



·高功率微波技术·

一种宽带瓦量级交错双栅脊波导返波振荡器的研究

冯霖琦, 岳玲娜, 徐进, 蔡金赤, 殷海荣, 魏彦玉, 尹鹏程, 王文祥, 邓峥嵘

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 611731)

摘要: 为满足太赫兹领域对大功率、宽带宽的太赫兹辐射源的需求, 提出了一种新型交错双栅脊波导 (RDSG) 慢波结构。设计并优化了交错双栅脊波导返波振荡器的高频结构, 同时对交错双栅脊波导和常规交错双栅的高频特性进行了仿真和对比, 结果表明: 当二者相速度接近时, 交错双栅脊波导拥有更宽的“冷”通带带宽和更高的耦合阻抗。PIC 仿真结果表明, 在 1 THz 频段, 交错双栅脊波导返波振荡器拥有超过 175 GHz 的可调谐带宽以及 1.1 W 的输出功率, 比相同工作条件下的常规交错双栅结构输出功率提高了 34%~42%。

关键词: 太赫兹; 宽带大功率返波振荡器; 新型慢波结构; 交错双栅脊波导; 仿真计算

中图分类号: TN125+.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230150

Investigation of a wide band watt level backward wave oscillator based on ridged double staggered grating waveguide

Feng Linqi, Yue Lingna, Xu Jin, Cai Jinchi, Yin Hairong, Wei Yanyu,
Yin Pengcheng, Wang Wenxiang, Deng Zhengrong

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A novel ridged double staggered grating (RDSG) slow wave structure (SWS) is put forward to develop the wide-band and high-power terahertz radiation source for meeting the demand of thriving field of terahertz. The high frequency structure of backward wave oscillator (BWO) is designed and optimized, meanwhile high frequency characteristics of RDSG and double staggered grating (DSG) are simulated and compared, indicating that RDSG has a higher ‘cold’ bandwidth and more prominent interaction impedance when their phase velocity are adjusted to basically the same. PIC simulation results show that, ridged double staggered grating backward wave oscillator has a tunable bandwidth more than 175 GHz, and it can generate more than 1.1 W output power which is 34%~42% higher than BWO implemented with conventional DSG in the frequency range around 1 THz.

Key words: terahertz, wide-band and high-power backward wave oscillator, novel slow wave structure, ridged double staggered grating waveguide, simulation

近年来太赫兹成像、通信及雷达等系统的发展对太赫兹辐射源的需求越来越大, 太赫兹辐射源已成为太赫兹技术发展的关键因素^[1]。基于固体电子学原理的辐射源在太赫兹频段存在输出功率不足的问题, 而真空电子器件在该频段拥有更高的输出功率。返波振荡器作为主要的太赫兹真空电子辐射源之一, 具有较高的功率水平, 以及较宽的工作带宽, 且不需要额外信号源, 通过改变工作电压即可实现工作频率的连续可调。结合光刻技术、微纳数控加工技术等微细加工工艺, 能实现太赫兹频段返波振荡器的加工制造。因此, 开展对太赫兹返波振荡器的研究, 是发展高频率、宽带、大功率的实用新型太赫兹电真空辐射源的重要途径。

慢波结构作为返波振荡器的核心部件, 很大程度上决定了返波振荡器的性能。近年来, 多种类型的慢波结构诸如折叠波导^[2-5]、交错双栅慢波结构^[6-13]、正弦波导及其变形^[14-17]等, 已经被国内外广泛地研究, 并取得了不错的进展。在众多研究中, 如何提高慢波结构的耦合阻抗来提高输出功率和效率, 以及拓展返波振荡器的带宽, 仍然是太赫兹返波振荡器的重要研究方向。已有研究表明, 交错双栅慢波结构具有天然电子注通道, 适合带状电子注, 易

* 收稿日期: 2023-05-29; 修订日期: 2023-10-23

基金项目: 四川省自然科学基金面上项目 (2023NSFSC045)

