

V形曲折矩形槽慢波结构的研究*

刘洋 徐进 许雄 沈飞 魏彦玉 黄民智 唐涛 王文祥 宫玉彬†

(电子科技大学物理电子学院微波电真空器件国家级重点实验室, 成都 610054)

(2011年11月13日收到; 2011年12月4日收到修改稿)

提出了一种新型的慢波结构——V形曲折矩形槽慢波结构, 该结构是由矩形槽波导沿其E面法向周期性呈V形折叠而成, 其两金属板之间的间隙形成天然的带状电子注通道. 相比传统的U形曲折矩形槽波导, 它能在保持良好高频特性的情况下增加相互作用面积, 从而可以采用面积更大的带状电子注以获得更大的输出功率. 分析了该结构的高频特性, 在V波段完成了对行波管相互作用电路的设计, 并利用三维粒子模拟的方法估计了其工作性能. 研究表明, 当工作电压和电流分别为12.8 kV和600 mA时, 在58—64 GHz的频率范围内饱和平均输出功率大于1000 W, 相应的饱和增益和电子效率分别大于33 dB和13.2%.

关键词: V形曲折矩形槽, 慢波结构, 带状电子注, 行波管

PACS: 42.60.Da, 07.57.Hm, 41.20.Jb

1 引言

宽带大功率毫米波放大器被广泛应用于高速数据通信、高分辨率雷达和空间通信等领域^[1-4]. 由于在带宽和功率方面具有其他器件无法比拟的优越性, 行波管是最重要的毫米波放大器之一^[5-8]. 而作为行波管的核心部件, 慢波结构的性能直接决定着行波管的技术水平. 在各种慢波结构中, 螺旋线由于其工作频带宽, 在行波管中得到了广泛应用, 但其功率容量受到限制, 特别是工作于短毫米波段时, 由于螺旋线横向尺寸极小, 散热困难, 功率容量小^[9,10]. 耦合腔的功率容量大, 但却具有较窄的工作带宽, 此外, 毫米波耦合腔行波管尺寸很小, 加工和装配精度要求高, 成品率低^[11,12]. 曲折波导作为一种新型的全金属慢波结构, 在实现大功率容量的同时, 具有良好的带宽性能. 且该结构具有机械强度高、散热好、加工容易以及输入输出耦合结构简单等优点, 因而在国内外受到了广泛的关注^[13-17]. 然而, 由于其采用圆形电子注, 当

工作在短毫米波甚至太赫兹频段时, 电子注通道的尺寸非常小, 加工将变得复杂, 同时功率容量也受到限制.

因此, 寻找能工作在短毫米波甚至太赫兹频段且加工容易的宽带大功率新型慢波结构就显得十分必要了. 王文祥等人^[18-20]根据曲折波导和槽波导, 提出了一种新型的慢波结构——U形曲折矩形槽慢波结构. 该结构不仅保留了槽波导所具有的低损耗、宽频带等优点, 还能允许大尺寸的带状电子注通过, 因而具有更高的输出功率, 同时还具有结构相对简单, 加工容易等特点. 我们通过分析其高频特性发现, 它的纵向电场主要分布在直槽段, 且其长度对色散和耦合阻抗影响较大, 在其它参数不变的情况下, 随着直槽段长度的增加, 通带明显变窄, 耦合阻抗减小, 为了保持原结构良好的性能且能尽量增加直槽段的长度, 以增加相互作用面积, 本文提出了一种新型的慢波结构——V形曲折矩形槽慢波结构. 该结构是由矩形槽波导呈V形折叠而成. 相比U形曲折矩形槽波导, V形曲折矩形槽波导结构的弯曲槽部分变短, 从而可以在高频特性相

* 国家杰出青年科学基金 (批准号: 61125103), 国防科技重点实验室基金 (批准号: 9140C050101110C0501) 和中央高校基本科研业务费项目 (批准号: ZYGX2009Z003, ZYGX2010J054) 资助的课题.

