

W 波段阶梯型交错双栅慢波结构行波管的研究

王海龙^{1,2}, 石先宝³, 王战亮¹, 官玉彬^{1*}

- (1. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 610054;
2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610000;
3. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要: 为了提高传统交错双栅慢波结构行波管的性能, 提出了一种阶梯型交错双栅慢波结构, 并基于此新型慢波结构, 提出了新型输入输出耦合结构. 在此基础上, 设计了一只工作在 W 波段的带状电子注阶梯型交错双栅慢波结构行波管. 计算结果显示, 阶梯型交错双栅慢波结构行波管的耦合阻抗更高, 从而使行波管在更短的互作用电路长度里, 实现更高的饱和增益和互作用效率. 在 90~100 GHz 频率范围内, 阶梯型交错双栅慢波结构的耦合阻抗大于 4 Ω, 高于传统交错双栅慢波结构; W 波段带状电子注行波管高频结构的反射系数 (S_{11}) 小于 -15 dB; 并且行波管的饱和输入功率仅约为 0.7 W, 可以实现最高输出功率约 800 W, 相应的效率大于 7.8%, 增益大于 30.6 dB.

关键词: 阶梯型交错双栅慢波结构; 带状电子注行波管; 低饱和输入功率; 高饱和增益
中图分类号: O46 **文献标识码:** A

Research on W band step-type staggered double vane slow wave structure traveling wave tube

WANG Hai-Long^{1,2}, SHI Xian-Bao³, WANG Zhan-Liang¹, GONG Yu-Bin^{1*}

- (1. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
2. The 29th institute of CETC, Chengdu 610000, China;
3. The 41th institute of CETC, Qingdao 266555, China)

Abstract: In order to improve the performance of traditional staggered double vane (SDV) traveling wave tube (TWT), a new kind of step-type staggered double vane (SSDV) slow wave structure (SWS) is proposed, and a new type of input/output coupling structure is designed based on this novel SWS. Moreover, a W band sheet electron beam SSDV SWS TWT is designed in this work. The calculation results show that the SSDV SWS TWT has a higher interaction impedance, so that it can achieve a higher saturated gain and higher interaction efficiency in a less interaction circuit length. In the frequency range of 90~100 GHz, the interaction impedance of SSDV SWS is greater than 4 Ω, which is higher than the traditional SDV SWS. The reflect ratio (S_{11}) of high frequency structure of W band sheet electron beam TWT is less than -15 dB. Moreover, the saturated input power of the traveling wave tube is only about 0.7 W, and the maximum output power can be about 800 W, the corresponding efficiency is more than 7.8%, and the gain is more than 30.6 dB.

Key words: step-type staggered double vane slow wave structure, sheet electron beam traveling wave tube, low saturation input power, high saturation gain

PACS: 04.30.Nk, 85.45.Bz, 84.40.Fe

收稿日期:2018-06-09, 修回日期:2018-09-27

Received date: 2018-06-09, revised date: 2018-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(61531010)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61531010)

作者简介 (Biography): 王海龙(1979-), 男, 黑龙江拜泉人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究领域为功率电子技术. E-mail: whlwell@163.com

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

引言

因交错双栅慢波结构简单、加工难度低,全金属结构、功率容量大,有天然的带状电子注通道、能够输入更高的直流驱动功率等优点,近年来被广泛关注^[1-5]. 2015 年,电子科技大学利用交错双栅慢波结构研制了一只新型可调谐小型化 PCM 聚焦的交错双栅慢波结构带状注行波管,并在试验中验证了 PCM 聚焦系统的可行性,为带状电子注行波管的发展奠定了理论和实验基础^[2]. 2012 年,电子科技大学利用此慢波结构设计了两只工作在 W 波段的行波管,其中圆形电子注行波管工作在 95 GHz 时,有最大平均输出功率,约为 144.5 W,效率约 2.8%^[5];带状电子注行波管工作在 93 GHz 时,有最大平均输出功率,约为 625.5 W,效率约 6%^[4]. 2015 年,北京航空航天大学设计了一只 W 波段多注交错双栅行波管,当工作在 94 GHz 时,有最大平均输出功率,约为 1128 W,效率约为 6.1%^[6]. 美国加州大学戴维斯分校还利用此慢波结构设计了一只工作在 220 GHz 的带状注行波管,设计结果显示,当行波管工作在 220 GHz 时,输出功率可达 160 W^[7-10].