联系方式: 冯霖琦, 313819167@qq.com。

通信作者: 岳玲娜, lnyue@uestc.edu.cn。

加工。然而这种慢波结构在太赫兹频段,纵向电场较弱,耦合阻抗较低。而矩形双脊波导则具有带宽宽、电场集中的优势。结合交错双栅结构和脊波导各自的优势,本论文提出了一种新型交错双栅脊波导慢波结构,该结构相对常规交错双栅结构具有更高的耦合阻抗以及更宽的带宽,在太赫兹频段易于用微细加工手段实现。本文对该新型慢波结构的结构特征进行了描述,对高频特性以及注-波相互作用特性进行了仿真计算,探讨了该结构应用于太赫兹返波振荡器的可行性。

1 交错双栅脊波导的高频特性

1.1 模型描述

交错双栅脊波导是将矩形脊波导中的金属脊,按照类似交错双栅中金属栅的排列方式沿纵向周期交错排列得到的,如图1所示,图中: a 为脊波导的宽边; w 为脊波导的窄边, $w=2b+2h$; l 为脊的宽度; p 为周期长度,上下两排金属栅按照半个周期的间距互相交错; h 为金属栅的高度,上下金属栅的 h 值一致; g 为栅的厚度。其类似双脊波导的结构相比于常规交错双栅,理论上降低了低截止频率,从而拓展了带宽,并使其可以在较低的工作电压下工作;另外,交错双栅脊波导相比常规交错双栅结构,在脊两侧留有较大空间,利于铣刀操作,方便加工栅结构。

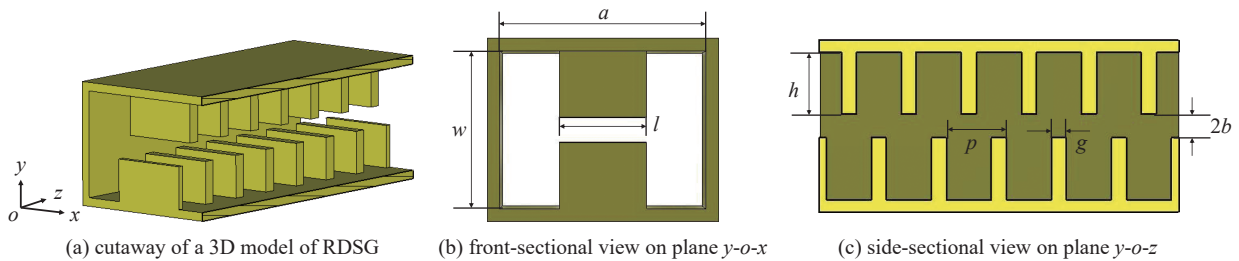


Fig. 1 Schematic diagram of RDSG model structure and dimensions

图 1 交错双栅脊波导三维结构及尺寸示意图

图2给出了交错双栅脊波导与常规交错双栅结构在典型频点 1.03 THz 处的纵向电场比较。从图2可以看出,同一频点下交错双栅脊波导在波导宽边中心附近的电场强度明显强于常规交错双栅,这是由于脊结构使得电场更