† E-mail: ybgong@uestc.edu.cn

同的情况下, 增加直槽段的长度, 这样就可以采用面积更大的带状电子注, 因而可以在保持良好的高频特性和不增加电子注电流密度的情况下获得更大的输出功率.

2 高频特性分析

2.1 结构的提出

传统的 U 形曲折矩形槽波导慢波结构示意图如图 1 所示, 它由矩形槽波导沿着 E 面法向周期性地呈 U 形折叠而成, 两金属板之间的间隙形成天然的带状电子注通道. 矩形槽波导中传输的基模为 $TE_{11}^{[21]}$, 进行折叠后 TE_{11} 模沿着弯曲路径传播, 其直槽段的纵向电场正好参与和电子注的相互作用. 直槽段的长度 l' 越长, 互作用的面积越大, 从而可以在不增加电子注电流密度的情况下采用更大的电子注电流, 以获得更大的输出功率. 因此在对行波管的相互作用电路进行设计时, 直槽段的长度是一个重要的考虑因素.

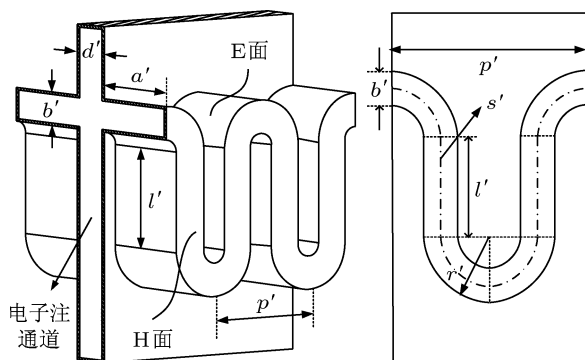


图 1 U 曲折矩形槽波导结构示意图

以 V 波段为例, 我们分析了 U 形曲折矩形槽波导的直槽段长度变化对色散和耦合阻抗的影响. 在保持其他结构参数不变的情况下, 改变直槽段长度 l' , 其基模 -1 次空间谐波的色散和平均耦合阻抗 (电子注通道上面积为 $l' \times d'/2$ 的平均耦合阻抗) 变化情况如图 2 所示. 由图分析可知, 随着直槽段长度的增加, 基模的通带明显变窄, 色散变差, 同时耦合阻抗减小, 从而会导致行波管的工作频带变窄, 电子效率降低. 因此, 在对相互作用电路进行设计时, 为了保证结构具有良好的高频特性, 其直槽段不能取得太长.

为了既能保持良好的高频特性, 又能尽量增

加直槽段的长度, 我们提出了一种新型的慢波结构——V 形曲折矩形槽慢波结构, 如图 3 所示. 它是由矩形槽波导沿着 E 面法向周期性地呈 V 形折叠而成, 为了降低反射, 我们把内弯曲角导成圆角. 由图可以看出, 采用 V 形折叠可以通过缩短弯曲槽段的内径来减小其长度, 从而在槽波导尺寸和弯曲周期 p 相同的情况下, 要得到和 U 形结构相同的高频特性, 就要通过增加 V 形结构的直槽段长度, 使电磁波在弯曲路径中传播的距离和 U 形结构中一样, 即 $s = s'$.

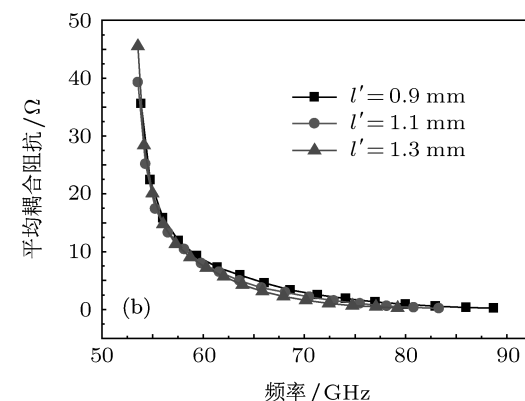
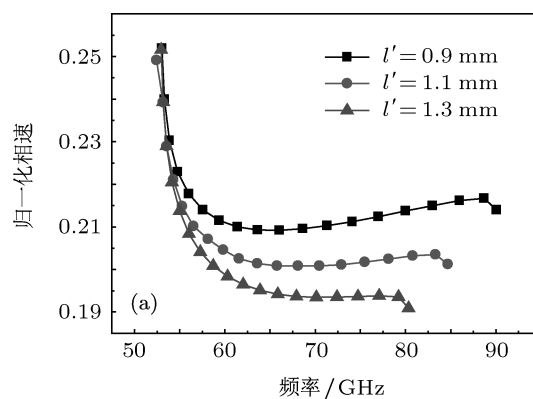