为了提高传统交错双栅慢波结构的耦合阻抗,使其有更高的相互作用效率,本文基于传统交错双栅慢波结构提出了阶梯形交错双栅慢波结构,并设计了一只工作在 W 波段的阶梯形交错双栅慢波结构行波管. 计算结果表明,阶梯型交错双栅慢波结构有更高的耦合阻抗. W 波段阶梯形交错双栅慢波结构行波管在整个频带内增益比传统交错双栅慢波结构行波管的增益高 4 dB. 并且,阶梯型交错双栅慢波结构行波管具有更低的饱和输入功率和更高的相互作用效率.

1 W 波段阶梯型交错双栅慢波结构的色散特性和耦合阻抗

慢波结构是行波管中电磁波与电子注相互作用发生能量交换的场所,慢波结构直接决定器件的工作方式和性能,因此是行波管内最为重要的部件. 为了能够提高器件的性能,本文对交错双栅慢波结构进行了结构优化,提出了阶梯型交错双栅慢波结构,其优化的阶梯型慢波结构及传统慢波结构如下图所示 1 所示.

由图 1 可知,阶梯型交错双栅慢波结构是由传统交错双栅慢波结构的栅结构做二级阶梯变换变形

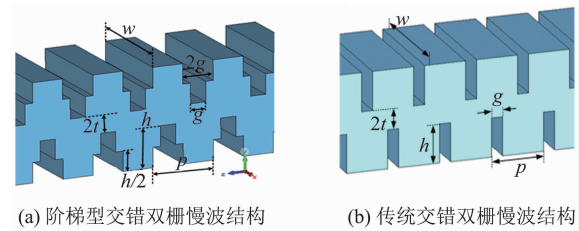


图 1 阶梯型交错双栅慢波结构及常规慢波结构示意图 (a)阶梯型交错双栅慢波结构, (b)传统交错双栅慢波结构

Fig. 1 The sketches of the SSDV SWS and its original SWS

而来. 理论分析可知,在传统交错双栅慢波结构的槽内沿宽边增加金属结构,能够对结构内的电场进行优化,使电场能够更加集中在电子注区域. 利用专业设计软件对两种结构的电场进行计算,结果如下图所示 2 所示.

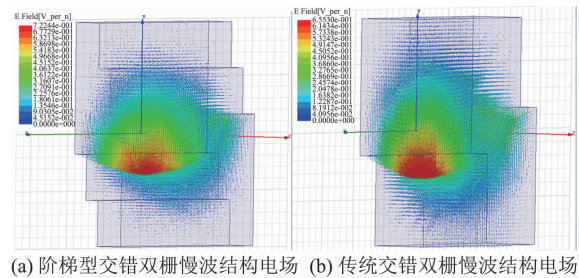


图 2 阶梯型交错双栅慢波结构及常规慢波结构中电场分布示意图 (a)阶梯型交错双栅慢波结构电场, (b)传统交错双栅慢波结构电场

Fig. 2 The electric field of the SSDV SWS and its original SWS

通过图 2 可知,两种慢波结构中的电场分布均为 TE₁₀ 模式,因此其工作模式均为 TE₁₀ 模式. 并且阶梯型交错双栅慢波结构的电场强度比常规交错双栅慢波结构的电场强度更大. 这意味着,阶梯型交错双栅慢波结构的纵向电场分量更大,由下面的耦合阻抗公式分析可知,阶梯型交错双栅慢波结构将会有更高的相互作用阻抗. 慢波结构耦合阻抗表达式为:

$$Z_c = \frac{E_{zn}^2}{(2\beta_n^2 P)} \quad (1)$$

其中, n 为慢波结构工作的谐波次数, P 是通过慢波系统中所有空间谐波的总功率流, β_n 为第 n 次谐波的相位常数, E_{zn} 是慢波结构中电子注所在位置第 n 次空间谐波的纵向电场幅值.