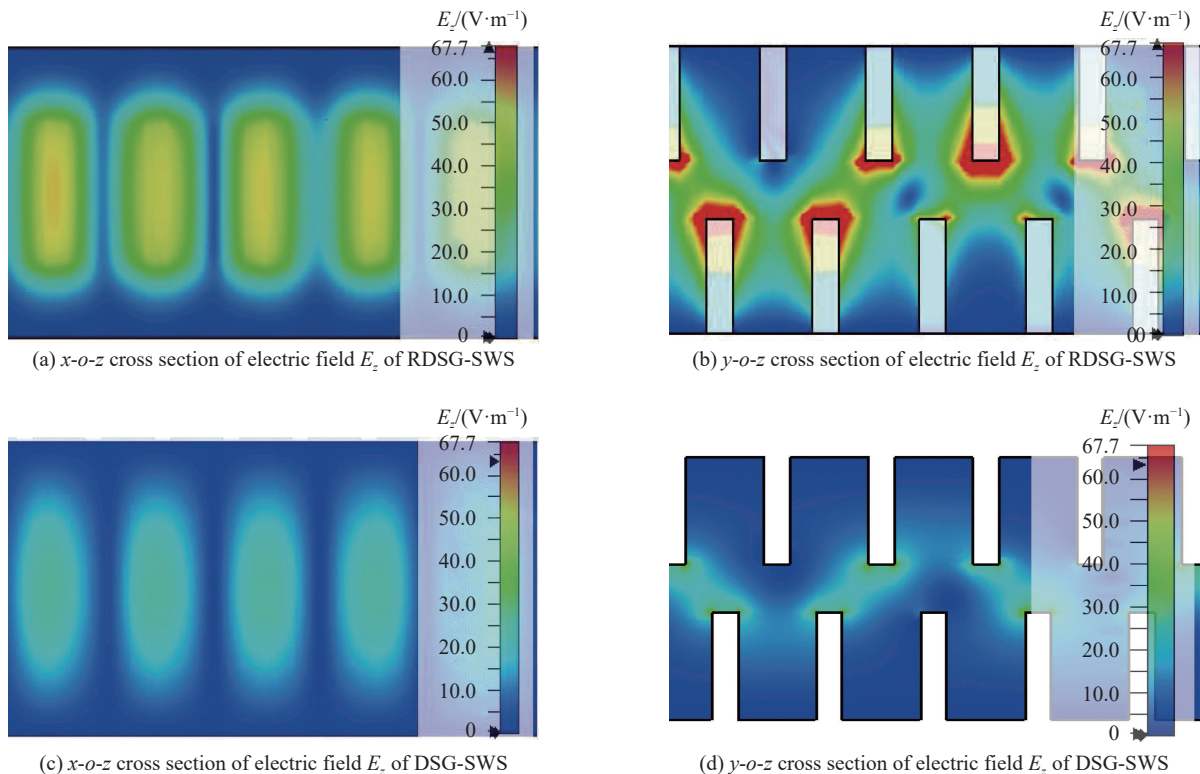


Fig. 2 Distribution of electric field E_z at the typical frequency of 1.03 THz of RDSG-SWS and DSG-SWS

图 2 1.03 THz 处交错双栅脊波导和常规交错双栅的电场 E_z 分布图

集中,这也会导致交错双栅脊波导的耦合阻抗比常规交错双栅更高。

1.2 高频特性仿真计算

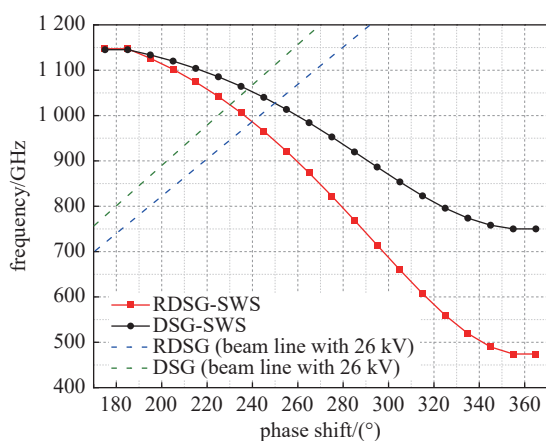
通过 CST Microwave Studio 三维电磁仿真软件,仿真优化得到交错双栅脊波导的结构参数见表 1。

表 1 交错双栅脊波导参数
Table 1 Parameters of RDSG-SWS

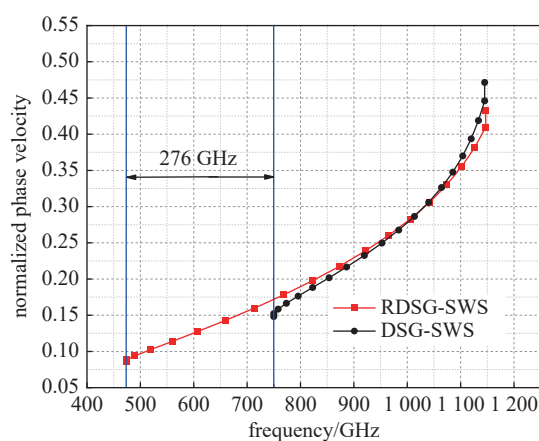
unit: μm

length of SWS z	width of SWS a	width of grating l	period length p	height of grating h	thickness of grating g	height of beam channel $2b$
125	180	90	55	50	13.75	25

将交错双栅脊波导和常规交错双栅结构两种高频结构的中心工作频率调至 1 THz 附近,且工作频段内的相速度基本一致,二者的布里渊曲线及归一化相速曲线如图 3 所示。从图 3(a)可知,此时,两种慢波结构的高端截止频率相同,常规交错双栅的冷通带带宽范围为 751~1150 GHz,而交错双栅脊波导则为 475~1150 GHz,相比常规交错双栅增大了 276 GHz,即带宽拓宽约 69%,表明该新型慢波结构具有较宽的“冷”通带带宽。



