

新型半矩形环螺旋线慢波结构高频特性*

夏 伟¹, 魏望和¹, 魏彦玉², 卢 敏¹

(1. 江西理工大学 理学院, 江西 赣州 341000; 2. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 610054)

摘 要: 针对行波管更高工作频率和更大输出功率的发展需要, 提出了一种半矩形环螺旋线慢波结构。基于三维电磁仿真软件 HFSS 的模拟研究表明: 调控慢波结构的尺寸可以获得合适的色散特性和相互作用阻抗, 与现有技术的半圆形环螺旋线慢波结构相比较, 半矩形环螺旋线慢波结构的色散变化很小, 但是具有更高的相互作用阻抗值。新结构具有平坦色散、高相互作用阻抗、与微细加工技术相兼容以及方便与带状电子束互作用的综合优点。

关键词: 半矩形环螺旋线慢波结构; 微细加工技术; 带状电子束; 色散特性; 相互作用阻抗

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190359

High-frequency characteristics of half rectangular ring helix slow wave structure

Xia Wei¹, Wei Wanghe¹, Wei Yanyu², Lu Min¹

(1. School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A novel half rectangular-ring helix slow-wave structure (SWS) is proposed for the design of wide bandwidth and high power traveling-wave tubes. The numerical calculation by 3D electromagnetic simulation software HFSS shows that proper dispersion and coupling impedance can be obtained by reasonably setting the geometrical parameters of the SWS. Meanwhile, compared with the half circular ring helix slow wave structure, slight variation in dispersion and remarkable improvement in coupling impedance have been observed in the numerical calculation of the half rectangular ring helix SWS. The half rectangular-ring helix slow-wave structure has the combined advantages of flatten dispersion, high interaction impedance, easy fabrication and convenience for interaction with sheet beam.

Key words: half rectangular-ring helix slow wave structure; micro-electro-mechanical system technology; sheet electron beam; dispersion characteristics; interaction impedance

当代电子技术的发展对行波管提出了更高工作频率、更大输出功率和更小器件尺寸的发展需求^[1-3]。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指标^[4-5]。常规的圆形螺旋线及其变形结构具有平坦色散的优点,在宽带中等功率行波管领域有着广泛应用^[6-7]。然而,随着输出功率的不断提高,需要不断增大电子束电流密度,而圆柱形电子束具有较强的空间电荷效应,这限制了行波管功率的提高^[8-9]。因此,探索可以与带状电子束互作用的新型慢波结构成为行波管发展的重要方向。鉴于此,本文提出了一种新型慢波结构——半矩形环螺旋线慢波结构。该新型慢波结构具有与微细加工(MEMS)技术相兼容、方便与带状电子束相互作用以及宽频带和高相互作用阻抗的综合优点,可以有效提升行波管的输出功率。文中基于三维电磁仿真软件 HFSS 对该新型慢波结构的高频特性进行了分析,并与具有相同结构参数的半圆形环螺旋线慢波结构的高频特性进行了深入比较^[10]。

1 半矩形环螺旋线慢波结构模型

图 1(a) 为 Muhammed Zuboraj 等人提出的半圆形环螺旋线慢波结构^[10]。其中, r 是圆环半径, t_c 和 w_c 分别是圆环金属带的厚度和宽度, p_c 是慢波结构的周期, l_c 是相邻半圆环之间连接杆的长度。研究表明,在同等参数条件

* 收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2019-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(61761022); 江西省教育厅科技项目(GJJ160622)