为了对两种慢波结构的色散特性做详细的对比研究,本文设计了工作在 W 波段的慢波结构. 并且

为了让对比分析结果有效,在尽量保证大部分尺寸相同的前提下,使两种 W 波段慢波结构的工作带宽基本相同. 经优化后,两种结构的尺寸如下表 1 所示.

表 1 两种慢波结构尺寸对比表

Table 1 Structural parameters of the two kinds of SWS

参数	阶梯型交错双栅慢波结构	传统交错双栅慢波结构
w	1.80 mm	1.80 mm
p	1.07 mm	1.07 mm
g	0.27 mm	0.27 mm
$2t$	0.35 mm	0.35 mm
h	0.66 mm	0.80 mm

由表 1 数据可知,两种慢波结构的尺寸除了栅的高度 h 不同之外,其余的尺寸均相同. 基于上表中的尺寸参数,我们对两种慢波结构的色散特性和耦合阻抗进行计算,结果如下图 3 所示.

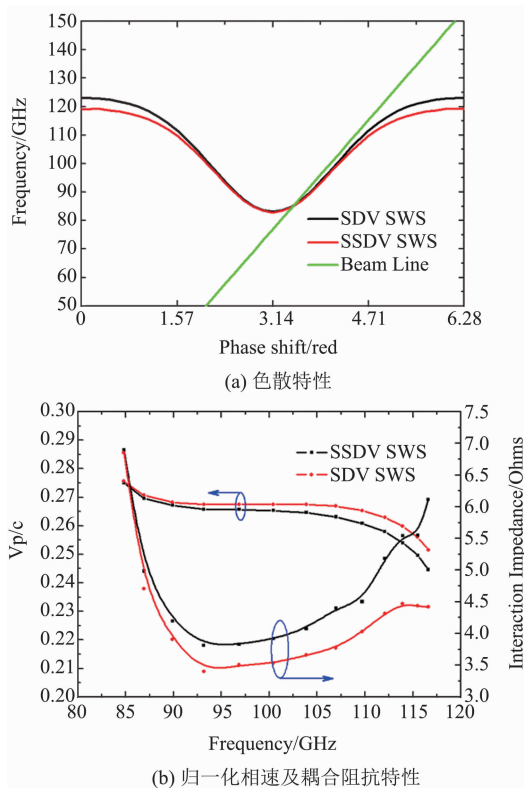


图 3 W 波段两种慢波结构色散特性和耦合阻抗对比图 (a) 色散特性, (b) 归一化相速及耦合阻抗特性
Fig. 3 The dispersion characteristics and the interaction impedance for the two kinds of SWS working in W band

由图 3(a) 可知,两种慢波结构都工作在 W 波段时,均工作在 -1 次空间谐波. 由于行波管工作时,电子注要与电磁波同步,由图可知,两种慢波结构的工作带宽基本相同(90 ~ 100 GHz).

在图 3(b) 所示的两种 W 波段慢波结构色散特性对比图中,两条黑色曲线代表 W 波段阶梯型交错双栅慢波结构的归一化相速及耦合阻抗;红色曲线表示 W 波段传统交错双栅慢波结构的归一化相速及耦合阻抗. 由图可知,两种慢波结构的归一化相速平坦,这意味着两种慢波结构都有较宽的工作带宽(90 ~ 100 GHz). 但是,阶梯型交错双栅慢波结构的归一化相速较常规结构而言偏小,这意味着阶梯型交错双栅慢波结构行波管的最佳工作电压更低. 同时,由图可知,整个频带内阶梯型交错双栅慢波结构的耦合阻抗要比传统慢波结构的耦合阻抗高大于 0.5Ω (约 15%),这意味着阶梯型交错双栅慢波结构行波管的互作用效率更高.

2 W 波段阶梯型交错双栅慢波结构行波管的传输特性

为了能够让微波信号顺利输入慢波结构内部,和电子注进行有效互作用,经过注-波互作用后,被放大的微波信号又能顺利输出,本文提出了一种适合于阶梯型交错双栅慢波结构行波管的输入输出结构,如下图 4 所示.