(a) Brillouin curves and 26 kV beam line of RDSG and DSG SWS



(b) normalized phase velocity of RDSG and DSG SWS

Fig. 3 Brillouin curves and normalized phase velocity of RDSG-SWS and DSG-SWS

图 3 交错双栅脊波导和常规交错双栅布里渊曲线及归一化相速度曲线图

交错双栅脊波导与常规交错双栅的耦合阻抗对比如图 4 所示,从图 4 可以看出,在 800~1100 GHz 范围内,交错双栅脊波导的耦合阻抗均比常规交错双栅的高,尤其是在典型频点 1.03 THz 处,交错双栅脊波导的耦合阻抗为 10.8 Ω ,比常规交错双栅的 7.6 Ω 高约 42%。由前文分析可知,由于在脊附近的电场更加集中,故交错双栅脊波导耦合阻抗相对交错双栅会有所提高,这意味着该慢波结构的返波振荡器会比常规交错双栅返波振荡器更容易起振,同等工作条件下会具有更高的输出功率。

慢波电路的输入输出结构也是返波振荡器中很重要的一部分。图 5 是交错双栅脊波导返波振荡器高频系统的模型示意图,其中包含 70 个均匀周期和左右两段各 5 个渐变周期。渐变周期部分保持了交错双栅脊波导结构,只是其中栅的高度 h 逐渐递减至 $h/2$,栅的厚度 g 逐渐递增至 $p/2$,依此顺序过渡到矩形脊波导。此后再从矩形脊波导由输出耦合器与脊波导-矩形波导过渡过渡至标准矩形波导。仿真时,金属背景材料设置为无氧铜,根据同频段金属结构的加工测试经验,铜的电导率设置为 $1.8 \times 10^7 \text{ s/m}$ 。

随着频率的上升,损耗增大也是必然出现的情况,而如图 6 所示的 S 参数计算结果说明,该设计方案下的交错双栅脊波导慢波结构在 960~1050 GHz 频段内,传输损耗 S_{21} 大于 -10 dB,反射参数 S_{11} 小于 -17.5 dB,其损耗与反射都被控制在较低的水平,非常适合应用于返波振荡器。