作者简介: 夏 伟(1993—), 男, 硕士, 从事新型慢波结构的研究; 1443490955@qq.com。

通信作者: 魏望和(1978—), 男, 博士, 副教授, 专业为物理电子学, 研究方向为行波管; weiwanghe@126.com。

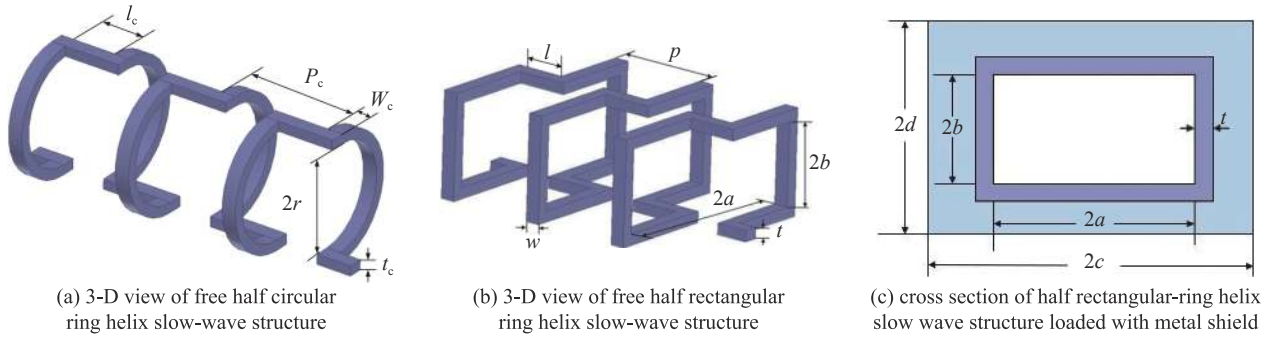


Fig. 1 Model of half circular ring helix slow wave structure and half rectangular ring helix slow-wave structure

图 1 半圆环螺旋线慢波结构和半矩形环螺旋线慢波结构模型图

下,半圆环螺旋线慢波结构具有与常规圆螺旋线慢波结构非常接近的色散平坦度和相互作用阻抗值,但其相速度更小,这使得基于该慢波结构的行波管可以在更小的器件长度下获得更大的输出功率。然而,半圆环螺旋线慢波结构的特点只适合采用圆柱形电子束进行注波相互作用,阻碍了行波管输出功率的提高,同时该结构与微细加工技术不兼容,不利于慢波结构的批量精细加工。

为了能提高宽带行波管的工作频率和输出功率,本文提出了一种新型慢波结构——半矩形环螺旋线慢波结构,如图 1(b) 和图 1(c) 所示。图中: $2a$ 和 $2b$ 分别是半矩形环螺旋线慢波结构横截面的宽度和高度, t 和 w 分别是半矩形环金属带的厚度和宽度, $2c$ 和 $2d$ 分别是加载同心矩形金属屏蔽筒的宽度和高度, p 是慢波结构的周期, l 是相邻半矩形环连接杆的长度,且满足 $p=2(l+w)$ 。相邻矩形半环间的连接杆厚度和宽度和半矩形环金属带的厚度和宽度相同。相对于半圆环螺旋线慢波结构而言,半矩形环螺旋线具有平面类慢波结构的特点,易于采用微加工技术批量精确加工,同时可变的宽高比使得其可以很方便地与带状电子束进行相互作用。

理论上来说,半圆形螺旋线慢波结构和半矩形环螺旋线慢波结构都存在场的奇异点,因此难以用传统的电磁理论加以分析。基于三维电磁仿真软件 HFSS 对该新型慢波结构的高频特性进行了详细的分析,在此基础上,开展了与半圆形环螺旋线慢波结构的对比研究。

2 半矩形螺旋线慢波结构高频特性

2.1 慢波结构参数对高频特性的影响

由于半矩形环螺旋线慢波结构是利用基模和纵向电场进行相互作用,因此这里只分析基模的高频特性。图 2~图 6 给出了半矩形环螺旋线慢波结构的参数对色散和相互作用阻抗的影响。图中的相互作用阻抗为慢波结构中心轴线上的阻抗值。

图 2 给出了金属带厚度 t 对半矩形环螺旋线高频特性的影响。从图中可以看出,随着厚度 t 的增加,归一化相速逐渐减小,慢波系统的色散有所增强,带宽逐渐变小。同时,慢波结构的相互作用阻抗随着厚度 t 的增大逐渐减小。因此,在实际设计中需要综合考虑工作电压,输出功率和系统散热等因素采用合适的金属带厚度。