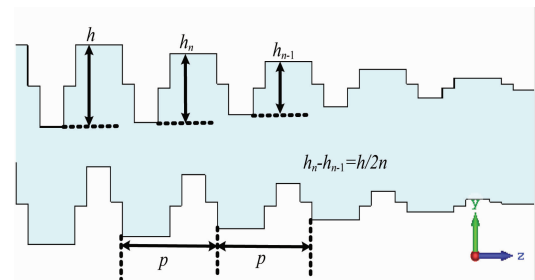


图 4 W 波段阶梯型交错双栅慢波结构行波管的输入输出结构
Fig. 4 The input/output structure for W band SSDV SWS TWT

由图 4 可知,阶梯型交错双栅慢波结构行波管的输入输出结构由对栅的高度进行等差变换而得,栅的高度变换规律如图所示,为 $h_n - h_{n-1} = h/2n$,其中 n 为变换阶数. 通过优化后,选择 5 级变换 ($n = 5$) 时,整个行波管的高频结构及其传输特性如图 5 和图 6 所示.

图 6 中 S_{11} 和 S_{22} 分别表示输入端口 (Port 1) 和输出端口 (Port 2) 的反射系数, S_{21} 和 S_{12} 分别表示输入端口和输出端口之间的传输系数. 由图可知,输入输出端口的反射系数在整个频带内小于 -15 dB. 反射系数较小,说明本文提出的渐变式输入输出结构

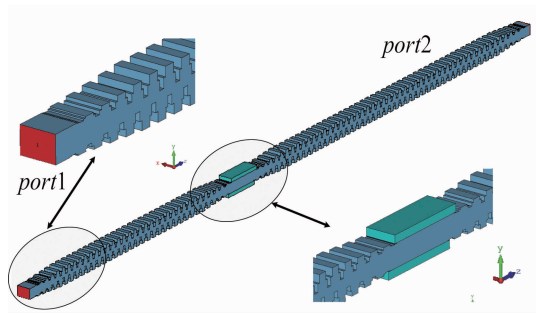


图5 W 波段阶梯型交错双栅慢波结构行波管的高频结构

Fig. 5 The high-frequency structure for the W band SS-DV SWS TWT

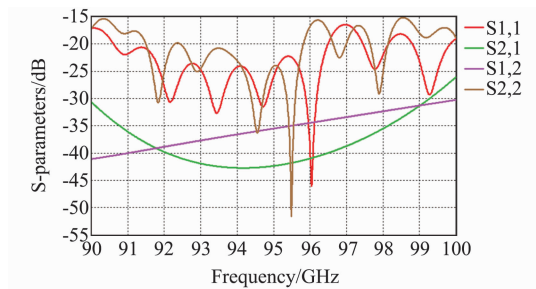


图6 W 波段阶梯型交错双栅慢波结构行波管的传输特性

Fig. 6 The S-parameters for the W band SS-DV SWS TWT

能够使得信号顺利输入/输出行波管的高频结构;而传输系数在整个频带内小于 -25 dB,说明设计的吸收体能够有效抑制返波振荡。

3 W 波段阶梯型交错双栅慢波结构行波管的注波相互作用分析

对高频特性优化确定以后,最后对行波管的注波相互作用特性进行研究以确定行波管放大微波信号的能力.本文对 W 波段阶梯型交错双栅慢波结构行波管和 W 波段传统交错双栅慢波结构行波管的注波相互作用特性均进行了研究,并对其性能进行了详细对比分析。

3.1 中心频率两种行波管的注波相互作用对比分析

当行波管工作在中心频率 95 GHz 时,利用粒子模拟优化阶梯型交错双栅慢波结构行波管的最佳相互作用电压为 20.5 kV,传统交错双栅慢波结构行波管的最佳相互作用电压为 20.6 kV,工作电流均为 0.5 A.此时两种交错双栅慢波结构行波管的输出功率随输入功率的变化如下图 7 所示.由图可知,阶梯型

交错双栅慢波结构行波管的饱和输入功率约为 0.7 W,饱和输出功率约为 741 W,饱和增益约为 30.25 dB.而传统交错双栅慢波结构行波管的饱和输入功率达 2 W,饱和输出功率约为 800 W,饱和增益仅为约为 26.02 dB.由此可见,阶梯型交错双栅慢波结构行波管的饱和输入功率更低,而饱和增益更高。