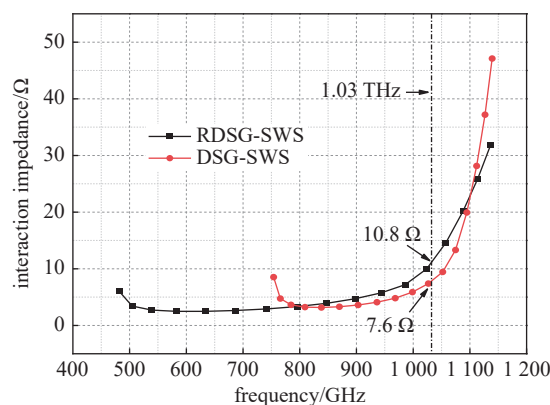


Fig. 4 Interaction impedance of RDSG-SWS and DSG-SWS

图 4 交错双栅脊波导和常规交错双栅耦合阻抗对比

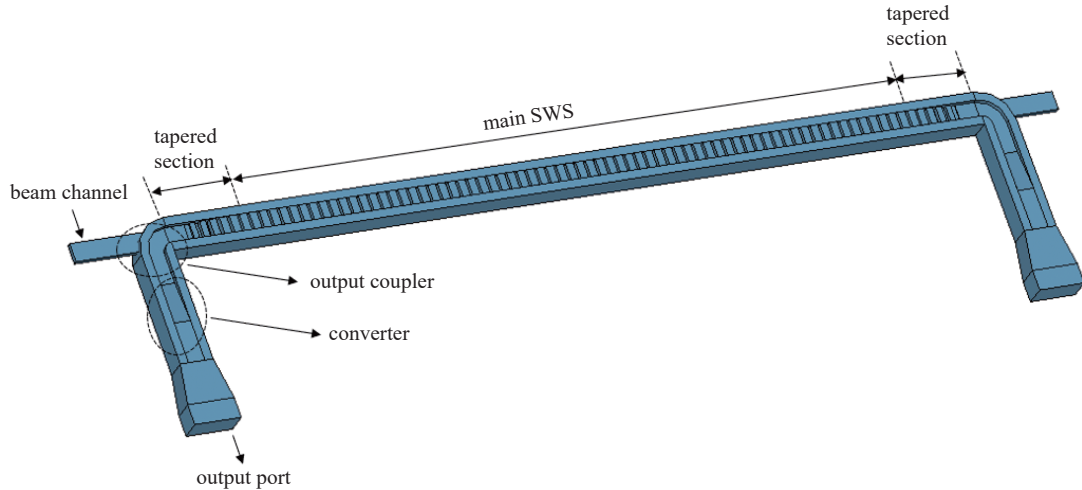


Fig. 5 Time-transient solver calculation model in CST MWS
图 5 CST MWS 中交错双栅脊波导时域求解器模型。

2 PIC 仿真计算

根据前文关于交错双栅脊波导高频特性的计算,可以推测装配该慢波结构的返波振荡器具有较高的输出功率。根据上述的尺寸,利用 CST-Particle Studio 对该返波振荡器进行注-波相互作用的 PIC 仿真计算。采用的带状电子注电压为 14~30 kV, 电流为 10 mA, 电子注的截面积为 $80 \times 15 \mu\text{m}^2$ 。同时,经过探索,得到该交错双栅脊波导慢波结构返波振荡器的起振电流为 4 mA, 而起振管长为 45 个主周期。

以 26 kV 电压下的输出功率为例,经过高性能计算机仿真计算,在 1000 余万网格的精度及 1318397 个粒子的作用下,得到电子能量随纵向位置变化情况如图 7(a) 所示,可以看到,大部分电子能量逐渐减小,转化为高频电磁场的能量。图 7(b) 为 26 kV 电子注电压下的输出功率图,可以看到,在经过 0.75 ns 的注-波相互作用后,输出功率达到了 1.32 W, 且随时间的变化也非常稳定。输出信号经过傅里叶变换得到的频谱图如图 7(c) 所示,工作频率为 1.032 THz, 信号频谱图十分纯净,表明没有杂模的产生。

为更直观地说明交错双栅脊波导返波振荡器的电压调谐性能,选择 14~30 kV 的电压进行仿真计算,此外,电流和均匀磁场保持不变,得到频率随电压变化的趋势如图 8(a) 所示。可以看到,谐振频率随着电压的升高而上升,且在 14~30 kV 电压范围内,该返波振荡器的调谐带宽超过 175 GHz。

在相速度基本一致,且电流及均匀磁场相同的情况下,将该交错双栅脊波导与常规交错双栅返波振荡器的输

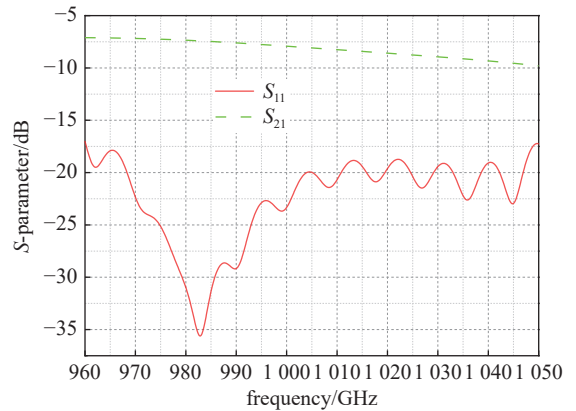
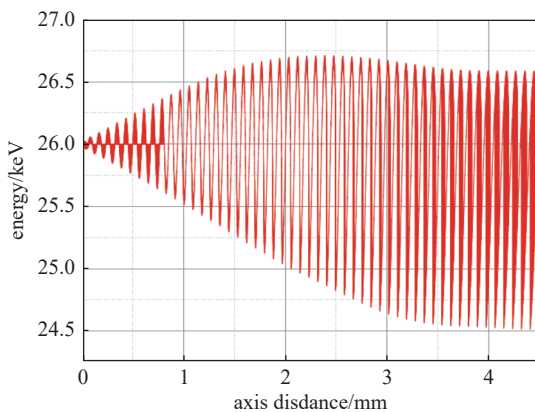
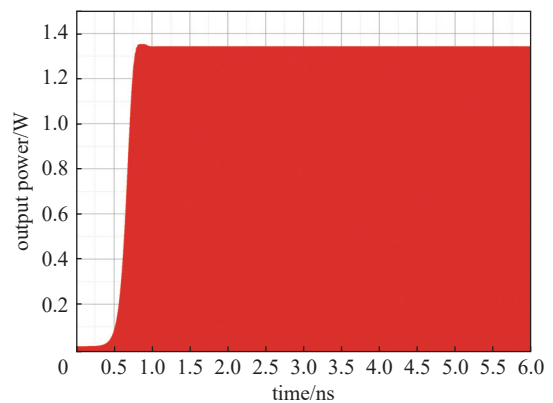