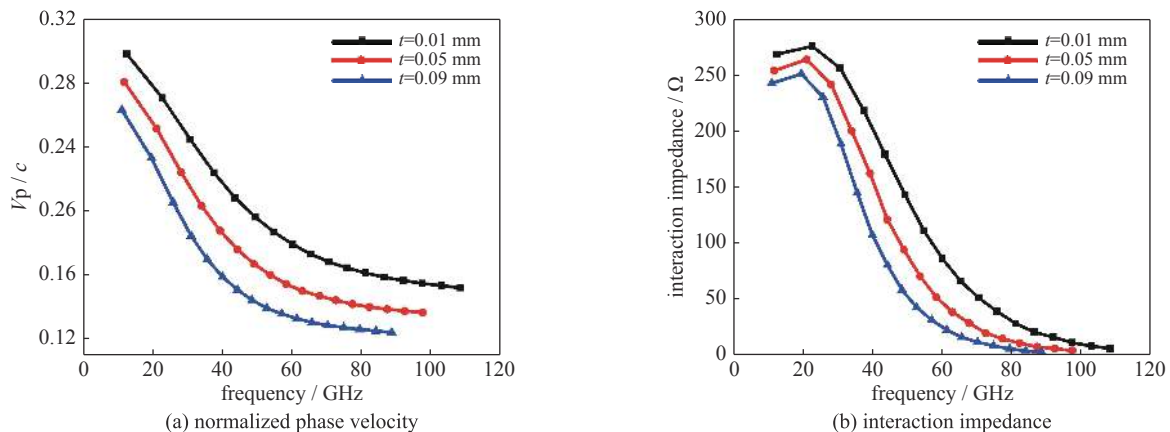


Fig. 2 Effect of helix thickness on high-frequency characteristics with parameters of (in mm) $b/a=2$, $a=0.10$, $w=0.06$, $p=0.20$, $c=1.00$, $d=1.00$

图 2 半矩形环螺旋线厚度 t 对慢波结构高频特性的影响,参数(单位: mm) $b/a=2$, $a=0.10$, $w=0.06$, $p=0.20$, $c=1.00$, $d=1.00$

图 3 给出了金属带宽度 w 的变化对慢波系统高频特性的影响。从图中可知,随着金属带宽度 w 的增加,半矩形环螺旋线慢波结构的相速度逐渐增大,慢波系统色散逐渐增强,这将导致慢波结构的工作带宽变窄。同时,中高频段的相互作用阻抗值随着宽度 w 的增加而逐渐增大,而低频段的相互作用阻抗值逐渐降低。因此,实际设计中需要权衡带宽、输出功率、结构牢固性和散热等因素选择合适的金属带宽度。

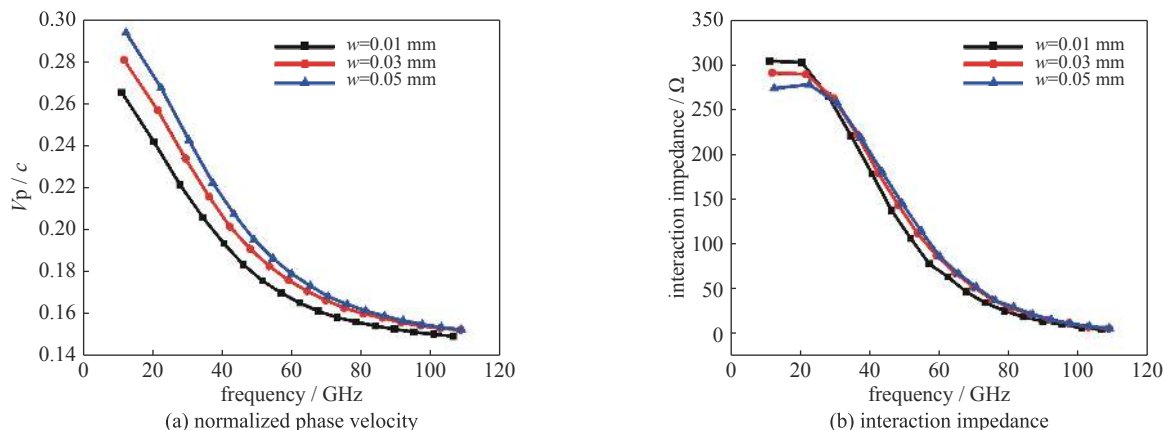


Fig. 3 Effect of helix width w on high-frequency characteristics with parameters of (in mm) $b/a=2$, $a=0.10$, $t=0.01$, $p=0.20$, $c=1.00$, $d=1.00$

图 3 半矩形环螺旋线宽度 w 对慢波结构高频特性的影响,参数(单位:mm) $b/a=2$, $a=0.10$, $t=0.01$, $p=0.20$, $c=1.00$, $d=1.00$