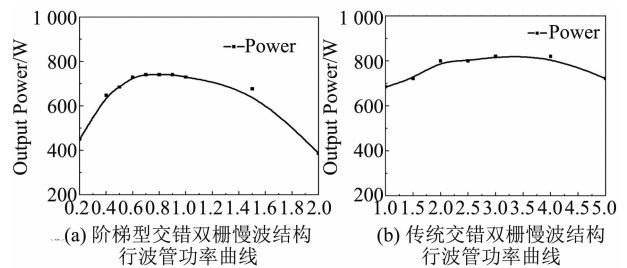


图7 W 波段阶梯型交错双栅慢波结构及传统交错双栅慢波结构行波管输出功率随输入功率变化曲线(a)阶梯型交错双栅慢波结构行波管功率曲线,(b)传统交错双栅慢波结构行波管功率曲线

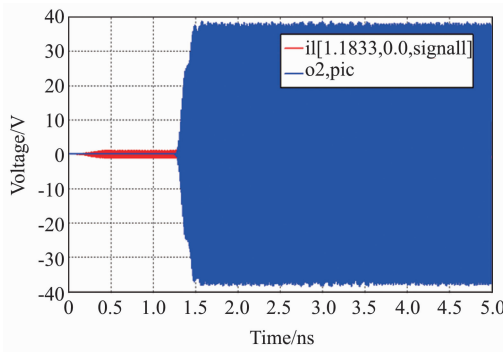
Fig. 7 The output power versus input power for the W band SS-DV SWS TWT and the original SWS TWT

图 8 为两种交错双栅慢波结构行波管工作在 95 GHz 时,在饱和输入功率工作时,输出端口信号图.由图可知,阶梯型交错双栅慢波结构行波管输入信号(红色)电压幅值为 1.1833,此时平均输入功率为 0.7 W.并且,当行波管工作 1.5 ns 后,输出信号(蓝色)电压幅值稳定在 38.5,此时平均输出功率为 741 W,并且输出信号幅值稳定,说明没有振荡发生.传统交错双栅慢波结构行波管的输入功率为 2 W,同样工作在 1.5 ns 后,能够稳定输出平均功率约 800 W。

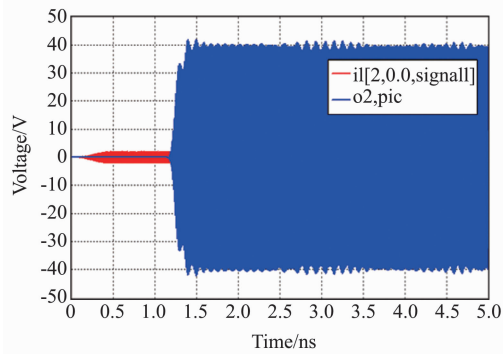
图 9 为两种交错双栅行波管工作 1.5 ns 稳定后的电子相空间图及电子群聚图.由图可知,两种行波管的电子均能够在最佳相互作用电压的作用下发生有效群聚,并且大部分电子的能量降低交给电磁波,从而使电磁波的能量得到放大.值得注意的是,阶梯型交错双栅慢波结构行波管的最佳相互作用长度比传统交错双栅慢波结构行波管的最佳相互作用长度短约 10 周期.这是因为,阶梯型交错双栅行波管的耦合阻抗更高,使得行波管耦合能量效率更高,从而使其能够在较短的相互作用长度达到饱和。

3.2 整个频带内两种行波管的注波相互作用对比

通过对工作在 95 GHz 时两种交错双栅慢波结构行波管的注波相互作用特性进行详细对比分析,结果如表 2 所示.由表 2 可知,阶梯型交错双栅慢波结



(a) 阶梯型交错双栅慢波结构行波管端口信号图



(b) 传统交错双栅慢波结构行波管端口信号图

图 8 两种交错双栅慢波结构行波管工作在 95 GHz 时输入信号及输出信号图 (a) 阶梯型交错双栅慢波结构行波管端口信号图, (b) 传统交错双栅慢波结构行波管端口信号图

