.com/electrondevices](http://www.thalesgroup.com/electrondevices).
- [5] Theiss A J, Meadows C J, Montgomery K L, *et al.* Development of a high average power W-band TWT[C]// *Vacuum Electronics Conference*, 2008. *IVEC 2008. IEEE International. IEEE*, 2008:197-198.
- [6] REN Da-Peng, CAI Jun, HU Yin-Fu, *et al.* Design of W band wide-band spiral traveling wave tube[J]. *Journal of Terahertz Science and electronic information Technology*. (任大鹏, 蔡军, 胡银富, 等. W 波段宽带螺旋线行波管设计. *太赫兹科学与电子信息学报*), 2016, **14**(1):31-33.
- [7] CAI Jun, FENG Jin-Jun, HU Yin-Fu, *et al.* Oscillation suppression of a W band folded waveguide traveling wave tube[J]. *High power laser and particle beams*. (蔡军, 冯进军, 胡银富, 等. W 波段折叠波导行波管振荡抑制. *强激光与粒子束*), 2013, **25**(5):1195-1199.
- [8] XU Xiong, WEI Yan-Yu, LAI Jian-Qiang, *et al.* Theoretic

- cal study on the electromagnetic system of W band kW sinusoidal guided traveling wave tube [J]. *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*. (许雄, 魏彦玉, 赖剑强, 等. W 波段千瓦级正弦波导行波管电磁系统的理论研究. *中国科学: 物理学力学天文学*), 2012, **3**:230 - 236.
- [9] WANG Yan-Jun, WANG Li, LUO Yong. Dispersion analysis of spiral wavy waveguides of W band gyro TWT [J]. *High power laser and particle beams*. (王艳军, 王丽, 罗勇. W 波段回旋行波管螺旋波导色散分析. *强激光与粒子束*), 2016, **28**(2):65 - 69.
- [10] DENG Xue, TANG Yong, LUO Yong, *et al.* Simulation design and thermal test of W band Gyrotron [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (邓学, 唐勇, 罗勇, 等. W 波段回旋行波管仿真设计与热测实验. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(5):569 - 575.
- [11] Wei Y, Guo G, Gong Y, *et al.* Novel W-band ridge-loaded folded waveguide traveling wave tube [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, **35**(10):1058 - 1060.
- [12] FENG Jin-Jun, CAI Jun, HU Yin-Fu, *et al.* Study of terahertz vacuum devices with folded waveguide slow wave structure [J]. *Journal of china academy of electronics and information technology* (冯进军, 蔡军, 胡银富, 等. 折叠波导慢波结构太赫兹真空器件研究. *中国电子科学研究院学报*), 2009, **4**(3):249 - 254.
- [13] Shin Y M, Barnett L R. Intense wideband terahertz amplification using phase shifted periodic electron-plasmoncoupling [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(9):132.
- [14] XU Xiong, WEI Yan-Yu, SHEN Fei, *et al.* Study on the slow wave structure of sinusoidal waveguides. *Vacuum electronic technology* (许雄, 魏彦玉, 沈飞, 等. 正弦波导慢波结构的研究. *真空电子技术*), 2012, **3**:17 - 22.
- [15] Zhang L, Wei Y, Guo G, *et al.* A ridge-loaded sine waveguide for S G S -band traveling-wave tube [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, **44**(11):2832 - 2837.
- [16] ZHANG Lu-Qi, WEI Yan-Yu, XU Jin, *et al.* A flat top sinusoidal waveguide slow wave structure: Chinese patent [P]. (张鲁奇, 魏彦玉, 徐进, 等. 一种平顶型正弦波导慢波结构: 中国专利), CN 105869971 A [P]. 2016. 08. 17.
- [17] Zhang Lu-Qi, Wei Yan-Yu, Xu Jin, *et al.* A truncated sine waveguide for G-band TWT [C]. *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, London, United Kingdom, 2017:1 - 2.
- [18] Kory C L, Read M E, Ives R L, *et al.* Design of overmoded interaction circuit for 1-kW 95-GHz TWT [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, **56**(5):713 - 720.
- [19] Hu Y, Feng J, Cai J, *et al.* Design and experimental study of a wide band width W-band folded waveguide continuous-wave TWT [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, **42**(10):3380 - 3386.
- [20] XU Xiong, WEI Yan-Yu, Lai Jian-Qiang, *et al.* Theoretical study on the electromagnetic system of W band kW sinusoidal guided traveling wave tube [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* (许雄, 魏彦玉, 赖剑强, 等. W 波段千瓦级正弦波导行波管电磁系统的理论研究. *中国科学: 物理学力学天文学*), 2012, **3**:230 - 236.

\*\*\*  
(上接第 234 页)

- [21] Hapke B, WELLS E. Bidirectional reflectance spectroscopy: 2. Experiments and observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, **86**(B4):3055 - 3060.
- [22] Shepard M K, Helfenstein P. A test of the Hapke photometric model [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, **112**(E3).
- [23] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 3. Correction for macroscopic roughness [J]. *Icarus*, 1984, **59**(1):41 - 59.
- [24] Helfenstein P. The geological interpretation of photometric surface roughness [J]. *Icarus*, 1988, **73**(3):462 - 481.
- [25] Seeliger H. *Theorie der Beleuchtung staubförmiger kosmischer Massen insbesondere des Saturnringes* [M]. Franz, 1893.
- [26] Hapke B, Nelson R, Smythe W. The opposition effect of the Moon: Coherent backscatter and shadow hiding [J]. *Icarus*, 1998, **133**(1):89 - 97.
- [27] Helfenstein P, Veverka J, Hillier J. The lunar opposition effect: A test of alternative models [J]. *Icarus*, 1997, **128**(1):2 - 14.
- [28] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 4. The extinction coefficient and the opposition effect [J]. *Icarus*, 1986, **67**(2):264 - 280.
- [29] McGuire A F, Hapke B W. An experimental study of light scattering by large, irregular particles [J]. *Icarus*, 1995, **113**(1):134 - 155.
- [30] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy 7: The single particle phase function hockey stick relation [J]. *Icarus*, 2012, **221**(2):1079 - 1083.
- [31] Hapke B, Denevi B, Sato H, *et al.* The wavelength dependence of the lunar phase curve as seen by the Lunar Reconnaissance Orbiter wide-angle camera [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E12).
- [32] Yan B, Wang R, Gan F, *et al.* Minerals mapping of the lunar surface with Clementine UVVIS/NIR data based on spectra unmixing method and Hapke model [J]. *Icarus*, 2010, **208**(1):11 - 19.
- [33] Taylor L A, Pieters C M, Keller L P, *et al.* Lunar mare soils: Space weathering and the major effects of surface-correlated nanophase Fe [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, **106**(E11):27985 - 27999.
- [34] Hamilton V E, Morris R V, Gruener J E, *et al.* Visible, near-infrared, and middle infrared spectroscopy of altered basaltic tephros: Spectral signatures of phyllosilicates, sulfates, and other aqueous alteration products with application to the mineralogy of the Columbia Hills of Gusev Crater, Mars [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, **113**(E12).