图 2 U 形曲折矩形槽波导直槽段长度变化对色散的影响和平均耦合阻抗的影响 (a) 色散; (b) 平均耦合阻抗

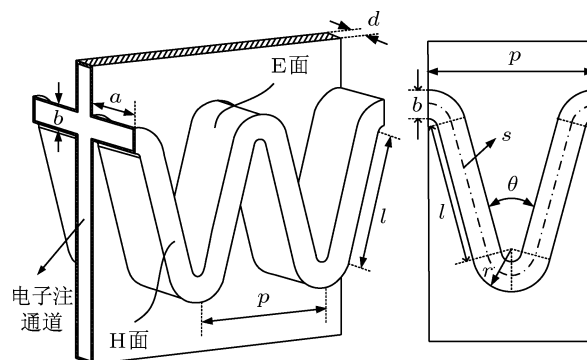


图 3 V 形曲折矩形槽波导结构示意图

我们分别取两组结构参数,对两种结构的色散和耦合阻抗情况进行了对比,其结构参数如下:U形曲折矩形槽: $a' = 1.25\text{ mm}$, $b' = 0.55\text{ mm}$, $d' = 0.5\text{ mm}$, $l' = 0.865\text{ mm}$, $p' = 1.424\text{ mm}$;V形曲折矩形槽: $a = 1.25\text{ mm}$, $b = 0.55\text{ mm}$, $d = 0.5\text{ mm}$, $l = 1.2\text{ mm}$, $r = 0.56\text{ mm}$, $\theta = 14^\circ$, $p = 1.424\text{ mm}$.即保持矩形槽波导的尺寸和弯曲周期 p 一致,增大V形结构的直槽段长度,保证电磁波在两种结构中传播的弯曲路径相同($s = s'$),其对比结果如图4所示.其中,U形和V形结构的平均耦合阻抗分别为电子注通道上面积为 $l' \times d'/2$ 和 $l \cos(\theta/2) \times d/2$ 的平均耦合阻抗.由图可以看出,两种结构的色散和平均耦合阻抗基本一致,而V形结构有更长的直槽段长度,从而可以采用面积更大的带状电子注以获得更大的输出功率.

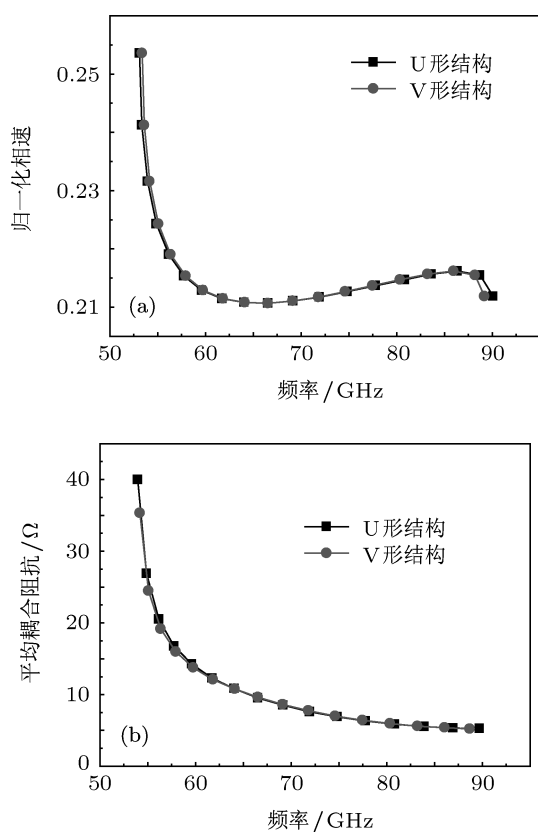


图4 (a) 色散特性对比; (b) 平均耦合阻抗对比

2.2 传输特性分析

V形曲折矩形槽波导中传输的基模是 TE_{11} ,为了实现矩形波导与矩形槽波导之间的过渡,我们按照文献[22]的思路设计了输入/输出结构.如图5(a)