Fig. 8 Input/output signal while the two kinds of SDV TWT working at 95 GHz

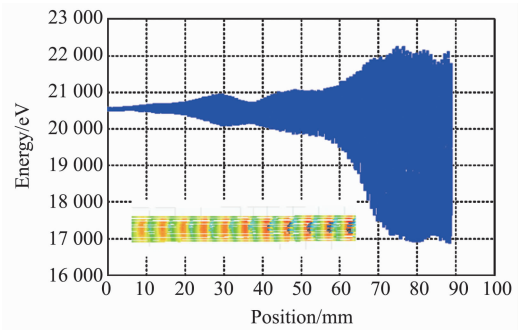
构行波管的最佳工作电压比传统交错双栅慢波结构行波管的最佳工作电压低, 并且阶梯型交错双栅慢波结构行波管的饱和输入功率更低, 饱和输出增益更高, 这与两种慢波结构高频特性分析结果相吻合.

表 2 两种交错双栅慢波结构行波管工作在 95 GHz 时注波相互作用对比表

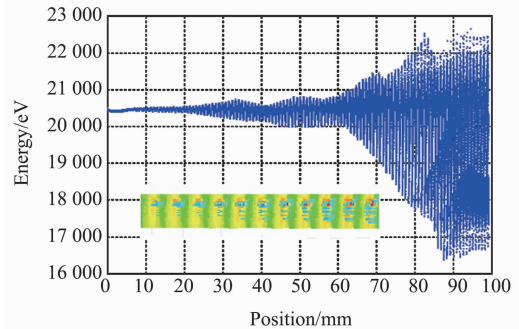
Table 2 Beam-wave interaction for the two kinds of SDV SWS TWT working at 95 GHz

参数	阶梯型交错双栅慢波结构	传统交错双栅慢波结构
工作电压/kV	20.5	20.6
工作电流/A	0.5	0.5
饱和输入功率/W	0.7	2
饱和输出功率/W	741	800
饱和增益/dB	30.25	26.02

为了对比分析两种交错双栅慢波结构行波管的整体性能, 本文对工作在 90 ~ 100 GHz 时的两种交错双栅慢波结构行波管的注波相互作用特性进行了计算, 结果如图 10 所示. 其中黑色曲线表示阶梯型交错双栅慢波结构行波管在整个频带内的输出功率和增益, 红色曲线表示传统交错双栅慢波结构行波管



(a) 阶梯型交错双栅慢波结构行波管电子相空间图



(b) 传统交错双栅慢波结构行波管电子相空间图

图 9 两种交错双栅慢波结构行波管稳定的电子相空间图 (a) 阶梯型交错双栅慢波结构行波管电子相空间图, (b) 传统交错双栅慢波结构行波管电子相空间图

Fig. 9 Stable phase space plot of the bunched electron beam of the two kinds of SDV TWT

的输出功率和增益.

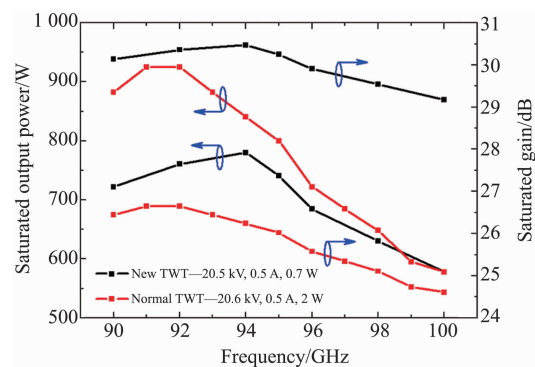


图 10 两种行波管在整个频带内饱和功率及饱和增益工作特性

Fig. 10 The performance for the two kinds of TWT working in the frequency range of 90 ~ 100 GHz

由图可知, 阶梯型交错双栅慢波结构行波管整个频带内最高输出功率约为 800 W, 并且整个频带增益大于 29 dB, 而传统交错双栅慢波结构行波管在整个频带内增益均小于 27 dB. 通过对比发现, 在整个频带内, 阶梯型交错双栅慢波结构行波

管的增益比传统交错双栅慢波结构行波管的增益高 4 dB.