Fig. 6 Transmission properties of RDSG
图 6 交错双栅脊波导的传输特性



(a) electron energy versus longitudinal distance



(b) output power versus time

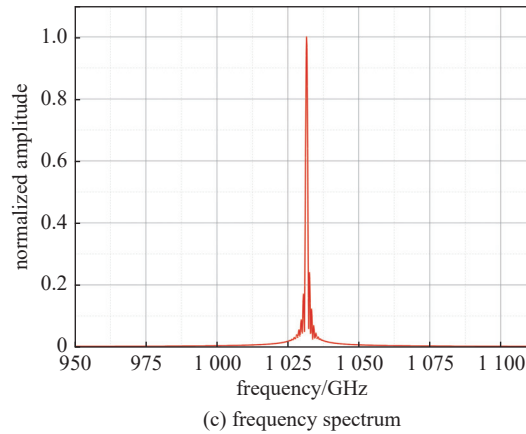


Fig. 7 PIC simulation results of 26 kV beam voltage

图 7 26 kV 电子注电压下 PIC 仿真结果示意图

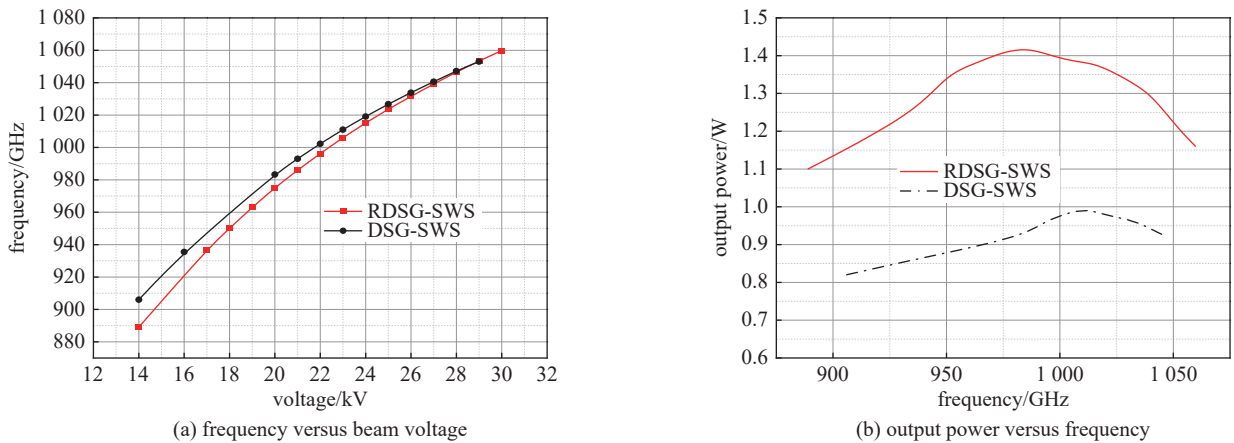


Fig. 8 Frequency versus beam voltage and output power versus frequency of RDSG-SWS and DSG-SWS BWO

图 8 交错双栅脊波导及常规交错双栅返波振荡器的输出功率、起振频率及电压关系示意图

输出功率进行对比,得到的结果如图 8(b)所示。PIC 仿真结果表明,交错双栅脊波导返波振荡器在 0.875~1.05 THz 频段输出功率超过 1.1 W,最大达到 1.42 W,而相同频段下,交错双栅结构返波振荡器的输出功率为 0.82~0.99 W。交错双栅脊波导的整体输出功率比常规交错双栅高,最大功率比后者高出约 42%。