所示,在矩形波导的两侧加载封闭的双槽,让槽的宽度线性地减小为零,完成矩形波导的 TE_{10} 模与矩形槽波导 TE_{11} 模之间的转换.慢波结构采用上述的结构参数,我们在CST微波工作室[23]中对40个周期的V形曲折矩形槽波导相互作用电路的传输特性进行了分析,考虑到实际粗糙度等情况,边界设定为有效电导率为 $3.5 \times 10^7\text{ S/m}$ 的铜[24].其结果如图5(b)所示,在56—65 GHz的频率范围内, S_{11} 基本低于-20 dB, S_{21} 大于-0.84 dB,每周期的传输损耗低于0.021 dB.

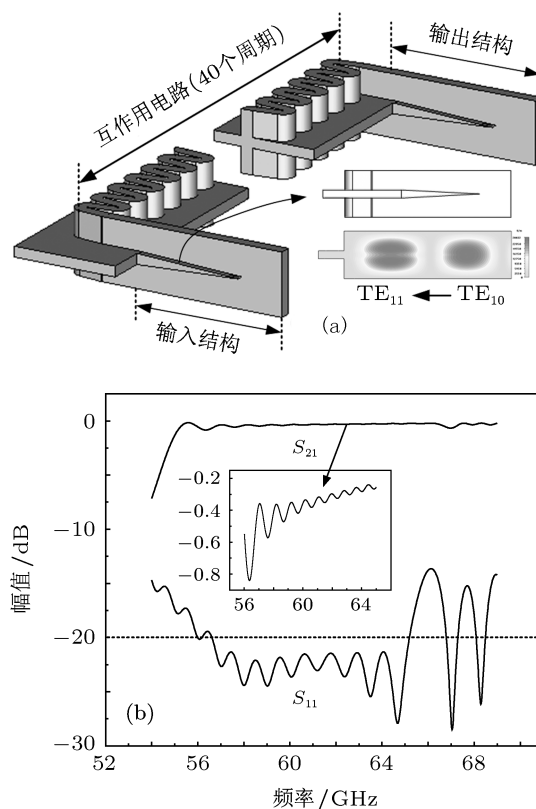


图5 (a) V形曲折矩形槽波导的传输模型(插图是输入结构的截面图和电场分布图); (b) 传输特性曲线

3 注-波相互作用分析

粒子模拟技术是近年来随着计算机性能不断提高而快速发展起来的时域电磁场分析方法.通过直接追踪大量宏粒子,联立求解Maxwell方程和Lorentz方程,直观地模拟电磁场与粒子的相互作用过程.因此,该方法极为适合分析行波管的非线性性能.我们利用CST粒子工作室中的PIC求解器[25]对V形曲折矩形槽行波管的非线性注-波相互作用进行分析,从而预测其工作性能.

采用上述的结构参数, 建立了一个三维的带状注 V 形曲折矩形槽行波管的电路模型, 如图 6 所示. 为了抑制反射和满足增益稳定性条件, 我们通过设计理想的输出端口 (端口 2 和端口 3) 将整个电路截断为两段, 其长度分别为 22

和 34 个周期. 工作参数如下: 带状电子注截面面积为 $l \cos(\theta/2) \times d/2$ ($1.19 \times 0.25 \text{ mm}^2$), 电流和电压分别为 0.6 A 和 12.8 kV (电流密度约为 200 A/cm^2), 并设置 1.4 T 的均匀磁场来引导带状电子注在通道中的稳定传输 [26,27].