图 4 给出了慢波结构的横截面高度对系统高频特性的影响,其中慢波结构横截面的宽度和周期等其它参数保持不变。从图中可以看出,随着横截面高度的增大,慢波结构的相速度减小,色散平坦性保持不变,而工作带宽不断变窄。同时,中高频段的相互作用阻抗随着横截面高度的增大而不断减小,而低频段的相互作用阻抗却随着横截面高度的增大而逐渐增大。

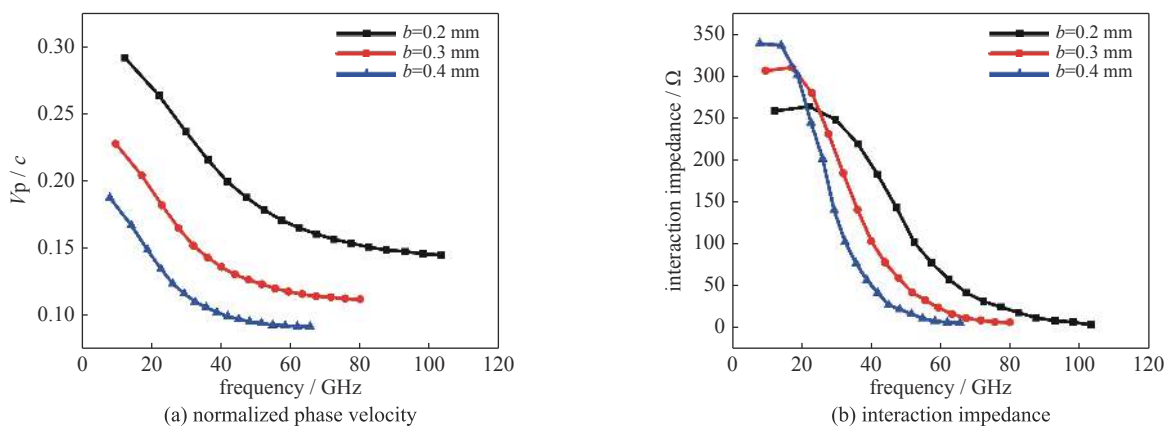


Fig. 4 Effect of the height b on high-frequency characteristics with parameters of (in mm) $a=0.10$, $t=0.03$, $w=0.06$, $p=0.20$, $c=1.00$, $d=1.00$

图 4 半矩形环螺旋线高度 b 对慢波结构高频特性的影响,参数(单位:mm) $a=0.10$, $t=0.03$, $w=0.06$, $p=0.20$, $c=1.00$, $d=1.00$

图 5 给出了慢波结构周期 p 对系统高频特性的影响。从图中可以观察到,随着螺距 p 的增大,系统的相速逐渐增大,色散平坦性保持不变。同时,慢波结构低频段相互作用阻抗值随 p 的增大不断减小,而中高频段的相互作用阻抗却逐渐增大。因此,在设计行波管时要综合考虑工作电压和功率要求,选择合适的螺距。

图 6 给出了在横截面周长不变时,慢波结构 p 相同的情况下,不同的横截面宽高比 b/a 对高频特性的影响。从图中可见,随着宽高比的逐渐增大,电磁波的相速不断增加,慢波系统的色散逐渐变强,而频带逐渐增大。同时,慢波结构的相互作用阻抗在低频段逐渐减小,而中高频段的相互作用阻抗随着宽高比的增大而增大。因此,需要综合考虑功率和带宽的因素,选择合适宽高比的慢波结构。

2.2 与相同参数的半圆环螺旋线慢波结构高频特性对比

为体现新结构的特点,对半矩形环螺旋线慢波结构和半圆环螺旋线慢波结构的高频特性进行了比较,其中两种慢波结构的横截面周长(1.22 mm)、纵向周期(0.20 mm)以及金属线的宽度(0.06 mm)和厚度(0.03 mm)等参数均设置为相同,利用高频仿真软件计算得到了其高频特性,如图 7 所示。可以看出,在同等参数条件下,半矩形环螺旋线慢波结构相比较半圆环螺旋线慢波结构具有更高的相速度以及更宽的工作频带。同时,半矩形环螺旋线慢波