3 结论

本文提出了一种具有高输出功率,宽带宽及易加工特性的新型交错双栅脊波导慢波结构,并研究了该类结构的色散特性、耦合阻抗以及传输特性,同时将该类结构与传统的交错双栅慢波结构进行了对比。结果表明:交错双栅脊波导的“冷”通带带宽明显优于常规交错双栅,且由于其电场在电子注通道处更加集中,所以其耦合阻抗在工作频段内比常规交错双栅更高,应用于返波振荡器时可以拥有更高的输出功率。在 1 THz 频段附近进行了 PIC 仿真计算,结果表明该返波振荡器的可调谐带宽超过 175 GHz,在工作频段内输出功率超过 1.1 W,达到了瓦量级输出功率,比相同工作条件下的常规交错双栅输出功率要提高 34%~42%。本文的研究结果将为研制工作在 1 THz 频段的瓦量级太赫兹振荡源提供一种良好的解决方案。

参考文献:

- [1] 丁耀根,刘濮鲲,张兆传,等. 大功率微波真空电子器件的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(8): 1989-1995. (Ding Yaogen, Liu Pukun, Zhang Zhaochuan, et al. Application of high power microwave vacuum electron devices[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(8): 1989-1995)
- [2] Wang Zhanliang, Zhou Qing, Gong Huarong, et al. Development of a 140-GHz folded-waveguide traveling-wave tube in a relatively larger circular electron beam tunnel[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2017, 31(17): 1914-1923.
- [3] Sudhamani H S, Balakrishnan J, Reddy S U M. Investigation of instabilities in a folded-waveguide sheet-beam TWT[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(10): 4266-4271.
- [4] Tian Yanyan, Yue Lingna, Xu Jin, et al. A novel slow-wave structure—Folded rectangular groove waveguide for millimeter-wave TWT[J]. *IEEE Transactions*

- on *Electron Devices*, 2012, 59(2): 510-515.
- [5] Tian Yanyan, Yue Lingna, Zhou Qing, et al. Investigation on sheet beam folded V-shape groove waveguide for millimeter-wave TWT[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(8): 1363-1368.
- [6] 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.
- [7] Shin Y M, Baig A, Barnett L R, 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.
- [8] 赖剑强. 交错双栅慢波结构的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 69-90. (Lai Jianqiang. Research on applications of staggered double vane slow-wave structure[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 69-90)
- [9] 王海龙, 石先宝, 王战亮, 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)
- [10] 赖剑强, 魏彦玉, 黄民智, 等. W波段交错双栅返波振荡器高频系统[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(9): 2164-2168. (Lai Jianqiang, Wei Yanyu, Huang Minzhi, et al. RF circuit for W-band staggered double vane backward wave oscillator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(9): 2164-2168)
- [11] Baig A, Gamzina D, Barchfeld R, et al. 0.22 THz wideband sheet electron beam traveling wave tube amplifier: cold test measurements and beam wave interaction analysis[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19: 093110.
- [12] Lai Jianqiang, Gong Yubin, Xu Xiong, et al. W-band 1-kW staggered double-vane traveling-wave tube[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, 59(2): 496-503.
- [13] Lu Zhigang, Ding Kesen, Wen Ruidong, et al. Novel double tunnel staggered grating slow wave structure for 0.2 THz traveling wave tube[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, 41(2): 284-287.
- [14] Xu Xiong, Wei Yanyu, Shen Fei, et al. A watt-class 1-THz backward-wave oscillator based on sine waveguide[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19: 013113.
- [15] 张鲁奇, 魏彦玉, 高宇航, 等. G波段正弦波导行波管的设计和研究[C]//2016真空电子学分会第二十届学术年会论文集(上). 2016: 308-311. (Zhang Luqi, Wei Yanyu, Gao Yuhang, et al. Design and study of G-band sine waveguide traveling wave tube[C]//Proceedings of the 20th Annual Conference of Vacuum Electronics Branch (Part 1). 2016: 308-311)
- [16] Zhang Luqi, Wei Yanyu, Wang Bing, et al. Investigation of 0.38 THz backward-wave oscillator based on slotted sine waveguide and pencil electron beam[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 033111.
- [17] Yang Ruichao, Xu Jin, Yin Pengcheng, et al. Study on 1-THz sine waveguide traveling-wave tube[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(5): 2509-2514.