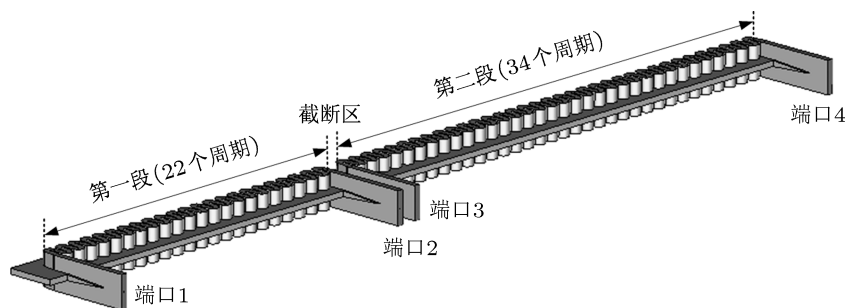


图 6 带状注 V 形曲折矩形槽行波管的电路模型

以 60 GHz 为例, 其注-波互作用的结果如图 7 和图 8 所示. 由图 7 给出的输入-输出幅值特性曲线可以看出, 当输入功率较小时, 输出功率随着输入功率线性变化, 其增益基本保持不变; 随着输入功率的继续增加, 输出功率开始偏离线性增长规律, 行波管工作在非线性区. 当输入功率为 100 mW (20 dBm) 时, 行波管达到饱和, 其饱和平均输出功率为 1175 W, 对应的饱和增益和电子效率分别为 40.7 dB 和 15.3%. 图 8 给出的是输入功率为 100 mW 时, 信号的电压图和输出信号的频谱图. 从图可以看出, 输出信号在 2.5 ns 后稳定, 其平均输出功率为 1175 W, 且频谱纯净, 没有发生振荡.

按照相同的方法, 对其他频点进行分析, 通过调整输入功率大小, 使其都工作在饱和状态, 输入-饱和平均输出功率曲线如图 9 所示. 我们可以看出, 在 56—65 GHz 的频率范围内饱和平均输出功率大于 800 W (59 dBm), 在 58—64 GHz 的范围内饱和平均输出功率大于 1000 W (60 dBm). 图 10 给出的是饱和增益和电子效率图, 在 58—64 GHz 的频率范围内, 饱和增益大于 33 dB, 饱和电子效率大于 13.2%.