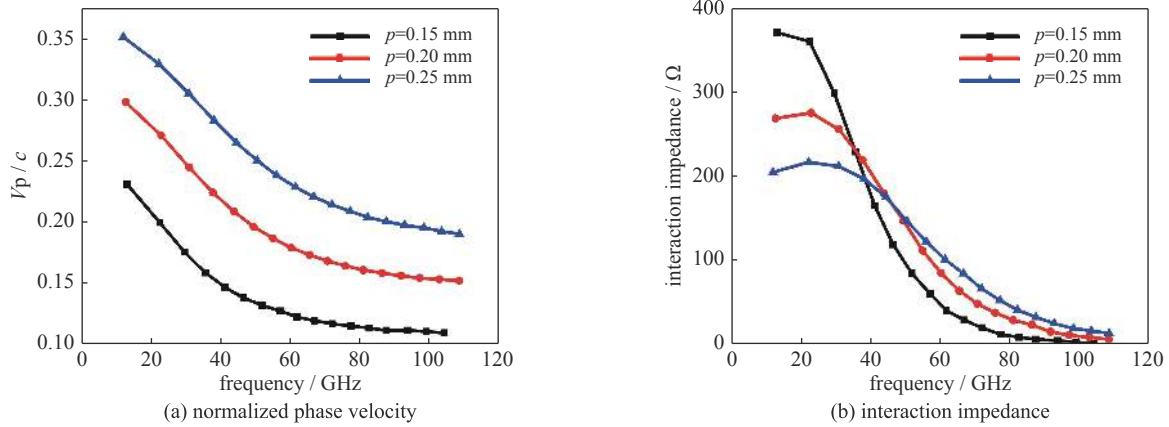


Fig. 5 Effect of the axial period on high-frequency characteristics with parameters of (in mm) $a=0.10, b/a=2, t=0.01, w=0.06, c=1.00, d=1.00$

图 5 慢波结构周期对系统高频特性的影响参数, (单位: mm) $a=0.10, b/a=2, t=0.01, w=0.06, c=1.00, d=1.00$

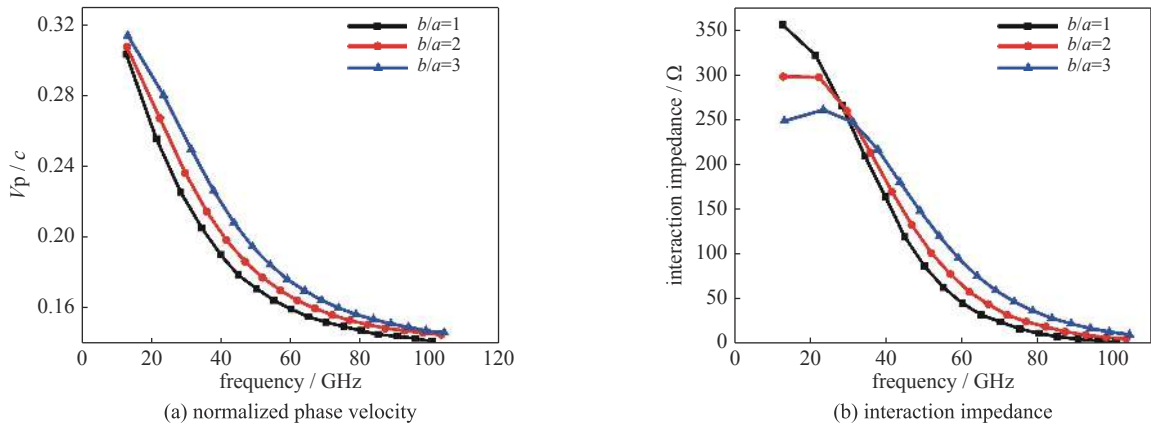


Fig. 6 Effect of aspect ratio on high-frequency characteristics with parameters of (in mm) $4a+4b=1.22, t=0.03, w=0.06, p=0.20, c=1.00, d=1.00$

图 6 半矩形环螺旋线宽高比对系统高频特性的影响, 参数(单位: mm) $4a+4b=1.22, t=0.03, w=0.06, p=0.20, c=1.00, d=1.00$