4 结论

基于传统的交错双栅慢波结构,本文提出了一种阶梯型交错双栅慢波结构,它由传统交错双栅慢波结构的栅高度做两级变换而来.通过研究发现,阶梯型交错双栅慢波结构有更高的互作用阻抗.在整个工作频带内(90 ~ 100 GHz),阶梯型交错双栅慢波结构的耦合阻抗大于 4 Ω .同时,设计了一只工作在 W 波段的阶梯型交错双栅慢波结构行波管,通过注-波相互作用计算发现,当工作电压 20.5 kV,工作电流 0.5 A 时,行波管的饱和输入功率约为 0.7 W,能够降低行波管寻求驱动功率源的难度.当行波管工作在 94 GHz 时,有最大输出功率约为 800 W,行波管的效率从约 6% 提升到大于 7.8%;除此之外,W 波段阶梯型交错双栅慢波结构行波管的增益在整个工作频带内大于 29 dB,比传统交错双栅慢波结构行波管的增益高 4 dB.本文的工作能够为高增益短毫米波行波管的设计提供理论支持.

References

- [1] Shi X, Wang Z, Tang X, *et al.* Study on wideband sheet beam traveling wave tube based on staggered double vane slow wave structure [J]. *IEEE Transactions On Plasma Science*, 2014, **42**(12), 3996 - 4003.
- [2] Shi X, Wang Z, Tang T, *et al.* Theoretical and experimental research on a novel small tunable PCM System in staggered double vane TWT [J]. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 2015, **62**(12), 1 - 7.
- [3] Shi X, Billa L R, Gong Y, *et al.* High efficiency and high power staggered double vane TWT amplifier enhanced by velocity-taper design [J]. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2016, **66**:39 - 46.
- [4] Lai J, Gong Y, Xu X, *et al.* W-band 1 kW staggered double vane traveling-wave tube [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, **59**(2): 496 - 503.
- [5] Lai J Q, Wei Y Y, Liu Y, *et al.* A staggered double vane circuit for a W-band traveling-wave tube amplifier [J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(6):068403.
- [6] Ruan C J, Zhang M W, Dai J, *et al.* W-band multiple beam staggered double-vane traveling wave tube with broad band and high output power [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, **43**(7):2132 - 2138.
- [7] Shin Y M, Barnett L R, Luhmann N C. Phase-shifted traveling-wave-tube circuit for ultrawideband high-power submillimeter-wave generation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, **56**(5):706 - 712.
- [8] Shin Y M, Baig A, Barnett L R, *et al.* Modeling investigation of an ultrawideband terahertz sheet beam traveling-wave tube amplifier circuit [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(9):3213 - 3218.
- [9] Shin Y M, Baig A, Barnett L *et al.* System design analysis of a 0.22 THz sheet-beam traveling-wave tube amplifier [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, **59**(1):234 - 240.
- [10] Shin Y M, Zhao J, Barnett L R, *et al.* Investigation of terahertz sheet beam traveling wave tube amplifier with nanocomposite cathode [J]. *Physics of Plasmas*, 2010, **17**(12): 10.1063/1.3525098.
- [11] Shi X, Wang Z, Tang X, *et al.* Study on wideband sheet beam traveling wave tube based on staggered double vane slow wave structure [J]. *IEEE Transactions On Plasma Science*, 2014, **42**(12), 3996 - 4003.
- [12] Shi X, Wang Z, Tang T, *et al.* Theoretical and experimental research on a novel small tunable PCM System in staggered double vane TWT [J]. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 2015, **62**(12), 1 - 7.
- [13] Shi X, Billa L R, Gong Y, *et al.* High efficiency and high power staggered double vane TWT amplifier enhanced by velocity-taper design [J]. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2016, **66**:39 - 46.
- [14] Lai J, Gong Y, Xu X, *et al.* W-band 1 kW staggered double vane traveling-wave tube [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, **59**(2): 496 - 503.
- [15] Lai J Q, Wei Y Y, Liu Y, *et al.* A staggered double vane circuit for a W-band traveling-wave tube amplifier [J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(6):068403.
- [16] Ruan C J, Zhang M W, Dai J, *et al.* W-band multiple beam staggered double-vane traveling wave tube with broad band and high output power [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, **43**(7):2132 - 2138.
- [17] Shin Y M, Barnett L R, Luhmann N C. Phase-shifted traveling-wave-tube circuit for ultrawideband high-power submillimeter-wave generation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, **56**(5):706 - 712.