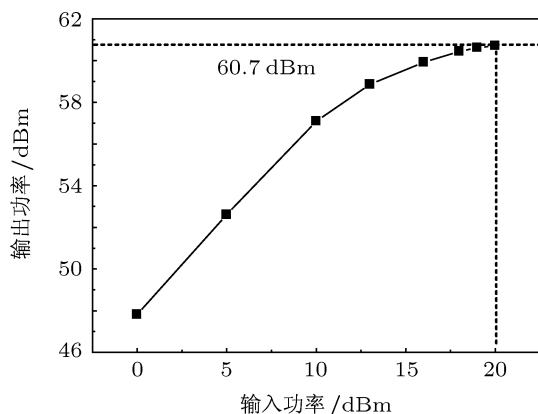


图 7 在 60 GHz 处输入-输出幅值特性

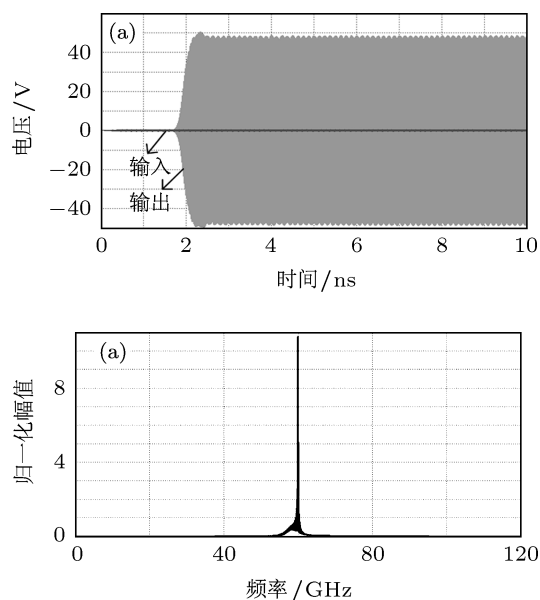


图 8 输入功率为 100 mW 时 (a) 信号的电压图; (b) 输出信号的频谱图

为了得到行波管在整个工作频带内的性能,

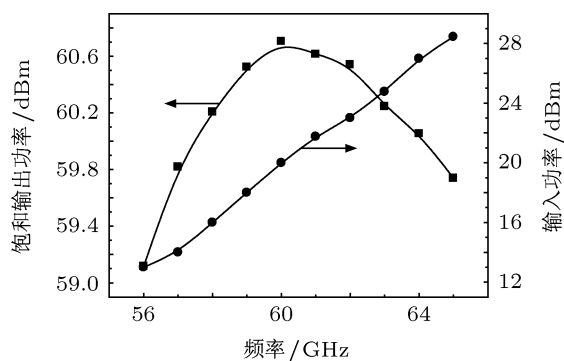


图9 输入 - 饱和平均输出功率曲线

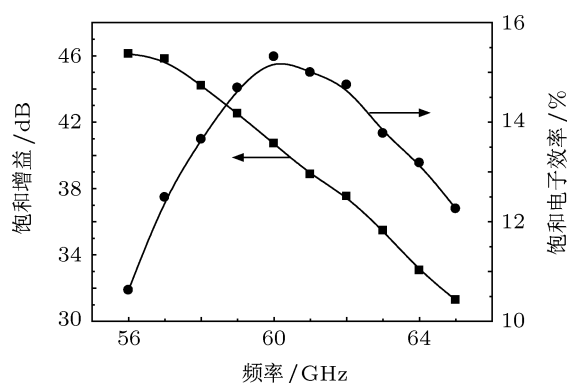


图10 饱和增益和电子效率图

由上面的结果可知, 带状注 V 形曲折矩形槽行波管在保持良好的带宽、增益、电子效率等性能的同时, 通过增大相互作用面积可以采用更大的电子注电流, 获得了更大的输出功率. 相比圆形电子注器件, 如耦合腔行波管 [28] 和曲折波导行波管 [29], 它不仅具有更高的电子效率和更宽的频带, 而且输出功率提高了近一个数量级. 另外, 类似于曲折波导结构, V 形曲折矩形槽波导是一个二维结构, 且不需要单独加工电子注通道, 加工非常简单, 如图 11 所示. 可以通过微机械加工技术先制造出两片镜像匹配的结构, 然后再将它们键合成完整的 V 形曲折矩形槽波导电路.