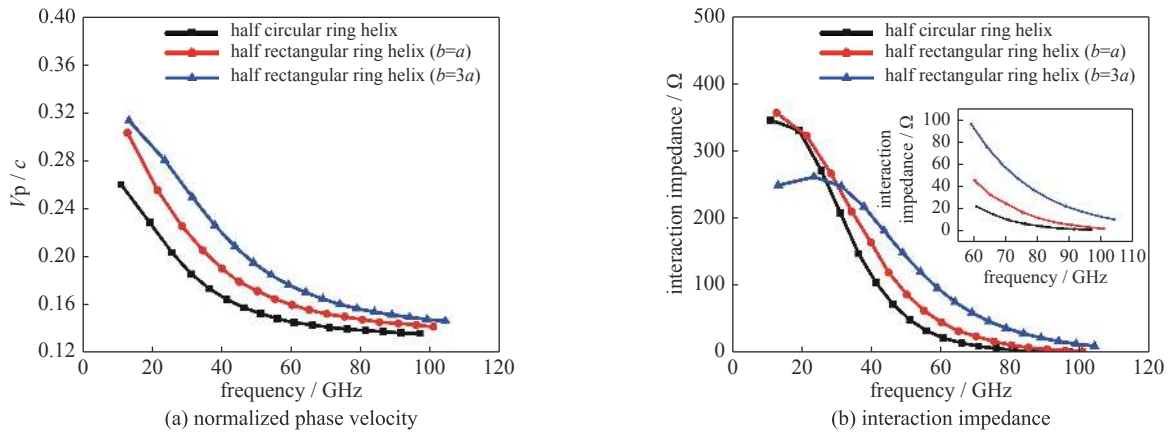


Fig. 7 Comparison of high frequency characteristics between the half circular ring helix slow wave structure and the half rectangular ring helix slow wave structure

图 7 半矩形环螺旋线和相同结构参数的半圆环螺旋线高频特性对比

结构在几乎整个工作频段内具有显著更高的相互作用阻抗, 这预示采用半矩形环螺旋线慢波结构的行波管将具有更高的输出功率和增益。由于新结构与微细加工技术相兼容, 有可控制的宽高比方便与带状电子束发生相互作用, 因此在宽带小型化高功率行波管领域具有很大的应用价值。

2.3 传输和衰减

构建了工作于 V 波段四十个周期长度的半矩形环螺旋线慢波结构。在仿真计算中将慢波结构和输入输出匹配器的材料设置为钼^[11], 同时钼表面镀铜以减小损耗。考虑到表面粗糙度的影响, 铜的电导率设置为 $3.0 \times 10^7 \text{ S/m}$ ^[12]。采用同轴线设计了渐变式输入输出匹配装置, 其中同轴线内导体的尺寸由半矩形环螺旋线的大小逐渐

渐变为正常同轴线的半径,基于 CST 的微波工作室的仿真结果如图 8 所示。从图中可以看出,半矩形环螺旋线慢波结构具有良好的传输特性,在 55.9~64.8 GHz 频率范围内, S_{11} 均低于 -20 dB,而 S_{21} 大于 -1.55 dB,每周期传输损耗低于 0.039 dB。