- [18] Shin Y M, Baig A, Barnett L R, *et al.* Modeling investigation of an ultrawideband terahertz sheet beam traveling-wave tube amplifier circuit [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(9):3213 - 3218.
- [19] Shin Y M, Baig A, Barnett L *et al.* System design analysis of a 0.22 THz sheet-beam traveling-wave tube amplifier [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, **59**(1):234 - 240.
- [20] Shin Y M, Zhao J, Barnett L R, *et al.* Investigation of terahertz sheet beam traveling wave tube amplifier with nanocomposite cathode [J]. *Physics of Plasmas*, 2010, **17**(12): 10.1063/1.3525098.
- [21] Shi X, Wang Z, Tang X, *et al.* Study on wideband sheet beam traveling wave tube based on staggered double vane slow wave structure [J]. *IEEE Transactions On Plasma Science*, 2014, **42**(12), 3996 - 4003.
- [22] Shi X, Wang Z, Tang T, *et al.* Theoretical and experimental research on a novel small tunable PCM System in staggered double vane TWT [J]. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 2015, **62**(12), 1 - 7.
- [23] Shi X, Billa L R, Gong Y, *et al.* High efficiency and high power staggered double vane TWT amplifier enhanced by velocity-taper design [J]. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2016, **66**:39 - 46.
- [24] Lai J, Gong Y, Xu X, *et al.* W-band 1 kW staggered double vane traveling-wave tube [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, **59**(2): 496 - 503.
- [25] Lai J Q, Wei Y Y, Liu Y, *et al.* A staggered double vane circuit for a W-band traveling-wave tube amplifier [J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(6):068403.
- [26] Ruan C J, Zhang M W, Dai J, *et al.* W-band multiple beam staggered double-vane traveling wave tube with broad band and high output power [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, **43**(7):2132 - 2138.
- [27] Shin Y M, Barnett L R, Luhmann N C. Phase-shifted traveling-wave-tube circuit for ultrawideband high-power submillimeter-wave generation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, **56**(5):706 - 712.
- [28] Shin Y M, Baig A, Barnett L R, *et al.* Modeling investigation of an ultrawideband terahertz sheet beam traveling-wave tube amplifier circuit [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(9):3213 - 3218.
- [29] Shin Y M, Baig A, Barnett L *et al.* System design analysis of a 0.22 THz sheet-beam traveling-wave tube amplifier [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, **59**(1):234 - 240.
- [30] Shin Y M, Zhao J, Barnett L R, *et al.* Investigation of terahertz sheet beam traveling wave tube amplifier with nanocomposite cathode [J]. *Physics of Plasmas*, 2010, **17**(12): 10.1063/1.3525098.
- [31] Shi X, Wang Z, Tang X, *et al.* Study on wideband sheet beam traveling wave tube based on staggered double vane slow wave structure [J]. *IEEE Transactions On Plasma Science*, 2014, **42**(12), 3996 - 4003.
- [32] Liu L, Ji M, Dong Y, *et al.* Quantitative retrieval of organic soil properties from visible near-infrared shortwave infrared (Vis-NIR-SWIR) spectroscopy using fractal-based feature extraction [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(12): 1035.
- [33] XIA Fang, PENG Jie, WANG Qian-Long, *et al.* Prediction of heavy metal content in soil of cultivated land: Hyperspectral technology at provincial scale [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (夏芳,彭杰,王乾龙,等,基于省域尺度的农田土壤重金属高光谱预测. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(5):593 - 599.
- [34] Axelsson C, Skidmore A, Schlerf M, *et al.* Hyperspectral analysis of mangrove foliar chemistry using PLSR and support vector regression [J]. *International Journal for Remote Sensing*, 2013, **34**(5):1724 - 1743.
- [35] Nouri M, Gomez C, Gorretta N, *et al.* Clay content mapping from airborne hyperspectral Vis-NIR data by transferring a laboratory regression model [J]. *Geoderma*, 2017, **298**:54 - 66.

(上接第 783 页)