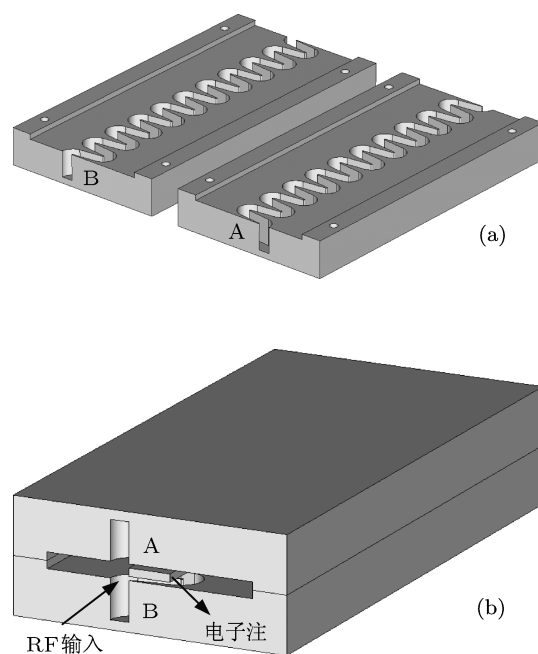


图11 V形曲折矩形槽波导加工示意图 (a) 两片镜像的结构; (b) 键合完整的结构

4 结论

提出了一种新型的慢波结构——V形曲折矩形槽慢波结构. 该结构不仅保留了常规曲折矩形槽波导低损耗、宽频带、加工容易等优点, 更重要的是, 它能在保持良好工作性能的同时增加相互作用面积, 从而可以在不增加电流密度的情况下采用更大的电子注电流, 因而能获得更大的输出功率. 利用该结构完成了对 V 波段行波管相互作用电路的具体设计, 并通过粒子模拟方法估计了其工作性能. 研究表明, 56 个周期的 V 形曲折矩形槽电路能够在 58—64 GHz 的频率范围内有千瓦以上的饱和平均输出功率, 相应的饱和增益和电子效率分别大于 33 dB 和 13.2%, 这为今后研制宽带大功率短毫米波甚至太赫兹频段行波管提供了一个良好的方案.

[1] Feng J J, Hu Y F, Cai J, Wu X P, Tang Y 2010 *Vacuum Electronics* **02** 27 (in Chinese) [冯进军, 胡银富, 蔡军, 邬显平, 唐焯 2010 真空电子技术 **02** 24]
 [2] Ding Y G, Liu P K, Zhang Z C, Wang Y 2011 *Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference Bangalore, India*, Feb. 21—24, 2011 p525

[3] Safer P N, Dronov V, Antonsen T M, Qiu J X, Danly B G, Levush B 2006 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **54** 3605
 [4] Kornfeld G K, Bosch E, Gerum W, Fleury G 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 68
 [5] Feng J J, Qu B 2010 *Vacuum Electronics* **02** 16 (in Chinese) [冯进军, 瞿波 2010 真空电子技术 **02** 16]