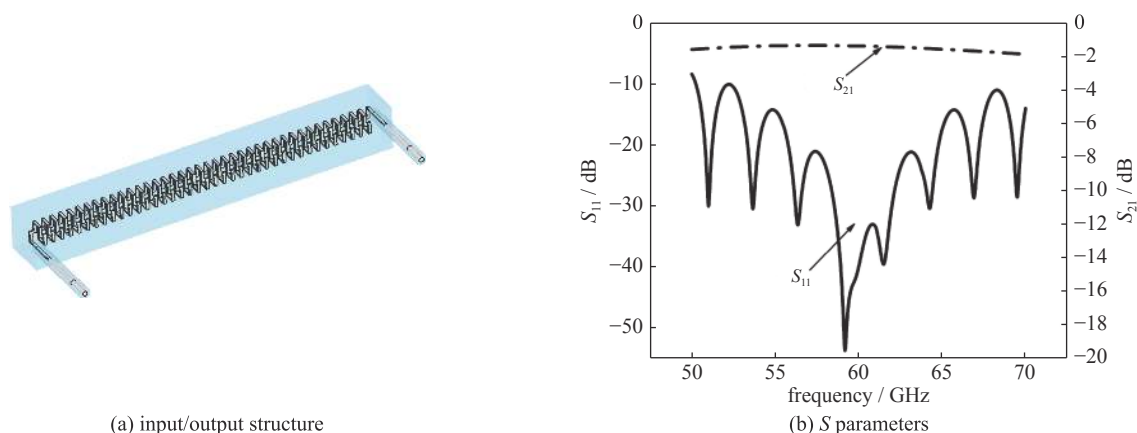


Fig. 8 S parameters of half rectangular ring helix slow-wave structure

图 8 半矩形环螺旋线慢波结构的 S 参数

3 结 论

基于数值计算方法,对新型带状注半矩形环螺旋线慢波结构的高频特性进行深入研究。结果表明:通过调整半矩形环螺旋线慢波结构的参数可以获得理想的高频特性。半矩形环螺旋线慢波结构保持了半圆环螺旋线慢波结构平坦色散的优点,却有明显更大的相互作用阻抗值,可以进一步提升行波管的输出功率。此外新结构还具有与微细加工技术 MEMS 相兼容,方便与带状电子束互作用的优点,因此在小型化宽带行波管领域具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] Booske J H, Dobbs R J, Joye C D. Vacuum electronic high power terahertz sources[J]. *IEEE Trans THz Sci Technol*, 2011, 1(1): 54-75.
- [2] 李含雁, 冯进军. UV LIGA技术在毫米波太赫兹器件中的应用进展[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018, 16(5): 776-780. (Li Hanyan, Feng Jinjun. Progress in application and research of UV LIGA techniques in millimeter wave and terahertz devices[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018, 16(5): 776-780)
- [3] 丁冲, 李倩, 雷霞, 等. 适用于 Ka 波段圆形电子束行波管的半圆形卷绕微带线慢波结构[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(3): 269-274. (Ding Chong, Li Qian, Lei Xia, et al. Semi-circularly folded microstrip meander line slow-wave structure for Ka-band traveling-wave tube with cylindrical electron beam[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(3): 269-274)
- [4] Wei Wanghe, Wei Yanyu, Wang Wenxiang, et al. Dispersion equations of a rectangular tape helix slow-wave structure[J]. *IEEE Trans Microw Theory Techn*, 2015, 63(5): 1445-1456.
- [5] Shen Fei, Wei Yanyu, Xu Xiong, et al. Symmetric double V-shaped microstrip meander-line slow-wave structure for W-band traveling-wave tube[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2012, 59(5): 1551-1557.
- [6] 付成芳, 魏彦玉, 宫玉彬, 等. 矩形螺旋线慢波电路高频特性的数值分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2009, 29(4): 386-390. (Fu Chengfang, Wei Yanyu, Gong Yubin, et al. Numerical analysis of high-frequency characteristics of rectangular helical slow-wave circuits[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, 29(4): 386-390)
- [7] Wei Wanghe, Wei Yanyu, Wang Yuanyuan, et al. A Study of the effects of helix misalignment on the cold parameters of a sheath helix slow-wave structure[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2015, 62(4): 1334-1341.
- [8] 王海龙, 石先宝, 王站亮, 等. W 波段阶梯型交错双栅慢波结构行波管的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(6): 784-789. (Wang Hailong, Shi Xianbao, Wang Zhanliang, et al. Research on W band step-type staggered double vane slow wave structure traveling wave tube[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(6): 784-789)
- [9] 陆德坚, 王自成, 刘璞鲲. 新型反绕双螺旋线慢波系统的分析与设计[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(4): 651-656. (Lu Dejian, Wang Zicheng, Liu Pukun. Analysis and design of novel contrawound helix slow wave system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(4): 651-656)
- [10] Zuboraj M, Apaydin N, Sertel K, et al. Half-ring helical structure for traveling wave tube amplifiers[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42(11): 3465-3470.
- [11] 韩勇, 刘燕文, 丁耀根, 等. 螺旋线镀膜对慢波组件散热性能影响的研究[J]. *电子与信息技术*, 2008, 30(8): 2029-2032. (Han Yong, Liuyanwen, Ding Yaogen, et al. Effect of plated helix on heat dissipation capability of the slow-wave circuit[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 2029-2032)
- [12] Ryskin N M, Rozhnev A G, Starodubov, A V, et al. Planar microstrip slow-wave structure for low-voltage V-band traveling-wave tube with a sheet electron beam[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2018, 39(5): 757-760.