- [6] Vancil B K 2004 *Proceedings of the 5th International Vacuum Electron Sources Conference* Beijing, China, Sept. 6—10, 2004 p23
- [7] Parker R K, Abrams R H, Jr., Danly B G, Levush B 2002 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **50** 835
- [8] Abrams R H, Levush B, Mondelli A A, Parker R K 2001 *IEEE Microwave Magazine* **2** 61
- [9] Hu Y L, Yang Z H, Li B, Li J Q, Huang T, Jin X L, Zhu X F, Liang X P 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 5439 (in Chinese) [胡玉禄, 杨中海, 李斌, 李建清, 黄桃, 金晓林, 朱小芳, 梁献晋 2010 物理学报 **59** 5439]
- [10] Hao B L, Xiao L, Liu P K, Li G C, Jiang Y, Yi H X, Zhou W 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 3118 (in Chinese) [郝保良, 肖刘, 刘濮鲲, 李国超, 姜勇, 易红霞, 周伟 2009 物理学报 **58** 3118]
- [11] Cui J, Luo J R, Zhu M, Guo Wei 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 051101 (in Chinese) [崔健, 罗积润, 朱敏, 郭炜 2011 物理学报 **60** 051101]
- [12] Cui J, Luo J R, Zhu M, Guo Wei 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 061101 (in Chinese) [崔健, 罗积润, 朱敏, 郭炜 2011 物理学报 **60** 061101]
- [13] He J, Wei Y Y, Gong Y B, Wang W X 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 2843 (in Chinese) [何俊, 魏彦玉, 宫玉彬, 段兆云, 王文祥 2010 物理学报 **59** 2843]
- [14] He J, Wei Y Y, Gong Y B, Wang W X 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 6659 (in Chinese) [何俊, 魏彦玉, 宫玉彬, 段兆云, 路志刚, 王文祥 2010 物理学报 **59** 6659]
- [15] Zhang C Q, Gong Y B, Wei Y Y, Wang W X 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 6653 (in Chinese) [张常青, 宫玉彬, 魏彦玉, 王文祥 2010 物理学报 **59** 6653]
- [16] He J, Wei Y Y, Gong Y B, Wang W X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 054102
- [17] Zheng R L, Ohlckers P, Chen X Y 2011 *IEEE Trans. Electron Devices* **58** 2164
- [18] Wang W X, Tang T, Yue L N, Zhao G Q, Wei Y Y, Gong Y B *Chinese Patent* 200910060072.4[2009-07022] (in Chinese) [王文祥, 唐涛, 岳玲娜, 赵国庆, 魏彦玉, 宫玉彬 中国专利 200910060072.4 [2009-07-22]]
- [19] Tian Y Y, Yue L N, Xu X, Wang W X, Xu J, Wei Y Y, Gong Y B 2011 *Proceedings of the 18th Institute of Chinese Electronics Conf. on Microwave tubes* Hunan, China, Aug. 20—23 2011 p61 (in Chinese) [田艳艳, 岳玲娜, 许雄, 王文祥, 徐进, 魏彦玉, 宫玉彬 2011 中国电子学会真空电子分会第十八届学术年会湖南、张家界 Aug. 20—23 2011 p61]
- [20] Xue D H, Wang W X, Yue L N, Wei Y Y, Gong Y B 2006 *Vacuum Electronics* **03** 11 (in Chinese) [薛东海, 王文祥, 岳玲娜, 魏彦玉, 宫玉彬 2006 真空电子技术 **03** 11]
- [21] Tischer F J 1963 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **11** 291
- [22] Liu J Y, Qin J Z *Chinese Journal of Radio Science* 1991 **Z1** 443 (In Chinese) [刘金莹, 秦建章 电波科学学报 1991 **Z1** 443]
- [23] CST MWS Tutorials, CST Corp. [Online] Available: <http://www.cst-china.cn/>
- [24] Wilson J D, Kory C L 1995 *IEEE Trans. Electron Devices* **42** 2015
- [25] CST PS Tutorials, CST Corp. [Online] Available: <http://www.cst-china.cn/>
- [26] Baig A, Wang J X, Barnett L R, N L Jr, Shin Y M 2011 *Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference* Bangalore, India, Feb. 21—24, 2011 p351
- [27] Nguyen K T, Pasour J A 2009 *IEEE trans. Electron devices* **55** 744
- [28] Wilson J D, Ramins P, Force D A 1991 *Proceedings of International Electron Devices Meeting* Washington, USA, Dec. 8—11, 1991 p585
- [29] Liu Y, Gong Y B, Wei Y Y, Xu J, Duan Z Y, Wang W X 2010 *Proceedings of 8th International Vacuum Electron Sources Conference and NANO carbon* Nanjing, China, Oct. 14—16, 2010 p249

Research on the V-shape folded rectangular groove slow-wave structure*

Liu Yang Xu Jin Xu Xiong Shen Fei Wei Yan-Yu Huang Min-Zhi
Tang Tao Wang Wen-Xiang Gong Yu-Bin[†]

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, School of Physical Electronics University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 13 November 2011; revised manuscript received 4 December 2011)

Abstract

A novel slow-wave structure called V-shape folded rectangular groove waveguide is proposed. This structure evolves from a conventional rectangular groove waveguide bending the groove with V-shape along its longitudinal direction, and the gap between metal plates forms a sheet electron beam channel naturally. Compared with the traditional U-shape structure, it can increase the interaction area without changing good high-frequency properties, which can adopt the sheet electron beam with a larger area to acquire more output power. In this paper, the high-frequency properties of this structure are analyzed, the interaction circuit for the V-band TWT is designed and the PIC simulation is performed to predict the operating characteristics. From our calculations, this tube can produce average saturation output power over 1000 Watts in a frequency range from 58 GHz to 64 GHz when the cathode voltage and beam current are set to be 12.8 kV and 600 mA respectively. The corresponding saturation gain and electron efficiency can reach over 33 dB and 13.2% respectively.

Keywords: V-shape folded rectangular groove, slow-wave structure, sheet electron beam, traveling-wave tube

PACS: 42.60.Da, 07.57.Hm, 41.20.Jb

* Project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 61125103), the Vacuum Electronics National Lab Foundation (Grant No. 9140C050101110C0501), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. ZYGX2009Z003, ZYGX2010J054).

[†] E-mail: ybgong@uestc.edu.cn